

令和3年度原子力規制庁委託研究成果報告書

原子力施設等防災対策等委託費  
(火山性地殻変動と地下構造及び  
マグマ活動に関する研究) 事業

京都大学防災研究所

令和4年3月

本報告書は、原子力規制委員会原子力規制庁からの委託により実施した事業の成果をとりまとめたものです。

本報告書に関する問い合わせは、原子力規制庁までお願いします。

## 目次

1. 令和3年度事業の委託研究の内容と成果の概要	1
(1) 活動的カルデラ火山の地下構造調査	1
(1) 1. 始良カルデラにおける地震観測による地殻構造調査	1
(1) 2. 始良カルデラにおける長期連続反射法の有効性の検討	4
(2) 活動的カルデラ火山の火山性地殻変動とマグマ活動に関する調査	6
(2) 1. 始良カルデラの火山性地殻変動データの蓄積	6
(2) 2. 始良カルデラにおける海底地盤変動観測の検討	8
(3) 活動的カルデラのシミュレーションモデルによる火山性地殻変動の検討	9
2. 研究報告	12
(1) 活動的カルデラ火山の地下構造調査	12
(1) 1. 始良カルデラにおける地震観測による地殻構造調査	12
(1) 2. 始良カルデラにおける長期連続反射法探査の有効性の検討	53
(2) 活動的カルデラ火山の火山性地殻変動とマグマ活動に関する調査	69
(2) 1. 始良カルデラの火山性地殻変動データの蓄積	69
(2) 2. 始良カルデラにおける海底地盤変動観測の検討	103
(3) 活動的カルデラのシミュレーションモデルによる火山性地殻変動の検討	167
(3) 1. 実施内容	167
(3) 2. 研究成果	167
(3) 3. まとめ	180
(4) 委員会等の開催	186
(4) 1. 第1回外部評価委員会の内容の要点	186
(4) 2. 第2回外部評価委員会の内容の要点	187

## 図表目次

図 1-1.	本項目を構成する小項目とその適用範囲.....	1
図 1-2.	トモグラフィ解析のロードマップ.....	3
図 1-3.	レシーバ関数解析ロードマップ.....	4
図 1-4.	長期連続反射法の検討 ロードマップ.....	5
図 1-5.	始良カルデラの火山性地殻変動データの蓄積 ロードマップ.....	6
図 1-6.	始良カルデラにおける海底地盤変動観測の検討ロードマップ.....	8
図 1-7.	シミュレーションモデルによる火山性地殻変動の検討ロードマップ.....	10
図 1-8.	モデル手法の棲み分け.....	10
図 1-1-1.	臨時地震観測点分布.....	12
表 1-1-1.	臨時地震観測のデータ回収およびバッテリー交換実施日.....	13
図 1-1-2-1.	地震波トモグラフィ解析に使用した地震観測点.....	14
図 1-1-2-2.	2008 年人工地震探査の発破点 (黄色) と地震観測点 (白○と青○) の分布..	15
図 1-1-2-3.	解析に使用した 383 イベントの震源分布図.....	16
図 1-1-2-4.	3 次元トモグラフィ解析の流れ.....	17
表 1-1-2-2.	初期構造となる 1 次元速度構造 (Ono et al., 1978 を参考).....	18
図 1-1-2-5.	深さ 1 km、5 km、10 km、15 km、20 km におけるチェッカーボードテスト結果 .....	19
図 1-1-2-6.	深さ 1 km、5 km、10 km、15 km における P 波、S 波速度およびその比.....	21
図 1-1-2-7.	始良カルデラ中心付近を通る東西 (左)、南北 (右) 断面の P 波、S 波およびそ の比.....	22
図 1-1-2-8.	低速度異常域内のメルト概念図.....	23
図 1-1-2-9.	深さ 15 km、20 km、25 km における P 波、S 波速度およびその比.....	25
図 1-1-2-10.	始良カルデラ周辺の P 波、S 波速度構造の鉛直断面図.....	26
図 1-1-2-11.	深さ 0km、4.5km、9 km、13.5 km、18km、22.5km における P 波、S 波速度およ びその比.....	28
表 1-1-2-3.	十分な地震波線数を得るためのグリッドサイズ.....	29
図 1-1-3-1.	レシーバ関数を追加した地震観測点の分布 (+)。灰色で示す 2 観測点、ST08 と ST10 については、波形データに問題があり、レシーバ関数を追加できなかった。.	45
図 1-1-3-2.	観測点 BEN におけるレシーバ関数の R 成分の波形。(左図) 到来方向に並べた 個々の波形。(右図) 到来方向の 10° ごとに±10° の範囲に入るレシーバ関数を重合し た波形。左図と右図で到来方向の並べ方が逆であることに注意すること。.....	46
図 1-1-3-3.	観測点 SHN におけるレシーバ関数の R 成分の波形。(左図) 短周期地震計の波 形データから求められたレシーバ関数。(右図) 広帯域地震計の波形データから求めら れたレシーバ関数。.....	47
図 1-1-3-4.	観測点 FUK におけるレシーバ関数の R 成分の重合波形。(左図) 短周期地震計 の波形データから求められたレシーバ関数。(右図) 広帯域地震計の波形データから求 められたレシーバ関数。.....	48

図 1-1-3-5	始良カルデラ周辺における深さ 10 km から深さ 35 km までの深さ 5 km ごとの レシーバ関数イメージ。+はレシーバ関数イメージングに用いた観測点の位置を示す。 黒丸は通常の地震を、白丸は深部低周波地震を示す。.....	49
図 1-1-3-6	傾斜する速度不連続面で屈折する P 波の波線（青線）を示す模式図。赤線は速 度不連続面の法線。緑線は地表から下した垂線。.....	50
図 1-1-3-7	福山（FUK）観測点において、広帯域地震計と短周期地震計から得られたレシ ーバ関数に違いがみられる地震の 3 成分波形例。（左図）伝達関数補正後の短周期地震 計の 3 成分波形。（右図）広帯域地震計の 3 成分波形。.....	51
図 1-2-1.	ロードマップ.....	53
図 1-2-2.	観測波形の構成要素.....	54
図 1-2-3.	発振点(Shot point)と速度計観測点 SUM1、加速度計観測点 SUMK1 の位置関係 (京都大学防災研究所、2021) .....	55
図 1-2-4.	振源直近で得られた近傍観測波形の例.....	56
表 1-2-1.	令和 2 年度実験における発振条件の組み合わせ.....	56
図 1-2-5.	観測点 SUM1 で得られた観測波形（地動速度波形）。発振条件に依存する波形の 変化を示す。各波形左端にはエアガン深度、発振パターン名称、成分名を順に記し、右 端には最大振幅（cm/s）、エアガンチャンバ容量（cui）、エアガン作動圧(psi)を示す。 .....	57
図 1-2-6.	観測点 SUMK1 で得られた観測波形（加速度波形）。各波形左端にはエアガン深 度、発振パターン名称、成分名を順に記し、右端には最大振幅（cm/s）、エアガンチャ ンバ容量（cui）、エアガン作動圧(psi)を示す。.....	58
図 1-2-7.	近傍観測点(SUM1-V と SUMK1-V)のパワースペクトル。.....	58
図 1-2-8.	遠方観測点(BKOM3-V)におけるパワースペクトル。.....	59
図 1-2-9.	発振条件 AAA (2550 cui, 2000 psi, 10m)の観測記録のデコンボリユーション結 果。左側は SUM1 3 成分観測記録と等価振源波形切り出し区間を示す。デコンボリユ ーションには SUM1 上下動(V)成分のみを用いた。右側は BKOM5 上下動成分のデコンボリユ ーション結果を示す。識別できる到来相に p~x のラベルをつけた。.....	60
図 1-2-10.	発振条件 AAB (2550 cui, 2000 psi, 6 m)の観測記録のデコンボリユーション結 果。左側は SUM1 3 成分観測記録と等価振源波形切り出し区間を示す。デコンボリユ ーションには SUM1 上下動(V)成分のみを用いた。右側は BKOM5 上下動成分のデコンボリユ ーション結果を示す。条件 AAB では目視による波形終了点の結果は示さない。.....	60
図 1-2-11.	発振条件 BAA (1050 cui, 2000 psi, 10m)の観測記録のデコンボリユーション 結果。左側は SUM1 3 成分観測記録と等価振源波形切り出し区間を示す。デコンボリユ ーションには SUM1 上下動(V)成分のみを用いた。右側は BKOM5 上下動成分のデコンボリユ ーション結果を示す。識別できる到来相に p~x のラベルをつけた。図 1-2-8 と異な る到来相に対して s' , u' のラベルをつけた。.....	61
図 1-2-12.	異なる発振条件から得られた最良のデコンボリユーション結果。デコンボリユ ーションパラメータとともに示す。(a)と(b)はともに発振条件 AAA、パワー積算 99%区	

間のデコンボリューション結果を示すが、“ウォーターレベル”(WL)の値が異なり、 (b)のWL=5%が良い結果を与えることを示している。.....	62
図 1-2-13. 発振条件 AAA (2550 cui, 2000 psi, 10 m) の観測記録のデコンボリューション 結果。左側は SUMK1 3 成分観測記録 (RAW:生波形、3 -10 Hz BPF 波形) と等価振源波形 切り出し区間を示す。デコンボリューションには SUM1K 加速度上下動 (V) 成分のみを用 いた。右側は BKOM5 上下動成分のデコンボリューション結果を示す。.....	63
図 1-2-14. 発振条件 BAA (1050 cui, 2000 psi, 10 m) の観測記録のデコンボリューション 結果。左側は SUMK1 3 成分観測記録 (RAW:生波形、3 -10 Hz BPF 波形) と等価振源波形 切り出し区間を示す。デコンボリューションには SUM1K 加速度上下動 (V) 成分のみを用 いた。右側は BKOM5 上下動成分のデコンボリューション結果を示す。.....	64
図 1-2-21. トリガン (350 cui×3).....	65
図 1-2-22. 圧縮空気供給機材搭載用ポンツーン (a) 平面図、(b) 実物写真。.....	66
図 1-2-23. 住吉池湛水状況 (a) 令和 3 年 8 月 3 日の水位 (水位ゲージ表示 8m)、(b) 令和 3 年 11 月 16 日の水位 (水位ゲージ表示 2m)、(c) 水面アプローチ場所 (令和 3 年 8 月)、(d) 水面アプローチ場所 (令和 3 年 11 月 16 日).....	67
図 2-1-1-1. 始良カルデラ西縁の BM2474 の BM2469 (鹿児島市) に対する相対上下変動およ び桜島の噴火による噴出物量の時間変化.....	69
図 2-1-1-2. GNSS 観測点の位置.....	71
図 2-1-1-3. SVOG を基準点として求めた SNJ2、BNTJ、OSKB および YOSI 観測点の日毎の位置 .....	72
図 2-1-1-4. TKEO 観測点近傍に設置した仮設観測点 (TK02).....	73
図 2-1-1-5. MAKI 観測点近傍に設置した仮設観測点 (MAK2).....	73
図 2-1-1-6. KIHR 観測点の機器設置状況.....	74
図 2-1-1-7. SVOG を基準点として求めた KIHR 観測点の日毎の水平位置 (左、座標系は 2 系) および楕円体高 (右).....	75
図 2-1-1-8. KGFP 観測点の機器設置状況.....	75
図 2-1-1-9. SVOG を基準点として求めた KGFP 観測点の日毎の水平位置 (左、座標系は 2 系) および楕円体高 (右).....	76
図 2-1-1-10. 桜島北部の GNSS 新観測点の機器設置状況.....	77
図 2-1-1-11. 中ノ島 (NAKN) における GNSS キャンペーン観測の機器設置状況.....	77
図 2-1-1-12. キャンペーン観測による NAKN (黒丸) の上下変動 電子基準点 960719 (青 丸)、FUTG (白丸、灰色の点は連続観測) をあわせて示した。.....	77
図 2-1-1-13. 2017 年-2021 年の GNSS 観測点の位置の時間変化 (基準点: 電子基準点 950487)。各観測点の日々の位置の南北 (青色)、東西 (赤色)、上下 (茶色) 成分とそ れぞれの 365 日移動平均。値は相対値でそれぞれ北、東、上が正の値をとる。TKA2 お よび TOG2 はそれぞれ TKAE および TOGO を移設したもので移設前後の差分を補正してい る。	78

図 2-1-1-14	GNSS 基線解析による 2019 年-2020 年の GNSS 観測点の水平変位 (左) および 上下変位 (右)。電子基準点 950487 を固定点として求めたもの。見やすさのため桜島内 の観測点の一部を省略した (以降の図も同様)。	81
図 2-1-1-15	GNSS 基線解析による 2019 年-2020 年の GNSS 観測点の水平変位 左図: テクト ニックな変動を補正する前の変位 (黒矢印、図 2-1-1-15 に示したものと同一) および 三次多項式近似によるテクトニックな水平変位 (赤矢印)。 右図: テクトニックな広域 地殻変動の影響を除去した GNSS 観測点の水平変位	82
表 2-1-2-1	GNSS キャンペーン観測の実施期間と連続観測点をあわせた観測点数	83
表 2-1-2-2	GNSS キャンペーン観測による圧力源の位置と体積変化	84
図 2-1-2-1	水準測量による上下変位 (2019 年 11 月-2020 年 11 月)	85
図 2-1-2-2	GNSS 観測による水平変位と水準測量による上下変位を統合した圧力源解析結 果。黒矢印: 変位の観測値、赤矢印: モデルから予測される変位、A: 始良カルデラ下 の圧力源の位置、S: 桜島南岳直下の圧力源の位置、灰色の楕円内の観測値を圧力源解 析に使用した	86
表 2-1-2-3	圧力源解析で得られた圧力源位置と体積増加量 南岳直下の圧力源の水平位置 は固定	87
図 2-1-2-3	MAKI-YOSI 間の水平距離 (m)	88
図 2-1-3-1	鹿児島県による降灰観測点の分布 (鹿児島県、2021 を改変)	89
表 2-1-3-1	鹿児島県による降灰量調査結果	91
図 2-1-3-2	鹿児島県の降灰観測点における月別降灰量と南岳からの距離の関係 (2021 年 3 月)	92
図 2-1-3-3	桜島から放出された月別推定総降灰量とその累積値 (1978 年 6 月以降)	92
図 2-1-3-4	GNSS 観測点 MAKI と YOSI の間の水平距離の時間変化 (m) 右下に MAKI、YOSI および体積変化量の算出に用いた圧力源の位置 (赤丸) を示す。	93
図 2-1-3-5	始良カルデラの中央部の圧力源へのマグマ供給量の時間変化 火山灰放出量を 体積に換算する際の密度を $2500\text{kg}/\text{m}^3$ および $1000\text{kg}/\text{m}^3$ とした場合のマグマ供給量につ いて示す。圧力源における体積変化および月別火山灰放出量 (縦棒) も合わせて示し た。	94
図 2-1-3-6	有限要素法モデルを用いた回転楕円体形圧力源による変位 (圧力源の中心の深 さ 11.2km、水平半径 500m) と圧力源の節点分布 (2 つの圧力源を通る鉛直断面)	95
図 2-1-3-7	地表変位の観測値と有限要素法モデルによる計算値の残差二乗和と圧力源の縦 横比の関係 (圧力源の中心の深さ 11.2 km、水平半径 500 m、表層地形あり)	96
図 2-1-3-8	有限要素法モデルによる圧力源の体積変化量と縦横比の関係 (圧力源の中心の 深さ 11.2 km、水平半径 500 m、表層地形あり)	96
表 2-1-3-2	有限要素モデルで使用した剛性率	97
図 2-1-3-9	地表変位の観測値とモデル計算による予測値の比較 (左: 水平変位、右: 上下 変位) 横軸は始良カルデラ下の圧力源中心からの水平距離。観測値 (黒点) の水平 変位は GNSS 測位、上下変位は水準測量によるもの。白丸は茂木モデル ((圧力源の深さ	

11.2 km、体積変化量 $15.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ ) による予測値。黄・青・赤の丸は有限要素法モデル（圧力源の上端の深さ 13.6km、水平半径 2000m、表層地形あり、水平成層構造）で圧力源の縦横比をそれぞれ 0.5、2、3 にした時の予測値。 .....	97
図 2-1-3-10 地表変位の観測値と有限要素法モデルによる計算値の残差二乗和と圧力源の縦横比の関係（圧力源の上端の深さ 13.6 km、水平半径 2000 m、表層地形あり、水平成層構造） .....	98
図 2-1-3-11 有限要素法モデルによる圧力源の体積変化量と縦横比の関係（圧力源の上端の深さ 13.6 km、水平半径 2000 m、表層地形あり、水平成層構造） .....	98
図 2-2-1. 本項目のロードマップ .....	103
表 2-2-1-1. 令和 3 年度設計の改良点 .....	104
図 2-2-1-1. 海底地盤変動観測装置全体図 .....	105
図 2-2-1-2. GNSS アンテナ配置図 .....	106
図 2-2-2-1. 海底地盤変動観測装置設置予定場所 (a)は始良カルデラ内の位置を示し、(b)は(a)図赤枠内を拡大して示す。a1 が定置予定場所（北緯 31 度 37 分 46 秒緯線 東経 130 度 42 分 55 秒経線 北緯 31 度 37 分 50 秒緯線 東経 130 度 43 分 07 秒経線で囲まれる海域）である。水深データは海上保安庁による。 .....	108
表 2-2-2-1. 海底地盤変動観測装置設計用環境 .....	109
図 2-2-2-2. ADCP の原理 (Teledyne RD, 2011) .....	110
図 2-2-2-3. 海況観測における定点観測地点。水深は海上保安庁提供のデータを用いた。 .....	111
図 2-2-2-4. 定点観測機器 .....	111
図 2-2-2-5. 定点観測における機器定置方法 .....	112
図 2-2-2-6. 定点観測期間中の潮位変動。(a)夏季、(b)冬季 .....	113
表 2-2-2-2. 平均流速分布。左表：夏季、右表：冬季 .....	114
図 2-2-2-7. 設置予定地点における平均流速分布。右図：夏季、左図：冬季を示す。 .....	115
図 2-2-2-8. 設置予定地点における流向流速の傾向。(a)夏季、(b)冬季。 .....	116
図 2-2-2-9. 流向流速深度分布時系列。(a)夏季小潮期、(b)夏季大潮期、(c)冬季小潮期、(d)冬季大潮期 .....	118
図 2-2-2-10. 曳航調査計画 .....	119
図 2-2-2-11. 曳航調査機材 .....	120
図 2-2-2-12. 曳航調査軌跡と流向流速ベクトル。(a)夏季曳航観測、(b)冬季曳航観測を示す。軌跡は 10 m 移動平均結果を示す。 .....	121
図 2-2-2-13. 夏季絶対流速分布 .....	123
図 2-2-2-14. 冬季絶対流速分布 .....	124
表 2-2-2-2. 分潮の種類 .....	125
図 2-2-2-15. モデル潮流と観測潮流値 .....	127
図 2-2-2-16. 冬季観測期間中における日別平均風速および風向。風向 0 度は北方位を表し、正の値は北から時計回り方向、負の値は反時計回り方向を表す。 .....	128

図 2-2-2-20	気象観測点 SZKM .....	129
図 2-2-2-21	日別風速データ。2021/9/15 から 2022/2/2 まで .....	130
図 2-2-2-22	風向分布 2021/9/15 から 2022/2/2 までの 10 分ごとの平均を使用した。 N=16403。 .....	131
図 2-2-2-23	観測点 SZKM における平均風速と気象庁鹿児島観測点における平均風速。破 線は近似直線を示す。 .....	132
図 2-2-2-24	2022/1/7 0:00~2022/1/12 0:00 までの風向風速 .....	133
図 2-2-2-25	日別気温データ。2021/9/15 から 2022/2/2 まで .....	133
図 2-2-2-26	気象庁鹿児島観測点と観測点 SZKM における日別平均気温の比較 .....	134
図 2-2-2-27	日別湿度データ。2021/9/15 から 2022/2/2 まで .....	135
図 2-2-2-28	気温及び湿度の日周変化例 (2022/1/7 0:00 ~2022/1/12 0:00) .....	135
図 2-2-2-29	筐体温度とバッテリー電圧 .....	136
図 2-2-2-31	採泥調査位置 .....	137
表 2-2-2-4	室内土質試験結果の概要 .....	139
図 2-2-2-32	各地点の粒径加積曲線 .....	139
図 2-2-3-1	1 軸実験台 .....	140
図 2-2-3-2	2 軸実験台 無風時平衡状態で D 側下がり 8 度。 .....	141
表 2-2-3-1	1 年間測位データ解析結果の比較 .....	142
図 2-2-3-3	常設 GNSS 観測点における Kinematic 解析結果 (左列) と Static 解析結果 (右 列) の時系列 .....	142
図 2-2-3-4	常設 GNSS 観測点における Kinematic 解析結果 (左列) と Static 解析結果 (右 列) の測位値分布 .....	143
表 2-2-3-2	アンテナ台運動速度の推定 .....	144
図 2-2-3-5	1 軸実験台 .....	145
図 2-2-3-6	OEM-7 Model OEM7720 受信機の内部構成 (NovAtel, 2021 より引用)。 .....	146
図 2-2-3-7	1 軸実験処理流れ図 .....	146
図 2-2-3-8	1 軸実験台の構成 .....	147
図 2-2-3-9	傾斜運動の 1 周期分の補正結果 (2021/10/12) .....	148
図 2-2-3-10	アンテナ Pr と傾斜補正結果 X0 .....	149
図 2-2-3-11	アンテナ速度対補正結果 .....	150
図 2-2-3-12	GNSS アンテナと回転軸との位置関係 .....	151
図 2-2-3-13	2 軸実験台 .....	152
図 2-2-3-14	2 軸実験台 4 アンテナ実験データ処理の流れ .....	153
図 2-2-3-15	アンテナアレイを用いた傾斜補正アルゴリズムの概念 .....	155
図 2-2-3-16	ベクトル EF の導出 .....	158
図 2-2-3-17	測位結果および傾斜補正結果時系列 (水色: XF, YF, ZF) 例。基準点 SNYM (実験台から 3.4 km) .....	159

図 2-2-3-18	観測点 SZKM (新島 ; 黒神実験台から北北東約 3.5km の地点) における実験期間中の風向風速 .....	160
図 2-2-3-19	2022 年 1 月 11 日の測位結果及び傾斜補正結果 (水色: XF, YF, ZF)、傾斜角。基準点 SNYM(実験台から 3.4km)。 .....	160
図 2-2-3-20	アンテナ A の測位結果分布と測位点 F の推定結果 (図 2-2-3-18, 2-2-3-19 と同時時間帯) .....	161
図 2-2-3-21	アンテナ A による各成分の測位結果分布 .....	162
図 2-2-3-22	測位点 F の各座標値分布 .....	162
表 2-2-3-3	アンテナアレイによる測位点 F 測位結果(基準点 KURG 距離約 24m) .....	163
表 2-2-3-4	アンテナアレイによる測位点 F 測位結果 (基準点 SNYM 距離約 3.4 km) ...	163
図 3-1.	調査地域の位置図。(三角): 桜島火山、(赤点線): 始良カルデラの縁 (Uto et al., 1997)、(青丸): 水準点、(緑四角): GNSS 点。 .....	168
図 3-2.	(a) 弱化係数 $f$ の空間分布。 $\Theta = 1$ km、 $\Omega = 5$ km の場合。(b) 弱化係数 $f$ の水平変化: (赤) $\Omega = 0.25$ km、(青) $\Omega = 0.5$ km、(緑) $\Omega = 1$ km、(紫) $\Omega = 2.5$ km、(橙) $\Omega = 5.0$ km、(水色) $\Omega = 10$ km。(c) 弱化係数 $f$ の鉛直変化: (赤) $\Theta = 0.25$ km、(青) $\Theta = 0.5$ km、(緑) $\Theta = 1$ km、(紫) $\Theta = 2.5$ km、(橙) $\Theta = 5.0$ km、(水色) $\Theta = 10$ km。 .....	170
図 3-3.	変動源モード M1 に対する粘弾性挙動 (鉛直変位 $u_z$ ): 弾性モデル挙動 $u_{ze}$ からの違い、i. e., $\zeta = u_z - u_{ze}$ を図示。(a-c) $\Theta = 1$ km、(d-f) $\Theta = 10$ km。 $R =$ (a, d) 0 km、(b, e) 6.74 km、(c, f) 13.92 km。(赤) $\Omega = 0.25$ km、(青) $\Omega = 0.5$ km、(緑) $\Omega = 1$ km、(紫) $\Omega = 2.5$ km、(橙) $\Omega = 5.0$ km、(水色) $\Omega = 10$ km。 ...	172
図 3-4.	変動源モード M2 に対する粘弾性挙動 (鉛直変位 $u_z$ ): 弾性モデル挙動 $u_{ze}$ からの違い、i. e., $\zeta = u_z - u_{ze}$ を図示。(a-c) $\Theta = 1$ km、(d-f) $\Theta = 10$ km。 $R =$ (a, d) 0 km、(b, e) 6.74 km、(c, f) 13.92 km。(赤) $\Omega = 0.25$ km、(青) $\Omega = 0.5$ km、(緑) $\Omega = 1$ km、(紫) $\Omega = 2.5$ km、(橙) $\Omega = 5.0$ km、(水色) $\Omega = 10$ km。 ...	173
図 3-5.	LVZ モデルと UNV モデルの振る舞い。(a, b, c) 変動源モード M1 に対する粘弾性挙動 (鉛直変位 $u_z$ ): 弾性モデル挙動 $u_{ze}$ からの違い、i. e., $\zeta = u_z - u_{ze}$ を図示。(d, e, f) 変動源モード M2 に対する粘弾性挙動 (鉛直変位 $u_z$ ): 弾性モデル挙動 $u_{ze}$ からの違い、i. e., $\zeta = u_z - u_{ze}$ を図示。(赤実線) $\Theta = 1$ km、 $\Omega = 5$ km の LVZ モデル、(青実線) $\eta = \eta_0 = 10^{20}$ Pa s の UNV モデル、(点線) $\eta = \eta_a$ の UNV モデル、ここで $\eta_a$ は LVZ モデルの振る舞いとの違いを最小にするのに必要な UNV モデルの粘性率で、 $\Delta t =$ (緑点線) $0.1 \tau_0$ 、(紫点線) $0.5 \tau_0$ 、(橙点線) $\tau_0$ の期間で両者の違いを最小にしている。 .....	174
図 3-6.	変動源の中心からの距離に依存した有効弱化係数 $f_e$ 。LVZ モデルと $\eta = \eta_a$ の UNV モデルの違いは、地表面鉛直変位の振る舞いについて $\Delta t = 0.5 \tau_0$ の期間で最小化している。 $\Theta =$ (a, b) 0.1 km、(c, d) 1 km、(e, f) 10 km。変動源モードは(a, c, e) M1、(b, d, f) M2 である。(赤) $\Omega = 0.25$ km、(青) $\Omega = 0.5$ km、(緑) $\Omega = 1$ km、(紫) $\Omega = 2.5$ km、(橙) $\Omega = 5.0$ km、(水色) $\Omega = 10$ km。 .....	175

図 3-7.  $\Theta$  と  $\Omega$  に依存した有効弱化係数  $f_e$ 。変動源モードは(a, c, e) M1 と(b, d, f) M2。LVZ モデルと  $\eta = \eta_a$  を持つ UNV モデルの振る舞いとの違いは  $\Delta t =$  (a, b)  $0.1 \tau_0$ 、(c, d)  $0.5 \tau_0$ 、(e, f)  $\tau_0$  の期間で最小化されている。また、最小化はモデルの中心での地表面鉛直変位の弾性成分からの逸脱分： $\zeta = u_z - u_{ze}$  を用いておこなわれている。..... 177

図 3-8.  $\Theta$  と  $\Omega$  に依存した有効弱化係数  $f_e$ 。変動源モードは(a, c, e) M1 と(b, d, f) M2。LVZ モデルと  $\eta = \eta_a$  を持つ UNV モデルの振る舞いとの違いは  $\Delta t =$  (a)  $\tau_0$ 、(b)  $0.2 \tau_0$  の期間で最小化されている。また、最小化は BM2474 における BM2469 に対する相対地表面鉛直変位の弾性成分から逸脱分： $\zeta = u_z - u_{ze}$  を用いておこなわれている。赤丸は、 $(\Theta, \Omega) = (0.63 \text{ km}, 2.5 \text{ km})$ 、 $(1 \text{ km}, 1 \text{ km})$ 、 $(2.5 \text{ km}, 0.63 \text{ km})$  の 3 モデルを示す。..... 178

図 3-9: 測地データから制約された LVZ モデルの振る舞い：(a) 変動源の膨張率  $\Omega$ 、(b) 1914 年噴火以降の変動源の累積体積  $\Delta V$ 、(c) BM2474 における BM2469 に対する相対隆起量。LVZ モデルは、(赤)  $\Theta = 0.63 \text{ km}$ 、 $\Omega = 2.5 \text{ km}$ 、(青)  $\Theta = 2.5 \text{ km}$ 、 $\Omega = 0.63 \text{ km}$ 、(緑)  $\Theta = \Omega = 1 \text{ km}$ 、(灰) 弾性モデル。(紫) Iguchi et al. (2019) による噴出量の時間変化。..... 179



## 1. 令和3年度事業の委託研究の内容と成果の概要

### (1) 活動的カルデラ火山の地下構造調査

本項目は本プロジェクトにおける研究の骨格を与える項目である。自然地震観測による地殻構造調査と人工地震観測による地下構造変化の検討とが含まれている。自然地震観測による地殻構造調査は地下を通過する地震波の属性から地下物性の空間的分布の把握が可能な特性があり、始良カルデラの地下構造を構成する物性の空間分布に関する観測量を提供する。また人工地震観測を用いた活動的カルデラ火山の地下におけるマグマ活動による物性の時間変化の検出手法についても、始良カルデラをテストフィールドとして検討を加える。

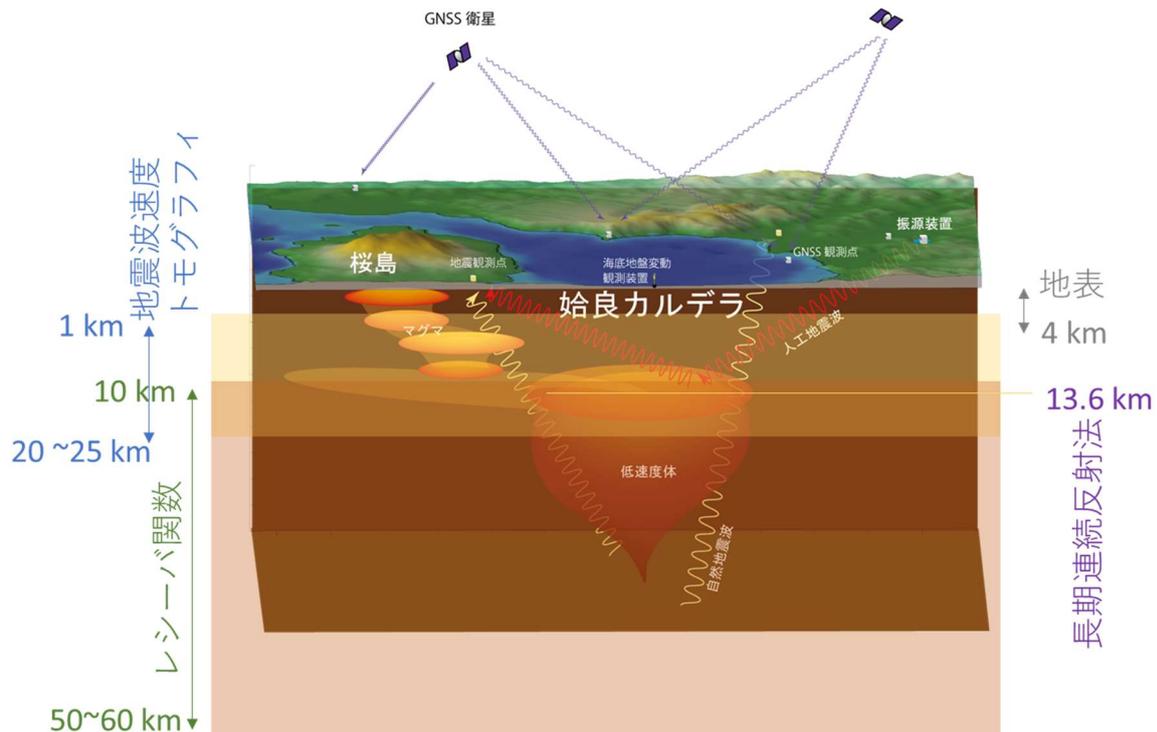


図 1-1. 本項目を構成する小項目とその適用範囲

#### (1) 1. 始良カルデラにおける地震観測による地殻構造調査

本項目では地震波走時トモグラフィ（以下、地震波トモグラフィ）とレシーバ関数を組み合わせて用いて始良カルデラの地震波速度構造を解明することによって、現時点での始良カルデラの地下のマグマだまりの広がり把握し大規模噴火ポテンシャルの評価の基礎データを得ることを狙っている。

地震波トモグラフィは近地地震波のP波初動到来時刻およびS波初動到来時刻の観測値から、これらの初動が伝播してきた経路上の地震波速度分布を得る手法であり、データとして用いた波長より大きなスケールの地震波速度分布を与える。また、レシーバ関数は地表で得られた遠地地震波記録に含まれるPs変換波の走時と振幅との観測値から、地震波が伝播してきた経路上の地震波速度境界面の分布と境界面のコントラストの強さとを得る手法であり、その分解能はおおよそ用いる地震波波長の1/4程度である。

本項目で用いる地震観測網（観測点間隔 5~20 km, さしわたし約 70 km）の近地地震観測データに地震波トモグラフィを適用した場合には地震波速度構造の描像は海面下 15km を中心とする深さまでの地震波速度の分布が得られる。これに対して、同じ観測網で得られた遠地地震観測記録にレーバ関数解析を適用すると深さ 10 km 以深 5~60 km まで空間的に連続した地下構造イメージが得られる。

トモグラフィは始良カルデラの地下における地震波速度構造の大局的な特徴を示し、地震波速度異常体の大局的な位置と大きさを与える。さらにレーバ関数は S 波速度不連続面を検出することによって地震波速度異常体の境界とその強度を与え、さらにレーバ関数インバージョンによって導かれる S 波速度構造はトモグラフィの結果を検証し補強する情報を与える。本項目ではこの 2 つの手法を組み合わせることで地震波速度異常領域を検出するとともに、その輪郭と内部の地震波速度とを明らかにすることを狙った。

本項目では下記の内容を令和 3 年度に実施した。

- ・地震観測網の維持
- ・地震波トモグラフィによって得られた始良カルデラの 3 次元地震波速度構造の分解能の改良
- ・レーバ関数による始良カルデラ内部の S 波地震波速度構造の推定

令和 3 年度はこれまでに展開された観測点を維持し地震観測を継続してデータ取得を行った。成果としてデータ蓄積は利用可能なレベルに達しており、これらに加えて令和 2 年度に増設した始良カルデラ北部および西部の広帯域地震観測点が順調に稼働することによって始良カルデラ内部を通過する地震波線に対する観測が強化された。

令和 3 年度の地震波トモグラフィでは著しい S 波低速度異常領域が西部始良カルデラ中央部に存在することが明らかになり、深さ 15 km を中心とした低速度領域の体積は最大 255 km<sup>3</sup> と推定された。また当該領域の P 波速度の減少量からメルト分率が約 7% と推定された。大きな S 波速度の減少率からは当該領域内のメルトが結晶化したマグマ内のインクルージョンとして存在する可能性が示唆され、メルト量は先述の総体積からすくなくとも 10~18 km<sup>3</sup> 程度であろうと見積もられた。この成果は為栗他(2022)として論文発表された。令和 3 年度にまとめられた成果は明瞭な結果が得られた深さ 15 km を中心とする S 波低速度領域のみに注目したものであり、今後はより大きな深度へこの低速度領域が連続するかどうかを検証し低速度領域全体の全体の広がり把握する必要がある。

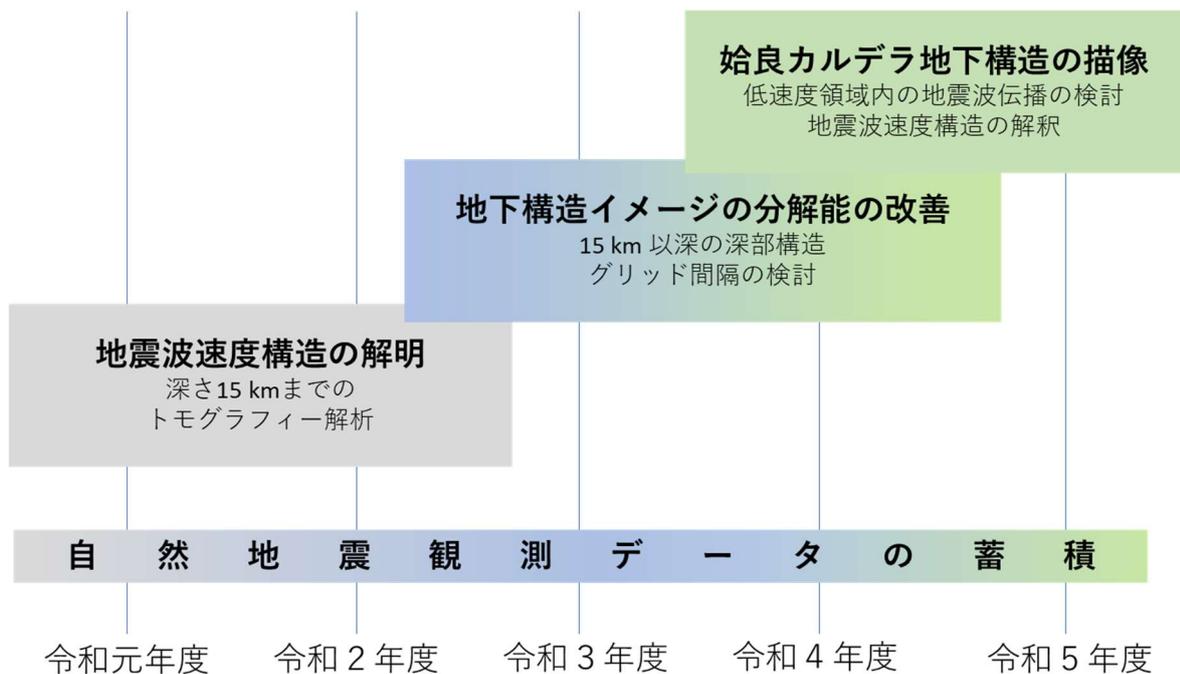


図 1-2. トモグラフィ解析のロードマップ

令和3年度のレシーバ関数解析では既存の観測点で新たに得られた遠地地震データを追加するとともに、始良カルデラ周辺と内部の観測点による解析を追加して始良カルデラ深部のより高い分解能のイメージを得ることに取り組んだ。特に平成31（令和1）年度に始良カルデラ内部に新たに設置された弁天島観測点のデータを追加することによって、カルデラ内部のレシーバ関数イメージの密度が明瞭に改善された。その結果、始良カルデラ全域で深さ20～25 kmで低速度が現れることが平成31（令和1）年度の成果よりも一層明瞭に示された。カルデラ縁辺部の観測記録からは、カルデラ北西部では東方に向かって傾斜する構造の存在と、カルデラ北東部ではカルデラ中央部方向から到来するS波の減衰に周波数依存性の存在とがともに示唆されることも報告された。

現時点では始良カルデラ内部の浅部S波速度構造不連続面のイメージが不十分であるが、今後は前年度の新設点も含めて蓄積された自然地震観測データが追加されることにより、始良カルデラ内浅部のレシーバ関数イメージが補完されてトモグラフィ結果の検証が期待される。また、データのさらなる蓄積により、令和2年度にカルデラ南部の観測点に適用されていた一次元S波速度インバージョンを、カルデラ内およびその周辺部への展開をすることによって地震波トモグラフィ結果の検証に寄与するとともに、これまでに得られた地震波トモグラフィの結果よりさらに深部におけるS波低速度領域の広がり把握することが期待される。

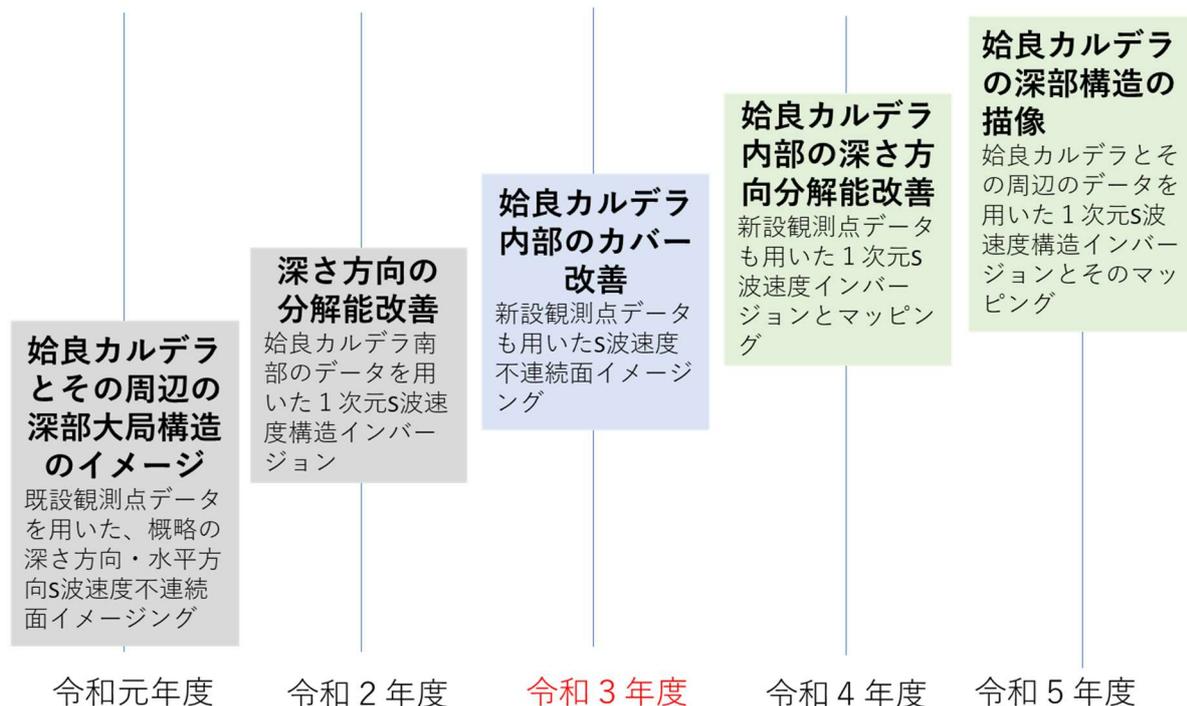


図 1-3. レシーバ関数解析ロードマップ

さらに令和3年度に本委託研究分担者により、始良カルデラ西部の深さ 13.6 km に S 波速度不連続面が存在していることを指摘する論文（筒井他，2021）を発表した。

また、本研究におけるこれまでの地盤変動の観測研究から始良カルデラ地下へのマグマ供給率は  $1 \times 10^{-2} \text{ km}^3$  のオーダーであることが明らかにされた。供給されたマグマが 100% メルトであると仮定するならば、今回推定された低速度領域内のメルト量は始良火砕噴火の DRE 換算噴出物体積の 1/10 程度で、1000~2000 年分の蓄積に相当する。Geshi et al. (2020) は 2 万 9 千年前の始良火砕噴火でそれ以前に蓄積された流紋岩質マグマが全て排出されて、現在は別の新たな流紋岩質マグマの蓄積を示唆するモデルを提唱した。このモデルも考慮すると、顕著な S 波低速度領域として指摘された領域の外側の構造も考慮してメルト総量を検討する必要がある。また、後述の地盤変動力源モデルの検討結果も考慮して始良カルデラ直下における地震波伝播を検討し、S 波低速度領域内部の物性の手がかりを得る必要もある。

後年度ではひきつづき 3 次元地震波伝播速度トモグラフィ解析と遠地地震波の観測によるレシーバ関数解析を行い、始良カルデラの深部の地下構造モデルを高精度化し、始良カルデラ下の S 波低速度領域の広がりとその内部の地震波伝播の詳細について検討を加える。

本項目全体の成果を火山性地盤変動モデルに反映し、地盤変動力源位置とマグマだまりジオメトリとの関係の検討を行い、地球物理学的な始良カルデラの姿の理解を深めてゆく。

#### (1) 2. 始良カルデラにおける長期連続反射法の有効性の検討

本項目では活動的カルデラの地下における火山活動を検出することを目的として、制御振源を用いた能動的な手法である長期連続反射法地震探査の有効性を検討する。長期連続反射法では人工

地震波を用いて、始良カルデラの地下深部のマグマだまりなどで発生する反射地震波／変換反射地震波を観測する。長期連続反射法では自然地震より短い波長の地震波を用い、波長の1/4程度の分解能がある。このことは始良カルデラの地下構造におけるS波低速度体の形状、特にその広がりの上限を先述の自然地震波解析結果よりも高い分解能で制約することが期待される。さらに、長期にわたり継続して繰り返し人工地震観測を実施し、始良カルデラの火山活動に伴う地下構造変化を地震反射波の変化として検出する構想である。

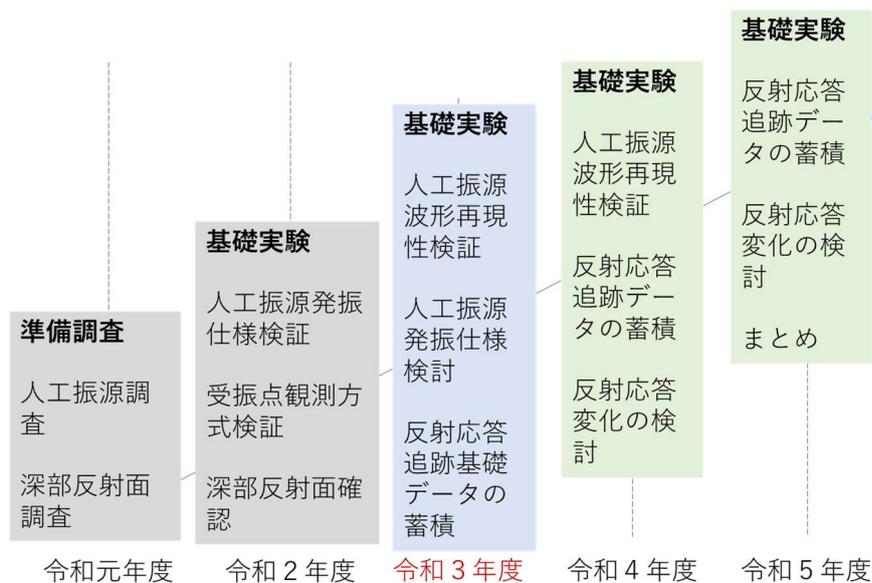


図 1-4. 長期連続反射法の検討 ロードマップ

令和3年度は令和2年度基礎実験の成果を踏まえて仕様を策定したエアガンの調達が実施されたほか、反射応答追跡の基礎として観測記録から振源波形の影響を取り除く手法について検討を行った。

観測記録から振源波形の影響を取り除く手法の検討では、令和2年度に得られた観測波形データを用いた。令和2年度基礎実験では複数の発振パラメータの組み合わせによるエアガン発振が実施されており、発振パラメータの組み合わせが異なると遠方における観測波形も異なる現象が報告されていた。令和2年度基礎実験では振源近傍における水中観測水圧波形および陸上観測による速度波形、加速度波形が得られており、これらを振源波形と等価なものとして扱い検討を行った。その結果、最も良好な結果を得られたのは、振源近傍における速度波形（陸上観測）を等価震源波形として用いた場合であった。このことから、遠方の観測波形に振源波形として直接影響を与えているのはエアガン発振波形そのものではなく、その振源波形に重畳した貯水池全体の応答波形であることが明らかになった。観測波形から振源の影響を取り除くためには、振源近傍の陸上における観測波形を得ることが重要であり、そのための参照観測が必要であることが確認された。

このほか令和3年度は発振作業予定地（始良市住吉池）の予期せぬ湛水不足に遭遇し、基礎実験の実施を見合わせた。

後年度では人工地震波を発振する基礎実験観測を繰り返し行い、振源波形の安定性を検証し地震反射の変化の抽出を試みる。基礎データの蓄積を進める必要から、令和4年度以降の実験の継続が求められる。

## (2) 活動的カルデラ火山の火山性地殻変動とマグマ活動に関する調査

本項目では始良カルデラ地下における現在の火山活動の推移の監視評価を目的として、地盤変動観測に基づいて研究を行うとともに、水没カルデラにおける地盤変動観測のための技術開発を行う。始良カルデラ地下における現在の火山活動の推移の監視評価に関しては始良カルデラの火山性地殻変動データの蓄積に取り組み、GNSS観測データをもとにしてカルデラ地下の体積増加量およびマグマ蓄積量の評価を行うとともに、前述の地下構造研究の成果を反映してより現実に近いモデルの構築を実施することによって現在進行中のマグマ蓄積量の推定精度を高めることに取り組む。水没カルデラにおける地盤変動観測のための技術開発では、始良カルデラ内の海底における地盤変動観測装置の開発に取り組む。

### (2) 1. 始良カルデラの火山性地殻変動データの蓄積

本項目は始良カルデラの地下における火山活動の推移を監視評価することが主な目的である。始良カルデラの地下における火山活動はカルデラ深部へのマグマの供給、カルデラ中央部におけるマグマの蓄積、そしてカルデラ南縁に位置する桜島へのマグマ供給である。これらの地下活動によって生ずる地盤変動を継続的に観測し、始良カルデラ深部におけるマグマ蓄積量および始良カルデラへのマグマ供給量を評価する。

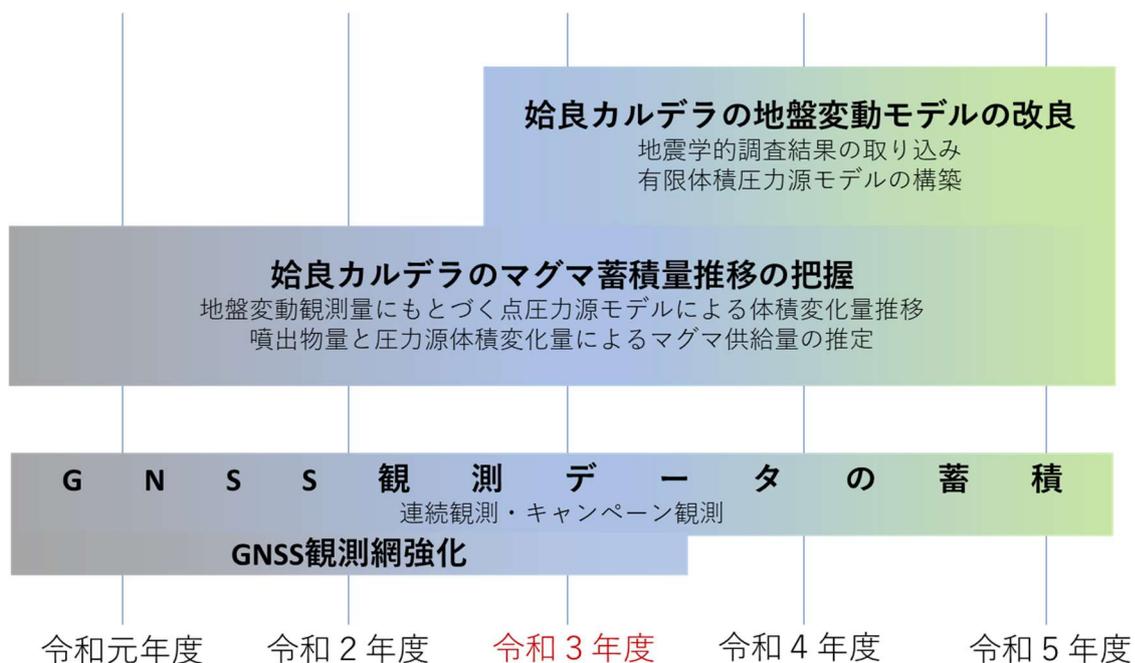


図 1-5. 始良カルデラの火山性地殻変動データの蓄積 ロードマップ

令和3年度は下記の内容を実施した。

- ・GNSS観測の維持継続
- ・4観測点の新設
- ・既設点の機器更新
- ・キャンペーン観測の実施
- ・始良カルデラへのマグマ供給量の推定

GNSS観測点の維持では既存の観測点（常設点および先行事業によってすでに展開された臨時点）と、本事業によって始良カルデラ内部に展開された観測点の維持観測を継続し、データの蓄積を行った。さらに令和3年度は始良カルデラ中央部を囲む基線網の強化と水準測量結果の検証を狙い鹿児島市内の水準点BM2469の近傍に点を新設するとともに、これまで手薄であった始良カルデラ北東側の観測の強化を狙った観測点の新設が実施された。さらに2観測点でキャンペーン観測点の常設化も実施された。またGNSS観測の安定化を狙い観測機器の老朽化が著しい既設観測点8点の機器更新も実施された。令和2年度にひきつづき、令和3年度も始良カルデラ中央部に近接した中ノ島においてキャンペーン観測を実施し、令和2年度に対して6mmの隆起を検出した。また、キャンペーン観測から得られた地殻変動圧力源の位置と深さは始良カルデラの中央部の深さ11kmでこれまでの推定位置とほぼ一致していた。

GNSS連続観測では令和2年度と同じ方法によって広い範囲の始良カルデラの火山性地殻変動の水平成分を抽出することができた。平成29(2018)–令和2(2020)年の期間について先行研究およびキャンペーン観測で得られた結果と整合した結果を得た。

令和3年度の研究対象とした期間では始良カルデラ直下と桜島南岳直下にそれぞれ圧力源を仮定することで、対象となる期間の地殻変動量を矛盾なく説明することができた。始良カルデラへのマグマ供給量の推定も実施した。令和3年度はその前年度より降灰が少なく、圧力源の体積増加の寄与が大きかった。細かく見てゆくと令和2年7月頃まで $9\sim 10\times 10^6$  m<sup>3</sup>/年の割合でマグマが供給されていたが、その後供給速度がやや鈍っているようにみえた。ひきつづく令和3年4月以降は $10\times 10^6$  m<sup>3</sup>/年の割合に戻っている。したがって令和3年度も始良カルデラのマグマだまりに大きな変化はなかったといえるであろう。

令和3年度は地震学的構造研究の知見を反映して有限体積力源による地盤変動のモデルを構築し、水平変動量と上下変動量とともに整合的に説明できる有限体積圧力源の位置と形状を検討した。

有限体積圧力源の位置と形状の検討では、次の3つのことが明らかになった。1) 有限体積力源の縦横比が大きくなるほど大きな地表変位がカルデラ中央部に集中ようになること。2) 圧力源を垂直方向に軸をもつ縦長の回転楕円体として与えると、扁平な回転楕円体の形状の圧力源の場合よりも観測値をよく説明する結果が得られ、縦軸が赤道半径の約1.5倍以上の領域では縦横比を変えても観測値とモデル値との差の変化はわずかであること。3) 地震学的知見から導いた剛性率構造および圧力源領域の上限（深さ13.6km）を与えたモデルは、均質弾性体中に深さ11kmを中心とする点圧力源を与えたものよりも約半分の体積変化で観測値をよく説明する結果が得られた。

ここまでの観測で始良カルデラの地下へのマグマ供給率は時期によって1割程度の揺らぎがあることが明らかにされ、有限体積力源モデルの検討ではマグマ供給率のうち7～9割を占める圧力源の体積変化量の見積が力源モデルに与えた形状によって約2倍異なる可能性が指摘された。後年度も令和3年度までに得られた始良カルデラの地下構造に関する最新の知見を導入して、ひきつづき水平変動量と上下変動量とともに整合的に説明できる有限体積圧力源の位置と形状を検討するとともに、圧力源モデルの改良により始良カルデラの地下深部におけるマグマ供給量の推移を再検討する。

## (2) 2. 始良カルデラにおける海底地盤変動観測の検討

本項目では、始良カルデラ内の海底における地盤変動観測デバイスの開発に取り組む。

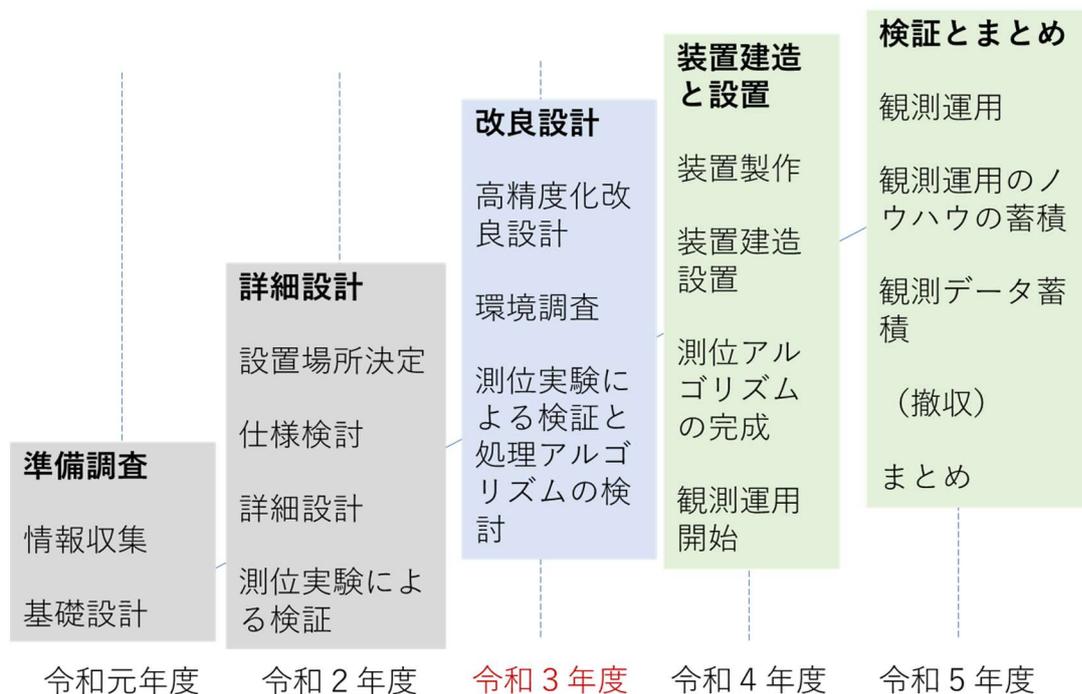


図 1-6. 始良カルデラにおける海底地盤変動観測の検討ロードマップ

令和3年度に実施した項目を下に列挙する。

- ・海底地盤変動装置の改良設計
- ・海底地盤変動装置設置予定点の環境調査
- ・海底地盤変動観測装置の測位実験

令和2年度の詳細設計にひきつづき、令和3年度は海底地盤変動観測装置の改良設計を重点的に実施した。令和3年度前半は改良設計と始良カルデラ南東部の新島とその北西沖における環境調査、陸上の実験台における測位実験が行われた。さらに海底地盤変動観測装置の基台設計の確認を目的として定めた設置予定地点の海底採泥調査を再び実施した。関係機関との協議結果および設置場所の海底地盤状況を反映し、令和元年度の基礎設計をもとにした海底地盤変動観測装置の詳細設計を実施し令和3年度後半に同装置の製作用図面一式を得た。令和3年度の改良設計で

は地盤変動観測の上下方向変動検出精度を改善するために、基台と上部構造との連結部分に摩耗量の小さいユニバーサルジョイントを組み込む構成とし、設計水深 30 m としたうえで観測項目と搭載機器の見直しを行った。さらに設計の改良にともない海底地盤変動観測装置の設置方式に関して検討を施し、起重機船による機器一体一括設置方式を採用する方針を定めた。

海底地盤変動観測装置の主題である GNSS 測位では GNSS 放送の搬送波位相を用いる Kinematic 解析を採用する方針である。現在の火山性地殻変動の GNSS 測位では Static 法を用いているために、Kinematic 法の静的長期安定性の確認をまず検証した。この検証では京都大学防災研究所火山活動研究センターの常設点における 1 年間のデータを用い、従来の Static 法による解析結果と同等の精度の得られることを確認した。海底地盤変動観測装置では風波および潮流等の外力による GNSS アンテナの運動が予想されることから、運動する実験台に搭載した GNSS アンテナによる測位実験を複数回実施し、測位結果から運動軸位置を推定して測位精度の確認を行った。運動速度に対する測位の安定性をたしかめる測位実験では、継続的に一定振幅の振動が可能な振り子式の実験台を用意し、支点の 1.4m 上方に 2 つの GNSS アンテナを 1m 間隔で取り付けた。ピラーの直上には主 GNSS アンテナを置き、ビームの先には副 GNSS アンテナを取り付けた。また、静止状態と、最大約 2m/s の運動状態における測位を実施した。実験の結果、想定される最大運動速度下であっても安定した測位結果が得られた。

また、GNSS 測位結果補正方法についても実験によって検討を行った。海底地盤変動装置の実物の構成を模した 2 軸を中心とした傾斜運動を行う実験台を用意し、前年度の実験で良い成績を示したツイン GNSS アンテナ方式を拡張して 4 アンテナを搭載したアンテナアレイ方式による測位実験を実施した。実験の結果、アンテナアレイ方式とそれに対応した傾斜補正は良好な結果を示した。

以上のことから海底地盤変動観測装置では 4 つの GNSS アンテナを搭載することとし、実際の建造のための仕様案をまとめた。後年度では海底地盤変動観測装置の建造設置に取り組むとともに、追加実験をひきつづき行い測位の安定性と測位精度の向上方法についてさらに検討を加える。設置予定地点付近の気象調査をひきつづき行う。

### (3) 活動的カルデラのシミュレーションモデルによる火山性地殻変動の検討

本項目では粘弾性を考慮した地殻構造モデルを用いて、地表面における測地学的観測データから始良カルデラの地下の体積変化を制約してマグマだまりへのマグマ供給速度を理解することを狙って研究を行っている。また、最終目標として粘弾性地殻構造モデルによる地盤変動評価ツールを構築することを狙っている（下図）。

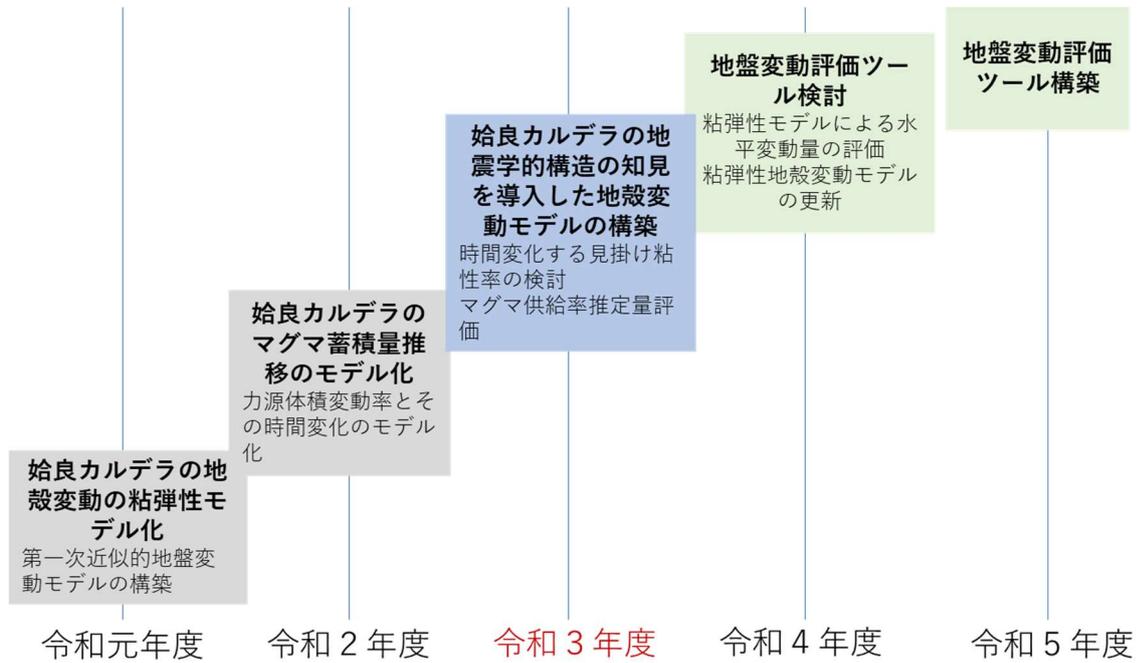


図 1-7. シミュレーションモデルによる火山性地殻変動の検討ロードマップ

令和 3 年度は為栗他 (2022) により S 波低速度領域が西部始良カルデラ中央部に見いだされその位置と深さが決められたことを受けて、S 波低速度領域を地盤変動力源の下位に置かれた低粘性領域として解釈することで、これまでの研究で明らかになった見掛け粘性率の応答特性の時間変化を説明できることが明らかになった。大噴火活動から 40 年経過までの期間の見掛け粘性率に対して、40 年後以降のそれは約 8 倍の大きさを示し、長期間で見る場合には粘弾性効果が無視できない。この成果から、今後は下記のようなイメージで先述の (2) 1 で扱う弾性地殻変動モデルとの棲み分けをすることにした。

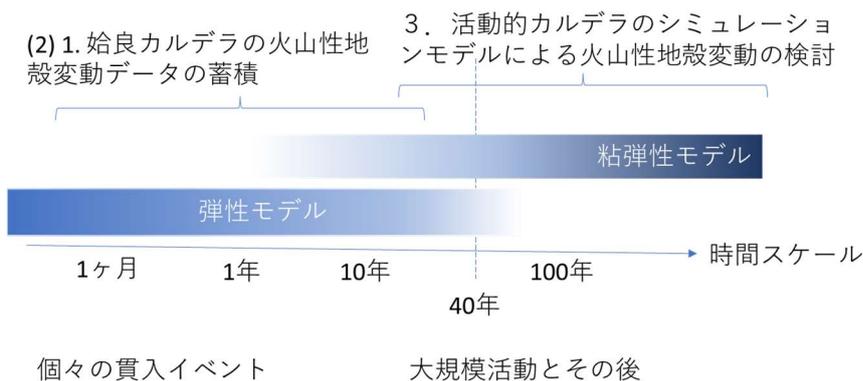


図 1-8. モデル手法の棲み分け

また 1914 年噴火以降における長期的なマグマ供給率の推定を行った場合、弾性モデルによる推定値は粘弾性を考慮した地殻構造モデルを用いた場合と比べて 10~17%過小評価であることが示された。この成果は Yamasaki et al. (2021) として論文発表された。

後年度はひきつづき、上部地殻でのマグマ給排出に対する粘弾性応答を精査し地下のマグマ活動に対する粘弾性挙動の計算ツールの構築に取り組むとともに、始良カルデラ下の新たな地球物理学的研究成果を考慮した粘弾性地殻構造モデルのアップデートを進めて地下の物性構造を更新する。また、地下のマグマ活動に対して地表面に現れる水平変位における粘弾性の効果について定量的に記述し、GNSS 観測への適用性を検討する。

#### 参考文献

- Geshi, N., Yamada, I., Matsumoto, K., Nishihara, A., Miyagi, I. (2020) Accumulation of Rhyolite magma and triggers for a caldera-forming eruption of the Aira Caldera, Japan. *Bulletin of Volcanology*, 82: 44, <https://doi.org/10.1007/s00445-020-01384-6>.
- 為栗 健・八木原 寛・筒井智樹・井口正人(2022)始良カルデラ下の3次元地震波速度構造の高分解能化の試み、火山、第67巻1号掲載予定
- 筒井智樹、為栗 健、井口正人(2021)人工地震記録による始良カルデラ西部の地殻内S波地震反射面の推定、火山、66巻2号, 71-81.
- Yamasaki, T, Sigmundsson, F., Iguchi, M., 2022, Variable inflation of a magmatic deformation source beneath Aira caldera after the 1914 eruption of Sakurajima volcano: Inference from a linear Maxwell viscoelastic model constrained by geodetic data, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 421, 107446, <https://doi.org/10.1016/j.volgeores.2021.107446>.

## 2 研究報告

### (1) 活動的カルデラ火山の地下構造調査

#### (1) 1 始良カルデラにおける地震観測による地殻構造調査

##### (1) .1.1 始良カルデラ臨時地震観測点の拡充と維持

2021年度は地震観測点の増設を行っていない。2020年度までに始良カルデラ周辺に設置している16点の地震観測点において、今年度も地震観測を継続している（図1-1-1）。図1-1-1の黄○の観測点では、地震計はサイスマテック株式会社製SSV-003（3成分、固有周期1秒）とMark Products L4型（3成分、固有周期1秒）を使用、データロガーは白山工業株式会社製LS-8800を使用して現地収録を行っている。図1-1-1の赤○においては、1 Hz地震計SSV-003とモバイルによるテレメータ装置（白山工業株式会社製LT-7700）、図1-1-1の赤□においては、Nanometrics社製Trillium120Qの広帯域地震計とデータロガーは白山工業株式会社製LS-7000XTを使用し、京都大学防災研究所火山活動研究センターの定常観測点用のNTT回線を使用してテレメータしている。図1-1-1の黒□においては、Nanometrics社製Trillium120QおよびLT-7700を用いて現地収録で観測を継続している。

業務委託により現地収録の観測点において2ヶ月に1度のデータ回収とバッテリー交換を実施しており、2021年度の実施日を表1-1-1に示す。特に異常は発生していない。臨時地震観測および業務委託によるデータ回収とバッテリー交換は来年度も継続して実施する。

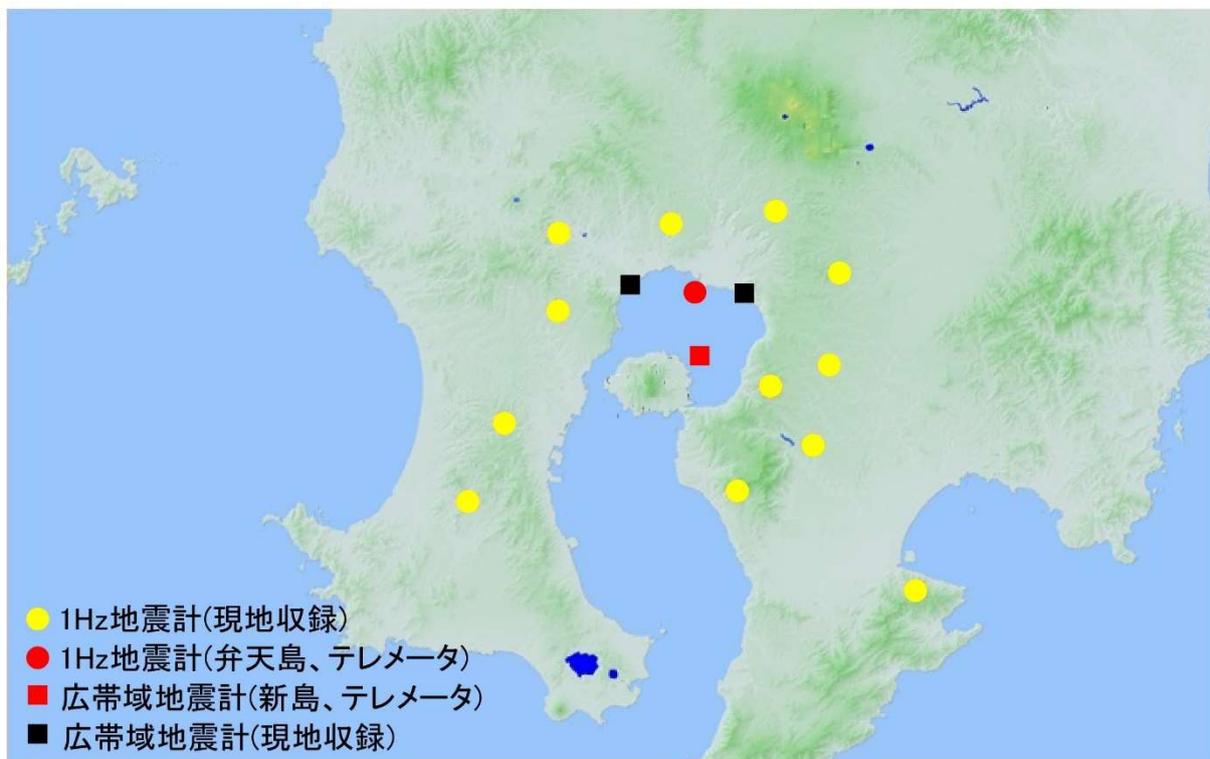


図1-1-1. 臨時地震観測点分布

表 1-1-1. 臨時地震観測のデータ回収およびバッテリー交換実施日

	実施日（多点のため作業は複数日）	異常報告
第1回	2021年4月20日、21日、23日、28日	なし
第2回	2021年6月11日、15日、16日、21日	なし
第3回	2021年8月24日、25日、27日、28日	なし
第4回	2021年10月12日、13日、15日、19日	なし
第5回	2021年12月17日、21日、22日、27日	なし
第6回(予定)	2022年2月11日、16日、18日、22日	なし

(1) .1.1. 3次元地震波伝播速度トモグラフィによる始良カルデラ地下構造モデルの高精度化

a) 深さ 15km に推定された S 波低速度異常領域のメルト量推定

1) 目的

始良カルデラ周辺に設置した地震計により観測された地震波の P 波および S 波の到達時刻をデータとして、地震波トモグラフィ法により、始良カルデラ下の 3 次元的な P 波および S 波の地震波伝播速度構造を求める。地震波伝播速度が周辺より異常である場所を検出することによりマグマ溜りの位置やサイズを特定することを目的とする。本章では解析精度が十分に高い、深さ 15 km 以浅に見出された S 波低速度異常領域についての考察を行なう。

2) データ

昨年度に引き続き、本プロジェクトで始良カルデラ周辺に設置している臨時地震観測点（図 1-1-2-1 の黄色○）および京都大学防災研究所火山活動研究センターが設置している定常地震観測点（図 1-1-2-1 の赤○）に、南九州一帯に設置されている防災科研の Hi-net 観測点や JDX-net で流通している大学・気象台の地震観測点（図 1-1-2-1 の青○）を示す。2018 年に観測を終了している宮崎県の 5 点（図 1-1-2-1 の黒○）も使用し、計 45 点の観測点で得られた P 波、S 波到達時を用いた。

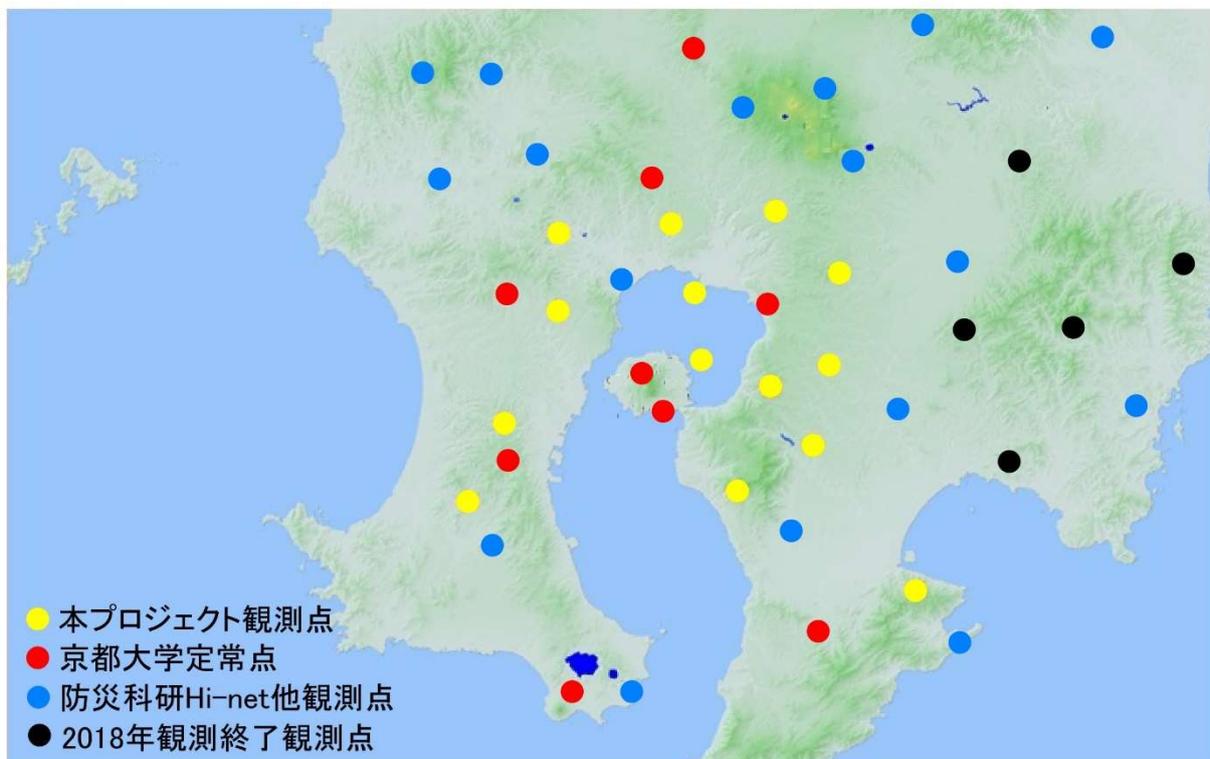


図 1-1-2-1. 地震波トモグラフィ解析に使用した地震観測点

地震波トモグラフィを行う上で、表層のより詳細な速度構造を得られれば、深部の解析結果の信頼性が向上すると考えられるため、解析に使用する到達時には昨年度同様に人工地震探査によるP波初動到達時を加えている。2008年に始良カルデラと桜島内を対象として実施されたダイナマイトを用いた人工地震探査（図1-1-2-2）のデータを地震波トモグラフィ解析に使用することで浅部の地震波速度構造の精度を向上させている。この人工地震探査では直達P波を用いた3次元地震波速度構造の探査深度は約4 kmであり浅い領域の構造しか分からない。ダイナマイトを用いた人工地震ではS波は励起されないため、本解析に使用する人工地震データはP波初動の到達時のみである。

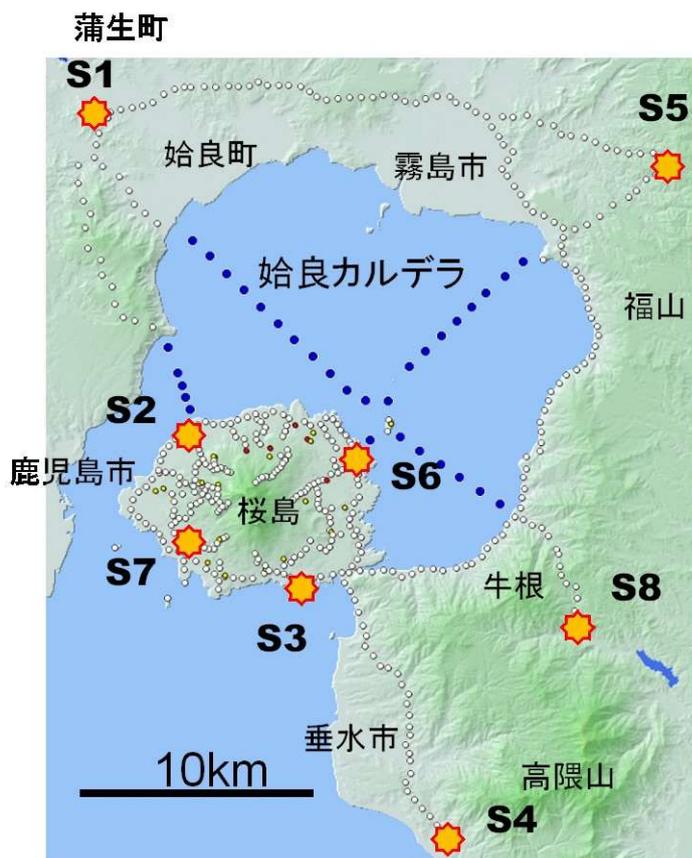


図 1-1-2-2. 2008 年人工地震探査の発破点（黄色）と地震観測点（白○と青○）の分布

本解析では南九州一帯で発生した主にマグニチュード2.0以上の地震について各観測点におけるP波、S波到達時の読み取り値をデータとしている。また、始良カルデラを通過する地震波線を多くするため、始良カルデラ周辺で発生した地震についてはM1.5程度のイベントのP波、S波到達時の読み取り値も解析に使用した。P波、S波とも8観測点以上で読み取り可能なイベントのみを解析に使用し、そのイベント数は383であった。図1-1-2-3に使用した地震の震源分布および表1-1-2-1に震源リストを示す（報告書末尾、表1-1-2-1の2020年10月8日イベントまで）。解析に使用した読み取り値は、自然地震P波が14,652、自然地震S波が10,935、人工地震P波が3,121であった。

### 3) 解析方法

解析は昨年度と同様の方法を使用している。地震波トモグラフィインバージョンは八木原・他 (2010) の方法、グリッド空間は Thurber (1983) の配置を使用している。1次元および3次元速度モデル解析において、波線追跡は Pseudo-Bending 法 (Um and Thurber, 1987) を用いている。3次元トモグラフィ解析の流れを図 1-1-2-4 に示す。解析精度については、用いた地震と観測点のデータセットと同じ組み合わせの疑似データを作成し、チェッカーボードテストを行い、結果として得られたパターンの復元状況と Resolution matrix の対角要素値 (RDE) を精度評価の参考とした。

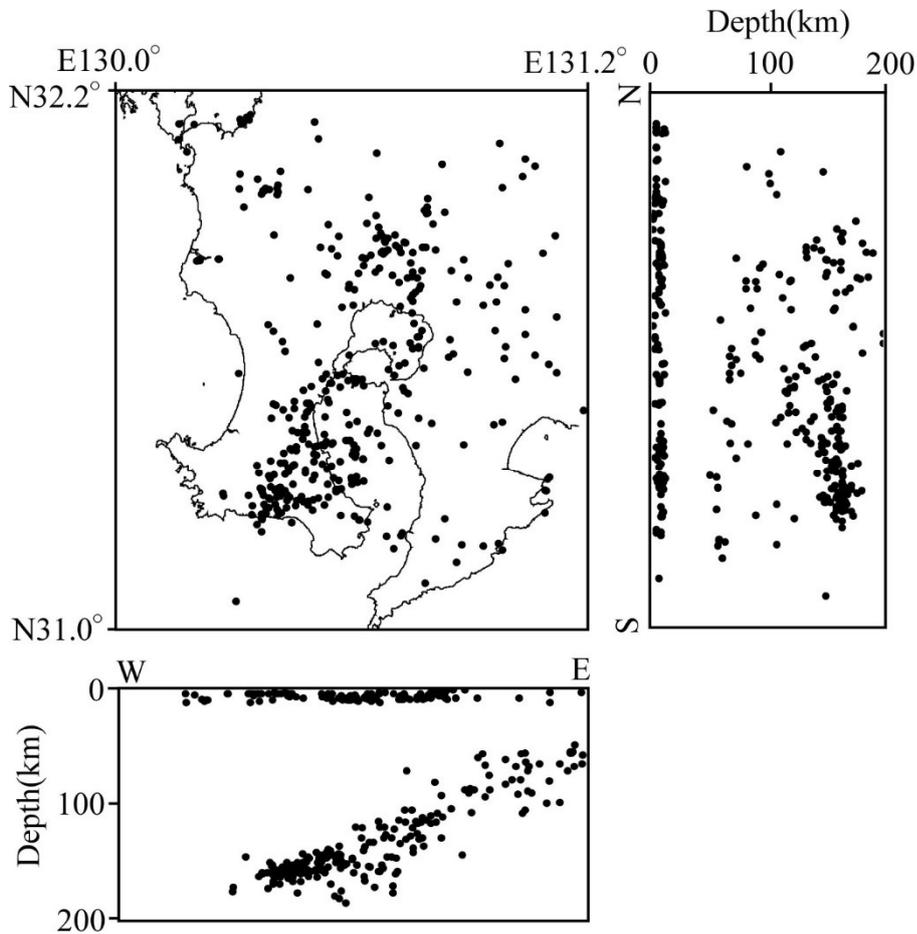


図 1-1-2-3. 解析に使用した 383 イベントの震源分布図

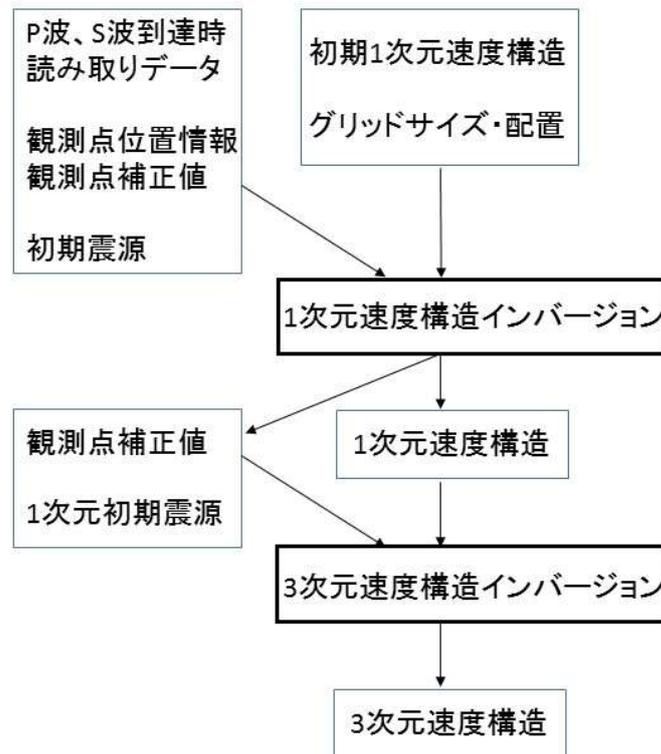


図 1-1-2-4. 3次元トモグラフィ解析の流れ

データの読み取り値の精度によりランク分けを行い、A (±0.01 秒)、B (±0.03 秒)、C (±0.10 秒) でそれぞれデータに重みづけを行っている。3次元速度構造インバージョンの初期データとなる1次元速度構造モデルは Ono et al. (1978) を参考に行っている (表 1-1-2-2)。

表 1-1-2-2. 初期構造となる 1 次元速度構造 (Ono et al., 1978 を参考)

depth (km)	Vp (km/s)	Vs (km/s)
~0	3.70	2.14
0	3.80	2.20
5	4.80	2.77
10	5.90	3.35
15	6.00	3.47
20	6.20	3.58
25	6.70	3.87
30	7.00	4.04
40	7.70	4.45
50	8.30	4.80
70	7.60	4.39
100	7.95	4.60
150	8.10	4.68
200	8.25	4.77

#### 4) 5km グリッドにおける S 波低速度異常領域とメルト量の推定

解析範囲は始良カルデラが含まれる北緯 31.4 度~31.9 度、東経 130.4 度~131.0 度、深さ 0 ~200 km である。水平方向、深さ方向ともに 0.05 度 (約 5km) の基準グリッドを構築した後、緯度方向 (北方向) に 0~0.05 度の範囲で 0.01 度毎、経度方向 (西方向) に 0~0.05 度の範囲で 0.01 度毎、合計 25 モデルで解析を行い、個々のモデルから得られた速度の平均値をとることで平滑化した。図 1-1-2-5 にチェッカーボードテストにおけるパターンの復元状況を示す。RDE が 0.6 以上の領域は速度の高低のパターンが再現され、解の信頼性が高いとみなす。実データから得られた速度分布に対する RDE は、深さ 15 km まではほぼ 0.6 を超えている。

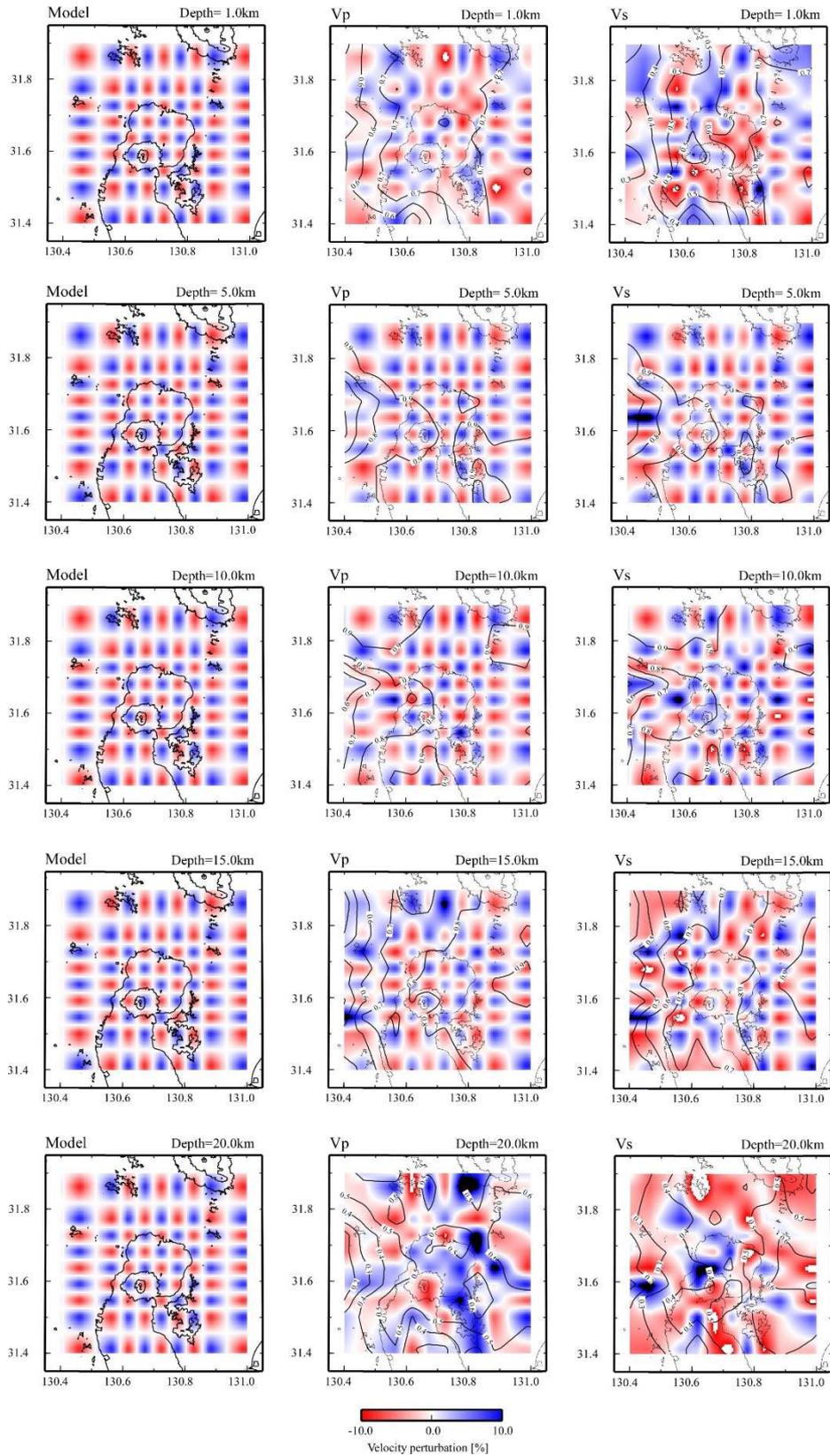


図 1-1-2-5. 深さ 1 km、5 km、10 km、15 km、20 km におけるチェッカーボードテスト結果

深さ 1 km, 5 km, 10 km, 15 km における P 波及び S 波の地震波速度分布を図 1-1-2-6 に示す。深さ 1 km では始良カルデラ北東部の若尊カルデラ下 (図 1-1-2-6 の Wa) において、S 波速度が遅い。一方、カルデラ北縁では P 波の高速部分が見られる。深さ 5 km ではカルデラ内の P 波速度および S 波速度はそれぞれ、4.5 km/s~5.8 km/s、2.6 km/s~3.7 km/s にあり、顕著な速度異常は見られない。深さ 10 km でもカルデラ内の P 波速度および S 波速度はそれぞれ、5.2 km/s~6.1 km/s、3.4 km/s~3.8 km/s にあり、P 波、S 波速度ともに顕著な不均質は見られない。深さ 15 km においてはカルデラ内の P 波速度および S 波速度はそれぞれ、5.4 km/s~6.8 km/s、1.1 km/s~4.4 km/s にあり、始良カルデラ中央部には特に S 波速度が遅い領域がある (図 1-1-2-6 の LS)。P 波速度の低下は周辺に対して 5~10 %程度であるが、S 波速度は 1.1 km/s~2.0 km/s まで低下しており、S 波速度 2.45 km/s 以下を領域 LS とすると速度比で約 18 %~55 %低下している。P 波速度には LS の外側の領域に対して 5~10 %程度の低下しかないため、 $V_p/V_s$  は 3.9 と大きい。

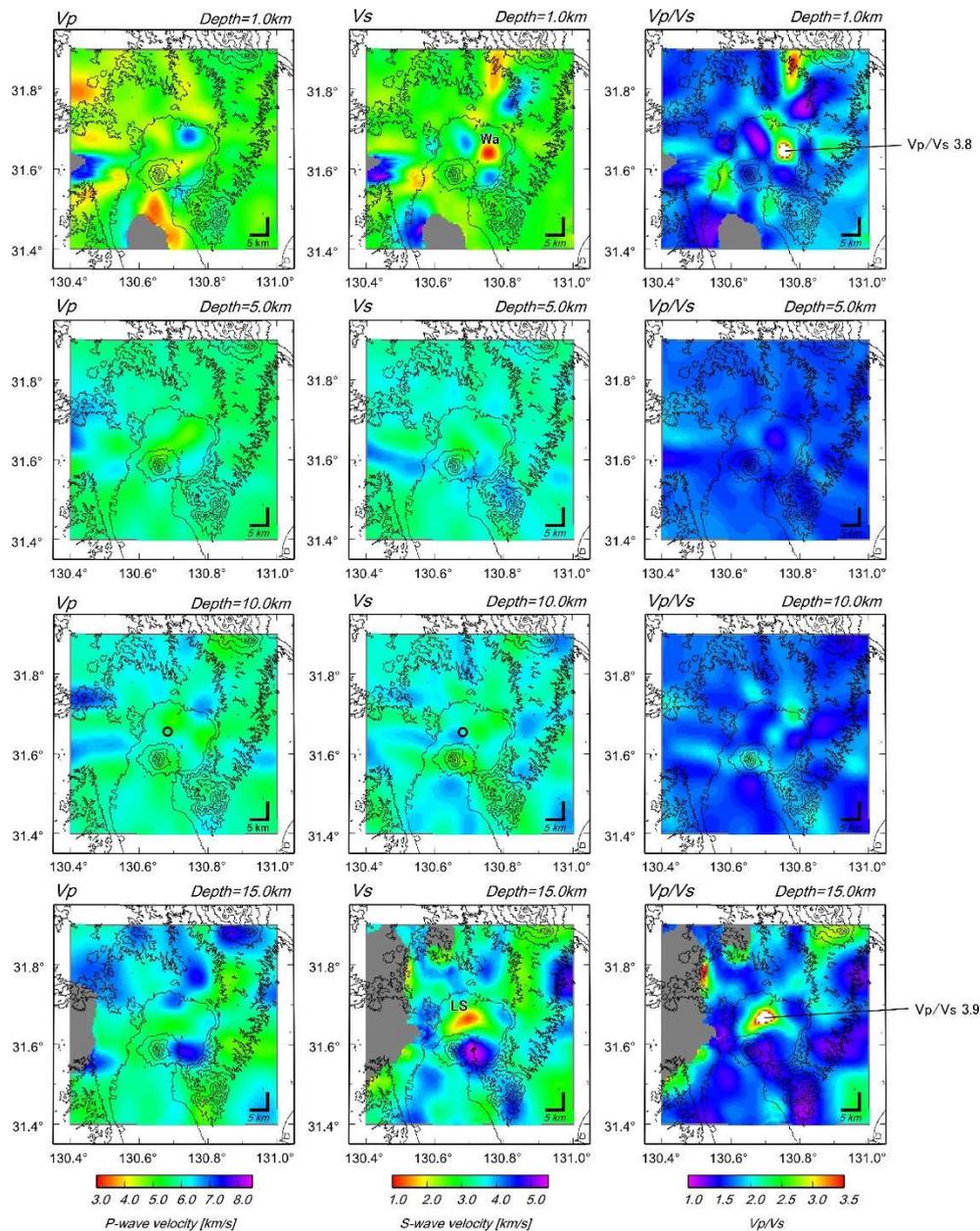


図 1-1-2-6. 深さ 1 km、5 km、10 km、15 km における P 波、S 波速度およびその比

図 1-1-2-7 に始良カルデラ中央部の東西と南北鉛直断面図を示す。深さ 1 km の S 波低速度 (図 1-1-2-6 の Wa) が見られる領域は始良カルデラ内の副カルデラである若尊カルデラに近接する。若尊カルデラは非常に活発な熱水活動を続けており (例えば, Ishibashi et al., 2008)、浅部における S 波低速度領域は熱水層に対応するものかもしれない。深さ 15 km において見出された S 波速度が 2 km/s 以下 (周辺より約 30%) の低速度領域の最上部は深さ 11~12 km に達している (図 1-1-2-7 の LS)。地盤変動観測から見出されている微小球状圧力源は、始良カルデラ中央部深さ 10~12 km に求められるが (Iguchi, 2013; Hotta et al., 2016)、深さ 10~12 km には顕著な速度異常は見られない。微小球状圧力源は地盤変動を引き起こす等方的応

力の集中点と考えるべきであり、速度コントラストの強いS波低速度領域の上端部付近では応力が集中しており、応力はその下にあるS波低速度領域が駆動していると解釈される。S波低速度領域の上端における速度コントラストの強さは、地震波形後続相に現れる始良カルデラ北西部の深さ 13.6 km からのPS変換反射波（図 1-1-2-8）により示されている（筒井・他，2021）。

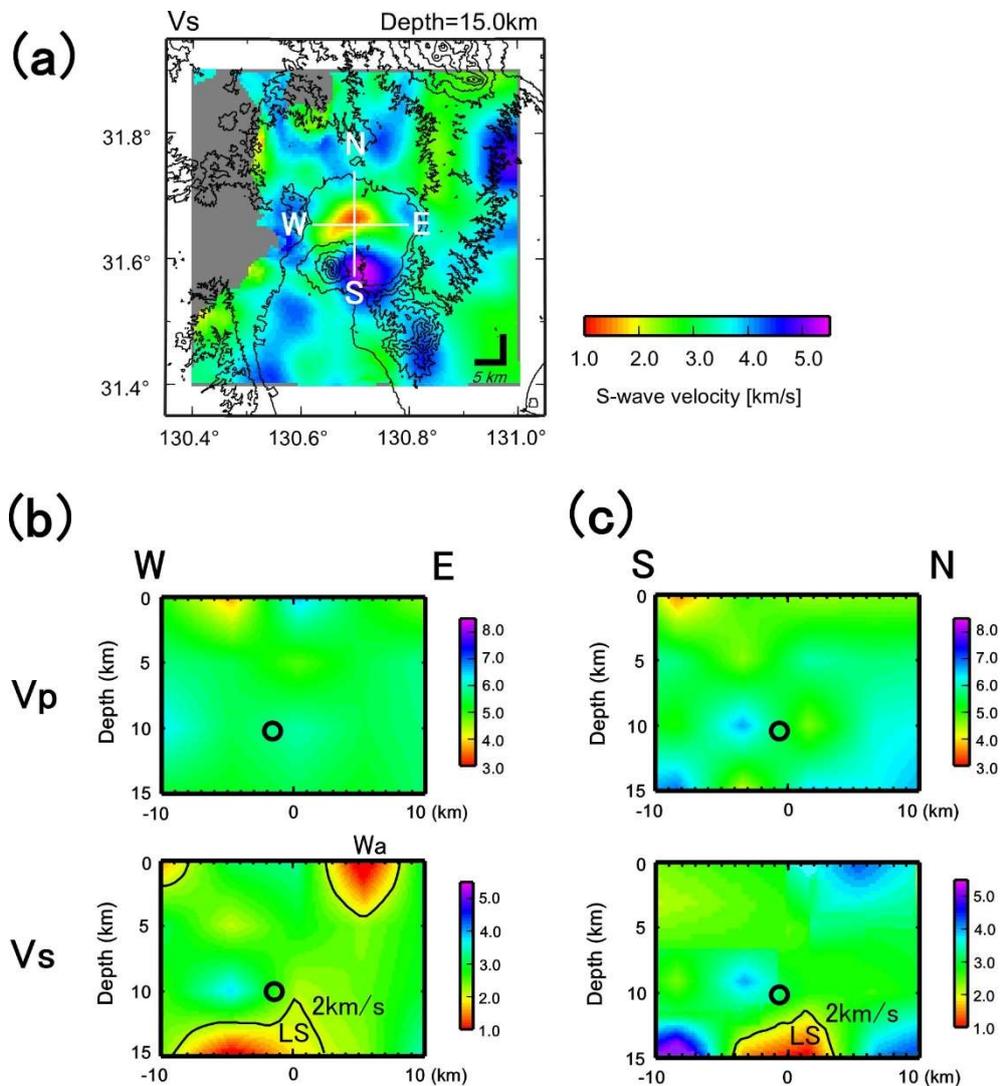


図 1-1-2-7. 始良カルデラ中心付近を通る東西（左）、南北（右）断面のP波、S波およびその比

Taylor and Singh (2002) はマグマ領域が結晶の集合体の中に微小な扁平なメルトインクルージョンを多数含む場合、メルトインクルージョンの厚み方向に通過するS波速度の低下率が同じ方向に通過するP波のそれよりも著しく大きくなり、マグマ領域に含まれるメルトインクルージョンのアスペクト比が大きいほど厚み方向に伝わるS波速度の低下率が大きくなることを指摘している。さらにS波およびP波速度低下の組み合わせはメルト含有量と関連するので、Taylor and Singh (2002) の Figure 3 を用いてS波およびP波速度低下の組み合わせからメルト含有量を推定する。低速度領域周辺部のS波速度平均値は 3.4 km/s である。それに対して 30 %以上の速度低下 (2.45 km/s 以下) がみられる領域を低速度領域とすると、低速度領域のS波速度平均

値は 1.9 km/s で周囲に対して 44 %低下した値である。一方、低速度領域の P 波平均速度は 5.6 km/s であり、周辺平均 P 波速度 6.1 km/s に対して 8.2 %の低下である。球状のメルトインクルージョンの存在によって P 波速度は 27 %、S 波速度は 44 %低下するが、メルトインクルージョンを扁平にすることで、同じ S 波速度の低下率に対するより小さな P 波速度低下率が説明できる。例えば、S 波速度の 44 %低下に対しては、メルトインクルージョンのアスペクト比 10 では P 波速度低下は 14 %、アスペクト比 100 の場合には約 4 %にとどまる。始良カルデラ下の場合、S 波速度の 44 %低下はアスペクト比 10~100 の間の形状のメルトインクルージョンに対応し、P 波速度の低下率からメルトの含有率は約 7 %と推定される。低速度領域の閾値を 2.45 km/s とした場合には、深さ 15 km を中心とした低速度領域の体積は 255 km<sup>3</sup>、2.0 km/s に設定すれば 139 km<sup>3</sup>となるので、メルト含有量はその約 7 %の 10~18 km<sup>3</sup>であると考えられる。なお扁平なメルトインクルージョン（10 以上のアスペクト比）では、P 波速度減少とメルト含有率との関係はアスペクト比の変化に鈍感であるので、低速度領域の閾値を 2.0 km/s にしてもメルト含有率の推定は大きく変わらない。

なお、上述の内容は為栗・他（2022）として火山学会誌に論文投稿した物に加筆を行なっている。

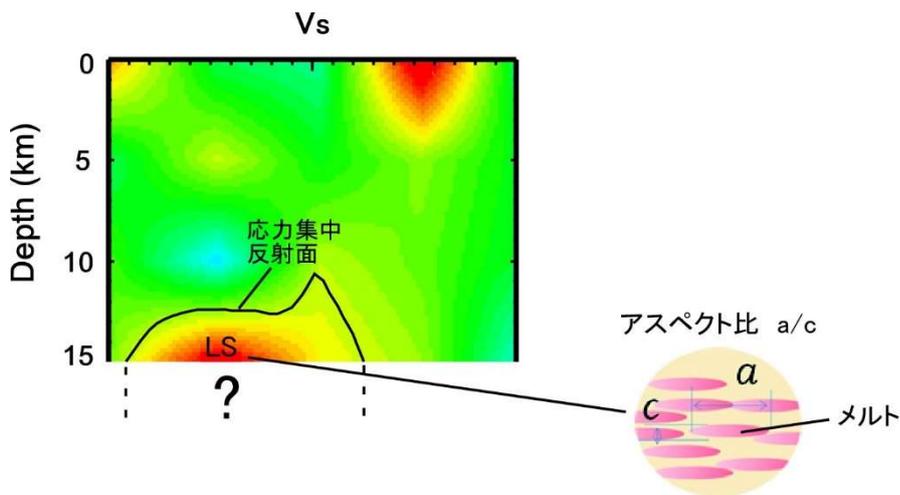


図 1-1-2-8. 低速度異常域内のメルト概念図

## b) 深さ 15 km 以深の S 波低速度異常領域の検出

深さ 15 km 以深の速度構造解析の解像度向上のために、解析の対象とした始良カルデラ周辺域で発生する地震をさらに追加し、表 1-1-2-1 の全ての地震を使用して解析を行なった。また、これまで同様に人工地震探査データも使用している。解析に使用した読み取り値は、自然地震 P 波が 17,314、自然地震 S 波が 14,272、人工地震 P 波が 3,121 であった。南九州付近で発生する地殻内の自然地震は深さ 10 km を超えるものは少なく、対象領域の深さ 15 km 以深を通過する地震波線は深発地震（100 km 以深）がほとんどである。波線数が増加したため深さ 20-25 km 付近の地震波速度構造を得ることは可能となったが、深さ 15 km 以浅の精度には達せず、実データから得られた速度分布に対する RDE の下限を前節まで使用していた 0.6 から 0.5 に下げた結果を示す。

図 1-1-2-9 に深さ 15 km、20 km および 25 km における P 波及び S 波の速度分布を示す。深さ 20 km において、P 波速度は始良カルデラ南部から東部にかけて高速度で、中央部北寄りが P 波速度 5 km/s とやや低速度が見られる。S 波速度については始良カルデラ中央部に 2 km/s と低速度の領域が見られる（図 1-1-2-9 中の  $V_s$  内の○）。始良カルデラ中央部の  $V_p/V_s$  比においても、S 波速度が低速のため高  $V_p/V_s$  が見られる（図 1-1-2-9 中の  $V_p/V_s$  内の○）。深さ 25 km における解像度の高い領域は、始良カルデラ内の中央部付近のみであるが、P 波は深さ 20 km と同様に中央部北寄りでやや低速度である。S 波は始良カルデラ内では 3 km/s 前後で、東側の大隅半島下と比較すると低速度に見られる。先述の深さ 15 km を中心とする S 波低速度異常 LS の領域の深さ 20 km 付近では、S 波速度 2 km/s 程度の低速度が見られるが、速度低下は少なく、位置はやや東寄りとなっている。また、速度 2 km/s 以下の領域は東西南北で約 2 km と小さくなっている。図 1-1-2-10 に解析で得られた速度構造の鉛直断面図を示す。深さ 20 km の低速度は始良カルデラ中央部の東寄りのため南北断面も東寄りにして示している。図中の黒円内が深さ 15 km、20 km で見られる S 波低速度異常を示す。東西断面（図 1-1-2-10 の (b)）では LS の領域は深さ 12 km から 22 km 付近で見られるが、先述したとおり深さ 20 km 付近では東寄りである。南北断面（図 1-1-2-10 の (c)）でも同様に LS の領域は深さ 12 km から 22 km 付近に見られ、南北方向の広がり狭く見える。以上のことから LS の領域は始良カルデラ中央部からやや東寄りにかけての深さ 12 km から 22 km 付近の範囲にあると言える。

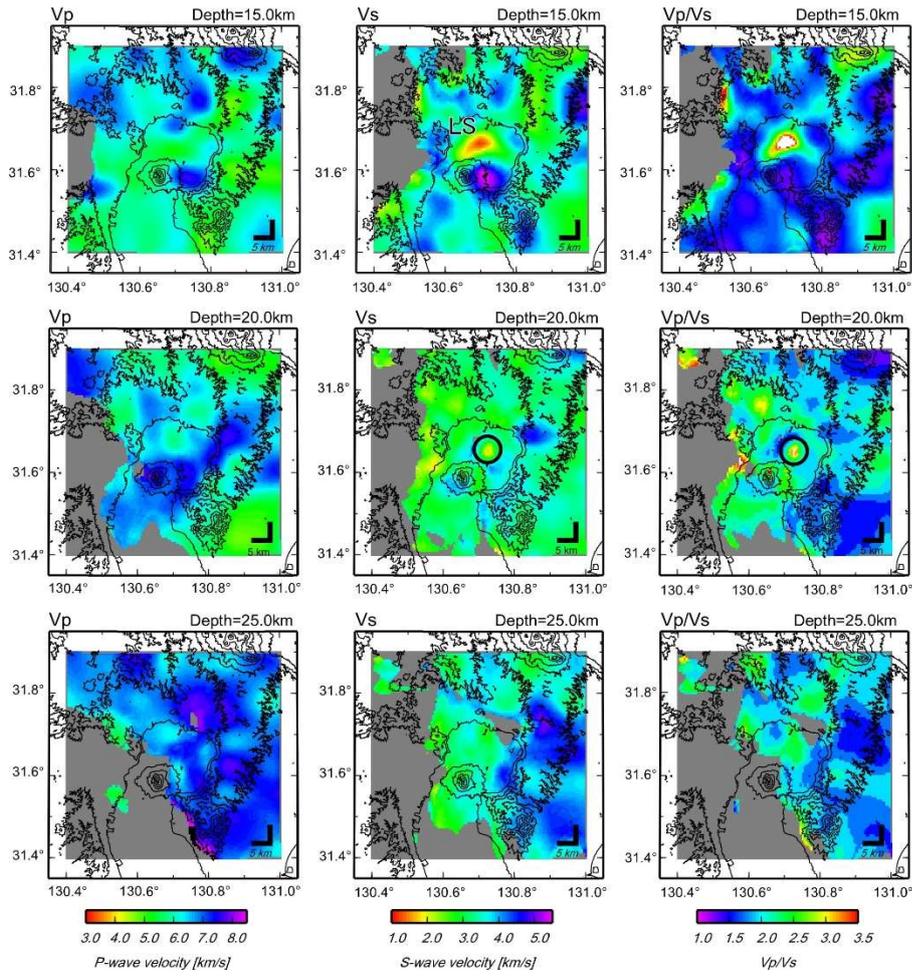


図 1-1-2-9. 深さ 15 km、20 km、25 km における P 波、S 波速度およびその比

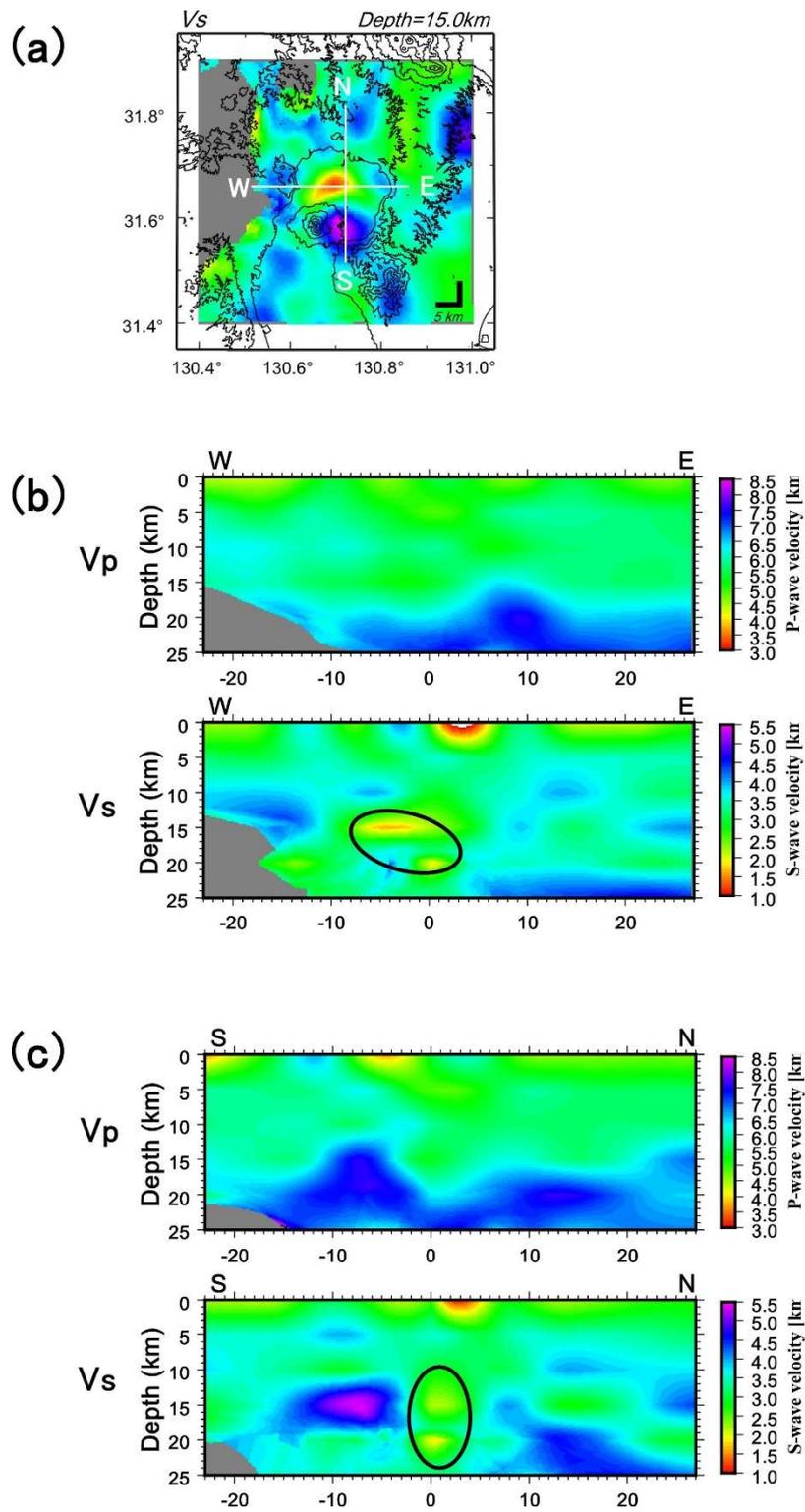


図 1-1-2-10. 始良カルデラ周辺の P 波、S 波速度構造の鉛直断面図

### c) 3次元地震波速度トモグラフィ解析の高解像度化の検討

これまでの3次元地震波速度トモグラフィ解析において始良カルデラ中央部の深さ12-22 km付近にS波低速度領域が見出されている。特にS波低速度領域の深さ分布を正確に知ることは圧力源の深さや形状の考察、地震波反射面との関連などを調べる上で重要となる。S波低速度領域の分布をより詳細に明らかにするために地震波速度トモグラフィの高解像度化の検討を行った。

まず、グリッドサイズを4 kmとした場合の計算を行なったが、1グリッド内を通過する波線数の減少に伴い、局所的に大きな速度異常があるグリッドでは計算において波線の発散が生じてしまい、結果が得られなかった。そのため、水平方向は5km、深さ方向を4.5kmごとのグリッド配置とした場合で計算を行なった。

図1-1-2-11に実データから得られた速度分布に対するRDEの下限を0.5とした場合の深さ方向4.5kmグリッド解析で得られた結果を示す。深さ18kmまでは十分な精度を得られたが、深さ22.5kmでは始良カルデラ中央部の十分な精度は得られなかった。深さ方向4.5kmグリッド解析で得られた深さ18kmまでのP波、S波速度および $V_p/V_s$ 比の分布について、前章までの5kmグリッド解析の結果と大きな違いはなかった。深さ9kmでは始良カルデラ内に顕著なS波低速度は見られないが、深さ13.5kmおよび18kmにおいては5kmグリッドと同様に始良カルデラ中央部に顕著なS波低速度領域が見出された。5kmグリッドの解析における結果(図1-1-2-6および図1-1-2-9)では深さ方向のグリッドで15kmにおいて顕著なS波低速度領域が見出されているが、この4.5kmグリッドにおける解析では深さ13.5kmにおいても顕著なS波低速度領域が見られる。また、深さ18kmにおいても低速度領域が見られることから、5kmグリッドの解析における深さ20kmの低速度領域(図1-1-2-9の深さ20km)の存在を示唆するものである。

今後、グリッドサイズをより小さくした場合(1グリッド内を通過する波線数が減少)の解析を継続するが、1グリッド内を通過する波線数を8まで減少することを許容して検討を行う。そうすることで、1イベント当たりのP波S波の読み取り点数が少ないM1程度の浅発微小地震も解析に加えることが可能になり、特に水平方向入射の波線の増加することが期待される。3次元速度構造解析においてグリッド内を通過する波線としては鉛直方向と水平方向から入射する地震波が交差する波線が多い方が解の信頼性が高くなる。現在の解析で使用している自然地震では半数が深発地震となっており、グリッド内を通過する地震波線は鉛直入射が多くなっている。これまでの解析では解の信頼性が下がることを防ぐため、1グリッド内に10波線は通過するようなグリッドサイズを設定していた。S波低速度領域の細かな構造、詳細なメルト量を得るためには、特に浅部(~25 km)構造解析の高解像度化は必須であるため、微小地震の波線を増加させて、グリッドサイズをどのサイズまで小さくできるか検討を行なう。上述の条件や南九州の自然地震の発生状況から十分な解の信頼性を得るためのグリッドサイズとして表1-1-2-3を想定し、カルデラ深部構造まで明らかにする。

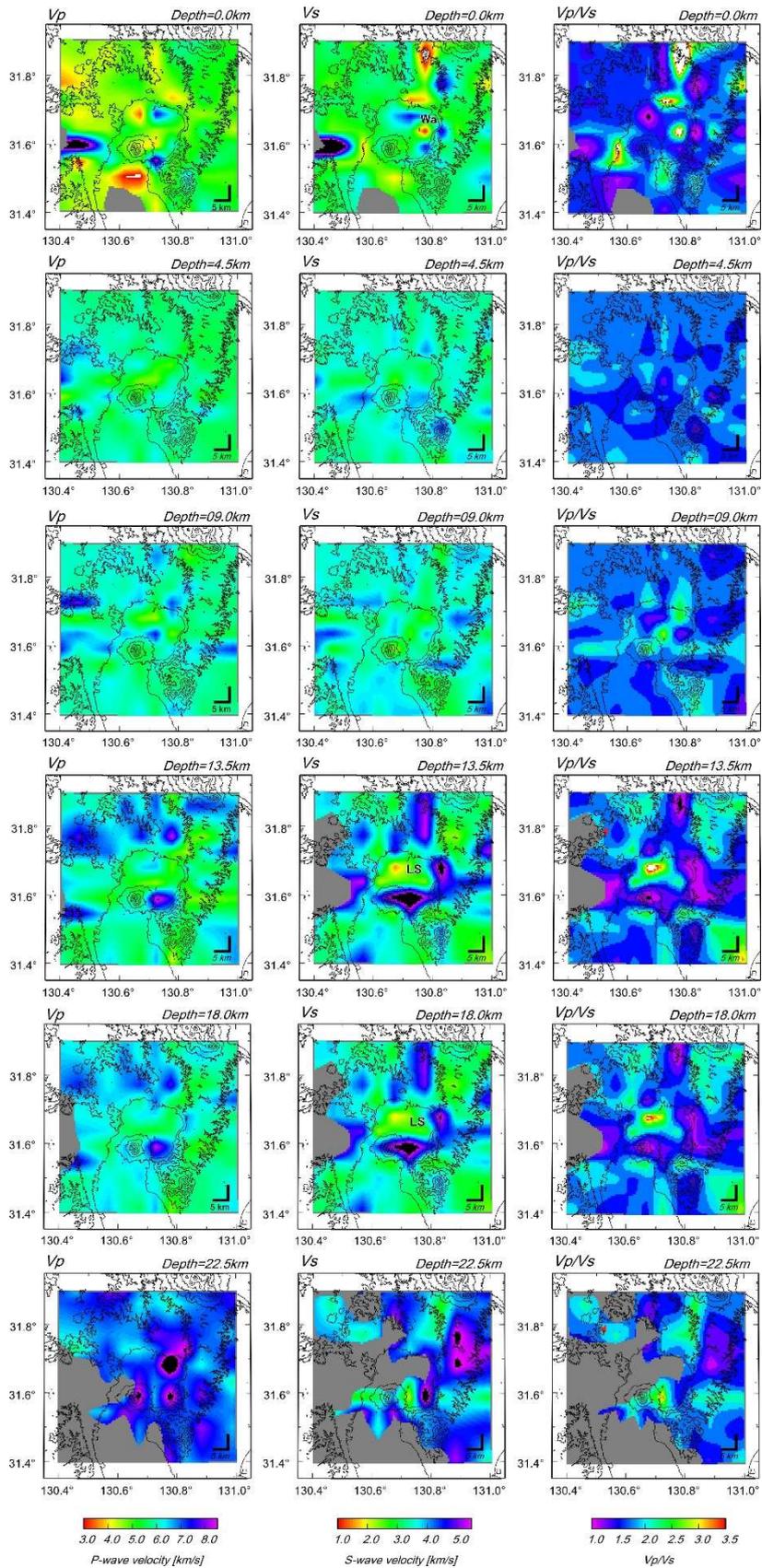


図 1-1-2-11. 深さ 0km、4.5km、9 km、13.5 km、18km、22.5km における P 波、S 波速度およびその比

表 1-1-2-3. 十分な地震波線数を得るためのグリッドサイズ

depth (km)	水平グリッドサ イズ (km)	鉛直グリッドサ イズ (km)
～20	4.5～5	4～4.5
20～40	5	5
40～80	10	10
80～	20	20

#### 参考文献

- Hotta, K., Iguchi, M., Yamamoto, K. and Ohkura, T. (2016) Multiple-pressure-source model for ground inflation during the period of high explosivity at Sakurajima volcano, Japan – Combination analysis of continuous GNSS, tilt and strain data –, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 310, 12-25.  
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.11.017>
- Iguchi, M. (2013) Magma movement from the deep to shallow Sakurajima volcano as revealed by geophysical observations, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, 58, 1-18.  
[https://doi.org/10.18940/kazan.58.1\\_1](https://doi.org/10.18940/kazan.58.1_1)
- Ishibashi, J., Nakaseama, M., Seguchi, M., Yamashita, T., Doi, S., Sakamoto, T., Shimada, N., Noguchi, T., Oomori, T., Kusakabe, M, and Yamanaka, T. (2008) Marine shallow-water hydrothermal activity and mineralization at the Wakamiko crater in Kagoshima bay, south Kyushu, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 173, 84-98.  
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.12.041>
- Ono, K., Ito, K., Hasegawa, I., Ichikawa, K., Iizuka, S., Kakuta, T., and Suzuki, H. (1978) Explosion seismic studies in south Kyushu especially around the Sakurajima volcano, *J. Phys. Earth*, 26, Supplement, S309-S319.  
[https://doi.org/10.4294/jpe1952.26.Supplement\\_S309](https://doi.org/10.4294/jpe1952.26.Supplement_S309)
- 為栗 健・八木原 寛・筒井智樹・井口正人 (2022) 高分解能な 3 次元地震波速度構造解析による始良カルデラ下のイメージング. *火山*, 67, 印刷中.
- Taylor, M. A. J. and Shingh, C. (2002) Composition and microstructure of magma bodies from effective medium theory, *Geophysical Journal*, 149, 15-21.  
<https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01577.x>

- Thurber, C.H. (1983) Earthquake locations and three-dimensional crustal structure in the Coyote Lake area, central California. *J. Geophys Res.*, 88, B10, 8226-8236.  
<https://doi.org/10.1029/JB088iB10p08226>
- 筒井智樹・為栗 健・井口正人 (2021) 人工地震記録による始良カルデラ西部の地殻内 S 波地震反射面の推定. *火山*, 66, 71-81. [https://doi.org/10.18940/kazan.66.2\\_71](https://doi.org/10.18940/kazan.66.2_71)
- Um, J. and Thurber, C. (1987) A fast algorithm for two-point seismic ray tracing. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 77, 972-986.
- 八木原 寛・井口正人・為栗 健・筒井智樹・及川 純・大倉敬宏・宮町宏樹 (2010) 諏訪之瀬島の火山体浅部 3 次元 P 波速度構造と爆発発生場, *火山*, 55, 75-87.  
[https://doi.org/10.18940/kazan.55.2\\_75](https://doi.org/10.18940/kazan.55.2_75)

表 1-1-2-1. 3次元速度構造解析に用いた地震のイベントリスト  
(発震時, 緯度, 経度, 深さ, マグニチュード)

2010/01/04 16:33:49	31.6552	130.7881	3	2.0
2010/01/04 22:24:48	31.3124	130.5867	8	2.1
2010/01/08 14:10:00	31.5729	130.3200	4	2.5
2010/01/15 17:53:18	32.1484	130.3510	4	2.7
2010/02/05 23:35:08	31.3661	130.5598	8	2.4
2010/02/06 01:20:47	31.3099	130.4336	157	3.8
2010/02/14 21:45:48	31.8067	130.6967	10	1.2
2010/03/26 00:56:24	31.2329	130.3668	164	4.4
2010/03/27 07:38:58	31.7467	130.7667	7	1.5
2010/04/02 02:34:15	32.0048	130.3695	4	2.5
2010/04/06 20:35:40	31.8187	130.7656	6	1.7
2010/04/27 18:09:29	31.7874	130.9899	81	2.9
2010/05/01 14:31:27	31.2687	130.3910	162	4.9
2010/05/12 06:28:49	31.7408	130.7658	6	1.8
2010/06/06 03:34:50	31.9429	130.3330	6	2.0
2010/06/10 16:27:54	31.3379	130.5661	10	3.0
2010/06/19 07:10:27	31.4587	130.9796	69	3.3
2010/07/11 12:00:57	31.2454	130.3808	174	4.6
2010/07/13 02:37:19	31.7078	130.7689	3	1.4
2010/07/13 22:14:48	31.7536	130.7780	3	2.0
2010/07/15 21:16:40	31.5618	130.6165	7	1.9
2010/07/19 21:03:13	31.5598	130.6400	118	2.4
2010/08/25 00:06:27	31.7985	130.7702	6	1.7
2010/08/29 04:55:57	31.6693	130.7949	95	2.3
2010/09/11 03:11:22	31.4649	130.6268	137	2.5
2010/09/14 15:42:07	31.7888	130.7696	120	4.2
2010/09/24 05:59:24	31.1763	131.0019	57	3.0
2010/09/30 02:55:22	31.2956	130.4823	162	3.7
2010/09/30 21:16:15	31.4300	130.5217	6	1.5
2010/10/01 20:33:49	31.7609	130.7880	6	1.8
2010/10/29 05:42:32	31.3106	131.1132	57	3.4
2010/10/31 18:09:58	31.9843	130.3223	4	2.6
2010/11/02 14:56:23	31.7852	130.7567	8	1.7
2010/11/06 20:02:32	31.7321	130.9873	8	2.2
2010/11/13 16:44:24	31.9825	130.3992	4	3.7

2010/11/13 22:06:20	31.6844	130.7734	1	1.5
2010/11/21 15:25:05	31.2946	130.4180	169	4.0
2010/12/02 07:18:43	31.3092	131.1156	57	3.0
2010/12/04 03:48:27	31.5960	130.7506	9	1.5
2010/12/07 05:37:22	31.6783	130.9967	67	1.6
2010/12/11 12:48:13	31.1790	130.7221	108	4.2
2010/12/27 13:47:10	32.1421	130.3403	4	3.0
2011/01/05 16:27:37	31.2758	130.3555	165	4.4
2011/01/14 18:54:41	32.1394	130.3438	4	2.8
2011/02/05 03:01:16	31.4880	130.4974	161	3.5
2011/03/13 11:35:48	31.3310	130.6429	12	2.4
2011/03/26 03:03:00	31.7687	130.7909	6	2.7
2011/04/09 07:40:42	31.9617	130.8093	9	2.6
2011/04/10 21:55:54	32.1296	130.3321	4	2.5
2011/04/15 11:39:13	31.3685	130.4644	161	4.2
2011/04/16 01:55:12	31.4370	130.5418	8	1.8
2011/08/01 19:10:00	31.4100	130.5226	8	2.5
2011/08/03 02:06:32	31.4733	130.7853	111	4.0
2011/08/17 04:36:30	31.7918	130.7176	9	2.0
2011/09/22 16:25:34	31.3234	130.5511	10	2.6
2011/10/26 06:58:02	31.9851	130.3898	4	4.6
2011/11/18 03:47:01	31.2137	130.7439	4	2.7
2011/11/24 08:16:19	31.6692	130.9842	94	4.5
2012/03/10 19:08:29	31.6142	131.0866	67	4.4
2012/03/28 08:29:09	31.6543	130.7816	3	1.9
2012/04/21 10:33:02	31.6325	131.0113	69	2.3
2012/04/28 20:38:08	31.9307	130.8100	1	2.5
2012/05/12 09:38:36	32.0220	130.4281	4	2.2
2012/05/22 11:12:30	31.7252	130.9527	85	2.7
2012/06/26 17:27:09	32.0945	130.5258	4	3.3
2012/08/16 19:38:39	31.6298	130.7851	3	3.0
2012/08/25 04:44:34	31.3315	130.5790	6	2.9
2012/08/28 02:17:53	31.6168	130.8757	90	2.9
2012/09/20 15:06:00	31.2971	130.4280	168	3.9
2012/09/29 17:12:52	32.1271	130.2041	9	3.0
2012/10/18 16:50:31	31.8415	130.7713	7	2.9
2012/11/30 13:21:17	32.1385	130.3228	4	2.9
2012/12/01 22:56:19	32.1278	130.3268	4	2.3

2012/12/04 07:31:07	31.5596	131.0367	67	2.9
2013/01/11 16:12:01	31.9645	130.6566	3	2.6
2013/04/20 06:35:16	31.2766	130.5424	149	3.9
2013/04/20 15:22:29	31.9791	130.3861	4	2.9
2013/04/24 14:42:07	31.9826	130.4996	4	2.5
2013/05/29 11:02:57	31.9821	130.3909	4	3.4
2013/08/31 04:06:44	31.5935	131.1229	69	3.1
2013/09/09 07:42:23	31.7859	130.4540	8	2.7
2013/09/17 05:09:40	31.1852	130.9534	63	3.6
2013/10/15 17:46:42	31.2380	130.4566	159	4.6
2013/10/26 01:55:03	31.2176	130.3796	164	3.6
2013/11/02 00:18:34	31.2582	130.3910	167	4.3
2013/11/30 19:04.19	31.3574	130.4927	158	4.2
2013/12/05 18:58:25	32.1274	130.1654	12	2.8
2014/01/11 22:01:00	32.0635	130.6771	4	2.3
2014/02/16 17:13:58	31.7322	130.8833	8	2.6
2014/03/01 17:07:03	32.1373	130.3468	11	2.6
2014/03/22 16:24:51	31.2714	130.4444	163	4.0
2014/03/22 23:38:50	31.2655	130.5121	8	3.0
2014/04/21 13:08:55	31.5047	130.4101	3	2.1
2014/05/16 03:59:42	31.5747	131.1422	67	2.9
2014/05/23 10:06:02	31.3755	130.5817	5	2.3
2014/07/12 20:20:03	31.2926	130.3971	165	4.3
2014/08/01 07:38:43	31.8279	130.2691	4	2.1
2014/09/10 05:27:14	31.9286	130.8065	1	2.6
2014/09/11 22:42:10	31.2067	130.7031	4	3.3
2014/10/15 15:39:33	31.3386	131.1236	50	2.8
2014/11/02 00:03:59	31.3616	130.4482	172	3.8
2014/11/15 05:56:41	31.3698	130.5362	155	3.7
2014/12/20 04:01:29	31.2997	130.4447	163	4.0
2014/12/26 04:27:25	31.3345	131.1200	56	3.2
2014/12/28 22:03:21	31.8530	130.7346	7	2.2
2015/02/04 07:29:14	31.2771	130.4994	154	4.4
2015/02/09 00:22:03	31.5431	130.5832	123	2.2
2015/02/14 05:55:42	31.9037	130.5519	8	2.8
2015/02/26 00:30:43	32.0940	130.1650	4	3.2
2015/03/09 18:41:35	31.2946	130.5515	8	2.0
2015/03/23 08:58:18	31.3756	130.5146	150	4.0

2015/03/29 12:23:22	31.4139	130.6173	137	4.4
2015/03/30 04:43:20	31.9922	130.4224	4	2.4
2015/03/31 05:45:24	31.5537	130.6232	7	2.0
2015/03/31 07:27:45	31.5508	130.6217	7	2.9
2015/04/04 23:41:35	31.8734	130.6756	182	2.6
2015/04/23 05:51:14	31.4643	131.0028	65	3.9
2015/05/24 09:09:38	31.2460	130.3785	157	4.3
2015/07/26 16:30:48	31.8780	130.5789	164	2.8
2015/07/27 01:51:20	31.9702	130.4195	4	3.0
2015/08/06 04:33:13	31.5852	130.7987	114	3.0
2015/08/15 10:47:30	31.5683	130.6633	1	2.3
2015/08/19 04:32:32	31.3934	130.5148	149	3.7
2015/09/15 23:11:10	31.8577	130.7262	146	3.1
2015/09/22 04:51:43	31.2760	130.4666	150	4.0
2015/09/30 16:39:14	31.7602	130.6197	159	2.6
2015/10/01 14:05:34	31.4754	130.4903	155	2.5
2015/10/03 04:09:57	32.0666	130.1868	5	3.9
2015/11/02 08:08:37	31.9052	130.8236	1	2.5
2015/11/04 22:45:17	31.4416	130.4720	163	2.6
2015/12/17 18:11:18	31.6596	131.0622	3	2.8
2016/01/01 11:14:34	31.1916	130.9918	58	3.0
2016/01/03 09:07:20	31.7862	130.9144	90	2.6
2016/01/19 15:45:59	31.4756	130.5438	140	2.7
2016/02/12 04:41:10	31.8283	130.2676	4	2.3
2016/02/17 16:50:30	31.5100	130.4633	154	2.5
2016/02/27 12:11:02	32.1330	130.5165	4	2.7
2016/03/05 10:46:10	31.8072	130.6839	151	2.6
2016/03/20 09:11:52	31.2537	130.5840	10	2.6
2016/04/14 03:36:14	31.3062	130.3816	172	3.6
2016/05/05 02:45:24	31.4865	130.4968	159	2.6
2016/05/25 02:22:43	31.7953	130.6302	177	2.8
2016/06/04 05:14:03	31.8401	131.1066	73	2.8
2016/07/03 01:33:29	31.9763	130.4212	7	2.4
2016/07/04 00:17:53	31.4962	130.5060	161	3.4
2016/07/05 07:49:34	31.3170	130.4022	165	2.7
2016/07/13 17:07:45	31.5505	130.5608	156	3.1
2016/07/13 20:36:04	31.2784	130.3862	167	3.4
2016/07/16 19:01:30	31.5436	130.5075	150	2.9

2016/07/19 21:17:19	31.4414	130.4842	162	3.5
2016/08/05 21:31:14	31.5575	130.6025	144	3.1
2016/08/08 05:10:11	31.6323	130.7860	3	2.1
2016/08/17 06:39:02	31.9788	130.3832	3	2.8
2016/09/01 01:30:16	31.8290	130.6488	157	2.8
2016/10/04 08:23:40	31.7926	130.5479	180	3.4
2016/10/16 05:54:02	31.7209	130.5877	157	2.5
2016/11/08 18:20:39	31.2516	130.6199	9	2.3
2016/11/11 15:11:20	31.8510	130.5604	191	3.0
2016/11/18 12:07:34	31.2008	130.8302	8	2.7
2016/11/26 07:44:05	31.6434	130.6941	138	4.2
2016/12/01 13:28:39	31.7624	130.6053	167	3.4
2016/12/12 22:50:00	31.3791	130.7093	73	2.7
2016/12/17 12:20:13	32.0109	131.0552	102	4.3
2016/12/21 19:02:32	31.7223	130.7376	120	3.9
2016/12/25 01:49:22	31.4896	131.2130	53	3.4
2017/01/02 12:13:58	31.8126	130.6440	163	2.8
2017/01/03 22:49:35	31.8811	130.4111	206	2.7
2017/01/07 02:31:09	31.3962	130.6175	8	2.7
2017/01/10 00:28:03	31.3155	130.4284	172	2.5
2017/01/12 13:39:16	31.1485	130.8846	61	3.2
2017/01/18 07:23:21	31.8417	131.2583	63	3.4
2017/01/22 11:06:41	31.8535	130.5320	185	3.5
2017/01/31 16:28:53	31.3920	130.6214	8	2.5
2017/02/10 19:02:48	31.3909	130.6145	6	2.5
2017/02/11 10:02:07	32.0342	131.0868	101	4.4
2017/02/23 06:47:51	31.9856	130.4201	4	3.1
2017/03/07 01:05:23	31.6815	130.3961	174	2.5
2017/03/07 05:36:04	31.7858	130.7824	119	3.3
2017/03/11 21:10:25	31.3861	130.6221	11	4.1
2017/03/12 05:03:48	31.7690	131.0077	91	3.4
2017/03/19 21:56:58	31.2597	131.1122	56	3.0
2017/03/22 19:44:08	31.5910	130.7350	129	3.8
2017/05/02 20:37:53	31.5509	130.5567	157	3.1
2017/05/19 15:55:48	31.8020	130.7940	6	3.1
2017/06/12 15:53:19	31.6088	130.8631	93	4.1
2017/07/02 06:49:31	31.5753	130.9130	77	3.5
2017/07/04 15:55:45	31.5816	130.7082	134	3.2

2017/07/12 05:13:10	31.4050	130.6242	10	2.0
2017/07/18 05:05:21	31.6059	131.0078	73	3.9
2017/08/08 17:46:32	31.4859	130.6002	124	3.4
2018/01/03 11:39:19	31.3334	130.5116	151	2.7
2018/01/09 06:58:26	31.3813	130.6417	4	2.5
2018/01/13 11:05:15	31.3812	130.6416	4	2.7
2018/01/15 05:05:45	31.3814	130.6416	3	2.5
2018/01/17 17:03:00	31.2846	130.4872	162	3.0
2018/01/19 12:03:00	31.2561	130.3799	172	3.1
2018/01/26 07:12:04	31.3166	130.4269	164	3.1
2018/01/27 01:56:16	31.3774	130.4035	159	2.6
2018/01/29 04:49:58	31.4615	130.8198	107	3.6
2018/01/29 12:11:53	31.4004	130.6179	8	2.7
2018/02/03 06:51:40	31.4264	130.4859	161	3.0
2018/02/05 11:52:24	32.0165	130.3234	12	3.3
2018/02/14 15:04:29	31.2778	130.4141	162	3.4
2018/02/15 14:53:52	31.3232	130.4602	164	4.1
2018/02/28 04:39:11	31.3270	130.6214	10	2.4
2018/02/28 07:50:18	31.2854	130.4996	148	2.9
2018/03/15 20:59:44	32.0845	130.9954	111	2.9
2018/03/21 12:45:25	31.4050	130.4717	158	2.0
2018/03/24 01:36:48	31.4083	130.5160	159	3.1
2018/03/25 03:38:53	31.3284	130.6233	6	2.2
2018/03/26 20:14:00	31.3125	130.4194	164	2.5
2018/04/02 23:54:10	31.3672	130.3669	178	3.1
2018/04/05 04:14:42	31.3962	130.6206	7	2.3
2018/04/07 02:00:10	31.4146	130.5020	162	3.1
2018/04/08 13:54:27	31.3261	130.6145	8	2.7
2018/04/11 10:00:30	31.2867	130.4453	159	2.6
2018/04/24 20:33:59	32.0382	130.8474	148	2.9
2018/04/26 01:02:31	31.7145	131.0621	12	2.3
2018/05/03 08:10:49	31.8542	130.7951	133	3.3
2018/05/04 21:57:17	32.0133	131.4350	17	2.6
2018/05/06 02:21:17	31.8860	130.6872	163	2.7
2018/05/07 21:40:20	32.1500	130.1417	12	2.0
2018/05/24 18:59:32	31.6438	130.4335	200	3.0
2018/05/24 20:41:46	31.9862	131.0019	108	2.8
2018/05/25 17:43:11	32.0502	131.0612	82	2.9

2018/05/26 19:21:03	31.4033	130.4233	153	2.0
2018/06/03 14:12:18	31.3937	130.6234	9	2.4
2018/06/22 20:45:38	31.2923	130.5267	148	3.0
2018/06/27 20:47:47	31.9242	130.6758	176	4.2
2018/06/30 17:11:08	31.3283	130.6275	9	2.4
2018/07/09 21:17:20	31.8794	131.1402	3	2.2
2018/07/16 04:43:31	31.4051	130.6223	4	2.2
2018/07/26 13:22:01	31.3996	130.4691	163	3.0
2018/07/31 23:42:58	31.2948	130.4525	162	2.8
2018/08/26 21:58:19	31.4838	130.7324	118	2.8
2018/09/03 04:13:02	31.3080	130.4283	168	2.9
2018/09/03 08:18:23	31.2517	130.3950	155	2.3
2018/09/05 04:53:04	31.4481	130.6586	130	3.5
2018/09/07 23:25:01	31.9316	130.8535	1	2.4
2018/09/18 05:07:12	31.9359	130.8003	1	2.4
2018/09/22 10:40:54	31.2564	130.3824	165	3.5
2018/09/23 15:46:19	31.3724	130.4284	157	2.8
2018/09/25 01:05:17	31.9783	131.3850	55	2.8
2018/09/25 21:29:32	31.6150	130.5450	164	2.1
2018/09/25 23:37:51	31.4454	130.4584	160	2.7
2018/10/02 09:04:46	31.9384	130.8064	2	2.5
2018/10/12 14:49:31	31.3116	130.3806	166	2.6
2018/10/25 14:36:39	31.2715	130.3980	168	3.6
2018/10/26 17:45:34	31.2391	130.6541	123	4.6
2018/10/30 18:10:45	31.8173	131.0169	93	2.9
2018/11/19 04:42:43	31.4233	130.5983	133	1.5
2018/11/20 23:09:01	31.5000	130.7066	119	2.3
2018/12/07 06:59:07	31.5416	130.7450	119	1.5
2018/12/08 08:44:18	31.5066	130.5033	7	2.0
2018/12/15 06:24:39	31.7966	130.5433	187	1.7
2018/12/27 03:25:38	31.4950	130.4633	152	1.5
2018/12/27 20:23:24	31.6350	130.7200	131	1.7
2018/12/30 09:03:14	31.6283	130.7700	6	2.3
2019/01/01 12:22:15	31.5983	130.5266	11	1.9
2019/01/11 03:49:25	31.7333	130.7700	8	1.7
2019/01/17 04:06:11	31.4133	130.5350	151	1.6
2019/01/17 20:00:52	31.6133	130.6066	141	1.8
2019/01/27 15:54:17	31.7250	130.6166	158	1.8

2019/02/14 02:40:19	31.4050	130.4533	147	1.6
2019/02/25 18:12:38	31.8483	130.8300	8	1.8
2019/02/26 21:21:39	31.8016	130.8700	110	1.8
2019/03/01 14:19:24	31.8816	130.7250	142	1.9
2019/03/05 07:52:54	31.4266	130.4866	146	1.6
2019/03/10 03:06:25	31.6400	130.6733	133	1.9
2019/03/10 15:43:06	31.8416	130.6900	9	2.8
2019/03/13 00:53:02	31.7983	130.6733	150	1.6
2019/03/18 03:29:23	31.5066	130.4966	151	1.7
2019/03/20 20:10:15	31.7483	130.7700	113	1.7
2019/03/22 07:43:05	31.8416	130.6933	9	2.2
2019/03/23 08:18:33	31.5333	130.7483	115	1.9
2019/03/24 04:55:55	31.4733	130.4050	165	1.9
2019/04/02 13:17:58	31.8400	130.6950	9	1.7
2019/04/06 02:01:14	31.5083	130.5533	9	2.1
2019/04/23 09:46:53	31.8633	130.7516	140	1.8
2019/05/07 15:07:47	31.8433	130.7000	9	1.9
2019/05/08 13:08:50	31.5616	130.5366	148	1.6
2019/05/20 23:13:47	31.6216	130.4400	182	1.9
2019/05/24 12:47:27	31.4416	130.4966	155	2.7
2019/06/14 09:52:28	31.8650	130.7000	8	2.4
2019/06/15 16:26:56	31.4983	130.5083	164	2.0
2019/06/20 19:22:33	31.6666	130.4100	200	2.6
2019/06/25 22:25:27	31.8683	130.6983	8	2.0
2019/07/14 16:53:18	31.5283	130.7583	117	1.5
2019/07/30 03:44:49	31.4400	130.6783	125	1.9
2019/08/04 05:13:19	31.5683	130.5750	152	1.5
2019/08/06 00:43:16	31.8300	130.6400	163	2.1
2019/08/10 16:56:29	31.7700	130.9700	81	1.5
2019/08/14 11:18:20	31.8266	130.9033	96	2.1
2019/08/17 20:21:00	31.8533	130.8050	8	2.0
2019/08/19 12:35:50	31.6833	130.5233	174	2.3
2019/09/05 23:09:21	31.8350	130.5750	151	2.1
2019/09/07 17:49:08	31.8416	130.7400	134	1.5
2019/09/15 00:26:37	31.8650	130.7483	133	2.1
2019/09/24 11:26:34	31.8366	130.6616	150	2.0
2019/09/26 20:38:58	31.4533	130.4916	160	1.5
2019/10/16 21:13:31	31.4233	130.6083	8	2.2

2019/10/18 03:58:31	31.4233	130.6066	7	1.5
2019/10/26 05:27:52	31.5683	130.7233	124	2.7
2019/11/05 18:53:49	31.5450	130.6433	123	2.0
2019/11/18 15:19:28	31.5333	130.5450	151	1.7
2019/11/19 22:10:24	31.4016	130.4566	164	2.3
2019/11/26 06:11:43	31.5716	130.5466	160	1.8
2019/12/02 16:00:24	31.4400	130.6533	133	1.7
2019/12/08 15:58:07	31.4916	130.4350	164	2.0
2019/12/12 02:31:22	31.7716	130.6066	171	1.8
2019/12/19 17:41:26	31.5016	130.4166	6	1.6
2019/12/22 12:07:48	31.4133	130.9033	68	2.1
2019/12/22 15:19:26	31.8450	130.6933	7	1.5
2019/12/23 02:12:03	31.8450	130.7000	9	2.1
2020/01/02 03:13:31	31.4117	130.6900	117	2.4
2020/01/07 17:25:55	31.4117	130.5417	147	2.6
2020/01/16 09:10:32	31.7750	130.7350	9	1.9
2020/01/16 18:50:15	31.3500	130.3733	155	2.1
2020/01/17 18:44:56	31.2983	130.3850	161	2.6
2020/01/19 14:33:11	31.4083	130.4683	167	2.1
2020/01/23 04:50:42	31.5350	130.4883	168	2.2
2020/01/25 07:07:53	31.4583	130.6067	8	1.5
2020/01/26 02:19:34	31.2467	130.8533	90	1.5
2020/01/28 02:58:13	31.8767	130.6950	6	1.5
2020/01/29 06:12:25	31.6417	130.7633	5	2.1
2020/02/10 14:03:46	31.9433	130.8083	1	2.3
2020/02/14 02:00:58	31.8733	130.7067	8	1.6
2020/02/14 02:51:22	31.5717	130.5900	11	1.5
2020/02/17 08:55:00	31.8233	130.2117	11	2.0
2020/02/22 00:22:22	31.3117	130.5750	9	3.3
2020/02/22 16:14:26	31.3100	130.5733	7	1.6
2020/02/22 17:44:01	31.3067	130.5717	10	1.6
2020/02/24 15:00:12	31.3100	130.5767	7	2.2
2020/03/04 04:48:47	31.6983	131.1433	59	1.7
2020/03/04 17:30:37	31.9067	130.6517	160	2.8
2020/03/05 02:08:37	31.3450	130.4117	163	2.7
2020/03/08 06:44:54	31.3100	130.5750	7	2.1
2020/03/09 12:08:08	31.3417	130.3983	164	2.1
2020/03/10 04:14:07	31.3067	130.5717	10	1.5

2020/03/12 03:27:15	31.4200	130.5467	148	2.2
2020/03/12 19:36:33	31.3117	130.5717	6	1.5
2020/03/19 22:40:42	31.3383	130.6200	6	1.5
2020/03/22 12:25:28	31.5600	130.6250	7	2.0
2020/03/22 13:42:05	31.3033	130.2800	181	2.7
2020/03/24 22:37:18	31.2550	130.3533	164	2.1
2020/03/25 02:50:21	31.3500	130.4933	151	3.1
2020/03/26 03:03:38	31.5617	130.6233	6	1.6
2020/03/27 20:14:57	31.2967	130.2817	177	2.3
2020/03/28 07:35:32	31.8250	130.2150	10	2.0
2020/04/06 21:40:41	31.3583	130.5483	6	1.6
2020/04/14 12:52:19	31.3083	130.4400	155	2.3
2020/04/14 20:04:32	31.0617	130.3133	150	2.2
2020/04/18 10:13:37	31.3383	130.6117	7	1.5
2020/04/30 10:59:30	31.2600	130.4300	160	3.0
2020/05/05 16:15:32	31.2900	130.4017	160	2.1
2020/05/05 17:50:00	31.3083	130.4150	155	2.1
2020/05/16 18:17:52	31.3400	130.6250	7	1.6
2020/05/27 14:00:43	31.3433	130.5167	143	2.3
2020/06/05 14:09:25	31.2567	130.4233	159	2.1
2020/06/12 12:43:17	31.4117	130.7783	83	1.6
2020/06/16 13:39:55	31.3733	130.4383	158	2.6
2020/06/16 13:48:34	31.3667	130.4600	161	2.2
2020/06/27 09:03:43	31.3467	130.4400	159	2.5
2020/06/27 19:32:06	31.2433	130.6317	9	1.8
2020/07/04 06:50:36	31.4183	130.5633	10	1.5
2020/07/10 21:42:50	31.3900	130.5217	144	2.1
2020/07/23 01:45:42	31.3317	130.6150	7	1.7
2020/07/24 05:07:10	31.3617	130.4533	155	2.1
2020/07/24 09:49:33	31.2883	130.5133	145	2.4
2020/07/28 00:11:08	31.3950	130.4367	7	1.9
2020/08/07 02:49:14	31.4750	130.4500	162	2.3
2020/08/13 05:44:11	31.6483	130.8667	89	1.6
2020/08/13 18:40:04	31.3517	130.4483	165	2.6
2020/08/15 05:31:32	31.2667	130.4200	159	2.1
2020/08/19 13:37:42	31.2867	130.4700	151	2.6
2020/08/22 04:57:23	31.4150	130.5600	9	1.5
2020/08/22 18:28:58	31.2983	130.3450	167	3.3

2020/09/06 12:57:53	31.1883	130.8967	58	2.0
2020/09/11 17:27:25	31.8250	130.2183	10	1.8
2020/09/15 15:15:23	31.3367	130.4017	165	2.4
2020/09/23 20:06:22	31.8483	130.7067	7	2.0
2020/09/28 19:19:35	31.3317	130.6150	9	1.8
2020/09/29 05:04:02	31.5150	130.5500	154	2.5
2020/10/01 11:22:08	31.3333	130.6200	8	2.3
2020/10/02 05:46:04	31.2717	130.7050	108	1.8
2020/10/05 01:49:14	31.8983	130.6817	165	3.3
2020/10/06 10:55:40	31.3150	130.3767	158	2.1
2020/10/08 00:23:55	31.1017	130.8033	6	2.0
2020/10/24 01:54:39	31.6667	130.7350	7	1.9
2020/10/24 10:23:45	31.5417	130.0633	6	2.2
2020/10/24 11:04:20	31.5617	130.6317	30	1.5
2020/10/25 15:43:42	31.3900	130.6200	10	2.3
2020/10/30 05:10:56	31.3283	130.6166	6	2.9
2020/10/31 22:36:44	31.5733	130.3300	8	2.9
2020/11/05 08:15:03	31.5700	130.3383	9	1.6
2020/11/06 21:06:25	31.3117	130.5517	7	1.6
2020/11/14 10:19:55	31.9283	131.1350	70	2.5
2020/11/26 09:15:51	31.5167	130.0733	3	2.3
2020/11/27 09:33:23	31.3066	130.4683	154	2.5
2020/11/29 13:26:22	31.5383	130.0617	5	2.1
2020/12/01 09:09:24	31.3033	130.5833	9	1.5
2020/12/10 12:47:12	31.4083	131.2883	46	2.6
2020/12/19 05:09:59	31.4000	130.6083	9	2.2
2020/12/25 23:21:57	31.4983	130.5700	5	2.6
2020/12/31 15:31:13	31.4317	130.6167	8	1.7
2021/01/01 07:35:07	31.7417	131.1117	6	1.6
2021/01/08 06:03:39	31.5700	130.6150	6	1.6
2021/01/09 06:57:10	31.8617	131.0233	75	1.7
2021/01/14 22:06:23	31.3983	130.6083	7	2.4
2021/01/15 04:04:01	31.8283	131.0817	9	1.5
2021/01/17 09:16:15	31.3183	131.1650	52	1.8
2021/01/20 03:09:23	31.4983	130.4183	5	1.7
2021/01/24 06:16:06	31.8333	130.7983	5	1.9
2021/01/28 02:47:01	31.5483	130.0650	6	2.0
2021/02/06 02:44:15	31.1900	131.2767	44	1.5

2021/02/12 12:23:06	31.9766	131.0200	102	2.5
2021/02/15 10:29:42	31.4550	130.6933	92	1.6
2021/02/21 23:27:55	31.9950	130.2616	10	2.7
2021/03/01 22:32:52	31.3250	130.6183	8	2.4
2021/03/03 11:37:13	31.3300	130.6183	9	2.5
2021/03/10 09:07:26	31.6600	130.7683	4	3.1
2021/03/11 05:14:42	31.6067	130.0700	8	2.0
2021/03/12 20:22:09	31.8467	130.7150	9	1.9
2021/03/15 19:31:24	31.3300	130.6200	6	2.8
2021/03/27 19:24:08	31.4133	130.5633	9	1.9
2021/04/02 06:38:28	31.7350	130.5216	8	2.8
2021/04/05 13:39:49	31.8250	130.2150	10	1.5
2021/04/05 21:35:57	31.6700	130.1400	10	1.5
2021/04/19 03:36:19	31.5050	130.6083	11	1.6
2021/04/27 05:27:59	31.3250	131.2817	47	1.8
2021/04/28 18:49:57	31.2650	130.5933	5	1.7
2021/04/29 04:55:10	31.2800	130.4300	154	2.5
2021/05/29 05:14:12	31.6983	130.5017	164	2.2
2021/06/06 01:40:58	31.7150	131.0450	67	2.0
2021/06/16 21:46:52	31.8833	131.1883	66	2.5
2021/07/09 06:04:58	31.5867	130.0867	9	2.1
2021/07/12 10:40:24	31.3917	131.2950	46	1.6
2021/07/19 22:32:21	31.5000	130.4167	5	1.7
2021/07/27 08:32:12	31.2900	130.7200	111	3.1
2021/07/29 18:31:24	31.3600	130.5483	7	1.5
2021/07/29 22:31:39	31.7133	131.1517	59	1.6
2021/08/08 08:49:01	31.2450	130.6150	8	3.5
2021/08/08 18:59:55	31.6900	130.1667	7	1.5
2021/08/12 04:17:24	31.1917	130.1867	7	2.0
2021/08/12 09:53:44	31.5633	130.5800	9	1.7
2021/08/12 19:26:41	31.2866	130.3650	158	2.5
2021/08/13 14:59:12	31.2617	130.6350	7	2.1
2021/08/18 22:11:40	31.8267	130.8933	95	1.6
2021/08/26 14:21:04	31.6883	131.0550	67	1.5
2021/08/30 03:55:34	31.6517	131.0633	63	1.6
2021/08/31 09:50:46	31.8433	130.9933	76	2.8
2021/09/06 02:21:28	31.2600	131.0683	53	2.0
2021/09/08 23:50:53	31.3967	130.6267	7	1.5

2021/09/09 03:56:52	31.7600	131.0383	76	1.6
2021/09/10 01:26:18	31.4683	130.5700	5	2.9
2021/09/11 12:04:01	31.3117	130.5750	9	1.9
2021/09/17 02:54:13	31.2700	130.3800	161	3.3
2021/09/25 05:17:37	31.6383	130.9667	88	1.9
2021/09/28 05:25:35	31.8233	130.9217	99	1.9
2021/09/30 05:58:17	31.3150	130.4466	157	2.8
2021/10/19 20:52:58	31.8617	131.0383	10	1.6
2021/10/30 19:18:47	31.3300	130.4283	152	2.7
2021/11/03 23:13:18	31.7683	130.7883	9	2.0
2021/11/09 21:10:29	31.3266	130.4250	164	2.7
2021/11/20 06:42:14	31.2283	130.6800	11	1.6
2021/11/21 16:07:15	31.8933	129.2700	5	1.8
2021/11/22 02:19:12	31.4183	130.9100	87	1.5
2021/11/26 17:04:23	31.6083	130.7750	4	1.5
2021/11/27 06:01:17	31.6267	130.7767	4	3.2
2021/11/29 07:13:54	31.9400	130.8116	1	3.3
2021/12/07 14:57:12	31.3783	130.5900	2	2.2
2021/12/09 14:59:47	31.3350	130.5000	154	2.9
2021/12/18 22:56:39	31.8583	130.9433	94	1.6
2021/12/18 23:45:48	31.9700	130.4800	9	2.8
2021/12/29 15:36:24	31.4767	130.5883	7	1.5

## (1) 1.2. レシーバ関数による始良カルデラ地下構造モデルの高精度化

### 1) はじめに

南九州下にはフィリピン海プレートが深さ 200 km まで沈み込んでいる。この沈み込みに伴い、「水」が地下深くまで運ばれ、マグマの生成に関与すると考えられている (Tatsumi, 1989)。桜島火山では、地球物理学的アプローチにより 20 km 以浅の構造についてはマグマだまりの位置や大きさが推定され、噴火過程のモデル化の研究が進められている (井口, 2007)。しかしながら、20 km 以深の構造は地震探査や地震波トモグラフィでは十分に解像されず、どの程度の大きさのマグマだまりがどの深さに存在するかはよくわかっていない。これを解明することは、火山爆発指数が「5」を超える非常に大規模な噴火の予測において重要な課題である。

レシーバ関数解析は、観測点に小さな入射角で到達する地震波に含まれる PS 変換波から、観測点下の S 波速度やその不連続面を推定する手法である。地下深部の構造を良い分解能で解像できるのが利点である。Abe et al. (2013) は、九州地域における定常観測点の地震波形データを用いたレシーバ関数解析を行い、フィリピン海プレートの沈み込みにより「水」が深さ 70~90 km まで運び込まれていることを示した。澁谷・他 (2019) は、宮崎-阿久根測線と宮崎-桜島測線において、臨時観測点を追加することにより、観測点間隔が約 5 km のリニアアレイ観測を行い、詳細なレシーバ関数解析を行った。

令和元年度には、始良カルデラ周辺で火山活動研究センターが実施している定常観測点と臨時観測点の地震波形データを用いたレシーバ関数解析を行い、S 波速度不連続面を 3 次的にイメージングした。その結果、深さ 20 km を中心として、低速度層の上面が広範囲に分布していることが分かった。令和 2 年度には、桜島島内の観測点で得られたレシーバ関数波形をインバージョンして求めた 1 次元 S 波速度構造をマッピングすることにより、S 波速度構造の 3 次的分を推定した。その結果、深さ 20 km では桜島とその周辺域が全体的に低速度であること、深さ 30 km でも桜島南部から北側の錦江湾下を経て東側の錦江湾下までの領域 (始良カルデラの南部) は低速度であることが分かった。

始良カルデラ全域の速度構造を議論するためには、桜島島内の観測点に加えて、錦江湾の湾奥部の海岸周辺の観測点でのレシーバ関数が必要となる。そこで今年度は、桜島の北東に位置する新島 (SHN)、湾奥北東部の福山 (FUK)、および最近設置された湾奥北部の弁天島 (BEN) に着目して解析を行った。さらに、湾奥部を囲む広範囲の定常観測点と本プロジェクトの臨時観測点についても、2019 年と 2020 年のレシーバ関数を追加して、再解析を行った。

### 2) レシーバ関数解析

レシーバ関数とは、遠地地震の P 波部分において水平動から上下動をデコンボリューションして、観測点下の地震波速度不連続面で生成される PS 変換波を抽出した波形である (澁谷・他, 2009)。このデコンボリューションには時間拡張マルチテーパ法 (Shibutani et al., 2008) を用いた。

レシーバ関数には、入射 P 波が地震波速度不連続面で P 波のまま透過する Pp 相に加え、後続波として、入射 P 波が不連続面で S 波に変換して透過する Ps 相、入射 P 波が地表面で PP 反射し、不連続面で PS 反射する PpPs 相、入射 P 波が地表面で PS 反射し、不連続面で SS 反射する PpSs 相が含まれる。

以下では、簡単のために、後続 3 相の中で振幅が最も大きいことが期待できる Ps 変換波について議論する。Ps 変換波は、高速度層上面で変換した場合は正の極性を、低速度層上面で変換した場合は負の極性をもつ。

レシーバ関数を Ps 変換波の共通変換点で重合し、S 波速度不連続面を描像することをレシーバ関数スタッキングという。Ps 変換点の位置の計算には、気象庁が震源決定に用いている水平成層の地震波速度モデル JMA2001（上野・他、2002）を用い、1 km×1 km×1 km の立方体の中の Ps 変換点についてレシーバ関数の振幅を足し合わせる。

### 3) 結果

今年度の研究において、2019 年と 2020 年の遠地地震に対しレシーバ関数を計算し、追加した観測点を図 1 に示す。

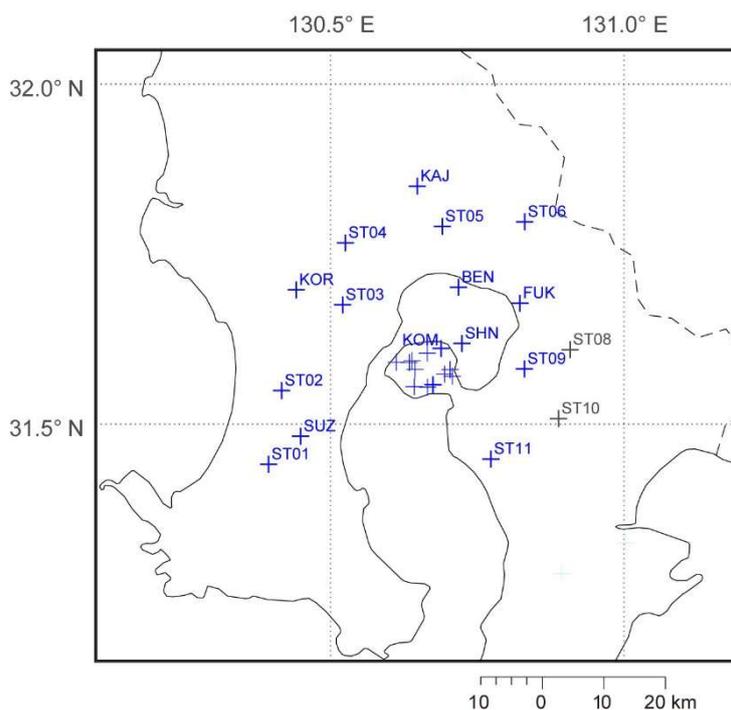


図 1-1-3-1. レシーバ関数を追加した地震観測点の分布 (+)。灰色で示す 2 観測点、ST08 と ST10 については、波形データに問題があり、レシーバ関数を追加できなかった。

始良カルデラの地下構造を議論するうえで重要と考えられる錦江湾奥の海岸付近の 3 観測点、弁天島 (BEN)、新島 (SHN)、および福山 (FUK) のレシーバ関数波形をそれぞれ図 1-1-3-2、図 1-1-3-3、および図 1-1-3-4 に示す。

図 1-1-3-2 の左図は、弁天島 (BEN) で得られたレシーバ関数の R 成分の波形を到来方向 (BAZ) 順に並べたものである。複雑な波形をしているが、到来方向の近い波形は似た特徴を示す。右図は、到来方向の  $10^\circ$  ごとに  $\pm 10^\circ$  の範囲に入るレシーバ関数を重合したものである。これによりノイズや小規模な不均質構造からの散乱波を抑え、S/N 比を向上させることができる。レシーバ関数の到来方向による違いが顕著である。このような特徴は、観測点下の構造が水平方向にも鉛直方向にも不均質であることを示唆している。

到来方向が  $120 \sim 160^\circ$  の範囲では、時刻 0 秒に見られる直達 P 波に対応する Pp 相の極性が負である。この原因については、第 4 節で議論する。

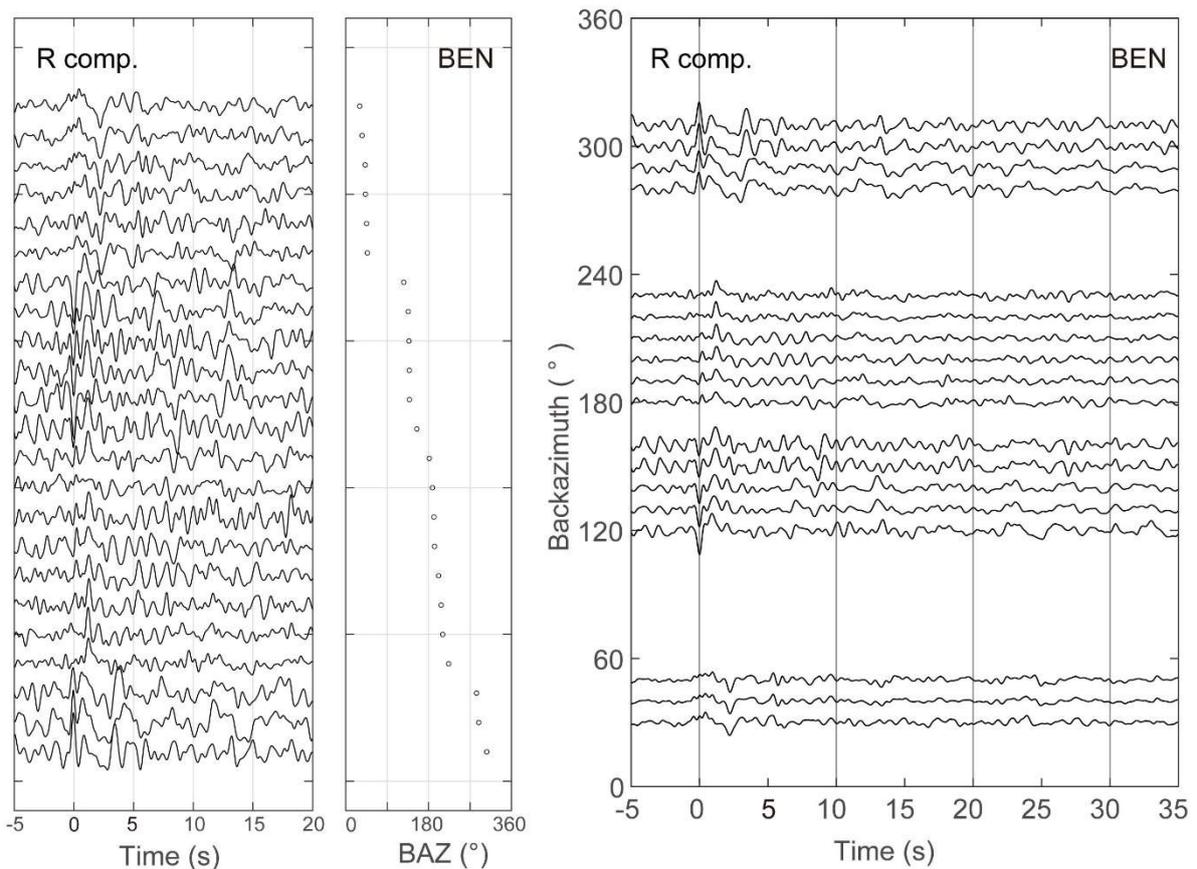


図 1-1-3-2. 観測点 BEN におけるレシーバ関数の R 成分の波形。(左図) 到来方向に並べた個々の波形。(右図) 到来方向の  $10^\circ$  ごとに  $\pm 10^\circ$  の範囲に入るレシーバ関数を重合した波形。左図と右図で到来方向の並べ方が逆であることに注意すること。

図 1-1-3-3 に新島 (SHN) で得られたレシーバ関数の R 成分の波形を示す。左図は短周期地震計の波形データを用いた結果、右図は広帯域地震計の波形データを用いた結果である。左図のレシーバ関数を見ると、到来方向 (BAZ) が近いものでも波形がかなり違っていることに気づく。図 1-1-3-2 の左図に示す弁天島 (BEN) のレシーバ関数と比較すると、そのことがよくわかる。観測点下の地下構造が不均質であっても、到来方向の数度の違いで、レシーバ関数がこのように違うことは考えにくい。広帯域地震計の波形から求められた右図のレシーバ関数はさらに暴れている。到来方向が  $41^\circ$  と  $202^\circ$  の付近のレシーバ関数はデルタ関数的な波形を示すものもある。

これらの到来方向の近傍のレシーバ関数の波形と比べて、到来方向によって、不連続的に変化している。新島 (SHN) のレシーバ関数がこのような特徴を示すことの原因については、特異な地下構造の影響ではなく、観測装置の不具合等の人為的なものの可能性が強く考えられる。

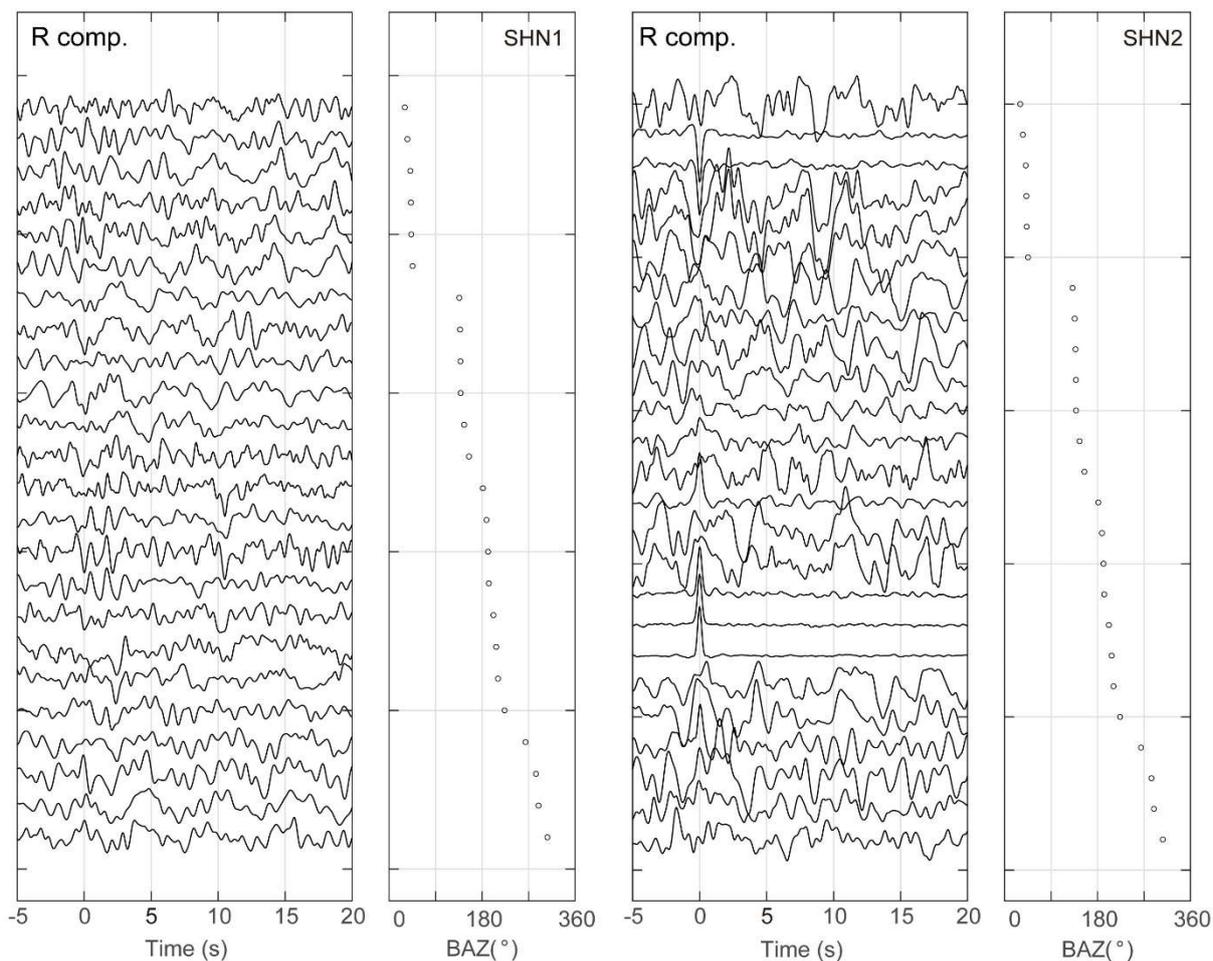


図 1-1-3-3 観測点 SHN におけるレシーバ関数の R 成分の波形。(左図) 短周期地震計の波形データから求められたレシーバ関数。(右図) 広帯域地震計の波形データから求められたレシーバ関数。

図 1-1-3-4 に福山 (FUK) で得られたレシーバ関数の R 成分の重合波形を示す。重合の方法は弁天島 (BEN) と同じである。左図は短周期地震計の波形データを用いた結果、右図は広帯域地震計の波形データを用いた結果である。どちらの図からも、到来方向とともにレシーバ関数の波形が連続的に変化すること、および到来方向が  $60^\circ$  以上違えばレシーバ関数の波形もかなり違ってくることが見て取れる。また、短周期地震計の波形データから計算したレシーバ関数の波形と広帯域地震計の波形データから計算したレシーバ関数の波形がよく一致していることもわかる。ただし、到来方向が  $170^\circ \sim 270^\circ$  のレシーバ関数については、時刻 0 秒の直達 P 波に対応する Pp 相に違いがみられる。右図のレシーバ関数では時刻 0 秒に明瞭なピークが見られるのに対し、左図には対応するピークが見られない。福山 (FUK) での  $170^\circ \sim 270^\circ$  の到来方向はちょうどカルデラの方角になるのは興味深い。これについても第 4 節で議論する。

図 1-1-3-5 に始良カルデラ周辺におけるレシーバ関数イメージを深さ 10 km から深さ 35 km まで深さ 5 km ごとに示す。深さ 10 km では、桜島を中心に周辺域まで高速度層上面を示す赤色のイメージとなっている。しかし、これは、桜島島内の観測点におけるレシーバ関数が、厚さ 1 km 程度の非常に低速度 ( $V_s \approx 1.0$  km/s) の表層の影響を受けて、時刻 1 秒程度まで幅の広い正のピークをもつためである。昨年度行った波形インバージョンの結果では、深さ 13~14 km までの上部地殻は、標準的な S 波速度 ( $V_s \approx 3.5$  km/s) を示すところもあれば、かなりの低速度 ( $V_s \approx 2.6$  km/s) を示すところもあった。

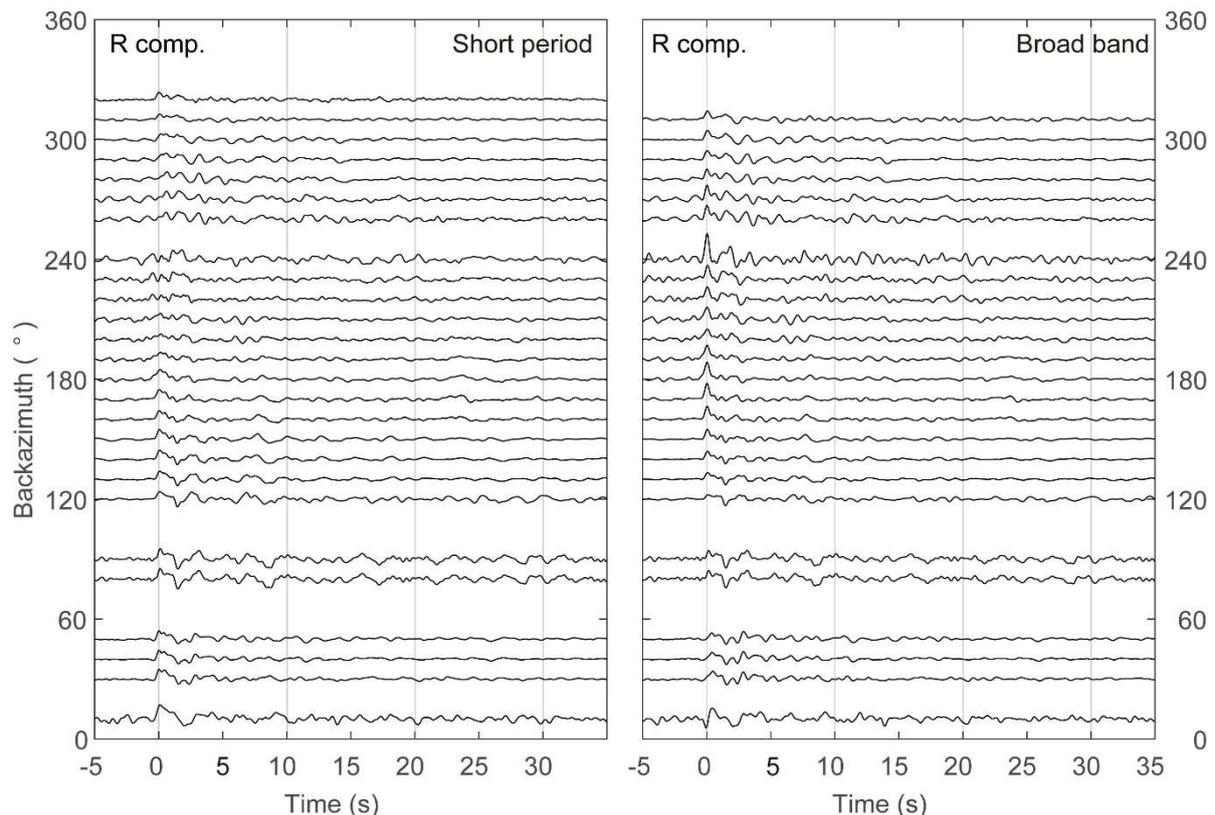


図 1-1-3-4 観測点 FUK におけるレシーバ関数の R 成分の重合波形。(左図) 短周期地震計の波形データから求められたレシーバ関数。(右図) 広帯域地震計の波形データから求められたレシーバ関数。

深さ 20~25 km では、カルデラのほぼ全域に低速度層上面を示す青いイメージが見られる。波形インバージョンでは、上部地殻の下に深さ 24 km 程度まで低速度の領域が見られた。レシーバ関数イメージに見られる青いイメージはこの低速度領域に対応するものと考えられる。深さ 30 km においても桜島周辺のカルデラ内には低速度層上面を示す青いイメージが見られる。波形インバージョンによる 1 次元 S 波速度構造をマッピングした結果でも、深さ 30 km においてカルデラの中部から南部にかけて低速度異常域が見られた。深さ 35 km になると、低速度層上面を示す青いイメージは顕著でなくなる。

10 km 以深のイメージングにおいて、海岸近傍にある弁天島 (BEN) と福山 (FUK) が重要な役割を果たしているのが見て取れる。今回、新島 (SHN) では正常なレシーバ関数が得られず、イ

イメージングには活用できなかったが、今後、問題点を解決して、イメージングに使えるようにしなければならない。

図 1-1-3-5 に示す領域の北東部に位置する霧島火山では、低速度層上面を示す青いイメージが見られる深さが、15 km を中心として 10 km から 20 km までであるのに対し、桜島火山では、25 km を中心として 20 km から 30 km までであるのは興味深い。

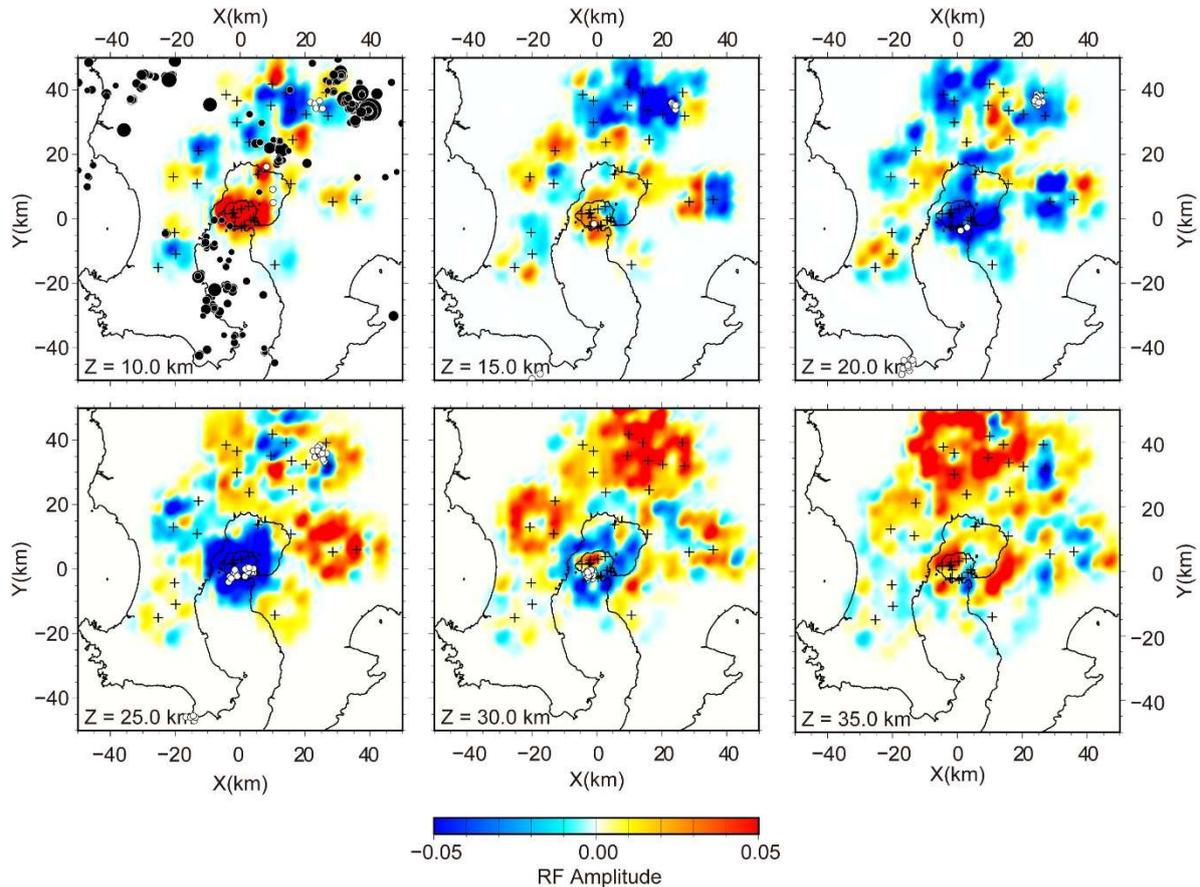


図 1-1-3-5 始良カルデラ周辺における深さ 10 km から深さ 35 km までの深さ 5 km ごとのレイバ関数イメージ。+はレイバ関数イメージングに用いた観測点の位置を示す。黒丸は通常の地震を、白丸は深部低周波地震を示す。

#### 4) 議論

##### 弁天島 (BEN) のレイバ関数における極性異常

第 3 節で触れたように、弁天島 (BEN) のレイバ関数の R 成分では、到来方向が 120~160° において、時刻 0 秒に見られる直達 P 波に対応する Pp 相の極性が負である (図 1-1-3-2)。P 波は進行方向に振動する縦波であるので、通常は、その上下成分と R 成分は同符号となる。したがって、レイバ関数の R 成分の Pp 相の極性は正になるはずである。それでは、弁天島 (BEN) の 120~160° の到来方向に見られるレイバ関数の Pp 相の負の極性はどうか。これは、図 1-1-3-6 に示すように、傾斜する速度不連続面を導入することで説明できる。スネルの法則は速度不連続面の法線に対して適用されるので、ある傾斜角をもった速度不連続面

に対し、updip 方向に P 波が入射する場合、不連続面の前後でのある速度比に対し、波線が図 6 のように屈折し、観測点には R 軸の逆向きから入射することが起こり得る。この場合、入射 P 波の上下成分と R 成分は異符号になるので、レスリー関数の R 成分の Pp 相の極性は負となる。弁天島 (BEN) では、 $120\sim 160^\circ$  の到来方向に対して負の Pp 相が見られるので、速度不連続面はこの方向に傾き下がっていると考えられる。弁天島 (BEN) は始良カルデラの北部に位置するので、南東方向に傾き下がる不連続面をもつ構造は考えられる。

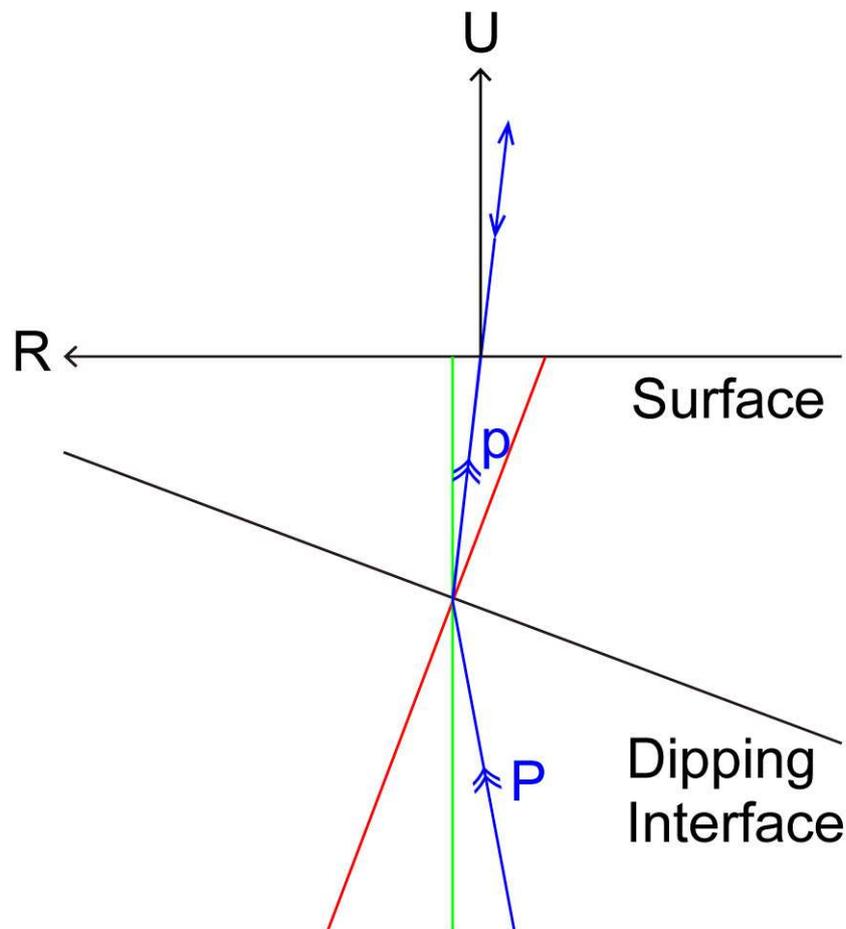


図 1-1-3-6 傾斜する速度不連続面で屈折する P 波の波線（青線）を示す模式図。赤線は速度不連続面の法線。緑線は地表から下した垂線。

福山 (FUK) の短周期地震計と広帯域地震計から得られるレスリー関数の違い

第 3 節の図 1-1-3-4 に示したように、到来方向が  $170\sim 270^\circ$  のレスリー関数の R 成分の Pp 相については、広帯域地震計で求めたものは明瞭なピークをもつが、短周期地震計で求めたものはピークが見られないという違いがあった。このような特徴を示すレスリー関数の一つについて、元の波形に戻って比較してみる。図 1-1-3-7 に伝達関数補正後の短周期地震計の 3 成分波形（左図）と広帯域地震計の 3 成分波形（右図）を示す。上下動成分と T 成分はよく似ているが、R 成分には違いがみられる。これがレスリー関数の R 成分の Pp 相の違いの原因であると考えら

れるが、それならなぜ広帯域地震計と短周期地震計の元の波形の R 成分に違いが生じたのかという疑問には明確には答えられない。短周期の S 波をより強く減衰するような構造が関係しているのかもしれない。なお、カルデラから離れる郡山 (KOM) では、短周期地震計から得たレシーバ関数と広帯域地震計から得たレシーバ関数において、福山 (FUK) のような違いは見られない。

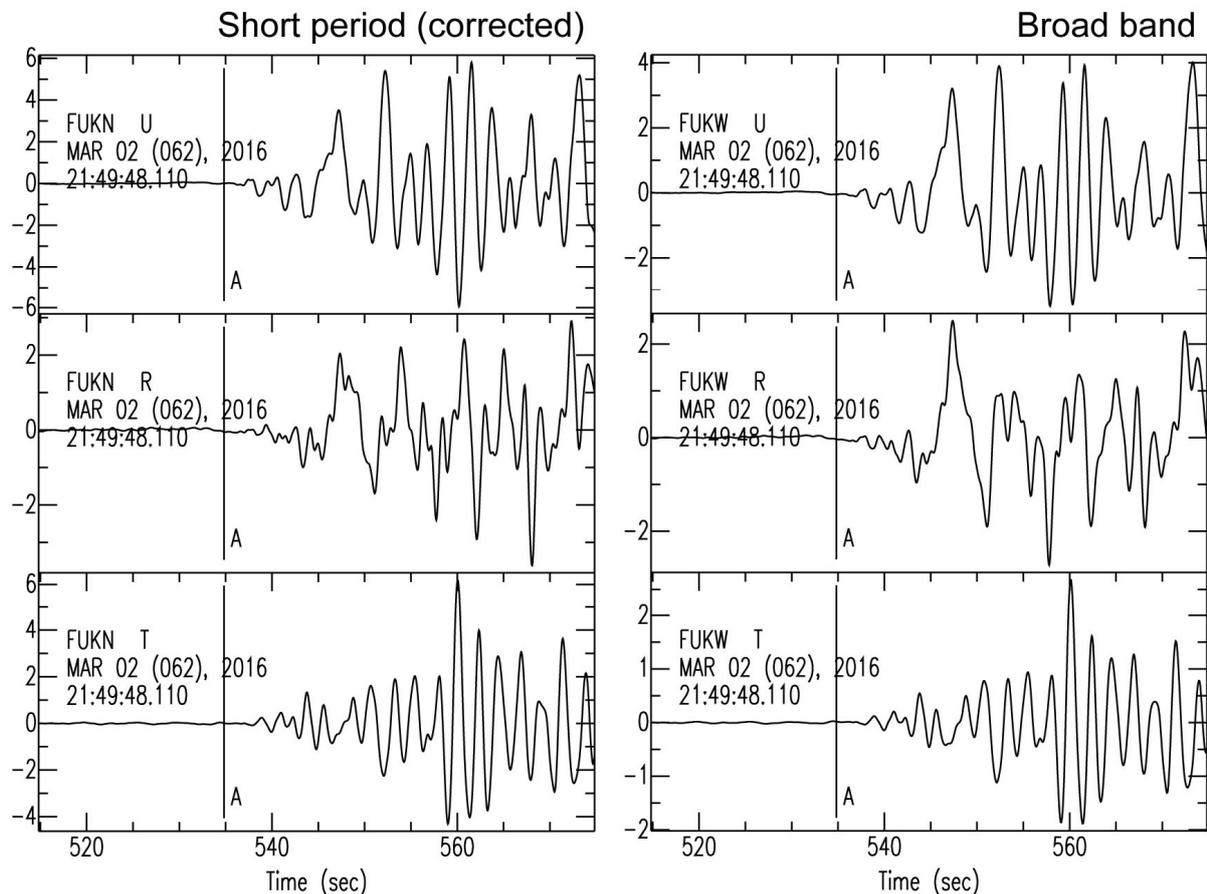


図 1-1-3-7 福山 (FUK) 観測点において、広帯域地震計と短周期地震計から得られたレシーバ関数に違いがみられる地震の 3 成分波形例。(左図) 伝達関数補正後の短周期地震計の 3 成分波形。(右図) 広帯域地震計の 3 成分波形。

#### 5) まとめと今後の方針

始良カルデラ全域の速度構造を議論するために必要となる錦江湾の湾奥部の海岸近傍の新島 (SHN)、福山 (FUK)、および最近設置された弁天島 (BEN) に着目して解析を行った。新島 (SHN) では、観測装置の不具合と考えられる原因により正常なレシーバ関数が得られないという問題がある。福山 (FUK) では、短周期地震計と広帯域地震計の波形データから数多くのレシーバ関数が得られ、始良カルデラ北東部のイメージングに役立っている。カルデラ方向から到来する地震波に対する広帯域地震計と短周期地震計のレシーバ関数の R 成分の Pp 相に違いがみられる。その理由はまだよくわからない。弁天島 (BEN) では、2019 年 10 月から観測が開始されたが、2020 年 12 月までの 14 か月間に 23 本のレシーバ関数が求められ、始良カルデラ北部のイ

メージングに寄与している。また、南東方向から到来する地震波に対するレシーバ関数の R 成分の Pp 相が負の極性をもつことから、観測点直下に南東方向に傾き下がる速度不連続面が存在することが示唆される。

さらに、始良カルデラを囲む広範囲の定常観測点と本プロジェクトの臨時観測点について、2019 年と 2020 年のレシーバ関数を追加して、再解析を行い、レシーバ関数イメージを更新した。その結果、深さ 20~25 km においてカルデラ全域が低速度であることを示唆する結果が得られた。

今後は、レシーバ関数の波形インバージョンで得られた 1 次元 S 波速度構造をマッピングする手法を、島外の観測点にも適用し、桜島だけでなく、より広範囲の 3 次元的な S 波速度構造の推定を行いたい。

## 参考文献

- Abe, Y., T. Ohkura, K. Hirahara, T. Shibutani, Along-arc variation in water distribution in the uppermost mantle beneath Kyushu, Japan, as derived from receiver function analyses, *J. Geophys. Res.*, 118, 3540-3556, doi:10.1002/jgrb.50257, 2013
- Haskell, N. A., Crustal reflection of plane P and SV waves, *J. geophys. Res.*, 67, 4751-4767, 1962
- 井口正人, 地球物理学的観測より明らかになった桜島火山の構造とその構造探査の意義, *物理探査*, 60, 145-154, 2007
- Kurita, T., Regional variations in the structure of the crust in the central United States from P-wave spectra, *Bull. seism. Soc. Am.*, 63, 1663-1687, 1973
- 澁谷拓郎・平原和朗・上野友岳, レシーバ関数解析による地震波速度不連続構造, *地震*, 61, S199-S207, 2009
- Shibutani, T., M. Sambridge, and B. Kennett, Genetic algorithm inversion for receiver functions with application to crust and uppermost mantle structure beneath Eastern Australia, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 1829-1823, 1996
- 澁谷拓郎・寺石真弘・小松信太郎・山崎健一・山下裕亮・大倉敬宏・吉川 慎・井口正人・為栗健・園田忠臣, 地震学的手法による南九州下のフィリピン海スラブとその周辺域の構造の推定, *京都大学防災研究所年報*, 62B, 279-287, 2019
- Shibutani, T., T. Ueno, K. Hirahara, Improvement in the extended-time multitaper receiver function estimation technique, *Bull. Seismo. Soc. Am.*, 98, 812-816, 2008, doi: 10.1785/0120070226
- Tatsumi, Y., Migration of fluid phases and genesis of basalt magmas in subduction zones, *J. Geophys. Res.*, 94, 4697-4707, 1989
- 上野 寛・畠山信一・明田川 保・舟崎 淳・浜田信生, 気象庁の震源決定方法の改善—浅部速度構造と重み関数の改良—, *験震時報*, 65, 1507-1520, 2002。

(1) 2. 始良カルデラにおける長期連続反射法探査の有効性の検討

始良カルデラにおける長期連続反射法探査の有効性の検討の目標は、始良カルデラの火山活動に伴う地下のマグマの変化を地震反射波として検出することである。本項目では人工的に発生した地震波により生じた始良カルデラの地下のマグマからの反射波の変化の検出に関して検討を行う。本項目のロードマップを下図に示す。

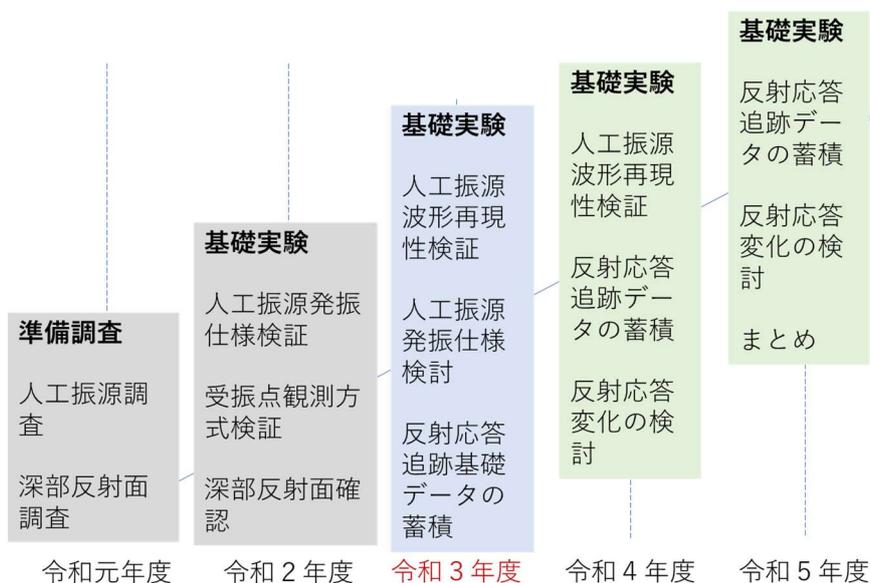


図 1-2-1. ロードマップ

令和3年度は始良カルデラの地下に地震波を放射する人工地震振源装置を調達し、反射応答追跡データの蓄積と反射応答変化の検討の基礎部分となる安定した振源波形を得る手法を検討した。

安定した振源波形は反射応答変化の検出にとって基礎的な要素である。観測点で得られる観測記録はつぎの3つの要素のたたみ込みで決定される(図 1-2-2)。その3つとは振源で発生して地下に放射される振源波形、伝播経路(構造)の応答、さらには観測点とその近傍の影響である。地下のマグマからの反射波は伝播経路(構造)の応答に含まれる。伝播経路の応答の変化を抽出するためには、のこりの2つの要素である振源波形および観測点とその近傍の影響を固定するか観測記録から取り除かなければならない。観測点とその近傍の影響は観測点を常設化することによって固定できるが、振源波形を固定するかその影響を取り除く必要がある。

令和2年度には始良カルデラにて基礎実験を行った(京大防災研究所, 2021)。この基礎実験では基礎的な始良カルデラの近傍に位置する始良市住吉池を発振点としてチャンバー容量1050cuiと2550cuiの2種類のエアガンを用いた発振を行い、始良カルデラをはさんで振源距離約20kmの桜島に設置した地震計アレイで人工地震波形の観測を実施した。

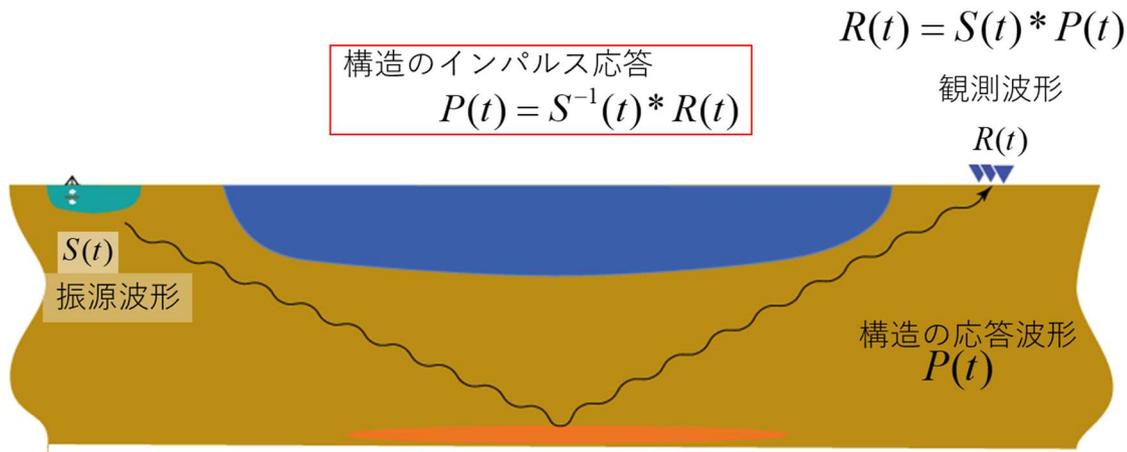


図 1-2-2. 観測波形の構成要素

令和 2 年度の基礎実験ではチャンバー容量 2550 cui のエアガンを用いた場合には約 60 km 先の常設観測点でも人工地震波形記録が得られることが示されたほか、複数回の繰り返し発振を行うのであればチャンバー容量 1050 cui のエアガンでも発振点から約 20 km 離れた桜島でも始良カルデラの地下からの反射波を含む観測記録が得られた。さらにエアガンが発生する振源波形はチャンバー容量、発振深度、作動圧に依って変化することが確認された（京都大学防災研究所，2021）。

しかし、エアガンが発生する振源波形に影響を及ぼす要因は先述の 3 つ（図 1-2-2）だけではなく、4 つめの要因としてエアガンを作動させる貯水池の水位も加わる可能性がある。エアガンの発振効率をもっとも良いとされる水面下 10m にエアガン深度を固定した場合、水位の変化はエアガンから水底までの距離の変化として反映され、一次波とそれに引き続く二次水中反射波の出現時間差と水中多重反射波の出現周期とに影響を与える。水位が減少すれば二次水中反射波の一次波との出現時間差と重複反射周期は短くなることが予想される。令和 2 年度の実験で利用した始良市住吉池は農業用ため池として利用されており、実験の為の水位制御が困難な条件である。令和 3 年度に利用する場合に必ずしも同じ水位条件での発振は実現できるわけではないと考えられた。本構想と類似する実験の例として Wang et al. (2018) および Wang et al. (2020) の報告がある。また Wang et al. (2020) の実験の副産物として異なる水位下での発振による振源波形の変化は Liu et al. (2021) が報告している。Liu et al. (2021) はエアガンを設置した貯水池の水位が 9m 減少するとエアガン波形のピーク周波数が約 0.5Hz 低化することを報告した。

以上を踏まえ、令和 3 年度は反射応答変化の検討の基礎部分として、観測波形から人工振源波形効果除去方法の検討と、基礎実験による反射応答追跡データの蓄積とに取り組んだ。

#### (1) 2.1. 振源波形効果除去方法の検討

人工振源観測波形から振源波形の影響を取り除くことは、制御地震学の分野でデコンボリューションとして実用化されている。デコンボリューションは観測波形に振源波形に由来する逆フィルターを作用させることであるが、安定にデコンボリューションを実行するためには 2 つの問題

を常にはらんでいる。1 つめは観測波形に含まれていることが多いゼロパワースペクトルの周波数の存在による不安定化の問題、もう一つは振源波形の抽出の問題である。

ゼロパワースペクトルの周波数に対する問題は Robinson and Treitel (1980)によるランダムノイズの添加や Langston(1979)によるウォーターレベルデコンボリューション法で克服することができる。ここでは Langston(1979)にならって周波数領域におけるウォーターレベルの添加による安定化を採用した。

デコンボリューションにおける振源波形の抽出に対する問題は、Source consistent deconvolution 法による振源波形の推定や、初動部分の切り出しなどによって解決されることが多い。令和2年度の観測（京都大学防災研究所、2021）では振源直近における直接観測波形が得られていたので、ここでは直接取り出した観測波形のいずれかを振源波形として取り扱うことにする。振源直近における直接観測では振源距離や観測条件が異なる複数のチャンネルで記録が得られているので、以降ではどの条件の波形がもっとも適切な結果を得ることができるかについて検討する。令和2年度実験（京都大学防災研究所、2021）における発振点と速度計観測点 SUM1、加速度計観測点 SUMK1 との位置関係を図 1-2-3 に示す。



図 1-2-3. 発振点 (Shot point) と速度計観測点 SUM1、加速度計観測点 SUMK1 の位置関係（京都大学防災研究所、2021）

この実験では振源としてエアガン(チャンバー容積 350 cui×3+ 1500 cui)を水中で用いた。発振点から 102m の地点（陸上）に速度計観測点 SUM1、発振点から 177m の地点（陸上）に加速度計観測点 SUMK1 を設置した。

振源直近における観測波形を図 1-2-4 に示す。

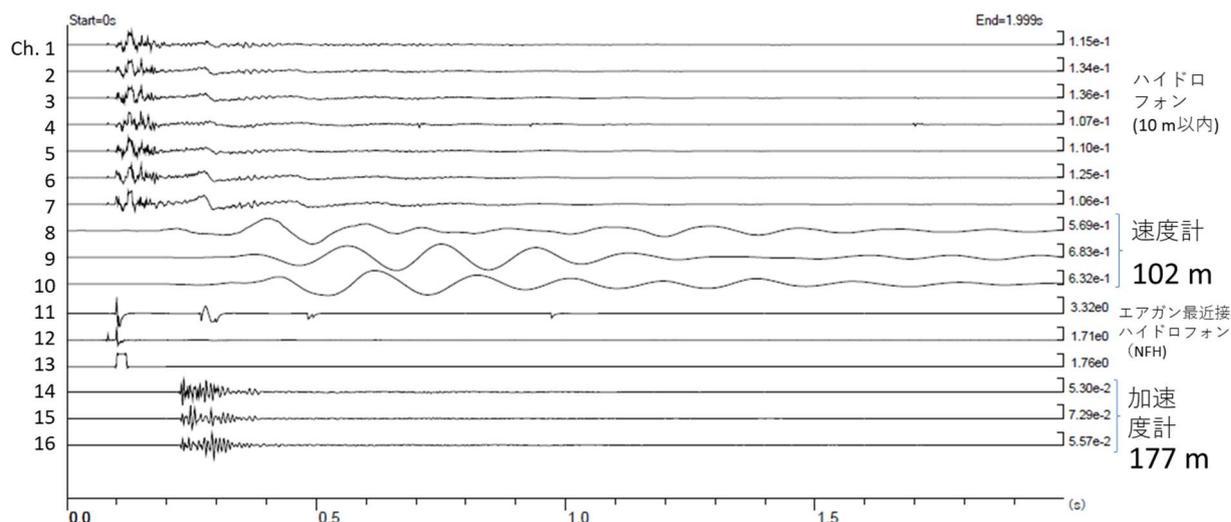


図 1-2-4. 振源直近で得られた近傍観測波形の例

図 1-2-4 で ch. 1~7 はエアガン近傍 10m 以内の水中に設置されたハイドロフォン、ch. 8~10 はエアガンから 102m の地点の湖畔陸上に設置された 1Hz 三成分速度計記録(観測点 SUM1)、ch. 11 と 12 はエアガン発振制御用ハイドロフォン(NFH)、ch. 13 はエアガンのエア制御信号(ソレノイドバルブ ON/OFF 用)、ch. 14-16 は発振点から 177m の地点における 3 成分加速度計記録(観測点 SUMK1) である。3 成分記録はチャンネル番号の若い順に上下動(V)、南北動(N)、東西動(E)の成分である。各波形の左端にはチャンネル番号、右端には最大振幅値、観測条件を表示する。

予備的な検討の結果から、本検討では ch. 8~10 の速度計記録、ch. 14~16 の加速度計記録の一部を振源波形記録と等価なものとして扱うことにする。予備的な検討では波形最大振幅がエアガン出力に見合ったものであるか否かを確認した。ch. 1~7 のハイドロフォン波形は振幅に直接関係するエアガンの総容量が変わってもその最大振幅が変わらなかったために、振源の条件を反映しているとは考えることができず今回の検討では使用しないことにした。

令和 2 年度実験で実施された発振条件の組み合わせを下表 1-2-1 に整理する。以降では表の左端欄のコード名で発振条件の組み合わせを表現することにする。

表 1-2-1. 令和 2 年度実験における発振条件の組み合わせ

コード	構成 (cui)	動作圧 (psi)	エアガン深度 (m)
AAA	2550	2000	10
BAA	1050	2000	10
AAB	2550	2000	6
ABB	2550	1000	6

次に発振条件の差による速度計記録および加速度計記録の差異について示すことにする。最初に ch. 8-10 の速度記録(観測点 SUM1) の変化を次の図 1-2-5 に示す。

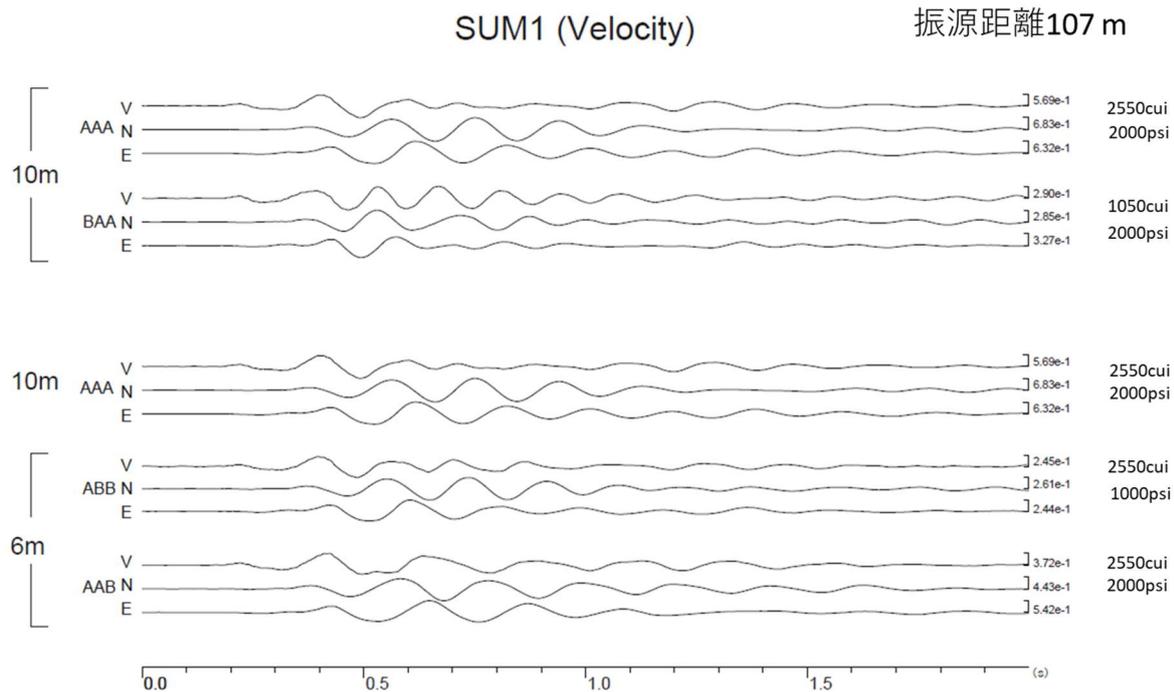


図 1-2-5. 観測点 SUM1 で得られた観測波形（地動速度波形）。発振条件に依存する波形の変化を示す。各波形左端にはエアガン深度、発振パターン名称、成分名を順に記し、右端には最大振幅 (cm/s)、エアガンチャンバ容量 (cui)、エアガン作動圧 (psi) を示す。

観測点 SUM1 の速度記録では同じ水深 10 m でもエアガンチャンバ容量が異なると波形の卓越周波数と継続時間が異なっていることが確認できる。特に上下動波形に注目すると、発振条件 AAA では 2 回に分けてまた、水深および動作圧の変化でも卓越周波数と継続時間が変化している。これらは約 20 km 遠方の桜島で得られたそれぞれの発振条件における観測波形の特徴と整合的である。

さらに ch. 14 -16 の加速度記録(観測点 SUMK1)で発振条件の差に伴う波形の差異を図 1-2-6 に示す。

## SUMK1 (Acceleration)

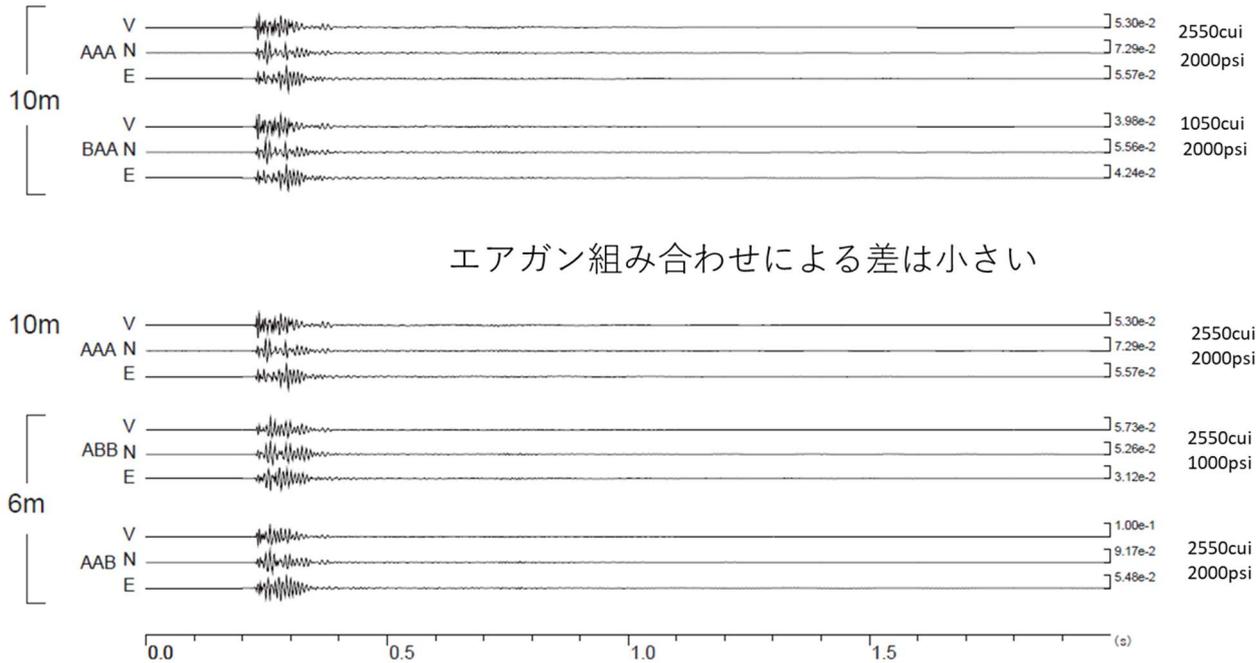


図 1-2-6. 観測点 SUMK1 で得られた観測波形 (加速度波形)。各波形左端にはエアガン深度、発振パターン名称、成分名を順に記し、右端には最大振幅 (cm/s)、エアガンチャンバ容量 (cui)、エアガン作動圧 (psi) を示す。

図 1-2-6 からは観測点 SUMK1 の加速度記録でも発振条件が異なると波形が異なることが見て取れる。しかし、異なるエアガン組み合わせの場合は、SUM1 で得られた速度計記録にあった継続時間や卓越周波数の差は顕著ではない。エアガン深度および動作圧が異なる場合は発振から 0.15 秒以内の波形の変異が認められる。

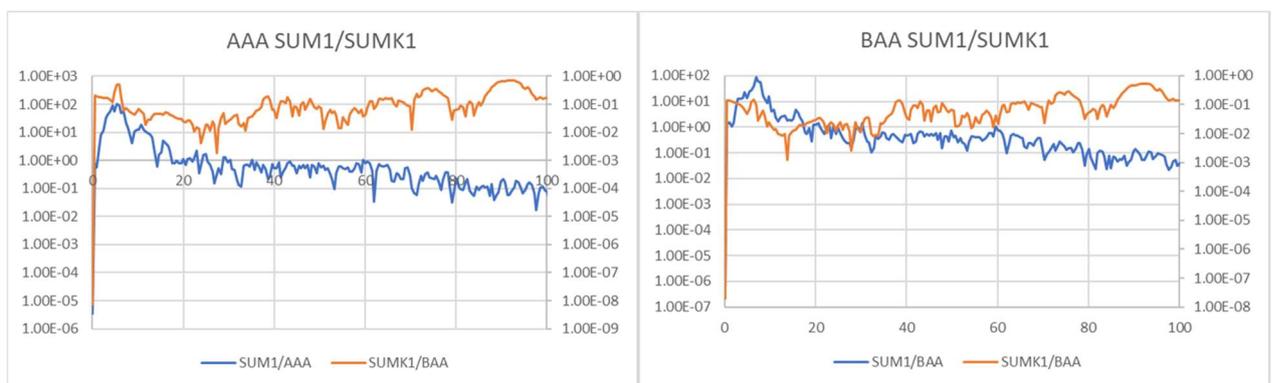


図 1-2-7. 近傍観測点 (SUM1-V と SUMK1-V) のパワースペクトル。

SUM1 と SUMK1 の上下動成分のパワースペクトルを図 1-2-7 に示す。SUMK1 では 20Hz 以上の高周波数成分が顕著に見られ、この高周波成分は発振条件が変わってもスペクトルの形と大きさは一致している。SUMK1 の観測記録では卓越する高周波数成分のスペクトルの一致が図 1-2-6 にお

けるみかけの波形の類似をもたらしている一方、10Hz 以下の帯域のスペクトルの形状には差異が認められる。

遠方の観測点 (BKOM3-V) では図 1-2-8 のように 20Hz 以上の高周波成分を観測することができない。10Hz 以下の帯域のスペクトル形状は SUMK1 のそれに類似している。このことから、遠方での観測波形への寄与は 10 Hz 以下の成分が卓越し、20Hz 以上の高周波成分は遠方に伝播していないことが示される、

したがって遠方観測波形のデコンボリューションに用いる振源波形は 10 Hz 以下の成分の寄与が中心になる。

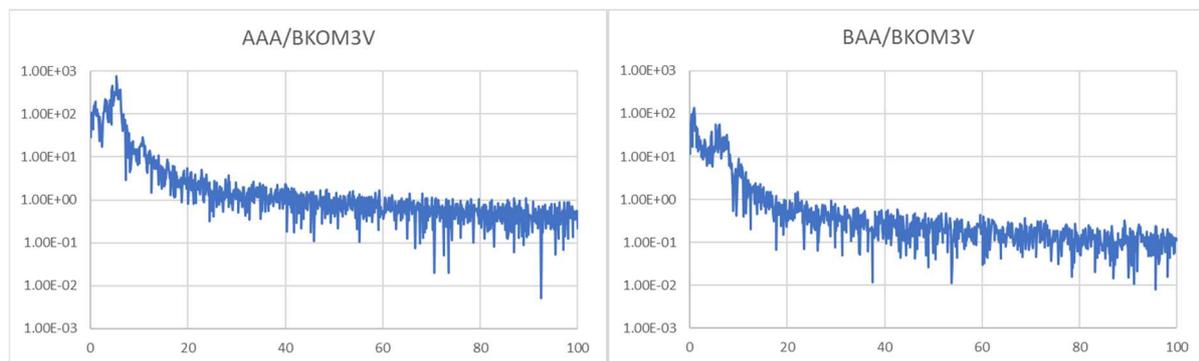


図 1-2-8. 遠方観測点 (BKOM3-V) におけるパワースペクトル。

振源直近における直接観測波形から等価震源波形を取り出す。等価振源波形の取り出しにあたり、等価振源波形と見なす区間の選択がデコンボリューション結果に大きな影響を与える。区間の始点については議論するまでもないが、今後の実験で多様な振源波形による観測が予想されるので、等価振源波形の区間の終点の決定には何らかの客観的な基準が必要である。本検討では発振時刻から積算した上下動観測記録のパワー（2乗振幅）値の積算値に注目し、積算値がパワー総積算値の 90%、95%、99（これらの値を以降でパワー積算値と称する）%に達するそれぞれの時刻を終点とする場合について検討した。

まず SUM1 の上下動成分を等価振源波形として用いたデコンボリューションの結果について述べる。図 1-2-9～1-2-11 には発振条件 AAA, AAB, BAA の観測記録に対する BKOM5 観測点上下動成分波形 (BKOM 観測ファイル Ch. 43) のデコンボリューション結果を示す。BKOM5 観測点は振源から始良カルデラをはさんで 19.6km 離れた高免アレイ最南端の孔中観測点（固有周波数 1 Hz、3 成分速度計、令和 2 年度設置）である。BKOM5 を含む高免アレイの観測記録は先述の振源近傍観測波形とは別の波形データファイルとして編成されている。図 1-2-9～1-2-11 ではデコンボリューションの際の“ウォーターレベル”を 1%とした。

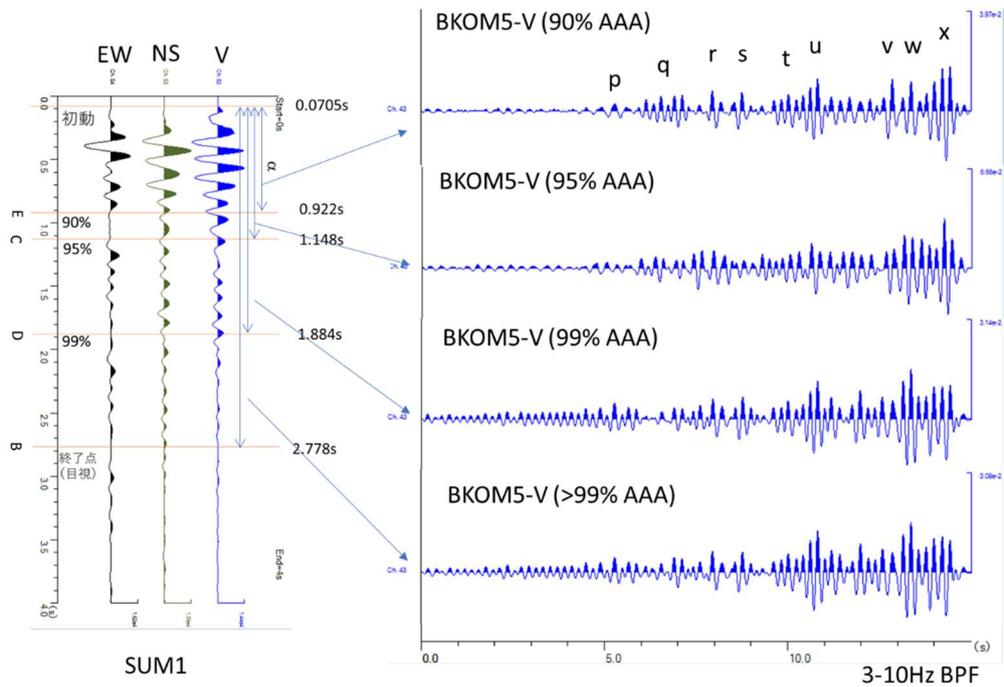


図 1-2-9. 発振条件 AAA (2550 cui, 2000 psi, 10m)の観測記録のデコンボリューション結果。左側は SUM1 3 成分観測記録と等価振源波形切り出し区間を示す。デコンボリューションには SUM1 上下動(V)成分のみを用いた。右側は BKOM5 上下動成分のデコンボリューション結果を示す。識別できる到来相に p~x のラベルをつけた。

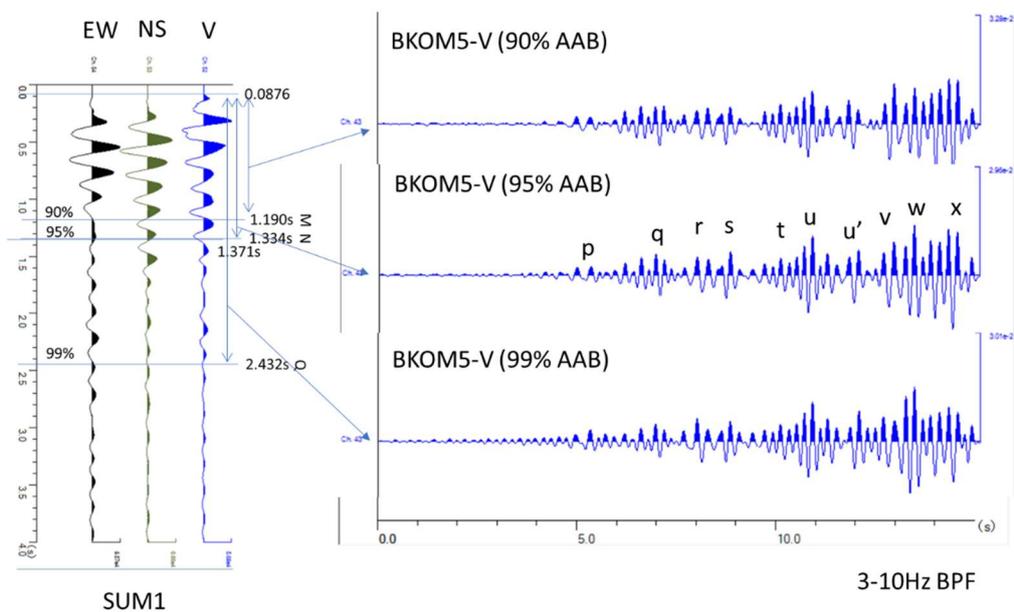


図 1-2-10. 発振条件 AAB (2550 cui, 2000 psi, 6 m)の観測記録のデコンボリューション結果。左側は SUM1 3 成分観測記録と等価振源波形切り出し区間を示す。デコンボリューションには SUM1 上下動(V)成分のみを用いた。右側は BKOM5 上下動成分のデコンボリューション結果を示す。条件 AAB では目視による波形終了点の結果は示さない。

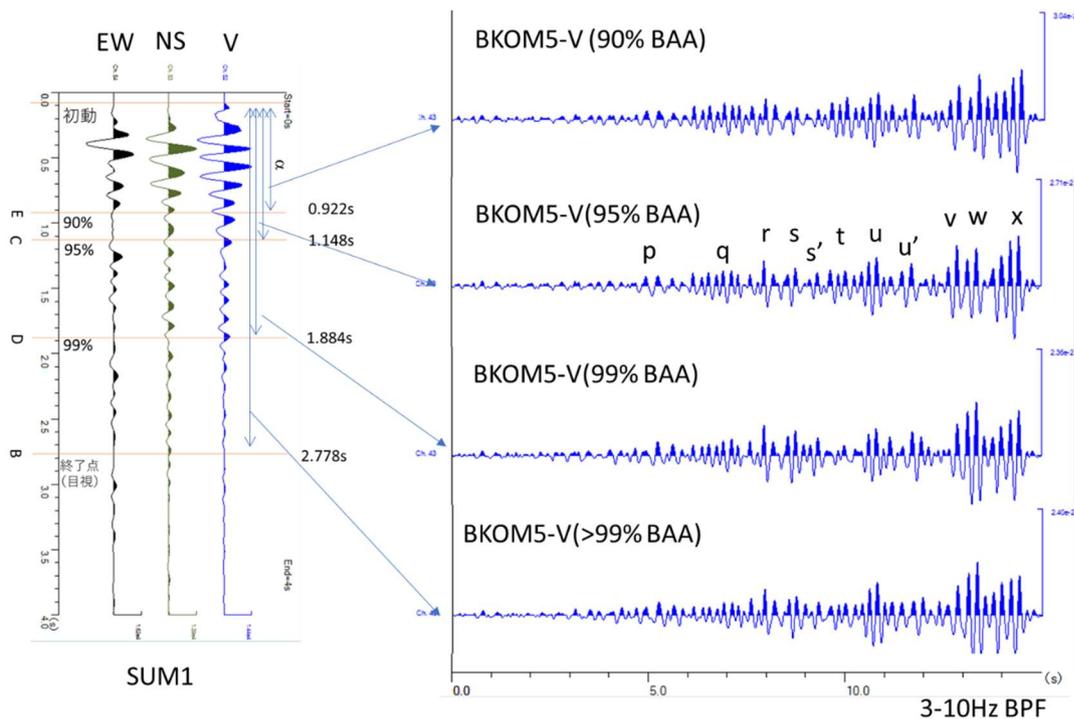


図 1-2-11. 発振条件 BAA (1050 cui, 2000 psi, 10m) の観測記録のデコンボリューション結果。左側は SUM1 3 成分観測記録と等価振源波形切り出し区間を示す。デコンボリューションには SUM1 上下動 (V) 成分のみを用いた。右側は BKOM5 上下動成分のデコンボリューション結果を示す。識別できる到来相に p~x のラベルをつけた。図 1-2-8 と異なる到来相に対して s' , u' のラベルをつけた。

まず図 1-2-9~図 1-2-11 の左側に示された観測点 SUM1 の記録を比較する。先の京都大学防災研究所 (2021) が指摘するように発振条件 AAA は振源波形継続時間がもっとも長い。振源波形が明瞭に区別される二つの波群  $\alpha$  と  $\beta$  から構成されており、先頭から 1.688 秒の点でパワー積算が 95% を超えている。これに対して他の 2 つの発振条件では振源波形が単一の波群  $\alpha$  から構成され AAB が 1.334 秒、BAA が 1.148 秒で 95% のパワー積算に達している。

図 1-2-9 は等価振源波形の切り出し (打ち切り) 長によってデコンボリューション結果が明瞭に変化する様子が示されている。特にパワー積算 99% 区間の s 相および u 相の直後の u' 相の出現が特徴的である。パワー積算 99% 区間と目視終了まで区間のデコンボリューション結果について、初動以前に単一周期のノイズが重畳され、初動の識別がしにくい様相を呈している。またパワー積算 99% で打ち切った場合と、目視で決めた波形終了点で打ち切った場合とでは結果がほぼ一致することも示されている。

図 1-2-10 でも等価振源波形の切り出し長が長くなるにつれてデコンボリューション結果が変化する様子が認められるが、先述の図 1-2-7 ほど顕著ではない。パワー積算 99% 区間の等価振源波形によるデコンボリューション結果の初動以前には図 1-2-9 のそれと同様な単一周期のノイズが見受けられるが、振幅は図 1-2-9 のそれより小さい。

図 1-2-11 では、等価振源波形切り出し長さの差異によるデコンボリューション結果の変異が先の 2 つ振源条件のそれに比べて小さい。先の 2 つの振源条件では等価振源波形を長くしないと見えなかった  $s'$  相および  $u'$  相が、パワー積算 95% 区間を使ったデコンボリューション結果から確認される。また、この発振条件でもパワー積算 99% 区間と目視で決めた波形終了点で打ち切った場合とを比較したが、両者には著しい差異を認めなかった。また、長い等価振源波形によるデコンボリューション結果にあっても発振条件 AAA, および AAB に見られる初動到来以前の単一周雑音の混入は見受けられなかった。

図 1-2-12 にはこれらの試行のなかで、走時 5.5~10 秒付近の区間の波形の相似が良いものをまとめて示す。(a) 図に図 1-2-9 で指摘されていた初動到来前のノイズについては、“ウォーターレベル”を 5% にすることで、(c) に示す発振条件 AAB のデコンボリューション結果相当まで低減できることが (b) で示されている。

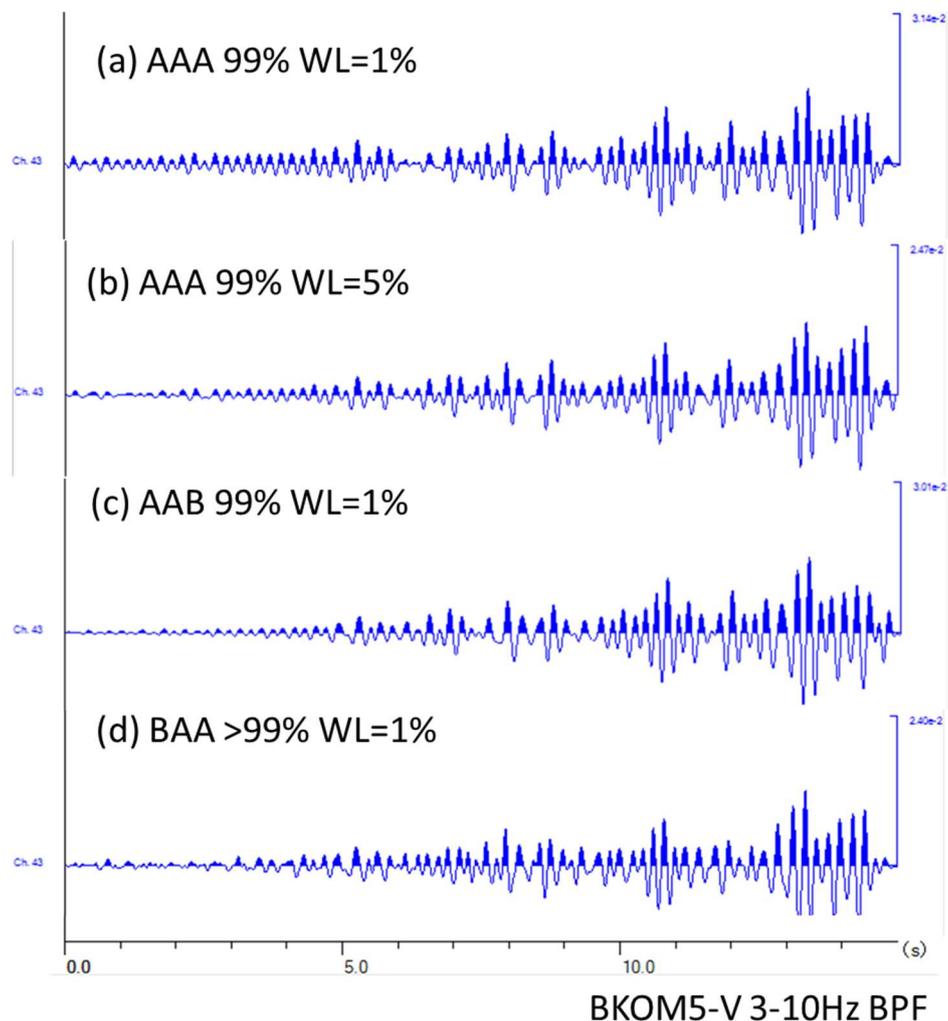


図 1-2-12. 異なる発振条件から得られた最良のデコンボリューション結果。デコンボリューションパラメータとともに示す。(a) と (b) はともに発振条件 AAA、パワー積算 99% 区間のデコンボリューション結果を示すが、“ウォーターレベル” (WL) の値が異なり、(b) の WL=5% が良い結果を与えることを示している。

図 1-2-12 では観測点 SUM1 で得られた速度波形上下動成分からパワー積算 99%の区間で切り出した等価振源波形は良好なデコンボリューション結果を与えることが示された。また、デコンボリューション結果では初動到来以前に単一周雑音の現れることがあるが、“ウォーターレベル”の値を選ぶことによって抑圧が可能であることが判った。

次に SUM1 上下動成分から切り出した等価振源波形によるデコンボリューション結果を検討する。加速度波形を用いたデコンボリューションにおける等価振源波形の切り出し長は次のようにした。先述のように図 1-2-6 に示すこれらの加速度波形の周波数成分では、地震波として伝播するエネルギーの主要周波数帯域(1~10 Hz)の帯域に比べて、30Hz 以上の周波数帯域の成分が約 10 倍の大きさを持っている。そのために SUM1 の生の加速度記録では 30Hz 以上の高周波成分が圧倒的に目立っている。しかしながら遠方における観測記録に寄与するのは 10 Hz 以下の周波数成分である。そのため、生波形をそのままパワー積算に用いると高周波成分に引きずられて、必要な周波数帯 (10 Hz 以下)を含む区間を切り出せない。図 1-2-7 に示された振源近傍観測波形のパワースペクトルの特徴を考慮し、SUM1 波形に 3 - 10 Hz BPF を施した波形におけるパワー積算を用いて切り出し終了点を決定した。

図 1-2-13 および図 1-2-14 に発振条件 AAA, BAA の観測波形のデコンボリューション結果をそれぞれ示す。

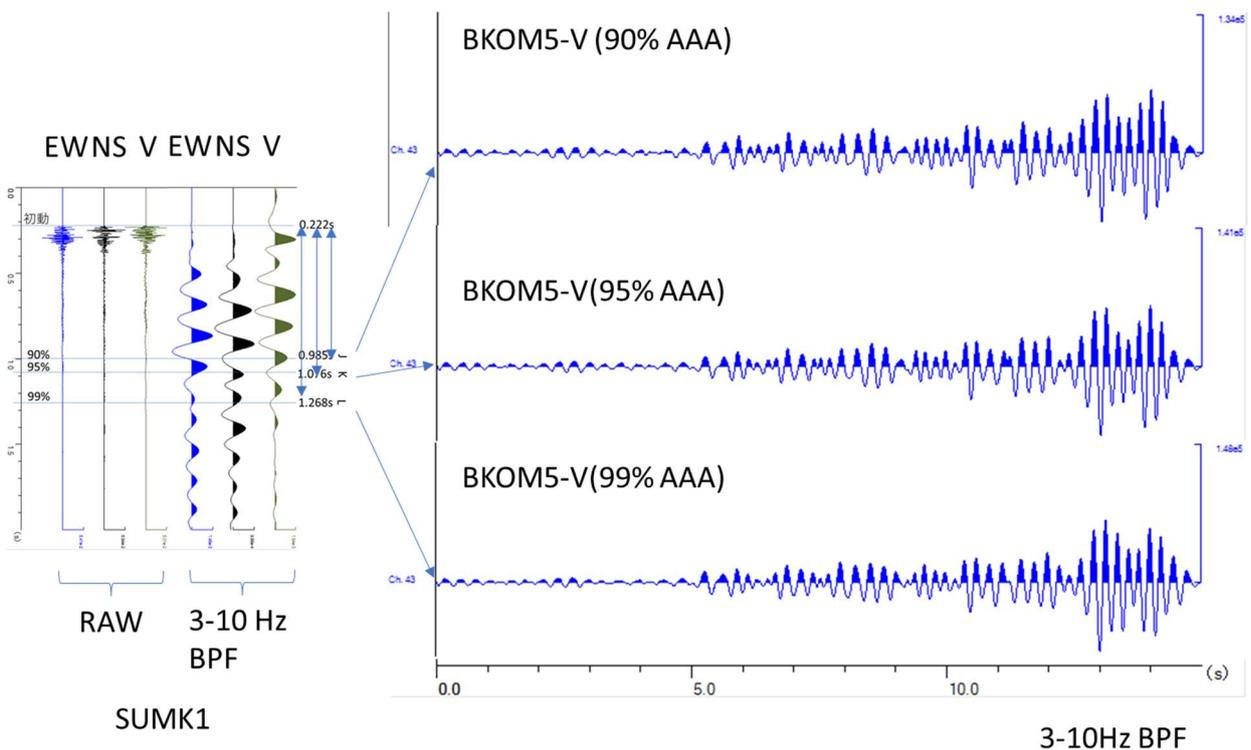


図 1-2-13. 発振条件 AAA (2550 cui, 2000 psi, 10 m)の観測記録のデコンボリューション結果。左側は SUM1 3 成分観測記録 (RAW:生波形、3 -10 Hz BPF 波形) と等価振源波形切り出し区間を示す。デコンボリューションには SUM1K 加速度上下動 (V) 成分のみを用いた。右側は BKOM5 上下動成分のデコンボリューション結果を示す。

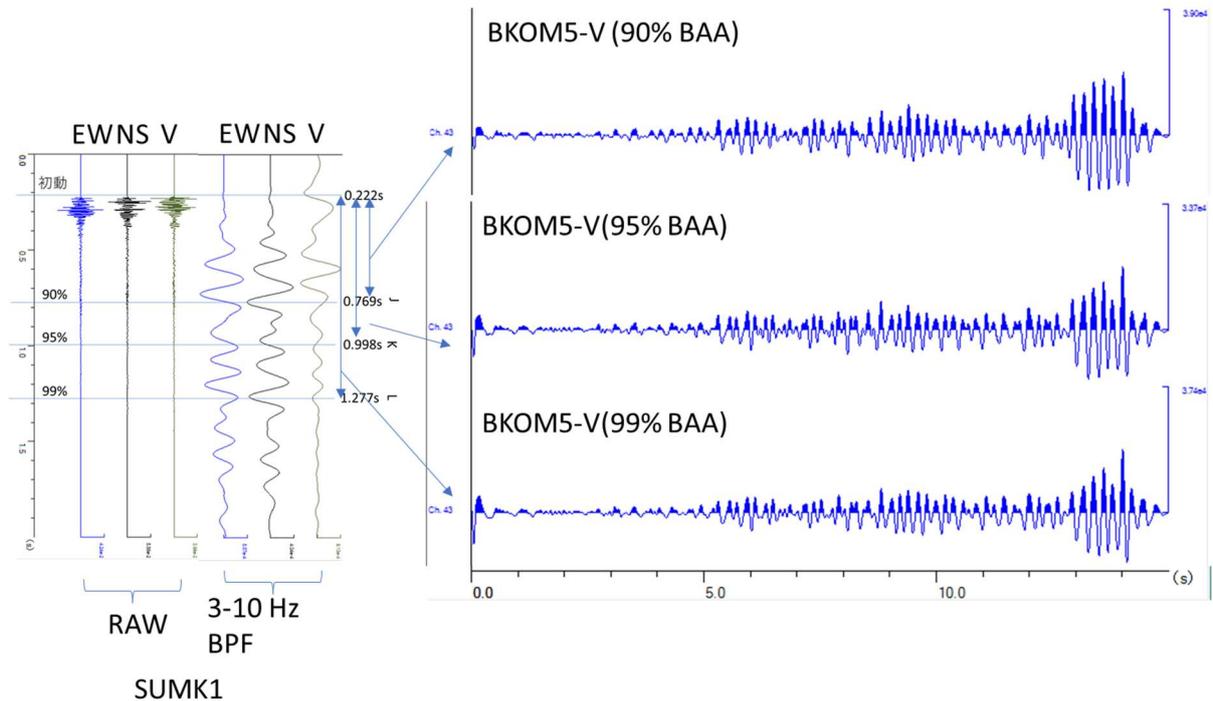


図 1-2-14. 発振条件 BAA (1050 cui, 2000 psi, 10 m) の観測記録のデコンボリューション結果。左側は SUMK1 3 成分観測記録 (RAW: 生波形、3 -10 Hz BPF 波形) と等価振源波形切り出し区間を示す。デコンボリューションには SUM1K 加速度上下動 (V) 成分のみを用いた。右側は BKOM5 上下動成分のデコンボリューション結果を示す。

図 1-2-13, 図 1-2-14 とともに異なる切り出し長による差異は顕著に見られない。しかしながら速度記録によるデコンボリューションで良い結果を示していたパワー積算 99% 区間をきりだした等価振源波形によるデコンボリューションの結果を両者で比較しても一致が見られない。このことから、令和 2 年観測においてデコンボリューションに加速度記録を用いることは適切でないことがいえる。速度計記録に比べて加速度計記録ではパワー積算 99% 区間が短くなる傾向があったことから、近傍観測の記録長が不足していたのかもしれない。

以上のことから、振源波形効果除去の検討作業で明らかになったことを整理すると；

- ・ 振源波形効果の除去をするためには、近傍における波形記録の取得が必要である。
- ・ 近傍における観測記録の一部を等価震源波形として用いる時には、遠方観測点まで伝播する周波数成分の継続時間を含む長さを切り出す必要がある。
- ・ 令和 2 年基礎実験においては、発振点から 102 m の地点の陸上に設置された速度計記録を用いたデコンボリューションが良い結果を示した。
- ・ 等価振源波形の切り出し長さは、パワー積算の 99% を目安にすると良い。
- ・ 安定なデコンボリューション結果を得るためには“ウォーターレベル”のチューニングが必要である。

以上の事から観測を繰り返す場合には安定した質の近傍観測の記録の確保が必要である。安定した質の観測記録を得るためには発振点近傍に半定常的な観測点の設置がのぞまれる。

#### (1) 2.2. 令和3年度基礎実験

令和3年度は前年度に引き続き、始良市住吉池における発振による反射応答追跡基礎データの蓄積を令和3年12月に実施し、始良カルデラ中央部をはさんで19.6 km離れた鹿児島市高免地区のアレイにおける波形観測を実施する構成を予定していた。

振源としては令和2年度の実験（防災研究所，2011）で高い発振効率を示しかつ分解能の良い波形を発生していた総チャンバー容量1050cuiの3本組エアガン（トリガン）を調達した（図1-2-21）。



図1-2-21. トリガン（350 cui×3）

エアガンの発振運用には令和2年度の実験（京都大学防災研究所，2021）で実績のある装置を用いることにしたが、騒音軽減の観点から圧縮空気供給装置一式をエアガンのそれとは別のポンプに搭載し、住吉池水面に浮かべることとした（図1-2-22）。

以上のような構想のもとで準備を進めており、令和3年9月末までの時点では住吉池は実験可能な水位で経過していた（図1-2-23a, c）。しかしその後、水利関係の修理工事が緊急実施されたために住吉池の水位が下げられていたことが実験開始直前に確認された。約5mの水位低下に伴い汀線が30m以上も後退していたため、水位の回復を待つか進入路の増築工事を伴わなければ振源機材の水面へのアプローチが困難な状況になっていた（図1-2-23b, d）。これまでの観察から住吉池の水位回復は月あたり約0.6mであり、水位の回復には約8ヶ月が見込まれた。一方進入路の構築は鹿児島県立公園でもある住吉池の環境を大幅に変更することから直ちに実施することは不可能であった。このような状況を踏まえ規制庁担当者と協議を実施した結果令和3年度の基礎実験を見送ることとなった。

反射応答追跡基礎データの蓄積のための基礎実験は令和4年度の実施が望まれる。また、住吉池は湖底地形や水深、始良カルデラとの位置関係から振源用の貯水池として好適な条件を備えているが、本来は農業水利用ため池として水位管理が行われているために、基礎実験のための水位条件のコントロールは困難である。今後の実験の継続にあたり、水位管理関係者との密接な連絡を維持することで継続的に実験を実施できる環境を保つ必要がある。

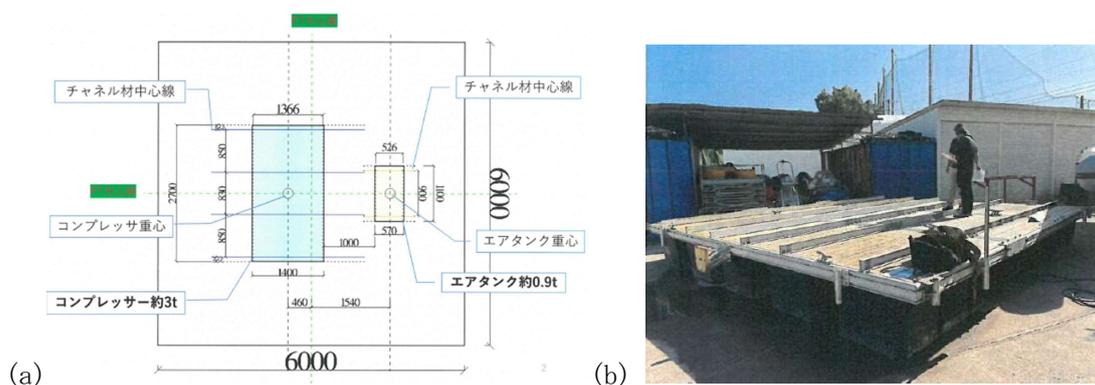


図1-2-22. 圧縮空気供給機材搭載用ポンツーン (a)平面図、(b)実物写真。

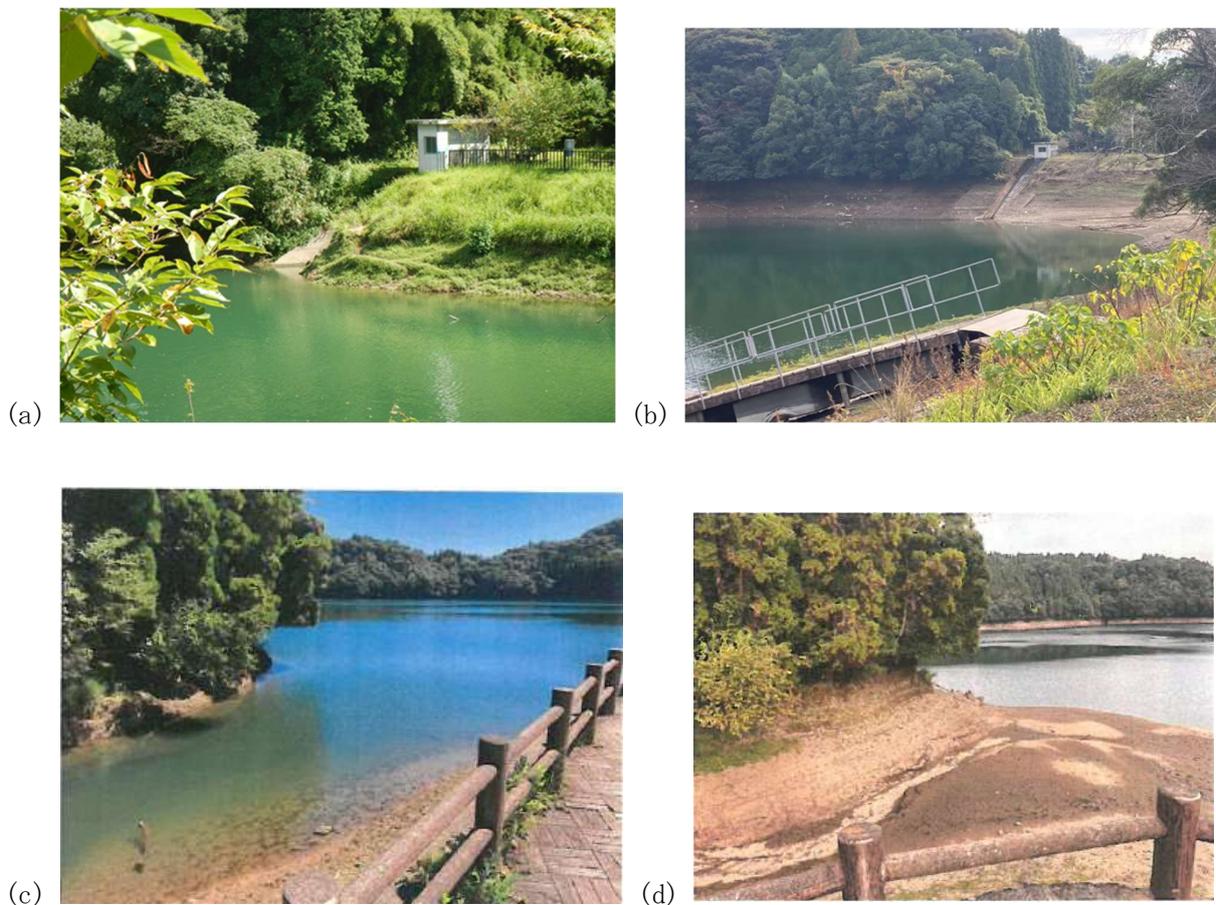


図 1-2-23. 住吉池湛水状況 (a) 令和 3 年 8 月 3 日の水位(水位ゲージ表示 8m)、(b) 令和 3 年 11 月 16 日の水位 (水位ゲージ表示 2m)、(c) 水面アプローチ場所 (令和 3 年 8 月)、(d) 水面アプローチ場所 (令和 3 年 11 月 16 日)

### (1) 2.3. まとめ

異なる発振条件の記録から振源波形の影響を取り除くためには、近傍の速度記録を用いることが有効であることが示された。したがって、長期連続反射法を定常観測に展開するためには近傍における速度観測記録の取得が望ましいと考えられる。

また、反射応答追跡基礎データの蓄積のための基礎実験は住吉池の湛水不足で令和 3 年度の実施を見送ったため、令和 4 年度の実施が望まれる。今後、水位管理関係者との密接な連絡を維持することで継続的に実験を実施できる環境を保つ必要がある。

### 謝辞

本項目を実施するにあたり、下記の関係機関・地元住民の皆様のご高配を賜った。住吉池の属する県立蘭牟田池自然公園特別地区における発振行為に関して鹿児島県環境林務部自然保護課自然公園係から許可をいただいた。住吉池キャンプ村の利用に関して始良市企画部観光商工課観光係には許可をいただきました。始良市農林水産部耕地課耕地管理係には住吉池とその近隣に関す

るお世話をいただきました。住吉池の水面利用に関しては始良市三叉土地改良区にはご厚情とご承諾をいただきました。住吉地区自治会には予備観測および本観測の実施に関してご理解とご協力を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 京都大学防災研究所 (2021) 令和 2 年度原子力規制庁委託研究成果報告書 原子力施設等防災対策等委託費 (火山性地殻変動と地下構造及びマグマ活動に関する研究) 事業、京都大学防災研究所、令和 3 年 3 月。
- Langston, C. A., (1979) Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves, *Journal of Geophysical Research*, 87(B8), 4749-4762.
- Liu, C., Yang, H., Wang, B., Yang, J. (2021) Impacts of Reservoir Water Level Fluctuation on Measuring Seasonal Seismic Travel Time Changes in the Binchuan Basin, Yunnan, China *Remote Sensing*, 13, 2421, <https://doi.org/10.3390/rs13122421>.
- Robinson, E. A., Treitel, S., (1980) *Geophysical signal analysis*, Prentice-Hall, 466pp.
- Wang, B., Tian, X., Zhang, Y., Li, Y., Yang, W., Zhang, B., Li, X. (2018) Seismic signature of an untuned large-volume airgun array fired in a water reservoir, *Seismological Research Letter*, 89(3), 983-991. <https://doi.org/10.1785/0220180007>.
- Wang, B., Yang, W., Wang, W., Yang, J., Li, X., Ye, B. (2020) Diurnal and Semidurnal P- and S-Wave Velocity Changes Measured Using an Airgun Source, *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 125, e2019JB018218, <https://doi.org/10.1029/2019JB018218>.

(2) 活動的カルデラ火山の火山性地殻変動とマグマ活動に関する調査

(2) 1. 始良カルデラの火山性地殻変動データの蓄積

桜島の1914年の噴火（大正噴火）においては、約1.3km<sup>3</sup>の溶岩と約0.5km<sup>3</sup>の軽石や火山灰が噴出した（石原・他、1981）。この噴火の後に行われた水準測量によって、南九州一帯で地盤の沈降が広く観測された。特に始良カルデラ周縁部で沈降が顕著で、始良カルデラ西縁の大崎ノ鼻（BM2474）では鹿児島市街部（BM2469）に対して約70cmの沈降が観測された。この地盤沈降の中心は始良カルデラ中央部にあると考えられている（Omori, 1918 ; Mogi, 1958）。大正噴火の後、始良カルデラ周辺では地盤の隆起が観測された。佐々（1956）は、1891年に行われた最初の測量から大正噴火の直前まで地盤が隆起し大正噴火に伴って約1mの地盤沈降が発生したと考えた。さらに佐々は、大正噴火直後から再び隆起に転じた地盤が約0.2 km<sup>3</sup>（石原・他、1981）の溶岩を流出した1946年の噴火（昭和噴火）で約7cmの沈降を生じたと推定した（図2-1-1-1）。

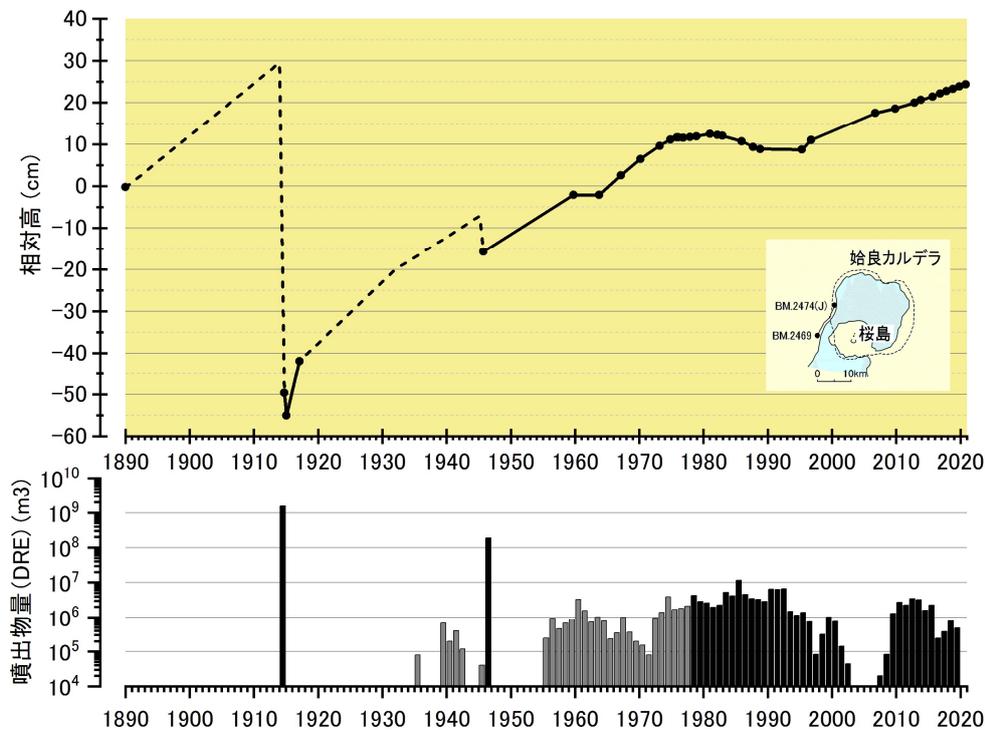


図 2-1-1-1. 始良カルデラ西縁の BM2474 の BM2469（鹿児島市）に対する相対上下変動および桜島の噴火による噴出物量の時間変化

昭和噴火以後は始良カルデラ周辺の地盤は再度隆起に転じ、1955年に始まった桜島南岳の山頂噴火活動が特に活発であった1974年から1992年ごろには隆起の停滞やわずかな沈降が観測された。さらに、1993年ごろから桜島の噴火活動は静穏になり、それに伴って地盤の隆起や地盤の膨張を示す水平変動が観測されている（江頭・他、1998a, b）。始良カルデラ周辺のこうした地殻変動の特徴から、桜島火山へのマグマの主な供給源となるマグマだまりは始良カルデラ中央部の地下およそ10kmにあると考えられている。

1990年代以降、GPS/GNSSが地盤変動観測に利用されるようになり、水平変位および上下変位を連続的に観測することが可能になった。始良カルデラ周辺におけるGPS連続観測によって水平変位が始良カルデラ中央部を中心にした放射状のパターンを示すことが明らかになった (Kriswati and Iguchi, 2003)。井口・他(2008)は、1996年から2007年までの期間のGPS観測で得られた地殻変動データから茂木モデルによる圧力源の位置を始良カルデラの中央部の深さ11km、体積変化量を $8 \times 10^7 \text{ m}^3$ と見積もった。

このように、地盤変動観測結果に圧力源モデルを適用することによってマグマだまりにおける体積変化量を求めることができる。これに桜島の噴火によって放出された噴出物量を加えることでマグマだまりへのマグマの供給量を見積もることができる。このような方法で始良カルデラ下のマグマだまりへのマグマ供給率はおよそ $8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$  (加茂・石原, 1980) ないし $10 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$  (Ishihara, 1981) と見積もられている。さらに井口 (2006) は1993年以降のマグマ供給は変動があるものの平均すると $10 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ の割合でマグマだまりへのマグマの供給が続いていたことを示した。

以下では、始良カルデラ周辺の地殻変動観測網の維持・強化について述べ、次に2019年から2020年の期間についてGNSS観測で得られた水平変動からテクトニックな定常的変動の影響を除いたデータと水準測量による上下変位データとを統合する形で従来より広範囲のデータを用いて始良カルデラ下の圧力源の位置と体積変化量を求めた結果を報告する。さらに桜島からの噴出物量を考慮した始良カルデラ下へのマグマ供給量の見積もりを示す。

## (2) 1.1. 始良カルデラ臨時 GNSS 観測点の拡充と維持

### a) 既設 GNSS 観測点における観測の継続

本課題では、原子力規制庁が「原子力施設等防災対策費等委託費（火山影響評価に係る技術的知見の整備）事業」により設置した観測点および本課題により整備した観測点における GNSS 観測を引き続き維持することとしている。

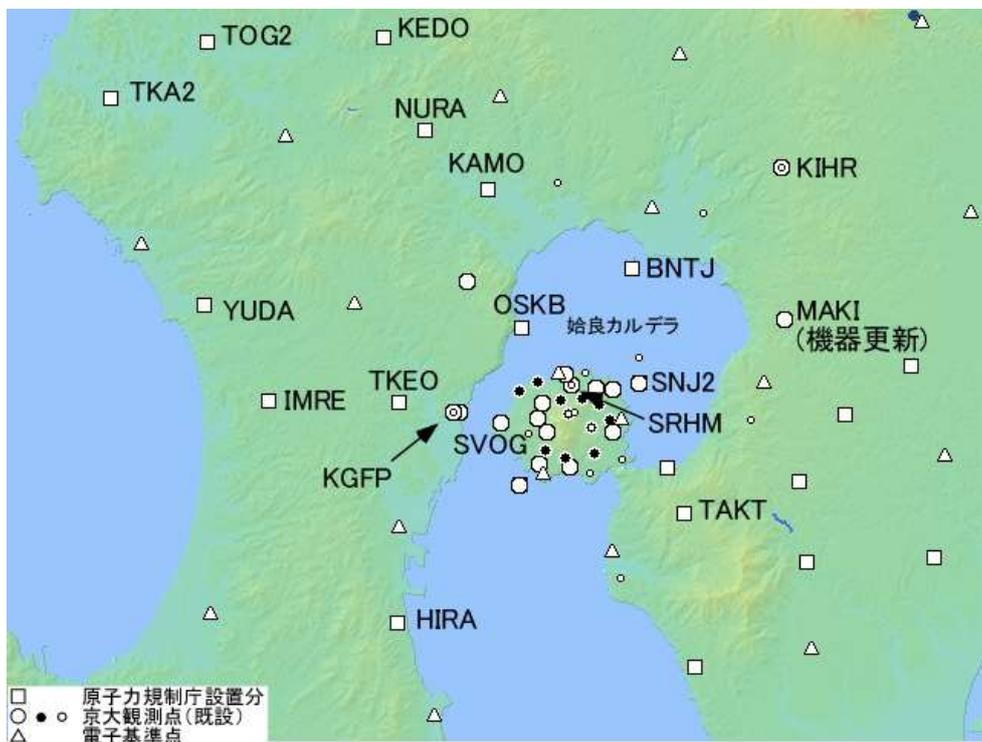


図 2-1-1-2. GNSS 観測点の位置

これらの観測点での観測は順調で、長期の欠測は生じていない。一部の観測点で GNSS 受信機のハングアップなどの障害が発生したが、障害が判明後速やかに対処し数日の欠測で復旧した。また、現地での定期点検においても機器の動作状況や設置状況等に異状はみられなかった。

原子力規制庁および京都大学が設置した GNSS 観測点で得られた観測データは、SVOG を基準点として基線解析を行い、1 日毎の各観測点の位置データが蓄積されている。得られた位置データの例として、図 2-1-1-3 に 2019 年度および 2020 年度に設置した SNJ2、BNTJ および OSKB 観測点の日毎の位置を示す。夏季にややばらつきが大きいが、日毎の測位結果は概ね安定している。しかし、SNJ2 および BNTJ においては、水平位置の変化速度が設置直後は速く設置 1 年後頃まで徐々に遅くなり、水平および上下方向の変化のトレンドも設置後 1 年程度までとそれ以降では異なっている傾向が認められる。設置後 1 年程度までの両観測点の位置変化は、アンテナピラー埋設後に周辺の比較的軟弱な地盤が落ち着く過程を示していることが考えられ、地殻変動を正しく反映していない可能性がある。一方 OSKB 観測点では、2021 年 8 月頃を境に水平位置の変化の南北成分のトレンドが反転しているように見えるが、このような特徴は、近傍の YOSI 観測点の水平位置の変化とよく似ており、また気象補正を施すことで軽減される（図 2-1-1-14）。このこと

から OSKB 観測点では SNJ2 や BNTJ と同様の問題はないと現在の時点では判断できる。これら 3 つの観測点は始良カルデラ中央部に最も近い基線網を形成することから、今後さらに観測を継続することで始良カルデラ下のマグマ蓄積に起因する地盤変動をより敏感に検出することが期待される。

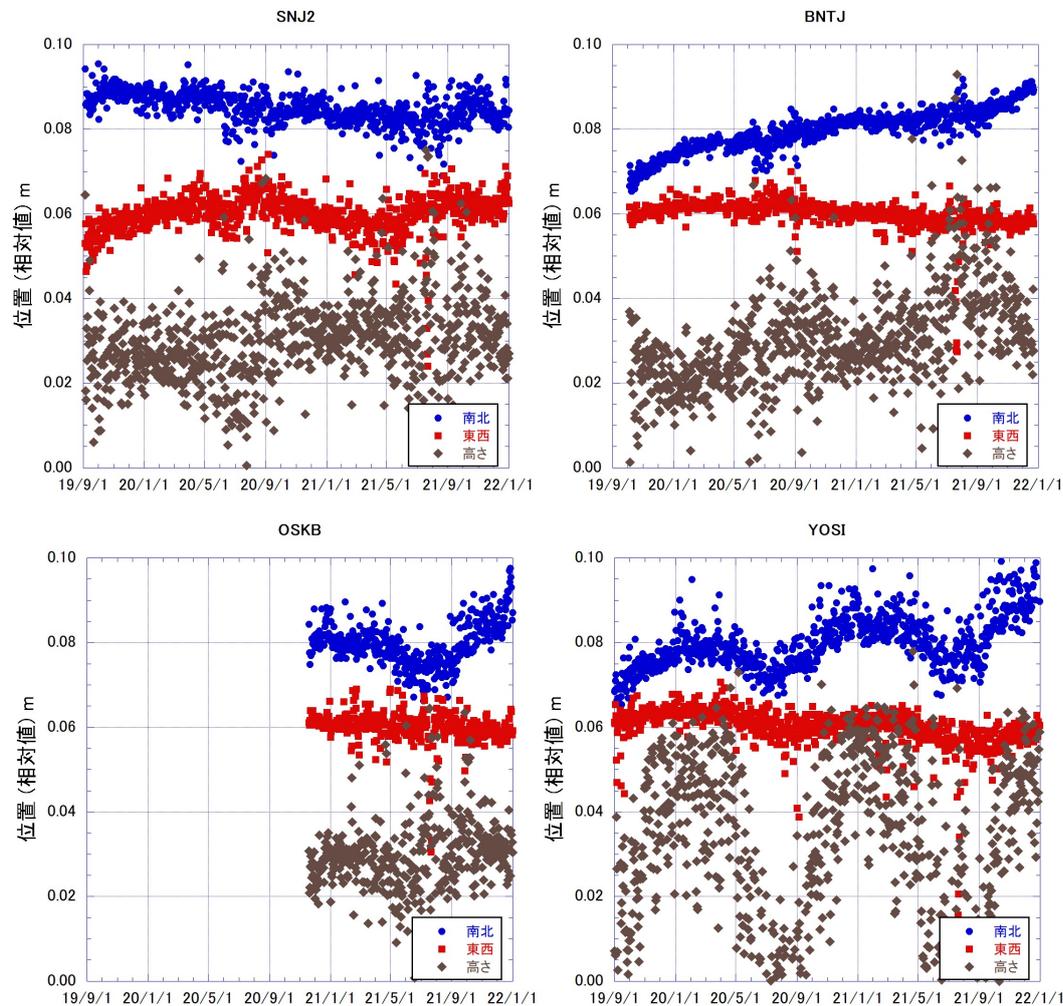


図 2-1-1-3. SVOG を基準点として求めた SNJ2、BNTJ、OSKB および YOSI 観測点の日毎の位置

TKEO 観測点および MAKI 観測点はいずれも鹿児島県立高等学校の校舎屋上に設置した観測点であるが、校舎の防水工事の実施に伴って観測機器を一時撤去してほしいとの要請があった。そこで、防水工事の範囲外に仮設の観測点を設置し、既設観測点との接続のために並行観測を行った後に、既設観測点の一時撤去を行った。

TKEO 観測点（鹿児島県立武岡台高等学校）においては、仮設点の設置について学校側の了承を得たうえで下見調査を行って設置場所および設置方法を決定した。仮設アンテナ設置用のアンテナ基台を製作し、2021 年 6 月 24 日に仮設観測点の設置作業を実施し（図 2-1-1-4）、TK02 観測点として運用を開始した。使用した機器は予備機として保有しているライカジオシステムズ社

製 GR30 受信機および AR10 アンテナである。その後 2021 年 9 月 2 日まで既設観測点 (TKE0) と並行観測を実施し、TKE0 観測点を一時撤去した。この際 TKE0 観測点で使用していたモバイル通信機器を TK02 観測点に移設してモバイル通信によるデータ回収ができるようにした。約 70 日の並行観測によって、十分な精度で TKE0 観測点と接続できる差分データが得られた。



図 2-1-1-4 TKE0 観測点近傍に設置した仮設観測点 (TK02)



図 2-1-1-5 MAKI 観測点近傍に設置した仮設観測点 (MAK2)

MAKI 観測点 (鹿児島県立福山高等学校) においても、仮設点の設置について学校側および鹿児島県伊佐地域振興局との交渉および下見調査を行い、仮設点の設置場所および設置方法を決定した。2021 年 9 月 21 日に仮設観測点の設置作業を実施し (図 2-1-1-5、MAK2 観測点として運用を開始した。MAK2 観測点には本年度に調達したセプテントリオ社製の GNSS 受信機 PolaRx5e およびアンテナ PolaNt-x MF を設置した。その後並行観測を経て 2021 年 12 月 14 日に MAKI 観測点

を一時撤去し、以降は MAK2 観測点をモバイル通信にて運用している。MAK2 観測点においても 3 か月弱の並行観測によって、MAKI 観測点と精度良く接続可能なデータが得られた。

両観測点とも防水工事終了後に元の位置での観測を再開する予定である。また、MAKI 観測点においては、従来から運用していた機器の老朽化が進んでいることから再設置後も MAK2 観測点で使用している機器を引き続き使用する予定である。

#### b) GNSS 観測網の強化

令和 3 年度は既存の GNSS 観測網をさらに強化するため、始良カルデラ周辺の北東部、鹿児島市街部、桜島北部（図 2-1-1-2 の◎印）に GNSS 観測点を新設することにした。

このうち、始良カルデラ周辺の北東部については、電子基準点など近隣に既設観測点が少ないことから、この地域の観測点密度の向上のために設置することにしたもので、図上調査および現地調査を経て候補地を霧島市立木原小中学校に決定した。用地借用交渉、必要な許可申請やアンテナ基台の設計・製作を経て、2021 年 8 月 19 日に観測・通信機器および電源機器を設置し（図 2-1-1-6）、同日より KIHR 観測点として観測を開始した。観測機器はセプトリオ社製の GNSS 受信機 PolaRx5e およびアンテナ PolaNt-x MF を使用した。観測データは、受信機の内蔵メモリおよび外部 USB メモリに蓄積され、モバイル通信網を介して取得することができる。



図 2-1-1-6 KIHR 観測点の機器設置状況

図 2-1-1-7 に KIHR 観測点の日毎の位置を示す。観測は順調で欠測等は発生していない。また、得られた水平位置は 1 cm 余りの範囲内に集中するが楕円体高はややばらつきが大きい。これは基準点（SVOG）との標高差が大きいことが主な要因と思われ、SVOG と同程度の標高差のある他の観測点と比べて特に大きいということはない。

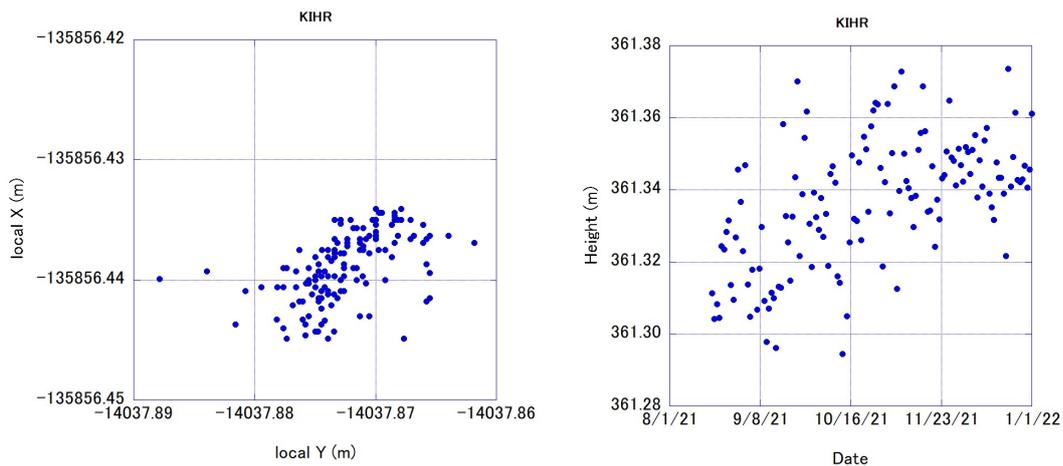


図 2-1-1-7 SVOG を基準点として求めた KIHR 観測点の日毎の水平位置（左、座標系は 2 系）および楕円体高（右）

鹿児島市街部の新規観測点は、大正噴火以前から測量が行われている水準点 BM. 2469 近傍への設置を企図したもので、これにより、BM. 2474 近傍の OSKB 観測点との比高の変化を図 2-1-1-1 に示した水準測量による比高変化と比較することができるようになる。図上調査および現地調査を行い、候補地を鹿児島市山下分庁舎屋上に決定した。用地借用交渉、必要な許可申請やアンテナピラーの設計・製作を経て、2021 年 9 月 13 日に観測通信機器および電源機器を設置し（図 2-1-1-8）、同日より KGFP 観測点として観測を開始した。使用機器は前述の KIHR 観測点と同一の構成である。



図 2-1-1-8 KGFP 観測点の機器設置状況

図 2-1-1-9 に KIHR 観測点の日毎の位置を示す。得られた水平位置および楕円体高はそれぞれよく集中する。2021 年 10 月 13 日にセンサーのハングアップによる 5 日間の欠測が発生した。これ以降の観測は概ね順調であるが、機器の初期不良等の可能性がないか動作状況を注意深く監視する必要がある。

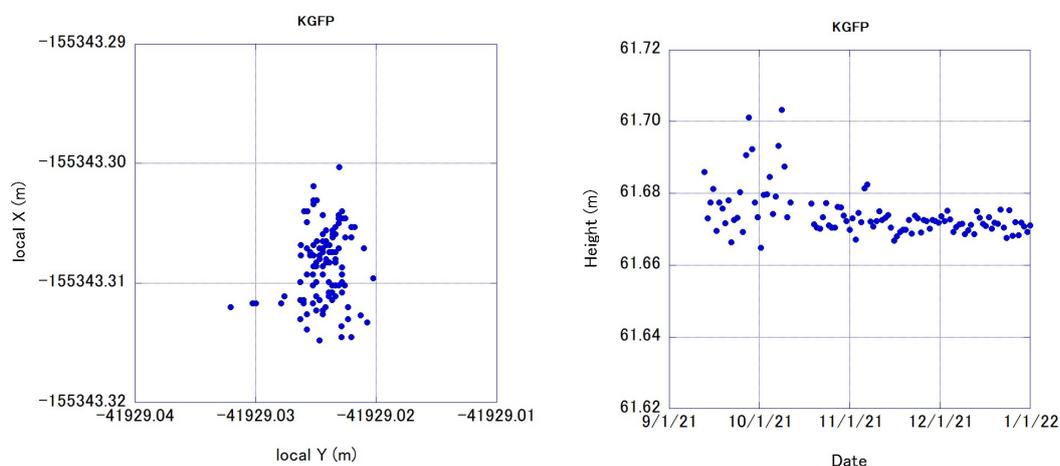


図 2-1-1-9 SV0G を基準点として求めた KGFP 観測点の日毎の水平位置（左、座標系は 2 系）および楕円体高（右）

桜島北部の新規観測点は、キャンペーン観測点 SHRH の近傍に連続観測点を設け、始良カルデラ中央部に近い桜島北部の連続観測網の強化を図るものである。下見調査で選定したいくつかの候補地について、地権者の連絡先を調査し用地交渉を行った結果、SHRH の南東約 80m の果樹畑の一部を借用できることとなり、令和 3 年 11 月下旬に貸借契約の締結に至った。現場が畑地であることから、1m 立方のコンクリート製基礎を設けたうえで、アンテナピラーを設置した。2022 年 2 月 9 日に観測、通信機器等を設置し（図 2-1-1-10）、同日より SRHM 観測点として観測を開始した。使用機器は前述の KIHR 観測点と同一の構成である。



図 2-1-1-10 桜島北部の GNSS 新観測点の機器設置状況

c) 新島北方の中ノ島におけるキャンペーン観測の実施



図 2-1-1-11 中ノ島 (NAKN) における GNSS キャンペーン観測の機器設置状況

2021 年 11 月 29 日から 12 月 3 日の期間、新島北方の中ノ島において、既設のベンチマークを利用したキャンペーン観測を行った (図 2-1-1-11)。使用した機器はライカジオシステムズ社製 GNSS 受信機 System500 および同社製アンテナ AT501 で、欠測等はなく所期の観測データが得られた。

中ノ島観測点 (NAKN) で得られた上下変動量を図 2-1-1-12 に示す。NAKN では 2010 年 11 月に対して 5cm 余の隆起が観測され、2020 年からは 6mm の隆起を示している。近隣の京都大学の連続観測点 (FUTG) および電子基準点 (960719) と比べてみると、変動のパターンが互いによく似ていることから本観測点におけるキャンペーン観測の信頼性は高いと考えられる。

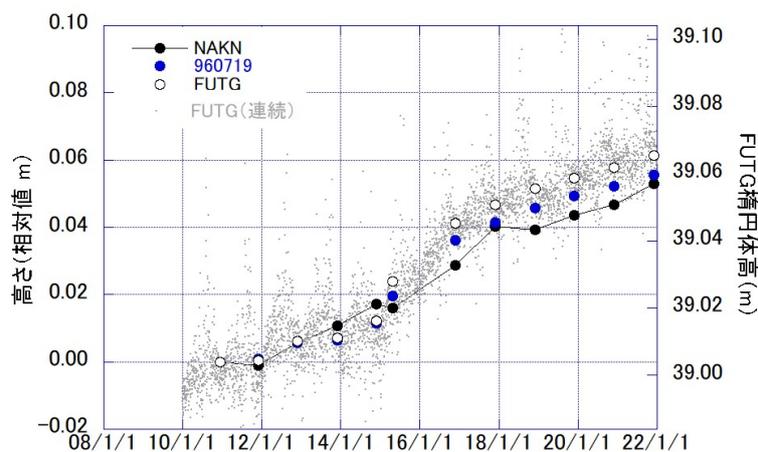


図 2-1-1-12 キャンペーン観測による NAKN (黒丸) の上下変動  
電子基準点 960719 (青丸)、FUTG (白丸、灰色の点は連続観測) をあわせて示した。

d) GNSS 連続観測による始良カルデラ周辺の地殻変動

始良カルデラ周辺のより広域の地殻変動を把握するため、原子力規制庁および京都大学の GNSS 連続観測点に加えて始良カルデラ中央部から概ね 60km 以内に位置する国土地理院の電子基準点を合わせた約 90 点の観測データを用いて、始良カルデラ中央部から約 80km 離れた甑島に位置する国土地理院の電子基準点 950487（鹿島）を固定点とした基線解析を行い、2017 年以降の各観測点の日々の位置を算出している。基線解析には Leica Geo Office ソフトウェアを使用した。基線解析においては精密層を使用し、電離層モデルおよび対流圏モデルはそれぞれ computed model および computed とした。求められた観測点毎の日々の位置から外れ値を除外し、斎藤・井口（2006）が示した水蒸気圧と相対位置の比を用いる気象補正を適用した。補正には、鹿児島地方気象台における日毎の蒸気圧（気象庁、2022）を用いた。基線解析結果の例として、原子力規制庁が設置した観測点で得られた気象補正後の日毎の位置を図 2-1-1-13 に示す。

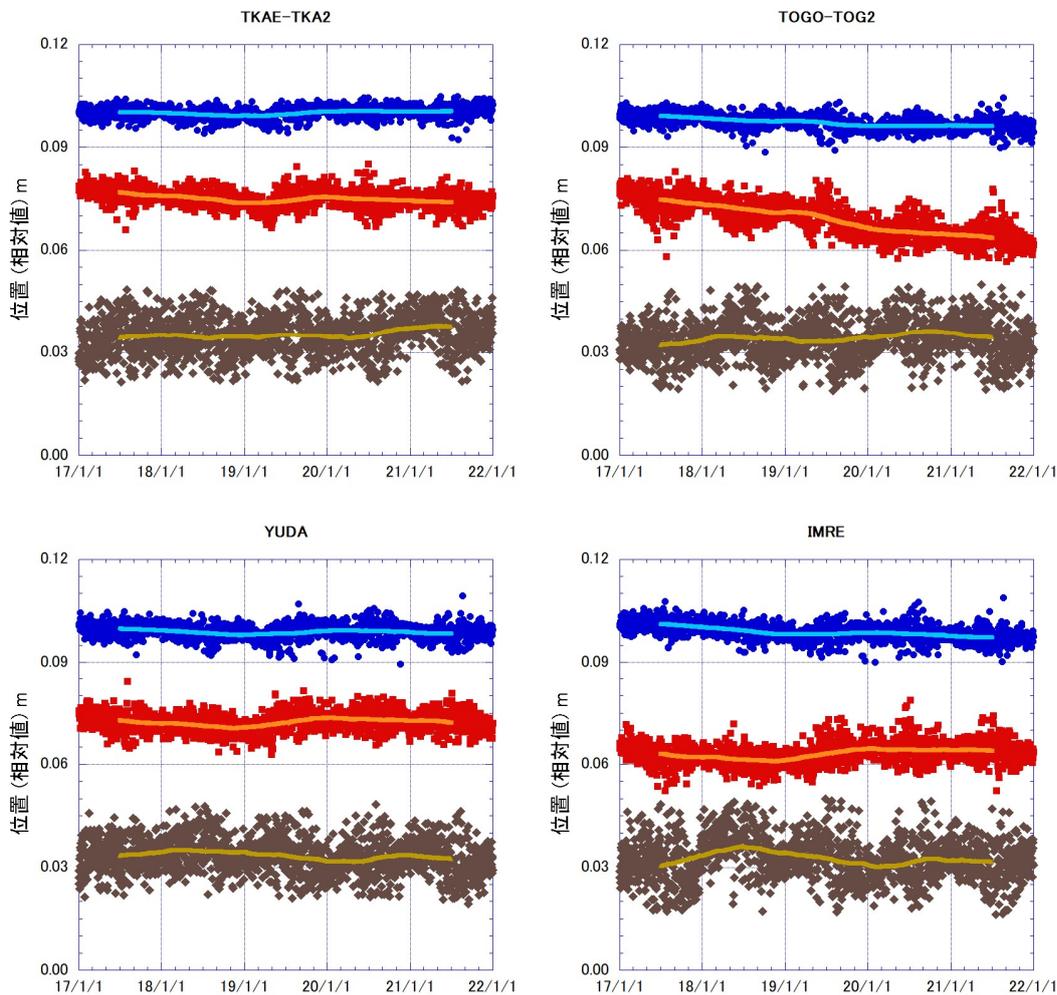


図 2-1-1-13 2017 年-2021 年の GNSS 観測点の位置の時間変化（基準点：電子基準点 950487）。各観測点の日々の位置の南北（青色）、東西（赤色）、上下（茶色）成分とそれぞれの 365 日移動平均。値は相対値でそれぞれ北、東、上が正の値をとる。TKA2 および TOG2 はそれぞれ TKAE および TOGO を移設したもので移設前後の差分を補正している。

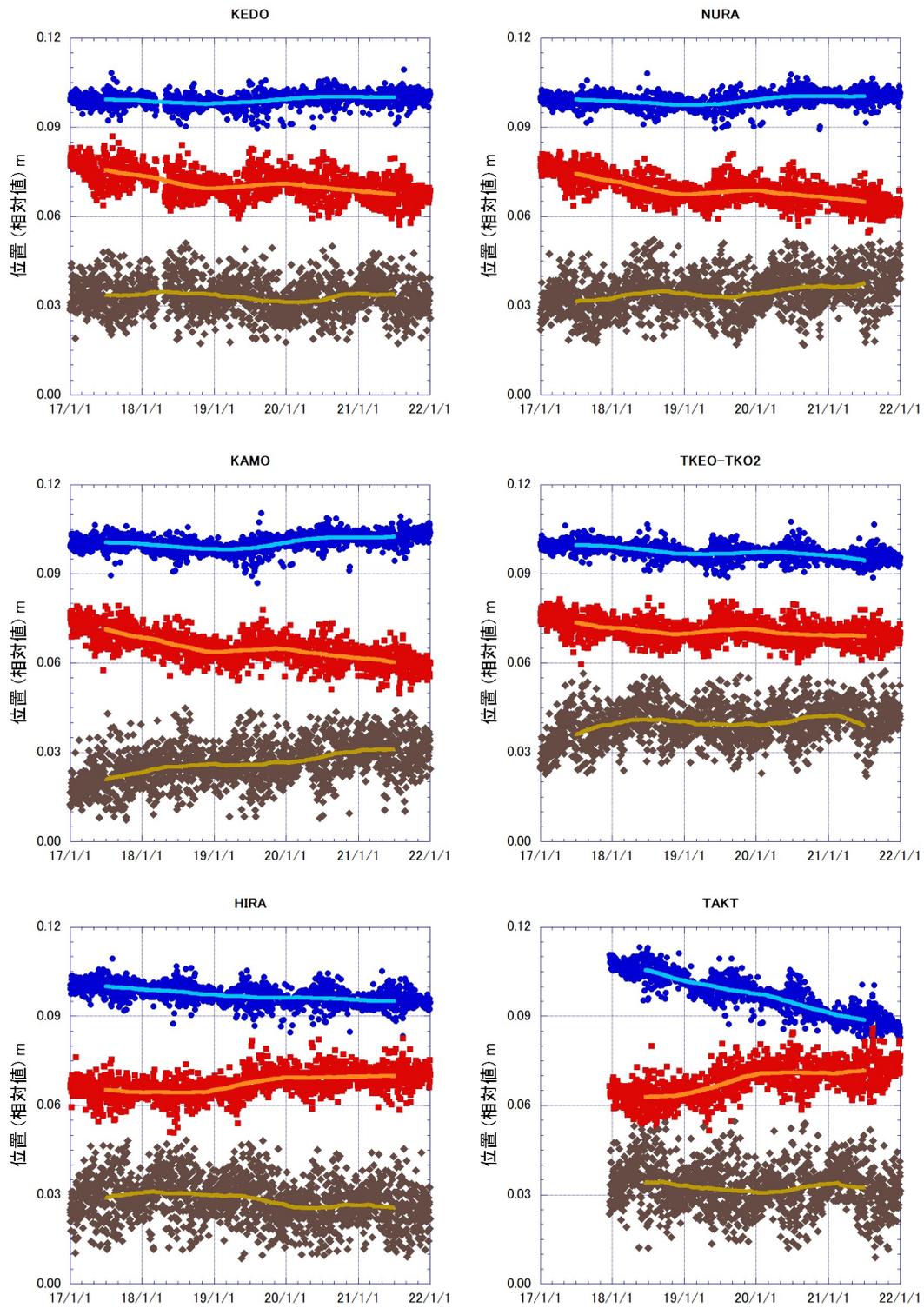


図 2-1-1-13 (続き)。TK02 は TKEO を代替する仮設点で TKEO との差分を補正している。

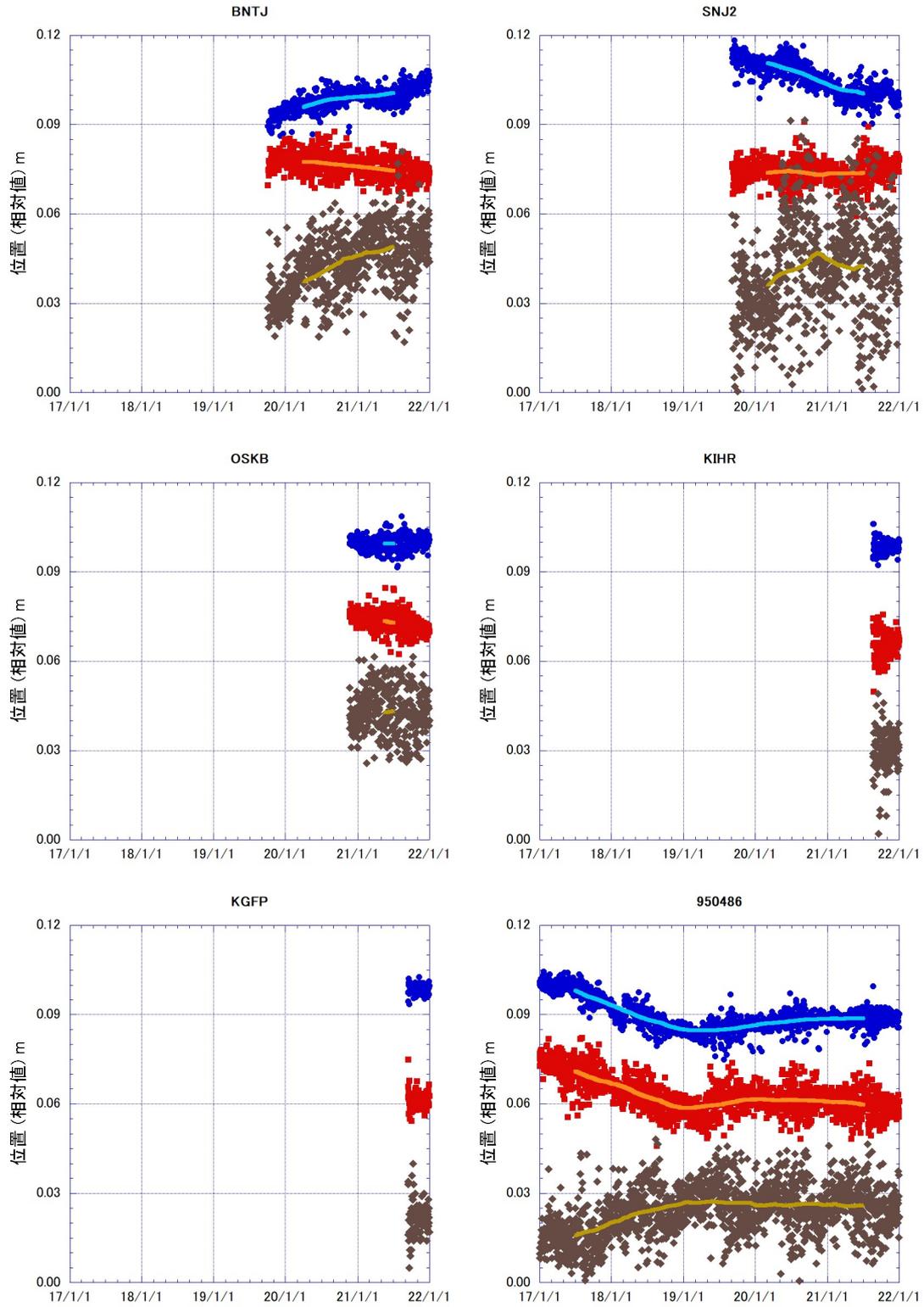


図 2-1-1-13 (続き)。950486 は国土地理院電子基準点 (牧園)。

いずれの観測点でも、気象補正によって軽減されてはいるものの年周変化と考えられる変化が認められるが、霧島火山周辺の観測点を除いて、位置変化の方向に大きな変化はみられず比較的単調な変動を示す。

一方、霧島火山周辺では、図 2-1-1-13 に示した 950486 を例にとると、2018 年末頃を境に変動のトレンドが変化し変動量も小さくなっている。同様の傾向が 960714 (えびの) や 021087 (都城 2)、YOSG などでも認められる。このことから、2018 年末頃までの地殻変動には霧島火山地下の圧力源による変位が含まれているが、それ以降はその影響は小さいと考えられる。

そこで、霧島火山による影響が小さいと考えられる 2019 年初めから 2020 年末までの日々の位置変化を直線近似しその傾きから各観測点の位置の変化量 (変位) を求めた。図 2-1-1-14 はこうして求めた GNSS 観測点の変位を地図上にプロットしたものである。水平変位をみると、全体として北東-南西方向に伸長するようなテクトニックな広域変動 (渡部・田部井、2004) が支配的であるが、始良カルデラの近傍ではそれとは異なる傾向がみられ、火山性地殻変動を反映していると考えられる。また、TOG0-TOG2 観測点の水平変位 (図 2-1-1-14 左図の灰色の矢印) は東西方向に大きく近隣の観測点と異なることから、観測点周辺の局地的な変動を示している可能性がある。上下変位においては、始良カルデラ周縁部で隆起する傾向が認められる。なお、GNSS による上下変位の決定精度は水平変位に比べて劣るため、2.1-2a 節で示す圧力源解析では同時期に行われた水準測量の結果を使用する。

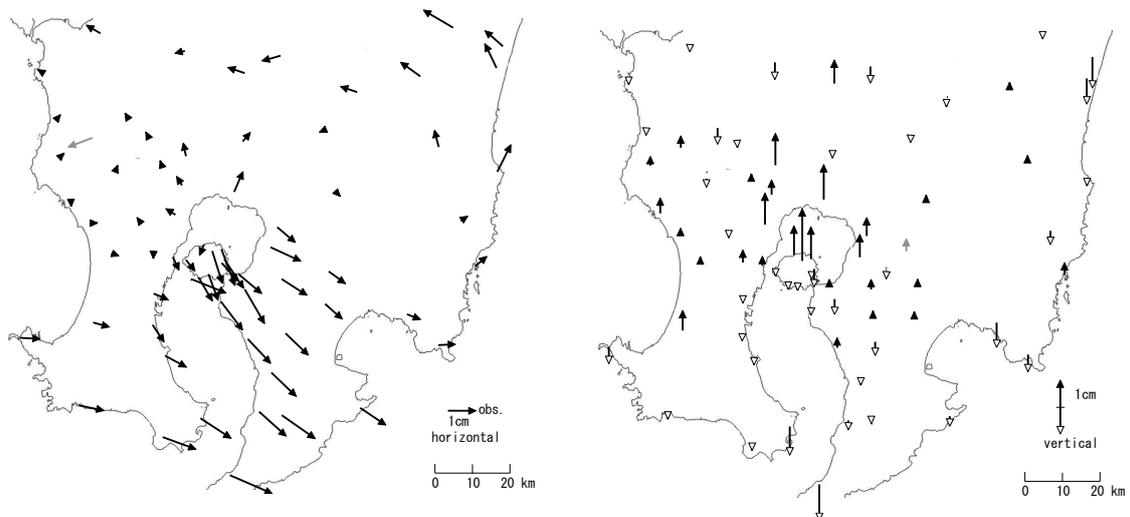


図 2-1-1-14 GNSS 基線解析による 2019 年-2020 年の GNSS 観測点の水平変位 (左) および上下変位 (右)。電子基準点 950487 を固定点として求めたもの。見やすさのため桜島内の観測点の一部を省略した (以降の図も同様)。

広域の変位データから火山性地殻変動を検出するには、テクトニックな変動の影響を除く必要がある。Takayama and Yoshida (2007) はこのようなテクトニックな広域水平変動を緯度と経度の一次多項式によって表した。微小な火山性地殻変動を検出するため、本稿ではこれを拡張し、テクトニックな地殻変動を観測点の緯度と経度の三次多項式で近似することにした。すなわち、

$$T_x = \sum_{n=1}^3 (a_{1n}\Delta\varphi^n + b_{1n}\Delta\lambda^n) + c_1$$

$$T_y = \sum_{n=1}^3 (a_{2n}\Delta\varphi^n + b_{2n}\Delta\lambda^n) + c_2$$

(1)

ここで、 $T_x$ 、 $T_y$ は変位の東西および南北成分、 $\Delta\varphi$ 、 $\Delta\lambda$ は観測点の経度および緯度の固定点との差である。図 2-1-1-14 右図に示した各観測点の水平変位ベクトルから、火山性地殻変動の影響が大きいと考えられる桜島内（図 2-1-1-15 左図の破線内）および特異な変動を示した TOG0-TOG2 観測点を除き (1) 式に近似することでテクトニックな広域地盤変動による水平変位ベクトル（同図の赤矢印）を求めた。

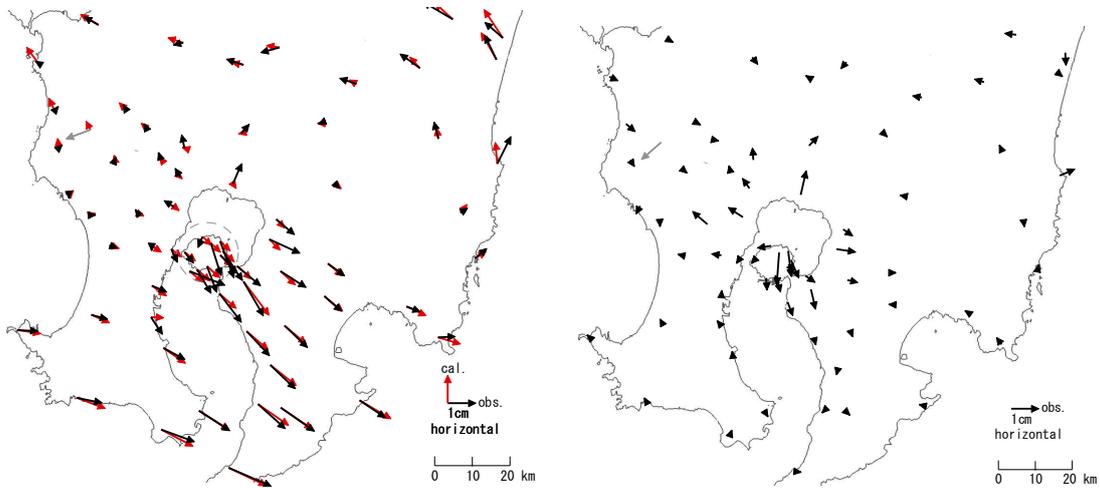


図 2-1-1-15 GNSS 基線解析による 2019 年-2020 年の GNSS 観測点の水平変位  
 左図：テクトニックな変動を補正する前の変位（黒矢印、図 2-1-1-15 に示したものと同一）および三次多項式近似によるテクトニックな水平変位（赤矢印）。  
 右図：テクトニックな広域地殻変動の影響を除去した GNSS 観測点の水平変位

ここで求めたテクトニックな地殻変動による水平変位ベクトルを観測値から引くことでその影響を除いた水平変位を図 2-1-1-15 左図に示す。このような補正により、始良カルデラ近傍で地盤が伸長する傾向が明瞭にみられる。始良カルデラ周辺の地盤の膨張は 2020 年以降においても継続していると考えられる。

(2) 1.2. 始良カルデラ下の圧力源解析

a) 圧力源解析に使用した圧力源モデル

始良カルデラ下の圧力源解析には、圧力源モデルとして半無限均質弾性媒質中の微小球状圧力源（いわゆる茂木モデル、Mogi, 1958）を用いた。深さ  $D$  にある半径  $a$  の微小球状圧力源の圧力増加  $\Delta P$  による水平距離  $r$  の地点における水平変位  $U_r$  及び上下変位  $U_z$  は以下のように記述される。

$$\begin{aligned} U_r &= K \frac{r}{(D^2+r^2)^{\frac{3}{2}}} \\ U_z &= K \frac{D}{(D^2+r^2)^{\frac{3}{2}}} \\ K &= \frac{3}{4\mu} a^3 \Delta P \end{aligned} \quad (2)$$

ここで  $\mu$  は媒質の剛性率、 $K$  は圧力源の強度を表す係数である。圧力源における体積変化量  $\Delta V$  は Delaney and McTigue (1994) により、

$$\Delta V = \frac{4\pi}{3} \quad (3)$$

となる。

圧力源解析では、このモデルを使用して圧力源の位置および体積変化量を未知パラメータとして、観測値とモデルによって計算される変位の差の自乗和が最小となるパラメータをグリッドサーチによって決定した。以下では、GNSS キャンペーン観測で得られた水平変位データを用いた圧力源解析、および 2019 年から 2020 年の GNSS 連続観測点の水平変位データと、水平変位の解析期間とほぼ同時期に実施された水準測量で得られた上下変位データを統合する形で用いた圧力源解析の結果を示す。

b) GNSS キャンペーン観測による圧力源の同定

ここでは、2015 年以降の GNSS キャンペーン観測で得られた水平変位データを用いた圧力源解析結果について報告する。GNSS キャンペーン観測は、表 2-1-2-1 に示した期間に実施され、中ノ島を含むキャンペーン観測点に加えて、原子力規制庁および京都大学防災研究所の GNSS 連続観測点、さらに国土地理院の電子基準点においてキャンペーン観測実施期間に得られた観測データから、基線解析によって各観測点の位置を求め、2 年以上の期間を対象にして得られた水平変位データを基に圧力源の位置と体積変化を求めた。

表 2-1-2-1 GNSS キャンペーン観測の実施期間と連続観測点をあわせた観測点数

観測期間 (UT)		観測点数	サンプリング間隔
2015 年	11 月 23 日～11 月 26 日	49	1 秒
2016 年	11 月 21 日～11 月 24 日	58	1 秒
2017 年	11 月 27 日～11 月 30 日	63	1 秒
2018 年	11 月 26 日～11 月 29 日	65	1 秒
2019 年	11 月 25 日～11 月 28 日	68	1 秒
2020 年	11 月 30 日～12 月 3 日	69	1 秒

モデルの未知パラメータは、圧力源の位置（東西、南北、深さ）および体積変化量とし、それぞれの観測点の変位の観測値とモデルから予測される値の差の二乗和が最小になるようこれらの未知パラメータをグリッドサーチによって決定した。グリッドサーチにおいては、始良カルデラ下の圧力源の水平位置を始良カルデラの中心から東西南北それぞれに20 kmの範囲を0.1 km間隔で、2つの圧力源とも圧力源の深さを海面下0 kmから0.1 km間隔で20 kmまで、体積変化量を0 m<sup>3</sup>から1×10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>間隔で±20×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>まで、を探索範囲とした。

表 2.1-2-2 に 2021 年を含む期間の変位を基に求めた圧力源の位置と体積変化量を平成 31 年度および令和 2 年度報告書（京都大学防災研究所、2020、2021）において報告された圧力源解析結果（A-J）とあわせて示す。

表 2-1-2-2 GNSS キャンペーン観測による圧力源の位置と体積変化

	期間	緯度	経度	深さ	体積変化量	体積変化率
				km	106 m <sup>3</sup>	106 m <sup>3</sup> /年
A	2015-2017 (2年)	31° 40' 24"	130° 41' 10"	5.7	6.6	3.3
B	2015-2018 (3年)	31° 40' 28"	130° 40' 32"	5.8	8.2	2.7
C	2016-2018 (2年)	31° 41' 31"	130° 39' 19"	11.6	15.7	7.8
D	2015-2019 (4年)	31° 40' 18"	130° 40' 56"	6.2	10.8	2.7
E	2016-2019 (3年)	31° 41' 23"	130° 39' 59"	10.8	16.3	5.4
F	2017-2019 (2年)	31° 40' 32"	130° 40' 32"	10.4	9.6	4.8
G	2015-2020 (5年)	31° 40' 13"	130° 41' 42"	6.8	15.4	3.1
H	2016-2020 (4年)	31° 40' 58"	130° 41' 54"	10.2	23.4	5.8
I	2017-2020 (3年)	31° 40' 29"	130° 41' 50"	11.4	17.0	5.7
J	2018-2020 (2年)	31° 39' 50"	130° 41' 46"	10.7	11.2	5.6
K	2015-2021 (6年)	31° 40' 49"	130° 41' 50"	7.4	22.4	3.7
L	2016-2021 (5年)	31° 42' 55"	130° 42' 24"	10.3	32.4	6.5
M	2017-2021 (4年)	31° 41' 15"	130° 42' 09"	11.1	22.5	5.6
M	2018-2021 (3年)	31° 41' 15"	130° 42' 51"	12.4	22.9	7.6
O	2019-2021 (2年)	31° 40' 16"	130° 42' 17"	12.0	13.1	6.9

2021 年を含む期間の水平変位から得られた圧力源の位置はいずれも始良カルデラの中央部付近で、そのうち 2015 年を含まない期間（表 2.1-2-2 の L, M, N, O）は圧力源の深さはその他の 2015 年を含まない（期間 C, E, F, H, I, J）とほぼ同じ 11 km 付近である。一方、期間 K の圧力源の深さはそれより浅く、京都大学防災研究所（2020、2021）で指摘されているのと同様に、桜島北部の浅部の膨張の影響を受けて圧力源が見かけ上浅く求められた可能性がある。この影響が少ないと考えられる 2016 年 11 月以降の期間について求められた圧力源の位置や圧力源における体積変化率はおおむね一致する。2020 年以降においても始良カルデラ下のマグマの蓄積状況に

大きな変化がなく、始良カルデラ中央部の深さ 11 km 付近において平均して約  $6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$  の割合で体積増加が進行していることが示唆される。

c) GNSS 観測による水平変位と水準測量による上下変位を統合した圧力源解析

以下では、GNSS 連続観測で得られた 2019 年–2020 年の水平変位と、同時期に実施された水準測量による上下変位を用いた圧力源解析の結果を示す。水平変位として図 2-1-1-16 右図に示した水平変位を用いた。上下変位データとして用いたのは 2019 年 1 月および 2020 年 11 月に公共測量として実施された水準測量結果（九州電力株式会社、2020、2021）であり、GNSS 観測による水平変位とほぼ同時期をカバーする。図 2-1-2-1 に水準測量路線の端点である 2436、2785、021092A、2514 を不動点とした上下変位を示す。始良カルデラ周縁部に近づくにつれて隆起が大きくなる傾向が顕著である。また、GNSS 観測点で得られた上下変位（図 2-1-1-14 右図）と近傍の水準点の上下変位は概ね一致する

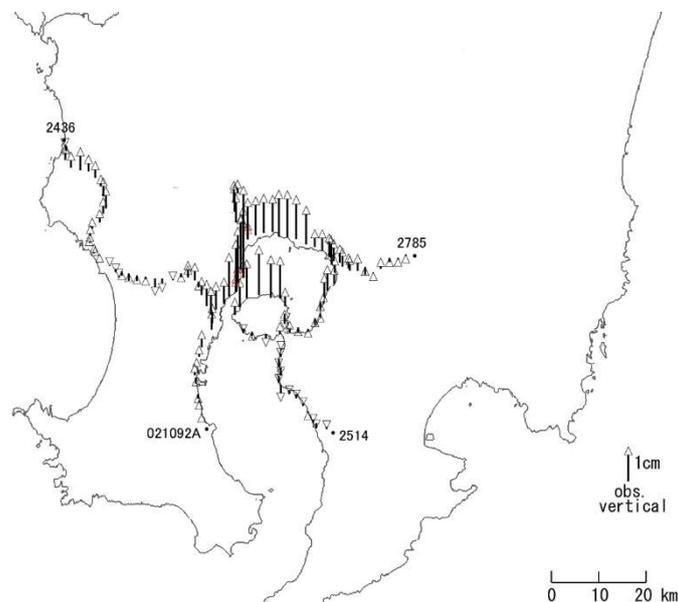


図 2-1-2-1 水準測量による上下変位（2019 年 11 月–2020 年 11 月）

水準点 2436、2785、021092A、2514 を不動点としたもの。

これまでの桜島および始良カルデラ周辺の地盤変動の観測から始良カルデラ下の他に、桜島島内にも圧力源の存在が推定されている。例えば Yoshikawa (1961) や江頭 (1988) は水準測量による上下変位を説明するため、南岳の直下にも圧力源を導入した。図 2-1-2-16 右図や図 2-1-2-1 に示されるように、桜島北岸部に比べて桜島南岸部の変位量がかなり小さく、桜島島内の圧力源の存在を考慮する必要がある。そこで、ここで行う圧力源解析でも始良カルデラ下の圧力源に加えて、桜島南岳直下にもう一つの圧力源が存在すると仮定した。モデルの未知パラメータは、前節で示したものに加えて、南岳直下の圧力源の水平位置を北緯  $31^{\circ} 34' 50''$ 、東経

130° 39′ 30″ に固定として、深さおよび体積変化量を未知とした。それらの未知パラメータを前節と同様のグリッドサーチによって決定した。

圧力源解析に使用するデータは、水準測量による上下変位データ 129 点と、水準測量路線近傍（図 2-1-2-2 の灰色の楕円内）の GNSS 観測による水平変位データ 58 点を使用した。なお、TOG2 観測点と、桜島内の変位データのうち近隣の観測点と極端に異なる変位を示した地点については異常値として除外した。試みに、始良カルデラ中央部から 25 km 以内の水平変位データのみを用いた圧力源解析、上下変位データのみを用いた圧力源解析も行った。

図 2-1-2-2 および表 2-1-2-3 に GNSS 観測による水平変位と水準測量による上下変位を統合した圧力源解析の結果を示した。また表 2-1-2-3 には水平変位のみおよび上下変位のみを用いた場合の解析結果も 2017 年–2019 年についての解析結果（京都大学防災研究所、2021）とあわせて示した。

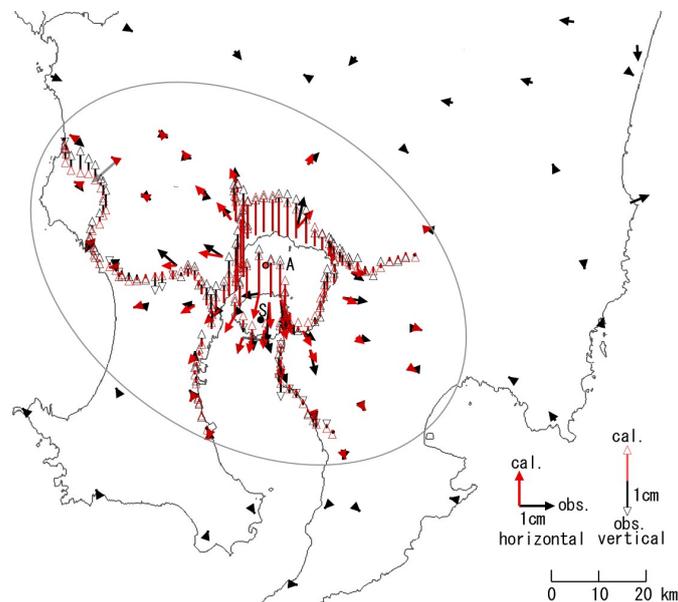


図 2-1-2-2 GNSS 観測による水平変位と水準測量による上下変位を統合した圧力源解析結果。黒矢印：変位の観測値、赤矢印：モデルから予測される変位、A：始良カルデラ下の圧力源の位置、S：桜島南岳直下の圧力源の位置、灰色の楕円内の観測値を圧力源解析に使用した

表 2-1-2-3 圧力源解析で得られた圧力源位置と体積増加量

南岳直下の圧力源の水平位置は固定

		データ数		始良カルデラ下の圧力源				桜島南岳直下の圧力源	
		水	上	緯度	経度	深さ	体積増加量	深さ	体積増加量
		平	下			km	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	km	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
		変	変						
		位	位						
統合	2017-2019	56	130	31° 40' 03"	130° 41' 04"	11.2	15.2	3.6	-0.8
	2019-2020	58	129	31° 40' 13"	130° 40' 08"	11.4	10.8	9.2	-0.6
水平変位	2017-2019	34	-	31° 38' 19"	130° 40' 31"	10.3	10.9	3.6	-1.4
	2019-2020	39	-	31° 37' 53"	130° 40' 20"	10.5	9.2	3.6	-0.4
上下変位	2017-2019	-	130	31° 40' 06"	130° 41' 12"	9.8	14.0	1.4	-0.8
	2019-2020	-	129	31° 40' 13"	130° 39' 49"	11.0	11.2	6.0	-0.9

GNSS 観測による 2019 年-2020 年水平変位と水準測量による上下変位を統合した圧力源解析の結果、始良カルデラ下の圧力源は始良カルデラの中央部の深さ 11.4 km に求められ、 $10.8 \times 10^6$  m<sup>3</sup>の体積増加を示した。また桜島南岳直下の圧力源は深さ 9.2km、 $0.6 \times 10^6$  m<sup>3</sup>の体積減少と求められた。始良カルデラ下の圧力源の位置は 2017 年-2019 年とほぼ同じであり、体積変化の年率も約  $5 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/年と一致する。このことは前節で述べたように始良カルデラ下のマグマの蓄積状況に大きな変化がないことを示している。さらに、ここで求めた圧力源の位置は、先行研究 (Mogi, 1958 ; 江頭, 1998a, b ; 井口・他, 2008 ; Hotta et al., 2016 など) において得られたものともほぼ一致している。このことは、今回の圧力源解析で得られた圧力源位置が妥当なものであるとともに、桜島の大正噴火以降大きく変化していないことを示すと考えられる。

GNSS 観測点 MAKI と YOSI の水平距離の変化は、基線が始良カルデラ中央部の圧力源の直上をほぼ東西に横切ることから、始良カルデラ下の圧力源における体積変化を直接的に反映していると考えられる。京都大学防災研究所 (2021) は、MAKI-YOSI 間の水平距離がほぼ様な伸長を示す時期と停滞する時期を繰り返していることを指摘し、伸長を示す時期の圧力源における体積変化率が  $9 \sim 10 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/年であることを示した。図 2-1-2-3 に示した MAKI-YOSI 間の水平距離をみると、2020 年 7 月頃からの停滞が 2021 年 4 月頃から伸長に転じ、その後は伸長が継続していることがわかる

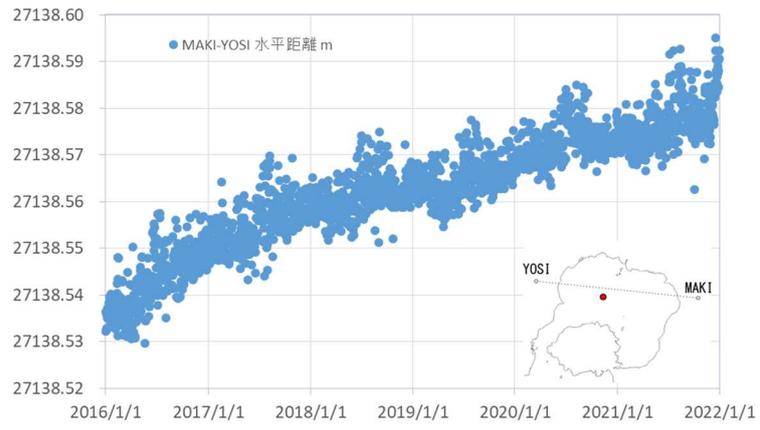


図 2-1-2-3 MAKI-YOSI 間の水平距離 (m)

## (2) 1.3. 始良カルデラへのマグマ供給量の推定

始良カルデラ下の圧力源の体積変化は新たなマグマの貫入による体積増加とマグマの流出による体積減少量の差である。圧力源からのマグマの流出量を桜島からの火山灰の放出量から見積もることができれば、圧力源の体積変化をこれに加えることで圧力源へのマグマの貫入量を見積もることができる。

### a) 桜島からの火山灰放出量の検討

桜島から放出される火山灰の放出量を見積もるための基礎データとして、鹿児島県が行っている降灰量調査のデータを利用する。鹿児島県危機管理防災局は、1978年以降、県内の約60か所（図2-1-3-1）に観測点を設けて降下火山灰の量を調査しており、各観測点における月毎の面積あたり降灰重量（以下では降灰量と表記する）を公表している（鹿児島県、2022）。本稿執筆時点で2021年12月までのデータが存在する。表2-1-3-1に2021年の観測結果を示す。

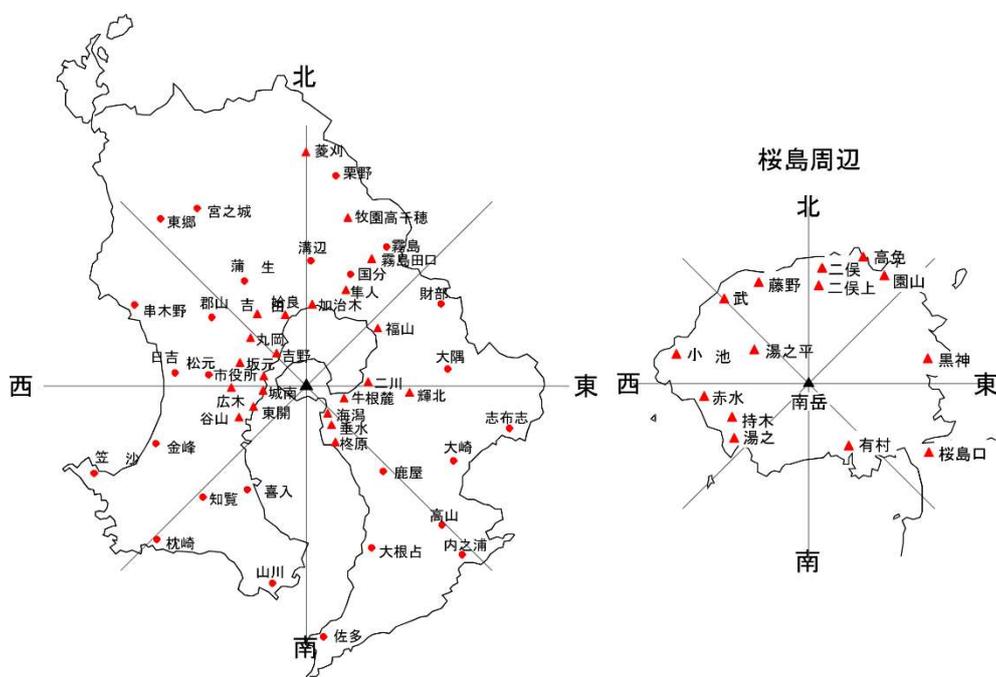


図 2-1-3-1 鹿児島県による降灰観測点の分布（鹿児島県、2021 を改変）

桜島から放出された火山灰量の総量を推定するのに、江頭・石原(1979)、Eto (1989a, 1989b, 2001)の方法を用いた。これは、中心角  $45^\circ$  の8方位の扇形の領域について、それぞれ領域毎に、火口近傍 (3 km 以内) では指数関数、遠方 (3 km 以上) ではべき関数を仮定して火口からの距離に対する降灰量の分布関数を求め、これを積分して領域内の総降灰重量を算出するものである。遠方では降灰量分布関数において降灰量が  $10 \text{ g/m}^2$  になる距離を限界距離として3 km から限界距離までを積分範囲としている。ここでは、鹿児島県危機管理防災局が公表しているものに鹿児島県農政部が行っている降灰調査の観測点を加えた約100地点の観測結果を基に、月毎の

火山灰放出量を求めた。例として、図 2-1-3-2 に、2021 年 3 月の各観測点の降灰量と南岳からの距離の関係を示す。

鹿児島県が調査を開始した 1978 年 6 月以降は、このようにして得られた月毎の推定総降灰重量データが蓄積されている（図 2-1-3-3）。2021 年は 2020 年 7 月以降の降灰が少ない状態が続いている。月別の推定総降灰重量では、3 月の 11 万トンが最も多く、7 月以降は 5 千トン未満で特に少ない。2021 年の月別推定総降灰重量の合計は 31 万トンで、2020 年の 149 万トンよりさらに少ない。

表 2-1-3-1 鹿児島県による降灰量調査結果

各観測点の月毎の面積あたり降灰重量（鹿児島県、2022）および南岳火口からの距離

観測点名	南岳からの距離 km	月間降灰量（2021年） g/m <sup>2</sup>											
		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
湯ノ平	3.0	33	50	678	594	65	7	8	9	44	24	8	7
二俣上	4.5	529	51	354	51	224	3	14	9	23	3	3	13
二俣武	5.0	316	14	311	42	160	3	3	4	8	3	3	5
藤野	4.9	145	40	343	136	57	8	9	6	12	7	6	17
赤水	4.5	30	100	165	384	88	6	16	4	13	6	5	5
小池	5.7	58	39	244	533	36	9	10	18	15	26	5	10
高免	5.1	228	42	202	440	155	3	10	19	13	5	3	9
園山	5.8	133	73	311	139	349	3	27	6	9	13	3	11
黒神	4.5	471	69	269	133	67	3	8	10	5	3	9	35
有村	3.1	791	461	927	546	77	5	4	3	24	7	48	135
湯之持木	3.5	20	21	165	306	99	12	15	4	47	6	18	39
持木	3.8	37	46	140	248	43	7	3	3	43	9	14	6
桜島口	5.3	168	97	245	160	115	7	5	2	5	3	4	31
海潟	7.3	268	182	269	127	34	6	6	3	6	7	6	41
垂水	10.5	279	42	119	74	33	3	3	3	4	3	5	8
牛根麓	9.0	40	53	203	63	30	4	4	2	3	3	3	8
柘原	14.8	185	50	116	96	24	4	4	3	4	3	5	7
二川	12.5	22	26	43	15	8	3	2	2	3	3	2	3
市役所	9.7	7	28	45	138	22	3	3	3	3	3	2	4
坂元	10.8	5	11	55	30	13	2	2	3	4	9	3	3
吉野	8.6	16	49	117	32	6	2	1	3	3	3	4	3
丸岡	14.8	3	4	22	8	4	2	2	2	4	3	2	3
東開	12.0	7	4	4	10	12	2	2	2	2	2	2	3
広木	13.7	3	9	14	30	20	2	3	2	2	3	2	3
谷山	15.7	4	5	16	15	6	2	2	2	2	2	2	3
城南	9.0	27	53	105	211	53	14	13	5	9	9	4	9
福山町	18.7	21	4	29	4	3	2	2	2	2	2	2	3
輝北町	20.0	6	9	9	7	5	2	2	2	2	3	3	3
加治木町	17.8	11	5	14	3	12	2	1	2	2	2	2	3
隼人町	20.0	4	1	19	6	5	1	1	1	1	1	1	1
始良町	16.7	12	1	9	3	10	1	1	1	1	1	1	1
吉田町	17.4	3	1	38	12	5	1	1	1	1	1	1	1
国分	20.4	3	4	7	3	8	3	1	1	1	1	1	2
溝辺	27.8	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
蒲生	21.9	4	1	4	20	3	1	1	1	1	1	1	1
霧島	31.3	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
栗野	41.8	1	1	1	1	2	1	1	0	1	1	1	1
郡山	20.2	4	1	12	10	11	1	30	2	2	2	4	6
松元	21.4	2	4	15	17	3	4	18	3	2	2	6	6
日吉	29.6	9	3	4	13	1	1	2	0	1	1	1	1
串木野	39.2	2	1	7	3	1	0	1	0	1	1	1	1
金峰	33.2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
宮之城	40.8	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	3	1
東郷	43.8	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	3	1
知覧	32.8	1	1	1	3	1	0	1	1	1	1	1	1
笠沙	48.4	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0
枕崎	48.4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
大隅	32.0	2	4	1	1	1	1	0	0	2	3	3	4
財部	35.7	68	4	2	2	1	1	1	0	0	1	0	0
大崎	37.2	37	24	38	38	2	1	2	1	0	1	0	1
志布志	43.5	2	15	9	9	3	1	1	1	3	1	1	1
喜入	25.2	1	1	1	3	2	2	6	3	1	1	3	3
山川	41.8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
鹿屋	28.4	21	3	4	15	4	1	1	1	1	1	0	1
高山	38.2	4	4	1	11	3	1	0	1	0	0	1	1
大根占	39.5	1	8	2	3	1	1	1	0	1	1	0	0
内之浦	51.8	4	5	1	7	6	1	0	1	1	0	1	7
佐多	54.2	1	1	1	1	3	1	0	1	1	1	0	1
霧島田口	36.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
牧園高千穂	37.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
菱刈	48.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

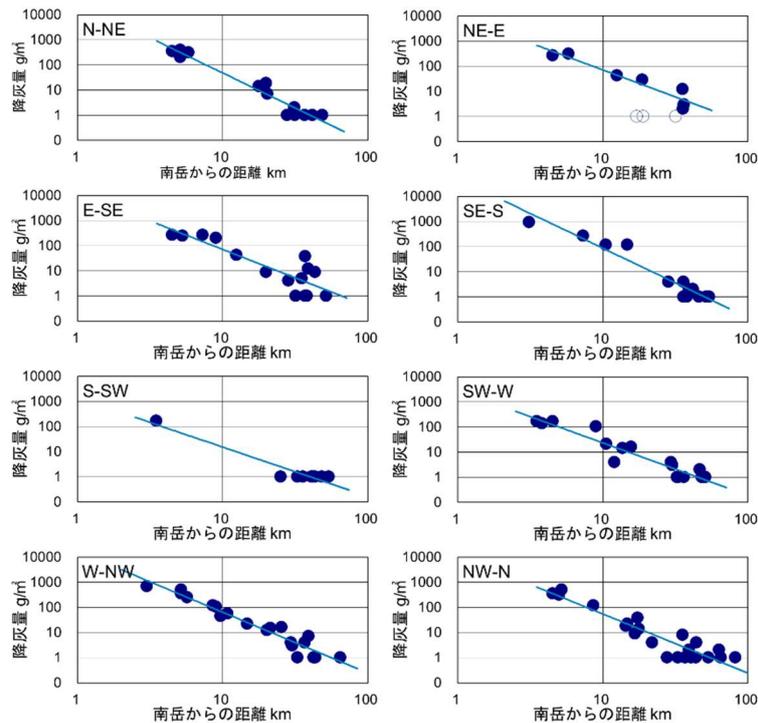


図 2-1-3-2 鹿児島県の降灰観測点における月別降灰量と南岳からの距離の関係 (2021年3月)

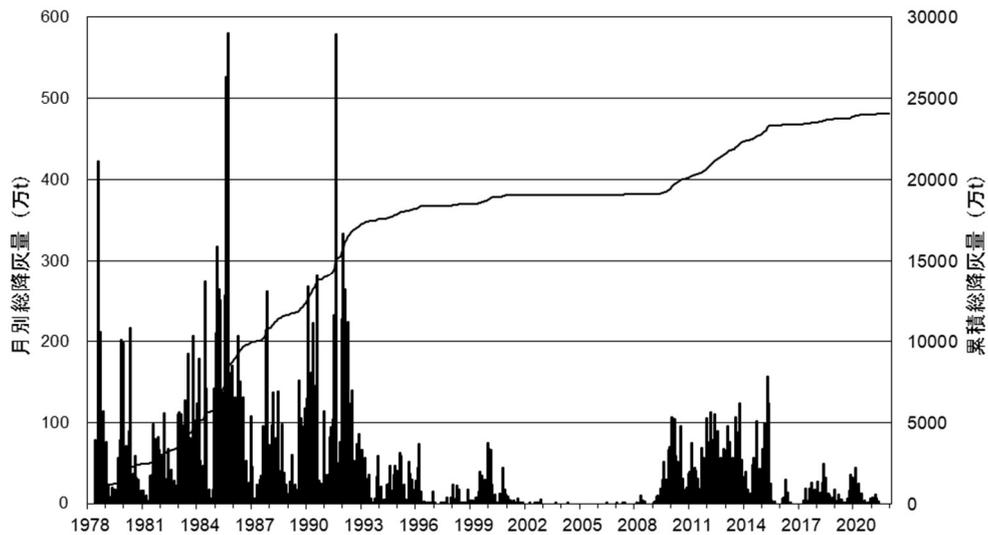


図 2-1-3-3 桜島から放出された月別推定総降灰量とその累積値 (1978年6月以降) 縦棒は月別推定総降灰量、線はその累積値をそれぞれ示す。単位：万トン。

b) 始良カルデラへのマグマ供給量の推定

既に述べたように、GNSS 観測点 MAKI および YOSI の間の水平距離の変化（図 2-1-3-4）は、始良カルデラ下の圧力源における体積変化を直接的に反映していると考えられる。MAKI-YOSI 間の水平距離は 2010 年から 2021 年までにおよそ 7 cm 伸長しているが、時期によって伸長率が異なり、2015 年から 2017 年までの期間は 12 mm/年に達する。2021 年は、1-2-c 項で述べたように、4 月頃以降約 8mm/年の伸長が進行している。

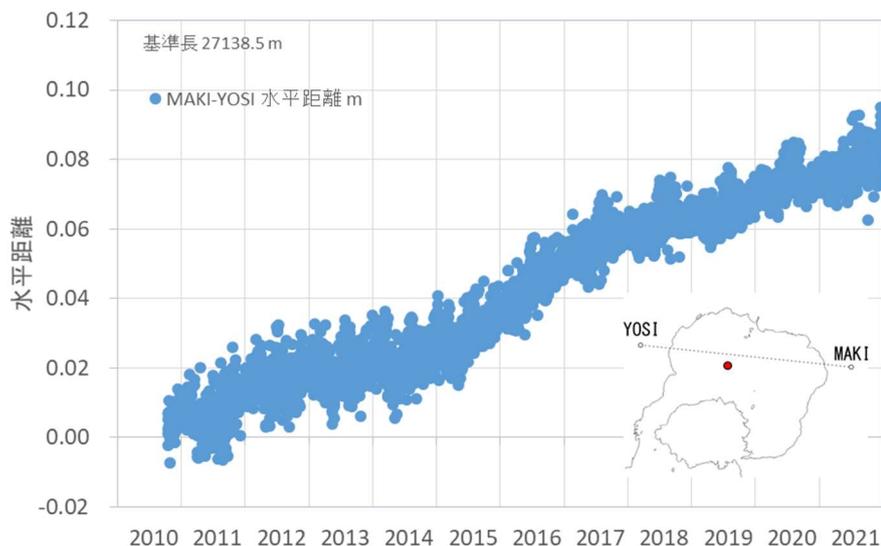


図 2-1-3-4 GNSS 観測点 MAKI と YOSI の間の水平距離の時間変化 (m)

右下に MAKI、YOSI および体積変化量の算出に用いた圧力源の位置（赤丸）を示す。

以下では始良カルデラ下の圧力源を GNSS による水平変位と水準測量による上下変位を統合した圧力源解析から得られた位置（北緯  $31^{\circ} 40' 13''$ 、東経  $130^{\circ} 40' 08''$ 、深さ 11.4 km）に固定し、MAKI-YOSI 間の月平均の水平距離の変化が茂木モデルの圧力源における体積変化に起因するものとして、圧力源における体積変化量を見積もった。これに月毎の火山灰放出量を体積に換算したものを加えて始良カルデラへのマグマ供給量を求めた。降下火砕物の重量を圧力源におけるマグマの体積に換算する際に仮定する密度（以下では DRE 換算密度）は  $2500 \text{ kg/m}^3$  がよく用いられる（例えば、江頭・他、1998a, b）が、降下火砕物に含まれない揮発成分の寄与を考慮すると DRE 換算密度はより小さい値をとるほうが妥当かもしれない。ここでは DRE 換算密度として  $2500 \text{ kg/m}^3$  および  $1000 \text{ kg/m}^3$  とした場合のマグマ供給量を求めた。

2010 年 11 月以降の始良カルデラへのマグマ供給量を図 2-1-3-5 に示す。マグマ供給速度は時期により変動はあるが、平均的には、DRE 換算密度を  $2500 \text{ kg/m}^3$  とした場合  $8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ 、 $1000 \text{ kg/m}^3$  とした場合  $10 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$  である。これまで知られているマグマの供給速度  $1 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{年}$

（Ishihara, 1981）とほぼ同等であるといえる。2021 年においては、2020 年 7 月頃から供給速度が鈍る傾向が続いていたが、4 月頃以降上昇に転じ、平均的な供給速度は、この期間の火山灰の

放出がほとんどないため DRE 換算密度が  $2500 \text{ kg/m}^3$  および  $1000 \text{ kg/m}^3$  のいずれの場合も約  $10 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$  となる。

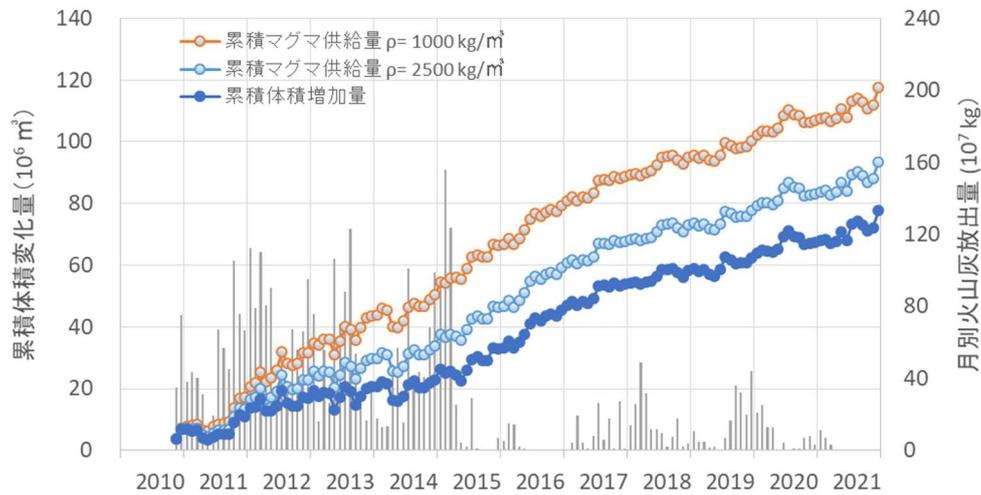


図 2-1-3-5 始良カルデラの中央部の圧力源へのマグマ供給量の時間変化

火山灰放出量を体積に換算する際の密度を  $2500 \text{ kg/m}^3$  および  $1000 \text{ kg/m}^3$  とした場合のマグマ供給量について示す。圧力源における体積変化および月別火山灰放出量（縦棒）も合わせて示した。

#### c) 圧力源モデルの改良の試み

ここまで本稿で示した圧力源解析においては、始良カルデラ下および桜島南岳直下に 2 つの茂木モデルによる圧力源を仮定することで、対象期間の地殻変動を大きな矛盾なく説明できた。茂木モデルは均質媒質中の球形圧力源を仮定したものであるが、本研究でも地震観測などから始良カルデラの地下構造に関する知見が蓄積されつつある。本研究において、始良カルデラ地下の圧力源モデルに非球形の圧力源形状や媒質の非均質性を導入することは、圧力源における体積変化量の推定精度の向上が期待できることから有用であると考えられる。そのための試みとして、始良カルデラ地下に扁平率の異なる回転楕円体圧力源をおいたときの地表の変位量を有限要素法を用いて算出した。

有限要素法の計算には FlexPDE7 を用いた。計算領域は、水平方向は始良カルデラ中央部から東西南北に  $60 \text{ km}$ 、深さ方向は海拔  $-50 \text{ km}$  までとした。節点数は、最大の節点間隔を  $4 \text{ km}$  として FlexPDE7 の自動分割機能を使用した結果、2 万個程度であった。節点の変位は、圧力源にある体積変化を生じさせるような内部圧力を与え、それによる圧力源表面の変位から Hooke の法則に従って算出した。

まず、媒質としてポアソン比  $0.25$ 、剛性率  $30 \text{ Gpa}$  の均質弾性体を仮定したモデル計算を試みた。モデルの上端は標高  $0 \text{ m}$  とし、圧力源の中心位置として、始良カルデラ中央部の深さ  $11.2 \text{ km}$  および桜島南岳直下の深さ  $3.6 \text{ km}$  を仮定した。有限要素法モデルでは、桜島南岳直下の圧力源を半径  $200 \text{ m}$  の球形で体積変化量を  $-0.8 \times 10^6 \text{ m}^3$  とし、始良カルデラ下の圧力源を水平半径  $500 \text{ m}$  の回転軸が鉛直な回転楕円体で体積変化量を  $15.2 \times 10^6 \text{ m}^3$  とした。これは、昨年度報

告書（京都大学防災研究所、2021）に示した、2017年から2019年までのGNSS測位による水平変位と水準測量による鉛直変位から茂木モデルを用いたグリッドサーチによって得られたものである。図2-1-3-6に変位の計算結果の例を示す。圧力源の縦横比（鉛直半径／水平半径比）が大きくなるほど地表の変位が顕著な範囲は狭くなっていることがわかる。また、始良カルデラ下の圧力源の水平半径を1000 mおよび2000 mとした場合についても試行したが図に示した水平半径500 mの場合と有意な差は認められなかった。

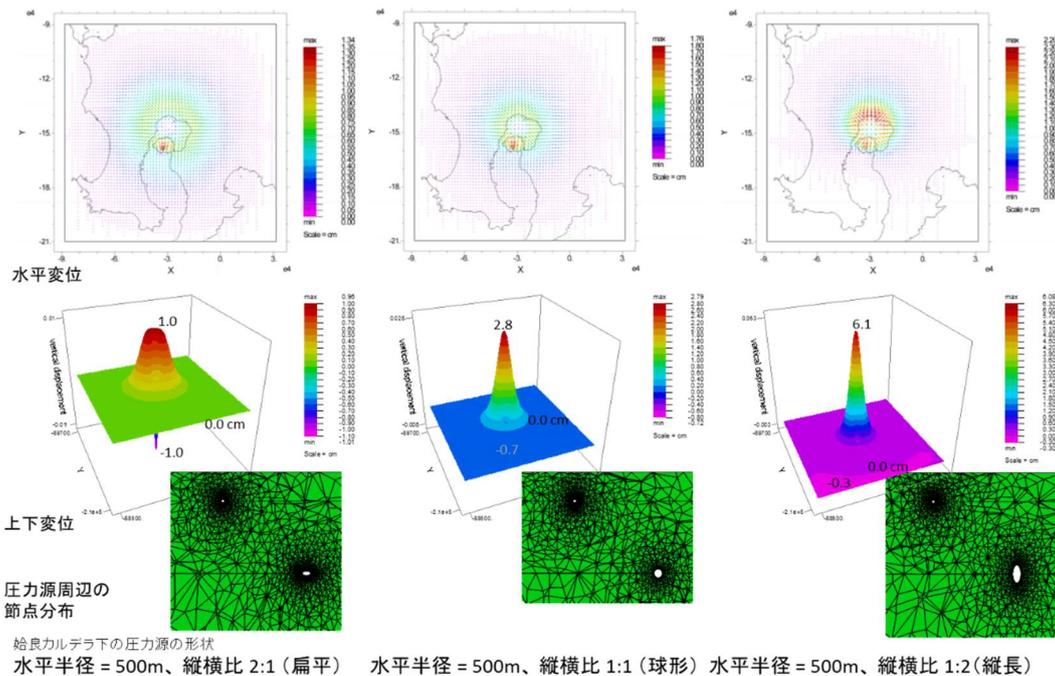


図 2-1-3-6 有限要素法モデルを用いた回転楕円体形圧力源による変位（圧力源の中心の深さ 11.2km、水平半径 500m）と圧力源の節点分布（2つの圧力源を通る鉛直断面）

次に、上記と同じモデルの上端の形状に地形を考慮し、始良カルデラ下の圧力源の縦横比が 0.5-5 までのいくつかの場合について、FlexPDE7 の最適化機能を用いてモデル計算による変位と観測値の残差二乗和が最小になる体積変化量を探索した。モデル上端の形状は、陸域と鹿児島湾内については既存の地形データ（国土地理院、2021；海上保安庁、2002）を基に作成した地形データ（始良カルデラ周辺で約 100 m メッシュ、最も遠方では 500 m メッシュ）を用い、それ以外の領域では海拔 0 km とした。この場合の計算結果でも圧力源の縦横比が大きくなるほど地表の変位が顕著な範囲は狭くなっている

図 2-1-3-7 に地表変位の残差二乗和と圧力源の縦横比の関係を示す。圧力源形状が縦横比 0.5 から 1.5 程度にかけて残差二乗和が急激に小さくなるが、その後は緩やかに増加する。つまり、圧力源の形状が扁平や球体よりもやや縦長（縦横比が 1.5 程度）の方が観測値をよりよく説明できると考えられる。しかし、縦横比がそれより大きくなると、残差二乗和や個々の観測点の残差の出現パターンはほとんど変化しない。

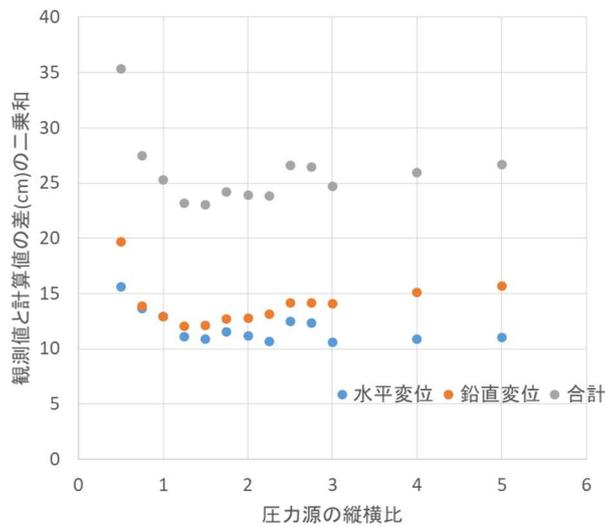


図 2-1-3-7 地表変位の観測値と有限要素法モデルによる計算値の残差二乗和と圧力源の縦横比の関係（圧力源の中心の深さ 11.2 km、水平半径 500 m、表層地形あり）

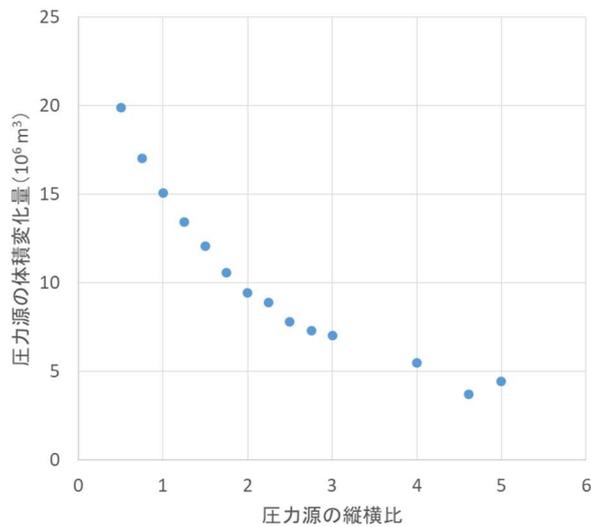


図 2-1-3-8 有限要素法モデルによる圧力源の体積変化量と縦横比の関係（圧力源の中心の深さ 11.2 km、水平半径 500 m、表層地形あり）

図 2-1-3-8 は残差二乗和を最小にする圧力源の体積変化量と圧力源形状の関係を示したもので、縦横比が大きくなるほど減少する。圧力源が球体の時の体積変化量や残差二乗和は茂木モデルを用いたグリッドサーチ法で求めたものとよく一致する。圧力源の縦横比を残差二乗和が最も小さかった 1.5 にとると体積変化量は球体の場合より 2 割程度小さくなる。このような特徴は圧力源の水平半径を 1000 m および 2000 m とした場合でも差異はなかった。

さらに、媒質に地震波速度構造（Ono ほか、1978）を参考に深さにより剛性率の異なる（表 2-1-3-2）水平成層構造を導入し、始良カルデラ下の深さ 13.6 km に地震波の反射面が存在する（京都大学防災研究所、2021）ことを考慮して圧力源の上面の高さを深さ 13.6km に固定したモデルについても同様に圧力源の水平半径を 500 m、1000 m、2000 m として試行した。この試行においても、圧力源の縦横比が大きくなるほど地表の変位が顕著な範囲は狭くなる傾向が認められ、また、圧力源の水平半径が大きくなると変位の大きさはやや小さくなるものの出現パターンは同様であった。

表 2-1-3-2 有限要素モデルで使用した剛性率

深さ (km)	<0	0-4	4 - 8	8-12	12- 16	16- 20	20- 24	24- 28	28- 32	32- 36	36- 40	>40
剛性 率 (GPa)	12.7	18.5	27.1	29.1	32.1	34.7	37.5	40.3	43.3	46.4	49.7	58.5

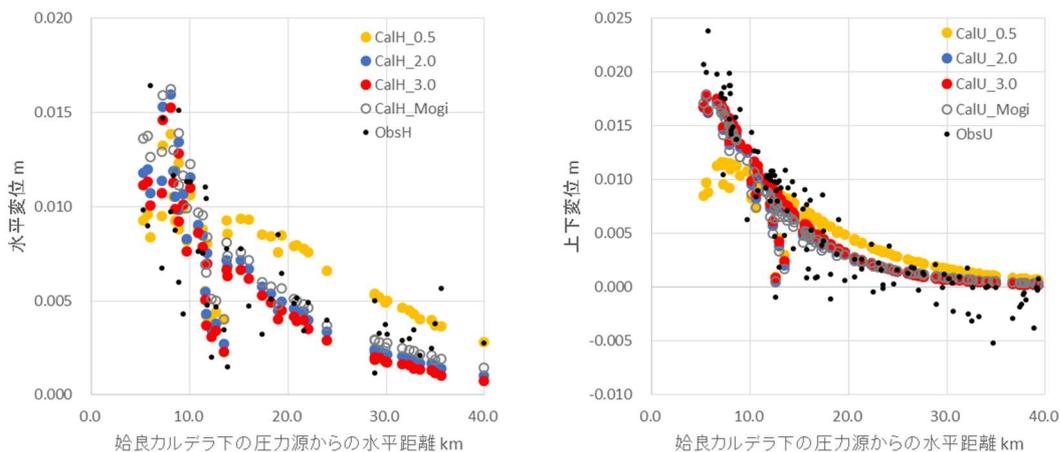


図 2-1-3-9 地表変位の観測値とモデル計算による予測値の比較（左：水平変位、右：上下変位）

横軸は始良カルデラ下の圧力源中心からの水平距離。観測値（黒点）の水平変位はGNSS測位、上下変位は水準測量によるもの。白丸は茂木モデル（圧力源の深さ 11.2 km、体積変化量  $15.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ ）による予測値。黄・青・赤の丸は有限要素法モデル（圧力源の上端の深さ 13.6km、水平半径 2000m、表層地形あり、水平成層構造）で圧力源の縦横比をそれぞれ 0.5、2、3 にした時の予測値。

図 2-1-3-9 にこのモデルによって予測される地盤変動観測点の変位と観測値を示した。圧力源が縦長の場合の予測値（青丸および赤丸）に比べ扁平な場合（黄丸）の方が明らかに観測値との

差が大きいことがわかる。このモデルにおいても圧力源が縦長の方が観測値をよりよく説明できるといえる。圧力源の縦横比が2の場合（青丸）と3の場合（赤丸）ではモデルから予測される観測点の変位はほぼ同じ値になる。また、茂木モデルによる予測値は圧力源の縦横比が2や3の場合と概ね合致するが、圧力源中心からの水平距離が10 km以下の（主に桜島北部に位置する）観測点の水平変位においては、圧力源の縦横比が2や3の場合の方が観測値により近い値をとる。

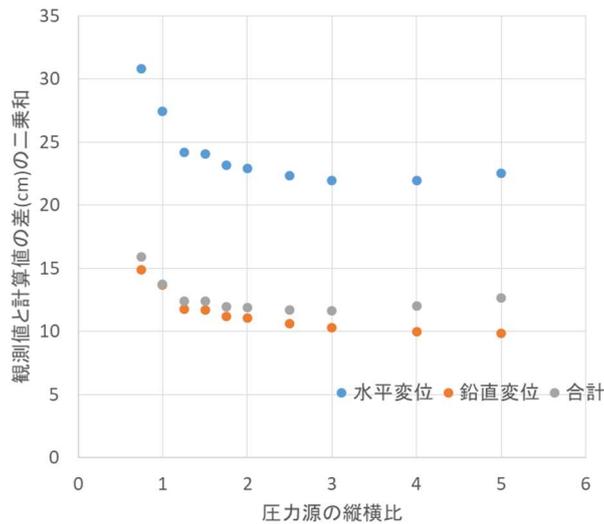


図 2-1-3-10 地表変位の観測値と有限要素法モデルによる計算値の残差二乗和と圧力源の縦横比の関係（圧力源の上端の深さ 13.6 km、水平半径 2000 m、表層地形あり、水平成層構造）

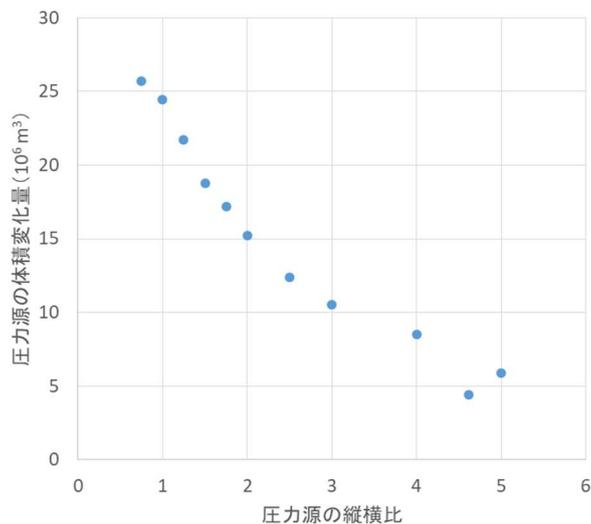


図 2-1-3-11 有限要素法モデルによる圧力源の体積変化量と縦横比の関係（圧力源の上端の深さ 13.6 km、水平半径 2000 m、表層地形あり、水平成層構造）

図 2-1-3-10 は地表変位の残差二乗和と圧力源の縦横比の関係を示したもので、図 2-1-3-7 の場合に比べて、圧力源形状が扁平からやや縦長になるにつれて残差二乗和が急激に小さくなりその後あまり変化しない傾向は共通しているが、その値は全体に小さくこのモデルの方が観測値をよりよく説明できると考えられる。圧力源の体積変化量（図 2-1-3-11）についても、図 2-1-3-8 の場合と同様に縦横比が大きくなるほど減少する。

今回得られた結果では、圧力源の形状が扁平や球体よりもやや縦長の方が観測値をよりよく説明できると考えられるが、縦横比がある程度よりより大きくなると、残差二乗和や個々の観測点の残差の出現パターンがほとんど変化しないため最適な縦横比の値を判断することは現状では難しい。一方で、圧力源における体積変化量の推定値は圧力源の形状によって明瞭に異なっており、より現実的な圧力源形状を決定することは重要である。今後、地下構造をより反映させたモデルの構築や異なる観測期間での試行を進め、さらにモデルを改良する必要がある。また、変位のパターンが大きく変化する範囲が主に鹿児島湾北部の海域で地盤変動観測点が存在しないことも最適な圧力源の形状を決定することを妨げる要因になっていると考えられる。本研究で計画されている海底地盤変動観測装置は、このような問題の解決に寄与すると期待される。さらに始良カルデラの地下構造がより詳細にわかればそれによって圧力源モデルに制約を与えることも期待できる。

#### (2) 1.4. まとめ

始良カルデラ周辺における GNSS 観測による地殻変動観測網を維持するとともに始良カルデラ北西部などに観測点を新設した。

GNSS キャンペーン観測で得られた水平変位データを用いた圧力源解析から得られた圧力源の位置は、先行研究で得られていたものと同様に、始良カルデラ中央部の深さおよそ 11 km であった。また、GNSS 連続観測によって得られた水平変位と水準測量による上下変位を統合する形で、2019 年–2020 年の期間について、始良カルデラ下の圧力源の位置と体積変化量を求めた。圧力源の位置は、先行研究で得られていたもの、また GNSS キャンペーン観測で得られたものとはほぼ一致する。

桜島から放出された噴出物量を始良カルデラからのマグマ流出量とみなして始良カルデラへのマグマ供給量を見積もった。2010 年 11 月以降 2021 年までの平均的なマグマ供給速度は  $8\sim 10 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$  であり、これまで知られている値と同等であった。2021 年 4 月頃以降は 2020 年 7 月頃から低下傾向にあったマグマ供給速度が平均と同程度で推移している。

圧力源モデルの改良の試みとして、有限要素法モデルを用いて楕円体圧力源による地表の変位を求め、圧力源の形状の違いによる差異を検討した。圧力源の形状はやや上下方向に長い形状の方が、また、圧力源の深さは茂木モデルによる推定値よりもやや深いほうが観測値をよりよく説明できる。

圧力源の縦横比がある程度よりより大きくなると、残差二乗和や個々の観測点の残差の出現パターンがほとんど変化せず、最適な縦横比の決定を困難にしている。これは、変位のパターンが大きく変化する範囲が主に鹿児島湾北部の海域で地盤変動観測点が存在しないことも要因になっ

ていると考えられ、本研究で計画されている海底地盤変動観測装置は、このような問題の解決に寄与すると期待される。また、さらに始良カルデラの地下構造がより詳細にわかればそれによって圧力源モデルに制約を与えることも期待できる。

#### 参考文献

- Delaney, P.T. and McTigue, D.F. (1994) Volume of magma accumulation or withdrawal estimated from surface uplift or subsidence, with application to the 1960 collapse of Kilauea Volcano, *Bull. Volcanol.*, 56, 417-424.
- 江頭庸夫(1988)桜島火山周辺における地盤変動—1982年～1985年—, 第6回桜島火山の集中総合観測, 15-19.
- Eto, T. (1989) An estimation of the amount and the dispersal of volcanic ash-falls ejected by summit eruptions at Sakurajima Volcano, *Proceedings, Kagoshima International Conference on Volcanoes 1988*, 448-451.
- Eto, T. (2001) Estimation of the amount and dispersal of volcanic ash-fall deposits ejected by vulcanian type eruption, *Rep. Fac. Sci. Kagoshima Univ.*, 34, 35-46.
- 江頭庸夫・石原和弘 (1979) 桜島火山周辺における火山灰の降下堆積状態, *火山*, 24, 88.
- 江頭庸夫・高山鐵朗・山本圭吾・Muhamad Hendrasto・味喜大介・園田忠臣・木股文昭・宮島力雄・松島健・内田和也・八木原寛・王彦賓・小林和典 (1998a) 桜島火山周辺における水準測量結果について—1991年12月～1996年10月—, 第9回桜島火山の集中総合観測, 15-29.
- 江頭庸夫・高山鐵朗・園田忠惟・山本圭吾 (1998b) 桜島火山周辺における光波測量結果—1992年1月～1996年12月—, 第9回桜島火山の集中総合観測, 31-37.
- Hotta, K., Iguchi, M., Ohkura, T. and Yamamoto, K. (2016) Multiple-pressure-source model for ground inflation during the period of high explosivity at Sakurajima volcano, Japan - Combination analysis of continuous GNSS, tilt and strain data -, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 310, 12-25.
- 井口正人(2006)マグマの蓄積過程にある始良カルデラ, *月刊地球*, 28, 2, 115-121.
- 井口正人・高山鐵朗・山崎友也・多田光宏・鈴木敦生・植木貞人・太田雄策・中尾茂・前野直・長尾潤・馬場幸二・大重吉輝・放生会正美(2008)桜島および始良カルデラ周辺におけるGPS観測, 第10回桜島火山の集中総合観測, 53-62.
- Iguchi, M., Tameguri, T., Ohta, Y., Ueki, S., Nakao, S. (2013) Characteristics of volcanic activity at Sakurajima volcano's Showa crater during the period 2006 to 2011 *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, 58, 115-135.
- Ishihara, K. (1981) A quantitative relation between the ground deformation and the volcanic materials ejected, *Abstract 1981 IAVCEI Symposium - Arc Volcanism*, 143.
- 石原和弘・高山鐵朗・田中良和・平林順一(1981)桜島火山の溶岩流 (I) —有史時代の溶岩流の容積—, *京都大学防災研究所年報*, 24, 1-10.

- 海上保安庁 (2002) 「沿岸の海の基本図」 シェープファイル, 販売元: (財)日本水路協会 海洋情報研究センター
- 鹿児島県 (2022) 鹿児島県ホームページ,  
URL: <http://www.pref.kagoshima.jp/bosai/sonae/sakurajima/index.html>
- 加茂幸介・石原和弘(1980)地盤変動から見た桜島の火山活動, 桜島地域学術調査協議会研究報告, 鹿児島県, 19-28.
- 気象庁 (2022) 気象庁ホームページ, URL:  
<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>.
- 国土地理院 (2021) 数値標高モデル(10m メッシュ), 国土地理院ホームページ, URL:  
<https://www.gsi.go.jp/kiban/index.html>
- Kriswati, E. and Iguchi, M. (2003) Inflation of the Aira caldera prior to the 1999 eruptive activity at Sakurajima volcano detected by GPS network in south Kyushu. *Ann. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, 46B, 817-826.
- 京都大学防災研究所 (2020) 平成 31 年度原子力規制庁委託研究成果報告書、原子力施設等防災対策等委託費 (火山性地殻変動と地下構造及びマグマ活動に関する研究) 事業、329pp.
- 京都大学防災研究所 (2021) 令和 2 年度原子力規制庁委託研究成果報告書、原子力施設等防災対策等委託費 (火山性地殻変動と地下構造及びマグマ活動に関する研究) 事業、469pp.
- 九州電力株式会社 (2020) 国土地理院九州地方測量部公共測量成果, 令 1 九公第 268 号.
- 九州電力株式会社 (2021) 国土地理院九州地方測量部公共測量成果, 令 2 九公第 172 号.
- Mogi, K. (1958) Relation between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surface around them, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, 38, 99-134.
- Omori, F. (1918) The Sakura-Jima eruptions and earthquakes, II. *Bull. Imp. Earthq. Inv. Comm.*, 8(6).
- Ono, K., Ito, K., Hasegawa, I., Ichikawa, K., Iizuka, S., Kakuta, T., and Suzuki, H. (1978) Explosion Seismic Studies in South Kyushu Especially Around the Sakurajima Volcano, *J. Phys. Earth*, 26, Supplement, S309 - S319.
- 斎藤英二・井口正人 (2006) 口永良部島火山における GPS 連続観測による気象要素を加味した 3 次元変位検出, *火山*, 51, 21-30.
- 佐々憲三 (1956) 地震予知に関する 2, 3 の問題(II), 地殻変動について; 京都大学防災研究所設立 5 周年記念論文集, 3-7.
- Takayama, H. and A. Yoshida (2007) Crustal deformation in Kyushu derived from GEONET data. *J. Geophys. Res.*, 112, B06413.
- 渡部豪・田部井隆雄 (2004) 南西諸島の GPS 速度場とサイスモテクトニクス. *地震*, 57, pp. 1-10.
- Yamamoto, K., Sonoda, T., Takayama, T., Ichikawa, N., Ohkura, T., Yoshikawa, S., Inoue, H., Matsushima, T., Uchida, K., Nakamoto, M. (2013) Vertical ground deformation associated with the volcanic activity of Sakurajima volcano, Japan

during 1996 - 2010 as revealed by repeated precise leveling surveys, Bull. Volcanol. Soc. Japan, 58, 137-151.

Yoshikawa, K. (1961) On the crustal movement accompanying with the recent activity of the volcano Sakurajima (Part 1), Bull. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., 48, 1-15.

(2) 2. 始良カルデラにおける海底地盤変動観測の検討

本委託費の事業を構成する項目の一つである、活動的カルデラにある火山の火山性地殻変動とマグマ活動に関する調査では、地球物理学的調査の一環として九州南部の始良カルデラにおける海底地殻変動観測の検討を実施する。この計画の重要な一翼を担うのが海底地盤変動観測装置（以下、本装置と称する）である。本装置は火山観測において測地測量における電子基準点に相当する役割を担う。本装置を始良カルデラに相当する北部鹿児島湾の海底に設置することによって、始良カルデラの火山活動に伴って生ずる地盤変動をその変動源の直近で直接計測できることが期待される。また変動源の直近における地盤変動は始良カルデラの地下における火山活動の詳細な情報をもたらすことが期待される。

Yamamoto et al. (2013)及び京都大学防災研究所(2021)等の報告によれば始良カルデラ南側の桜島北岸における垂直変動量は年1 cm程度であるため、海底地盤変動観測装置はこのスケールの地盤変動の検出をねらった設計とした。

本項目のロードマップを下に示す。

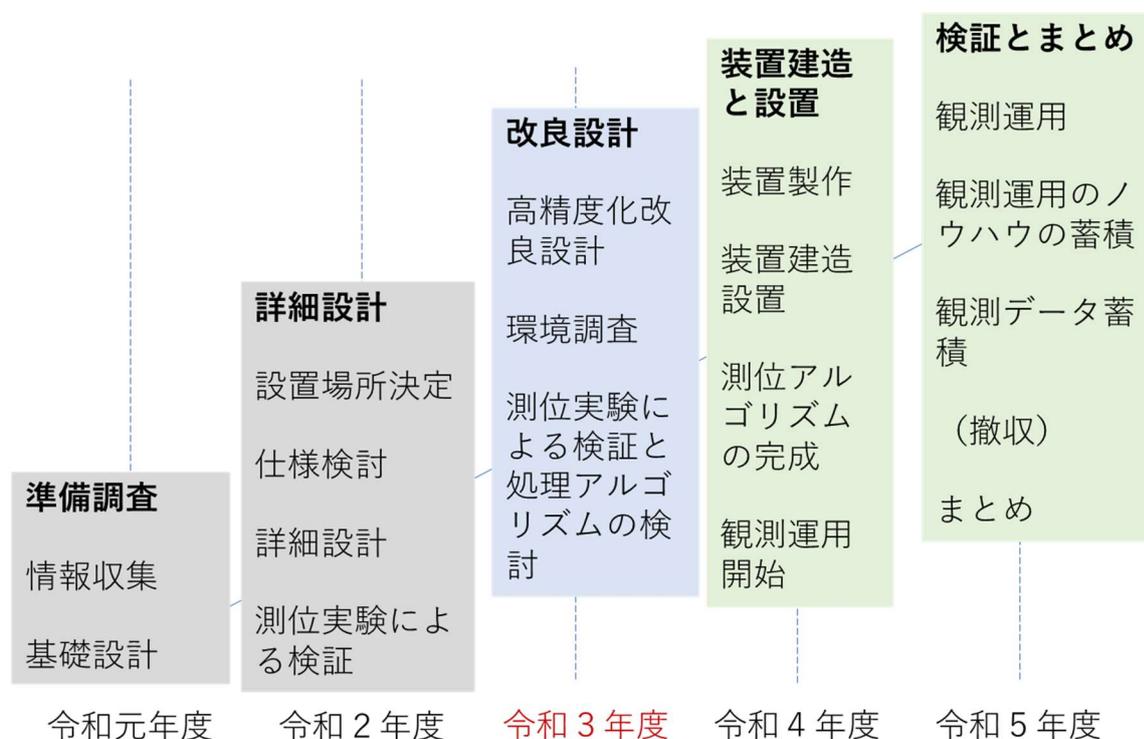


図 2-2-1. 本項目のロードマップ

上に示すロードマップにもとづき、令和3年度は以下の項目に取り組んだ。

- 1) 海底地盤変動観測装置の改良設計
- 2) 海底地盤変動観測装置設置予定地点とその周辺における海況および気象調査
- 3) 海底地盤変動観測装置測位方式の検討

1) では令和3年度は令和2年度に実施した詳細設計を高精度化の観点で見直し、設計水深30mに変更するとともに傾斜検知を精度の良いGNSSアンテナアレイによる方式に変更すること

を含んだ改良設計を実施した結果について報告する。2) では本装置設置予定地点とその周辺における実際の海象条件および気象条件を知るために実施した調査観測について報告する。3) では潮流力や波浪力によって運動する GNSS アンテナアレイの測位結果から海底の基準点の位置を推定する手法について実際の測位実験を通して検討した結果を報告する。

## (2) 2.1. 海底地盤変動観測装置の改良設計

令和3年度は令和2年度に実施した詳細設計を見直し、設計水深30mとしてより高い精度のGNSSアンテナアレイによる傾斜検知方式に対応することと、総重量軽減とを狙った改良設計を実施した。なお、海底に定置したアンカー（シンカー）にユニバーサルジョイントで連結されたピラーが浮体による浮力で海中に直立する基本構造と、測位手法をGNSS測位に依る方針は不変とした。

主要な改良点を表2-2-1-1に示す。下表中で令和2年度とあるのは京都大学防災研究所(2021)による。

表2-2-1-1. 令和3年度設計の改良点

項目	令和3年度改良設計	令和2年度詳細設計
設置水深(設計値)	30 m	50 m
全重量	約 38 t	約 63 t
観測計器容器	200 リットル	2500 リットル
搭載観測機器	ツインアンテナ GNSS 受信機 2 台・モバイルルータ 1 台	ツインアンテナ GNSS 受信機 1 台・流向流速計・風向風速計・水圧計・データロガー 1 台・モバイルルータ 2 台
ピラー傾斜検知	GNSS アンテナアレイ	傾斜角計
GNSS アンテナ	4 基	2 基
電源系統数	1 系統	2 系統
太陽電池パネル	60W×4 枚	92W×4 枚
蓄電池容量	2V 300Ah×6 個直列=300Ah	12V 60Ah×8 個並列=480Ah
標識灯（施設灯）	正灯 1 基のみ・遠隔監視装置 無し	正灯 1 基・副灯 2 基・遠隔監視装置
設置時に必要とされる起重機船および台船数	起重機船 550t 1 隻	400t 起重機船 1 隻および 300t 起重機船 1 隻、台船 1 隻

改良設計の結果、海底地盤変動観測装置は全長 40.7m、浮体部幅 3.0m、作業台+ピラー及び浮体重量約 18t、アンカー約 20t の規模になった。

傾斜検知方式の見直しに伴い、GNSS アンテナおよび GNSS 受信機搭載数が増加した。一方、全重量の減少は設計水深を見直し 30m とした効果が大きい。また、全重量の減少を目的とした観測計

器項目の削減により、蓄電池容量の削減および観測計器容器サイズの削減が実現された。さらに全体のサイズおよび重量の減少により、設置に必要な起重機船数が削減された。全体図を図 2-2-1-1 に示し、各部詳細図を添付資料に示す。

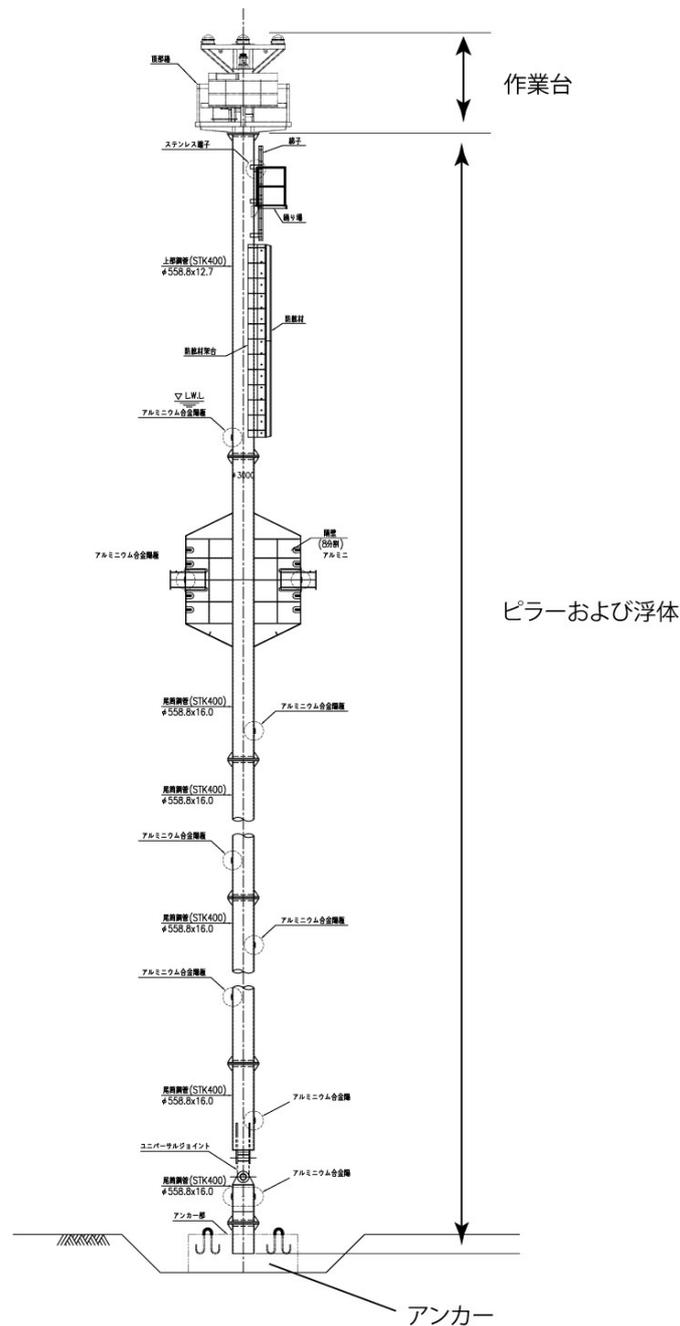


図 2-2-1-1. 海底地盤変動観測装置全体図

先述のように海底地盤変動観測装置は測地測量における電子基準点に相当する役割を負うため、GNSS アンテナの配置および設置精度が直接観測精度に反映される。海底地盤変動観測装置の頂部における GNSS アンテナ A~D の幾何学的配置と、基部におけるユニバーサルジョイントとの位置関係を図 2-2-1-2 のように決めた。

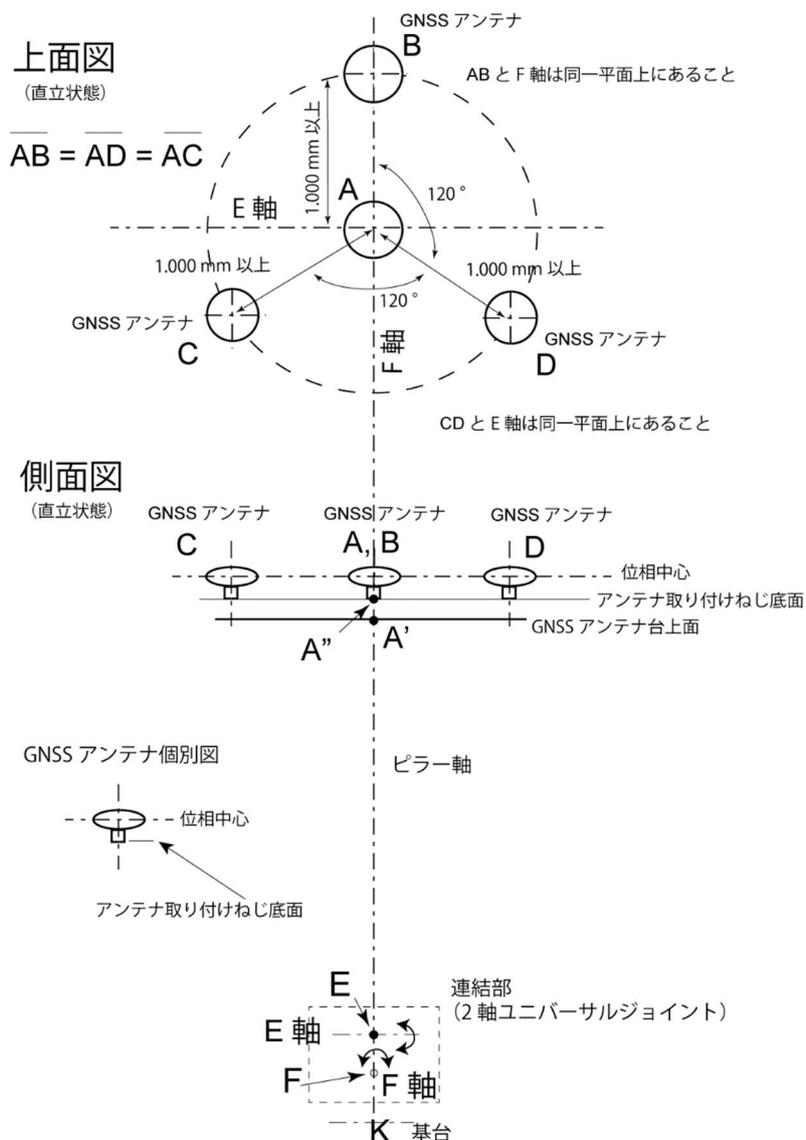


図 2-2-1-2. GNSS アンテナ配置図

このうち、アンテナ A はピラー軸上に位置しており、主アンテナとして取り扱われる。一方アンテナ B~D はピラー軸を法線とする平面上に配置され、この平面の傾斜を推定するための GNSS アンテナアレイを構成する副アンテナとして取り扱われる。ピラーはユニバーサルジョイントを介して海底のアンカーと連結される。外力にしたがってピラーが自由に傾動できるように、ユニバーサルジョイントは直交する 2 軸のそれぞれを中心として回転できる構造とする。なお、ピラーは水中部分に浮力体を有し、外力が働かない（無風および静水条件）状態では直立する。

以上の改良設計結果の設計根拠となる設計計算書及び参考図、改良設計を反映した仕様を添付資料に示す。この仕様をもとに令和 4 年度以降に海底地盤変動観測装置の実現に取り組む予定である。

(2) 2.2. 設置予定点およびその周辺の環境調査

海底地盤変動観測装置は先述の設計水深を考慮して、水深 30 m の場所を選定した。設置予定場所を図 2-2-2-1 に示す。設置場所は北緯 31 度 37 分 46 秒緯線、東経 130 度 42 分 55 秒経線、北緯 31 度 37 分 50 秒緯線、東経 130 度 43 分 07 秒経線で囲まれる海域である。設置予定点は江戸時代安永年間（18 世紀）に海底噴火活動を伴って隆起したいわゆる安永諸島の中央部の南南西-北北東方向に伸びる尾根地形の鞍部である。

(a)



(b)

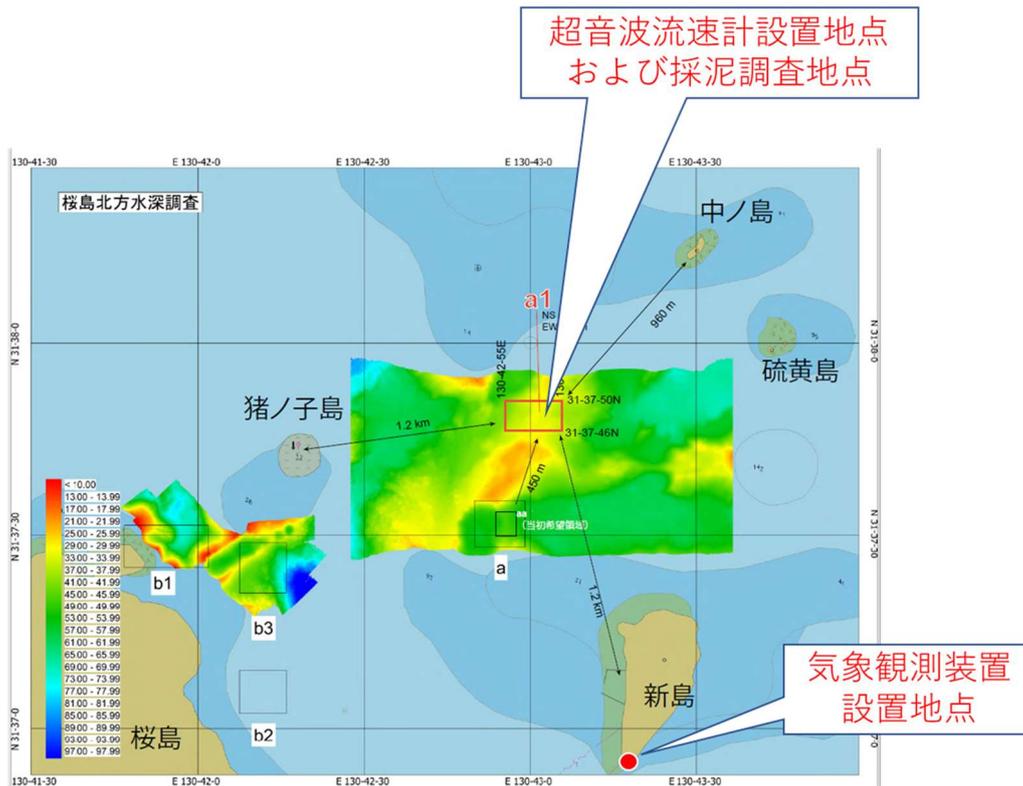


図 2-2-2-1. 海底地盤変動観測装置設置予定場所 (a)は始良カルデラ内の位置を示し、(b)は(a)図赤枠内を拡大して示す。a1 が定置予定場所(北緯 31 度 37 分 46 秒緯線 東経 130 度 42 分 55 秒経線 北緯 31 度 37 分 50 秒緯線 東経 130 度 43 分 07 秒経線で囲まれる海域)である。水深データは海上保安庁による。

表 2-2-2-1 に令和 3 年度海底地盤変動観測装置改良設計の前提とした環境条件を示す。環境条件の大部分の値は原子力規制庁(2019)による。地質については京都大学防災研究所(2021)によった。

表 2-2-2-1. 海底地盤変動観測装置設計用環境

自然条件	地形	水深 30m
	地質	粘性土質砂または粘性土礫混じり砂
	10 年確率風速	21.6 m/s (SSE)
	30 年確率風速	27.1 m/s (SSE)
	50 年確率風速	30.0 m/s (SSE)
	最高潮位	428 cm (鹿児島湾)
	潮流	0.5 kt 以下
	最大フェッチ	13.3 km (NW)
	10 年確率波高	1.4 m
	30 年確率波高	2.0 m
	50 年確率波高	2.5 m
	10 年確率周期	3.9 s
	30 年確率周期	4.5 s
	50 年確率周期	4.9 s

令和 3 年度は海底地盤変動観測装置の設置予定地点の海象および気象を把握することを目的として、設置予定地点における約 1 ヶ月間の海況調査を夏季と冬季の 2 季実施し、設置地点近傍の新島における気象観測を令和 3 年 8 月から継続している。また、海底地盤状況の把握を目的として設置予定点とその付近で採泥調査を実施した。

a) 海況調査

設置予定地点とその周辺の海水の動きの概略を知るために海況調査を実施した。海況調査は定点観測と曳航観測とで構成し、定点観測結果から調和定数を推定した。定点観測では潮流潮位の時間変化の把握を目的とし、曳航観測では潮流の空間分布の把握を目的とした。定点観測および曳航観測ではともに超音波流速計(ADCP: Acoustic Doppler Current Profiler)による流向流速測定を実施した。いずれの測定も 600 KHz の超音波を使用した測定であった。

定点観測では、夏季(第一季)は 2021/8/20 11:00 - 9/28 07:50 (38 昼夜)、冬季(第二季)は 2021/11/9- 08:00 - 12/22 06:50 (42 昼夜)の 2 期間に分けて観測を行った。事前の聞き込みで 8 月下旬の潮汐が大きく、冬季は潮汐が小さくなることを把握しており、夏季の最大潮汐と冬季の通常潮汐とを比較することを狙い、観測期間を 2 回設けた。曳航観測は ADCP を GNSS 測位装置とともに作業船に艀装し、MTRBM 設置直後の潮流の転流期を含む時間帯(第一季 8/20 11:00 - 8/20 12:20, 第二季 11/9 8:56 - 10:05)で作業船を運航して測定を行った。

ADCP は媒質中を伝わる超音波の後方散乱におけるドップラーシフトが媒質の流れの速度場と関連することを利用した流体運動速度測定機材である。Goodman and Kemp(1981)が原理を発表し、Joyce et al. (1982)が初めて船舶に搭載して海水の流れの場の測定を行った。

ADCP の原理を図 2-2-2-2 とともに説明する。

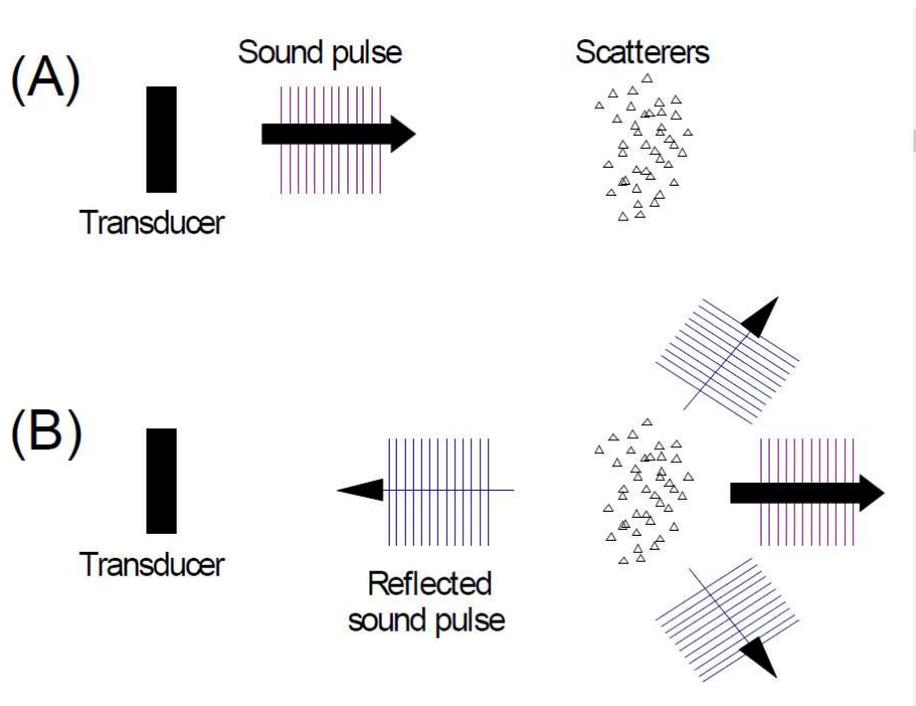


図 2-2-2-2. ADCP の原理 (Teledyne RD, 2011)

ADCP は超音波トランスデューサで超音波の発振と検出とを行う。トランスデューサから発射された超音波パルスはその一部が水中の擾乱（散乱体）で後方散乱する。水中の散乱体がある速度で移動していると、ドップラー効果によってトランスデューサに戻ってくる後方散乱波の周波数が散乱体の速度に比例して変化する。この後方散乱波の周波数変化を検出し散乱体移動速度を推定する。後方散乱波が戻ってくるまでの時間を計測することによって散乱体までの距離を知ることができる。ドップラー効果は超音波の伝播経路に沿った方向に生ずるため、3 組の送信トランスデューサと受振トランスデューサの組を互いに直交方向に向けて配置すれば、3 次的に流れの場を測定することができる。

海況観測を実施した場所を図 2-2-2-3 に示す。

	WGS84系		平面直角座標 II 系	
	北緯	東経	X	Y
夏季調査	31° 37' 48.3"	130° 43' 01.7"	-151863.366	-26832.554
冬季調査	31° 37' 48.4"	130° 43' 00.9"	-151860.232	-26853.626

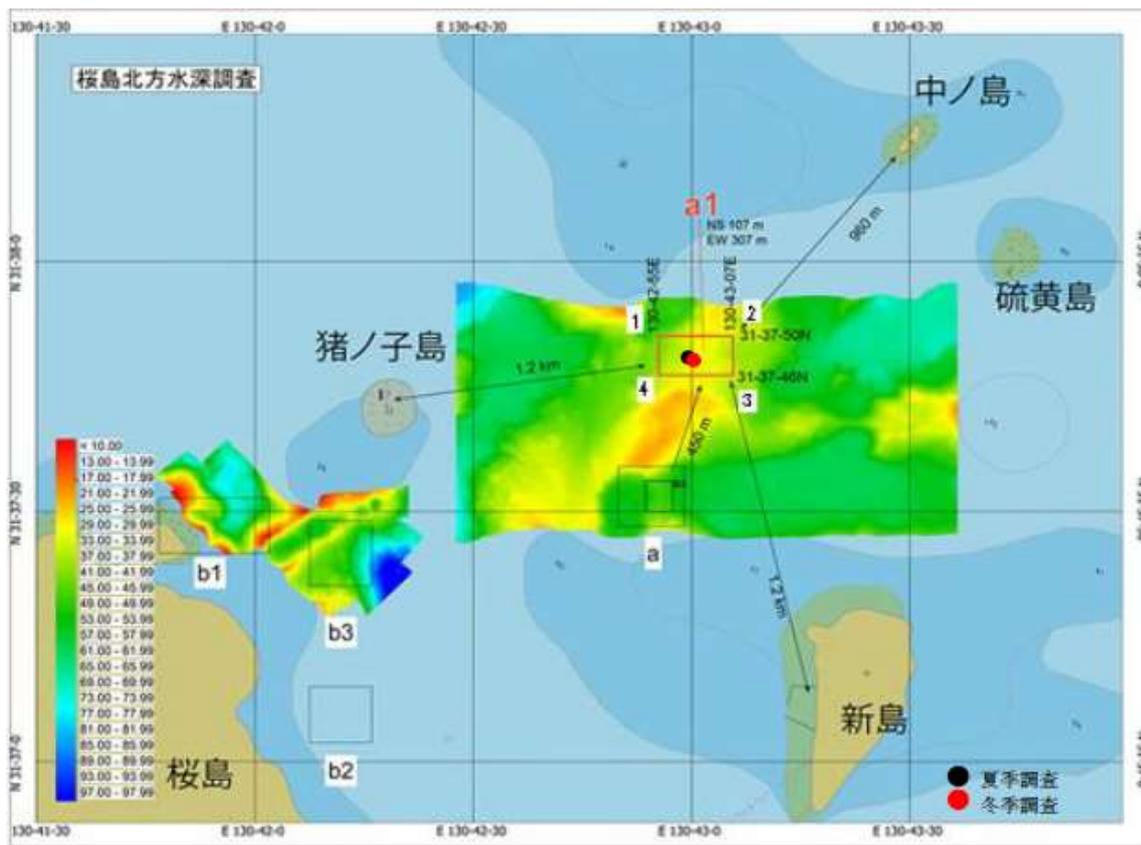


図 2-2-2-3. 海況観測における定点観測地点。水深は海上保安庁提供のデータを用いた。

定点観測に用いた機器を図 2-2-2-4 に示す。ADCP センサーは独立型海底設置架台 (MTRBM) に装着の上海底に設置された。

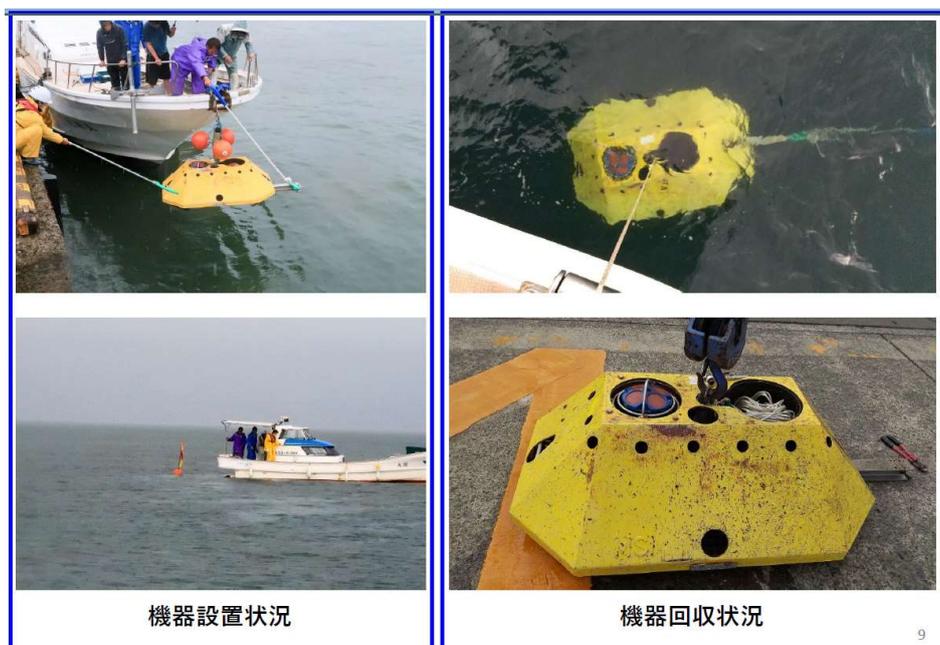


図 2-2-2-4. 定点観測機器

定点観測機器の定置方法を図 2-2-2-5 に示す。定点観測における機器の設置は全て作業船上から行われ、潜水作業を必要としなかった。

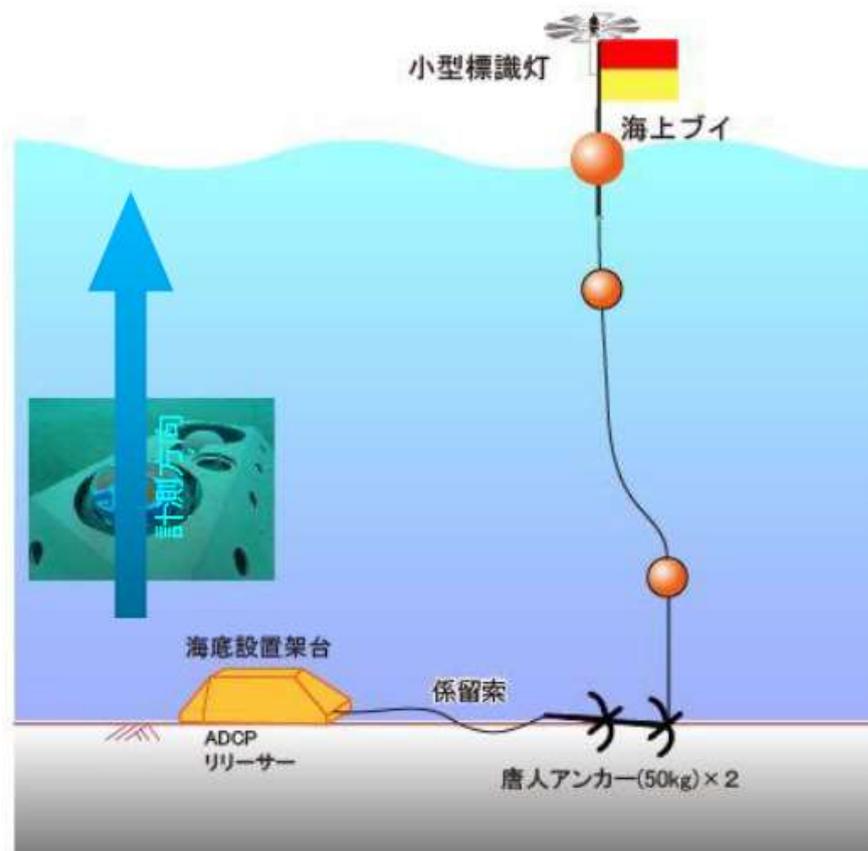


図 2-2-2-5. 定点観測における機器定置方法

定点観測の期間は後述の 13 分潮成分の解析を狙って 32 昼夜以上とした。次の潮位変動図（図 2-2-2-6）に示すように夏季および冬季の 2 季のいずれも大潮期と小潮期を含む期間とした。

(a)



(b)

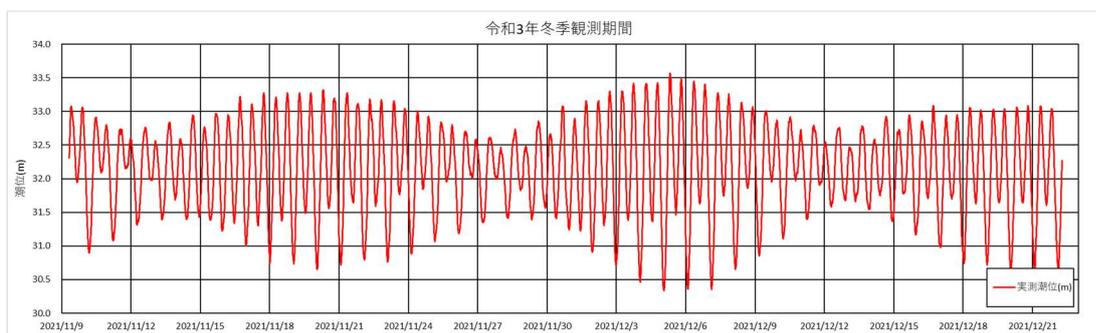


図 2-2-2-6. 定点観測期間中の潮位変動。(a) 夏季、(b) 冬季

b-1-1. 設置予定点における潮流向の特徴

観測結果の平均的な潮流の流速分布を表 2-2-2-2 に、平均的な潮流の様子をグラフを図 2-2-2-7 に示す。

表 2-2-2-2. 平均流速分布。 左表：夏季、右表：冬季

夏季調查			
海底上	全期間	小潮期	大潮期
	平均流速		
m	cm/s		
2.72	15.4	11.3	16.6
3.72	16.1	11.5	17.4
4.72	16.5	11.0	17.9
5.72	16.5	10.6	18.1
6.72	16.3	10.1	18.2
7.72	15.8	9.4	18.2
8.72	15.1	8.3	17.9
9.72	14.5	7.3	17.8
10.72	14.0	6.6	17.7
11.72	13.5	6.3	17.5
12.72	13.0	6.1	17.3
13.72	12.6	6.1	17.3
14.72	12.2	6.2	16.7
15.72	11.9	6.3	16.0
16.72	11.6	6.3	15.2
17.72	11.4	6.3	14.2
18.72	11.2	6.4	13.1
19.72	10.9	6.6	12.2
20.72	10.6	6.3	11.7
21.72	10.4	5.9	11.7
22.72	10.4	5.7	11.9
23.72	10.5	6.2	12.3
24.72	10.3	6.9	11.8
25.72	10.4	7.6	11.5
26.72	10.8	7.8	11.5
27.72	11.4	7.8	12.1
28.72	12.3	8.5	12.6

冬季調查			
海底上	全期間	小潮期	大潮期
	平均流速		
m	cm/s		
2.72	5.3	3.5	5.5
3.72	5.4	3.3	5.6
4.72	5.5	3.3	5.8
5.72	5.6	3.5	5.9
6.72	5.7	3.6	6.1
7.72	5.8	3.8	6.4
8.72	5.8	3.8	6.6
9.72	5.9	3.9	6.8
10.72	5.9	4.0	6.9
11.72	6.0	4.0	7.0
12.72	6.0	4.1	7.2
13.72	6.1	4.2	7.2
14.72	6.1	4.2	7.2
15.72	6.2	4.5	7.3
16.72	6.3	4.6	7.4
17.72	6.3	4.8	7.5
18.72	6.4	4.9	7.5
19.72	6.5	4.9	7.5
20.72	6.6	5.1	7.6
21.72	6.7	5.3	7.6
22.72	6.8	5.4	7.6
23.72	6.9	5.6	7.8
24.72	7.0	5.7	7.8
25.72	7.2	6.0	7.9
26.72	7.3	6.1	8.0
27.72	7.4	6.3	8.2
28.72	8.1	6.5	9.9

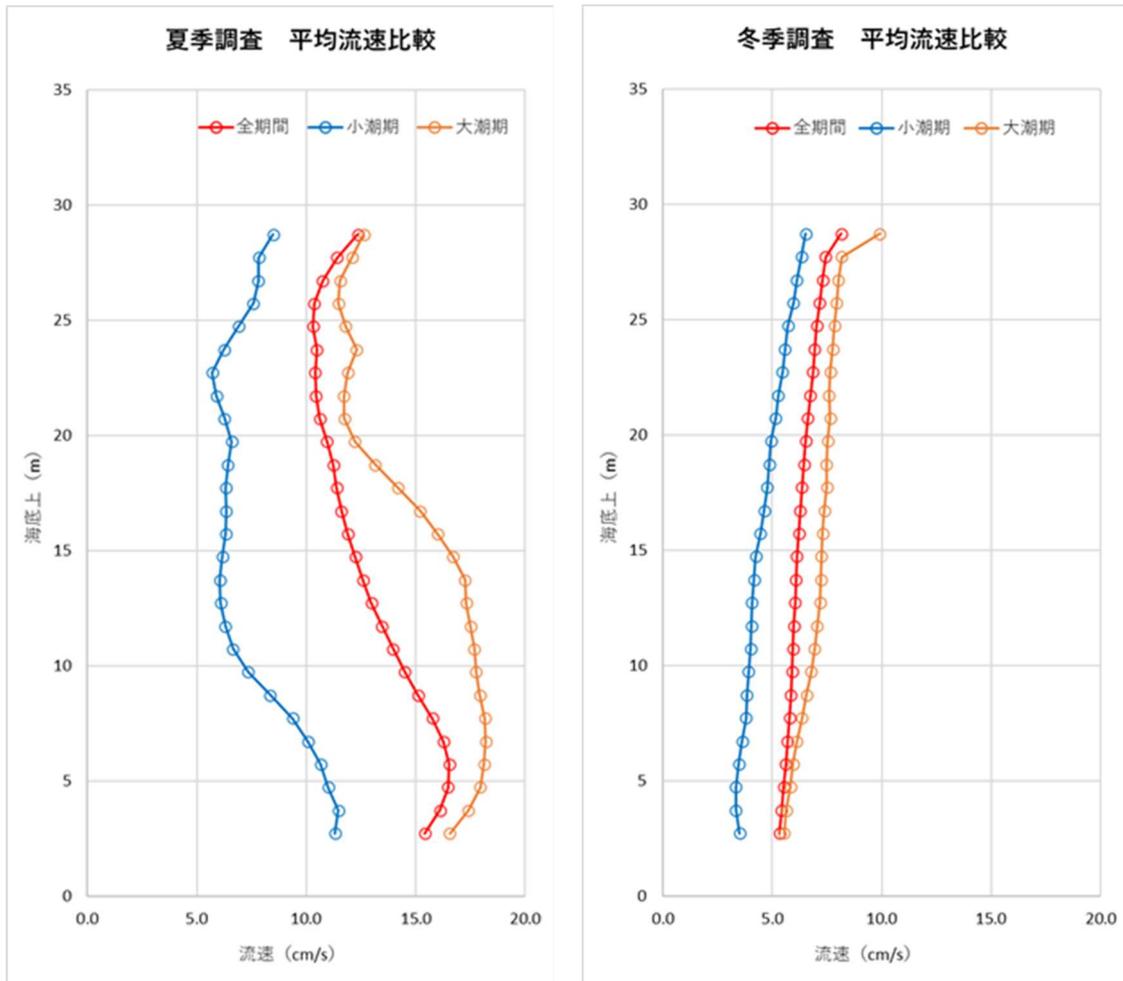


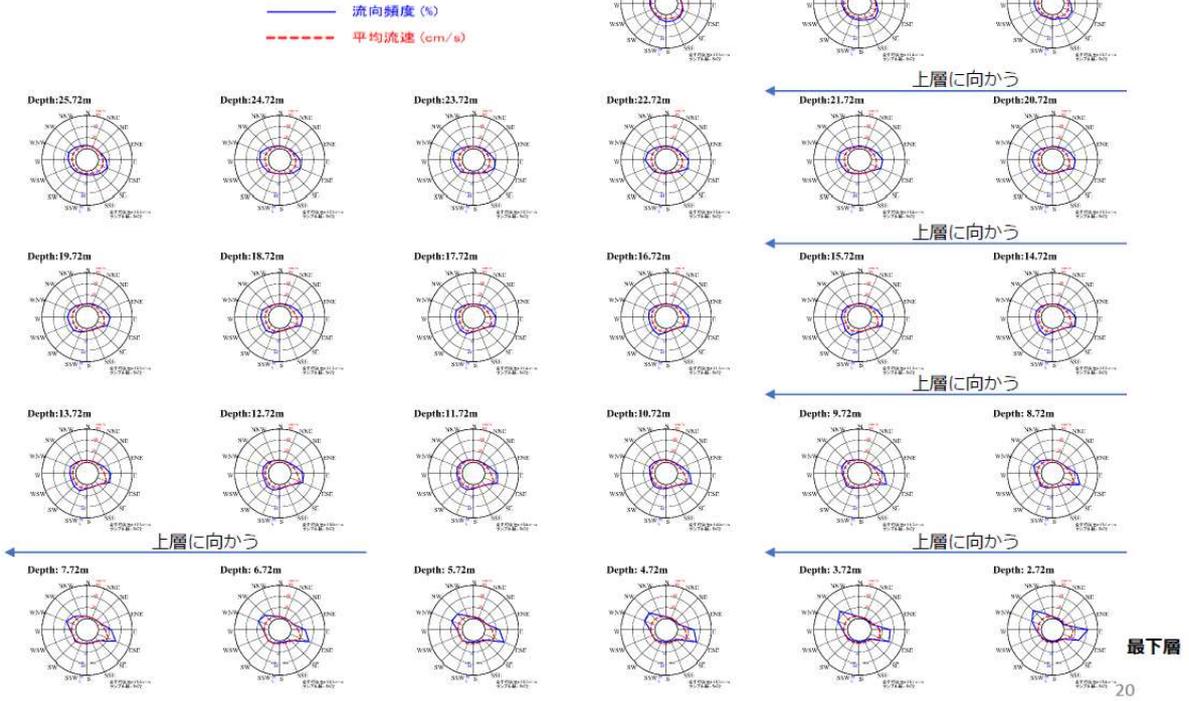
図 2-2-2-7. 設置予定地点における平均流速分布。 右図：夏季、左図：冬季を示す。

夏季および冬季はともに大潮を含む期間に潮流速の観測を実施しているが、全てにおいて夏季調査の平均流速が冬季調査の平均流速を上回っている。流速の深度分布に注目すると、海面の平均流速は水深 5m の流速より概ね 2 割大きくなる傾向が夏冬通して認められるが、5m 以深の水深では夏季の平均流速の方が冬季のそれにくらべて顕著に大きい。夏季に海底から 5m までの高さに平均流速が最大値をとる場所があることはこの場所の特徴である。全層平均を求めると、夏季大潮期の全層平均は 15.1 m/s(0.29 ノット)、夏季全期間平均：12.8 cm/s (0.25 ノット)、冬季全層平均：6.3 cm/s(0.12 ノット)であった。したがって、表 2-2-2-1 の設計条件として仮定した 0.5 ノット以下の数値は妥当なものである。

つぎに潮流の流向流速の特徴を紹介する。潮流向の分布を次の図 2-2-2-8. に示す。

(a) 夏季

# 流向流速レーダーチャート 最上層



(b) 冬季

# 流向流速レーダーチャート 最上層

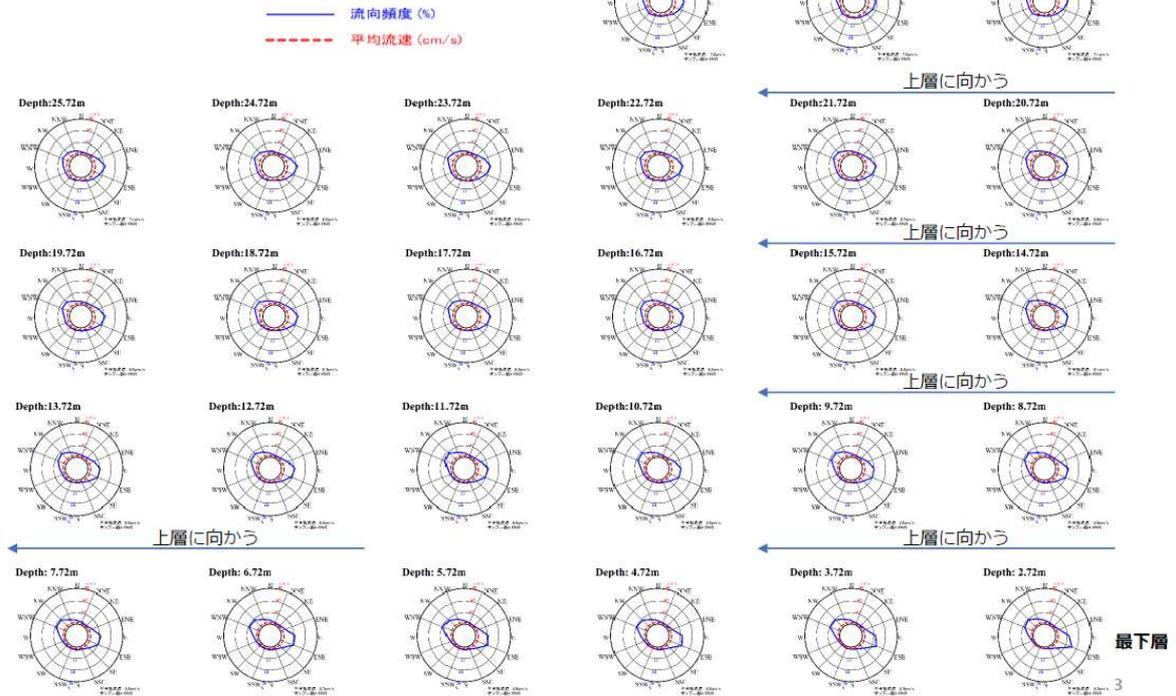


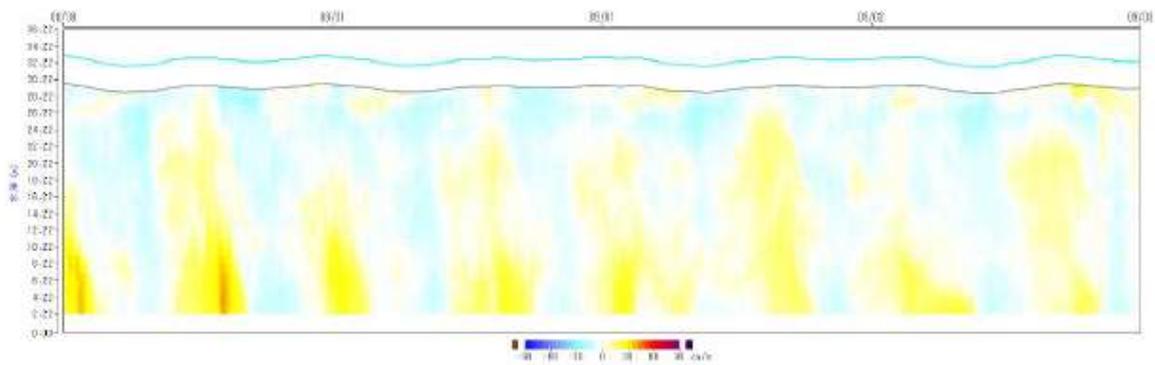
図 2-2-2-8. 設置予定地点における流向流速の傾向。(a)夏季、(b)冬季。

夏季においては海面から5m以内で西北西方向と東南東方向の流れが卓越する傾向があるが、海底に近づくにつれて北西方向と東南東方向の流れが卓越する傾向のあることが示される。

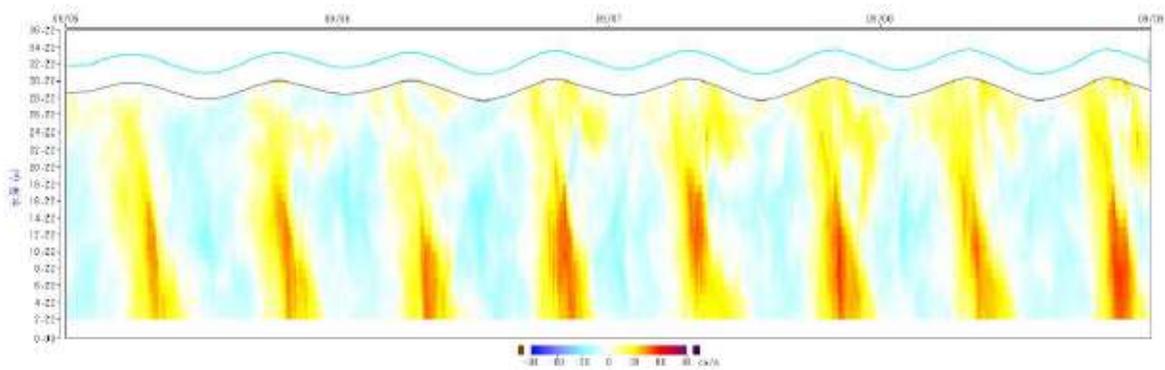
冬季においても夏季と同様な傾向のあることがみてとれるが、最表層部で西北西方向と東南東方向が卓越する点は夏季と異なっている。いずれの時期も東西方向の潮流の卓越することが示されている。この流向の特徴は機器投入場所が南北方向に伸びる尾根地形の鞍部であることと関連していると考えられる。

次に大潮期と小潮期における流速の深度分布を紹介する。先述のように卓越する流向は概ね東西方向であるので、東西方向成分に注目する。夏季における流速分布の時系列を図 2-2-2-9 に示す。

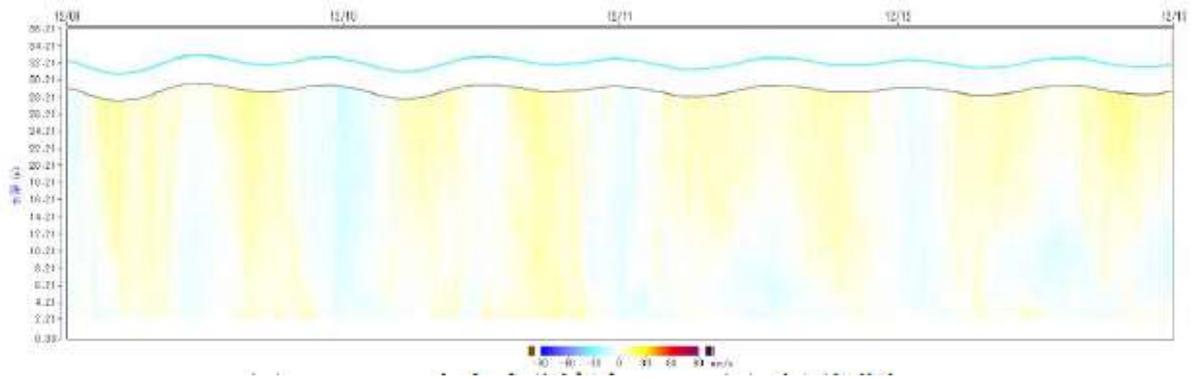
(a) 小潮期



(b) 大潮期



(c) 小潮期



(d) 大潮期

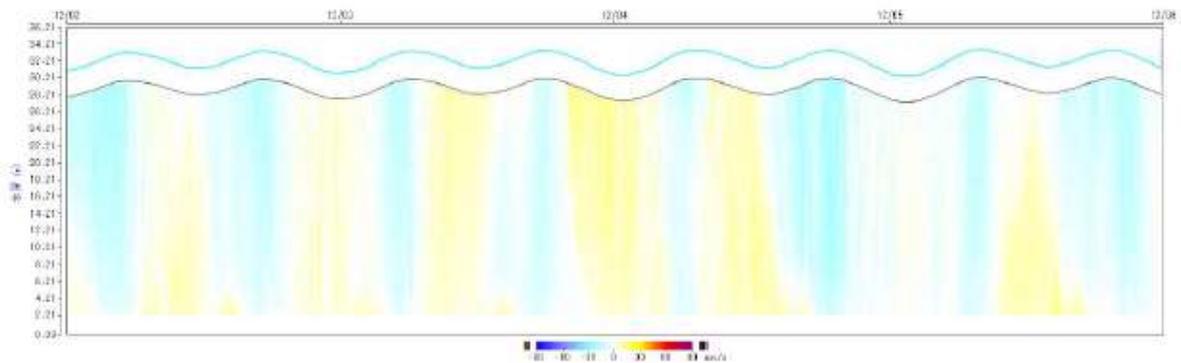


図 2-2-2-9. 流向流速深度分布時系列。(a) 夏季小潮期、(b) 夏季大潮期、(c) 冬季小潮期、(d) 冬季大潮期

潮汐に伴う流れは東西方向に卓越し、もっと流速変化が大きい夏季の大潮期観測では 10 m 以浅 0.22 m/s (約 0.4 ノット)、18~25 m 深約 0.45m/s(約 0.8 ノット)と深部で流速が大きい傾向が認められる。尾筒部分に相当する深さ 18~25m で令和 3 年度の改良設計の設計条件を超えるものとなった。18~25 m 深約 0.45m/s(約 0.8 ノット)は尾筒部分に作用する。尾筒部分のうける水平力は流速に比例すると考えられる。このことは尾筒部に作用する潮流水平力が設計条件の最大 2 倍になるが、浮体部に作用する潮流水平力は設計値程度であることを意味している。添付資料の設計計算書(LWL)では表 2-2-2-1 に示す設計条件下で全水平力 10.93 kN のうち、尾筒部 0.46 kN および浮体部 0.36 kN の水平力が潮流によって生ずると想定されている。尾筒に作用する水平力が 2 倍になっても、想定された全水平力に対して 4%程度の増加にしかならないので、設計の大変更を要する深刻な問題にはならないと考える。

また、定点観測による特定の地点における流向流速の深さ方向分布に加えて、曳航調査により流向流速の空間分布を把握した。曳航調査は夏季：2021/8/20 11:00~12:20、冬季:2021/11/9 8:56~10:05 に実施した。曳航調査測線計画を図 2-2-2-10 に示す。

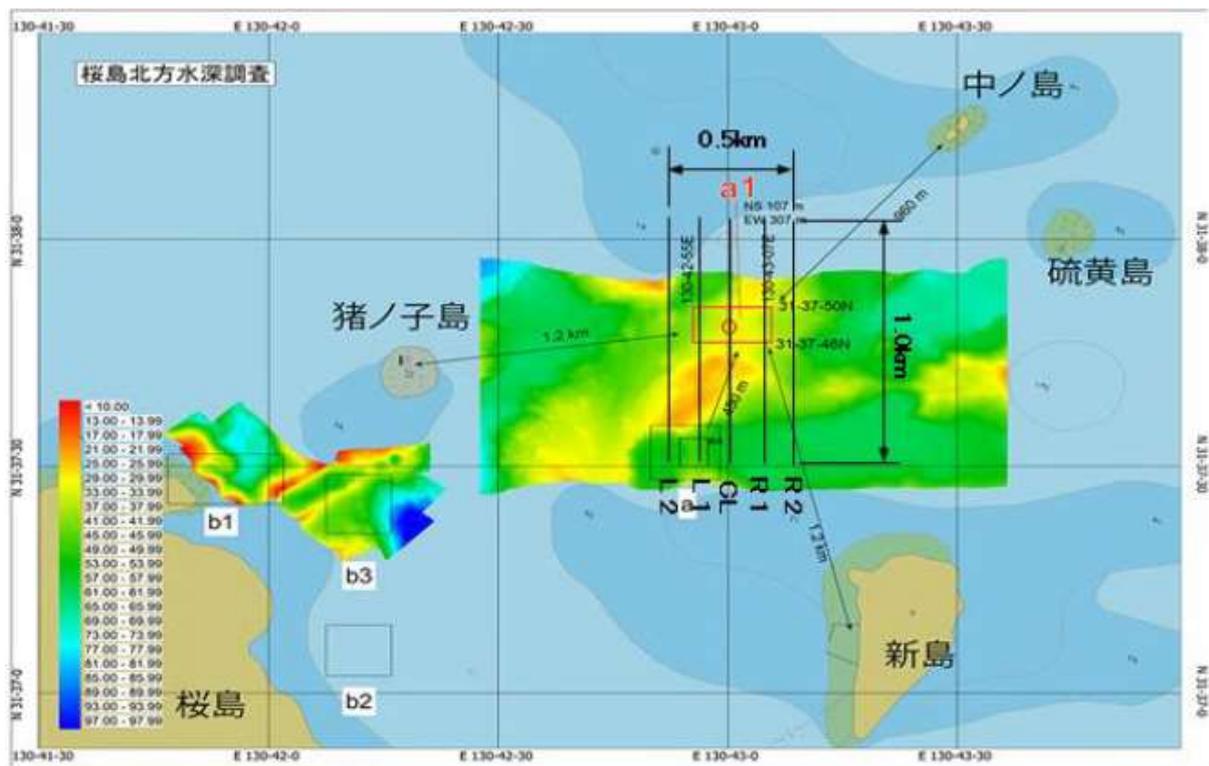


図 2-2-2-10. 曳航調査計画

曳航調査に用いた機材を図 2-2-2-11 に示す。定点観測と同様に曳航観測でも ADCP に依る流向流速測定を行った。曳航観測では ADCP を下向きに作業船に設置し、曳航観測における ADCP の航跡は外部 GNSS を用い、ネットワーク型 VRS 方式によって RTK データを取得することとした。但し、冬季調査においては、ネットワーク型 VRS がなかなか Fix しなかったことと、調査時間の制約があったため、DGPS の状態で計測を行った。



使用機器：GNSS



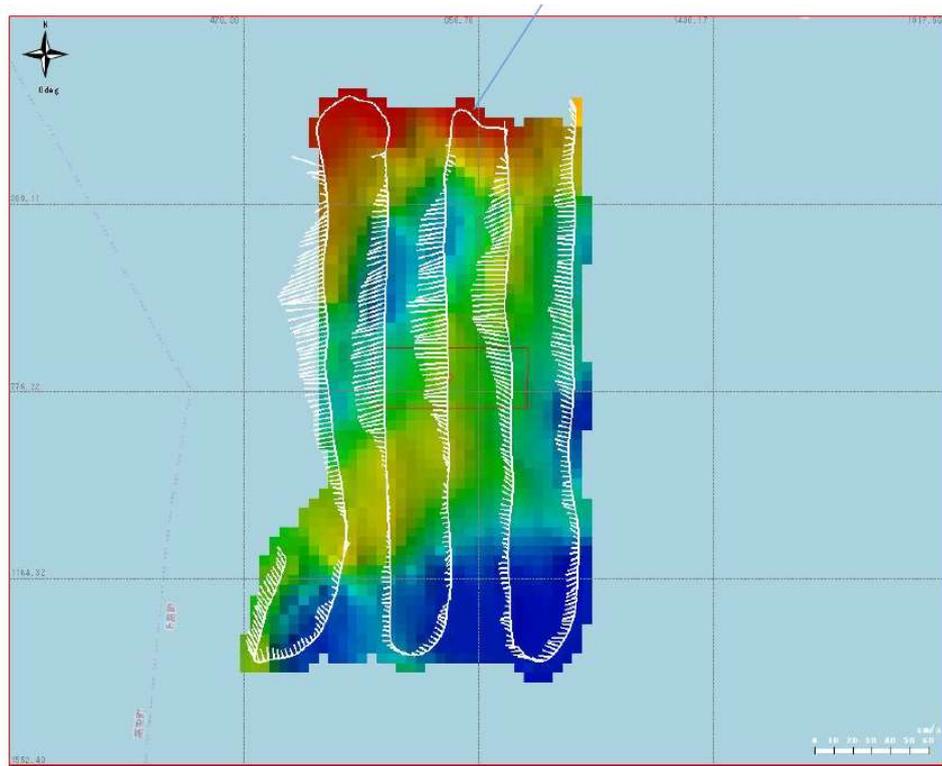
使用機器：ADCP



図 2-2-2-11. 曳航調査機材

曳航観測の軌跡と流速ベクトル、水深をともにプロットした結果を次の図 2-2-2-12 に示す。蛇行する曲線が曳航観測の軌跡で、曲線からその側方に延びる線が流速ベクトルを示す。また、軌跡とその周辺の水深分布を彩色で示す。観測の性質上、軌跡上のそれぞれの測定点の測定時刻は異なっている。

(a)



(b)

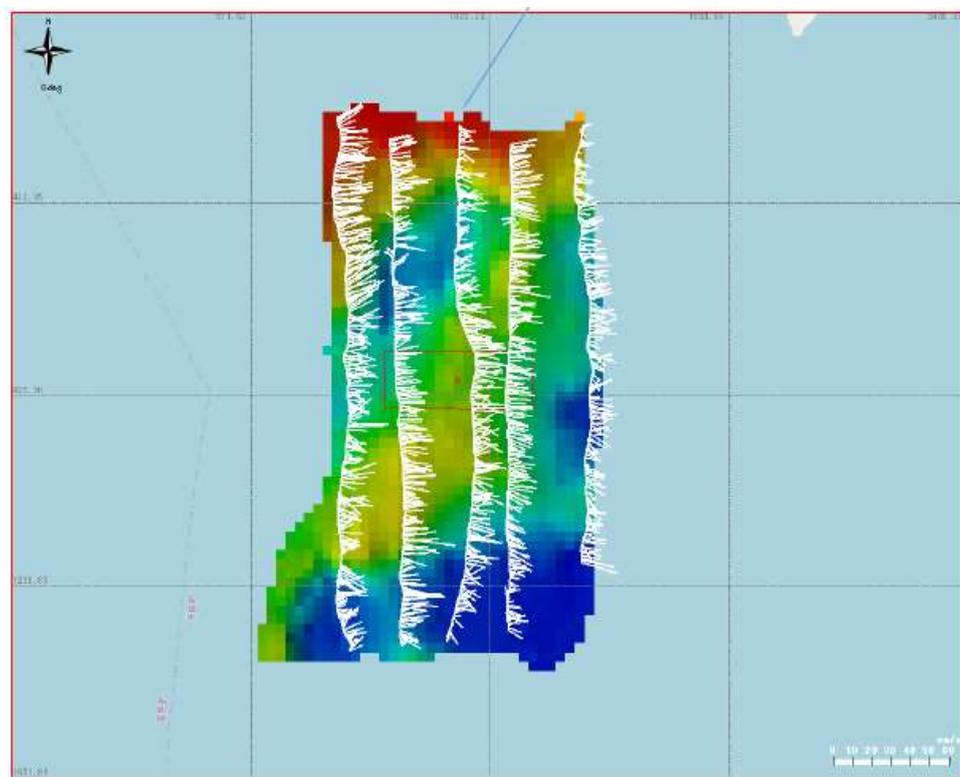


図 2-2-2-12. 曳航調査軌跡と流向流速ベクトル。(a)夏季曳航観測、(b)冬季曳航観測を示す。軌跡は 10 m 移動平均結果を示す。

曳航調査結果にも全般的に東西方向の流れの卓越する傾向が表れている。夏季観測の結果では水深の大きい桶状地形に沿う流れと鞍部を乗り越える流れがあることが明瞭に示されている。一方、冬季観測では観測時に波浪が高かったために、流向流速観測結果のバラツキが大きい傾向がある。

ADCP の曳航観測 で得られた流向流速データの解析条件を以下に示す。

この観測では流速リファレンスのリソースにはデータの品質が優れているボトムトラックを用いることとした。

得られた流向流速は、地球座標系（真方位をゼロとした  $360^\circ$  方位）に変換し、東方成分と北方成分とに分解を行った、東方成分とは、東西方向の成分流速を意味しており、東方向に流れる流速 をプラス、西方向に流れる流速をマイナス、と表示している。

次に曳航観測で得られた潮流の絶対流速の空間分布を下図 2-2-2-13、図 2-2-2-14 に示す。夏季は ADCP 設置点すなわち海底地盤変動観測装置設置予定地点周辺では表層と水深 25 m 付近の 2 つの深さに 30 cm/s を超える速さの流れが表れており、その特徴は先述の定点観測結果と一致する。このような状態を海洋関係者は「三枚潮」と呼ぶ。しかしながら ADCP 設置地点の北側では流速が 30 cm/s を超える深さが 3 つある。最表層と水深 15 m、25 m である。複雑な流速分布は複雑な海底地形の影響を反映していると推察される。

冬季は垂直帯状の乱れが随所に見受けられる。垂直帯状の乱れは荒天下の観測であったために作業船の姿勢変化によって ADCP センサーが空中に露出した瞬間に発生したものである。同時に実施された定点観測の結果から冬季は潮流が 10 cm/s 以下で水深の増大につれて単調減少する事が判っているので、流速 17 cm/s を超える垂直帯は ADCP センサーが空中に露出した瞬間に得られて記録と考えられる。流速 17 cm/s 以下を示す帯に注目しても、冬季では夏季の三枚潮のような明瞭な特徴を見いだすことはできなかった。

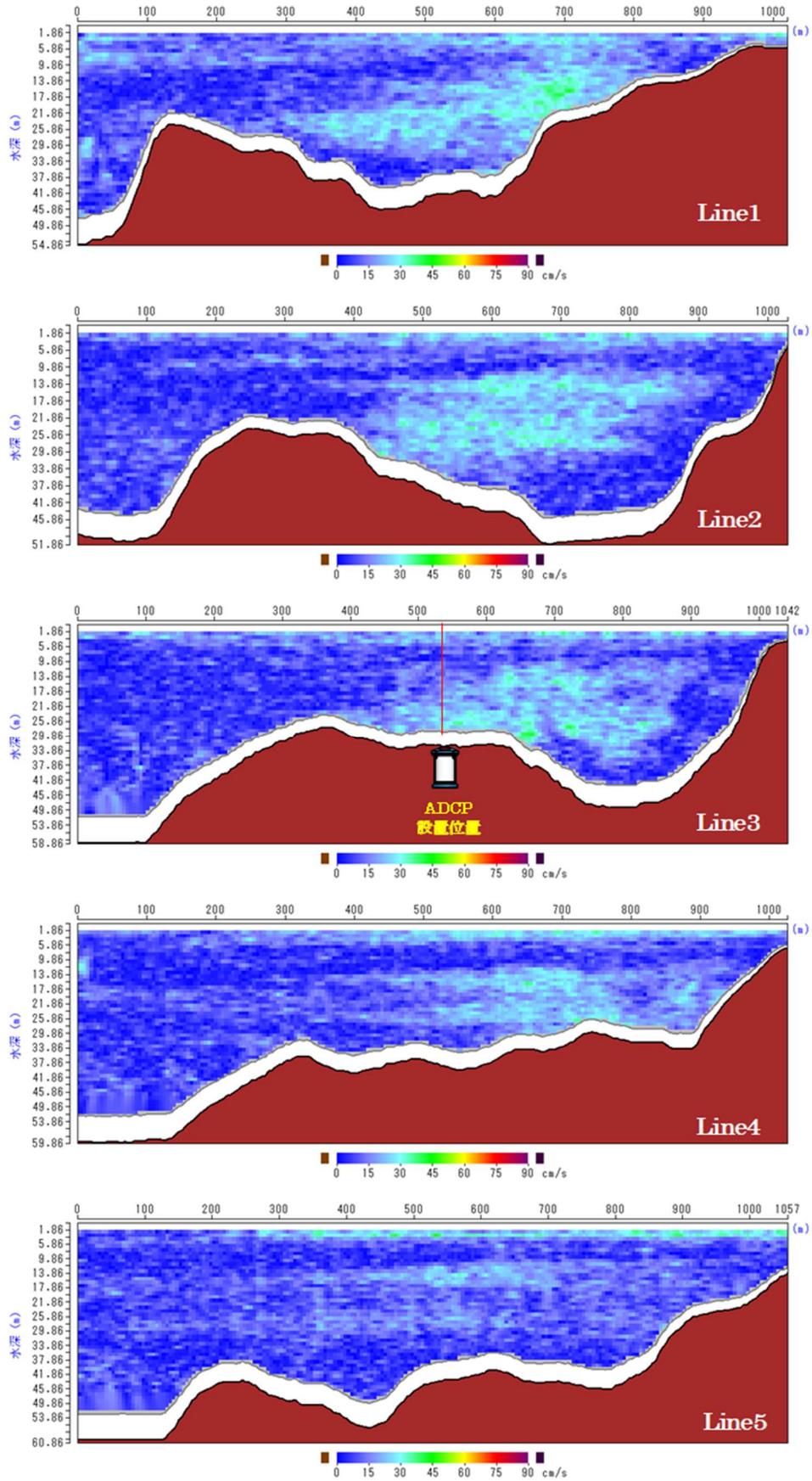


图 2-2-2-13. 夏季绝对流速分布

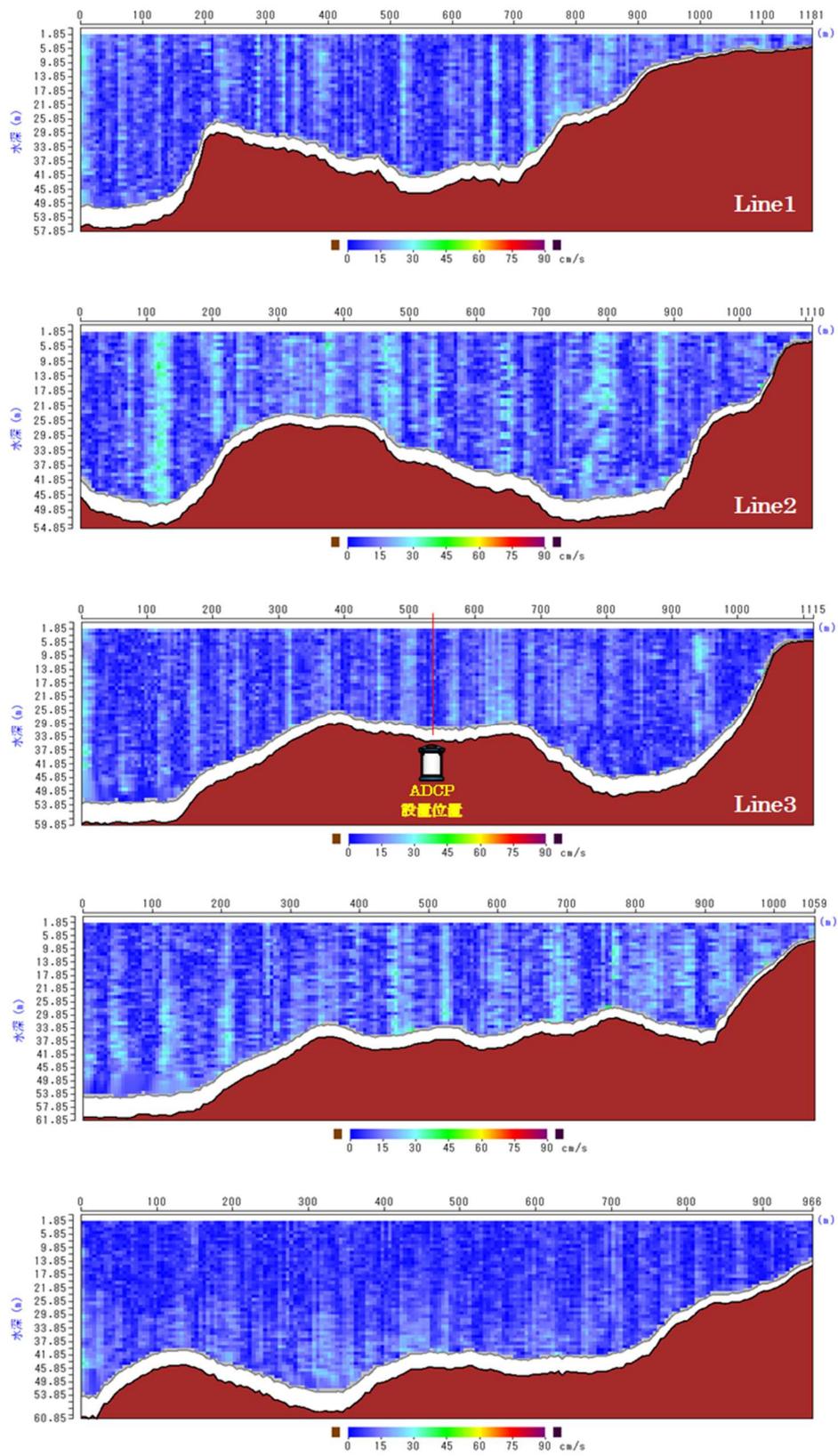


图 2-2-2-14. 冬季绝对流速分布

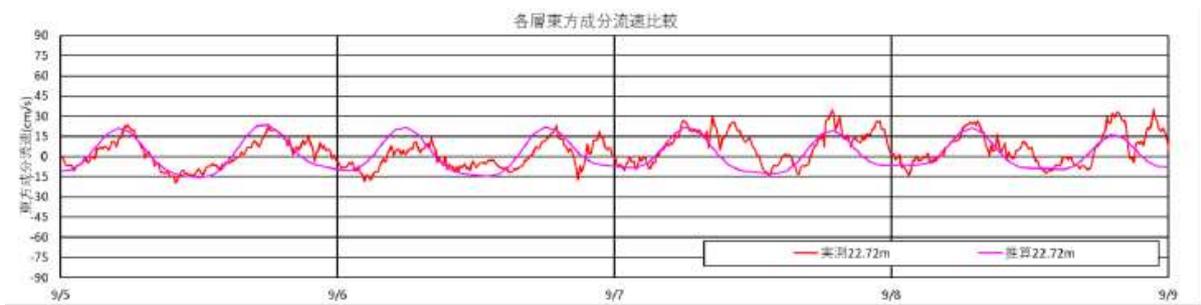
最後に本調査で得られたデータを元にした調和解析の結果を以下に示す。潮汐の調和解析は観測データをもとに潮汐を構成する調和振動成分の振幅と遅角を得ることである。調和解析の結果から任意の場所と時刻における潮汐の様子を推定することができ、海洋における効率のよい建設作業等の計画策定に視するものである。本調査では最短 31 昼夜の観測を行ったので、夏季のように 13 分潮（表 2-2-2-2）成分の強さの推定を行う。なお、ADCP のデータにはエラーが含まれることがあるが、データの信頼性を判断する各種指標をもとに、ノイズフィルターをかけて、エラー値を思われるデータは棄却を行った。棄却されたエラー値による欠損は、周囲の正常なデータを元に補完を行った。

表 2-2-2-2. 分潮の種類

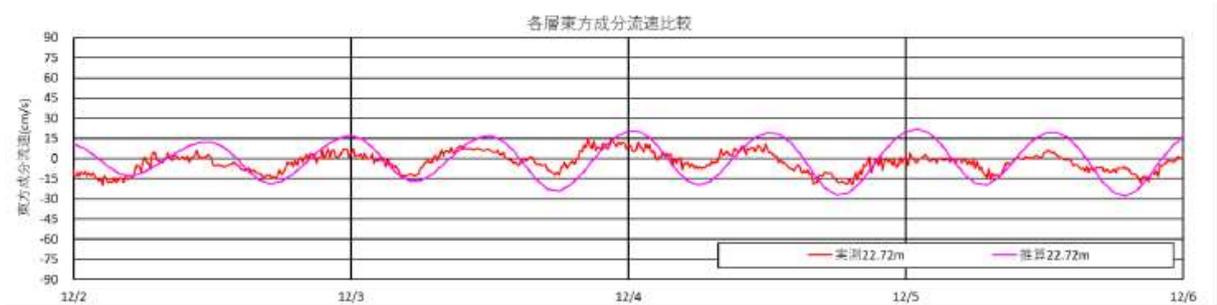
種類	分類	名称	周期
半日周期	M2	主太陰半日周潮	12.42 時間
	S2	主太陽半日周潮	12.00
	K2	日月合成半日周潮	11.97
	N2	主太陰楕円潮	12.66
	L2	副太陰楕率潮	
	v2	主太陰出差潮	
	$\mu$ 2	太陰二均差潮	
日周期	K1	日月合成日周潮	23.93 時間
	O1	主太陰日周潮	25.82
	P1	主太陽日周潮	24.07
	Q1	主太陰楕円潮	26.87
倍潮	M4	太陰 1/4 日周潮	6.21 時間
複合潮	MS4	(M2+S2)	6.01 時間
	A0	恒流	

観測結果の調和解析によって得られた分潮定数を添付資料に示す。また、調和解析結果による分潮定数からもとめたモデル潮流値と実測値の比較を以降の図 2-2-2-15 で示す。モデル潮流値と実測値の差は、実際の潮位に働く潮汐力以外の成分の存在を示すと解釈できる。

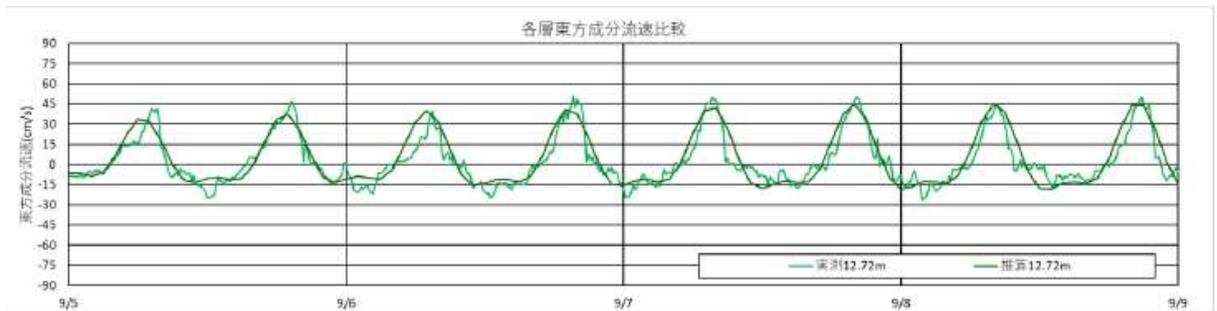
(a) 夏季 22.76m (最表層)



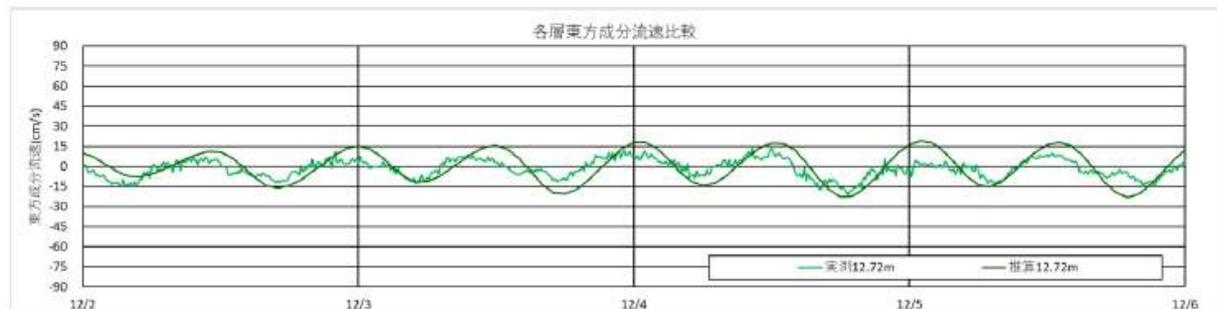
(b) 冬季 22.76m (最表層)



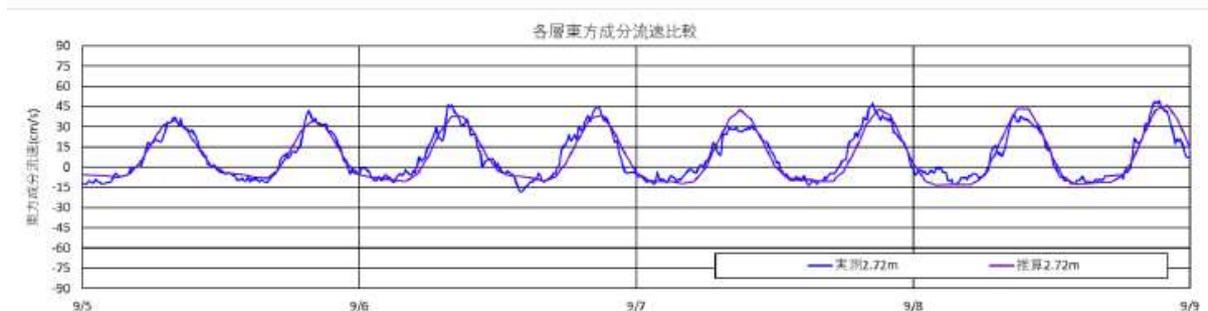
(c) 夏季 12.72m (水深約 17m)



(d) 冬季 12.72m (水深約 17m)



(e) 夏季 2.72m (水深約 28m)



(f) 冬季 2.72m (水深約 28m)

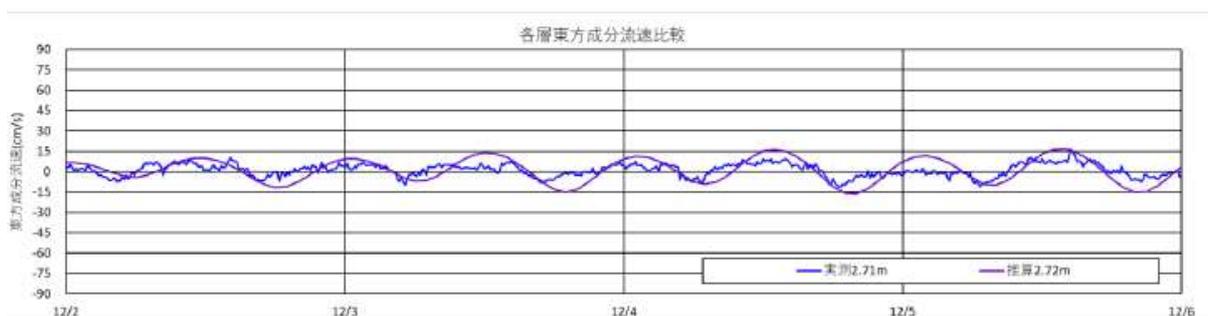


図 2-2-2-15. モデル潮流と観測潮流値

モデル潮流と観測潮流との比較をすると、夏季と冬季ともに表層部ではモデルと実測の一致が良くない。中層部以深では夏季はモデルで潮流がよく説明できる一方、冬季はモデルと実測の一致が良くない。このことから、表層部は夏冬を通して風などの気象条件の作用が卓越していると考えられる。中層部以深では冬季に潮汐以外の力の作用（例えば表層水の冷却による垂直循環）が相対的に大きくなっている可能性が指摘できる。

後述の気象観測からは冬季観測期間中の日別平均風向風速が下図のように得られている。

### 冬季海況観測期間風速

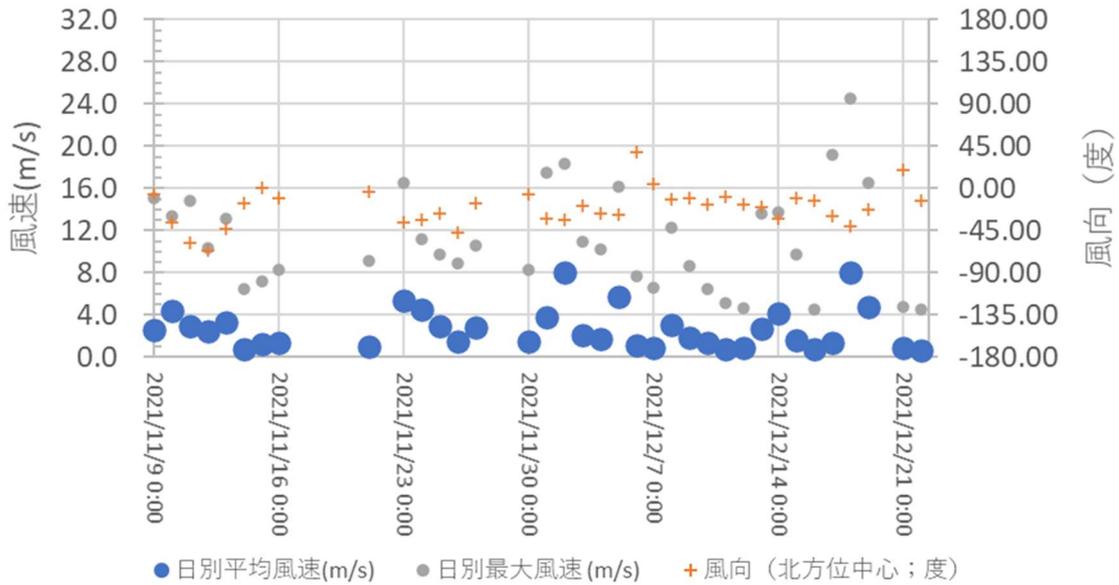


図 2-2-16. 冬季観測期間中における日別平均風速および風向。風向 0 度は北方位を表し、正の値は北から時計回り方向、負の値は反時計回り方向を表す。

これによれば期間を通しての平均的な風向は北北東方向 (-20 度) で、平均風速は 2.66 m/s であった。曳航観測を実施した 11 月 9 日は平均風速 4.4 m/s で最大風速 13.0 m/s を記録している。また、2021/12/2 - 12/6 の大潮期には 12/4 に平均風速 5.7 m/s, 最大風速 16.2 m/s であるのに対して 2021/11/27-11/30 の小潮期では平均風速 2.9 m/s、最大風速 10.6 m/s が記録されており、小潮期に風が弱かった。冬季小潮期に表層の流れが弱く大潮期に表層の流れが強い傾向が指摘されていたが、気象条件を考慮すると冬季大潮期の表層流の大きな値は主に風を反映していると考えられる。

## b) 気象観測

気象観測を海底地盤変動観測装置設置予定地点の約 1.6 km 南南東の鹿児島市新島地先（通称：州崎）で行った。以降で観測点を SZKM と称する。SZKM における主な観測項目は、地上 2 m の高さにおける超音波風速計（WMT-703A1C0A3E2B1A3、ヴァイサラ社製）による風向風速観測、地上 1.5 m の高さにおける温湿度観測（HMP155A2GB11A0A3A1A0A、ヴァイサラ社製）である（図 2-2-2-20）。ロガー（CR-310、キャンベルサイエンティフィック社製）を用いた現地収録方式で運用を行っている。

超音波による風速観測は国内では光田・水間(1964)が初めて実施している。超音波による風向風速測定の方法は先述の ADCP と同様に媒質柱を伝わる超音波のドップラー効果を利用している。超音波風向風速計では超音波を伝播させる媒体が空気である。

SZKM では観測初期にロガー設定に原因するトラブルによる欠測が約 1 ヶ月生じたほかは順調に推移しており、台風接近に伴う気象状況の推移、寒冷前線通過による気象変化、秋季から厳冬季にかけての気象変化の経過を捉えている。観測期間中の台風の接近は 2 つ(202114:2021/9/16-17, 202116:9/29-9/30)であったが、時期の早い台風 202114 のみ、関連する風速の変化を記録した。もう 1 つの台風 202116 接近時は欠測期間中であった。前線通過は 7 回(9/24, 10/20, 11/8, 11/22, 11/30-12/1, 12/16-17, 1/23)、低気圧の接近は 8 回 (10/24-25, 10/30, 11/6-7, 12/24, 12/29-30, 1/5-6, 1/10, 1/25) あった。



図 2-2-2-20 気象観測点 SZKM

## 日別風速

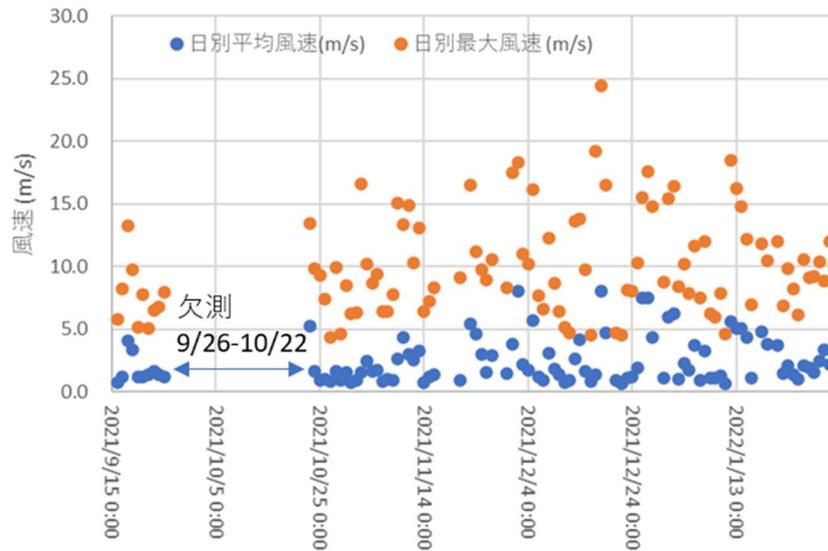


図 2-2-2-21 日別風速データ。2021/9/15 から 2022/2/2 まで

図 2-2-2-21 は SZKM における日別平均風速と最大瞬間風速の推移である。

10 分データの平均風速は 2.35 m/s、最大風速は 13.05 m/s (2021/12/17 13:50) であった。日別風速では平均風速 2.36 m/s、瞬間最大風速は 24.5 m/s を 2021/12/17 13:37 に記録している。これは寒冷前線の通過とその後の寒気の吹き出しによるものである。気象庁の鹿児島観測点（鹿児島市東郡元）では 2021/12/17 13:40 に北西風の最大風速 21.3 m/s を記録している。新島における瞬間最大風速は気象庁発表より 3.2m/s 大きい値を示している。いずれにしても今回の観測期間中には海底地盤変動観測装置の設計範囲（10 年確率風速：21.6 m/s）を超える風には遭遇しなかった。

なお、観測点 SZKM における風速観測値には孤立して異常な風速値が日別最大風速値として記録されていることがあったが、先述の日別最大風速値は以下の特徴をもつ異常風速値を除去したものを扱った。観測点 SZKM における風速異常値は以下の 4 つの特徴をもつ。

- ・異常風速値は 10 分平均風速 2 m/s 以下の時に出現することがある
- ・10 分データでは 1~2 サンプルだけ孤立して異常風速値が出現する。
- ・異常風速値は 10 分平均風速の 20 倍以上である。
- ・異常風速値が現れる時刻の風向は決定されていないことが多い。

超音波風向風速計による気象観測ではセンサー本体への鳥類の停留による異常値の出現例が青嶋(2011)により報告されている。風速 2 m/s 以下の穏やかな風の時に異常値が出現することと現地の風向風速センサー直下への鳥類の糞の付着があったことを考慮すると、青嶋(2011)が指摘する鳥類のセンサー本体への停留が風速異常値をもたらしたものと推察される。風向風速計と同様に GNSS アンテナも鳥類の停留により欠測が生ずる。測位実験の際も鳥類の停留が原因とみられる解決の不良が散見されていたことから、海底地盤変動観測装置はその水面上の部分が鳥類の

停留場所になることが推察されることから、GNSS アンテナのレドームは鳥類の停留を避ける形状（たとえば頂角が鋭角をなす円錐状等）であることがのぞまれる。

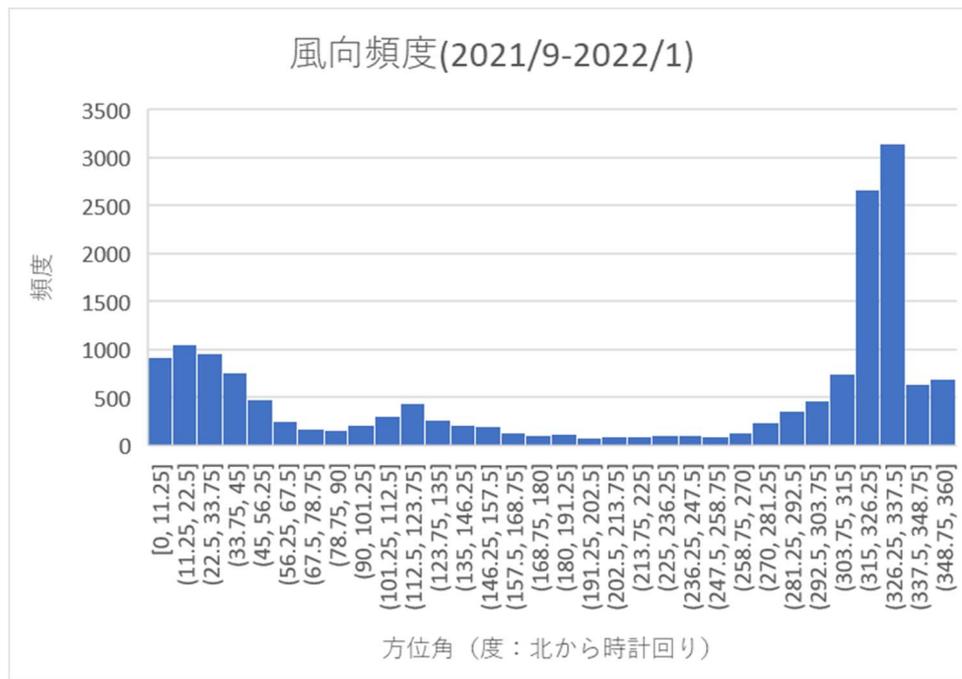


図 2-2-2-22 風向分布 2021/9/15 から 2022/2/2 までの 10 分ごとの平均を使用した。N=16403。

図 2-2-2-22 から観測点 SZKM における風向の出現頻度は、北北西方向（315-337.5°）が最も多く、次位が北北東方向（0-45°）、三位が東南東方向（101.25-135°）であった。北北西から北北東にかけての風向の出現が卓越するのは、この場所の秋季から厳冬期にかけての特徴と思われるが、今後季節が春から夏と変化するのに合わせて風向の傾向が変化する可能性がある。引き続き観察が必要である。

次に観測点 SZKM における風速観測値と気象庁鹿児島観測点における風速観測値（気象庁、2021）とを比較する。気象庁鹿児島観測点における風速を横軸、観測点 SZKM における風速を縦軸にとり図 2-2-2-23 に示す。

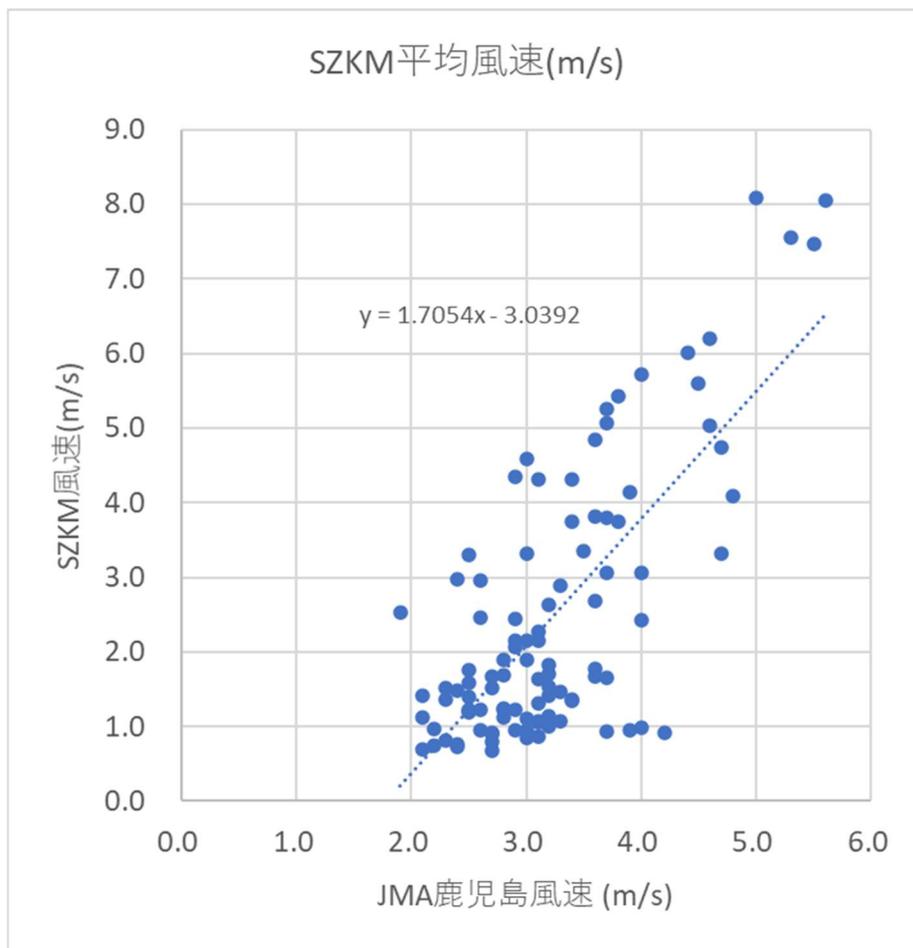


図 2-2-2-23 観測点 SZKM における平均風速と気象庁鹿児島観測点における平均風速。破線は近似直線を示す。

図 2-2-2-23 から観測点 SZKM における観測値と気象庁鹿児島観測点における観測値は正の相関があることが確認される。観測された範囲の風速帯では気象庁鹿児島観測点の増分に対して、観測点 SZKM の風速の増分は 1.7 倍であり、観測点 SZKM の方が風速の大きい傾向が認められる。特に SZKM で 7m/s 以上の大きな風速が認められたのは北北西方向の風向の時である。また、気象庁鹿児島観測点で 4 m/s 前後の風速が認められたにもかかわらず、SZKM で 1 m/s 前後の風速しか観測されなかったのは北東～北北東方向の風向の時であった。SZKM では観測点の北～北北東側に新島の最高標高の高まりがあり、特に北～北北東の風があたりにくいことを示している。

なお、両者の関係の近似曲線の切片値が 0 ではないことは、SZKM の風速センサー高が 2m と低いことを反映していると考えられる。

観測点 SZKM では局地気象として風向風速の日周変化も認められる。図 2-2-2-24 は 2022/1/7-2022/1/12 の間の風向風速の様子を示している。1/7～1/11 までは風速 4m/s 以下の穏やかな気象条件ではほぼ北から北北西方向（315° から 360°）の風向が卓越しており、毎日正午過ぎから日没までは南東（方位 135°）の 1 m/s 前後の風が卓越する傾向がある。平穏な日の午後の南東風は桜島を含めた地域の局地気象の「海風」に相当すると考える。1/11 に入ってから 8 時頃に

寒冷前線が通過した後に北西の風が卓越するようになり、それまでの日周変化のパターンが崩れている。

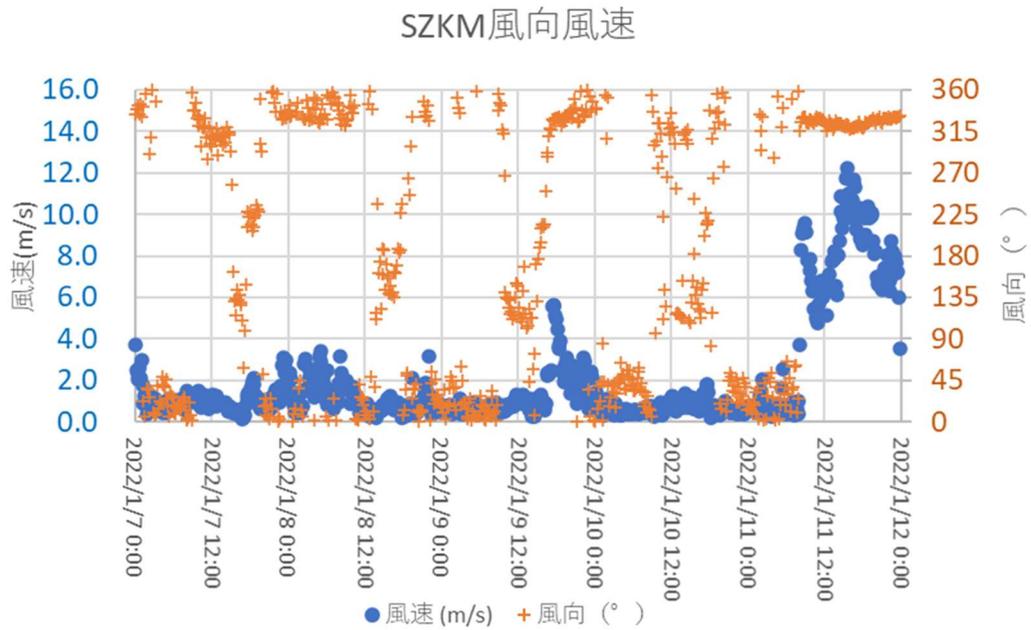


図 2-2-2-24 2022/1/7 0:00～2022/1/12 0:00 までの風向風速

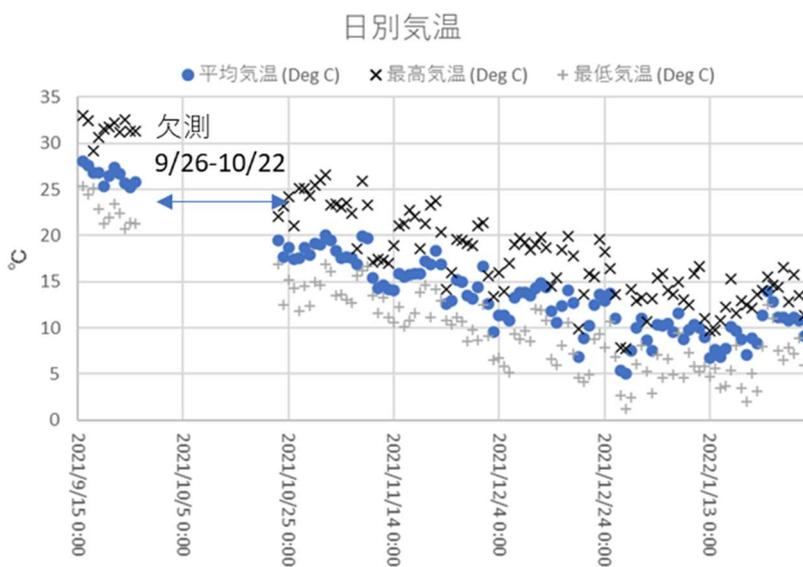


図 2-2-2-25 日別気温データ。2021/9/15 から 2022/2/2 まで

図 2-2-2-25 に日別気温の推移を示す。ここに示す観測期間が秋季から厳冬期にかけてであったために、秋季における日毎の気温の降下が記録されている。今回の観測期間中には約 20℃に及ぶ平均気温の変化が観察された。1 月中旬の厳冬期でも最低気温が零下になっていない。

気温についても気象庁鹿児島観測点のそれと比較する。気象庁鹿児島観測点と観測点 SZKM とで日別平均気温の比較を次の図 2-2-2-26 に示す。

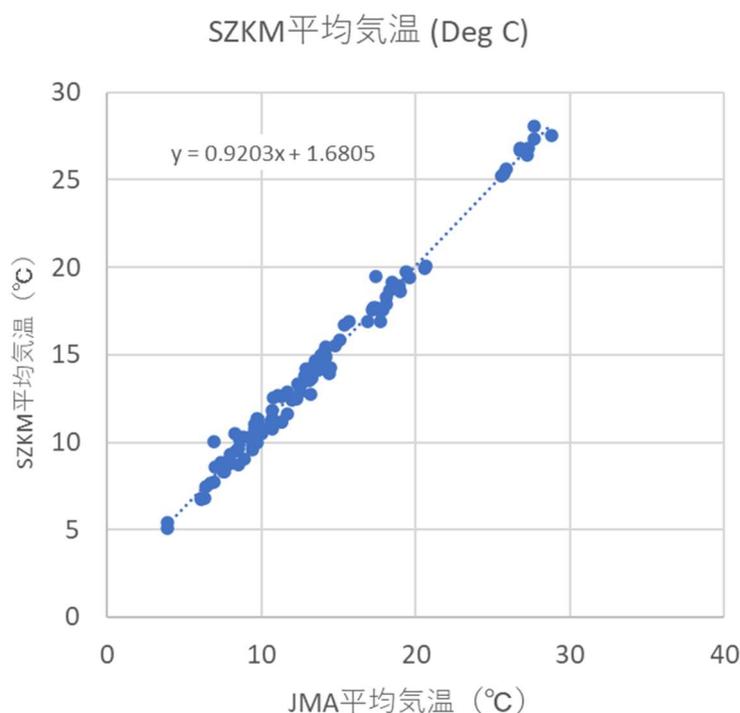


図 2-2-2-26 気象庁鹿児島観測点と観測点 SZKM における日別平均気温の比較

図 2-2-2-26 では気象庁鹿児島観測点より観測点 SZKM のほうが平均気温の変化が小さめに出ており、平均気温の変化率は気象庁鹿児島観測点に比べて緩やかであることが示されている。さらに近似曲線を表す式の切片が正の値を示すことは冬季の低温時には気象庁鹿児島観測点に比べて SZKM の方の気温が高いことをうかがわせる。

図 2-2-2-27 には観測点 SZKM の日別平均湿度とその最高値と最低値を示す。観測期間中の平均湿度は 70.3%で、9 月の観測開始直後はこれよりも高い平均湿度を示していたが、10 月以降はほぼ一定の値をとることが示されている。

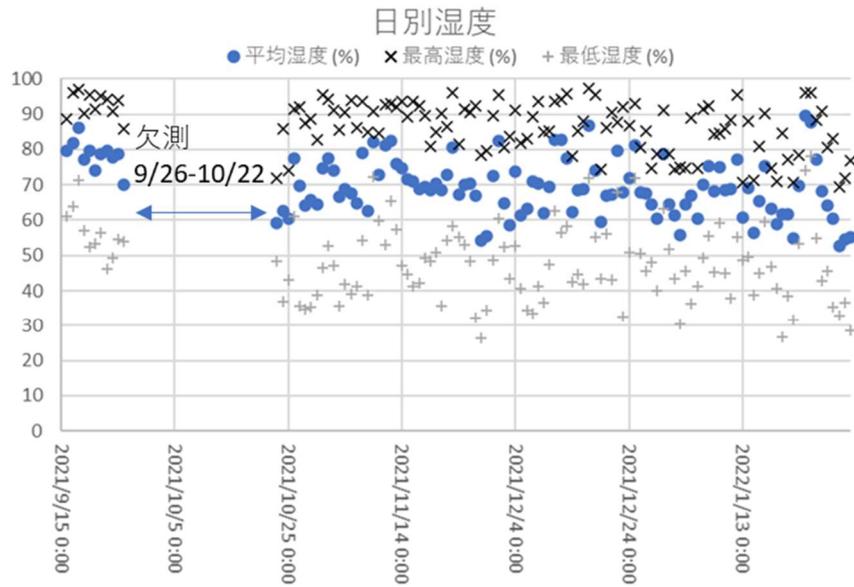


図 2-2-2-27 日別湿度データ。2021/9/15 から 2022/2/2 まで

さらに先述のように気温と湿度の日周変化についても下図に報告する。

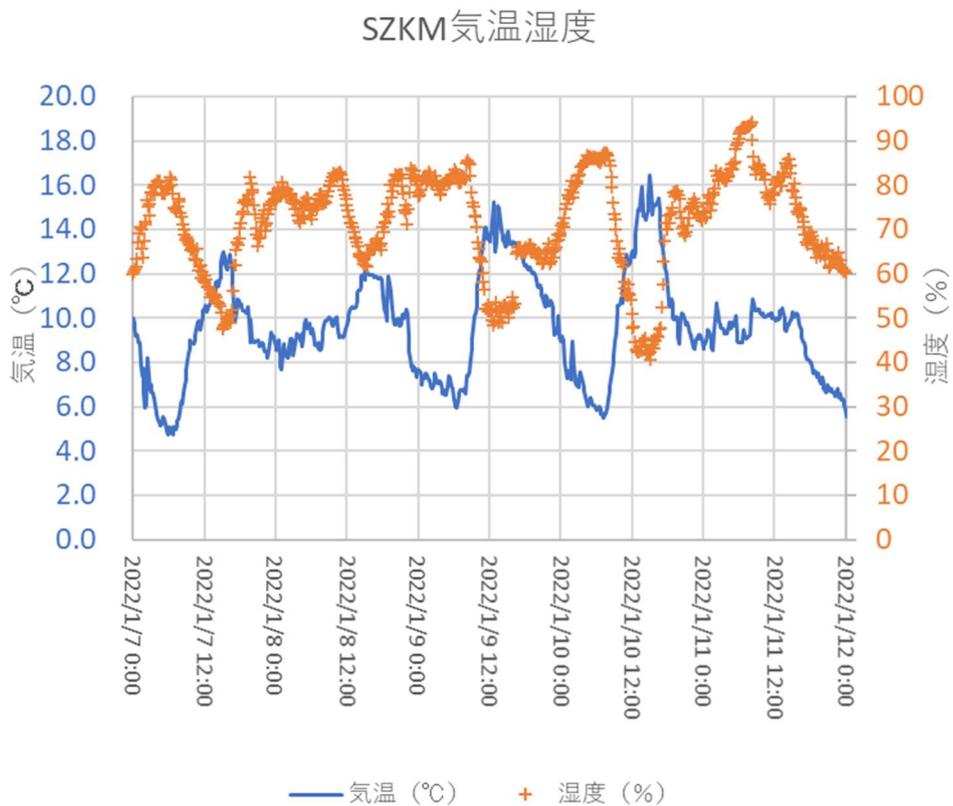


図 2-2-2-28 気温及び湿度の日周変化例 (2022/1/7 0:00 ~2022/1/12 0:00)

当たり前であるが、気温と湿度は日周変化を示し、両者は逆相関の傾向にある。最高気温と最低湿度は毎日午後に現れ、最低気温と最高湿度は午前中に現れている。先にも述べたように日周変化が明瞭に認められるのは穏やかな状態が続いた 1/11 08:00 台の寒冷前線の通過前までである。寒冷前線の通過後、午後になってから急速に気温と湿度が低下している。寒冷前線の通過に伴う風向風速の変化は 1/11 08:00 頃から明瞭になるのに対し、気温と湿度の低下はそれより 6 時間ほど遅れて現れている。

気象観測点 SZKM では外側を銀色のシートで包んだポリコンテナの中にロガーと電源系を収め、日光の直射を受ける状態で野外に定置されている。海底地盤変動観測装置に装着された観測計器も同様に日光の直射を受ける状態で定置されることが想定され、SZKM におけるロガー筐体温度の記録は海底地盤変動観測装置に装着される計器が暴露される温度環境の手がかりである。図 2-2-28 にロガー筐体温度の推移を示す。

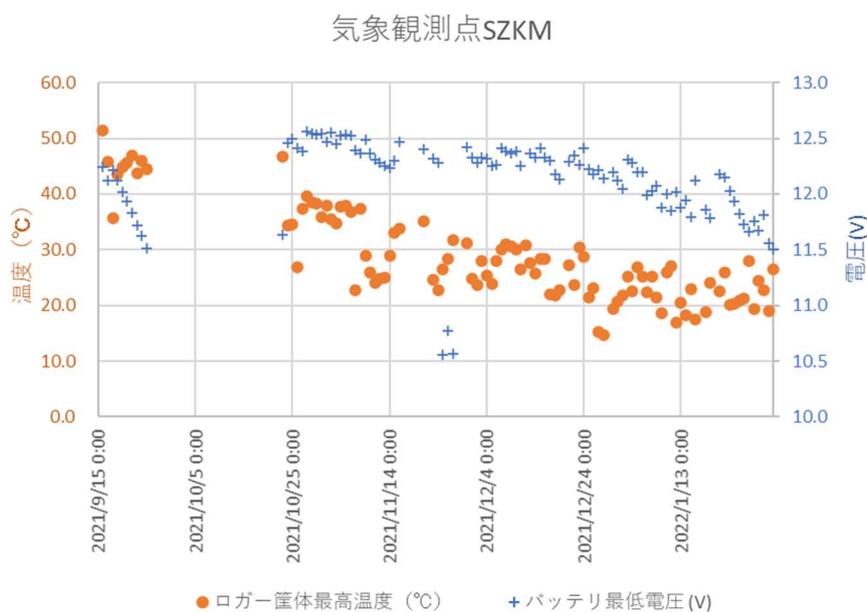


図 2-2-2-29 筐体温度とバッテリー電圧

観測期間中のロガー筐体温度は最高 51.5°C、最低 14°C が記録された。外気温同様、観測期間では 37°C に達する温度差のあることが示されている。当然ではあるがこの観測期間中は外気温の低下に伴ってロガー筐体温度が低下し 1 月末の時点で平均 20°C 台になっている。最高温度 51.5°C は設置作業中にロガーが直射日光を受けて記録したものであるが、その後ボックスに収め直射日光をシートで遮ることで約 5 度の温度低下があった。盛夏時にはより高い最高温度が想定されるので、ひきつづき季節の進行に伴う今後の推移に注目してゆく必要がある。

また、2021/10/26 以降はソーラーパネルによる充電をとまなう電源系としたが、12 月初旬以降緩やかな電圧低下が示されている。これは太陽高度の減少に伴う日照時間の減少によると考えられる。なお、9 月に見られる単調で急激な電圧降下はバッテリーのみ運用を実施したためであ

る。この電圧降下率を検討して10月下旬にソーラーパネルを併用する電源系統への改良を実施し。現在も継続して運用を続けている。

c) 採泥調査

現地海底の土質条件を把握するため、以下の図2-2-2-31に示す3地点において、採泥調査を実施した。水深は30m～45mである。採泥用具はスミス・マッキンタイヤ採泥器を用いて海底表面の土砂を採取した。採泥位置の測位はGPSを用いて行った。

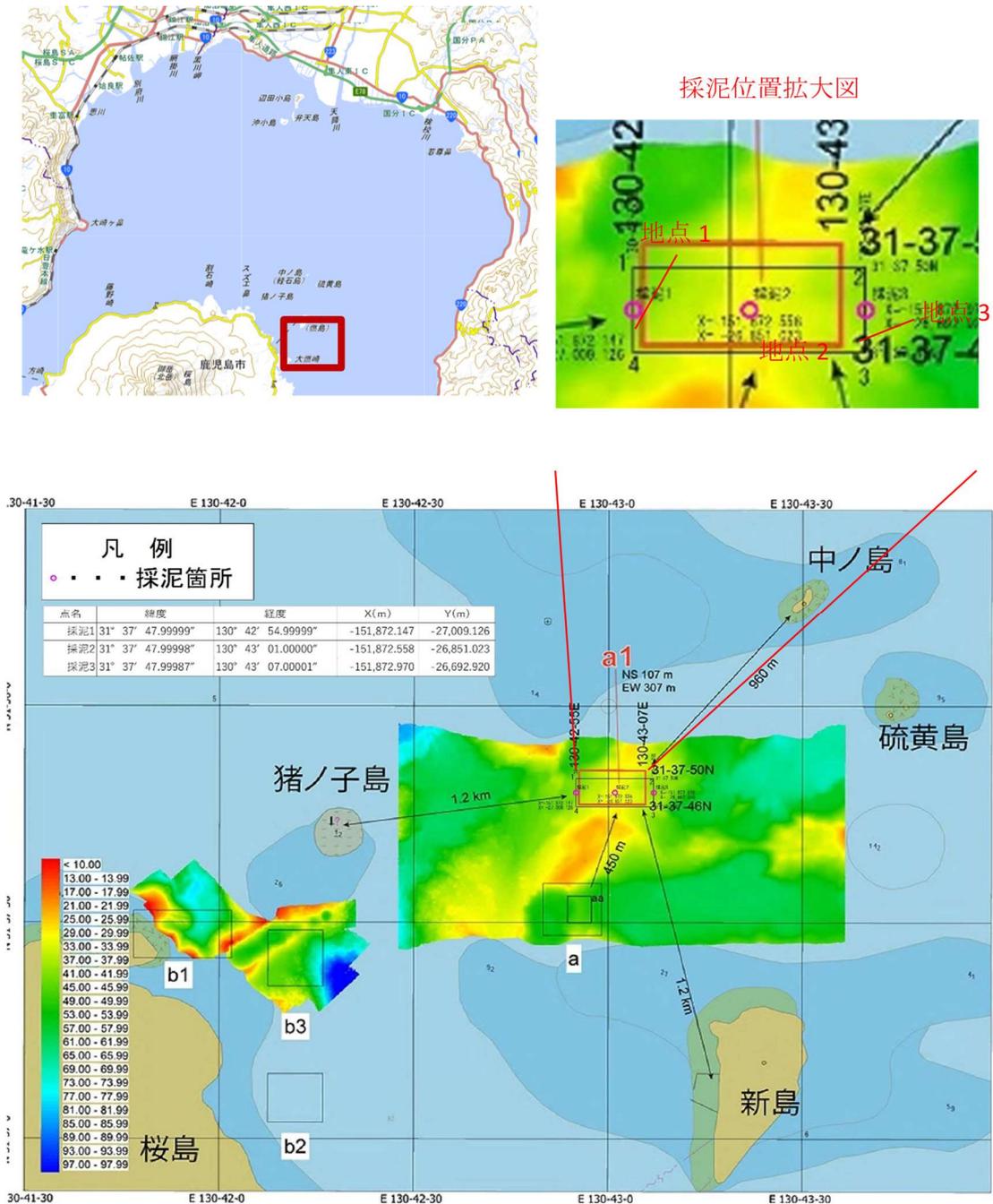


図 2-2-2-31 採泥調査位置

採泥調査で得られた試料に対する土質試験結果の概要を表 2-2-2-3 に示す。地点 no1 は中分類として砂質土 (SF)、地点 no2、3 は中分類として砂 (S) に属する。小分類は粘性土質砂 (SCs) から粘性土礫混じり砂 (S-CsG) に分類された。図 2-2-2-32 の粒径加積曲線によれば中央粒径は 0.11mm~0.20mm であり、0.075mm 以下のシルト・粘土成分は概ね 10~30% 程度である。また、粒径のバラツキを示す均等係数  $U_c$  は 3~9 である。地点 2 は採泥 3 地点のうちで最も密度が大きい値を示すとともに  $U_c$  も最も小さな値を示している。

当初令和 2 年度の詳細設計での想定設置領域 a (水深約 50m) で実施された令和 2 年度の採泥調査結果 (京都大学防災研究所, 2021) と比較すると、令和 3 年度の領域 a1 の結果では中央粒径の範囲は令和 2 年度のそれと同程度であるが、令和 3 年度の  $U_c$  は令和 2 年度の  $U_c$  の結果 7~12 より小さい値をとり粒径がより揃っていることを示している。令和 3 年度の採泥結果から求められたせん断角は  $30^\circ$  で、令和 2 年のそれ ( $25^\circ$ ) より大きな値が求められた。このことは摩擦係数に換算すると令和 3 年度のほうが令和 2 年度より約 2 割大きな値を示すことに相当する。

表 2-2-2-4 室内土質試験結果の概要

地点no	土粒子密度	地盤材料の分類		50%粒径 D50	均等係数 $U_c$
	g/cm <sup>3</sup>	中分類	小分類	mm	
1	2.601	SF 砂質土	SCs 粘性土質砂	0.1150	8.93
2	2.631	S 砂	S-CsG 粘性土礫まじり砂	0.1895	3.03
3	2.564	S 砂	S-CsG 粘性土礫まじり砂	0.1884	3.03

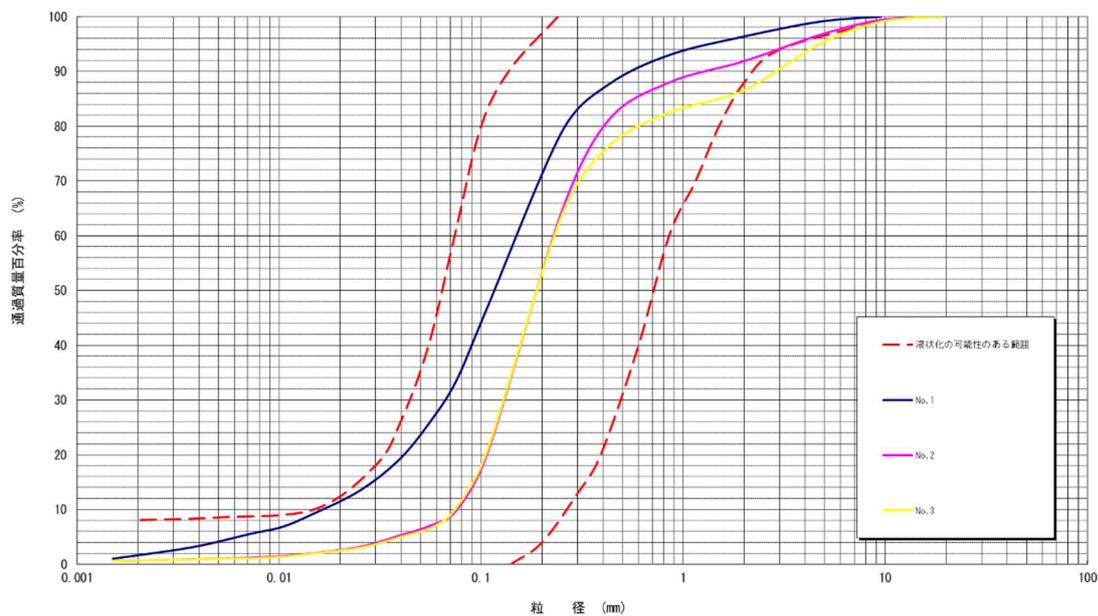


図 2-2-2-32 各地点の粒径加積曲線

### (2) 2.3. 海底地盤変動観測装置測位方式の検討

始良カルデラにおける既往の観測研究（たとえば、京都大学防災研究所，2021; Yamamoto et al., 2013 等）によれば、海底地盤変動観測装置設置予定地点付近では1 cm/Year 程度の地盤変動の検知が期待される。測位結果の解析にはGNSS 搬送波の位相を用いる Kinematic 解析法を用いる予定である。したがって Kinematic 解析法の安定性、運動追従性を検証する必要がある。令和3年度は海底地盤変動観測装置の測位精度の確認のために、以下の解析および測位実験を行った。

1) Kinematic 解析の長期安定性の検証

2) 1 軸実験台における測位実験

3) 2 軸実験台における測位実験

1) の検討は既存の京都大学防災研究所火山活動研究センター連続観測点の1年分のデータを用いて PPK 解析を行い、PPK 解析結果の長期安定性を確認することが目的である。安定性は渡邊他(2020)にならい、測位値の分布で評価した。

2) の1軸実験台における測位実験は電動機駆動によるアンテナ強制運動下での測位精度の確認を目的として実施された。ピラー長60 m（京都大学防災研究所，2021）におけるピラー頂部の最大速度は2 m/s 程度であると予想されたため、2 m/s 近辺の運動速度が得られるように実験台を改修した（図2-2-3-1）。



図 2-2-3-1 1 軸実験台

3) の2軸実験台における測位実験では、直交する2軸のそれぞれを中心とする回転を許したピラー上にアンテナ台を設け、ピラーの3次元傾斜に対する傾斜補正アルゴリズムの有効性の確認を目的とした実験を行った。2軸実験台を図3-3-3-2に示す。



図 2-2-3-2 2 軸実験台 無風時平衡状態で D 側下がり 8 度。

1)～3)の解析にはフリーソフトウェア RTKLIB(Takasu, 2013)を用いた。さらに 2), 3)の実験ではピラーの傾斜補正が必要であるが、後述のように必要なアルゴリズムを考案して補正に用いた。

#### a) Kinematic 解析結果の長期安定性の検証

本項では Kinematic 解析結果の長期安定性を確認することを目的として、既存の観測点における GNSS 測位データを用いて PPK(Post-Processing Kinematic)解析を行った結果を、同じ観測点組み合わせで行った Static 解析結果と比較する。安定性の評価は渡邊他(2020)にならい、測位値の分布を用いた。両解析では既存の京都大学防災研究所火山活動研究センター連続観測点 SNYM の約 1 年分(2020/6/17～2021/6/23 372 日分) のデータを対象とし、SNYM から 1.5 km の距離を隔てた常設点の KMNG を参照点として用いた。なお使用アンテナはそれぞれ SNYM:AT502(Leica 社製)、KURG: AX1202(Leica 社製)であった。

解析結果の時系列を下図に示す。2 種類の解析法 (Kinematic 法と Static 法) による結果を並べて示す。対流圏補正モデルはそれぞれ次の方法を用いた。Kinematic 解析では RTKLIB 組み込みの RTKPOST を用いて ZTD (Zenith Tropospheric Delay) で対流圏補正を行い、Static 解析では解析アプリケーション Leica LGO に組み込まれている時空間依存の対流圏補正オプショ

ン(以下 Computed) による補正を行った。両者の統計量を表 2-2-3-1 に示し、値の分布を図 2-2-3-3、4 に示す。

表 2-2-3-1 1 年間測位データ解析結果の比較

	Kinematic 解析	Static 解析
緯度(度)	31. 614159048	31. 614159049
経度(度)	130. 701771133	130. 701771134
標高(m)	49. 13997	49. 14003
緯度方向標準偏差(m)	0. 0013	0. 0015
経度方向標準偏差(m)	0. 0015	0. 0016
標高方向標準偏差(m)	0. 0051	0. 0042

両者とも下図の時系列からはめだったトレンドは認められない。水蒸気量の多くなる季節(6月~8月)では static 法による結果のバラツキが若干大きくなる傾向が見受けられる。測位値解析結果は Kinematic 及び Static のいずれの結果も単峰分布を示す。

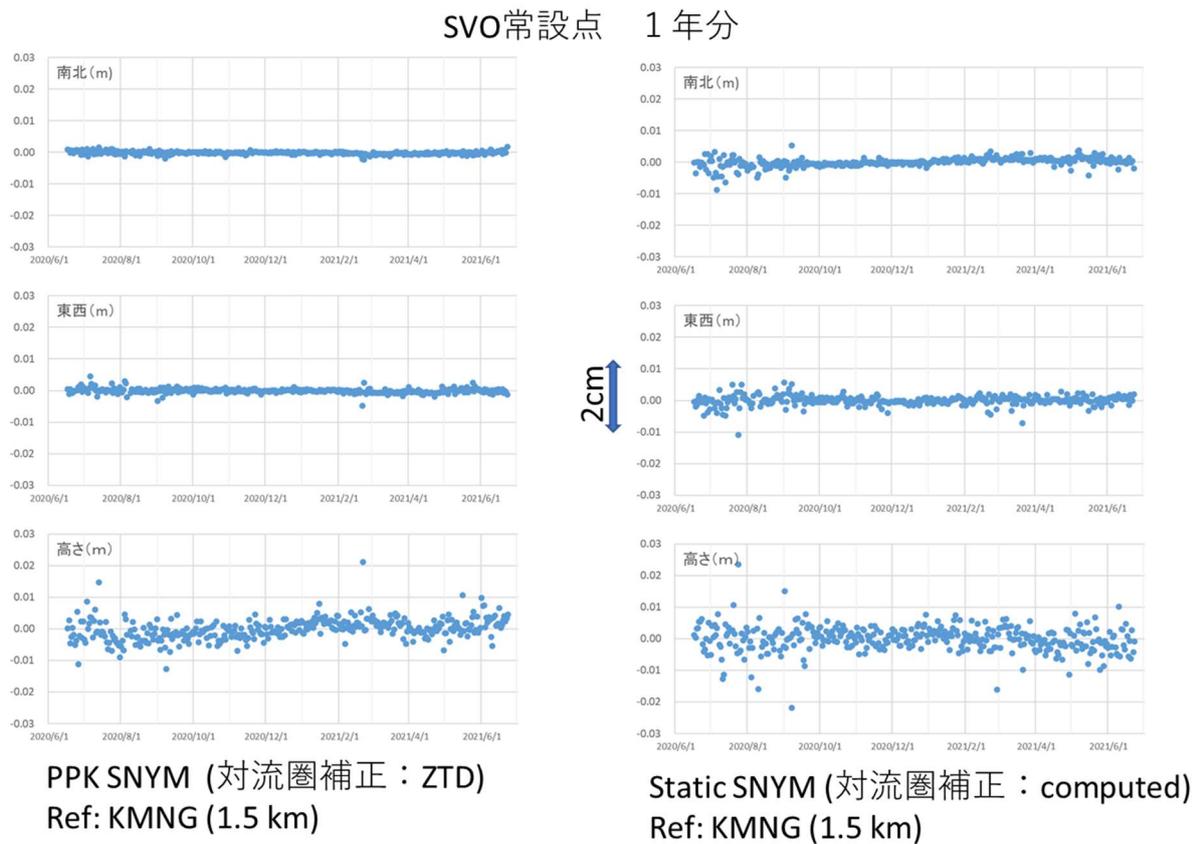


図 2-2-3-3 常設 GNSS 観測点における Kinematic 解析結果(左列)と Static 解析結果(右列)の時系列

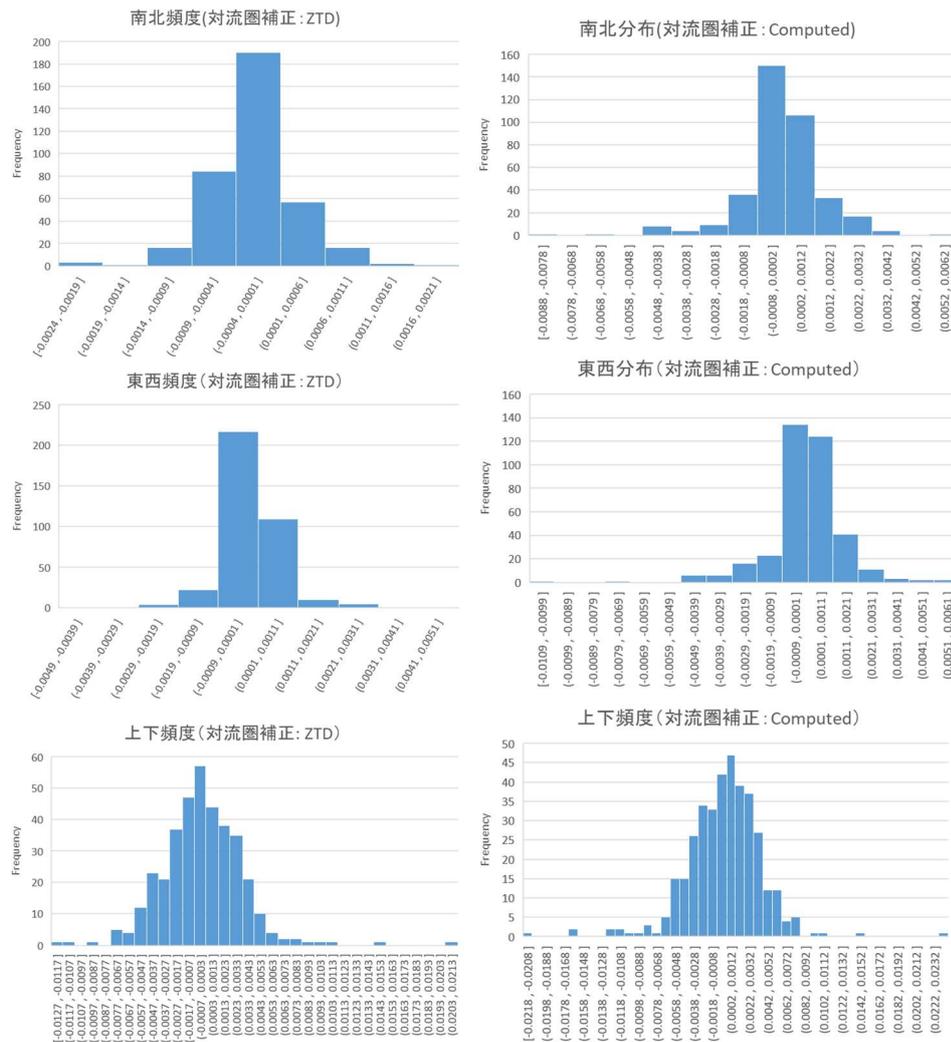


図 2-2-3-4 常設 GNSS 観測点における Kinematic 解析結果 (左列) と Static 解析結果 (右列) の測位値分布

以上のことから Kinematic 解析法による測位結果は長期にわたる測位結果にあっても、Static 解析法と同程度の安定した結果が得られており、長期間の測位の継続を前提とする火山性地盤変動の観測が可能であることが確かめられた。

b) 1 軸実験台における測位実験

海底地盤変動観測装置では風波と潮流によるアンテナ台の運動が想定され、大きな速度の運動体上の測位の Kinematic 解析法結果が安定したものであることを確認する必要がある。

運動体上のアンテナを用いた測位実験としてはいくつかの報告例がある。Yigit (2016)は地震動による建造物の運動の検出を目的として 2m 長の鋼帯材の上にアンテナを搭載し、打撃による加振を実施し DGPS を基準として高速サンプリング PPP の結果を評価した。さらに、Yigit et al. (2020)が地震動による建造物の運動の検出を目的として 直線運動する振動台の上の測位実験を実施し、差動トランスによる変位量実測値に対して高速サンプリング PPP の結果を評価している。

一方キネマティック解析では岡本 修, (2020)が RTK 対応 2 周波受信機 F9P の性能評価を目的に、2.5 m の直線軌道上の台車を時速 1 km で移動させて測位し、RTK 解析によって移動中の精度の評価を実施した例がある。

海底地盤変動観測装置のアンテナ台の運動速度は京都大学防災研究所(2021)の添付資料 e 解析報告書 Table 5 によって次のように推測した。

表 2-2-3-2 アンテナ台運動速度の推定

<入射波条件> 波周期 Ts: 2.0~15.0 s, 波高 Hs: 0.53~2.50m (京都大学防災研究所, 2021)、ピラー長 (連結部から頭頂) 60m

Hs (m)	Ts (s)	Xdamp (m)	Vmax (m/s)
0.53	2.0	0.016	0.050
1.19	3.0	0.226	0.474
2.11	4.0	0.928	1.458
2.50	4.9	1.650	2.116
2.50	6.0	2.20	2.304
2.50	7.0	2.575	2.311
2.50	8.0	2.925	2.297
2.50	9.0	3.250	2.269
2.50	10.0	3.600	2.262
2.50	12.0	4.300	2.251
2.50	15.0	5.625	2.356

Hs は垂直波高値で、Xdamp は入射波に対する観測塔の応答振幅である。参考にした京都大学防災研究所 (2021) 添付資料 e Table 7 では Xdamp/Hs が示されており、この値を元に Xdamp を計算した。また、観測装置頭頂の最大運動速度 Vmax は動揺が単振動であると仮定して、

$$V_{\max} = X_{\text{damp}} * 2\pi / T_s$$

を与えた。

上表より、ピラー長 60m (旧設計) におけるピラー頂部の最大速度は 2.4 m/s 程度が予想された。また、改良設計の結果ピラー長は約 40m とされ、旧設計の 2/3 の長さになったために、最大速度はさらに小さくなり 2 m/s 程度であると予想された。

以上の予察をへて 2 m/s 近辺の運動速度が得られるように既存の実験台 (京都大学防災研究所, 2021) を 1 軸実験台に改修した (図 2-2-3-1、図 2-2-3-5)。実験台の改修にあたり、定常的なアンテナ台の運動を 200W 電動機駆動のクランク機構を構成することによって実現した。

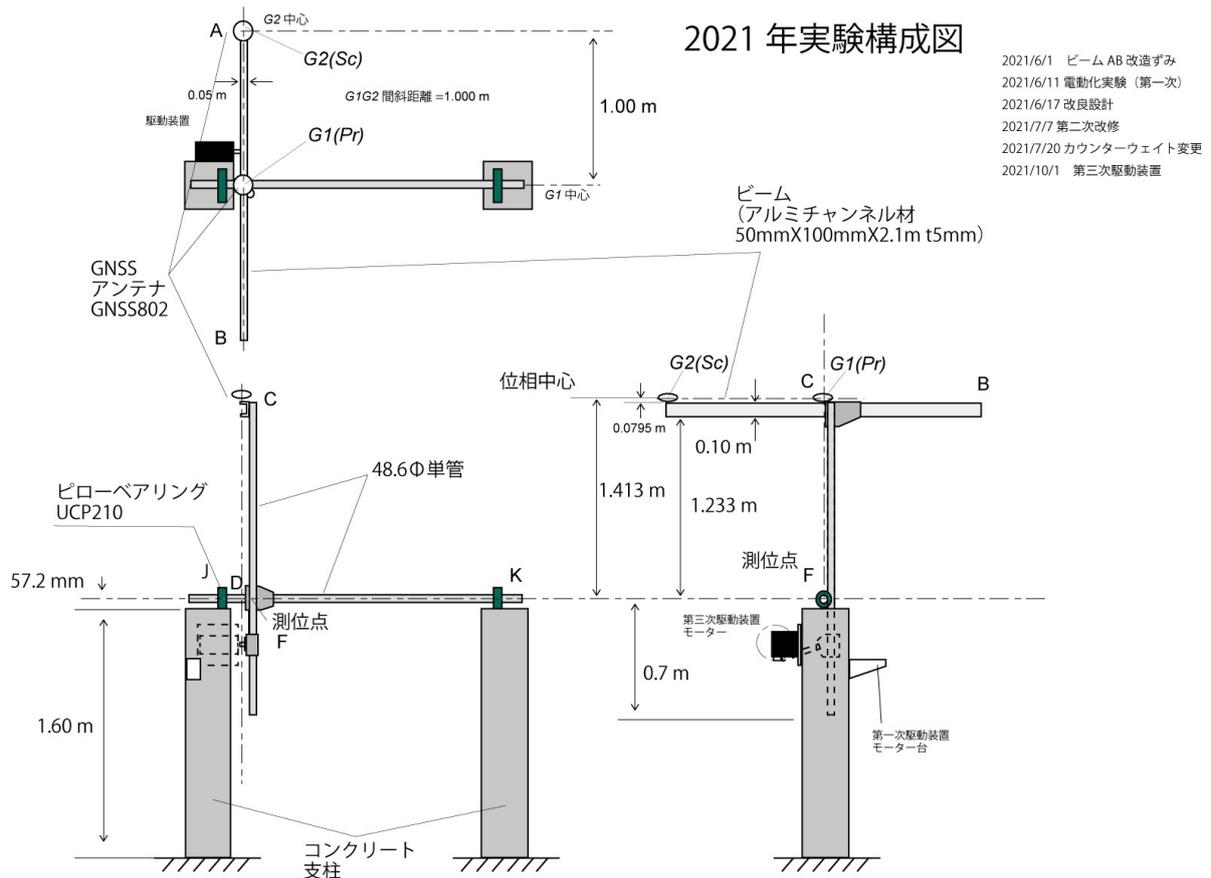


図 2-2-3-5 1 軸実験台

実験台では回転軸中心からアンテナ G1 位相中心までの長さを 1.4125 m とし、周期 1.0 秒で最大傾斜角 15 度として 2.1 m/s の最大速度を実現した。このアンテナ台に GNSS アンテナ GNSS-802 (NovAtel 社製) を 2 つ使用し、ピラー直上のアンテナ G1、ビーム先端のアンテナ G2 と名付けた。また、このアンテナペアをデュアルアンテナ GNSS 受信機 PwrPak-7D (NovAtel 社製) と組にして用いた。デュアルアンテナ GNSS 受信機 PwrPak-7D は NovAtel 社の OEM-7 シリーズ Model OEM7720 をケースに組み込んだものである。Model OEM7720 の内部構成を下図に示す。Model OEM7720 は 2 つのアンテナから送られた GNSS 信号を共通のクロックで処理する構成をもつ。

Figure 1: OEM7 Receiver System

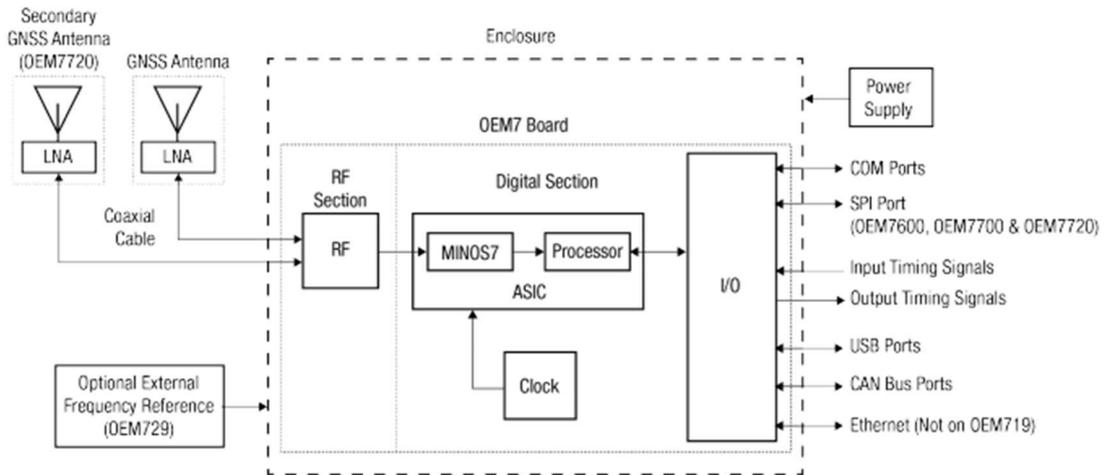


図 2-2-3-6 OEM-7 Model OEM7720 受信機の内部構成 (NovAtel, 2021 より引用)。

1 軸実験台における測位データ処理は下図 2-2-3-7 の流れで行った。

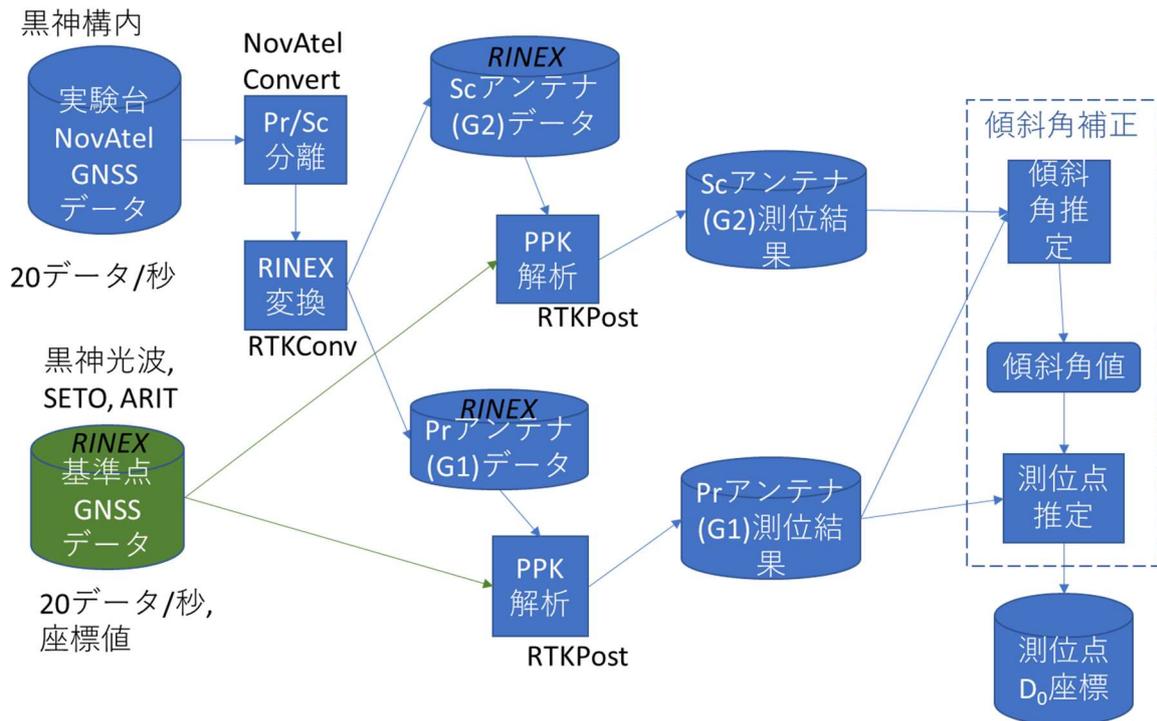


図 2-2-3-7 1 軸実験処理流れ図

基準点として、既存基準点 KURB、ARIT を用いた。これらの基準点は観測点 SVOG を参照してそれぞれの座標値を決定した。基準点 KURB はアンテナに AR10(Leica 社製)を用い、受信機に GR30(Leica 社製)と接続した。基準点 ARIT は PolaNt-x(Septentrio 社製)をアンテナとして用いた。KURB はアンテナ G1 より 25 m 離れて 2.2 m 低く、ARIT は G1 より 4.0 km 離れて 23.2 m 高い

楕円体高であった。なお、先述の海底地盤変動観測装置の設置予定点中心位置（31度37分48秒 東経130度43分01秒）に対して、実際の運用時に想定される基準点SNYMまでの距離は2.27 kmである。それぞれの基準点で決定された座標値をエポック毎のデータとともに放送歴を使用してPPK解析に用いた。

各アンテナで得られた測位データはアンテナ毎に分離のうえ記録形式変換の後、PPK解析を施してエポック毎の測位値を得る。また、傾動するアンテナ台における測位結果の傾斜補正は以下のように行った。

実験台の幾何学的配置を図2-2-3-8に示す。測位点F、主アンテナG1をPr、副アンテナG2をScとし、磁北方向にx軸、それと直交する東方向にy軸をとるものとする。ピラーF-Prは長さLで、ピラーはFを中心としてy軸の周りに回転できるものとする。ここに、Heading角 $\phi$ 、Pitch角 $\theta$ とする。

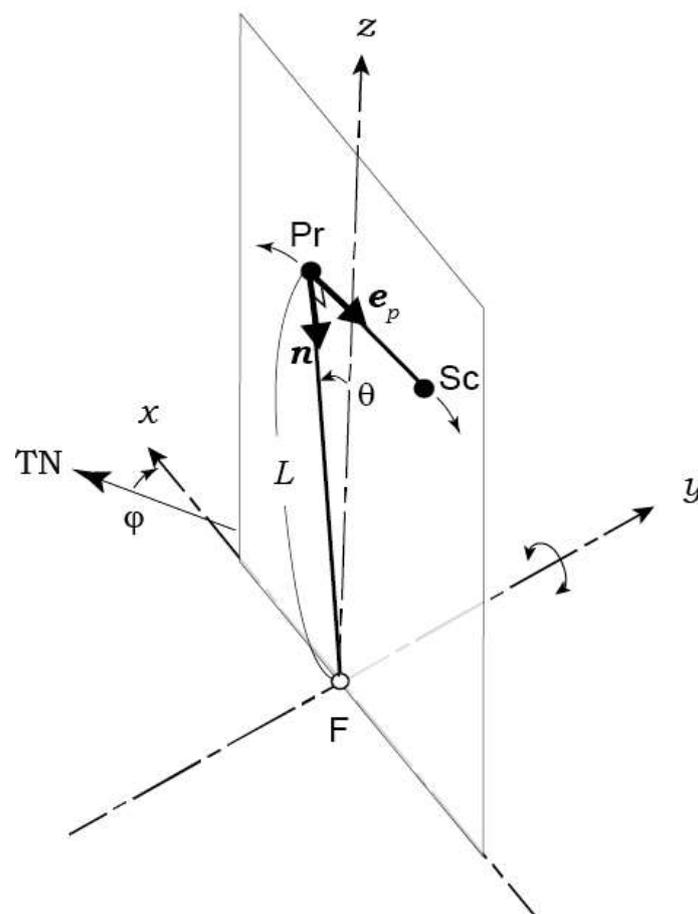


図 2-2-3-8 1 軸実験台の構成

以下に測位点Fの座標推定の手順を述べる。プライマリアンテナPr、セカンダリアンテナScとする。

1. 実験台パラメータ（ビーム方向）の推定
  - 1-1. 測位結果を平面直角座標系XYZに変換する。
  - 1-2. 観測値からPr-Scベクトルの平均値を求める。

- 1-3. Pr-Sc ベクトルの平均値から Pr-Sc の方位角  $\beta$  を求める。
2. 測位点座標 F の推定
  - 2-1. 測位結果を平面直角座標系 XYZ に変換する。
  - 2-2. Pr-Sc ベクトルを求める。
  - 2-2. Pr-Sc ベクトルを水平面内で角度  $\beta$  の座標回転を行い、Pr-Sc ベクトルを含む平面座標系 xyz に変換する。
  - 2-3. 座標変換された Pr-Sc ベクトルと直交する xz 面内の単位法線ベクトルを求める。
  - 2-4. xz 面内の単位法線ベクトルを XYZ 座標系に逆変換する。
  - 2-5. アンテナ位相中心-F 間の距離を変換後の単位法線ベクトルに乗じて Pr 座標に加え、F 座標を得る。

運動するアンテナに対する測位結果（傾斜補正済み）を下図 2-2-3-9、図 2-2-3-10 に示す X 成分

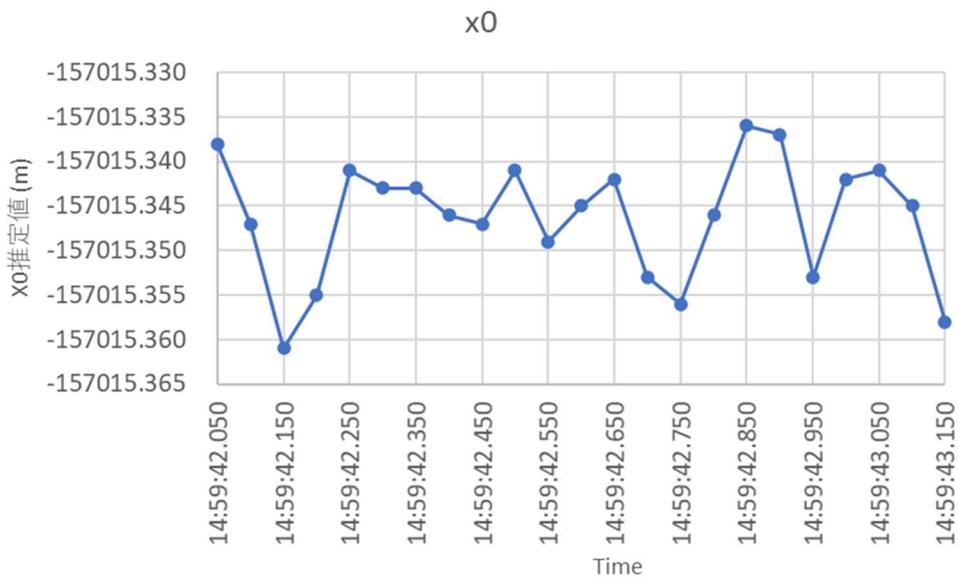


図 2-2-3-9 傾斜運動の 1 周期分の補正結果（2021/10/12）

上図では KURB 基準の傾斜補正結果のアンテナ位置依存性は特に見られない。もし傾斜補正の完成度が低ければ、アンテナの運動に伴った周期性が表れるはずである。

また、アンテナ Pr の測位結果と、傾斜補正を施して導出した F の位置とを次の図に示す。

### 傾斜補正結果

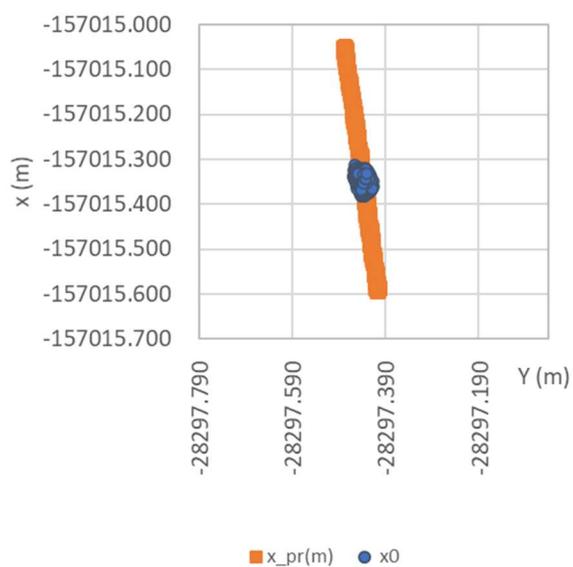
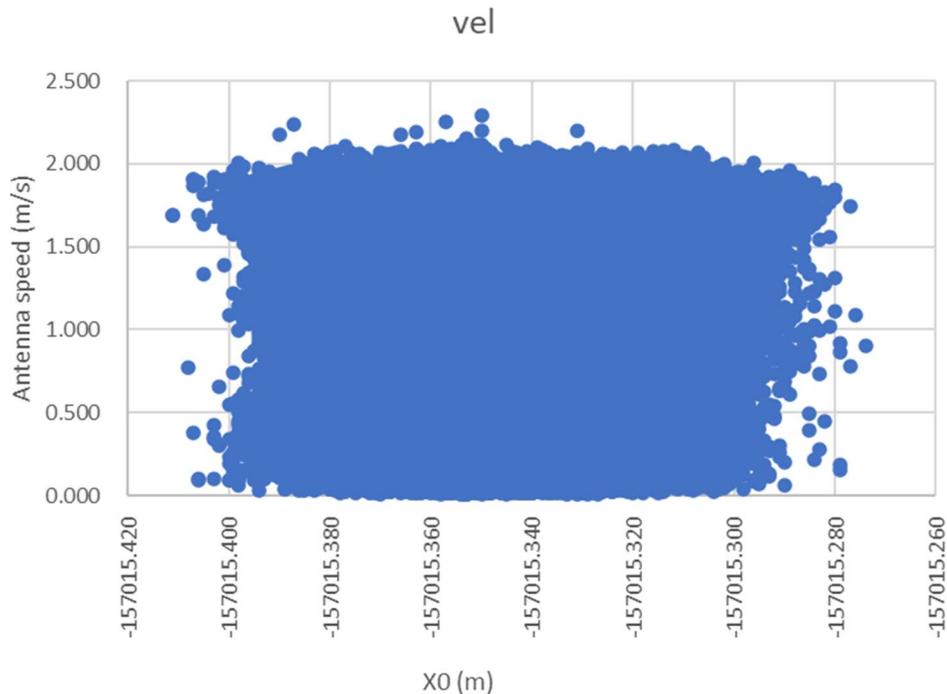


図 2-2-3-10 アンテナ Pr と傾斜補正結果 X0

アンテナ Pr が約 50 cm X 方向に運動するのに対して、傾斜補正結果 X0 は 10cm 以内に収束している。以上のことから、傾斜量補正は成功していると判断される。

また 2021/10/12 15:00-21:00 の間の 6 時間分の測位結果とアンテナ速度との関係を下図 2-2-3-11 に示す。



Mean benchmark=(-157015.348, -28297.438, 93.469), Var=(0.00002, 0.00001, 0.00002)

図 2-2-3-11 アンテナ速度対補正結果

アンテナ運動速度の増大に対して、測位結果が顕著に不安定になる傾向は見受けられない。したがって、運動するアンテナでの測位結果の Kinematic 解析は安定した結果を与えると判断される。

#### c) 2 軸実験台における測位実験

海底地盤変動観測装置は海底に設置されたアンカーに、ユニバーサルジョイントで結合された上部構造（ピラーおよびアンテナ台）が乗る構造になっている。上部構造は風力や潮流力の作用がない時には浮体の浮力によって直立し、風力や潮流力、波浪力が作用した際には上部構造が傾斜してその力を受け流す。時々刻々変化する風力や潮流力、波浪力に対応するために上部構造はすべての方向に傾動が可能でなければならない。海底地盤変動観測装置では運動する上部構造頂部で GNSS 測位した結果から、海底のアンカー上の基準点位置を決定する必要がある。海底地盤変動観測装置を実際に運用するために頂部の GNSS 測位結果から海底のアンカー上の基準点位置を求めるアルゴリズムを構築し、実際の構成を模した実験を通してその検証をする必要がある。

海底地盤変動観測装置におけるアンテナ配置は、下図 2-2-3-12 のように計画されている。2 軸実験台は、単一の回転軸を有する在来の実験台の基礎を用いて回転軸に直交する軸を一つ追加し、直交する 2 軸を有するユニバーサルジョイントの動きが実現できるようにした。2 軸実験台のピラーの頂部には GNSS アンテナ A を設置し、アンテナ A から長さ 1.0 m の 3 本ビームを 120 度間隔に設け、ビーム橋の一つずつ GNSS アンテナ B~D を設置した。2 軸実験台においても各アンテナの配置と E 軸および F 軸との位置関係を想定される海底地盤変動観測装置と同じにした。

また、2軸実験台のピラーは電動機による駆動ではなく、ピラー下部の主おもり板に対する風力を動力源とするものとした。

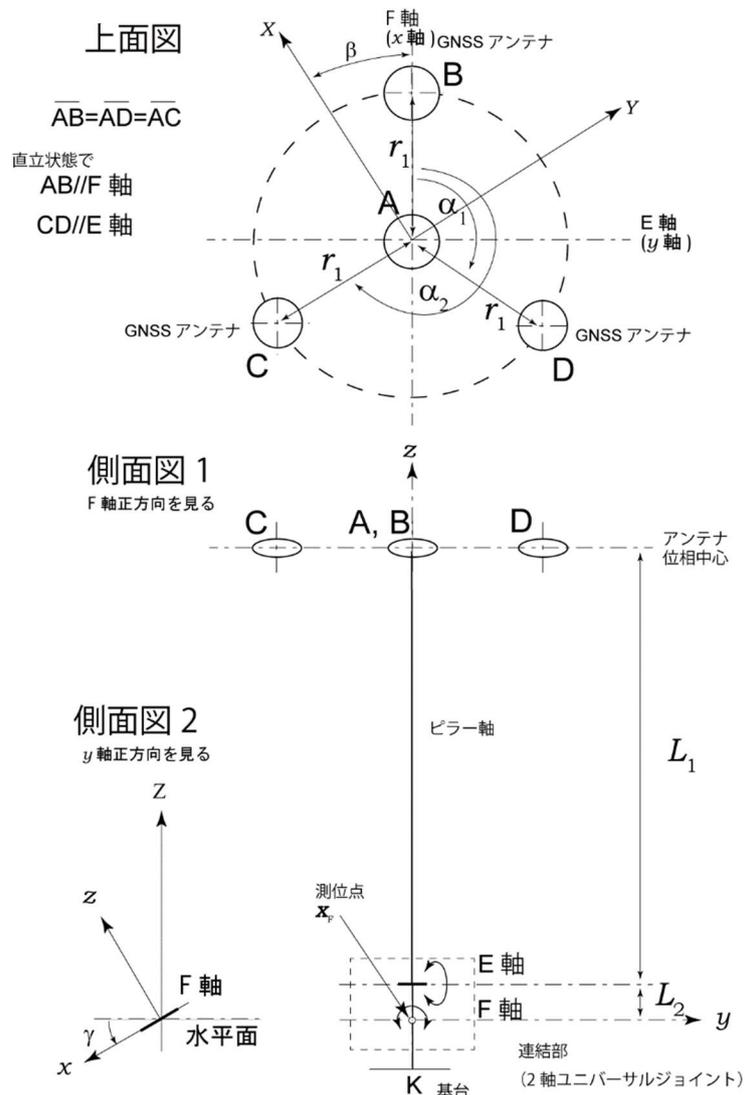


図 2-2-3-12 GNSS アンテナと回転軸との位置関係

この実験を行うために再び実験台を改修し、海底地盤変動観測装置の実際の構成を模した2軸実験台を構成した。2軸実験台の組み立てを図2-2-3-13に示す。

図2-2-3-13の2軸実験台における測位実験を2022/1/7～2022/1/11にかけて行った。4つのGNSSアンテナA～Dには先述の1軸実験と同様にGNSS-802(NovAtel社製)を用いた。デュアルアンテナGPS受信機PwrPak7D(NovAtel社製)を2セット用意し、それぞれアンテナA及びBの組と、アンテナCおよびDの組とを接続した。測位点Fは2軸実験台の最下軸JKの中央に設定した。

Kinematic解析の基準点として既設の定常観測点KURGとSNYMを用いた。KURGは実験台から約24mの距離にありアンテナAより3.7m高く、SNYMは実験台から約3.4kmの距離にありアンテナAより45.6m低い。

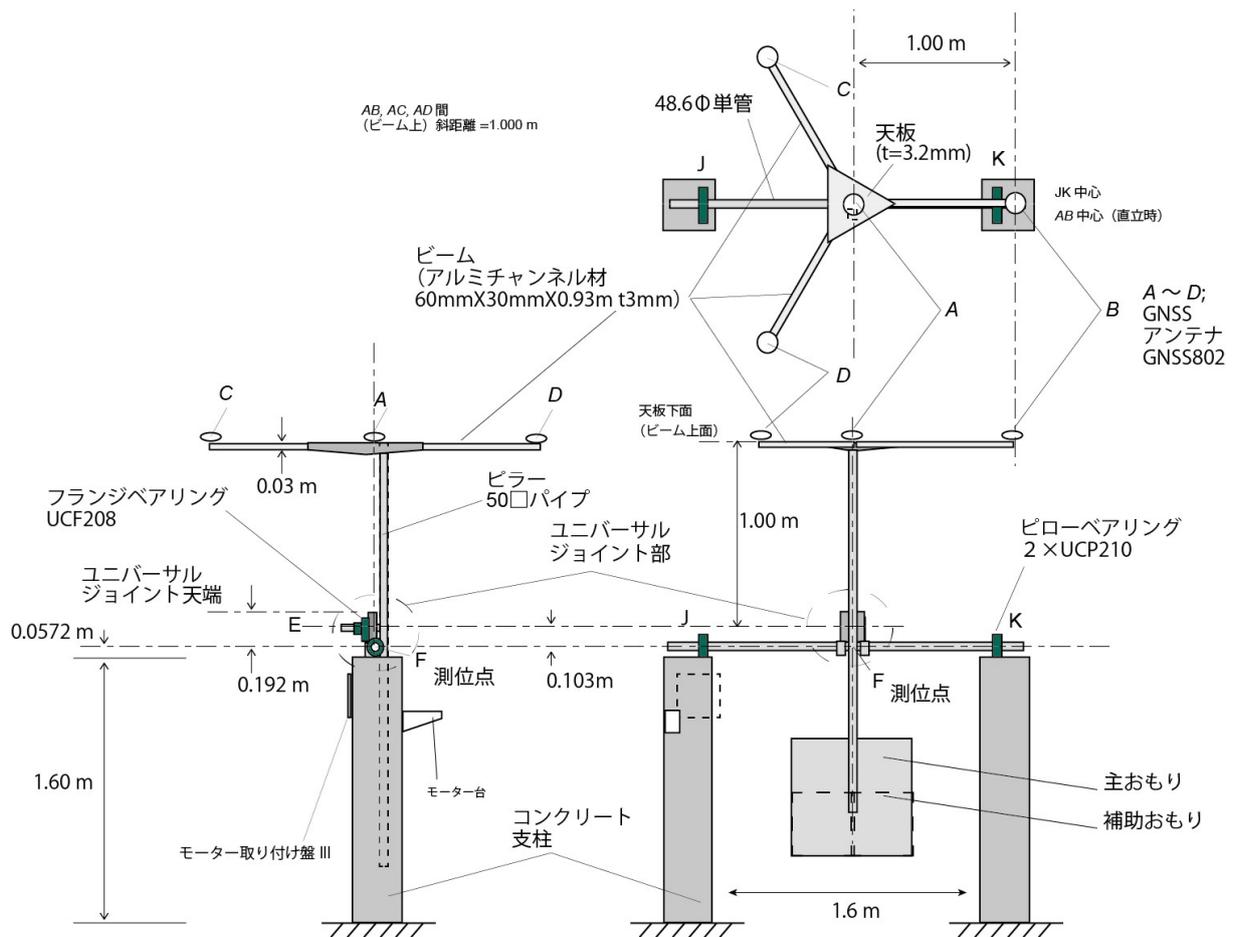


図 2-2-3-13 2 軸実験台

本実験で得られた4つのアンテナの測位結果の処理の流れを図 2-2-3-14 に示す。先述の1軸実験と同様に、各アンテナで得られた測位データはアンテナ毎に分離のうえ記録形式変換の後、PPK 解析を施してエポック毎の測位値を得る。

アンテナ A の測位結果の傾斜補正は次のように行う。

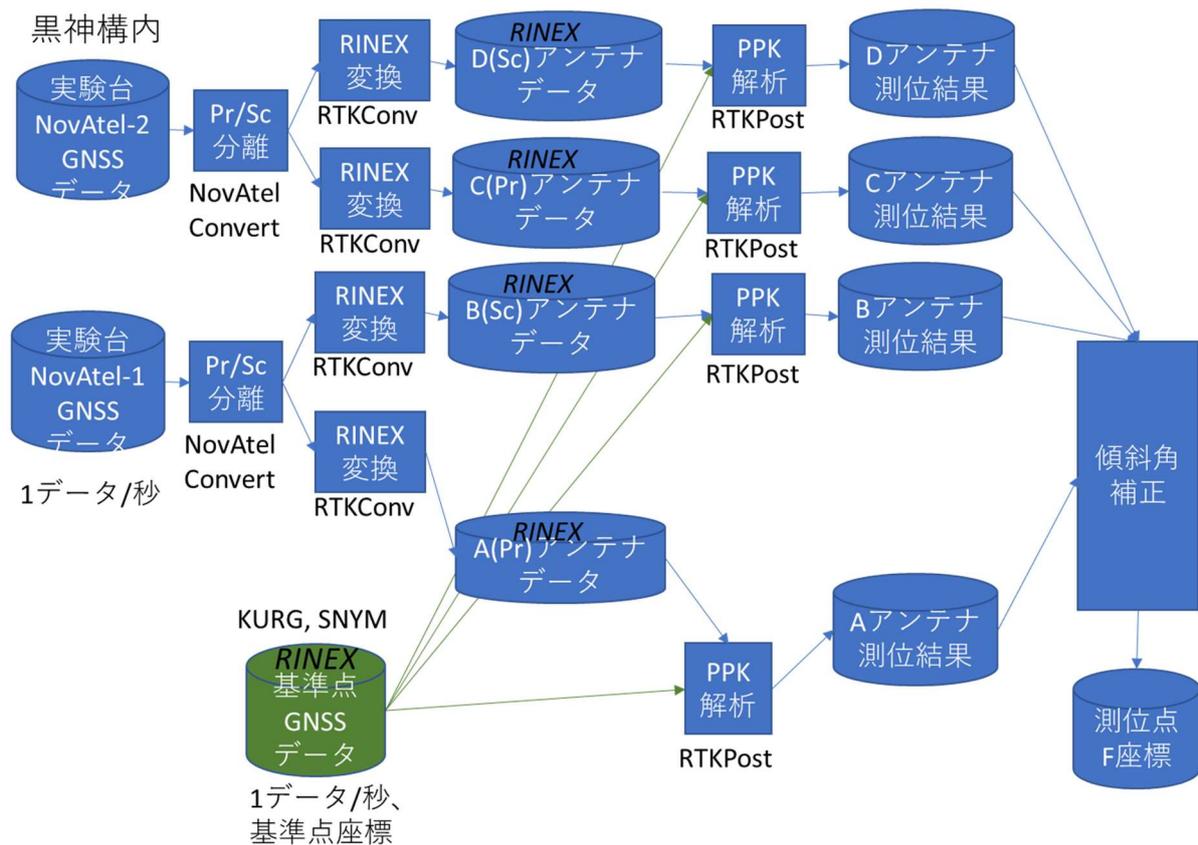


図 2-2-3-14 2 軸実験台 4 アンテナ実験データ処理の流れ

$\mathbf{X}_F = (X_F \ Y_F \ Z_F)$  : 平面直角座標系における測位点の表示

a. 既知量

海底地盤変動観測装置の各部寸法

$\beta$  : F 軸の方位 (北から時計回りを正)

$\gamma$  : F 軸の傾斜 (水平面から時計回りを正)

$L_1$  : E 軸-アンテナ A 位相中心間距離

$L_2$  : F 軸-E 軸間距離

F 軸  $\perp$  E 軸

AB と F 軸は同一平面上。直立状態で AB//F 軸

CD と E 軸は同一平面上。直立状態で CD//E 軸

$l_1$  : アンテナ A - アンテナ B 中心間距離およびアンテナ A - アンテナ C、アンテナ A - アンテナ D 中心間距離

$$\alpha_1 : \angle BAD$$

$$\alpha_2 : \angle BAC (= 2\alpha_1)$$

点 A~D は同一面 BCD 上にあるものとし、点 A, B, E, F は同一面 ABEF 上にあるものとする。面 ABEF 上に x 軸および AB があるものとする。

b. 測定値

測位値の平面直角座標系

$$\mathbf{X}_A = (X_A \ Y_A \ Z_A)$$

$$\mathbf{X}_B = (X_B \ Y_B \ Z_B)$$

$$\mathbf{X}_C = (X_C \ Y_C \ Z_C)$$

$$\mathbf{X}_D = (X_D \ Y_D \ Z_D)$$

c. 座標系

平面直角座標系： $\mathbf{X}=(X \ Y \ Z)$  で表現する。測位値  $\mathbf{X}_A \sim \mathbf{X}_D$

ブイ座標系： $\mathbf{x}=(x \ y \ z)$  で表現し、F 軸中央  $\mathbf{X}_F$  を原点(0 0 0)とする。x 軸=F 軸で北方向を正、y 軸=水平面東方向を正、z 軸=xy 面に垂直上方を正とする。

点 A~F の幾何学配置を下図 2-2-3-15 に示す。

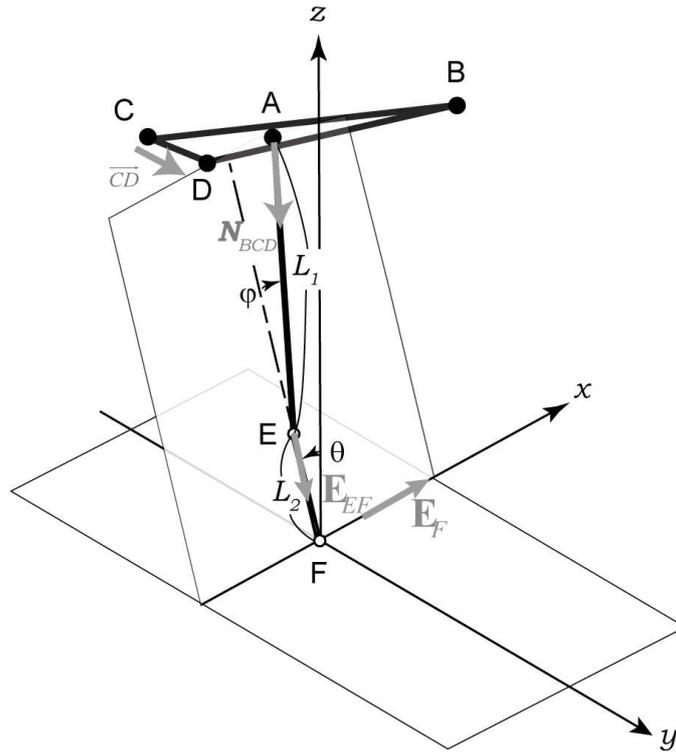


図 2-2-3-15 アンテナアレイを用いた傾斜補正アルゴリズムの概念

測位点 (x 軸の中央 F) に原点をとり、F 軸に平行に x 軸、XY 平面上で時計回り 90° 方向に y 軸を取ることにする。

e. 傾斜補正

以降では面 BCD の単位法線ベクトル  $\mathbf{N}_{BCD}$  を求める。ここでは任意の点  $(x_i, y_i, z_i)$  に対して  $x_i = X_i, y_i = Y_i, z_i = Z_i$  として xyz 座標系と XYZ 座標系が一致しているものとする。

既知量：

$$\begin{aligned} L_1 &= \overline{EA} \\ L_2 &= \overline{EF} \end{aligned} \quad (2-1)$$

各点測位値：

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_A &= (X_A \quad Y_A \quad Z_A) \\ \mathbf{X}_B &= (X_B \quad Y_B \quad Z_B) \\ \mathbf{X}_C &= (X_C \quad Y_C \quad Z_C) \\ \mathbf{X}_D &= (X_D \quad Y_D \quad Z_D) \end{aligned} \quad (2-2)$$

面 BCD を張る 2 つのベクトル  $(\overline{BC} + \overline{BD})$  および  $\overline{CD}$  は以下のように算出される。

$$\begin{aligned} \overline{BC} + \overline{BD} &= (X_{BCD} \quad Y_{BCD} \quad Z_{BCD}) \\ &= (X_C + X_D - 2X_B \quad Y_C + Y_D - 2Y_B \quad Z_C + Z_D - 2Z_B), \\ \overline{CD} &= (X_{CD} \quad Y_{CD} \quad Z_{CD}) \\ &= (X_D - X_C \quad Y_D - Y_C \quad Z_D - Z_C) \end{aligned} \quad (2-3)$$

ベクトル  $(\overline{BC} + \overline{BD})$  と  $\overline{CD}$  とのベクトル積は、二つのベクトルが張る平面の法線と平行である。

ベクトル  $(\overline{BC} + \overline{BD})$  と  $\overline{CD}$  とのベクトル積は以下のように計算される。

$$(\overline{BC} + \overline{BD}) \times \overline{CD} = (Y_{BCD}Z_{CD} - Z_{BCD}Y_{CD} \quad Z_{BCD}X_{CD} - X_{BCD}Z_{CD} \quad X_{BCD}Y_{CD} - Y_{BCD}X_{CD}) = \widetilde{\mathbf{N}}_{BCD} \quad (2-4)$$

$\widetilde{\mathbf{N}}_{BCD}$  を正規化したものが単位法線ベクトル  $\mathbf{N}_{BCD}$  である。

$$\mathbf{N}_{BCD} = \frac{\widetilde{\mathbf{N}}_{BCD}}{|\widetilde{\mathbf{N}}_{BCD}|} \quad (2-5)$$

次に E 点の位置ベクトル  $\mathbf{X}_E = (X_E \ Y_E \ Z_E)$  を以下に従って求める。

$$\mathbf{X}_E = \mathbf{X}_A + L_1 \mathbf{N}_{BCD} \quad (3-1)$$

次に F 点の座標を求めるためにはベクトル EF をもとめる必要がある。まず、EF に平行な単位ベクトルが必要である。F 軸 (x 軸) が水平で真北に向いているならば話は簡単で

$(x_i = X_i, y_i = Y_i, z_i = Z_i)$  であるが、実際に海底地盤変動観測装置の設置を実施すると F 軸は真北に対して角度を持ち、かつ水平に対する傾斜も生じてしまうはずである。このことを考慮して、あらためて以下のように F 軸の方位角  $\beta$  と傾斜角  $\gamma$  を定義する。

$\beta$  : F 軸の方位 (測位点を中心として北から時計回りを正)

$\gamma$  : F 軸の傾斜 (測位点を中心として水平面から下方を正)

方位角  $\beta$  と傾斜角  $\gamma$  はいずれも設置作業の際に測定されて既知であるものとする。

以上のことから F 軸単位ベクトル  $\mathbf{E}_F$  (x 軸正方向向き) は以下のように与えることができる。

$$\mathbf{E}_F = (\cos \gamma \cos \beta \quad \cos \gamma \sin \beta \quad -\sin \gamma) \quad (4-1)$$

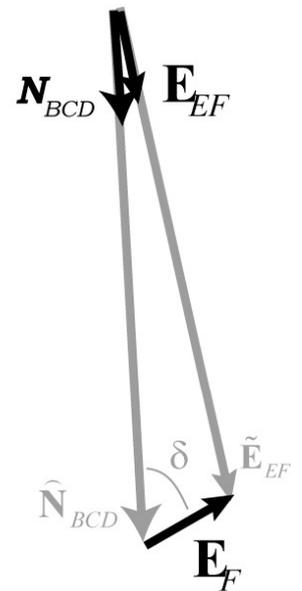
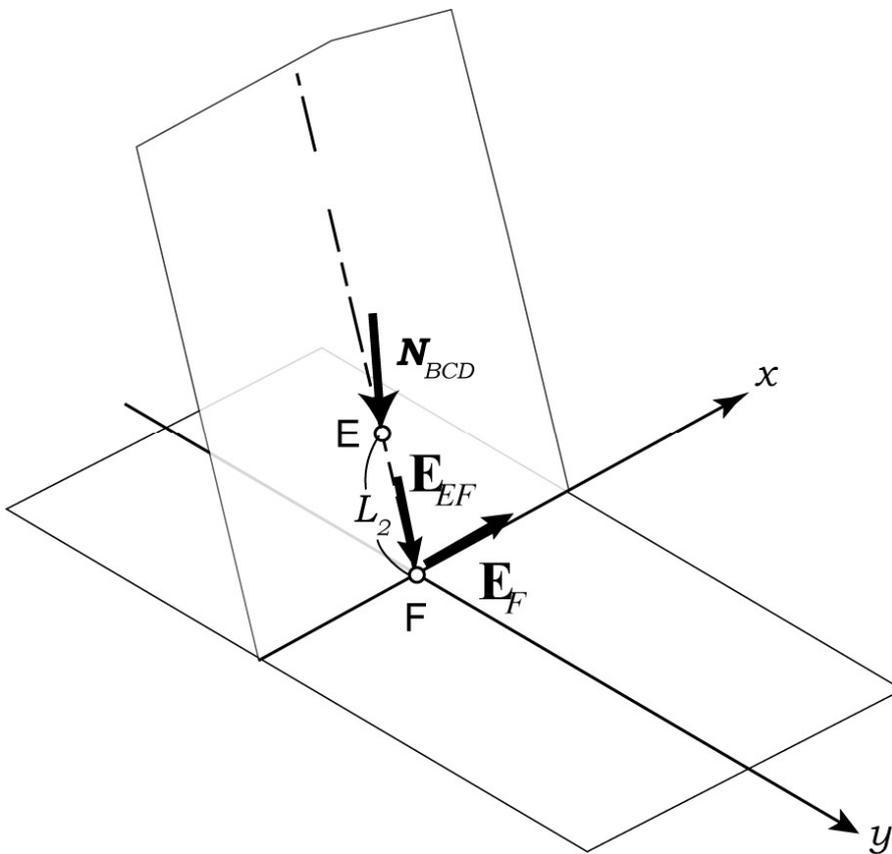


図 2-2-3-16 ベクトル EF の導出

$\mathbf{N}_{BCD}$  と  $\mathbf{E}_F$  のなす角を  $\delta$  とすると、

$$\cos \delta = \frac{\mathbf{E}_F \cdot \mathbf{N}_{BCD}}{|\mathbf{E}_F| |\mathbf{N}_{BCD}|} \quad (4-2)$$

$\mathbf{E}_F$  の  $\mathbf{N}_{BCD}$  方向成分  $\hat{\mathbf{N}}_{BCD}$  は、

$$\hat{\mathbf{N}}_{BCD} = \frac{\mathbf{N}_{BCD}}{|\cos \delta|} \quad (4-3)$$

で与えられる。(図 2-2-3-16)

したがって、EF 方向のベクトル  $\tilde{\mathbf{E}}_{EF}$  は、

$$\tilde{\mathbf{E}}_{EF} = \hat{\mathbf{N}}_{BCD} - \mathbf{E}_F \quad (4-4)$$

で与えられ、EF 方向の単位ベクトル  $\mathbf{E}_{EF}$  は、

$$\mathbf{E}_{EF} = \frac{\tilde{\mathbf{E}}_{EF}}{|\tilde{\mathbf{E}}_{EF}|} \quad (4-5)$$

である。

したがって、

$$\overrightarrow{EF} = L_2 \mathbf{E}_{EF} \quad (4-6)$$

である。

以上より EF 方向の単位ベクトル  $\mathbf{E}_{EF}$  を得たので、下式によって  $\mathbf{X}_F$  を求める。

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_F &= (X_F \quad Y_F \quad Z_F) \\ &= \mathbf{X}_E + \overrightarrow{EF} \\ &= \mathbf{X}_A + L_1 \mathbf{N}_{BCD} + L_2 \mathbf{E}_{EF} \quad (4-7) \end{aligned}$$

#### f. 観測結果

各アンテナの測位値とともに上述の傾斜補正を施した結果を下図 2-2-3-17 に示す。複数の GNSS アンテナ間の干渉は認められなかった。、実験中の無風時の平衡状態は、図 2-2-3-2 のようにアンテナ CD の D 側が水平に対して  $8^\circ$  下がりの状態であった。



図 2-2-3-17 測位結果および傾斜補正結果時系列（水色：XF, YF, ZF）例。基準点 SNYM（実験台から 3.4 km）

また観測期間中 1/7~1/11 の午前中までは風速が小さかったが、実験期間最終日（1月11日）午前以降は観測点 SZKM の観測結果（図 2-2-3-18）に示されるように、風が強くなった。これに伴い下図 2-2-3-19 のように実験台の顕著な運動が認められ、アンテナ A~D が数センチメートル以上の振幅で揺動していた。なお無風時平衡状態で、アンテナ A~D は D 側下がり 8 度を示していた。

### SZKM風向風速

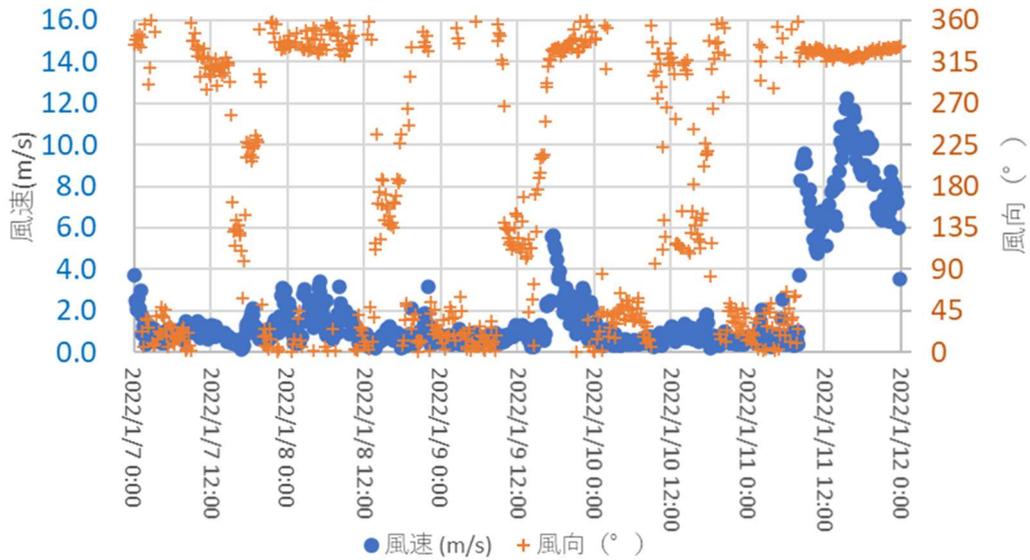


図 2-2-3-18 観測点 SZKM (新島; 黒神実験台から北北東約 3.5km の地点) における実験期間中の風向風速

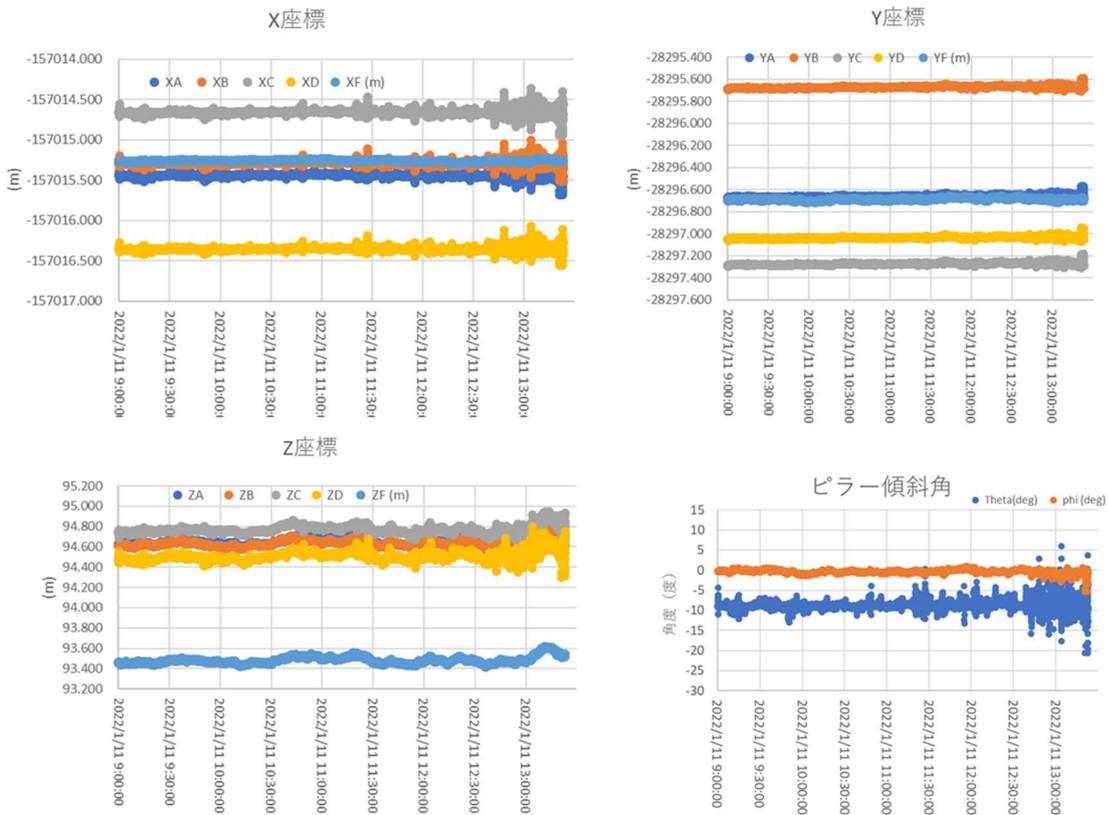


図 2-2-3-19 2022 年 1 月 11 日の測位結果及び傾斜補正結果 (水色: XF, YF, ZF)、傾斜角。基準点 SNYM(実験台から 3.4km)。

上図の期間のアンテナ A の測位値分布と導出された測位点 F の測位値分布を下図 2-2-3-20 で比較する。

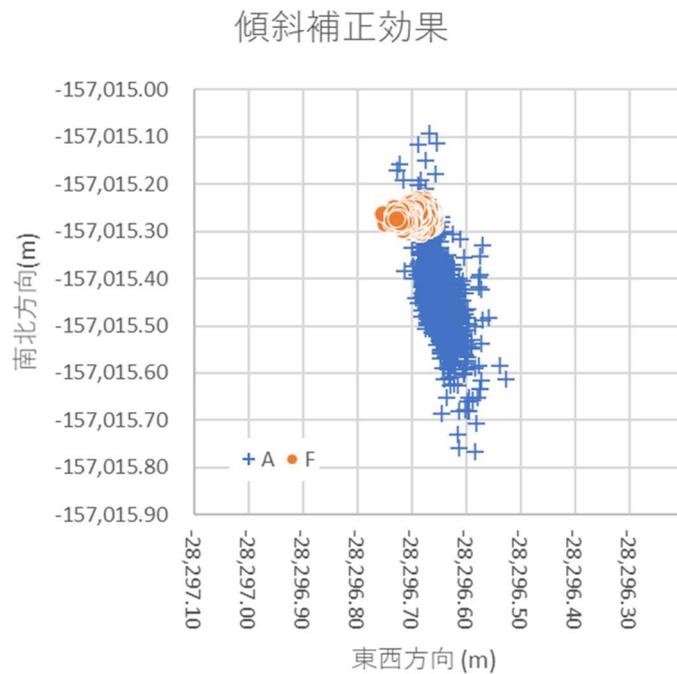


図 2-2-3-20 アンテナ A の測位結果分布と測位点 F の推定結果（図 2-2-3-18, 2-2-3-19 と同時時間帯）

上図で示すアンテナ A の運動方向は北北西－南南東方向が卓越しているが、1/11 は SZKM で北北西の風が強く吹いていたことが観測されていることから、当日の卓越風向の影響であると考えられる。アンテナ A の測位値の分布が最大南北方向 0.6 m、東西方向 0.3 m の範囲内にあるのに対して、傾斜補正後の F 点は  $(x, y) = (-157015.26, -28296.69)$  m を中心として ほぼ 0.1 m 以内に分布する。したがって傾斜補正アルゴリズムは機能していたことが示された。

傾斜補正前の A アンテナの測位結果分布を下図 2-2-3-21 に示す。

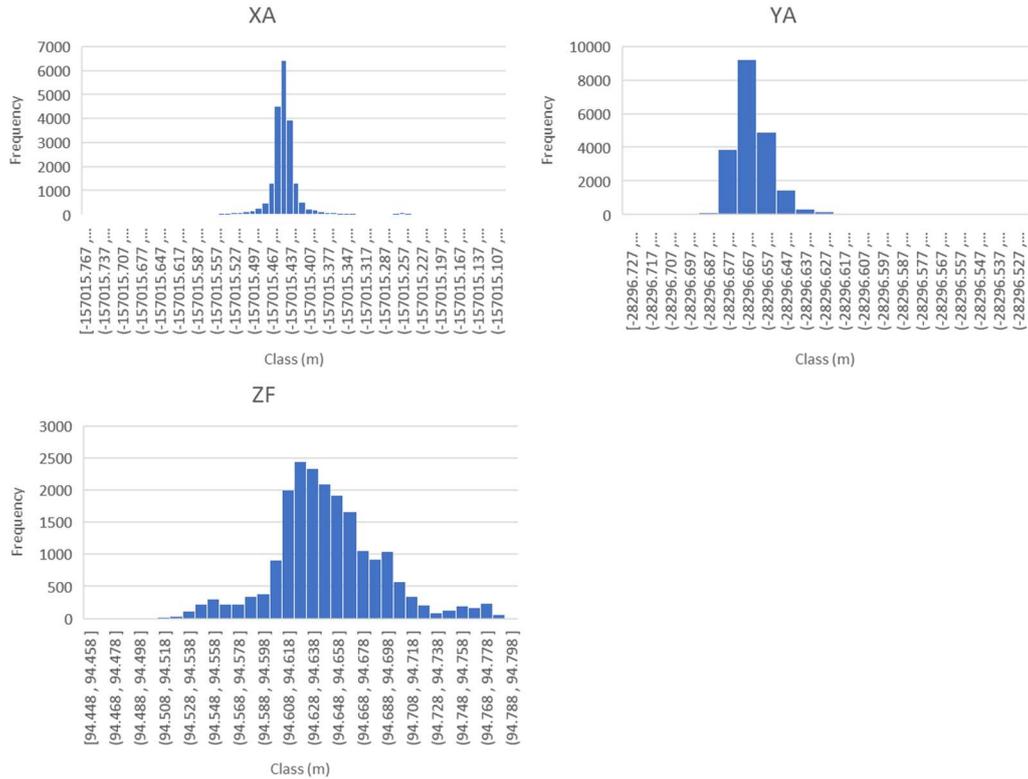


図 2-2-3-21 アンテナ A による各成分の測位結果分布

傾斜補正を施して導出された測位点 F の座標値の分布を下図 2-2-3-22 に示す。

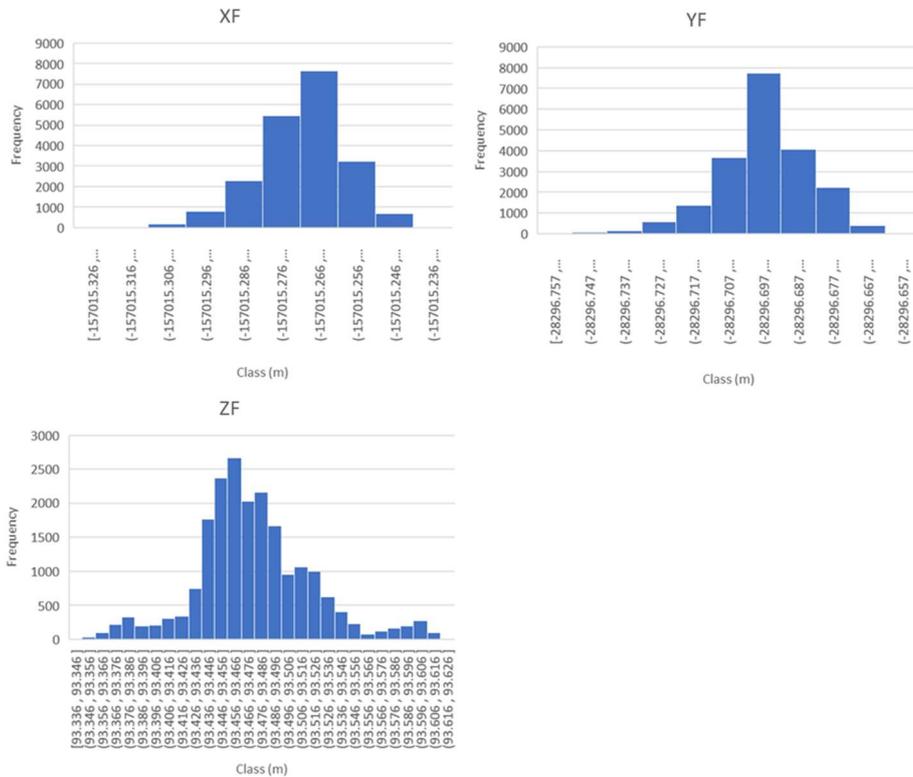


図 2-2-3-22 測位点 F の各座標値分布

図 2-2-3-22 に示されるように傾斜補正後の測位結果の分布はほぼ単峰的である。1 日分の平均を行った結果の収束は期待して良いと考える。

最後にアンテナアレイ A~D の測位結果を用いて算出した測位点 F の座標値と、直接測位による測位点 F の座標とを比較する。ここでは Kinematic 解析に用いる基準点として、距離の異なる 2 点 (SNYM; 3.4 km、KURG; 24 m) のそれぞれについて調べた。

直接測位データは GNSS-802 アンテナを F 軸からの垂直高さが既知のユニバーサルジョイント上の台座に取り付けて、2022/2/1 10:00-10:40 の間に測位データを取得した。これらのデータに対して RTKPOST の Static モードを用いて解析を行った。基準点は KURG (アンテナ: AX-1202) を用いた場合と SNYM (アンテナ: AT-502) を用いた場合と 2 通りの計算を行った。

表 2-2-3-3 に KURG を基準とした直接測位結果と、同じく KURG を基準として Kinematic 解析のうへ傾斜補正を行った結果との比較を示す。

表 2-2-3-3 アンテナアレイによる測位点 F 測位結果 (基準点 KURG 距離約 24m)

Period	XF(m)	YF(m)	ZF(m)	SXF(m)	SYF(m)	SZF(m)	Diff XF (m)	Diff YF(m)	Diff ZF(m)	Note
2022/01/07 1210-1/08 0859	-157015.2640	-28296.6910	93.4680	0.00838	0.00798	0.0144	-0.0087	0.0044	0.0078	
2022/01/08 0900-1/09 0859	-157015.2650	-28296.6910	93.4680	0.00796	0.00773	0.0139	-0.0097	0.0044	0.0078	
2022/01/09 0900-1/10 0859	-157015.2650	-28296.6910	93.4680	0.00794	0.00781	0.0140	-0.0097	0.0044	0.0078	
2022/01/10 0900-1/11 0859	-157015.2640	-28296.6910	93.4680	0.00798	0.00789	0.0144	-0.0087	0.0044	0.0078	
2022/01/11 0900-1/11 1459	-157015.2650	-28296.6910	93.4660	0.00694	0.00894	0.0126	-0.0097	0.0044	0.0058	Windy,
The reference value	-157015.2553	-28296.6954	93.4602							Direct survey, 2022/2/1 10:08-10:40 Static ref=KURG

表 2-2-3-3 は推定された測位点 F の座標を XF, YF, ZF で表している。Period 欄に日本標準時の時間帯が記述されている行はアンテナアレイによる測位結果を表し、The reference は直接測位の結果を表している。Diff XF~Diff ZF はアンテナアレイによる推定座標値のそれぞれから直接測定値を引いた残差を表している。SXF~SZF はアンテナアレイによる座標推定値の標準偏差を示している。KURG を基準点として Kinematic 解析を行った場合は、Diff XF~Diff ZF が全ての場合において直接測定値との差が 1 cm 以内であることを示している。風が強くなった時間帯を含む測定 (1/11 09:00-14:59) においても顕著な残差の増大は認められない。

次に表 2-2-3-4 に距離 3.4km の地点にある SNYM を基準とした直接測位結果と、SNYM を基準として Kinematic 解析のうへ傾斜補正を行った結果とについて比較する。表 2-2-3-4 の構成は表 2-2-3-3 と同じである。

表 2-2-3-4 アンテナアレイによる測位点 F 測位結果 (基準点 SNYM 距離約 3.4 km)

	XF (m)	YF (m)	ZF (m)	SXF (m)	SYF (m)	SZF (m)	Diff XF (m)	Diff YF (m)	Diff ZF (m)	Note
2022/01/07 1210-01/08 0859	-157015.2610	-28296.6890	93.4680	0.01113	0.00956	0.03885	-0.0119	0.0037	0.0191	
2022/01/08 0900-01/09 0859	-157015.2620	-28296.6890	93.4650	0.00833	0.00848	0.02717	-0.0129	0.0037	0.0161	
2022/01/09 0900-01/10 0859	-157015.2620	-28296.6900	93.4690	0.01184	0.00928	0.04116	-0.0129	0.0027	0.0201	
2022/01/10 0900-01/11 0859	-157015.2610	-28296.6900	93.4640	0.01007	0.00877	0.03751	-0.0119	0.0027	0.0151	
2022/01/11 0900-01/11 1459	-157015.2650	-28296.6910	93.4750	0.01213	0.01382	0.04522	-0.0159	0.0017	0.0261	Windy
The reference	-157015.2491	-28296.6927	93.4489							Direct survey, 2022/2/1 10:08-10:40 Static Ref=SNYM

表 2-2-3-4 では Diff XF~Diff ZF の差が KURG を基準にした解析より大きい値を示す。X 方向では最大 1.6 cm の差、Y 方向では 0.27 cm、Z 方向では 2.6 cm の差があった。さらに、SNYM 基準の XF~ZF の推定結果の標準偏差 (SXF~SZF) は KURG 基準のそれよりも 5 割大きい。基準点として用いた観測点 SNYM は観測点 KURG に比べて実験台までの距離が相対的に大きいことを考慮すると、基準点までの距離の増大に応じて測位推定値のバラツキが大きくなる傾向が示されていると考える。

以上のことから海底地盤変動観測装置における 4 アンテナ測位は実用に耐えると判断された。

#### (2) 2.4. まとめ

令和 3 年度は 1) 海底地盤変動観測装置の改良設計, 2) 海底地盤変動観測装置設置予定地点とその周辺における海況および気象調査, 3) 海底地盤変動観測装置測位方式の検討 に取り組んだ。

1) では海底地盤変動装置の傾斜検出方式を見直すとともに、計測内容の見直し、設計水深の見直しを行い、令和 2 年度設計より軽量かつ高精度な改良設計を行い、次年度以降の建造に供することができる仕様と参考図を得た。

2) では海底地盤変動装置設置予定地点における海況調査と採泥調査を行うとともに、近傍の新島陸上における気象観測を実施した。海況調査を夏季と冬季の 2 回にわたり実施し、当該地点の潮流は東西方向が卓越すること、潮流の最大の強さは夏季の底層で最大 0.8 ノットに達するが、表層から 10 m までは 0.2 ノット程度にとどまること、周辺では夏季に水平及び垂直方向でともに複雑な流れの場ができることが明らかになった。また、採泥調査では当該地点の底質が砂から砂質土の範囲にあることが明らかにされた。気象観測では、台風の接近に伴う気象現象、寒冷前線の通過に伴う気象現象、季節の進行に伴う気象変化が観測された。これらの調査結果のいずれも海底地盤変動観測装置の当初の設計条件を著しく逸脱するものは観測されなかった。

3) では海底地盤変動観測装置の測位精度の確認のために、以下の解析および測位実験を行った。1) Kinematic 解析の長期安定性の検証、2) 1 軸実験台における測位実験、3) 2 軸実験台における測位実験。

1) では既存の京都大学防災研究所火山活動研究センター連続観測点 SNYM の約 1 年分 (2020/6/17~2021/6/23 372 日分) のデータを対象とし、SNYM から 1.5 km の距離を隔てた常設点の KMNG を参照点として用いて PPK 解析を行った結果を評価した。解析結果の測位値は単峰分布を示し、1 年間を通したトレンドは見られなかったことから、Kinematic 解析は長期にわたる観測結果を用いても安定した解が得られることが示された。

2) では 1 軸を中心に振動する実験台を用い最大 2 m/s に達するアンテナの運動下での測位結果の分布を調べ、Kinematic 測位の安定性を調べた。運動するアンテナで求めた測位結果に副アンテナを用いたエポック毎の傾斜補正を施して測位点座標を求めた。傾斜補正後の測位点座標ではアンテナ運動速度が 2 m/s に達しても顕著な分散の拡大が見られないことが明らかになった。このことは運動するアンテナに対して、副アンテナを用いたエポック毎の傾斜補正が有効であることと、想定される運動速度に対して Kinematic 解析が安定した結果を与えることを示すものである。

3) では直交する2軸のそれぞれを中心に回転する実験台を用いて、アンテナアレイによる全方向の傾斜に対する補正アルゴリズムの確認を行った。、実験の結果、アンテナアレイによる傾斜補正の結果として得られた測位点座標値はいずれの成分も1cm以下の標準偏差の単峰分布を示し、アンテナアレイによる傾斜補正アルゴリズムが有効であることが示された。

以上のことから海底地盤変動観測装置の設計はほぼ確立し、今後大きな設計変更の必要はないと考えられる。

#### 参考文献

- Goodman, L., and Kemp, K. A., 1981, Scattering from Volume Variability, Journal of Geophysical Research, Vol. 86, No. C5, 4083-4088.
- Joyce, T. M., Bitterman, Jr. D. S., and Prada, K. E., (1982) Shipboard acoustic profiling of upper ocean currents, Deep-Sea Research, Vol. 29, No. 7A, 903-913, 1982
- 京都大学防災研究所 (2021) 令和2年度原子力規制庁委託研究成果報告書 原子力施設等防災対策等委託費 (火山性地殻変動と地下構造及びマグマ活動に関する研究) 事業、京都大学防災研究所、令和3年3月。
- 光田 寧・水間満郎(1964)超音波風速計とその試作、天気, Vol. 11, No. 2, 33-40.
- 原子力規制庁 (2019) 平成30年度原子力規制庁請負成果報告書 海底地殻変動観測に係る施設  
の設計・施工検討業務, 677pp.
- 海上保安庁(2020) 海底地形資料
- 気象庁(2021) 気象庁WEB ページ「過去の気象データ検索」,  
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, 2022/2/7 確認.
- Novatel (2021) OEM7 Receiver system,  
[https://docs.novatel.com/OEM7/Content/Core\\_Installation/OEM7\\_Receiver\\_System\\_Overview.htm](https://docs.novatel.com/OEM7/Content/Core_Installation/OEM7_Receiver_System_Overview.htm), 2022/2/7 確認
- Takasu, T. (2013) RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning,  
<http://www.rtklib.com/>
- Teledyne RD Instruments (2011) Acoustic Doppler Current Profiler Principles of Operation A Practical Primer, Teledyne Instruments, Inc. P/N 951-6069-00(January 2011), 56pp.
- 岡本 修, (2020) 新世代の低価格受信機が持つ抜群の精度 2周波 RTK レシーバ F9P の測位性能, センチメートル GPS 測位 F9P RTK キット・マニュアル、CQ 出版株式会社, 31 - 41.
- 渡邊俊一・横田裕輔・石川直史 (2020) キネマティック精密単独測位を用いた GNSS-A 海底測位の精度検証、測地学会誌、第66巻, 1-7.
- Yamamoto, K., Sonoda, T., Takayama, T., Ichikawa, N., Ohkura, T., Yoshikawa, S., Inoue, H., Matsushima, T., Uchida, K., Nakamoto, M. (2013) Vertical ground deformation associated with the volcanic activity of Sakurajima volcano, Japan

during 1996 - 2010 as revealed by repeated precise leveling surveys, Bull. Volcanol. Soc. Japan, 58, 137-151.

Yigit, C. O., El-Mowafy, A., Bezcioglu, M., and Dindar, A. A. (2020), Investigating the effects of ultra-rapid, rapid vs. final precise orbit and clock products on high-rate GNSS-PPP for capturing dynamic displacements, Structural Engineering and Mechanics, Vol. 73, NO. 4, 427-436, DOI: <https://doi.org/10.12989/sem.2020.73.4.427>.

Yigit C. O. 2016, Experimental assessment of post-processed kinematic Precise Point Positioning method for structural health monitoring, Geomatics, Natural Hazards and Risk, Vol. 7, No. 1, 360-383, <http://dx.doi.org/10.1080/19475705.2014.917724>.

### (3) 活動的カルデラのシミュレーションモデルによる火山性地殻変動の検討

#### (3) 1. 実施内容

本研究では、地震波速度構造に示唆されるような地殻内粘性率の空間依存性を、ガウス関数にしたがった低粘性領域(Low Viscosity Zone: LVZ)として、3次元線形マックスウェル粘弾性モデルに導入し、マグマ活動(噴火にともなうマグマ排出とその後のマグマ再供給)に対する粘弾性地表面変位の挙動を解析した。その結果、与えられたLVZ構造に対して、マグマ排出に対する粘弾性応答は、マグマ再供給に対する粘弾性応答に比べて、より低い有効粘性率に支配されることがわかった。このようなLVZモデルの振る舞いは、始良カルデラ下にLVZ構造が存在している場合、これまでの一様粘性モデルでは説明できなかった同地域の測地観測をより良く説明できることを示唆しているが、本研究では、実際にLVZモデルを測地観測に適用することにより、このことを確認することができた。始良カルデラの測地観測を説明するLVZモデルの有効粘性率は、1914年の大正噴火に対しては $\sim 5 \times 10^{18}$  Pa s、その後のマグマ再供給に対しては $\sim 4 \times 10^{19}$  Pa sとなる。噴火後 $\sim 40$ 年ほどのマグマ再供給に対しては弾性応答に相当すると考えられるが、それ以上の期間におけるマグマ供給に対しては、粘弾性応答を無視できない。GNSS観測が導入されて以降のマグマ活動に対する応答はほぼ弾性であると考えてよいが、それ以前のマグマ供給に対する粘弾性応答の評価なしに、弾性モデルを適用した場合、マグマ供給率の過小評価を招くことになる。しかし、始良カルデラにおけるその過小評価量は、1914年以降における平均年率にして概ね $10^6$  m<sup>3</sup>/yr程度で、従来の見積もりの $\sim 10$ - $17\%$ でしかない。

#### (3) 2. 研究成果

##### (3) 2.1. はじめに

火山性地殻変動は、変動源としてのマグマ活動と地殻岩石のレオロジーとの相互作用の産物であり、後者が前者に対する応答を規定する。火山下の地殻岩石のレオロジーは、マグマの粘性率がバックグラウンドの地殻岩石の粘性率よりもはるかに低いことと、マグマの温度が非常に高いために周辺岩石の熱活性化クリープが促進されることに影響を受けると考えられる(e.g., Newman et al., 2001)。実際、地球物理学的研究により火山下で得られてきた地殻構造は、マグマの存在とその影響という観点から説明されてきた(e.g., Honda et al., 2011; Lü et al., 2013; Farrell et al., 2014; Huang et al., 2015; Eilon and Abers, 2017; Debayle et al., 2020)。また、地球物理学的に描画された地殻構造が、地殻のレオロジー構造を直接的にあらわしているであろうことは、理論的・実験的研究によって支持されてきた(e.g., Werthmüller et al., 2013; Shinevar et al., 2018; Chantel et al., 2016; Taylor and Singh, 2002)。空間的に一様な粘性率といった単純なレオロジー構造を仮定したモデルと比較して、地球物理学的イメージと整合的なレオロジー構造を持つモデルが、測地データとのフィッティングを向上させるかどうかは、大変興味深い問題である。

Yamasaki et al. (2020)は、変動源の膨張率が1914年噴火の前後で一定とした粘弾性モデルを用いて、南九州の始良カルデラ周辺の測地データを解析した。しかし、変動源の膨張率一定モ

デルでは、1996–1997年の地表面沈降とその後の地表面回復（特にその水平変位成分）を説明することができない。そこで、Yamasaki et al. (2022)は、変動源の膨張率の時間変化を導入することで粘弾性モデルを改良し、測地データをよりよく説明するようにした。しかし、空間的に一様な地殻粘性率の値を一意的に制約することはできず、1914年噴火後の変動が進むにしたがって有効粘性率が増加する必要があることが示された；1914年噴火後の最も早い時期には $\sim 5 \times 10^{18}$  Pa sの粘性率が必要であるが、その後の地盤沈下を示す時期には $\sim 5 \times 10^{19}$  Pa s またはそれ以上の粘性率が必要である。このように、始良カルデラの噴火後の地表回復は、単一粘性率のMaxwell粘弾性モデルでうまく説明できないことが明らかにされている。

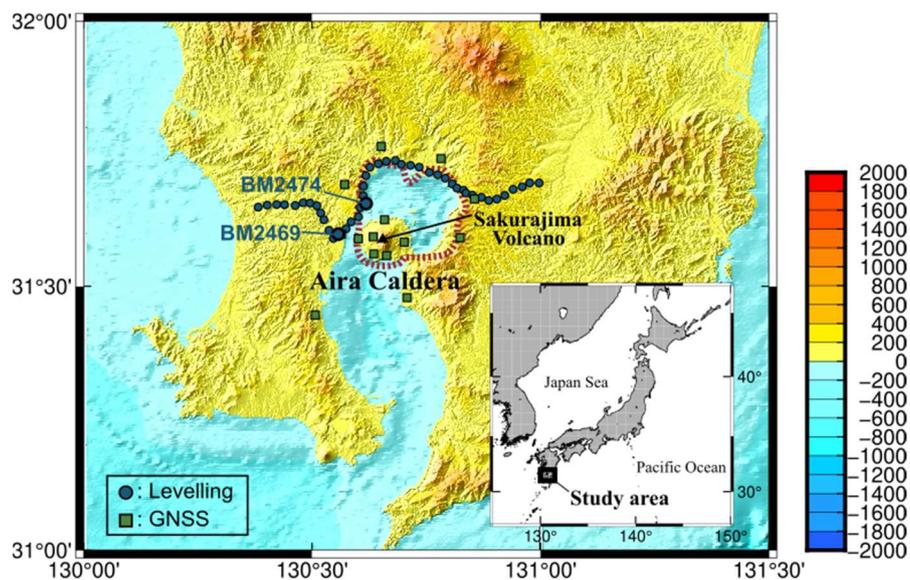


図 3-1. 調査地域の位置図。(三角)：桜島火山、(赤点線)：始良カルデラの縁 (Uto et al., 1997)、(青丸)：水準点、(緑四角)：GNSS 点。

このような有効粘性率増加の必要性は、地震発生時の断層運動に対する粘弾性応答で明らかにされている。標準線形固体モデル (e.g., Hetland and Hager, 2005; Ryder et al., 2007)、二粘性 Burgers モデル (e.g., Pollitz, 2003, 2005; Hetland and Hager 2005, 2006; Hearn et al. 2009)、三粘性粘弾性モデル (e.g., Hetland and Hager, 2005)、冪乗則レオロジーモデル (e.g., Freed and Bürgmann, 2004)等の遷移レオロジーモデルなどが、解釈の候補として提案されている。また、ニュートン粘性率の空間変化も、代替案として提案されてきた (e.g., Yamasaki and Houseman, 2012ab; Hetland and Zhang, 2014; Yamasaki et al, 2014)。火山性地殻変動に関する先行研究では、冪乗則レオロジーが採用されている (e.g., Chery et al., 1991; Fialko and Pearse, 2012)が、観測データがそのようなレオロジーモデルを要請するかどうかについては詳しく検討されていない。したがって、マグマが存在する領域は粘性が最も低く、マグマから離れるにしたがい粘性が高くなるという (e.g., Del Negro et al., 2009;

Gregg et al., 2013; Hickey et al., 2016)、ニュートン粘性率の空間変化モデルも、火山性地殻変動に適用が可能であると考えられる。

Tameguri et al. (2022)が得た始良カルデラ下の高分解能地震波速度構造においては、深さ約15kmに低速度領域があり、 $V_p/V_s$ 比は最大で $\sim 4$ に相当するが、S波速度は $\sim 1$  km/sにまで減じられている。このような超低S波速度領域は、Taylor and Singh (2002)の有効媒体理論に基づく部分熔融領域と相関があると説明しており (Tameguri et al., 2022)、そこにおける地震波速度は部分熔融領域のメルト分率だけでなくメルトポケットの形状や方向にも支配されている。また、低速度領域はメルトを起源とするため (e.g., Newman et al., 2001)、その中心からの距離に応じてメルト分率が変化することに支配された低粘性領域(LVZ、Low Viscosity Zone)に相当する可能性もある。変動源下のこのような地殻粘性率の空間不均質性が、見かけ上の有効粘性率の上昇を要請する地表面変位の時間変化に、重要な役割を果たしているかもしれない。

本研究では、3次元有限要素モデルを用いて、マグマティックな変動源に対する線形Maxwell粘弾性応答に与える、粘性率の空間不均質性の影響を検討した。Tameguri et al. (2022)の地震波速度構造が始良カルデラ下の地殻粘性構造を反映していると仮定し、粘弾性地殻に低粘性領域を導入し、1914年の大正噴火のような規模の大きな噴火と、その後の連続したマグマ再供給による地表面変位を制御する有効地殻粘性が、噴火後変動の異なる段階においてどう異なるのかを評価することを目的としている。そのために、まず一般的なモデルの挙動を説明し、マグマ供給による連続的な変動源の膨張と、マグマ排出による瞬間的な変動源の収縮のそれぞれに対する地表面変位が、粘性率の空間不均質性にどのような影響を受けるのかを記述する。また、始良カルデラ周辺の測地データにLVZモデルを適用し、1914年噴火後の初期および地表面沈降が見られる時期の測地データを、ニュートン粘性率の単純な空間不均質性で説明できるか否かを調べる。

### (3) 2.2. モデル説明

上部地殻内のマグマ活動に対する線形マックスウェル粘弾性応答を、並列化された3次元有限要素コード (oregano\_ve, e.g., Yamasaki and Houseman, 2012a; Yamasaki et al, 2022)を用いて計算する。数値計算の基本的なモデル設定はYamasaki et al. (2020, 2022)と同じである。モデルは力学的2層構造をもち、上部の弾性層と下部の粘弾性層により構成される (図3-2)。本研究では、粘弾性層に粘性率の空間不均質性を導入するが、これはTameguri et al. (2022)による地震波速度構造をもとにしたものである。

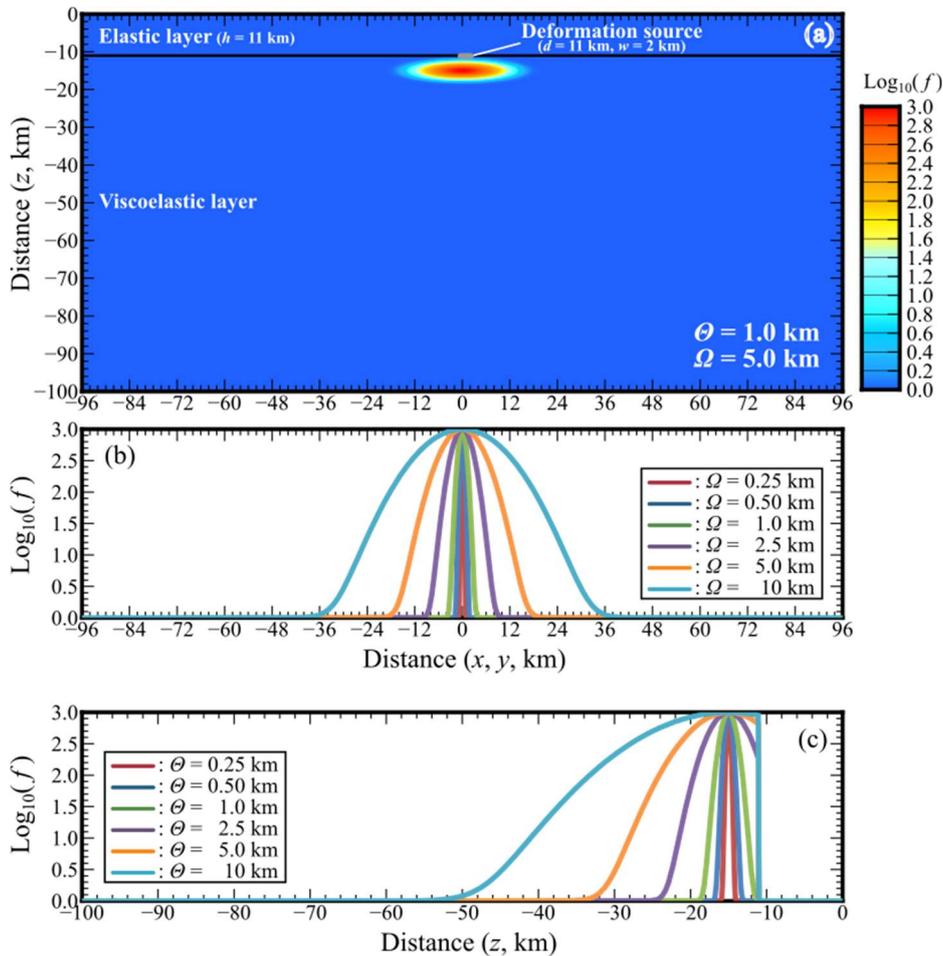


図 3-2. (a) 弱化係数  $f$  の空間分布。  $\Theta = 1 \text{ km}$ 、  $\Omega = 5 \text{ km}$  の場合。(b) 弱化係数  $f$  の水平変化：(赤)  $\Omega = 0.25 \text{ km}$ 、(青)  $\Omega = 0.50 \text{ km}$ 、(緑)  $\Omega = 1.0 \text{ km}$ 、(紫)  $\Omega = 2.5 \text{ km}$ 、(橙)  $\Omega = 5.0 \text{ km}$ 、(水色)  $\Omega = 10 \text{ km}$ 。(c) 弱化係数  $f$  の鉛直変化：(赤)  $\Theta = 0.25 \text{ km}$ 、(青)  $\Theta = 0.5 \text{ km}$ 、(緑)  $\Theta = 1 \text{ km}$ 、(紫)  $\Theta = 2.5 \text{ km}$ 、(橙)  $\Theta = 5.0 \text{ km}$ 、(水色)  $\Theta = 10 \text{ km}$ 。

弾性層の厚さは  $h = 11 \text{ km}$  であり (Yamasaki et al., 2020, 2022)、始良カルデラ下の地震活動の cut-off 深度と調和的である (Hidayati et al., 2007)。変動源は、赤道半径  $w = 2 \text{ km}$  の回転楕円体とし、その赤道面の深度を  $d = 11 \text{ km}$  とするが、これにより観測された地表面変位場を十分説明できることが確認されている (Yamasaki et al., 2020, 2022)。また、回転楕円体変動源の中心の厚さは  $s_c$  とする。マグマ定置と蓄積を制御する機構はまだ良く理解されていない。しかし、これまでの理論的研究により (Parsons et al., 1992; Rubin, 1995; Watanabe et al., 1999)、上昇したマグマが脆性-塑性遷移帯で水平方向に広がりやすくなると考えられており、その遷移帯の深度は、有効弾性層厚 (EET) の下限にほぼ相当するので (e.g., Watts, 2001; Pollitz and Sacks, 2002; Watts and Burov, 2003; Yamasaki et al., 2008)、 $d = h$  と仮定することは、全く物理的背景をもたないわけではない。

弾性層の下の粘弾性層における粘性率  $\eta$  を次式で定義する：

$$\eta = \frac{\eta_0}{f} \quad (1)$$

ここで、 $\eta_0$ は空間的に一様なバックグラウンド粘性率、 $f$ は空間的に可変な弱化係数である(図3-2)。本研究では、地震後～地震間変動から推定された地殻粘性率の上限とされている  $10^{20}$  Pa s (e.g., Bürgmann and Dresen, 2008)を  $\eta_0$ に適用する。一様粘性(Uniform Viscosity: UNV)モデルは  $f = 1$ を適用して得られる；すなわち、UNVモデルは  $\eta = 10^{20}$  Pa sの空間的に一様な粘性率を持つ。いっぽう、 $(x, y, z) = (0, 0, z_c)$ を中心とする低粘性領域(LVZ)は、ガウス関数で  $f$ を空間的に変化させて導入する：

$$f = 1 + (f_0 - 1) \exp \left[ - \left\{ \frac{x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{(z-z_c)^2}{2\sigma_z^2} \right\} \right] \quad (2)$$

ここで、 $f_0$ は最大弱化係数、ガウスパラメータ  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$ はそれぞれ、 $f$ が  $f_0/2$ より大きい領域の鉛直厚さ  $\Theta$  と水平幅  $\Omega$  を規定するものである。

$$\Omega = \sqrt{2}\sigma_{x,y} \sqrt{\ln \left\{ \frac{2(f_0-1)}{f_0-2} \right\}} \quad (3)$$

$$\Theta = \sqrt{2}\sigma_z \sqrt{\ln \left\{ \frac{2(f_0-1)}{f_0-2} \right\}} \quad (4)$$

本研究では、 $\Theta$  と  $\Omega$  は 0.1 km から 10 km 範囲の値を考える。 $f_0$ の値を定量的に決定することは現実的には困難である。しかし、過去の研究において、いくつかの手がかりがある。Newman et al. (2001)は、 $670^\circ$  C 付近の結晶性の高い流紋岩メルトの粘性は  $\sim 10^{15} - 10^{17}$  Pa s、 $500 \sim 600^\circ$  C の石英含有結晶質岩は  $\sim 10^{17} - 10^{19}$  Pa s であるとまとめている。本研究では、LVZの中心の粘性率が  $10^{17}$  Pa s になる  $f_0 = 1000$  と仮定して検証をおこなう。

モデルの一般的挙動の記述には、回転楕円体変動源の2つの単純な膨張・収縮パターンを考える：(M1)一定速度で膨張、(M2)噴火によるマグマの排出に相当する瞬間的な収縮。後者は1914年の噴火に対する粘弾性応答、前者はその噴火後のマグマ再供給に対する応答を想定している。一方、始良カルデラへのLVZモデルの適用においては、Yamasaki et al. (2022)の方法に従って、1914年噴火後の6つの異なる時期のそれぞれにおける変動源の膨張率( $\Omega$ )を一定と仮定して、 $\Omega$ の値を測地データから制約する。

### (3) 2.3. モデルの振る舞い

a) 弾性モデルとの違い

図 3-3 は、M1 の変動源モード ( $s_c$  の連続増加) に対する LVZ モデルの垂直地表面変位 ( $u_z$ ) を、変位場の中心からの距離  $R = 0, 6.74, 13.92$  km (後の 2 つの距離は、BM2474 と 2469 の二つの水準ベンチマークにそれぞれ対応する) ごとに示している。 $\Theta = 1$  km と 10 km の 2 つの値、 $\Omega = 0.25 \sim 10$  km の 6 つの値を採用した。弾性変位 ( $u_{ze}$ ) からのずれ  $\zeta = u_z - u_{ze}$  をプロットしている。 $s_c$  は時間に対して直線的に増加し、 $t = \tau_0$  において 100 cm となる；ここで、 $\tau_0$  は  $\eta = \eta_0$  ( $10^{20}$  Pa s) の時のマックスウェル緩和時間で、 $\tau_0 = \eta_0 / \mu$  で定義される；ここで  $\mu$  は剛性率で、本研究では  $\mu = 3 \times 10^{10}$  Pa とする。

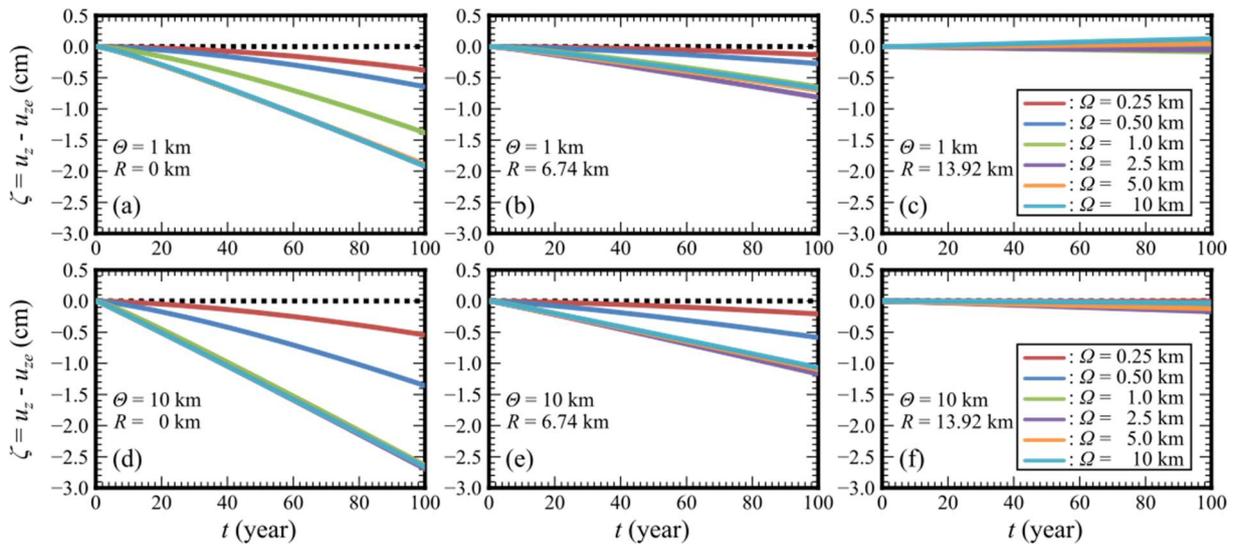


図 3-3. 変動源モード M1 に対する粘弾性挙動 (鉛直変位  $u_z$ ) : 弾性モデル挙動  $u_{ze}$  からの違い、i. e.,  $\zeta = u_z - u_{ze}$  を図示。(a-c)  $\Theta = 1$  km、(d-f)  $\Theta = 10$  km。  $R =$  (a, d) 0 km、(b, e) 6.74 km、(c, f) 13.92 km。(赤)  $\Omega = 0.25$  km、(青)  $\Omega = 0.5$  km、(緑)  $\Omega = 1$  km、(紫)  $\Omega = 2.5$  km、(橙)  $\Omega = 5.0$  km、(水色)  $\Omega = 10$  km。

$\zeta$  は負の値を持ち、時間とともに減少する (負の値が大きくなる)。これは、変動源の一定の膨張率に対する粘弾性応答が、その膨張による地表面の隆起を和らげるためである (e. g., Yamasaki et al., 2018)。 $|\zeta|$  は  $R$  が大きいほど小さく、 $\Theta$  あるいは  $\Omega$  が大きいほど大きい。しかし、 $\Omega = 5$  km と 10 km のモデルは他とはわずかに異なる挙動を示し、 $|\zeta|$  は  $\Omega = 2.5$  km の場合と同等あるいはより小さく、 $\Theta = 1$  km では、遠距離変位がわずかに隆起していることがわかる。

図 3-4 は、M2 の変動源モード ( $s_c$  の瞬間的減少 ;  $t = 0$  で  $s_c$  が瞬間的に -100 cm 減少する) に対する LVZ モデルの鉛直方向の地表面変位 ( $\zeta$ ) を示している。採用した  $\Theta$  と  $\Omega$  の値、およびモデルの予測値を記述した地表面上の地点は図 3-3 と同じである。変動源の収縮に対する粘弾性応答の方向は、変動源の膨張に対する応答の方向と反対である。 $\zeta$  は、 $\Theta$  と  $\Omega$  が大きいほど大き

く、 $R$  が大きいほど小さい。しかし、図 3-3 に見られるように、 $\Omega = 5 \text{ km}$  と  $10 \text{ km}$  のモデルはこの一般的な挙動から逸脱し、 $\zeta$  は  $\Omega = 2.5 \text{ km}$  と同等かそれよりも小さくなっている。また、変動源からの距離  $R$  が大きくなると  $\zeta$  が小さくなることも M1 モードに対する応答と同じである。

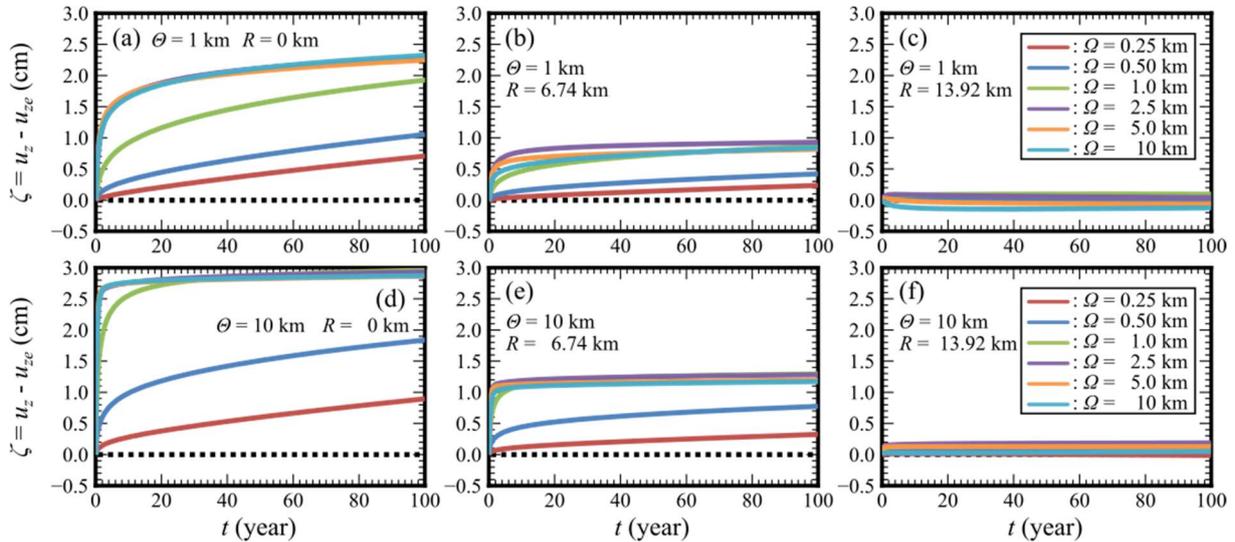


図 3-4. 変動源モード M2 に対する粘弾性挙動（鉛直変位  $u_z$ ）：弾性モデル挙動  $u_{ze}$  からの違い、i. e.,  $\zeta = u_z - u_{ze}$  を図示。(a-c)  $\Theta = 1 \text{ km}$ 、(d-f)  $\Theta = 10 \text{ km}$ 。  $R =$  (a, d)  $0 \text{ km}$ 、(b, e)  $6.74 \text{ km}$ 、(c, f)  $13.92 \text{ km}$ 。(赤)  $\Omega = 0.25 \text{ km}$ 、(青)  $\Omega = 0.5 \text{ km}$ 、(緑)  $\Omega = 1 \text{ km}$ 、(紫)  $\Omega = 2.5 \text{ km}$ 、(橙)  $\Omega = 5.0 \text{ km}$ 、(水色)  $\Omega = 10 \text{ km}$ 。

#### b) 有効弱化係数 $f_e$

ここでは、UNV モデルに見かけ上の一様粘性率  $\eta_a$  を適用することで、LVZ モデルと UNV モデルの  $\zeta$  の差を最小にすることを考える。図 3-5 は、 $\Theta = 1 \text{ km}$ 、 $\Omega = 5 \text{ km}$  の LVZ モデルの挙動 ( $\zeta$ ) を、 $\eta = \eta_0$  と  $\eta_a$  の場合の UNV モデルの挙動 ( $\zeta$ ) と比較して示したもので、 $\eta_a$  は  $t = 0$  から  $\Delta t$  の時間間隔で LVZ モデルの  $\zeta$  と UNV モデルの  $\zeta$  との差が最小になるように決定している。ここで、 $\eta = \eta_0$ 、 $\eta_a$  の UNV モデルの  $\zeta$  は、それぞれ  $\zeta_0$ 、 $\zeta_a$  と定義する。

M1 モードに対する粘弾性応答では、 $s_c$  が期間  $\tau_0$  で  $100 \text{ cm}$  の割合で直線的に増加する場合、 $\zeta_a$  は  $t \leq \Delta t$  で  $\zeta$  をよく再現している（ただし、 $t > \Delta t$  では  $\zeta_a$  は時間とともに  $\zeta$  から大きく乖離していく； $\Delta t = 0.1 \tau_0$  と  $0.5 \tau_0$  の場合も参照）。また、 $\zeta$  と  $\zeta_0$  の差を最小にするためには、 $\Delta t$  が小さいほど  $\eta_a$  を小さくする必要がある。 $t = 0$  で  $s_c$  が瞬間的に  $100 \text{ cm}$  低下する M2 モードに対する粘弾性応答についても、 $\eta_a$  を調整することで偏差を最小にしているが、時間間隔  $\Delta t$  の前半と後半のそれぞれで、 $\zeta$  が  $\zeta_a$  より小さく、そして大きくなるという、 $\zeta$  からの著しい偏差が依然として残っている。M1 でも同様のことが見られるが、このモードでは偏差

がかなり小さくなっている。また、M1、M2ともにRが大きくなるにつれて、残った偏差は小さくなっている。

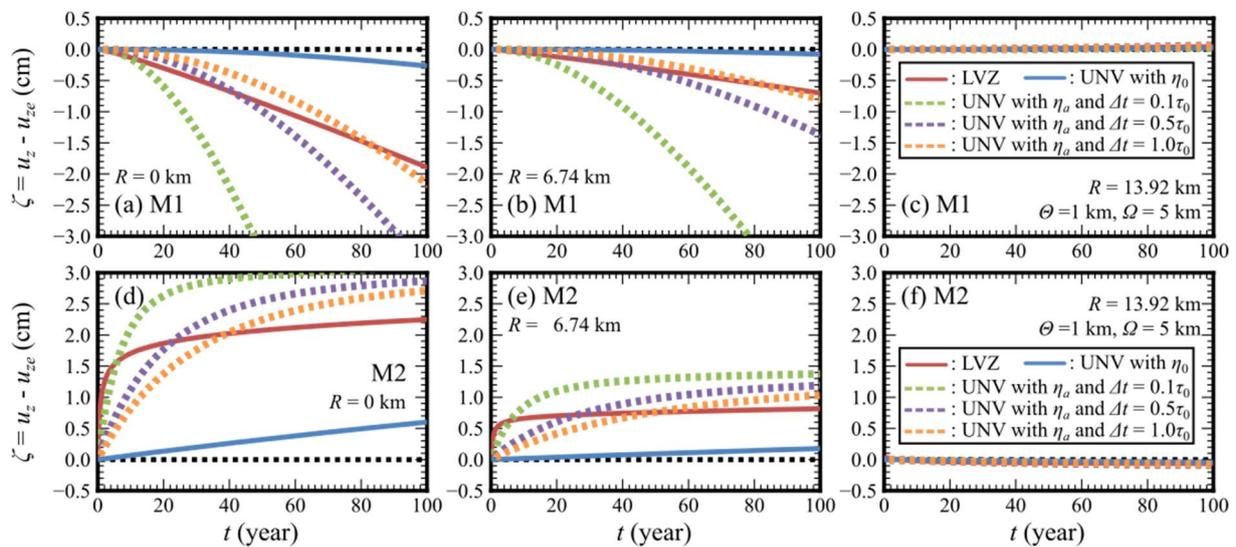


図 3-5. LVZ モデルと UNV モデルの振る舞い。(a, b, c) 変動源モード M1 に対する粘弾性挙動 (鉛直変位  $u_z$ ) : 弾性モデル挙動  $u_{ze}$  からの違い、i. e.,  $\zeta = u_z - u_{ze}$  を図示。(d, e, f) 変動源モード M2 に対する粘弾性挙動 (鉛直変位  $u_z$ ) : 弾性モデル挙動  $u_{ze}$  からの違い、i. e.,  $\zeta = u_z - u_{ze}$  を図示。(赤実線)  $\Theta = 1 \text{ km}$ ,  $\Omega = 5 \text{ km}$  の LVZ モデル、(青実線)  $\eta = \eta_0 = 10^{20} \text{ Pa s}$  の UNV モデル、(点線)  $\eta = \eta_a$  の UNV モデル、ここで  $\eta_a$  は LVZ モデルの振る舞いとの違いを最小にするのに必要な UNV モデルの粘性率で、 $\Delta t =$  (緑点線)  $0.1 \tau_0$ 、(紫点線)  $0.5 \tau_0$ 、(橙点線)  $\tau_0$  の期間で両者の違いを最小にしている。

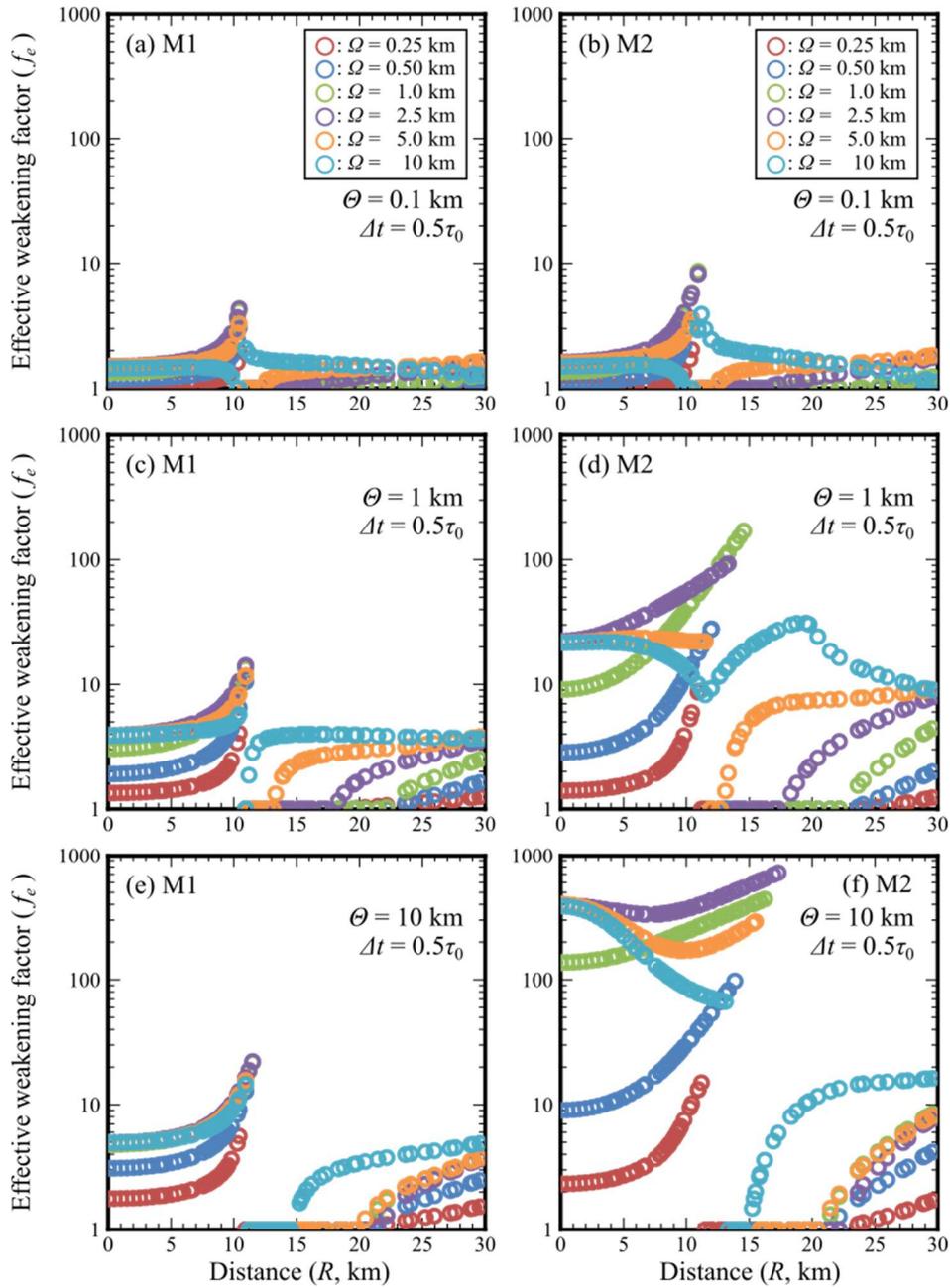


図 3-6. 変動源の中心からの距離に依存した有効弱化係数  $f_e$ 。LVZ モデルと  $\eta = \eta_a$  の UNV モデルの違いは、地表面鉛直変位の振る舞いについて  $\Delta t = 0.5 \tau_0$  の期間で最小化している。 $\Theta =$  (a, b) 0.1 km、(c, d) 1 km、(e, f) 10 km。変動源モードは(a, c, e) M1、(b, d, f) M2 である。(赤)  $\Omega = 0.25$  km、(青)  $\Omega = 0.5$  km、(緑)  $\Omega = 1$  km、(紫)  $\Omega = 2.5$  km、(橙)  $\Omega = 5.0$  km、(水色)  $\Omega = 10$  km。

ここで、 $\eta_o/\eta_a$  を有効弱化係数  $f_e$  と定義し、これによって LVZ モデルの挙動が UNV モデルにより最もよく再現されるようにした。図 3-6 は、 $\Theta$  と  $\Omega$  を変えた場合の  $f_e$  を、 $R$  の関数として

まとめたものである。とと $\zeta_a$ の差は、 $\Delta t = 0.5 \tau_0$ の時間間隔で最小化している。 $\Theta = 0.1$ 、1、10 kmのそれぞれについて、0.25~10 kmの範囲で $\Omega$ の値を変えている。一般に、M1、M2のいずれのモードにおいても、 $\Theta$ と $\Omega$ が大きいくほど $f_e$ は大きくなる。しかし、 $\Omega = 5$ 、10 kmのモデルでは少し異なった挙動を示し、 $\Omega = 2.5$  kmのモデルよりも有効弾性厚さが小さくなったかのように $f_e$ が小さくなる。実際、粘弾性地表面変位速度は、弾性層が薄いほど小さくなることが既に知られている(e.g., Fukahata and Matsu'ura, 2018; Yamasaki et al., 2018)。しかし、 $\Omega = \sim 5$ -10 kmのモデルは異なる挙動を示し、特にM2モードへの応答では、 $\Theta = 1$  kmでの $f_e$ は $R$ が大きいくほどむしろ小さくなる。LVZとUNVの粘弾性地表面変位場の波長の違いにより、さらに遠地においては、変位が小さいだけでなく、ある特定の距離では、LVZモデルの地表面変位の方向がUNVモデルのそれと反対になっており、両モデルの変位挙動を比較することが困難となる。

#### c) $\Theta$ - $\Omega$ 空間における $f_e$

図7は、変動源の挙動の2つのモードM1、M2に対する $f_e$ の $\Theta$ - $\Omega$ 空間での等値線コンターを示している。モデル上面の中心(すなわち $R = 0$  km)で、 $\zeta_0$ との差を最小にする時間間隔 $\Delta t = 0.1 \tau_0$ 、 $0.5 \tau_0$ 、 $\tau_0$ を適用している。一般には、上述したように、 $f_e$ は $\Theta$ や $\Omega$ が大きいくほど、また $\Delta t$ が小さいほど大きい。連続的な変動源の膨張(M1)に対する $f_e$ は、 $\Delta t = 0.1 \tau_0$ 、 $0.5 \tau_0$ 、 $\tau_0$ のそれぞれにおいて、 $\sim 10$ 、 $\sim 4$ 及び $\sim 3$ 以下となる。一方、瞬時の変動源収縮(M2)に対して、 $\Delta t = 0.1 \tau_0$ 、 $0.5 \tau_0$ 、 $\tau_0$ の場合の $f_e$ はそれぞれ、 $\sim 650$ 、 $\sim 125$ 、 $\sim 80$ まで上昇する。

#### d) 始良カルデラへの適用

以上では、LVZモデルが、変動源挙動のM1モードとM2モードで有効弱化係数 $f_e$ が異なることを予測し、M1モードよりもM2モードに対して $f_e$ が大きくなる、つまり見かけの一樣粘性率 $\eta_a$ が小さくなることを説明した。このように、LVZモデルは、噴火後の異なる段階で異なる粘性率を必要とする測地データを説明できる可能性がある。

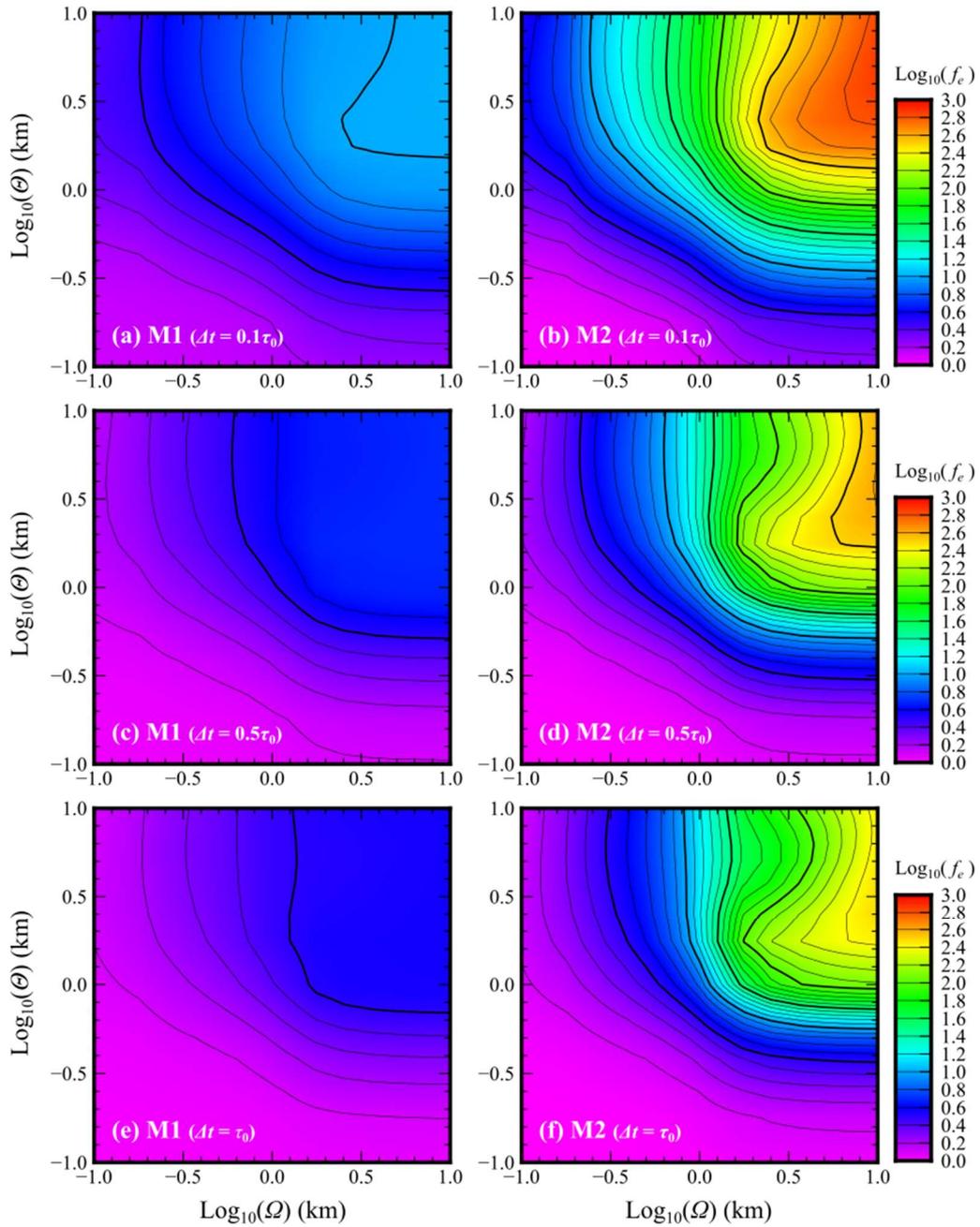


図 3-7.  $\Theta$  と  $\Omega$  に依存した有効弱係数  $f_e$ 。変動源モードは(a, c, e) M1 と(b, d, f) M2。LVZ モデルと  $\eta = \eta_a$  を持つ UNV モデルの振る舞いとの違いは  $\Delta t =$  (a, b)  $0.1 \tau_0$ 、(c, d)  $0.5 \tau_0$ 、(e, f)  $\tau_0$  の期間で最小化されている。また、最小化はモデルの中心での地表面鉛直変位の弾性成分からの逸脱分:  $\zeta = u_z - u_{ze}$  を用いておこなわれている。

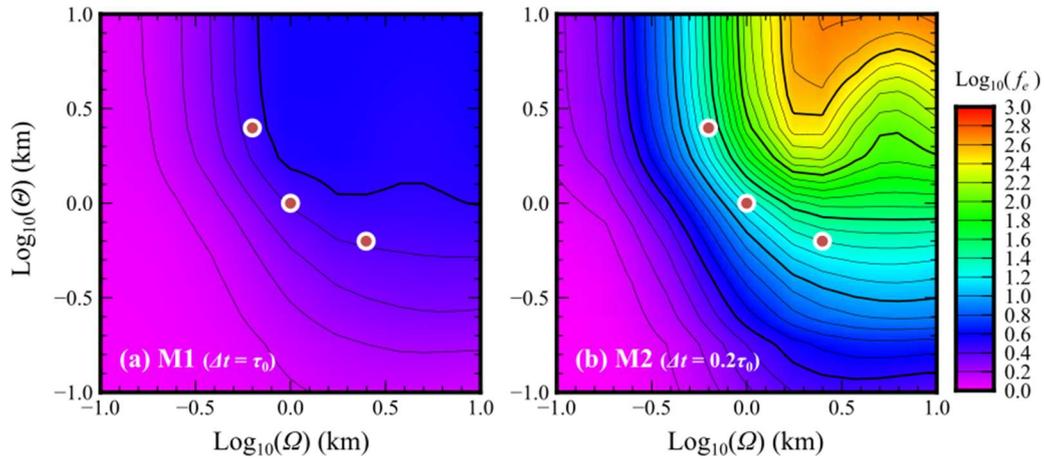


図 3-8.  $\Theta$  と  $\Omega$  に依存した有効弱化係数  $f_e$ 。変動源モードは(a, c, e) M1 と(b, d, f) M2。LVZ モデルと  $\eta = \eta_a$  を持つ UNV モデルの振る舞いとの違いは  $\Delta t =$  (a)  $\tau_0$ 、(b)  $0.2\tau_0$  の期間で最小化されている。また、最小化は BM2474 における BM2469 に対する相対地表面鉛直変位の弾性成分から逸脱分： $\zeta = u_z - u_{ze}$  を用いておこなわれている。赤丸は、 $(\Theta, \Omega) = (0.63 \text{ km}, 2.5 \text{ km})$ 、 $(1 \text{ km}, 1 \text{ km})$ 、 $(2.5 \text{ km}, 0.63 \text{ km})$  の 3 モデルを示す。

ここでは、LVZ モデルを始良カルデラ周辺の測地データに適用することを試みる。変動源の中心は Mogi (1958) に従うことにする。図 8 は、LVZ モデルと UNV モデルの間で、BM2474 における BM2469 に対する相対隆起量を最小にする有効弱化係数  $f_e$  を  $\Theta$ - $\Omega$  空間において示している (2 つのベンチマークの位置は図 3-1 参照)。M1 モードと M2 モードに対する粘弾性応答のそれぞれは  $\Delta t = \tau_0$ 、 $0.2\tau_0$  で最小化されている。Yamasaki et al. (2022) は、1914 年噴火 (M2 モード) とその後の継続的なマグマ再供給 (M1 モード) に対する粘弾性応答のそれぞれにおいて、 $\sim 5 \times 10^{18} \text{ Pa s}$ 、 $\sim 5 \times 10^{19} \text{ Pa s}$  以上の有効地殻粘性率を、測地データが要求していることを見出している。

M2 モードに対しては、 $\eta_0$  を  $10^{20} \text{ Pa s}$  とすると、LVZ 構造は  $f_e = \sim 20$  になるように制約される。すなわち、図 3-8b の  $\text{Log}_{10}(f_e) = \sim 1.3$  の等値線上に  $\Theta$  と  $\Omega$  の許容される組み合わせが見出される。これらの組み合わせは、M1 モード (図 3-8a 参照) に対しては、 $\text{Log}_{10}(f_e) = \sim 0.4$ 、すなわち  $f_e = \sim 2.5$  で、有効粘性率が  $\sim 4 \times 10^{19} \text{ Pa s}$  と下限の  $\sim 5 \times 10^{19} \text{ Pa s}$  に近い値になることに相当する。

M2 モード、M1 モードに対する粘弾性応答でそれぞれ  $f_e = \sim 20$ 、 $\sim 2.5$  が得られる  $\Theta$  と  $\Omega$  の組み合わせのうち、(1)  $\Theta = 0.63 \text{ km}$  と  $\Omega = 2.5 \text{ km}$ 、(2)  $\Theta = \Omega = 1 \text{ km}$ 、(3)  $\Theta = 2.5 \text{ km}$  と  $\Omega = 0.63 \text{ km}$  という 3 つの LVZ モデル (図 3-8 の赤丸参照) を選んで測地データに適用し、時間変化する変動源の膨張率を制約してみた。Yamasaki et al. (2022) にしたがって、噴火後の期間を 6 つに分割する：(I) 1914–1934、(II) 1934–1960、(III) 1960–1968、(IV) 1968–1976、(V) 1976–1997、(VI) 1997–2007。そして、それぞれの期間における変動源の膨張率  $\Omega$  は一定と仮定する。また、1914 年噴火直前の地殻応力状態は平衡状態であると仮定する。1914 年噴火時

の変動源の収縮体積量  $\Delta V_{g14}$  は、地表で計測された噴出マグマ体積  $V_{m14} = 1.544 \text{ km}^3$  (Ishihara, 1981) の 1/5 倍としている、これによって測地データとの全体のミスフィットは、UNV モデルの場合、数 cm 以内になることが確かめられている (Yamasaki et al., 2022)。1946 年噴火では  $\Delta V_{g46} = V_{m46} = 0.188 \text{ km}^3$  (Ishihara et al., 1981) が採用されている。 $\Gamma_{46} = V_{m46} / \Delta V_{g46}$  の比率が異なっても、結果は大きく変わらない (Yamasaki et al., 2022) ; ただし、期間 II における  $\Omega$  は  $\Gamma_{46}$  が大きいほど小さくなる。本研究で用いた測地データ、つまり水準測量 (1914 - 2006) と GNSS (1996 - 2007)、及び、より詳細な  $\Omega$  の拘束方法などは、Yamasaki et al. (2022) を参照のこと。

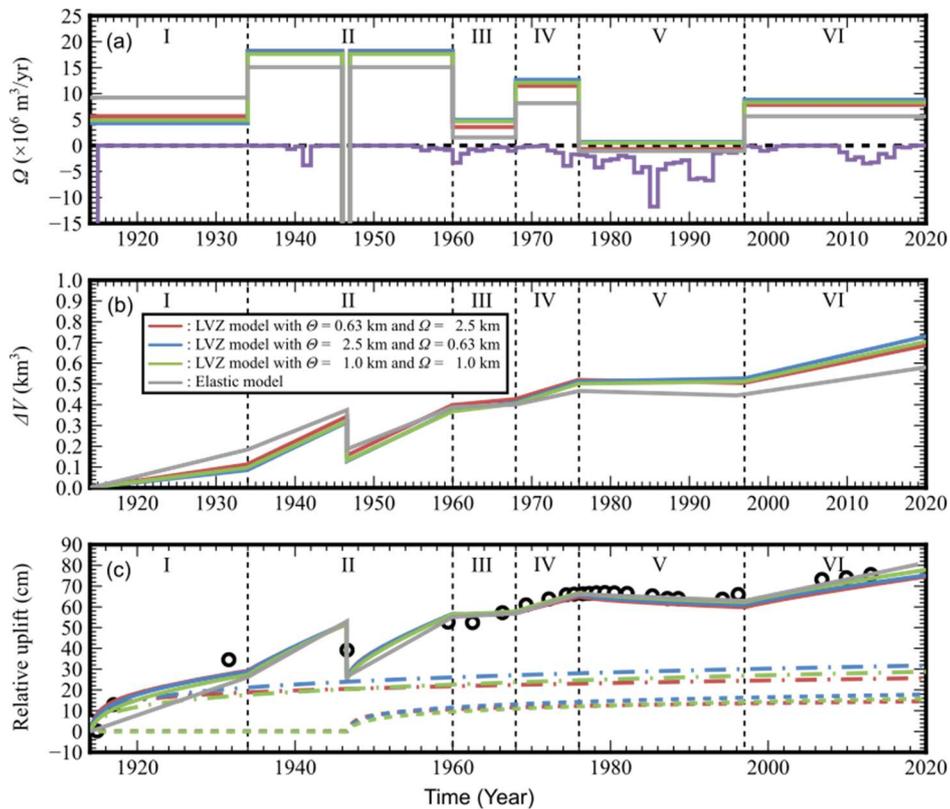


図 3-9: 測地データから制約された LVZ モデルの振る舞い : (a) 変動源の膨張率  $\Omega$ 、(b) 1914 年噴火以降の変動源の累積体積  $\Delta V$ 、(c) BM2474 における BM2469 に対する相対隆起量。LVZ モデルは、(赤)  $\Theta = 0.63 \text{ km}$ 、 $\Omega = 2.5 \text{ km}$ 、(青)  $\Theta = 2.5 \text{ km}$ 、 $\Omega = 0.63 \text{ km}$ 、(緑)  $\Theta = \Omega = 1 \text{ km}$ 、(灰) 弾性モデル。(紫) Iguchi et al. (2019) による噴出量の時間変化。

3つのモデルは、変動源の膨張率 ( $\Omega$  : 図 3-9a)、1914 年噴火以降の変動源の累積体積 ( $\Delta V$  : 図 3-9b)、BM2469 に対する BM2474 の相対地表面隆起 (図 3-9c) などについて、ほぼ同じ挙動を予測する。 $\Omega$  は 1934 年以前では弾性体モデルの場合よりも小さく、しかしそれ以降では弾性体モデルの場合よりも大きくなっている。これは、噴火に対する粘弾性応答は地表面の回

復を促進し、連続的な変動源の膨張に対する応答は膨張による地表面隆起を抑制するためである。予測された  $\Omega$  は、3つのモデルのいずれにおいても、2020年における1914年噴火以降の  $\Delta V$  を  $\sim 0.7 \text{ km}^3$  と制約され、弾性モデルの予測より  $\sim 0.1 \text{ km}^3$  程度大きい。

予測された相対隆起は、Yamasaki et al. (2022)のUNVモデル予測よりも、測地データ (Omori, 1916; Eto et al., 1997; Yamamoto et al., 2013)と調和的である。1914年噴火後の初期における粘弾性地表面回復は、Yamasaki et al. (2022)の最良UNVモデルよりも速いので、1917年のデータが十分に満足される；ただし1931年のデータは予測量よりも大きくなっている。また、第V期の測地データは、第I期で必要とされた  $\sim 5 \times 10^{18} \text{ Pa s}$  を持つUNVモデルでは説明できなかったが (Yamasaki et al., 2022)、本研究のLVZモデルはそれらの両方を十分に説明することができる。

噴火後変動の初期に要請される見かけの一樣粘性率  $\eta_a = \sim 5 \times 10^{18} \text{ Pa s}$  が得られるLVZ構造においては、噴火後変動の後期において得られる見かけの一樣粘性率は  $\eta_a = \sim 4 \times 10^{19} \text{ Pa s}$  となる。この粘性率の場合のマックスウェル緩和時間は  $\sim 40$  年ほどになる。マックスウェル緩和時間より短い時間においては弾性応答が卓越するので、噴火後のマグマ再供給に対する始良カルデラ下の地殻の応答は、最初の  $\sim 40$  年くらいは弾性応答で近似できるようなものとなる。しかし、それ以上の継続時間を持つマグマ供給に対しては、粘弾性応答の影響を無視できなくなってくる。GNSSが導入された1995年以降の地殻変動観測の期間におけるマグマ供給に対する応答についても、実際には、それまでのマグマ供給に対する粘弾性応答の影響を無視することは勧められない。しかし、本研究の結果は、現在のマグマ蓄積量について、弾性モデルでの予測量の違いは  $\sim 0.1 \text{ km}^3$  程度でしかないことを明らかにしている。1914年の大正噴火以降の年数で割った過小評価の年率は  $\sim 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$  程度となり、 $\sim 10^7 \text{ m}^3/\text{yr}$  の見積もり (Iguchi et al., 2008)の  $\sim 10\%$  程度、 $\sim 6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$  の見積もり (Yamasaki et al., 2022)の  $\sim 17\%$  程度でしかない。

たとえLVZ構造がある程度の仮定にもとづいているとしても、 $V_s$  と粘性率との関係を見出ししておくのは大変興味深い。両者を比較するため、LVZ構造の中心を深さ  $15 \text{ km}$  の低速度領域の中心に置いてみる；この比較では、 $15 \text{ km}$  より深いところの低速度構造は明らかにされていないが、LVZ構造と同じように、深さ  $15 \text{ km}$  を境に、上下対称の構造をもっていることを想定している。本研究の検証で考えた3つのモデルのうち、 $(\Theta, \Omega) = (0.63 \text{ km}, 2.5 \text{ km})$  のLVZ構造の場合、あくまでも概略の見積もりではあるが、S波速度が  $2 \text{ km/s}$  の領域は、有効弱化係数  $f_e = \sim 4-13$ 、つまり見かけの一樣粘性率  $\eta_a = \sim 2.5 - 7.5 \times 10^{18} \text{ Pa s}$  に相当する。一方、噴火後変動の後期において必要とされる粘性率  $\eta_a = \sim 4 \times 10^{19} \text{ Pa s}$ 、これは地表面が沈降している期間 ( $\sim 1975-1997$ ) に特に要請されるが、ここで考えているLVZ構造においては、S波速度が  $2 \text{ km/s}$  より  $\sim 10-20\%$  程度高い部分に相当している。

### (3) 3. まとめ

本研究では、3次元線形マックスウェル粘弾性モデルを用いて、粘性率が指数 (ガウス) 関数的に空間変化する低粘性領域 (LVZ) が、地殻上部でのマグマ活動に対する地表面変位の挙動に与

える影響を検討した。始良カルデラ周辺の測地データ（水準測量と GNSS 変位場）から、弱化係数  $f$  が、その最大値  $f_0$  の半分になるガウス半値幅  $\Theta$  と  $\Omega$ （それぞれ鉛直方向と水平方向）を拘束することができた。その結果、1914 年噴火後のどの段階においても、LVZ モデルがデータをよく満足させることが確認された。

LVZ モデルの地表面変位が、見かけの一樣粘性率  $\eta_a = \eta_0/f_e$  で制御されているとし、これにしたがい  $f_e$  を有効弱化係数として定義した（バックグラウンド粘性率からどれほど弱化しているのかを見かけの一樣粘性率で表現した）。 $\Theta$  と  $\Omega$  で記述される LVZ 構造では、変動源の連続的な膨張に対する粘弾性応答の  $f_e$  は、噴火時の瞬間的な変動源に対する応答より小さくなる。1914 年噴火の粘弾性応答において、1914 年噴火後の最も早い時期の測地データに要請される  $f_e \sim 20$ 、すなわち  $\eta_a \sim 5 \times 10^{18}$  Pa s が予測される  $\Theta$  と  $\Omega$  の組み合わせは、連続した変動源膨張においては、 $f_e \sim 4$ 、すなわち  $\eta_a \sim 4 \times 10^{19}$  Pa s を予測する組み合わせに相当するものであった。これは、噴火後期の地表面変位のほとんどが、マクスウェル緩和時間である約 40 年間に及ぶ期間においては、マグマの再供給に対する弾性応答であることを意味している。したがって、その年数を越えるようなマグマ活動に対してはそれまでの粘弾性の影響を考慮しなければならない。しかし、その粘弾性の効果を考慮しても、始良カルデラにおける過小評価の年率は従来の見積もりの  $\sim 10$ – $17\%$  でしかない。

LVZ の形状は球状や長球状ではなく、扁球状であることが地震波速度構造と現時点では一致するが、深さ 15 km 以下の速度構造はまだ十分な解像度を得られていないので、今後検討が必要である。 $(\Theta, \Omega) = (0.63 \text{ km}, 2.5 \text{ km})$  の LVZ 構造の場合、S 波速度が 2 km/s の領域は、見かけの一樣粘性率  $\eta_a \sim 2.5 - 7.5 \times 10^{18}$  Pa s にほぼ相当し、1914 年噴火後の最初期の測地データに必要な粘性率と同程度であった。一方、噴火後の地表面変動の後期、特に地盤沈下が見られる時期（ $\sim 1975$ – $1997$ ）に必要な  $\eta_a \sim 4 \times 10^{19}$  Pa s は、S 波速度が 2 km/s より  $\sim 10$ – $20\%$  高い部分に相当している。

本研究は、地殻粘性構造がマグマ溜りの存在に影響をうける場合、噴火後のマグマ再供給の時期によって異なる有効粘性率に粘弾性地表変位が制御されている可能性を示す重要な示唆を与えている。このような状況は、マグマ溜りの上部に変動源としてのマグマが存在しており、その下部マグマ溜りから上部の変動源へとマグマが供給されている場合に得られる。このことは、大規模噴火に相当する噴出可能なマグマ量を、変動源として検出するか、レオロジカル強度の低い領域として検出するかという重要な問題を提起するが、同じような提起は Yamasaki and Kobayashi (2018) によってもすでに示唆されている。

## 参考文献

Bürgmann, R., Dresen, G., 2008. Rheology of the lower crust and upper mantle: evidence from rock mechanics, geodesy and field observations. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 36, 531-567.

- Chantel, J., Manthilake, G., Andrault, D., Novella, D., Yu, T., Wang, Y., 2016. Experimental evidence supports mantle partial melting in the asthenosphere. *Sci. Adv.*, 2, e1600246
- Chery, J., Bonneville, A., Vilotte, J.P., Yuen, D., 1991. Numerical modelling of caldera dynamical behaviour. *Geophys. J. Int.* 105, 365-379.
- Del Negro, C., Currenti, G., Scandura, D., 2009. Temperature-dependent viscoelastic modeling of ground deformation: Application to Etna volcano during the 1993-1997 inflation period. *Phys. Earth Planet. Inter.* 172, 299-309.
- Debayle, E., Bodin, T., Durand, S., Ricard, Y., 2020. Seismic evidence for partial melt below tectonic plates. *Nature*, 586, 555-559.
- Eto, T., Takayama, T., Yamamoto, K., Hendrasto, M., Miki, D., Sonoda, T., Matshushima, K., Uchida, K., Yakiwara, H., Wan, Y., Kimata, F., Miyajima, R. and Kobayashi, K., 1997. Re-upheaval of the ground surface at the Aira caldera - December 1991~ October 1996-. *Ann. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.* 40B-1, 49-60 (in Japanese with English abstract).
- Eilon, Z.C., Abers, G.A., 2017. High seismic attenuation at a mid-ocean ridge reveals the distribution of deep melt. *Sci. Adv.*, 3, e1602829.
- Fialko, Y., Pearse, J., 2012. Sombrero uplift above the Altiplano-Puna magma body: Evidence of a ballooning mid-crustal diapir. *Science*, 338, 250-252.
- Freed, A.M., Bürgmann, R., 2004. Evidence of power-law flow in the Mojave desert mantle, *Nature*, 430, 548-551.
- Fukahata, Y., Matsu'ura, M., 2018. Characteristics of viscoelastic crustal deformation following a megathrust earthquake: Discrepancy between the apparent and intrinsic relaxation time constants, *Pure appl. Geophys.*, 175, 549-558.
- Gregg, P.M., de Silva, S.L., Grosfils, E.B., 2013. Thermomechanics of shallow magma chamber pressurization: Implications for the assessment of ground deformation data at active volcanoes. *Earth Planet. Sci. Lett.* 384, 100-108.
- Hearn, E.H., McClusky, S., Ergintav, S., Reilinger, R.E., 2009. Izmit earthquake postseismic deformation and dynamics of the North Anatolian Fault Zone, *J. geophys. Res.*, 114, B08405, doi:10.1029/2008JB006026.
- Hetland, E.A., Hager, B.H., 2005. Postseismic and interseismic displacements near a strike-slip fault: a two-dimensional theory for general linear viscoelastic rheologies, *J. geophys. Res.*, 110, B10401, doi:10.1029/2005JB003689.
- Hetland, E.A., Hager, B.H., 2006. The effects of rheological layering on post-seismic deformation, *Geophys. J. Int.*, 166, 277-292.

- Hetland, E.A., Zhang, G., 2014. Effect of shear zones on post-seismic deformation with application to the 1997 MW 7.6 Manyi earthquake. *Geophys. J. Int.* 198, 259-269, doi: 10.1093/gji/ggu127.
- Hickey, J., Gottsmann, J., Nakamichi, H., Iguchi, M., 2016. Thermomechanical controls on magma supply and volcanic deformation: application to Aira caldera, Japan. *Sci. Rep.* 6, 32691, doi: 10.1038/srep32691.
- Hidayati, S., Ishihara, K., Iguchi, M., 2007. Volcano-tectonic earthquakes during the stage of magma accumulation at the Aira caldera, southern Kyushu, Japan. *Bull. Volcanol. Soc. Japan* 52, 289-309.
- Honda, R., Yamaya, Y., Ichihara, H., Hase, H., Mogi, T., Yamashita, H., Ohyama, T., Uyeshima, M., Nakagawa, M., 2011. Magnetotelluric investigation around the Kutcharo caldera region. *Geophys. Bull. Hokkaido Univ.* (74), 45-55 (Sapporo, Japan, March, in Japanese with English abstract).
- Huang, H.H., Lin, F.C., Schmandt, B., Farrell, J., Smith, R.B. and Tsai, V.C., 2015. The Yellowstone magmatic system from the mantle plume to the upper crust, *Science*, 348, 773-776.
- Iguchi, M., Takayama, T., Yamazaki, T., Tada, M., Suzuki, A., Ueki, S., Ohta, Y., Nakao, S., 2008. Movement of magma at Sakurajima Volcano revealed by GPS observation. *Ann. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, 51B, 241-246 (in Japanese with English abstract).
- Iguchi, M., Tameguri, T., Hirabayashi, J., Nakamichi, H., 2019. Forecasting volcanic eruption of Sakurajima Volcano based on magma intrusion rate. *Bull. Volcanol. Soc. Japan* 64, 33-51 (in Japanese with English abstract).
- Ishihara, K., Takayama, T., Tanaka, Y., Hirabayashi, J., 1981. Lava flows at Sakurajima volcano (1) Volume of the historical lava flows. *Ann. Disast. Prev. Res. Inst. Kyoto Univ.* 24, 1-10 (in Japanese with English abstract).
- Lü, Y., Ni, S., Xie, J., Xia, Y., Zeng, X., Liu, B., 2013. Crustal S-wave velocity structure of the Yellowstone region using a seismic ambient noise method. *Earthq. Sci.*, 26, 283-291.
- Mogi, K., 1958. Relations between eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them. *Bull. Earthq. Res. Inst.* 26, 99-134.
- Newman, A.V., Dixon, T.H., Ofoegbu, G.I., Dixon, J.E., 2001. Geodetic and seismic constraints on recent activity at Long Valley Caldera, California: evidence for viscoelastic rheology. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 105, 183-206.

- Omori, F., 1916. Level change and horizontal displacement of the ground caused by the Sakura-jima eruption of 1914. *Bull. Imp. Earthq. Invest. Comm.* 8, Part II, 152-179.
- Parsons, T., Sleep, N.H., Thompson, G.A., 1992. Host rock rheology controls on the emplacement of tabular intrusions: Implications for underplating of extending crust. *Tectonics*, 11, 1348-1356.
- Pollitz, F.F., 2003. Transient rheology of the uppermost mantle beneath the Mojave Desert, California, *Earth planet. Sci. Lett.*, 215, 89-104.
- Pollitz, F.F., 2005. Transient rheology of the upper mantle beneath central Alaska inferred from the crustal velocity field following the 2002 Denali earthquake, *J. geophys. Res.*, 110, B08407, doi:10.1029/2005JB003672.
- Pollitz, F.F., Sacks, I.S., 2002. Stress triggering of the 1999 Hector Mine Earthquake by transient deformation following the 1992 Landers Earthquake, *Bull. seism. Soc. Am.*, 92, 1487-1496.
- Rubin, A.M., 1995. Propagation of magma-filled cracks, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 23, 287-336.
- Ryder, I., Parsons, B., Wright, T.J., Funning, G.J., 2007. Post-seismic motion following the 1997 Manyi (Tibet) earthquake: InSAR observations and modelling, *Geophys. J. Int.*, 169, 1009-1027.
- Shinevar, W.J., Behn, M.D., Hirth, G., Jagoutz, O., 2018. Inferring crustal viscosity from seismic velocity: Application to the lower crust of Southern California. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 494, 83-91.
- Tameguri, T., Yakiwara, H., Tsutsui, T., Iguchi, M., 2022. High resolution three-dimensional seismic velocity imaging below Aira Caldera. Submitted for publication.
- Taylor, M.A.J., Singh, S.C., 2002. Composition and microstructure of magma bodies from effective medium theory. *Geophys. J. Int.*, 149, 15-21.
- Uto, K., Sakaguchi, K., Teraoka, Y., Okumura, K., Komazawa, M., 1997. Geological map of Japan 1:200,000, Kagoshima. Geological Survey of Japan.
- Watanabe, T., Koyaguchi, T., Seno, T., 1999. Tectonic stress controls on ascent and emplacement of magmas, *J. Volc. Geotherm. Res.*, 91, 65-78.
- Watts, A.B., 2001. *Isostasy and Flexure of the Lithosphere*, Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Watts, A.B., Burov, E.B., 2003. Lithospheric strength and its relationship to the elastic and seismogenic layer thickness, *Earth planet. Sci. Lett.*, 213, 113-131.

- Werthmüller, D., Ziolkowski, A., Wright, D., 2013. Background resistivity model from seismic velocities, *Geophysics*, 78, E213-E223.
- Yamamoto, K., Sonoda, T., Takayama, T., Ichikawa, N., Ohkura, T., Yoshikawa, S., Inoue, H., Matsushima, T., Uchida, K., Nakamoto, M., 2013. Vertical ground deformation associated with the volcanic activity of Sakurajima Volcano, Japan during 1996–2010 as revealed by repeated precise leveling surveys. *Bull. Volcanol. Soc. Japan* 58, 137–151.
- Yamasaki, T., Houseman, G.A., 2012a. The signature of depth-dependent viscosity structure in post-seismic deformation. *Geophys. J. Int.* 190, 769–784.
- Yamasaki, T., Houseman, G.A., 2012b. The crustal viscosity gradient measured from post-seismic deformation: A case study of the 1997 Manyi (Tibet) earthquake. *Earth Planet. Sci. Lett.* 351–352, 105–114.
- Yamasaki, T., Wright, T.J., Houseman, G.A., 2014. Weak ductile shear zone beneath a major strike-slip fault: Inferences from earthquake cycle model constrained by geodetic observations of the western North Anatolian Fault Zone. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 119, 3678–3699, doi:10.1002/2013JB010347.
- Yamasaki, T., Kobayashi, T., 2018. Imaging a low viscosity zone beneath the Kutcharo caldera, eastern Hokkaido, Japan, using geodetic data. *Earth Planet. Sci. Lett.* 504, 1–12.
- Yamasaki, T., Kobayashi, T., Wright, T.J., Fukahata, Y., 2018. Viscoelastic crustal deformation by magmatic intrusion: A case study in the Kutcharo caldera, eastern Hokkaido, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 349, 128–145.
- Yamasaki, T., Sigmundsson, F., Iguchi, M., 2020. Viscoelastic crustal response to magma supply and discharge in the upper crust: Implications for the uplift of the Aira caldera before and after the 1914 eruption of the Sakurajima volcano. *Earth Planet. Sci. Lett.* 531, 115981.
- Yamasaki, T., Sigmundsson, F., Iguchi, M., 2022. Variable inflation rate of a magmatic deformation source beneath Aira caldera after the 1914 eruption of Sakurajima volcano: Inferences from a linear Maxwell viscoelastic model constrained by geodetic data. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 421, 107446.
- Yamasaki, T., Miura, H., Nogi, Y., 2008. Numerical modelling study on the flexural uplift of the Transantarctic Mountains, *Geophys. J. Int.*, 174, 377–390.

#### (4) 委員会等の開催

令和3年度は外部評価委員会を2回開催した。開催日時と会場を以下に示す。

##### 第1回外部評価委員会

令和3年5月13日(木) 10時~12時

場所: オンライン

##### 第2回外部評価委員会

令和3年11月30日(火) 13時~16時

場所: オンライン

令和3年度外部評価委員は以下の4氏に委嘱した。

防災科学技術研究所・主幹研究員	森田裕一
九州大学大学院理学研究院・特任教授	清水 洋
東北大学大学院理学研究科・教授	三浦 哲
防災科学技術研究所・総括主任研究員	藤田英輔

#### (4) 1. 第1回外部評価委員会の内容の要点

第1回外部評価委員会では令和3年度の研究計画の全般の内容と個別の研究計画について提案があった。委員からは本研究に関連するこれまでの個々の研究成果に対する質問と今後の展望に関する質問がなされた。

##### (1-1) 始良カルデラにおける地震観測による地殻構造調査・地震観測計画

研究担当者から令和3年度は地震波速度構造インバージョンの対象領域を2倍以上に広げるとともに、解析の対象とする地震の範囲を広げて東方向の沈み込み帯で発生する地震も対象に加えることにする。領域拡張分の観測データは既存のものを使用することとするとの提案があった。

委員からは方針について肯定的な意見が出されたほか、観測データの取り扱いに関する話題、範囲拡張および深度増大に関する質疑が出された。

##### (1-1) 始良カルデラにおける地震観測による地殻構造調査・地殻構造研究計画

研究担当者からは令和3年度はレシーバ関数インバージョンを始良カルデラとその周辺域に拡大することにより、3次元(S波)速度構造モデルの構築に取り組むとの方針が示され、新たに始良カルデラ内に設置された観測点で得られたデータによる解析に取り組むとの提案があった。

委員からはこれまでに得られた桜島直下のS波速度分布パターンの信頼性とその検証方法に関連する質疑がなされた。

##### (1-2) 始良カルデラにおける長期連続反射法の有効性の検討

研究担当者から令和3年度は、適正なサイズの振源装置を導入して基礎実験を実施すること、基礎実験の実施により振源波形の再現性の確認および変化検出の為の基礎波形データの蓄積を実施することの提案があった。

委員からは振源波形の類似性に関する質疑、発振に関する品質管理、スタック方法、構造変化検出の手順などに関する質疑が行われた。

#### (2-1) 始良カルデラの火山性地殻変動データの蓄積

研究担当者からは令和3年度はGNSSの観測の継続および始良カルデラへのマグマ供給量の推定を実施し、GNSS観測の継続では新設点による観測点網の強化と仮設観測点設置による観測継続を実施する。また、マグマ供給量の推定では圧力源モデルの改良を実施するという提案が行われた。

委員からは解析の対象および地殻変動圧力源モデルの検討とする変位成分の取り扱いに関する方針の確認と解析の際の広域変動成分除去方法に関する確認があった。

#### (2-2) 始良カルデラにおける海底地盤変動観測の検討

研究担当者が資料に基づき令和3年度は観測装置の改良設計、設置予定点の環境調査、観測データ解析の検討の実施を提案した。改良設計は観測装置の傾斜検出方法の変更と装置寸法の変更が柱となる。環境調査では海流観測と気象観測を実施する。さらに観測データ解析では令和2年度に建造した実験台を用いた実験の継続に取り組むことが紹介された。

委員からは海況観測方法の詳細の確認、観測装置の運動に伴うGNSS測位の応答性の検証の必要性について指摘された。

#### (3) 活動的カルデラのシミュレーションモデルによる火山性地殻変動の検討

研究担当者から資料に基づき令和3年度は局所的に不均質な粘性構造を導入したモデルで噴火イベント後の過渡的な変動のパターンの説明を試みる方針であることが提案された。局所不均質粘性構造の導入に際して別項の地震学的構造調査結果を参照し、局所不均質粘性を導入した構造によるマグマ蓄積量の再評価も行うことが紹介された。

委員からは局所的粘性不均質を導入する目的の説明を求められたほか、局所的粘性不均質に対応する物質及びその状態に関する質疑が行われた。

### (4) 2. 第2回外部評価委員会の内容の要点

第2回外部評価委員会では各研究項目の進捗状況について報告がなされ、専門性および品質保証の立場から質疑が行われた。

#### (1-1) 始良カルデラにおける地震観測による地殻構造調査・地震観測計画

令和3年度のキーワードは中部地殻構造の高精度化である。インバージョンによる研究担当者から、5 km グリッドインバージョンで見つかった深さ 15 km を中心とする S 波低速度領域に関する詳細をまとめ論文発表とするという報告があった。S 波低速度領域の上限は 12.5 km 深と推定される。S 波低速度領域のサイズは 10 km × 8 km、容積 139 - 255 km<sup>3</sup>。S 波低速度領域内の P 波速度減少率からメルト分率 7 % を推定し、メルト換算 10~18 km<sup>3</sup>。4 km グリッドによるインバージョンも実施したが、S 波低速度領域の概形はほぼ同じであることが報告された。

委員からは、S 波低速度領域内の異方性の合理性に関する質疑、S 波低速度領域の上方に位置する高速度領域、S 波低速度領域の体積の合理性の確認などが出され、今後より深いところの解像度を改良して低速度領域の全体像の解明を進めることが要請された。

レシーバ関数の研究担当者からはカルデラ内観測点の使用によるレシーバ関数イメージングで、カルデラ内全域の中部地殻内（20-30 km 深）の S 波低速度分布が明らかにされ、カルデラ内の複雑な構造を反映する変則的なレシーバ関数の出現が報告された。

委員からは変則的なレシーバ関数の解釈とその扱いについて質疑があった。

#### (1-2) 始良カルデラにおける長期連続反射法の有効性の検討

研究担当者から発振点を予定していた住吉池における湛水量不足から令和 3 年度基礎実験の見合わせが報告された。また、令和 2 年度実験観測波形を用いた振源波形の影響の除去について報告があった。

委員からは長期連続反射法の振源域の理解についての確認、振源波形の影響除去の際の原振源波形の信号処理に関する提案と、住吉池を発振点として継続的に利用する際の不安定要素についての指摘があった。

#### (2-1) 始良カルデラの火山性地殻変動データの蓄積

令和 3 年度のキーワードとして地震学的構造の見知を導入した地盤変動力源モデルの検討というキーワードに対して、研究担当者から、新設点設置状況の報告に加えて既に設置済みの点の経過報告、地盤変動力源モデルの検討の経過報告があった。地盤変動力源モデルの検討に関しては一様弾性モデル+有限体積圧力源（楕円体ベースの圧力源形状）によるモデル計算を試みたことが説明された。

委員からは現プロジェクトで設置された GNSS アンテナピラーの地面へのカップリング方法に関する確認のほか、地殻変動圧力源モデルに関する質疑が集中した。地殻変動圧力源モデルの計算境界の取り扱い、圧力源そのものの弾性的性質の取り扱い、圧力源形状に関する質疑等であった。

#### (2-2) 始良カルデラにおける海底地盤変動観測の検討

研究担当者から令和 3 年度は改良設計として水深 30m 対応化、環境調査として海況調査・底質調査・気象観測の実施、測位実験はキネマティクス解析結果の長期安定性の検証・速度追従性の検証について実施され、いずれも問題のないことが報告された。

委員からは、長期安定性の検証観測結果に関する質疑の他、提唱された測位方法において見込まれる精度についての確認があった。また、長期安定性の検証手段を確保することについても要請がなされた

#### (3) 活動的カルデラのシミュレーションモデルによる火山性地殻変動の検討

令和 3 年度のキーワードは変動力源深さや粘性構造を反映させたモデルパラメータの依存性の検証であった。研究担当者からは地震学的構造の見知を導入した粘弾性構造モデルの検討として、深さ 11 km のシル状圧力源の下に深さ 15 km を中心とする低粘性領域を配した粘弾性構造モデルを用いた検討が行われたことが報告され、このモデルに対して噴火イベントに対する短期的見掛け粘性率が小さく、長期変動に対する見掛け粘性率が大きいという問題が説明できたことが報告された。

委員からは低粘性領域の下方拡張による影響に関する質疑、低粘性領域の物理的イメージ、モデルの背景粘性構造の与え方等に関する質疑が出された。

#### (4) まとめ

外部評価委員からは全体として順調な進捗であるとの講評を得ることができた。また、構造調査の範囲を深度方向に拡大する必要性が指摘された。

一方、実施責任者からはあらためて本委託研究のアウトプット内容の確認の必要性が指摘され、プロジェクトの骨格を再確認する発言があった。

添付資料

## 海底地盤變動觀測装置 仕様案

(内容)

海底地盤変動観測装置 一式

(構成内訳)

1. アンカー	1 式
2. ピラー及び浮体部	1 式
2-1. ジョイント部	1 式
2-2. 浮体部	1 式
2-3. 尾筒及び上部鋼管	1 式
3. 作業台部	1 式
3-1. 作業台	1 式
3-2. GNSS アンテナ台	1 式
3-3. 観測計器容器	1 式
3-4. 施設灯	1 式

(概要)

1. 装置機能

本装置は火山活動に伴う海域の地盤変動を検出する測地測量のための海底電子基準点である。本装置は海域に設置されたプラットフォーム上で GNSS 衛星を観測し、その測位データを取得し、測位データを基地局に向かって送信する機能を有する。

2. 全体概要

本装置は海底に置かれたアンカーと連結されたピラーの空中に露出した頂部に設置したアンテナで GNSS 衛星からの電波を用いた測位を行い、GNSS 受信機で測位結果を取得する。また、取得された測位データは無線通信を介して陸上に伝送する。GNSS 受信機及び無線通信装置の電源は太陽電池パネルを用いたシステムから給電される。また、ピラーはアンカーとの連結部を関節として潮流及び風力で自由に傾動するものとし、複数の GNSS 受信機の測位結果からその傾斜方向と傾斜角を得て海底の測位点位置を得る。

本装置の設置を予定している地域(海域)を別紙1に示す。本装置の設置場所の水深は約30mである。本装置の設置場所では1cm/年の垂直地盤変動の観測が期待される。また、本装置が設置される場所の環境を別紙2に示す。始良カルデラ地域を含む南九州地域は台風の常襲地帯であるうえ、設置場所における潮位変動も大きいため、本海底地盤変動観測装置はこれらの自然環境に対応するものでなければならない。本装置の耐用年数は5年以上であるものとする。

本装置の全体と部位名称を別紙3に示し、本装置の参考図を別紙4に示す。本装置は製造・組み立てのうえ別紙1に示される始良カルデラ内部の海域に設置され、発注者に引き渡

される。

### 3. 定置性能

以降の技術要件を満たしたものは下記の定置性能を有すること。なお定置性能については対応する計算書を提出すること。

- 3-1 設置予定場所（別紙1）における通常の高潮条件下の最大干潮時で性能、機能に関する要件の2 ピラー（別紙3）が直立すること。
- 3-2 設置予定場所（別紙1）の最大満潮時（別紙2）において、別紙2に示される10年確率風速及び10年確率波高、10年確率周期の条件に遭遇しても性能、機能に関する要件の3-3 観測計器容器（別紙3）は海面以上の高さになること。
- 3-3 設置予定場所（別紙1）の最大満潮時において、別紙2に示される10年確率風速及び10年確率波高、10年確率周期の条件に遭遇してもアンカーが移動しないこと。

（性能、機能に関する要件）

#### 海底地盤変動観測装置 一式

##### 1. アンカー 1式

- 1-1 アンカーは別紙4⑩アンカー図に示す構造を有し、設置時及び揚収時の空中吊り上げの自重に耐える強度を有するコンクリート製であること。
- 1-2 アンカーにはジョイント取り付け鋼管（2-1-2）の下端が埋め込まれており、ジョイント部より上の構造による浮力及び別紙2に示される10年確率風速及び10年確率波高、10年確率周期に遭遇してもジョイント取り付け用鋼管が離脱しないこと。
- 1-3 空中吊り上げの自重に耐える強度を有する直径4cm以上の鋼製吊筋が2ヶ所及び直径3.5cm以上の鋼製吊筋を4ヶ所以上備えられていること。

##### 2. ピラー及び浮体部 1式

ピラー及び浮体部1式はジョイント部1式、浮体部1式、尾筒1式及び上部鋼管1式から構成されること。尾筒及び上部鋼管部、及び作業台部の鋼製部は別紙5の仕様に従い白色で塗装されるものとする。なお、尾筒及び上部鋼管をまとめてピラーと呼ぶ。

##### 2-1. ジョイント部 1式

別紙4③尾筒鋼管詳細図に示す構造を有すること。ジョイント部はユニバーサルジョイント1式とジョイント部上部尾筒1本及び下部尾筒1式、ジョイント取り付け鋼管1本から構成されること。ユニバーサルジョイントは別紙4⑨ジョイント詳細図に示す構造を有

すること。

- 2-1-1 ジョイント部上部尾筒及び下部尾筒は STK400 鋼材で構成され、上部尾筒上端部と下部尾筒下端部にはともにボルト結合用フランジを有すること。
- 2-1-2 ジョイント取り付け鋼管は STK400 鋼材で構成され、上端部にはボルト結合用フランジを有すること。ジョイント取り付け鋼管の下端をアンカーに埋め込む構造であること。埋め込み長は 1-2 を満たす十分な強度であることを計算書に示すこと。
- 2-1-3 ユニバーサルジョイントの主要部分は直交する 2 軸で構成されること。
- 2-1-4 ユニバーサルジョイントは別紙 2 に示す 10 年確率風速及び 10 年確率波高、10 年確率周期に繰り返し遭遇してもアンカーとピラーが分離しない強度を備えること。
- 2-1-5 ユニバーサルジョイントの軸受けは完全無給油軸受け材とし、1ヶ所あたりの 5 年間摩耗量が 0.90 mm 以下の材質のものであること。なお採用した軸受け材とその摩耗量に関する資料を品質管理報告書に添付すること。

## 2-2. 浮体部 1 式

別紙 4 ④～⑥浮体部詳細図に示す構造を有すること。

- 2-2-1 鋼製の気密構造であり、上部と下部にテーパーを有する外形とすること。
- 2-2-2 浮体部はその上端部が設計最低潮位時水面(LWL)の下方 3m となるように尾筒に取り付けられ、その中心を尾筒が貫通する構造であること。
- 2-2-3 浮体部は水深 10m 以上の水圧及び 0.5 ノット以上の潮流力によって座屈しない強度を有すること。
- 2-2-4 浮体部は内部に 8 つ以上の独立した気室を有すること。
- 2-2-5 浮体部の外側には設置時の吊り下げ用のトラニオンを軸対称の位置に 2ヶ所以上有すること。トラニオン取り付け部の内側には吊り上げ時の座屈を防ぐ鋼板による補強材を有すること。
- 2-2-6 浮体部の内部には鋼板による周方向補強材を 4ヶ所以上有すること。

## 2-3. 尾筒及び上部鋼管 1 式

尾筒及び上部鋼管 1 式を別紙 4 ②上部鋼管詳細図及び③尾筒鋼管詳細図に示す構造を有すること。

- 2-3-1 尾筒は、製作及び組み立て、輸送が容易な長さに分割できる構造の STK400 材鋼管とし、両端にボルト結合用のフランジを有すること。
- 2-3-2 上部鋼管は STK400 材鋼管で、両端にボルト結合用のフランジを有すること。
- 2-3-3 上部鋼管には別紙 4 ⑦⑧昇降梯子詳細図に示す SS400 材鋼製の昇降梯子

1 式を備えること。

- 2-3-4 昇降梯子はLWLの下方1 m以下から最下段が始まり、最上段は3-4 作業台部が有する梯子と連絡すること。
- 2-3-5 昇降梯子の周囲には別紙4⑦昇降梯子詳細図のようにLWLの下方1 m以下からLWLの4 m以上の高さまで防舷材1 式を有すること。
- 2-3-6 昇降梯子の途中に鋼製の踊り場を有すること（別紙4⑧昇降梯子詳細図）。
- 2-3-7 防蝕のため、常に水中となる高さにアルミニウム合金陽極を合計10ヶ所取り付けること（別紙4⑩アルミニウム合金陽極配置図参照）
- 2-3-8 尾筒及び上部鋼管 1 式は別紙5の仕様にしたが、LWLより上部は白色で塗装されるものとする。LWLより下部の塗色は協議で決定する。

### 3. 作業台部 1 式

別紙4⑫作業台図に示す構造を有すること。作業台部1 式は別紙3 部位説明図のように作業台1 式及びGNSSアンテナ台1 式から構成され、作業台上には観測計器容器1 式及び施設灯1 式を有すること。作業台部は別紙5 塗装仕様に従い白色仕上げであること。

#### 3-1. 作業台 1 式

- 3-1-1 作業台はSS400 材鋼製であること。
- 3-1-2 作業台は2.4 m四方以上の床面を有し、高さ（太陽電池パネルを除く）1.3 m以内とすること。
- 3-1-3 作業台の中央部に上部鋼管と結合された鋼管（以下「作業台貫通鋼管」という）が上下に貫通し、その床面は作業台貫通鋼管上端から1 m、作業台貫通鋼管下端から30 cmに位置すること。
- 3-1-4 作業台貫通鋼管の両端には、上部鋼管及びGNSSアンテナ台とのボルト結合用フランジを備えること。
- 3-1-5 作業台は床面に昇降口を有するとともに、2-3-3の昇降梯子に連絡する梯子を備えること。
- 3-1-6 作業台の南面には太陽電池パネルが水平に対して40度の角度で取り付けられる架台を有すること。またその架台には発注者が供給する観測計器用電源の太陽電池パネル必要枚数（別紙7）及び施設灯電源用太陽電池パネルをともに装着すること。
- 3-1-7 作業台に転落防止の鋼製手すりを有し、手すりには命綱をかけるリングを有すること。
- 3-1-8 作業台床上に3-3 観測計器容器及び3-4 施設灯関連機器容器を設置すること。
- 3-1-9 作業台に荷物吊り上げ用のチェンブロック取り付け金具1ヶ所を有すること。なお、チェンブロック取り付け金具は定格荷重250 kg以上

のチェーンブロック用とすること。

- 3-1-10 作業台には直径20cm以上のLTEアンテナ台を2ヶ所有すること。  
また、各々のアンテナ台はいずれのGNSSアンテナの下方の1m以上の距離にあること。

### 3-2. GNSSアンテナ台 1式

- 3-2-1 GNSSアンテナ台はSS400材鋼製で4個のGNSSアンテナを取り付ける構造であること。
- 3-2-2 GNSSアンテナ台の中心は上部鋼管中心軸及び尾筒中心軸(以下「ピラー中心軸」という)と5mm以内で一致すること。
- 3-2-3 GNSSアンテナ取り付け面の下に灯ろう取り付け台を有すること。
- 3-2-4 GNSSアンテナ台には、ピラー中心軸に平行になるように取り付けられた4つのアンテナ取り付け軸(A~D)が別紙6GNSSアンテナ配置のように平面配置されていること。1基のGNSSアンテナ(A)取り付け軸がピラー中心軸上に配置され(公差5mm以内)、3基のGNSSアンテナ(B~D)取り付け軸がピラー中心軸から1.0m以上の等しい距離に配置されること。
- 3-2-5 GNSSアンテナ台におけるGNSSアンテナの配置を別紙6GNSSアンテナ配置のようにして取り付けること。アンテナA~Dはそれぞれの位相中心は全てがピラー中心軸を法線とする同一平面上になるように取り付けられること。また、アンテナAとBはそれぞれの位相中心を結ぶ線がユニバーサルジョイント軸Fと同じ平面にあるように、アンテナCとDはそれぞれの位相中心を結ぶ線がユニバーサルジョイント軸Eと同じ平面にあるように取り付けられること。
- 3-2-6 全てのGNSSアンテナ取り付け軸は5/8インチボルトを使用し、全てのGNSSアンテナの方位を同一方向にそろえて取り付けたときに、それぞれのGNSSアンテナ取り付けねじ底面がピラー中心軸を法線とする同一平面上に配置する構造であり、かつ本装置の動揺の繰り返しによるGNSSアンテナの脱落を防止する構造であること。
- 3-2-7 GNSSアンテナ取り付け軸1につきGNSSアンテナ保護用レドームを1つ備えること。GNSSアンテナ保護用レドームは鳥類がとまりにくい円錐形に準じた形状とし、径20cm以下、高さ10cm以下のGNSSアンテナ1個の収納が可能であること。

### 3-3. 観測計器容器 1式

- 3-3-1 観測計器容器は内総容積が100リットル以上200リットル以下であ

ること。

- 3-3-2 観測計器容器は3-1-8 作業台床面に固定されていること。
- 3-3-3 観測計器容器は別紙7に示す発注者が支給する観測計器と観測計器用電源機材とを収納し、かつ接続用及び保定用の工具の操作が考慮された寸法であること。
- 3-3-4 観測計器容器は扉を有し、別紙2に示される30年確率風速及び10年確率波高、10年確率周期の条件下でも波浪やその飛沫の浸入を許さない防水構造であること。さらに観測計器容器扉は作業台上の1方向から開閉可能であること。
- 3-3-5 観測計器容器のケーブル引込口はいずれも別紙2で示される30年確率風速及び10年確率波高、10年確率周期の条件下でも波浪やその飛沫の浸入を許さない防水構造であること。観測計器用太陽電池パネルからのケーブル引込口とは別に、GNSS アンテナ及びLTE アンテナからのケーブル引込口とを合計9ヶ所以上備えること。
- 3-3-6 観測計器容器内には、別紙7に示す発注者が供給する観測計器及び観測計器用電源を保定のうえ収容し、これらの接続ケーブル類が別紙2の10年確率風速及び10年確率波高、10年確率周期の条件下の本装置の動揺にあっても遊動しないように容器内及び容器外に保定されること。

#### 3-4. 施設灯 1式

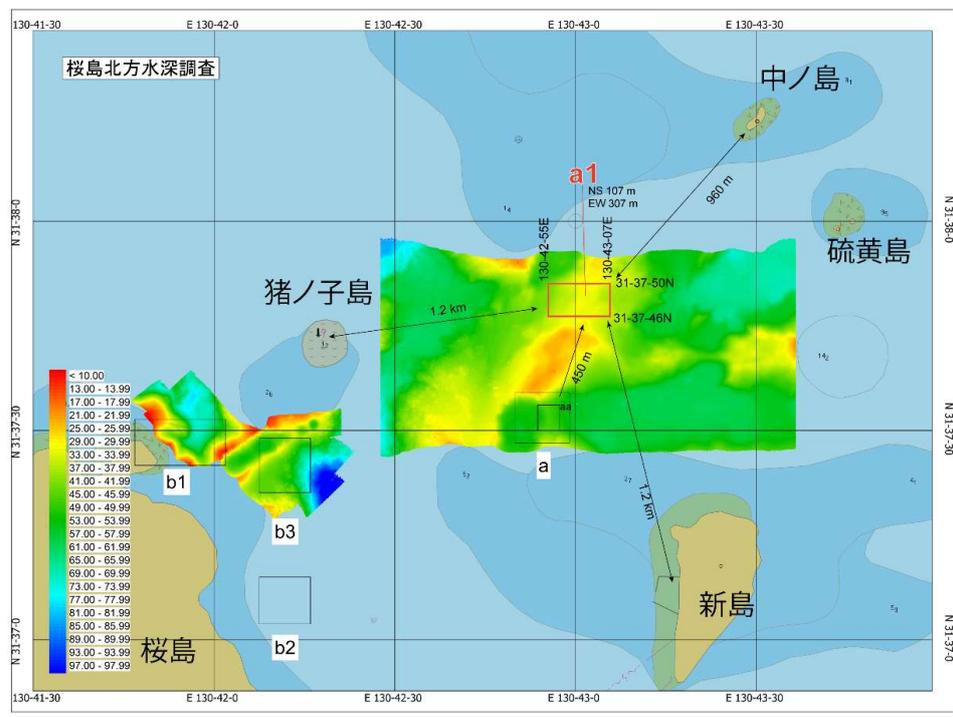
施設灯1式は灯ろう（施設灯本体）と施設灯電源部から構成される。

- 3-4-1 灯ろうはGNSSアンテナ台の下の作業台床面から1.5m以内の高さ取り付け台上に設置され、全ての方角（水平方向360度）から視認できること。
- 3-4-2 施設灯電源部は作業台床面に固定されること。
- 3-4-3 施設灯の電源は観測計器用の電源から独立した太陽電池パネルを用いた回路とし、無日照日数7日間以上に耐える容量を有すること。
- 3-4-4 施設灯は光量15カンデラ以下の白色灯で、点滅パターンはモールス信号の“U”を周期8秒以上15秒以下で繰り返す機能を有すること。

別紙 1 設置予定場所



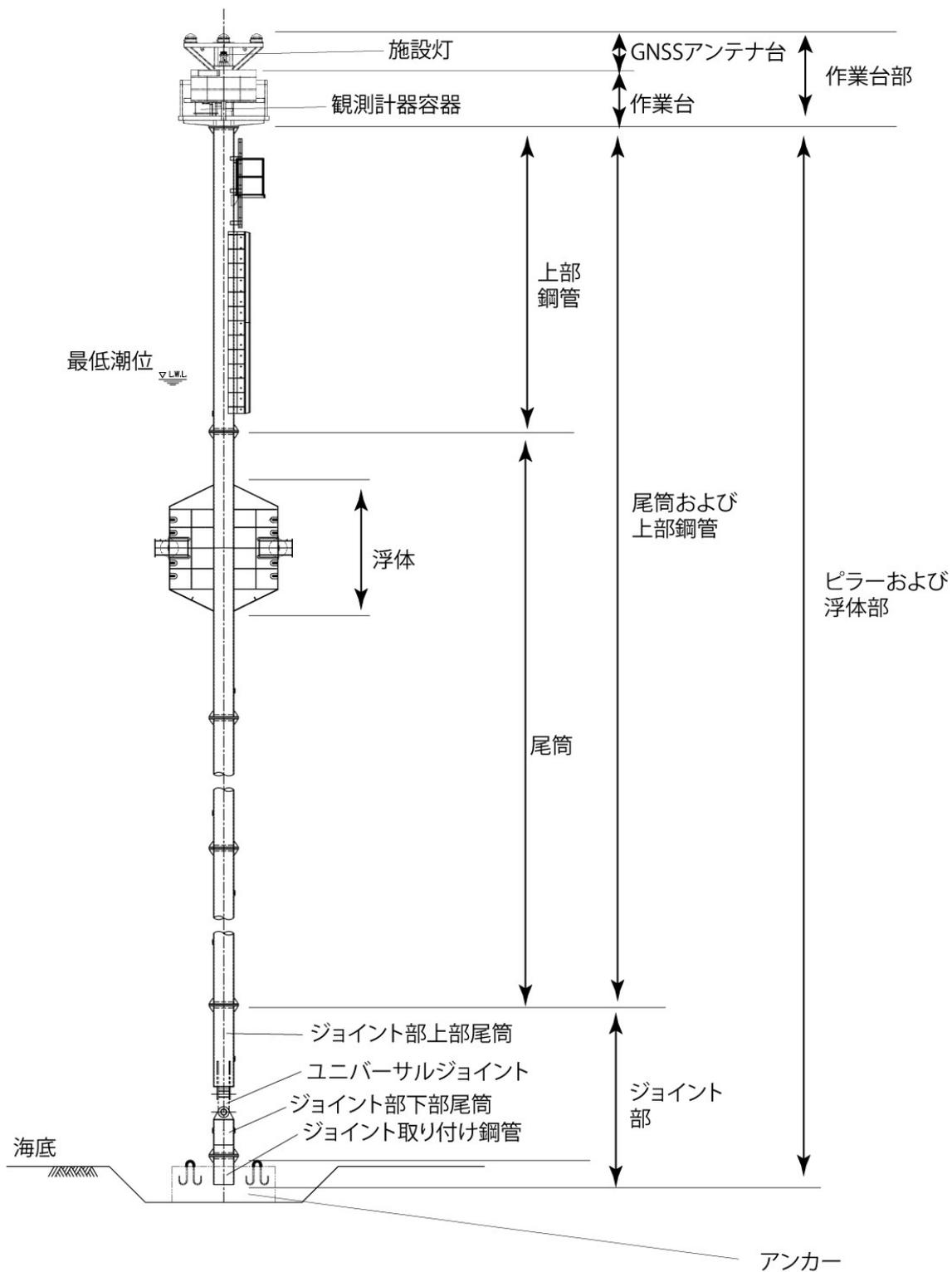
拡大図 a1 が設置予定場所 (北緯 31 度 37 分 46 秒緯線 東経 130 度 42 分 55 秒経線 北緯 31 度 37 分 50 秒緯線 東経 130 度 43 分 07 秒経線で囲まれる海域)。



## 別紙2 環境

自然条件	地形	水深 30m
	地質	粘性土質砂または粘性土礫 混じり砂
	10年確率風速	21.6 m/s (SSE)
	30年確率風速	27.1 m/s (SSE)
	50年確率風速	30.0 m/s (SSE)
	最高潮位	428 cm (鹿児島湾)
	潮流	0.5 kt 以下
	最大フェッチ	13.3 km (NW)
	10年確率波高	1.4 m
	30年確率波高	2.0 m
	50年確率波高	2.5 m
	10年確率周期	3.9 s
	30年確率周期	4.5 s
	50年確率周期	4.9 s

別紙3 部位説明図



#### 別紙4 参考図

(図面は添付資料2\_詳細図を参照のこと)

##### 一覧

- ①全体組立図
- ②上部鋼管詳細図
- ③尾筒鋼管詳細図
- ④浮体部詳細図 (その1)
- ⑤浮体部詳細図 (その2)
- ⑥浮体部詳細図 (その3)
- ⑦昇降梯子詳細図 (その1)
- ⑧昇降梯子詳細図 (その2)
- ⑨ジョイント詳細図
- ⑩アルミニウム合金陽極配置図
- ⑪アンカー図
- ⑫作業台図

別紙5 塗装仕様

部位		塗装仕様
外面	作業台部 上部鋼管 (LWLより上部)	前処理：パワーツール
		下塗り：ジンクリッチプライマ 75 $\mu\text{m}$ / 1回
		下塗り：エポキシ樹脂ペイントエアレス 総膜厚200 $\mu\text{m}$ (2回 $\times$ 100 $\mu\text{m}$ / 回)
		中塗り：白色 ポリウレタン樹脂ペイントエアレス 30 $\mu\text{m}$ / 1回
	上塗り：白色 ポリウレタン樹脂ペイントエアレス 30 $\mu\text{m}$ / 1回	
	浮力体 尾筒 ジョイント部 上部鋼管 (LWLより下部)	前処理：パワーツール
		下塗り：変性エポキシ樹脂ペイントエアレス 総膜厚300 $\mu\text{m}$ (3回 $\times$ 100 $\mu\text{m}$ / 回)

なお、下記の場所は塗装がなくてもよい。

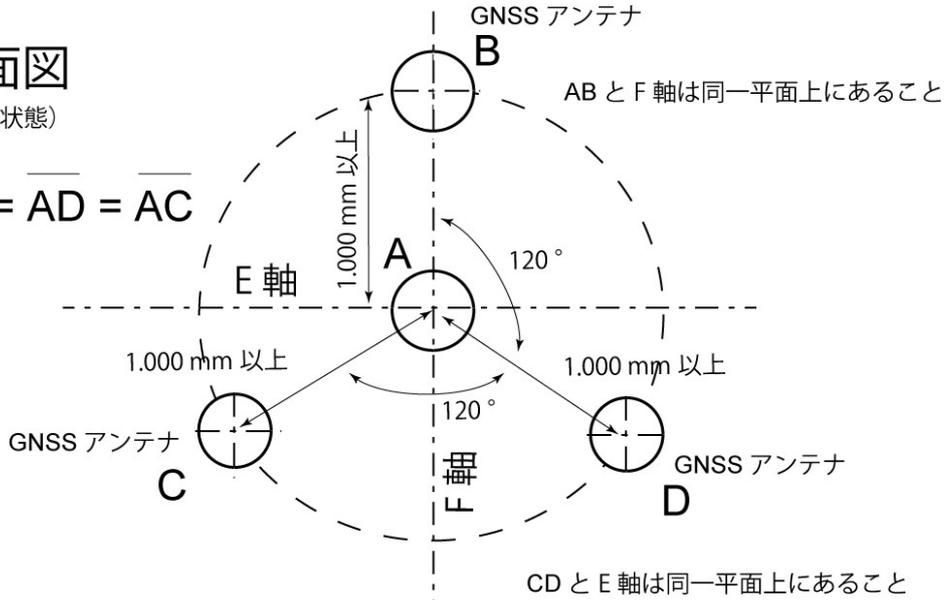
- ・溶接で構成された気密構造の内面。
- ・支柱パイプの内側など手が届かない面。

別紙6 GNSSアンテナ配置

上面図

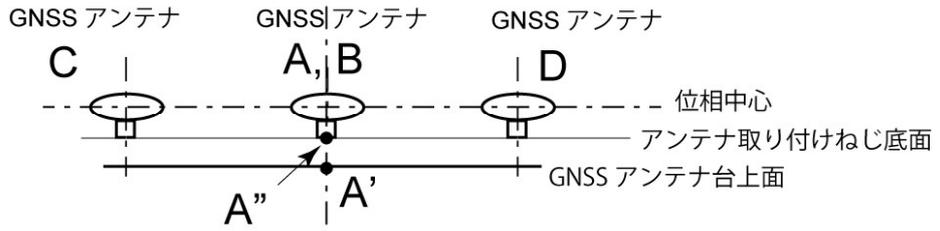
(直立状態)

$$\overline{AB} = \overline{AD} = \overline{AC}$$

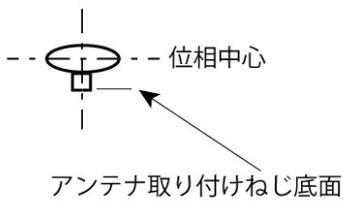


側面図

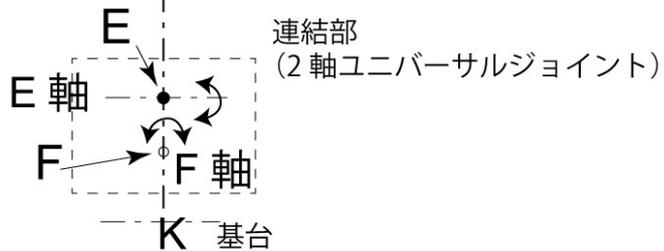
(直立状態)



GNSS アンテナ個別図



ピラー軸



別紙 7. 搭載予定の観測機器及び観測機器用電源機材

区分	名称	製品名	製造者	数量	装着場所	備考
観測計器	GNSS 受信機本体	PwrPak-7D	NovAtel 社	2	観測計器容器内	電源ケーブル（片側バラ片側コネクタ）付きで供給
	GNSS アンテナ	GNSS-802	NovAtel 社	4	GNSS アンテナ台	アンテナケーブル（10m 長両端コネクタ付き）とともに供給
	モバイルルータ	AS-250	センチュリーシステムズ社	1	観測計器容器内	
	モバイルルータアンテナ	FMM800W-4T-10M-BP	日精社	2	作業台上 LTE アンテナ台	アンテナケーブル（10m 長ルータ側コネクタ）付きで供給
観測計器用電源機材	太陽電池パネル	DBG100-12	電菱社	3	作業台上太陽電池パネル架台	
	チャージコントローラ	PV-1230D1AB	未来社	1	観測計器容器内	
	バッテリー	DLB-G24-12V	Discovery 社	3	観測計器容器内	

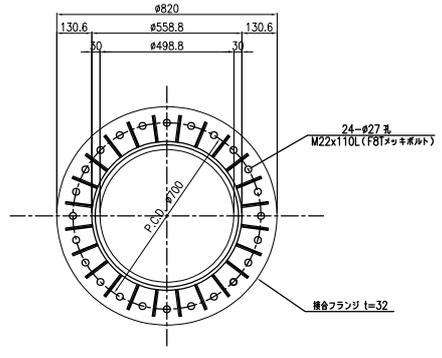
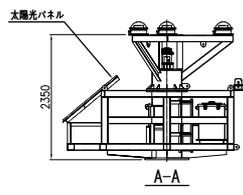
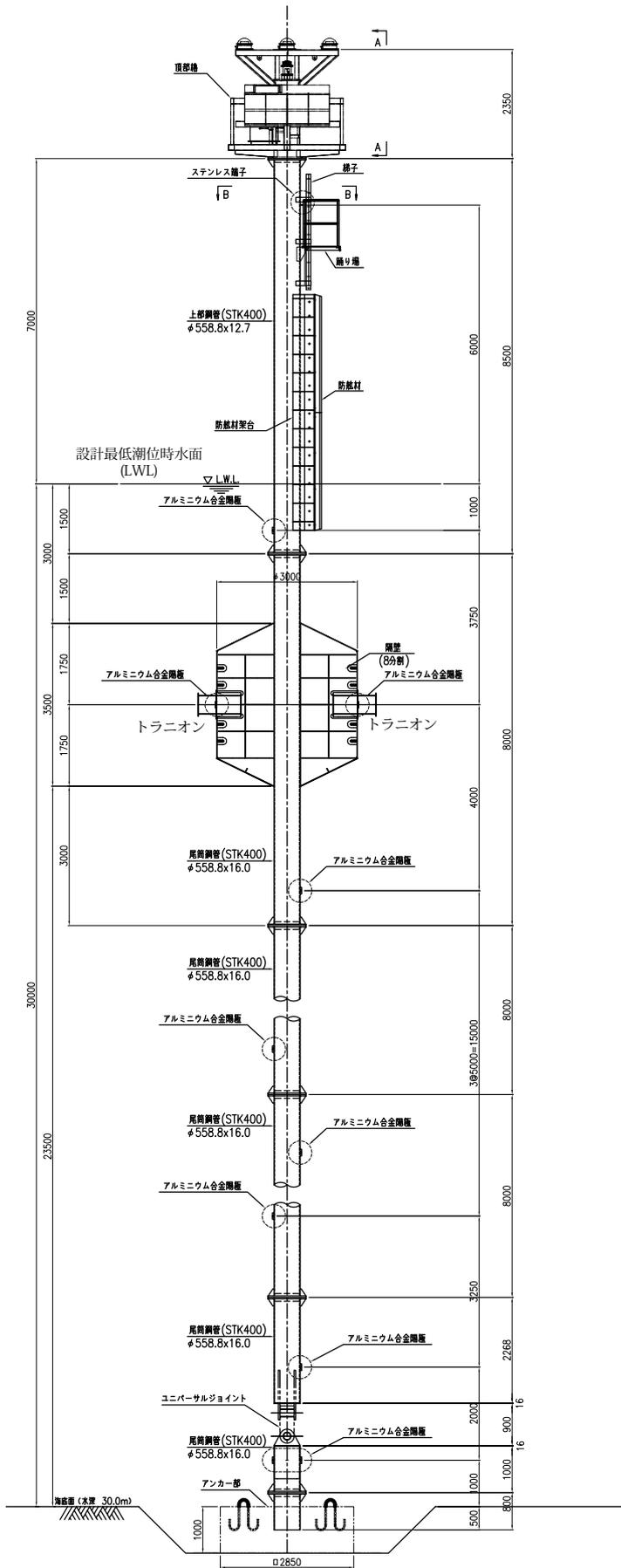
なお、上記にない接続ケーブルは必要に応じて製作し、結線に用いること。結線の組み合わせは発注者が指示する。

添付資料

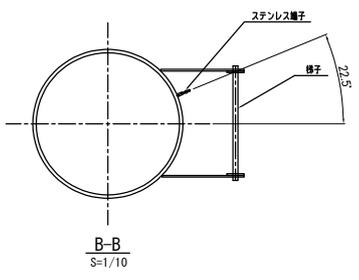
海底地盤變動觀測裝置

参考図

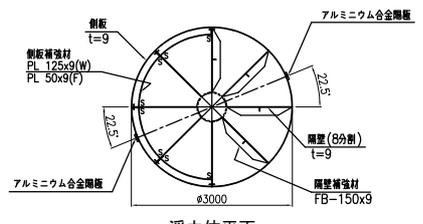
① 全体組立図 S=1/50



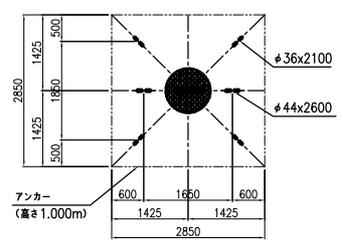
鋼管接合フランジ平面 S=1/10



B-B S=1/10

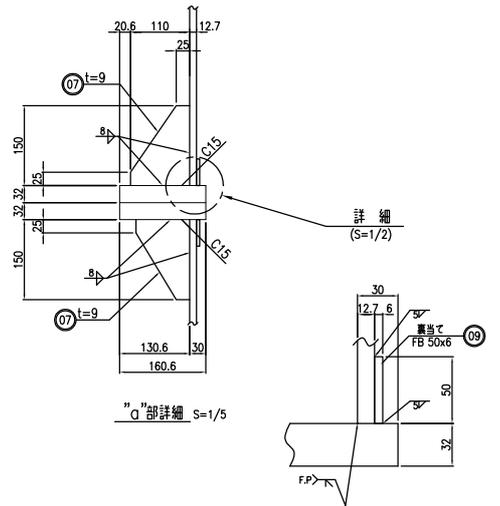
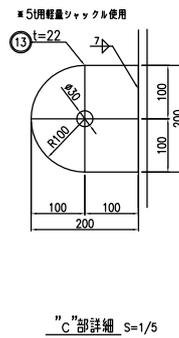
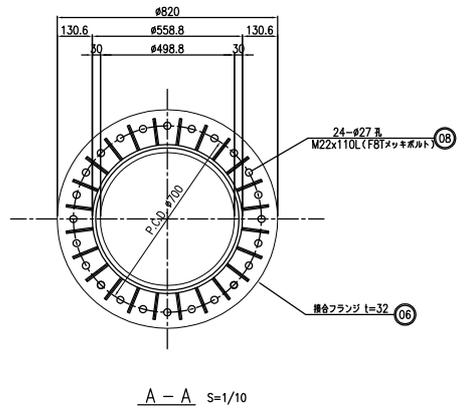
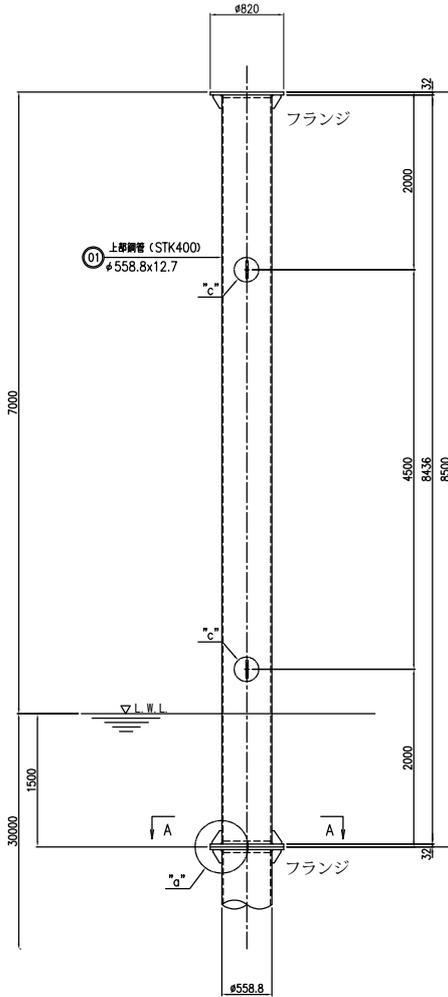


浮力体平面

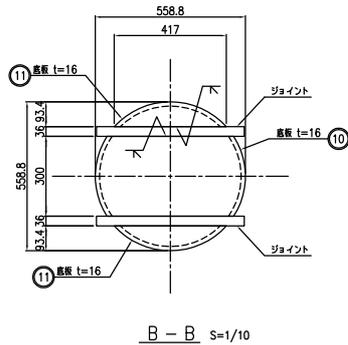
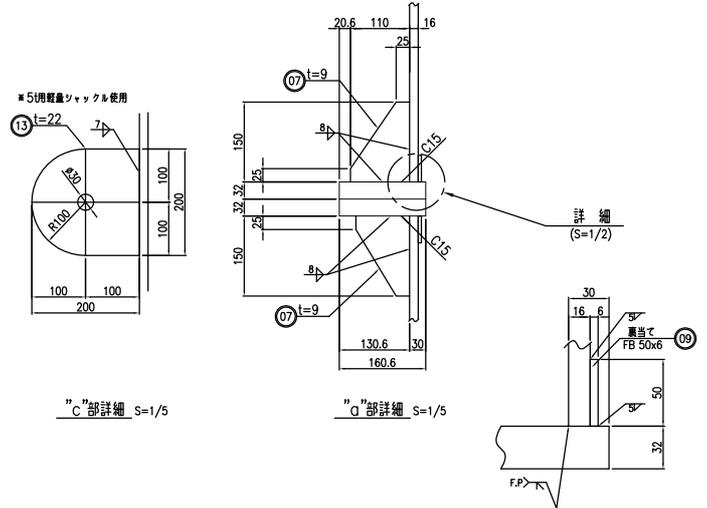
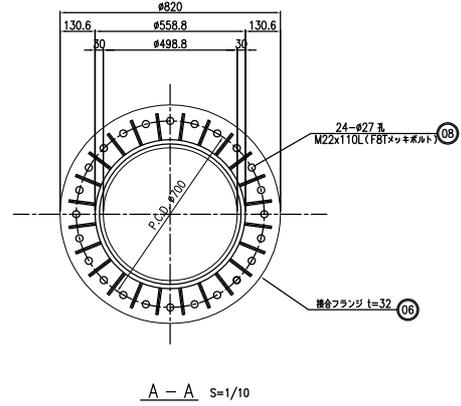
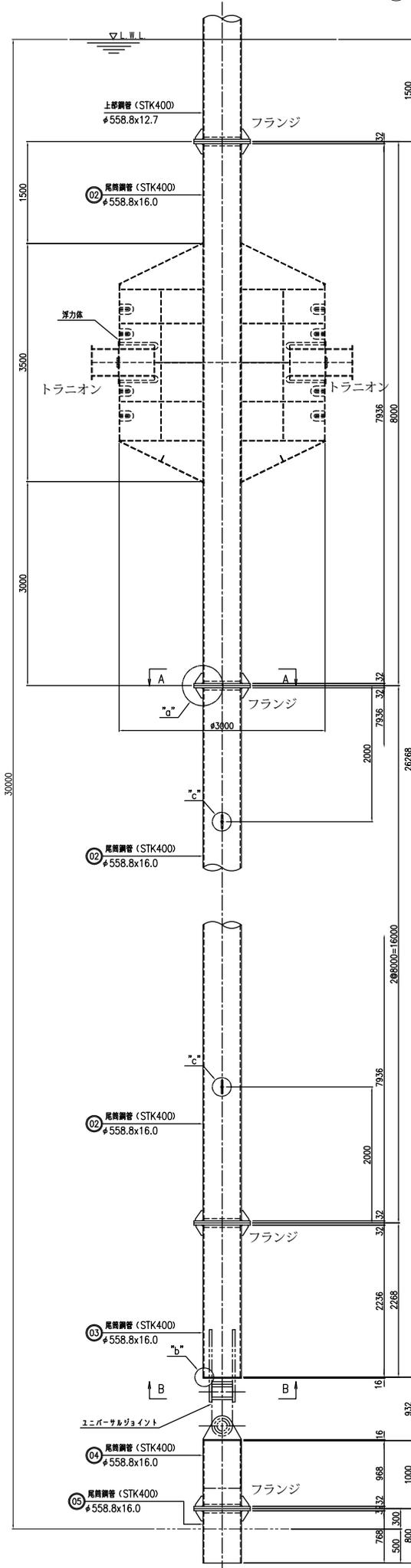


アンカー平面

注)  
 1. 特記なき材質は全てSS400とする。  
 2. 特記なきスカーップは全てR25とする。  
 その他コーナーカットは10Cとし溶接にて埋戻しとする。  
 3. 鋼材のコーナー部には安全性を考慮し2Cを施工しておくこと。



- 注)
1. 特記なき材質は全てSS400とする。
  2. 特記なきスクラップは全てR25とする。
  3. 鋼材のコーナー部には安全性を考慮し2Cを施工しておくこと。

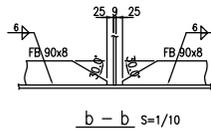
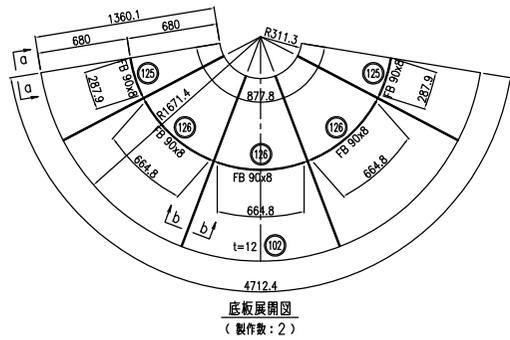
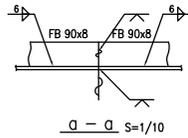
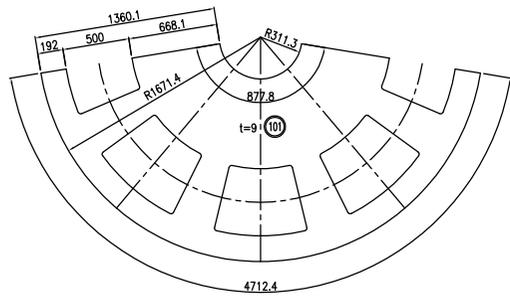
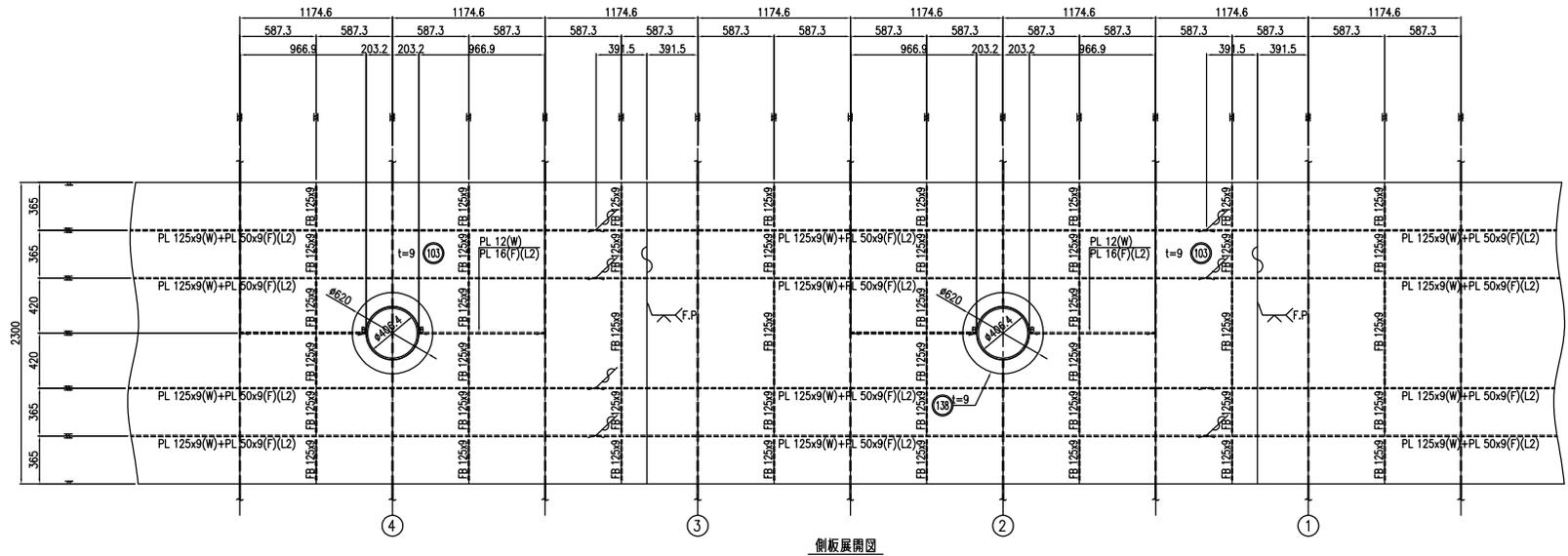


- 注)
1. 特記なき材質は全てSS400とする。
  2. 特記なきスカーフは全てR25とする。  
その他コーナークットは10Cとし溶接にて埋戻しとする。
  3. 鋼材のコナー部には安全性を考慮し2Cを施工しておくこと。



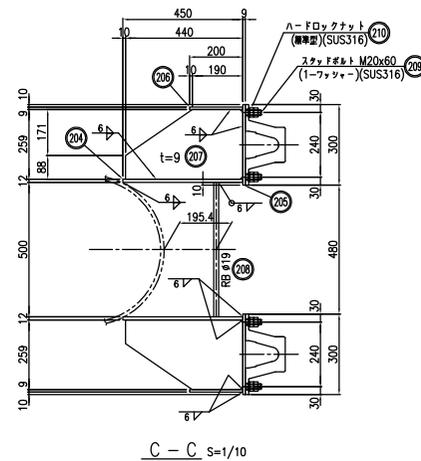
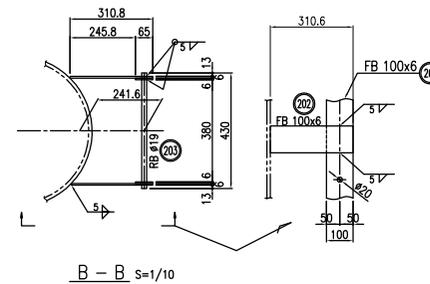
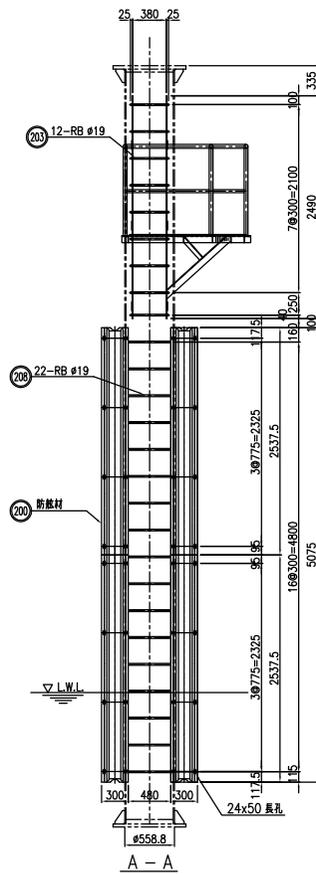
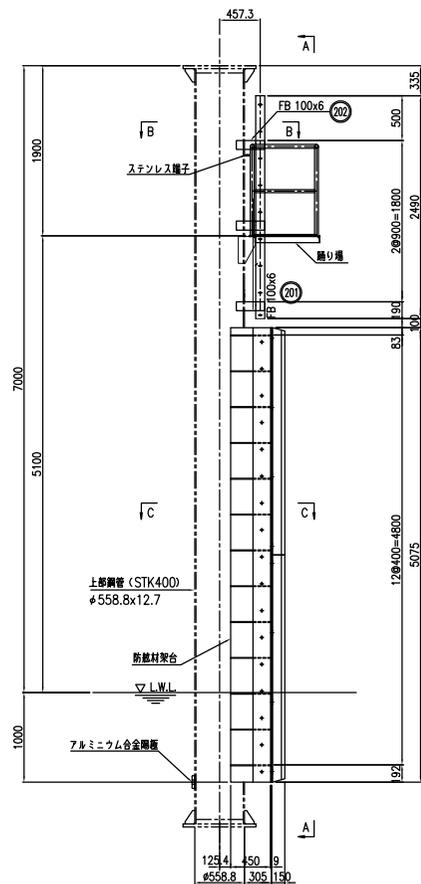


⑥ 浮体部詳細図 (その3) S=1/20



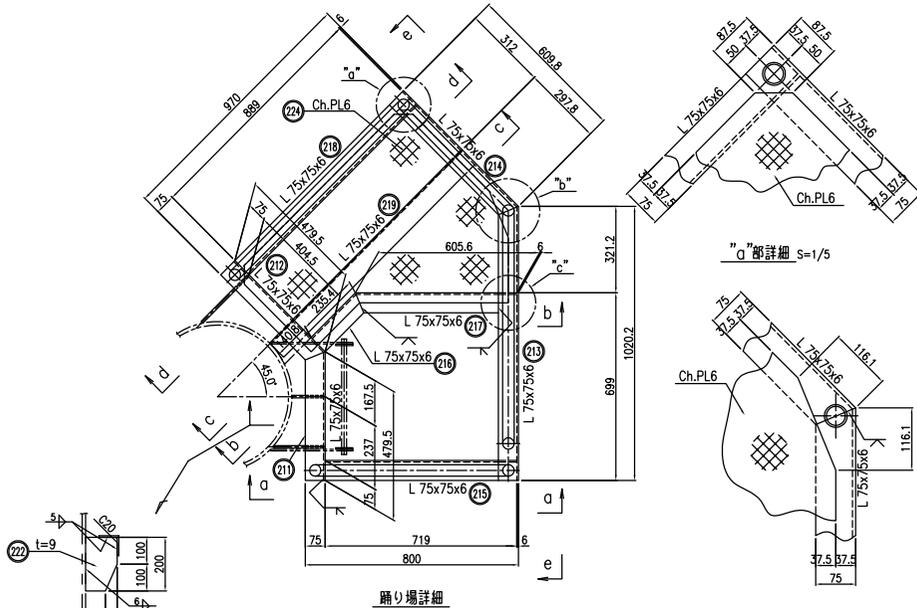
- 注)
1. 特記なき材質は全てSS400とする。
  2. 特記なきスクラップは全てR25とする。  
その他コーナーカットは10Cとし溶接にて埋戻しとする。
  3. 鋼材のコナ部には安全性を考慮し2Cを加工しておくこと。

⑦ 昇降梯子詳細図(その1) S=1/30

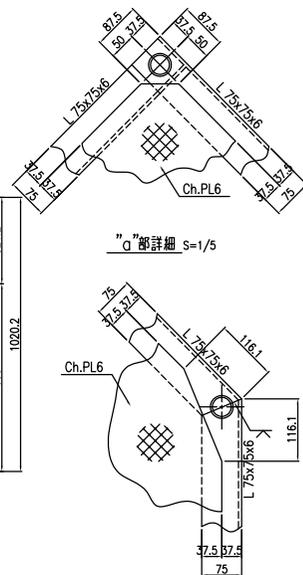
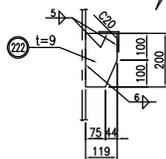


- 注)
1. 特記なき材質は全てSS400とする。
  2. 特記なきスカフツは全てR25とする。  
その他コーナークットは10Cとし溶接にて埋戻しとする。
  3. 鋼材のコーナー部には安全性を考慮し2Cを施工しておくこと。

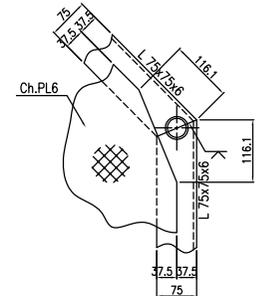
⑧ 昇降梯子詳細図(その2) S=1/10



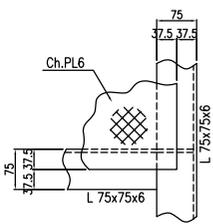
踊り場詳細



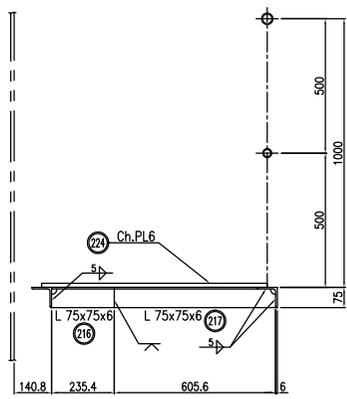
"a-a"部詳細 S=1/5



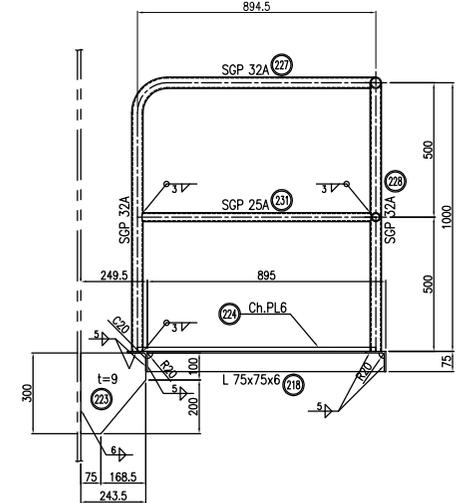
"b-b"部詳細 S=1/5



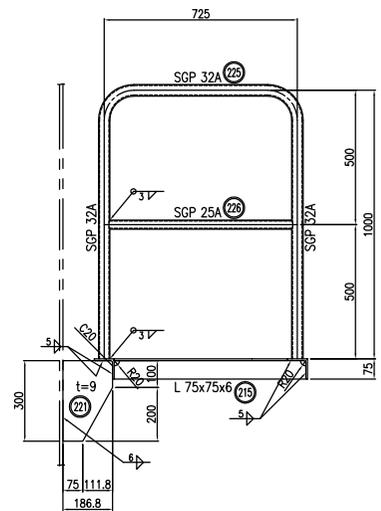
"c-c"部詳細 S=1/5



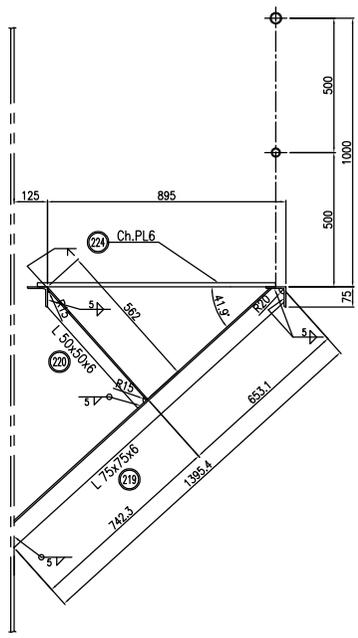
b - b



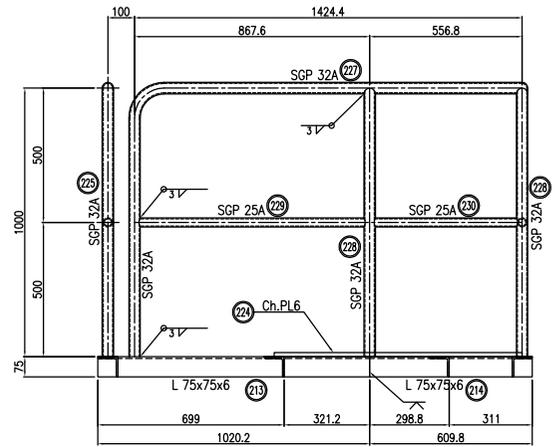
d - d S=1/10



d - d

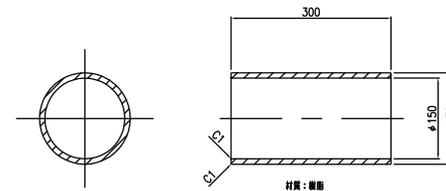
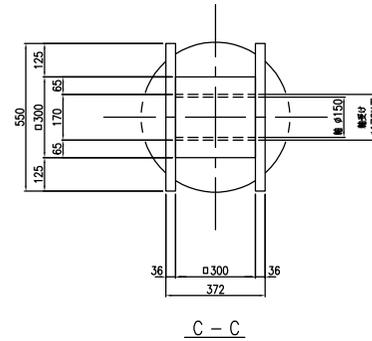
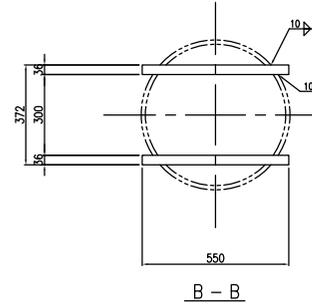
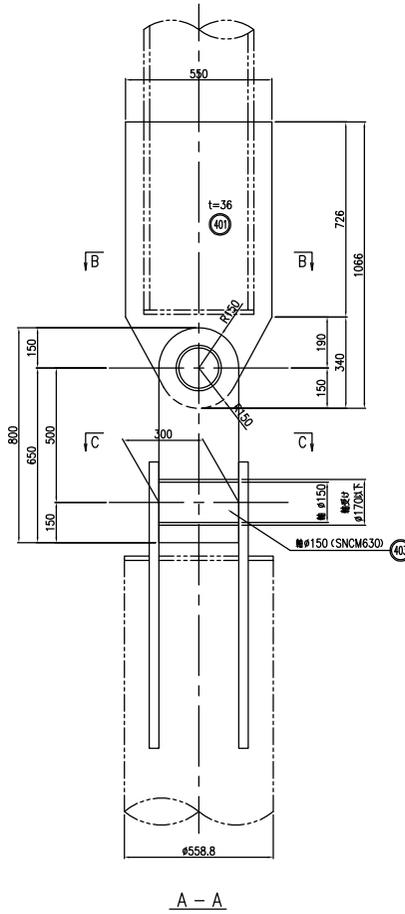
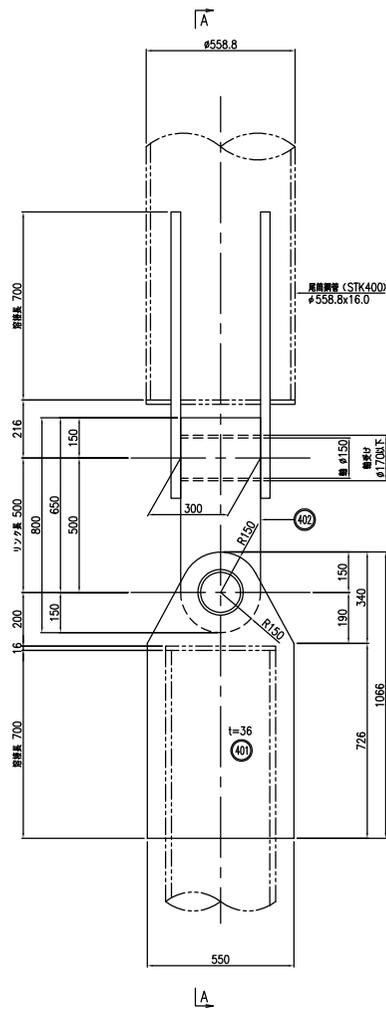


c - c



e - e S=1/10

- 注)
1. 特記なき材質は全てSS400とする。
  2. 特記なきスカートは全てR25とする。  
その他コーナーカットは10Cとし溶接にて埋戻しとする。
  3. 鋼材のコーナー部には安全性を考慮し2Cを施工しておくこと。

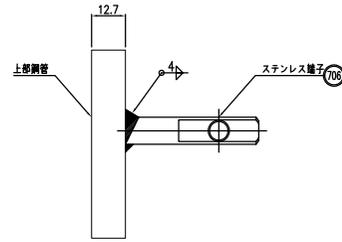
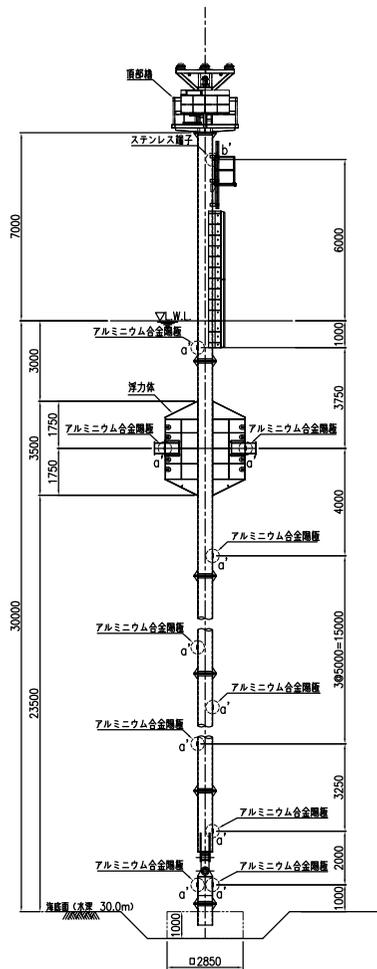


軸受け詳細 S=1/5

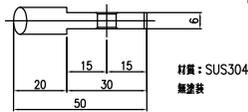
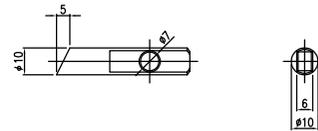
⑩

- 注)
1. 特記なき材質は全てSS400とする。
  2. 特記なきスカフは全てR25とする。  
その他コーナーカットは10Cとし溶接にて埋戻しとする。
  3. 鋼材のコーナー部には安全性を考慮し2Cを施工しておくこと。

⑩ アルミニウム合金陽極配置図 S=1/100



b 詳細図 S=1/1

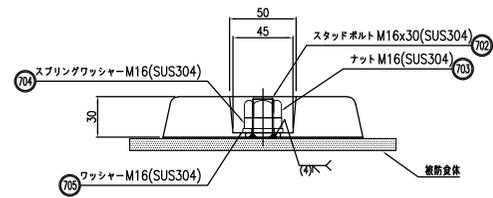
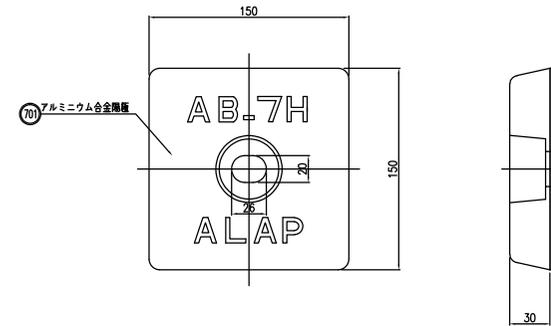


ステンレス継手詳細図 S=1/1

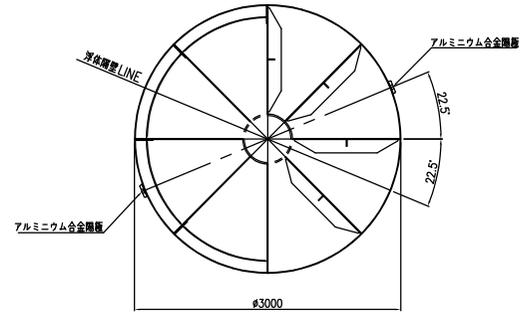
706



断面配置図 S=1/30



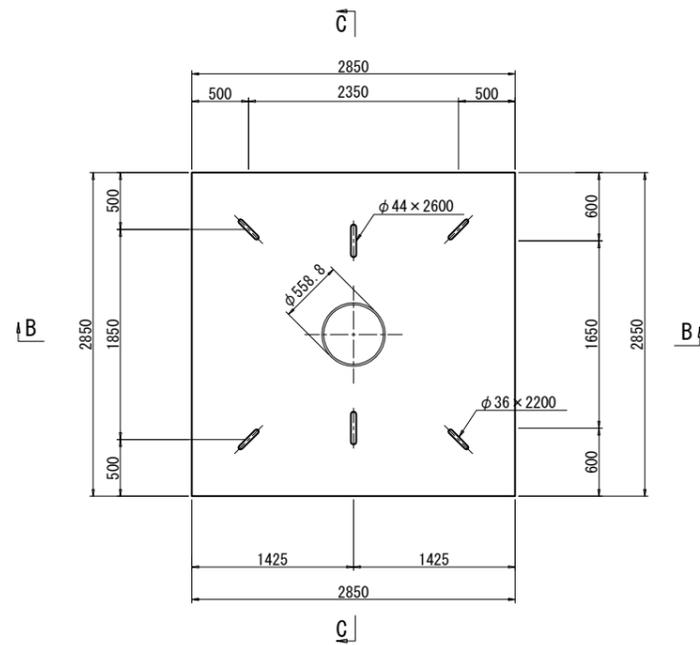
a' アルミニウム合金陽極詳細図(取り付け断面図) S=1/2  
(製作数: 10)



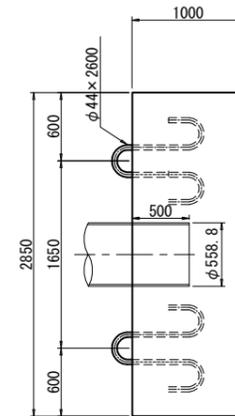
浮力体平面 S=1/30

⑪ アンカー図 S=1/30

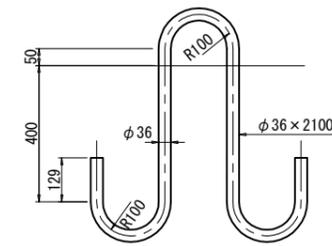
Sect. A-A



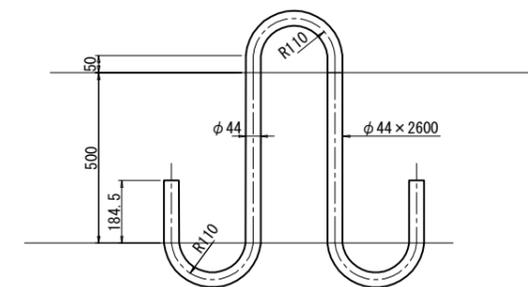
Sect. C-C



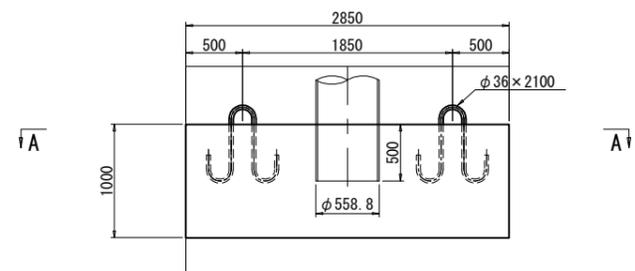
吊筋詳細図 S=1/10  
(4点吊用 φ36 x 2100)



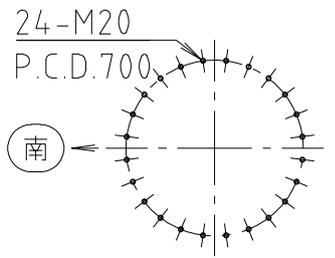
吊筋詳細図 S=1/10  
(2点吊用 φ44 x 2600)



Sect. B-B

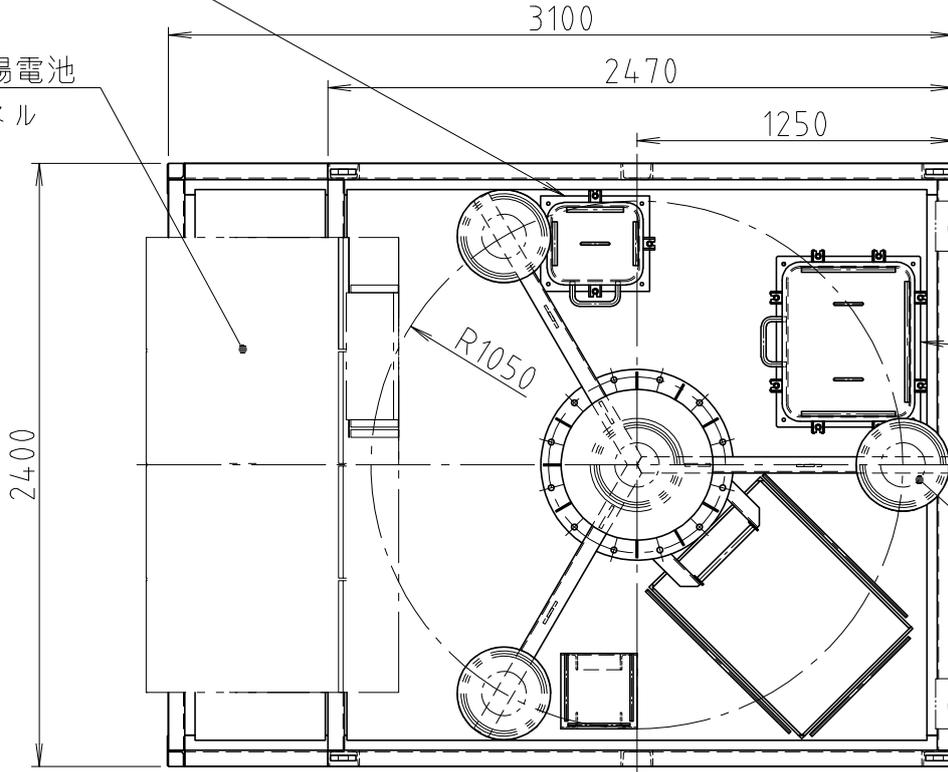


# ⑫ 作業台図



航路標識用  
電源ケース

太陽電池  
パネル



取付用ボルト位置図

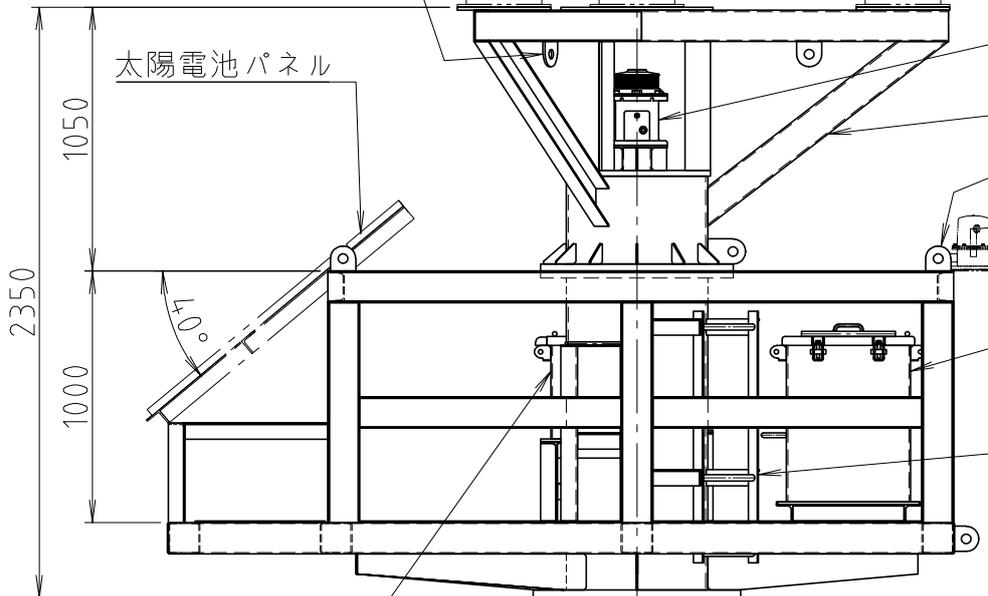
LTEアンテナ  
(2個)

観測計器容器

GNSSアンテナ  
(4個)

安全帯用金具  
(3箇所)

太陽電池パネル



GNSSアンテナ  
(4個)

灯ろう

上部構造

吊環

LTEアンテナ  
(2個)

観測計器容器

梯子

航路標識用電源ケース

全備質量：約2.2 ton

主要材質：一般構造用圧延鋼材

添付資料

海底地盤變動觀測裝置  
設計計算書 (L. W. L)

2021年10月

## 目次

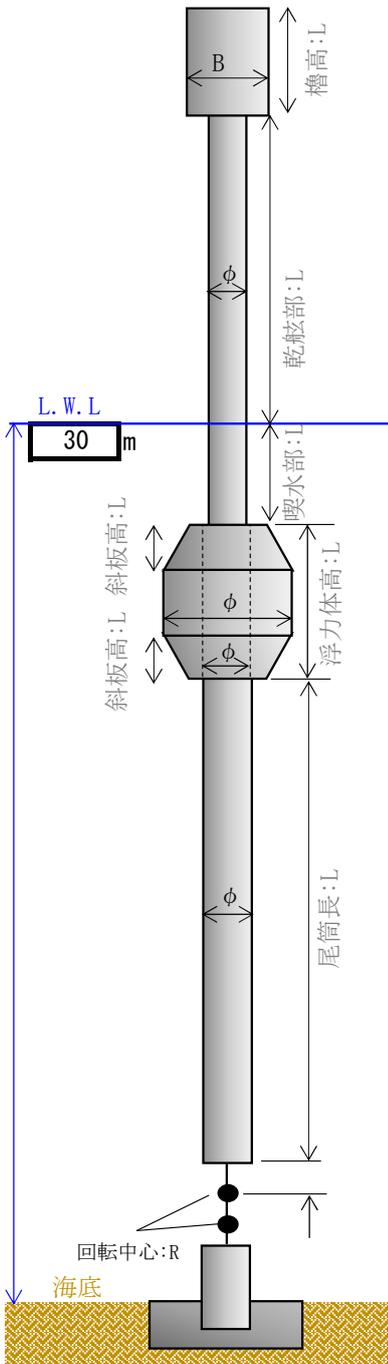
設計結果の概略	…	3
1. 設計条件	…	7
2. 施設諸元	…	8
3. 係留設計	…	9
1) 浮体の傾き		
2) ジョイント部の荷重		
3) 余剰浮力の照査		
4) アンカー部の荷重		
4. 安定性の確認	…	12
1) 設計荷重の整理		
2) 風荷重		
3) 檣の水没角度		
4) モーメントのつりあい角度		
5. 構造照査	…	16
1) 外力条件		
2) 荷重の整理		
3) 設計断面力の算出		
4) 断面性能		
5) 強度照査		
6) 座屈照査		
6. 水圧照査	…	21
1) 浮力体-上面板		
2) 浮力体-底板		
3) 浮力体-側板		
4) 浮力体-隔壁		
5) 上部鋼管		
6) 尾筒		

## 参照図書

- ① MF21 浮魚礁設計・施工技術基準 (社)マリノフォーラム21(平成4年3月)
- ② 漁港・漁場の施設の設計参考図書 2015年版 (社)全国漁港漁場協会
- ③ 道路橋示方書・同解説 I 共通編・II 鋼橋編 (社)日本道路協会(平成14年3月)

# 設計結果の概略

施設概略図



槽 & 搭載機器	2500	[kg]
槽幅B	3.1	[m]
槽高L	2.51	[m]

φ 558.8x12.7		
上部鋼管 φ	0.5588	[m]
t	12.7	[mm]
乾舷部L	7	[m]
喫水部L	3	[m]

浮力体 φ	3.0	[m]
浮力体全高L	3.5	[m]
(斜板高L)	0.6	[m]
斜板 φ	0.5588	[m]

φ 558.8x16		
尾筒 φ	0.5588	[m]
t	16	[mm]
L	21.3	[m]

尾筒下端～		
上部回転中心までの長さL	0.2	[m]
ジョイントリンク	300	[mm角]

上部鋼管		照査値	許容値	判定
構造	曲げ	2.8	< 210	OK
	せん断	0.5	< 120	OK
	座屈	-	< -	OK
水圧	円周方向	0.7	< 210	OK
	高さ方向	0.3	< 210	OK
	シェル圧壊	31.2	< 2.E+10	OK
合力	圧縮	3.0	< 210	OK
	引張	2.8	< 210	OK
	二軸応力状態	0.00	< 1.2	OK

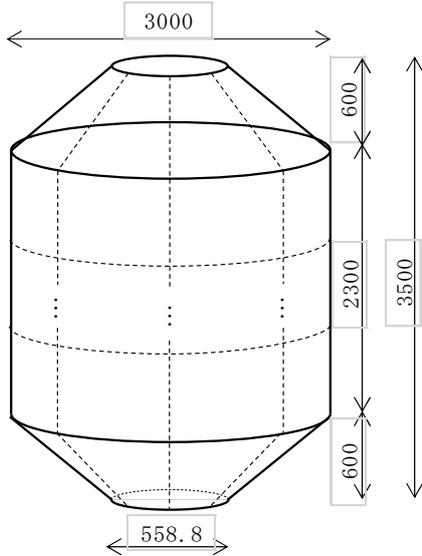
	照査値	許容値	判定
余剰浮力	54.1	> 3.3	OK

	照査値	許容値	判定
静的安定性	9.5	< 34.4	OK

尾筒		照査値	許容値	判定
構造	曲げ	31.8	< 210	OK
	せん断	3.7	< 120	OK
	座屈	7.0	< 19.7	OK
水圧	円周方向	4.9	< 210	OK
	高さ方向	2.5	< 210	OK
	シェル圧壊	280.9	< 3.E+10	OK
合力	圧縮	34.3	< 210	OK
	引張	24.8	< 210	OK
	二軸応力状態	0.02	< 1.2	OK

# 設計結果の概略

## 浮力体フルム構造

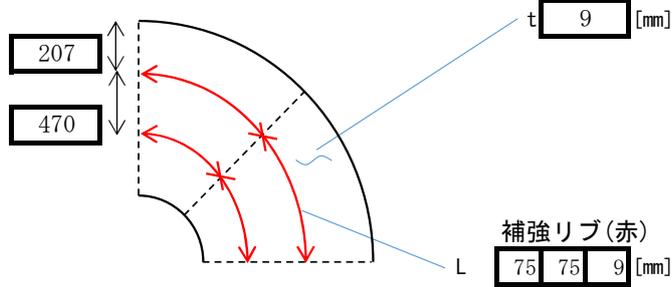


高  
 浮体 3500 [mm]  
 円柱 2300 [mm]  
 斜板 600 [mm]

径  
 浮体径 3000 [mm]  
 底板 558.8 [mm]  
 中央鋼管 558.8 [mm]

水密区画数  
 n 8 個

## 上面鋼板



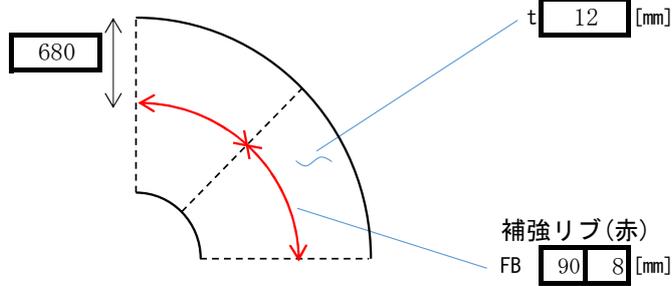
OK ←

四辺固定板	照査値	許容値	判定
0x曲げ	4.7 <	210	OK
0y曲げ	1.9 <	210	OK
A曲げ	9.6 <	210	OK
B曲げ	6.6 <	210	OK
せん断	0.4 <	120	OK

OK ←

はり	照査値	許容値	判定
曲げ(外側圧縮)	17.5 <	210	OK
曲げ(内側引張)	88.8 <	210	OK
せん断	10.4 <	120	OK
二軸応力	0.02 <	1.2	OK

## 底板



OK ←

四辺固定板	照査値	許容値	判定
0x曲げ	49.6 <	210	OK
0y曲げ	23.0 <	210	OK
A曲げ	101.1 <	210	OK
B曲げ	72.3 <	210	OK
せん断	1.2 <	120	OK

OK ←

はり	照査値	許容値	判定
曲げ(外側圧縮)	23.6 <	210	OK
曲げ(内側引張)	115.7 <	210	OK
せん断	21.7 <	120	OK
二軸応力	0.33 <	1.2	OK

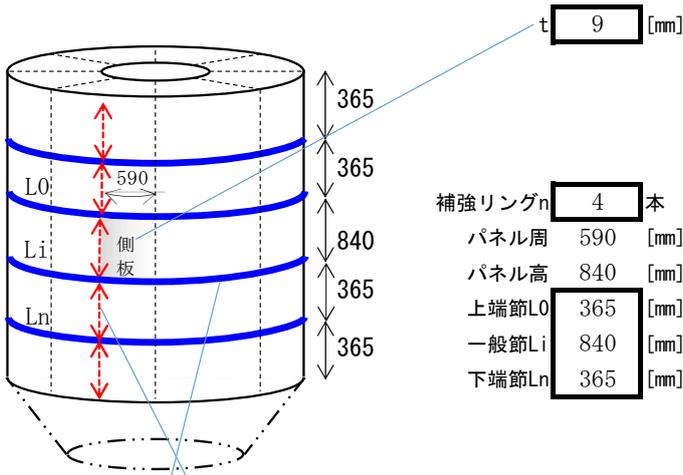
円錐 12 [mm]

OK ←

円錐シェル	照査値	許容値	判定
周方向	18.6 <	210	OK
径方向	9.0 <	210	OK
二軸応力	0.01 <	1.2	OK
圧壊	0.066 <	2.5	OK

# 設計結果の概略

## 側板



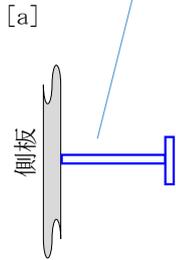
OK ←

円筒シェル	照査値	許容値	判定
シェル円周	10.0	< 210	OK
シェル長手	5.0	< 210	OK
圧壊	60.2	< 5526	OK

OK ←

四辺固定板	照査値	許容値	判定
0x曲げ	47.9	< 210	OK
0y曲げ	29.1	< 210	OK
A曲げ	99.6	< 210	OK
B曲げ	78.0	< 210	OK
せん断	1.5	< 120	OK

## 補強リング



[a]

ウェブ	125 × 9
フランジ	50 × 9

OK ←

シェル構造	照査値	許容値	判定
梁曲げ(側板)	17.1	< 210	OK
梁曲げ(補強材)	57.2	< 210	OK
梁せん断	16.8	< 120	OK
シェル円周	37.8	< 210	OK
円周座屈	37.8	< 127.4	OK
合力(円周)	54.9	< 210	OK
合力(長手)	73.0	< 210	OK
二軸応力	0.32	< 1.2	OK

補強リブ(赤)

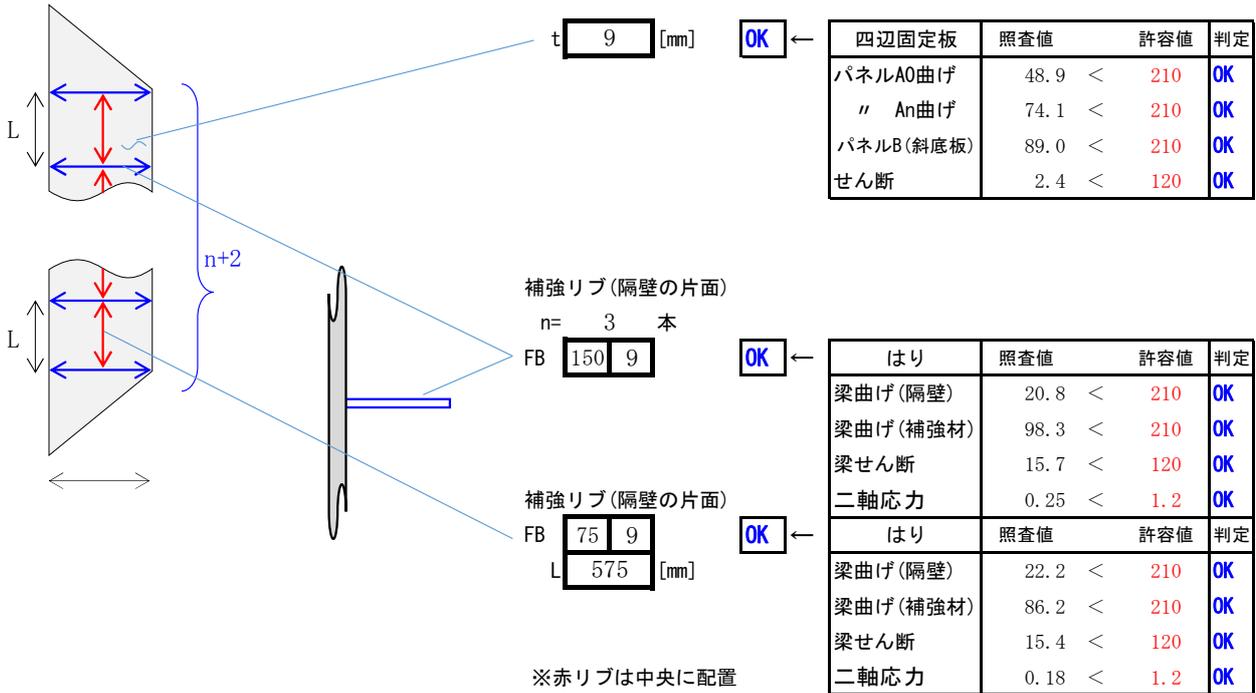
FB	125 × 9 [mm]
----	--------------

OK ←

はり	照査値	許容値	判定
梁曲げ(側板)	15.4	< 210	OK
梁曲げ(補強材)	61.8	< 210	OK
梁せん断	11.7	< 120	OK
合力(円周)	89.6	< 210	OK
合力(長手)	20.4	< 210	OK
二軸応力	0.29	< 1.2	OK

# 設計結果の概略

## 水密隔壁



## 1.設計条件

### 1. 設計条件

#### 1) 施設の位置

鹿児島県錦江湾

#### 2) 気象・海象条件

- ① 水深  $h = 30 \text{ m}$
- ② 設計波浪  
最大波高 $H_{\max} = 2.8 \text{ m}$   
有義波高 $H_{1/3} = 1.4 \text{ m}$  有義波周期  $T_{1/3} = 3.9 \text{ sec}$   
波長  $L = 23.7 \text{ m}$
- ③ 設計風速  $U_{10} = 21.6 \text{ m/sec}$  ,  $U_{\max} = 28.1 \text{ m/sec}$   
 $U_{60} = 20.5 \text{ m/sec}$
- ④ 海水流速 (潮流速)  $0.5 \text{ Knot} [ 0.26 \text{ m/sec}]$
- ⑤ 吹送流速  $1.2 \text{ Knot} [ 0.62 \text{ m/sec}]$
- ⑥ 海水密度  $1.03 \text{ t/m}^3$

## 2.諸元|3.係留設計

### 2. 施設諸元

	部位	外径	区間長	水深(上端)	排水容積	表面積	自重
		D[m]	L[m]	Z[m]	V[m <sup>3</sup> ]	A[m <sup>2</sup> ]	[t]
乾舷	檣	3.1	2.51	-9.51	-	-	2.50
	上部鋼管	0.5588	7.00	-7.00	-	-	2.52
喫水	上部鋼管	0.5588	3.00	0.00	0.7	5.3	1.07
	浮力体	3.0	3.50	3.00	19.7	33.0	7.54
	尾筒	0.5588	21.30	6.50	5.2	37.4	5.32
	ジョイント	0.300	0.20	27.80	0.0	0.4	0.61
	アンカー	-	-	30.00	-	-	-

鋼材密度  $\rho_s = 7.85$  [t/m<sup>3</sup>] = 77.0 [kN/m<sup>3</sup>]

上部鋼管厚  $t = 12.7$  [mm]

尾筒管厚  $t = 16$  [mm]

側板厚  $t = 9$  [mm]

隔壁厚  $t = 9$  [mm]

### 抗力係数、設計流速など

	部位	生物付着後				風速 $U_{max}$ [m/s]	潮流速 $\nu_T$ [m/s]	吹送流速 $\nu_B$ [m/s]	波の流速 $\nu_w$ [m/s]
		外径 D' [m]	排水容積 V' [m <sup>3</sup> ]	投影面積 A' [m <sup>2</sup> ]	抗力係数 $C_D$				
乾舷	檣	-	-	2.6	-	28.1	-	-	-
	上部鋼管	-	-	3.9	-	28.1	-	-	-
喫水	上部鋼管	0.70	1.2	2.1	1	-	0.3	0.6	1.1
	浮力体	3.14	27.1	11.0	1	-	0.3	0.6	0.5
	尾筒	0.70	8.2	14.9	1	-	0.2	0.5	0.2
	ジョイント	0.44	0.0	0.1	2	-	0.2	0.3	0.0

### その他定数等

重力加速度  $g = 9.81$  [m/s<sup>2</sup>]

海水密度  $\rho_0 = 1.03$  [t/m<sup>3</sup>] = 10.1 [kN/m<sup>3</sup>]

生物付着量 80 [N/m<sup>2</sup>] (水中)

生物付着厚 70 [mm]

## 2.諸元|3.係留設計

### 3. 係留設計

#### 1) 浮体の傾き

波による変動外力が作用していないとき

係留索の傾き  $\phi$  は、4. 安定性より

$$\phi = 9.55 \text{ [deg]} = 0.17 \text{ [rad]}$$

・潮流、風、吹送流による水平力

$$F = F_0 + F_1 + F_2 = 7.99 \text{ [kN]}$$

・余剰浮力

$$N = F_N - W_S - W_L = 61.6 \text{ [kN]}$$

ただし  $F_N$ : 浮力 (付着生物の体積を含まない)、

$W_S$ : 構造物自重 (質量)、 $W_L$ : 付着生物重量 (水中重量)

		水平外力F			鉛直			
		潮流力 $F_0$ [kN]	風荷重 $F_1$ [kN]	吹送流力 $F_2$ [kN]	浮力 $F_N$ [kN]	生物重量 $W_L$ [kN]	自重 $W_S$ [kN]	余剰浮力 $N$ [kN]
乾 舷	櫓	-	1.57	-	-	-	24.5	-24.5
	上部鋼管	-	0.94	-	-	-	24.7	-24.7
喫 水	上部鋼管	0.07	-	0.41	7.4	0.4	10.5	-3.5
	浮力体	0.36	-	1.90	199.1	2.6	74.0	122.5 ★
	尾筒	0.48	-	2.25	52.8	3.0	52.1	-2.4
	ジョイント	0.00	-	0.01	0.2	0.0	6.0	-5.8
	小計	0.91	2.51	4.57	(全余剰浮力)=			61.6
	合計	7.99			(全余剰浮力-上部鋼管浮力)=			54.1

上表「★」より、浮力体が余剰浮力の大部分を占める。この浮力体は常に水中にあることから、当該構造物は中層浮魚礁に類似するものとし、以下の検討は、中層浮魚礁の設計手順を参考とする。

## 2.諸元|3.係留設計

### 2) ジョイント部の荷重

施設に潮流、風（および吹風流）が作用して $\phi$ 傾いた状態でつりあっているとき、施設に波による外力が一時的に作用することを考える。

外力作用中、 $\phi$ は1)からほとんど変化しないものとし、最も不利な状況として、波外力は1)と同方向に作用するものとする。施設のピッチ回転については、角速度は十分に小さいものとし、向心すなわち施設長手方向としては無視できるものとする。

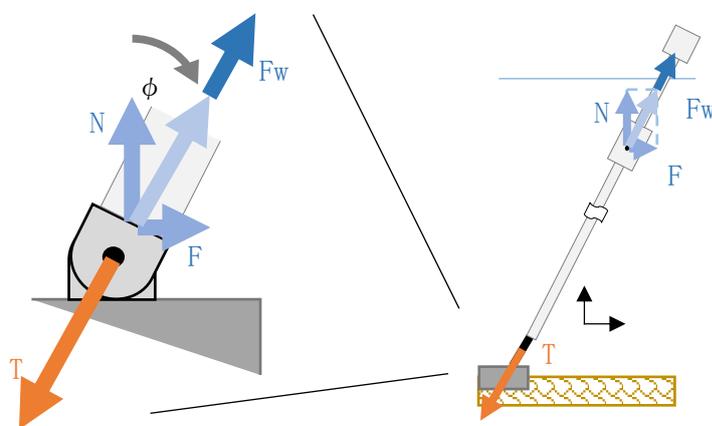
施設に作用する、長手方向の流体力は

$$F_w = \pm F_D = \pm 3.25 \text{ [kN]}$$

$$F_D = (1/2) \rho_0 \Sigma (C_D A') v_w^2 = 3.25 \text{ [kN]}$$

表. 波の粒子速度による抗力

		長手方向
部位		波抗力 $F_D$ [kN]
乾 舷	櫓	-
	上部鋼管	-
喫 水	上部鋼管	1.37
	浮力体	1.47
	尾筒	0.41
	ジョイント	0.00
合計		3.25



以上より、ジョイント部の最大荷重は

$$T_{\max} = N \cos \phi + F \cos(90 - \phi) + F_{w\max} = 65.3 \text{ [kN]}$$

( $N \cos \phi$ : 余剰浮力の長手方向成分)

( $F \cos(90 - \phi)$ : 水平外力の長手方向成分)

## 2.諸元|3.係留設計

### 3) 余剰浮力の照査

緊張係留方式では、係留索に大きな衝撃力が加わらないよう、余剰浮力を十分に確保し、係留索に緊張状態を維持させる必要がある。係留張力が最も小さくなる時、係留索方向の力のつり合い式から

$$T_{\min} = N \cos \phi + (F_w)_{\min} > 0.0$$

$$\Leftrightarrow N > (F_w)_{\max} / \cos \phi$$

$$\therefore N = 54.1 > 3.3 \text{ [kN]}$$

... OK

※ただし、ここで施設が有する余剰浮力は、波の影響を考慮し、上部鋼管の排水容積(浮力)を加味しないものとする。

### 4) アンカー部の荷重

アンカー部の荷重は下記[a][b]の2ケースを考慮する。

#### [a] 上記2)のφ方向にジョイント部最大荷重が作用する場合

$$F_V = \text{最大荷重} \times \cos \phi = 64.4 \text{ kN}$$

$$F_H = \text{最大荷重} \times \sin \phi = 10.8 \text{ kN}$$

#### [b] 滑動方向の外力が最大となる場合

すなわち、鉛直方向に余剰浮力が、水平方向に潮流、風、吹送流、波による外力が作用する場合

$$F_V' = 61.6 \text{ kN}$$

$$F_H' = 11.24 \text{ kN}$$

		水平外力 $F_H'$				
		鉛直方向	水平方向			
	部位	余剰浮力 N[kN]	潮流力 [kN]	風荷重 [kN]	吹送流力 [kN]	波力 [kN]
乾 舷	檣	-24.5	-	1.57	-	-
	上部鋼管	-24.7	-	0.94	-	-
喫 水	上部鋼管	-3.5	0.07	-	0.41	1.37
	浮力体	122.5	0.36	-	1.90	1.47
	尾筒	-2.4	0.48	-	2.25	0.41
	ジョイント	-5.8	0.00	-	0.01	0.00
	合計	61.6	0.91	2.51	4.57	3.25
		11.24				

## 4.安定性の確認

### 4. 安定性の確認

施設に設計荷重が作用した時の静的安定性について検討する。  
 なお、施設はジョイント部が回転中心となり運動するものとする。

#### 1)設計荷重の整理

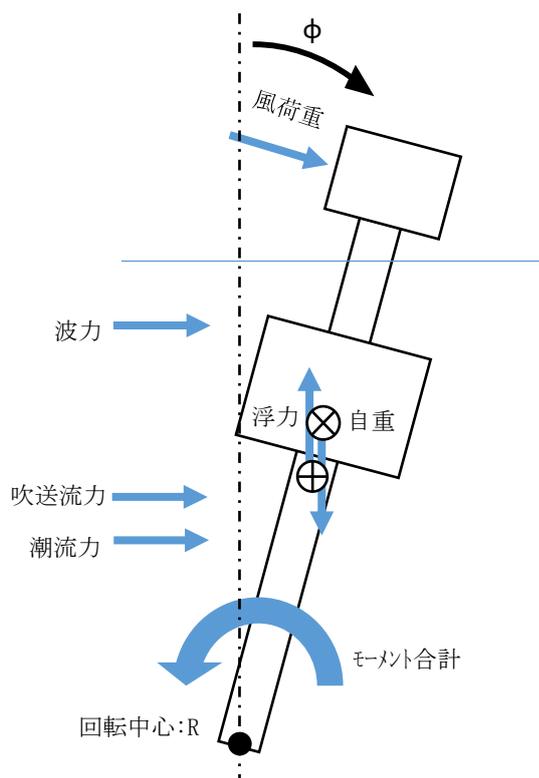
施設が海底に係留されている時、  
 浮力体は常に水面下に位置し、浮力及び浮心位置は常に一定であるとする。

以下、施設に作用する荷重および荷重作用位置について、

	部位	浮力 [kN]	自重※ [kN]	潮流力 [kN]	吹送流力 [kN]	風荷重 [kN]	波力 [kN]	区間中心 位置[m]
乾 舷	檣	-	24.5	-	-	[c] 参照	-	36.3
	上部鋼管	-	24.7	-	-		-	31.5
喫 水	上部鋼管	7.4	10.9	0.07	0.41	-	1.37	26.5
	浮力体	199.1	76.6	0.36	1.90	-	1.47	23.3
	尾筒	52.8	55.1	0.48	2.25	-	0.41	10.9
	ジョイント	0.2	6.0	0.00	0.01	-	0.00	0.1

※自重は付着生物重量を考慮した値である。

※区間中心位置は施設軸方向における回転中心からの距離とする。



	力[kN]	中心[m]
浮力	259.5	20.8
自重	-197.9	21.9
潮流力	-0.91	17.0
吹送流力	-4.57	17.4
風荷重	[c]参照	
波力	-3.25	23.1

※施設を転倒させる荷重は一の値とする。

※中心長さは施設軸方向における  
 回転中心からの距離とする。

## 4.安定性の確認

### 2)風荷重

#### [a] 風圧

風圧Pは、「鋼船規則P編海洋構造物 3章3.2.2風荷重」の計算式を参照する。

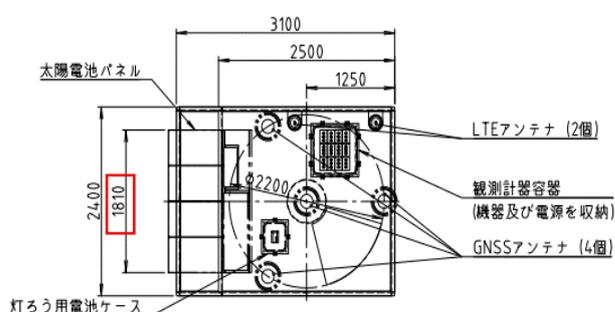
$$P = 0.611 \times C_h \times C_s \times V^2 \quad [\text{N/m}^2]$$

設計風速  $V = U_{\max} = 28.1 \text{ [m/s]}$   
 高度係数  $C_h = 1.00$  (檣、上部鋼管)  
 形状係数  $C_s = 1.25$  (檣)  
                    $0.5$  (上部鋼管)

#### [b] 受圧面積

檣の受圧面積は、①鋼管、②太陽電池パネル、③その他、を対象とする。

③その他については、①+②の受圧面積の30%とみなす。



#### ①鋼管

$$B = 0.5588 \text{ m}$$

$$H = 0.31 \text{ m}$$

$$A_1 = 0.2 \text{ m}^2$$

#### ②太陽電池パネル

$$B = 1.81 \text{ m}$$

$$H = 0.96 \text{ m}$$

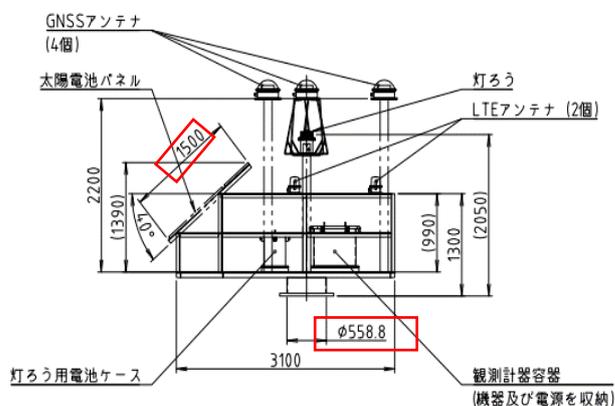
$$A_2 = 1.8 \text{ m}^2$$

#### ③その他 (=①+②の30%)

$$A_3 = 0.6 \text{ m}^2$$

#### ①～③の合計

$$A = 2.6 \text{ [m}^2\text{]}$$



[a][b]より、檣と上部鋼管に作用する風荷重は

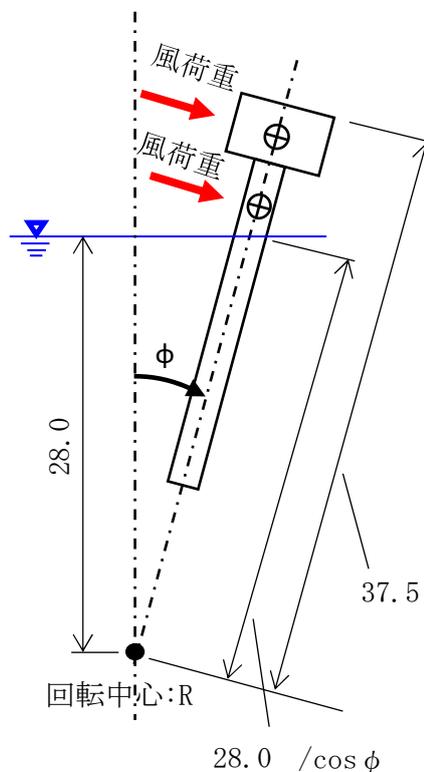
	部位	外径 D[m]	区間長 L[m]	高度係数 Ch	形状係数 Cs	受圧面積 A[m <sup>2</sup> ]	風荷重 F[kN]
乾 舷	檣	-	-	1.00	1.25	2.6	1.57
	上部鋼管	0.5588	7.00	1.00	0.50	3.9	0.94
	合計						2.51

#### 4.安定性の確認

##### [c] 風荷重による傾斜モーメント

風荷重については、傾斜角に応じた風速を算出し、そこからモーメントを求めると以下ようになる。

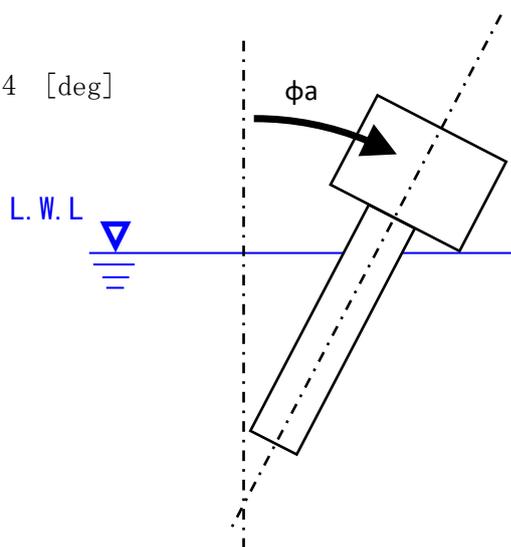
風荷重による傾斜モーメント		浮体の傾き $\phi$ [deg]		
		0.00	9.55	13.30
回転中心からの距離(施設軸方向) [m]	檣上端	37.5		
	檣下端	35.0		
	水面	28.0	28.4	28.8
風荷重作用位置[m]	檣	36.3		
	鋼管	31.5	31.7	31.9
受圧面積 [m <sup>2</sup> ]	檣	2.6		
	鋼管	3.9	3.7	3.5
高度係数	檣	1.00		
	鋼管	1.00		
形状係数	檣	1.25		
	鋼管	0.5		
風速[m/s]	水平方向	28.1		
	法線方向	28.1	27.7	27.3
風荷重[kN]	檣	1.57	1.52	1.48
	鋼管	0.94	0.86	0.79
	合計	2.51	2.38	2.27
モーメント [kN・m]	檣	-56.9	-55.1	-53.7
	鋼管	-29.6	-27.3	-25.2
	合計	-86.5	-82.4	-78.8
全体作用位置[m]		34.5	34.6	34.7



##### 3) 檣の水没角度

檣の水没角度は L.W.L 時の潮位における水面とする。

檣の水没角度  $\phi_a = 34.4$  [deg]



#### 4.安定性の確認

##### 4) モーメントのつりあい角度

モーメントのつりあい角度は下記[a][b]の2ケースを検討し、つりあい角度が櫓の水没角度を下回っていることを確認する。

##### [a] 水平方向に潮流、吹送流、風による外力が作用する場合

$$\phi = 9.55 \text{ [deg]} < \phi_a = 34.4 \text{ [deg]} \quad \dots \text{ OK}$$

施設の傾斜角度 $\phi$ [deg]		0.00	9.55
ト ハ メ ン ト [kN・m]	浮力	0.0	895.3
	自重	0.0	-719.4
	潮流	-15.4	-15.2
	吹送流力	-79.5	-78.4
	風荷重	-86.5	-82.4
	合計	-181.4	0.0

※転倒モーメントは-の値とする。

##### [b] 水平方向に潮流、吹送流、風、波による外力が作用する場合

$$\phi = 13.30 \text{ [deg]} < \phi_a = 34.4 \text{ [deg]} \quad \dots \text{ OK}$$

施設の傾斜角度 $\phi$ [deg]		0.00	13.30
ト ハ メ ン ト [kN・m]	浮力	0.0	1242.1
	自重	0.0	-998.0
	潮流	-15.4	-15.0
	吹送流力	-79.5	-77.3
	風荷重	-86.5	-78.8
	波力	-74.9	-72.9
	合計	-256.3	0.0

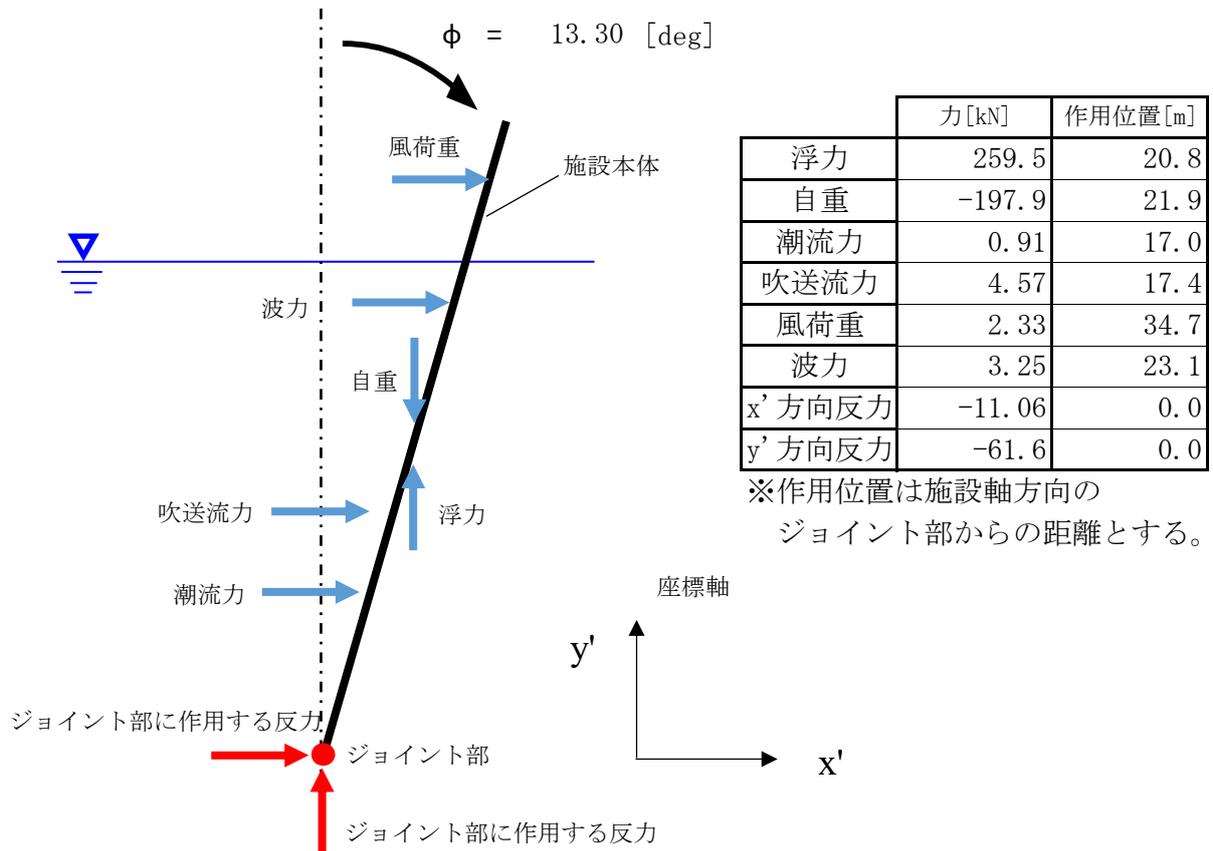
※転倒モーメントは-の値とする。

## 5.構造照査

### 5. 構造照査

#### 1) 外力条件

施設が潮流、風、吹送流、波を受け、傾斜 $\phi$ でつりあい状態である時の曲げモーメント、せん断力、軸力を用いて設計する。



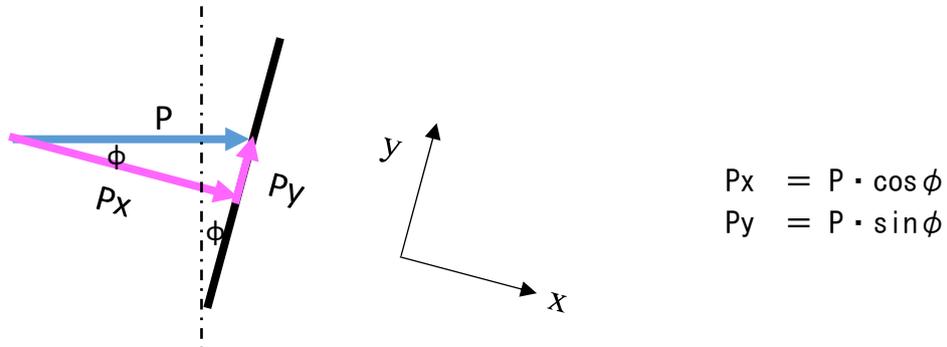
## 5.構造照査

### 2) 荷重の整理

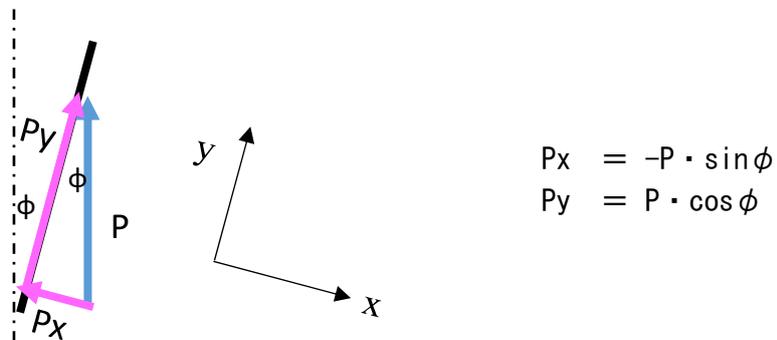
1) の荷重を施設軸方向と法線方向の荷重に分解する。

この時、施設軸方向をy軸、法線方向をx軸とした座標軸を再設定する。

#### [i] x' 方向の荷重をx方向とy方向の荷重に分解



#### [ii] y' 方向の荷重をx方向とy方向の荷重に分解

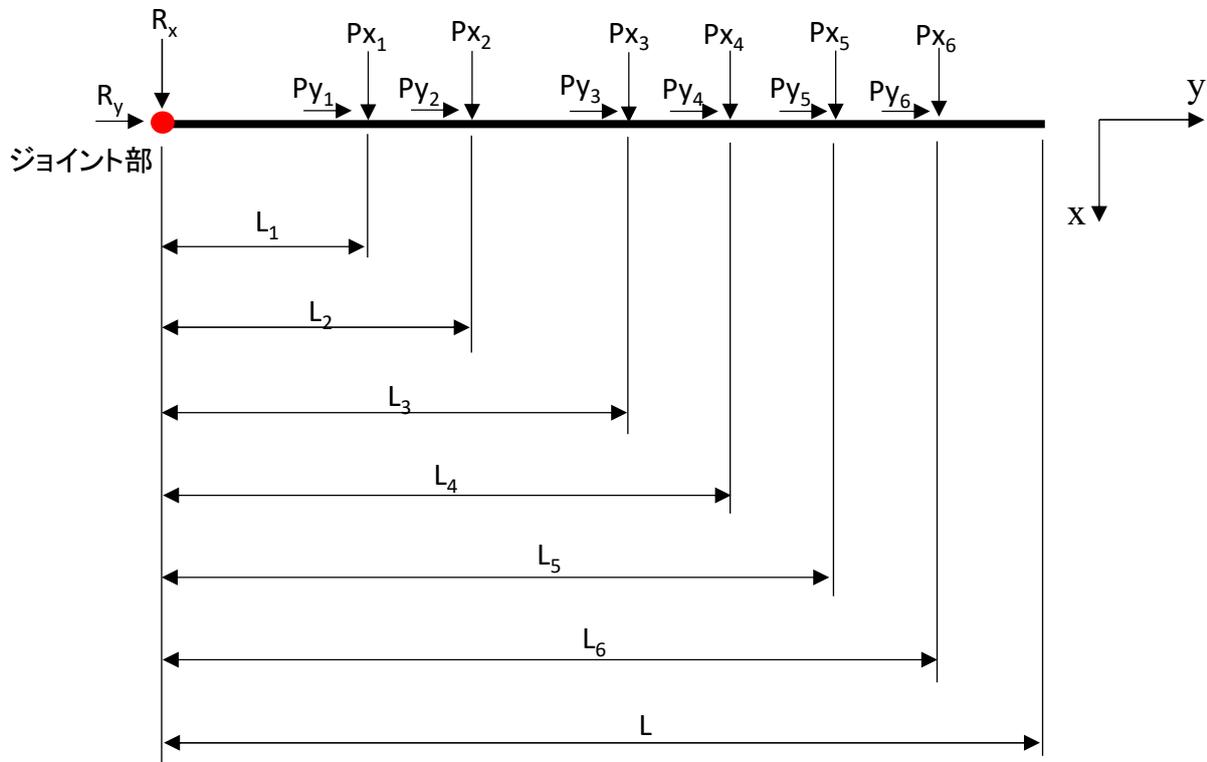


	力 [kN]	
	x方向	y方向
浮力	-59.7	252.5
自重	45.5	-192.6
潮流力	0.89	0.21
吹送流力	4.45	1.05
風荷重	2.27	0.54
波力	3.16	0.75
ジョイント反力	3.4	-62.5

## 5.構造照査

### 3) 設計断面力の算出

施設をジョイント部がピン結合された梁と見なして設計する。

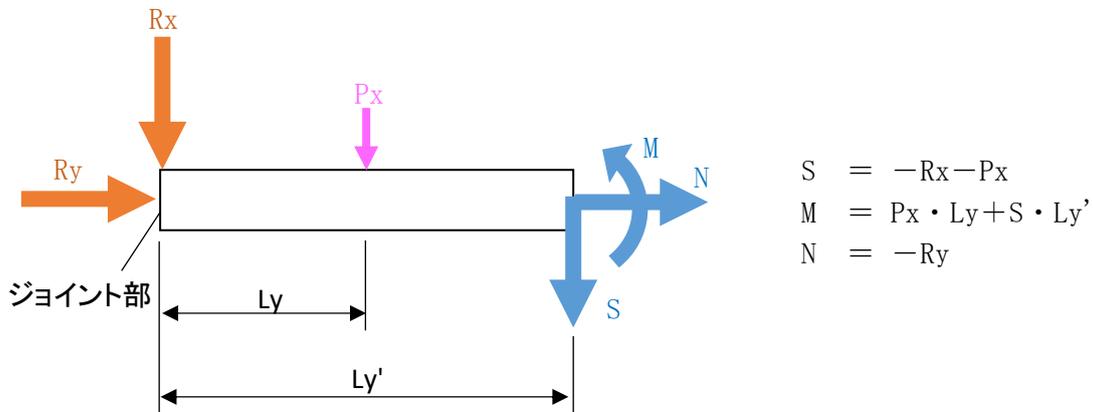


$R_x$	=	3.4 [kN]	$R_y$	=	-62.5 [kN]	:	ジョイント反力
$P_{x1}$	=	0.89 [kN]	$P_{y1}$	=	0.21 [kN]	:	潮流力
$P_{x2}$	=	4.45 [kN]	$P_{y2}$	=	1.05 [kN]	:	吹送流力
$P_{x3}$	=	-59.7 [kN]	$P_{y3}$	=	252.5 [kN]	:	浮力
$P_{x4}$	=	45.5 [kN]	$P_{y4}$	=	-192.6 [kN]	:	自重
$P_{x5}$	=	3.16 [kN]	$P_{y5}$	=	0.75 [kN]	:	波力
$P_{x6}$	=	2.27 [kN]	$P_{y6}$	=	0.54 [kN]	:	風荷重

$L_1$	=	17.0 [m]	:	ジョイント部から潮流力作用点までの距離
$L_2$	=	17.4 [m]	:	ジョイント部から吹送流力作用点までの距離
$L_3$	=	20.8 [m]	:	ジョイント部から浮力作用点までの距離
$L_4$	=	21.9 [m]	:	ジョイント部から自重作用点までの距離
$L_5$	=	23.1 [m]	:	ジョイント部から波力作用点までの距離
$L_6$	=	34.7 [m]	:	ジョイント部から風荷重作用点までの距離
$L$	=	37.5 [m]	:	ジョイント部から檣上端までの距離

## 5.構造照査

施設の各区間の断面力は、梁を仮想的に切断し、力のつりあい式より算出する。  
 なお、ジョイント部まわりの曲げモーメントの値はピン結合のため、0とみなす。



各区間を仮想的に切断し、上記の計算方法から算出した断面力は以下ようになる。

区間[m]	せん断 S[kN]	曲げ M[kN・m]	軸力 N[kN]
0.0 ~ L1 = 17.0	-3.4	-57.7	62.5
L1 = 17.0 ~ L2 = 17.4	-4.3	-59.5	62.3
L2 = 17.4 ~ L3 = 20.8	-8.7	-89.4	61.2
L3 = 20.8 ~ L4 = 21.9	51.0	-32.7	-191.3
L4 = 21.9 ~ L5 = 23.1	5.4	-26.5	1.3
L5 = 23.1 ~ L6 = 34.7	2.3	0.0	0.5
L6 = 34.7 ~ L = 37.5	0.0	0.0	0.0

※断面力は区間右端の値とする。

また、上部鋼管と尾筒の接合部はジョイント部から 26.5 mの位置にあり、この位置における断面力は以下ようになる。

$$S = 5.4 \text{ [kN]}$$

$$M = -7.8 \text{ [kN} \cdot \text{m]}$$

$$N = 1.3 \text{ [kN]}$$

以上より、上部鋼管と尾筒に作用する最大断面力は

	せん断  S  [kN]	曲げ  M  [kN・m]	引張  T  <sub>max</sub> [kN]	圧縮  P  <sub>max</sub> [kN]
i) 上部鋼管	5.4	7.8	1.3	-
ii) 尾筒	51.0	89.4	62.5	191.3

## 5.構造照査

### 4) 断面性能

	鋼管外径 φ [mm]	板厚 t [mm]	断面積 A [mm <sup>2</sup> ]	断面定数 W [mm <sup>3</sup> ]
i) 上部鋼管	558.8	12.7	21788	2908630
ii) 尾筒	558.8	16	27284	3599566

### 5) 強度照査

#### i) 上部鋼管

$$\begin{aligned} \sigma &= |M|_{\max}/W + |T|_{\max}/A \\ &= 2.7 + 0.1 = 2.8 < 210 \text{ N/mm}^2 \quad \dots \text{ OK} \\ \tau &= |S|_{\max} / 0.5A = 0.5 < 120 \text{ N/mm}^2 \quad \dots \text{ OK} \end{aligned}$$

#### ii) 尾筒

$$\begin{aligned} \sigma &= |M|_{\max}/W + |P|_{\max}/A \\ &= 24.8 + 7.0 = 31.8 < 210 \text{ N/mm}^2 \quad \dots \text{ OK} \\ \tau &= |S|_{\max} / 0.5A = 3.7 < 120 \text{ N/mm}^2 \quad \dots \text{ OK} \end{aligned}$$

### 6) 座屈照査

#### i) 上部鋼管

圧縮力が作用しないため、座屈照査しない

#### ii) 尾筒

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= |P_{\max}|/A = 7.0 < 19.7 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{座屈応力}) \quad \dots \text{ OK} \\ &\text{座屈応力} \\ \sigma_a &= 1200000 / ( 6700 + ( \beta L/k )^2 ) \\ &= 19.7 \text{ [N/mm}^2] \quad \beta: \text{端末条件} \quad 2.1 \\ &\text{細長比} \quad L: \text{長さ} \quad 21.3 \text{ [m]} \\ &\beta L/k = 233 > 92 \quad k: \text{断面2次半径} \quad 192.0 \text{ [mm]} \end{aligned}$$

表-3.2.2(a) 局部座屈を考慮しない許容軸方向圧縮応力度  
(溶接箱形断面以外の場合)

鋼種 板厚 (mm)	SS400 SM400 SMA400W	SM490	SM490Y SM520 SMA490W	SM570 SMA570W
	40 以下	$140: \frac{l}{r} \leq 18$ $140 - 0.82 \left( \frac{l}{r} - 18 \right):$ $18 < \frac{l}{r} \leq 92$ $\frac{1,200,000}{6,700 + \left( \frac{l}{r} \right)^2}:$ $92 < \frac{l}{r}$	$185: \frac{l}{r} \leq 16$ $185 - 1.2 \left( \frac{l}{r} - 16 \right):$ $16 < \frac{l}{r} \leq 79$ $\frac{1,200,000}{5,000 + \left( \frac{l}{r} \right)^2}:$ $79 < \frac{l}{r}$	$210: \frac{l}{r} \leq 15$ $210 - 1.5 \left( \frac{l}{r} - 15 \right):$ $15 < \frac{l}{r} \leq 75$ $\frac{1,200,000}{4,400 + \left( \frac{l}{r} \right)^2}:$ $75 < \frac{l}{r}$

## 6.水圧照査(その1)

### 6. 水圧に対する強度照査

#### 1) 浮力体-上面板

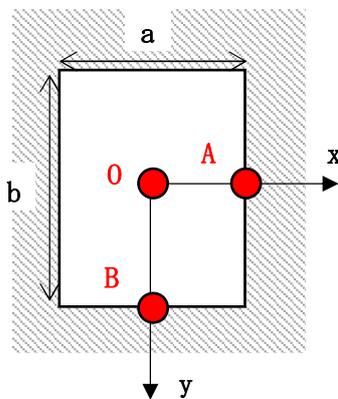
浮力体上面が、基本水準面から 3.600 m の水深に位置しているとする。  
このとき、鋼板が受ける流体力は、 静水圧:P1= 36.4 kN/m<sup>2</sup>

#### i) 四辺固定板の照査

側板、隔壁および補強材で区切られたパネルを長方形とみなし、  
四辺固定板モデルとして強度照査する。

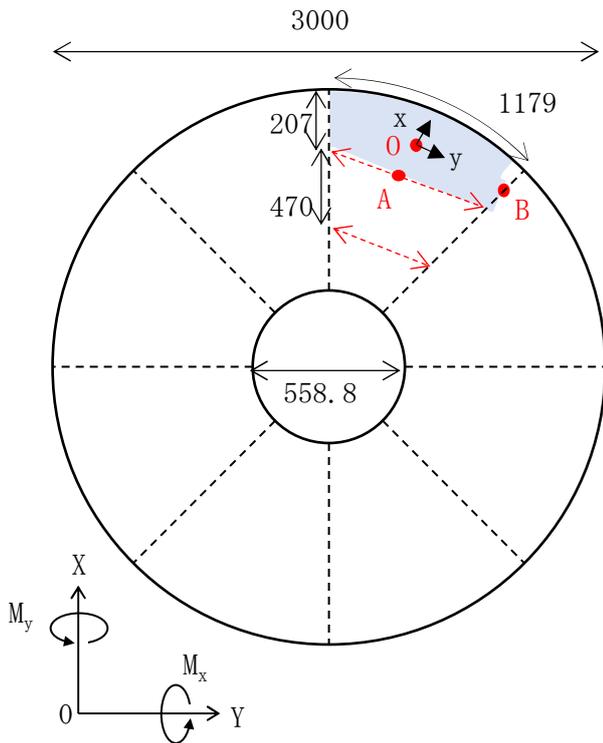
四辺固定板(短辺:a[mm],長辺:b[mm])に等分布荷重qが作用した場合の  
曲げモーメントは、次式から求められる。

#### (1) 等分布荷重を受ける周辺固定板の 曲げモーメント ( $\nu=0.3$ )



b/a	x=a/2, y=0	x=0, y=b/2	x=0, y=0	x=0, y=0
	$Mx=\beta \cdot p \cdot 0 \cdot a^2$ $\beta$	$My=\beta \cdot p \cdot 0 \cdot a^2$ $\beta$	$Mx=\beta \cdot p \cdot 0 \cdot a^2$ $\beta$	$My=\beta \cdot p \cdot 0 \cdot a^2$ $\beta$
1.0	-0.0513	-0.0513	0.0231	0.0231
1.1	-0.0581	-0.0538	0.0264	0.0231
1.2	-0.0639	-0.0554	0.0299	0.0228
1.3	-0.0687	-0.0563	0.0327	0.0222
1.4	-0.0726	-0.0568	0.0349	0.0212
1.5	-0.0757	-0.0570	0.0368	0.0203
1.6	-0.0780	-0.0571	0.0381	0.0193
1.7	-0.0799	-0.0571	0.0392	0.0182
1.8	-0.0812	-0.0571	0.0401	0.0174
1.9	-0.0822	-0.0571	0.0407	0.0165
2.0	-0.0829	-0.0571	0.0412	0.0158
$\infty$	-0.0833	-0.0571	0.0417	0.0125

6.水圧照査(その1)



作用圧力 (kN/m <sup>2</sup> )		36.4	
パネル形状	a (mm)	207	
	b (mm)	1179	
縦横比	b / a	5.7	
パネル板厚	t (mm)	9	
モーメント係数 $\beta$	O点	$M_x$	0.0412
		$M_y$	0.0158
	A点	$M_x$	-0.0829
曲げモーメントM (kN. m/m)	O点	$M_x$	0.064
		$M_y$	0.025
	A点	$M_x$	-0.129
発生応力度 $\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	O点	$\sigma_x$	4.7 OK
		$\sigma_y$	1.9 OK
	A点	$\sigma_x$	9.6 OK
許容応力度	B点	$\sigma_y$	6.6 OK
		$\sigma_a$ (N/mm <sup>2</sup> )	210
	発生せん断応力度	$\tau$ (N/mm <sup>2</sup> )	0.4 OK
許容応力度	$\tau_a$ (N/mm <sup>2</sup> )	120	

## 6.水圧照査(その1)

### ii)補強材(赤)の照査

単純支持はりモデルとして

はりにかかる均等荷重

$$q = 36.4 \times 0.339 = 12.3 \text{ kN/m}$$

最大モーメント

$$M = 12.3 \times 1.016^2 / 8 = 1.6 \text{ kN.m}$$

最大せん断力

$$S = 12.3 \times 1.016 / 2 = 6.2 \text{ kN}$$

リブサイズ

$$L \quad 75 \quad \times \quad 75 \quad \times \quad 9 \quad [\text{SS400}]$$

フランジの有効幅

$$2b = 338 \text{ mm}$$

$$b/1 = 0.166 \rightarrow \lambda = 130 \text{ mm}$$

断面定数

				A (mm <sup>2</sup> )	y (mm)	Ay (mm <sup>3</sup> )	Ay <sup>2</sup> (mm <sup>4</sup> )	I (mm <sup>4</sup> )
1	-	Shl. PL	260 × 9	2336	4.5	10513	47309	15770
2	-	Fla. PL	75 × 9	675	13.5	9113	123019	4556
3	-	Web. PL	66 × 9	594	51.0	30294	1544994	215622
				3605		49920	1715322	235948
								-686585
								1264685

$$e = 13.8 \text{ mm}$$

$$W_1 = 91644 \text{ mm}^3$$

$$W_2 = 18015 \text{ mm}^3$$

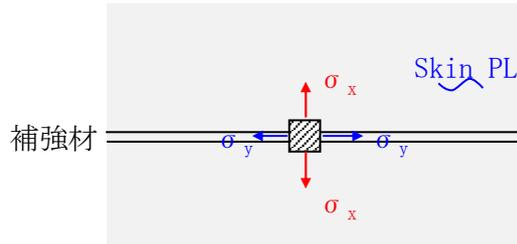
発生応力度(点A:はり中央)

$$\begin{array}{llllllll} \sigma_1 = M/W_1 = & 17.5 & < & 210 & \text{N/mm}^2 & (\text{圧縮}) & \dots & \text{OK} \\ \sigma_2 = M/W_2 = & 88.8 & < & 210 & \text{N/mm}^2 & (\text{引張}) & \dots & \text{OK} \\ \tau = S/A_S = & 10.4 & < & 120 & \text{N/mm}^2 & & \dots & \text{OK} \end{array}$$

## 6.水圧照査(その1)

### iii) 二軸応力状態の照査

点Aにおける二軸応力



$$\left( \frac{\sigma_x}{\sigma_a} \right)^2 - \left( \frac{\sigma_x}{\sigma_a} \right) \left( \frac{\sigma_y}{\sigma_a} \right) + \left( \frac{\sigma_y}{\sigma_a} \right)^2 + \left( \frac{\tau}{\tau_a} \right)^2 = 0.02 \leq 1.2 \quad \dots \text{OK}$$

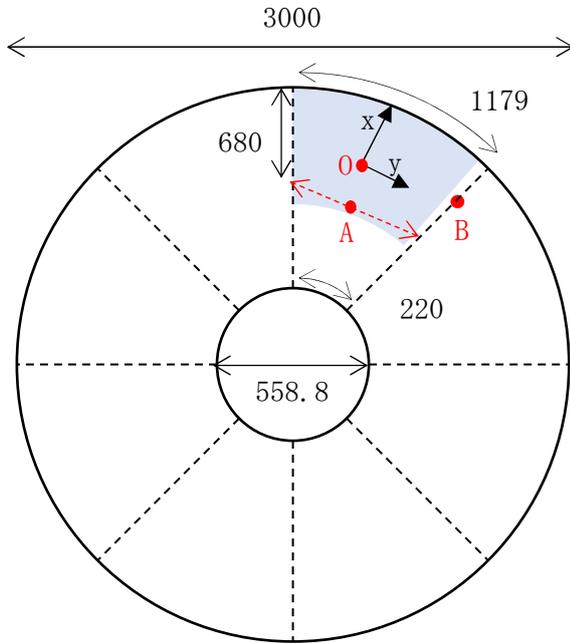
$\sigma_x = 9.6 \text{ N/mm}^2$	: 周方向応力度	※引張方向正
$\sigma_y = -17.5 \text{ N/mm}^2$	: 径方向応力度	※引張方向正
$\sigma_a = 210 \text{ N/mm}^2$	: 許容応力度	
$\tau = 10.4 \text{ N/mm}^2$	: せん断応力度	
$\tau_a = 120 \text{ N/mm}^2$	: 許容応力度	

## 6.水圧照査(その1)

### 2) 浮力体-底板

浮力体底面が、基本水準面から 6.500 m の水深に位置しているとする。  
 このとき、鋼板が受ける流体力は、 静水圧:  $P_1 = 65.7 \text{ kN/m}^2$

#### i) 四辺固定板の照査



作用圧力 (kN/m <sup>2</sup> )		65.7	
パネル形状	a	(mm)	
	b	680	
縦横比		b / a	1.7
パネル板厚		t	(mm) 12
モーメント 係数 $\beta$	O点	$M_x$	0.0392
		$M_y$	0.0182
	A点	$M_x$	-0.0799
	B点	$M_y$	-0.0571
曲げモーメントM (kN. m/m)	O点	$M_x$	1.190
		$M_y$	0.553
	A点	$M_x$	-2.426
	B点	$M_y$	-1.734
発生応力度 $\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	O点	$\sigma_x$	49.6 OK
		$\sigma_y$	23.0 OK
	A点	$\sigma_x$	101.1 OK
	B点	$\sigma_y$	72.3 OK
許容応力度	$\sigma_a$ (N/mm <sup>2</sup> )	210	
発生せん断応力度	$\tau$ (N/mm <sup>2</sup> )	1.2 OK	
許容応力度	$\tau_a$ (N/mm <sup>2</sup> )	120	

## 6.水圧照査(その1)

### ii)補強材(赤)の照査

単純支持はりモデルとして

はりにかかる均等荷重

$$q = 65.7 \times 0.680 = 44.6 \text{ kN/m}$$

最大モーメント

$$M = 44.6 \times 0.700^2 / 8 = 2.7 \text{ kN.m}$$

最大せん断力

$$S = 44.6 \times 0.700 / 2 = 15.6 \text{ kN}$$

リブサイズ

$$\text{FB } 90 \times 8 \quad [\text{SS400}]$$

フランジの有効幅

$$2b = 680 \text{ mm}$$

$$b/1 = 0.486 \rightarrow \lambda = 105 \text{ mm}$$

断面定数

				A (mm <sup>2</sup> )	y (mm)	Ay (mm <sup>3</sup> )	Ay <sup>2</sup> (mm <sup>4</sup> )	I (mm <sup>4</sup> )
1	-	Shl. PL	210 × 12	2519	6.0	15111	90667	30222
2	-	Stf. PL	90 × 8	720	57.0	41040	2339280	486000
				3239		56151	2429947	516222
								-969256
								1976913

$$e = 17.3 \text{ mm}$$

$$W_1 = 114272 \text{ mm}^3$$

$$W_2 = 23340 \text{ mm}^3$$

発生応力度(はり中央)

$$\sigma_1 = M/W_1 = 23.6 < 210 \text{ N/mm}^2 \text{ (圧縮)} \quad \dots \text{ OK}$$

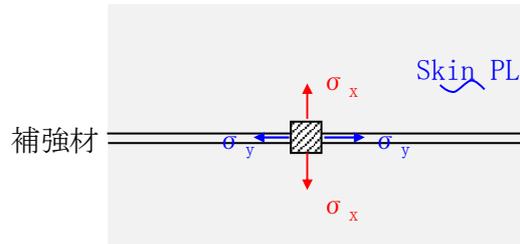
$$\sigma_2 = M/W_2 = 115.7 < 210 \text{ N/mm}^2 \text{ (引張)} \quad \dots \text{ OK}$$

$$\tau = S/A_S = 21.7 < 120 \text{ N/mm}^2 \quad \dots \text{ OK}$$

## 6.水圧照査(その1)

### iii) 二軸応力状態の照査

点Aにおける二軸応力



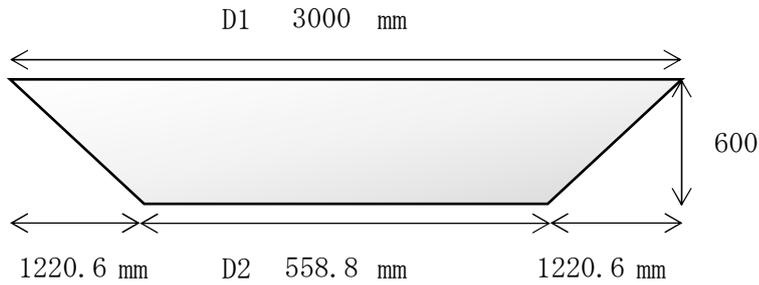
$$\left( \frac{\sigma_x}{\sigma_a} \right)^2 - \left( \frac{\sigma_x}{\sigma_a} \right) \left( \frac{\sigma_y}{\sigma_a} \right) + \left( \frac{\sigma_y}{\sigma_a} \right)^2 + \left( \frac{\tau}{\tau_a} \right)^2 = 0.33 \leq 1.2 \quad \dots \text{OK}$$

$\sigma_x = 101.1 \text{ N/mm}^2$	: 周方向応力度	※引張方向正
$\sigma_y = -23.6 \text{ N/mm}^2$	: 径方向応力度	※引張方向正
$\sigma_a = 210 \text{ N/mm}^2$	: 許容応力度	
$\tau = 21.7 \text{ N/mm}^2$	: せん断応力度	
$\tau_a = 120 \text{ N/mm}^2$	: 許容応力度	

## 6.水圧照査(その1)

### iv) 斜板としての照査

斜板の外観図は、以下の通りである。



### ①円錐シェルとしての照査

$$N_{\theta} = \frac{q \cdot x \cdot \cos \phi_0}{\sin^2 \phi_0} = \begin{matrix} 41.6 \text{ N/mm} & \text{at } x = 137 \text{ mm} \\ 223.2 \text{ N/mm} & \text{at } x = 737 \text{ mm} \end{matrix}$$

$$\rightarrow \sigma_{\theta} = \frac{N_{\theta}}{t} = \begin{matrix} 3.5 < 210 \text{ N/mm}^2 & \text{at } x = 137 \text{ mm} \cdots \text{OK} \\ 18.6 < 210 \text{ N/mm}^2 & \text{at } x = 737 \text{ mm} \cdots \text{OK} \end{matrix}$$

$$N_s = \frac{q \cdot x}{2} \frac{\cos \phi_0}{\sin^2 \phi_0} \left( 1 - \frac{h_0^2}{x^2} \right) = 108 \text{ N/mm} \quad \text{at } x = 737 \text{ mm}$$

$$\rightarrow \sigma_s = \frac{N_s}{t} = 9.0 < 210 \text{ N/mm}^2 \quad \text{at } x = 737 \text{ mm} \cdots \text{OK}$$

ここで、 $q$  : 静水圧(=  $0.066 \text{ N/mm}^2$ )

$$\cos \phi_0 = 0.897$$

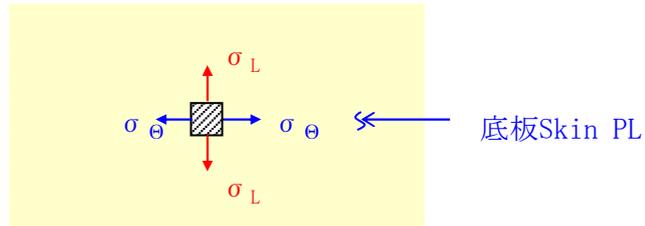
$$\sin \phi_0 = 0.441$$

$h_0$  : 円錐切欠き高さ(=  $137 \text{ mm}$ )

$t$  : シェル厚(=  $12 \text{ mm}$ )

## 6.水圧照査(その1)

### ②二軸応力状態の照査



$$\left( \frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_a} \right)^2 - \left( \frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_a} \right) \left( \frac{\sigma_L}{\sigma_a} \right) + \left( \frac{\sigma_L}{\sigma_a} \right)^2 = 0.01 \leq 1.2 \quad \dots \text{OK}$$

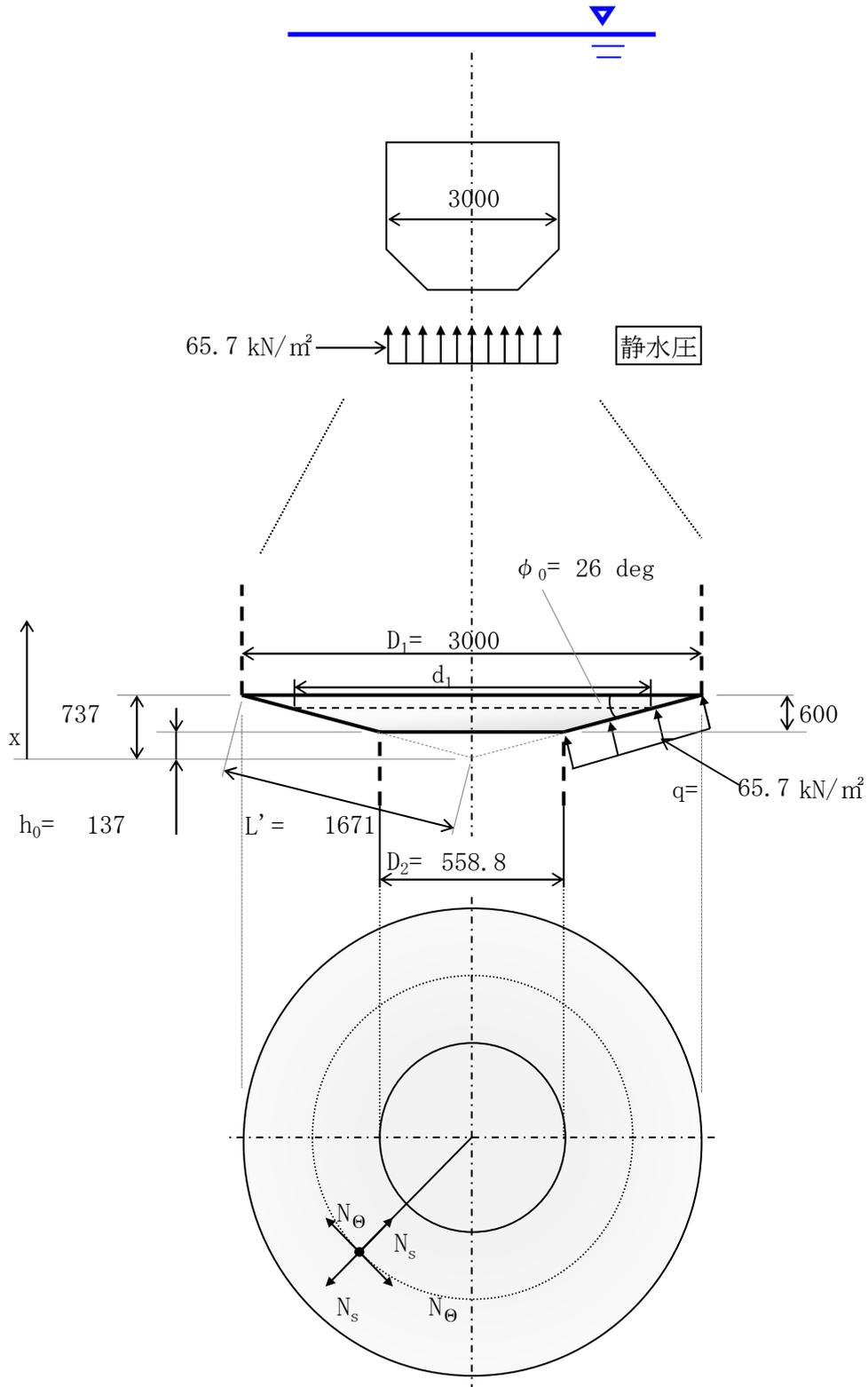
$\sigma_{\theta} = -18.6 \text{ N/mm}^2$	: 周方向膜応力度 ※引張方向正
$\sigma_L = -9.0 \text{ N/mm}^2$	: 長さ方向膜応力度 ※引張方向正
$\sigma_a = 210 \text{ N/mm}^2$	

### ③座屈照査

$$P_k = 2.4 \cdot E \cdot \left( \frac{r_1}{L'} \right) \cdot \left( \frac{t}{r_1} \right)^{2.5} = 2.5 \text{ N/mm}^2 > q = 0.066 \text{ N/mm}^2 \quad \dots \text{OK}$$

ここで、E : 弾性係数(= 200000 N/mm<sup>2</sup>)  
 r<sub>1</sub> : 外周半径(= 1500 mm)  
 r<sub>2</sub> : 内周半径(= 279.4 mm)  
 L' : 円錐辺長(= 1671 mm)

# 6.水圧照査(その1)

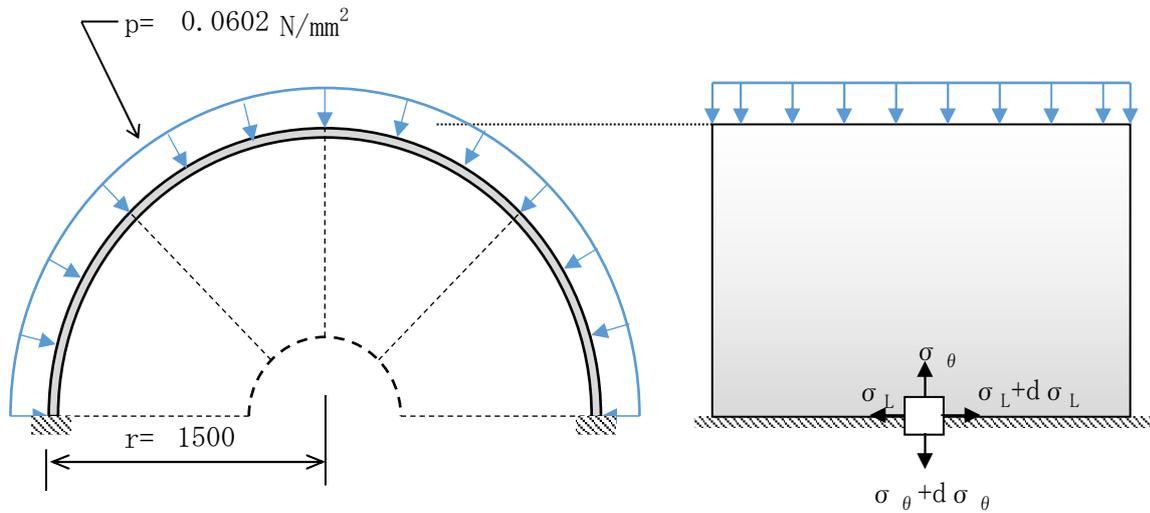




## 6.水圧照査(その1)

### ii)円筒シェルとしての照査

#### ①外圧が作用する薄肉円筒構造の照査



円周方向

$$\sigma_\theta = \frac{p \cdot r}{t} = 10.0 < 210 \text{ N/mm}^2 \quad \dots \text{OK}$$

高さ方向

$$\sigma_L = \frac{p \cdot r}{2 \cdot t} = 5.0 < 210 \text{ N/mm}^2 \quad \dots \text{OK}$$

ここで、 $p$ : 作用圧 (= 0.0602 N/mm<sup>2</sup>)

$r$ : シェル半径 (= 1500 mm)

$t$ : シェル厚 (= 9 mm)

(発生応力度が小さいため2軸応力の照査は省略する.)

6.水圧照査(その1)

②7-7の圧壊照査

荷重はi)より

$P = 60.2 \text{ kN/m}^2$

圧壊強度は

$$Pr = \frac{E \cdot I}{L \cdot r^3} [(\pi/\alpha)^2 - 1] = 5.526 \text{ N/mm}^2$$

$$\rightarrow 5526 \text{ kN/m}^2 > P$$

... OK

- ここで、E: 弾性係数(= 200000 N/mm<sup>2</sup>)
- I: 断面二次モーメント(= 5. E+06 mm<sup>4</sup>) (iii)②にて後述)
- r: アーチ半径 (= 1500 mm)
- α: 隔壁配置角(= π / 4 = 45 deg)
- L: 補強材配置間隔(= 840 mm) (iii)①にて後述)

8.1.7.2 均等外圧をうける周輪および弧状アーチの圧壊圧力算定法  
第 8.16 表

屈半波数	4	2	
屈圧力	$p_k = \frac{3EI}{r^3}$	$p_k = \frac{EI}{r^3} \left[ \left( \frac{\pi}{\alpha} \right)^2 - 1 \right]$	$p_k = \frac{EI}{r^3} (k^2 - 1)$

ただし、k は次式または次表によつて定まる。  $k \cdot \tan \alpha \cdot \cot k\alpha = 1$

α	30°	60°	90°	120°	150°	180°
k	8.621	4.375	3	2.364	2.066	2

## 6.水圧照査(その1)

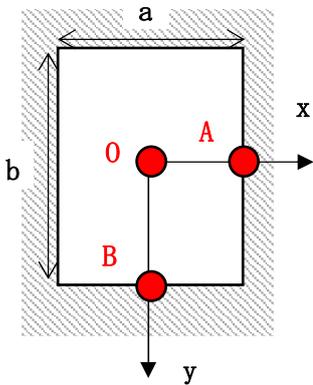
### iii) 変形後の強度照査

漂流物の衝突等、想定外の荷重によって側板の円筒形状が巨視的に崩れた場合(上記ii)の各式が適用できなくなった場合)について、検討する。

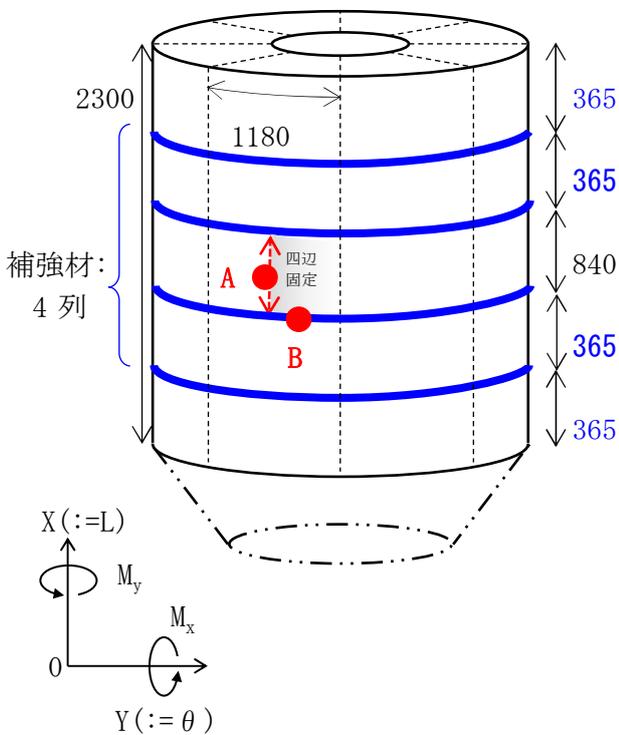
#### ①側板パネルの照査

アーチ形状が崩れた箇所の側板を平板と見做し、  
隔壁と補強材で支持された四辺固定板モデルとして照査する。  
補強材は高さ方向に 4 列配置する。

#### (1) 等分布荷重を受ける周辺固定板の 曲げモーメント ( $\nu=0.3$ )



b/a	x=a/2, y=0	x=0, y=b/2	x=0, y=0	x=0, y=0
	$M_x = \beta \cdot p \cdot 0 \cdot a^2$ $\beta$	$M_y = \beta \cdot p \cdot 0 \cdot a^2$ $\beta$	$M_x = \beta \cdot p \cdot 0 \cdot a^2$ $\beta$	$M_y = \beta \cdot p \cdot 0 \cdot a^2$ $\beta$
1.0	-0.0513	-0.0513	0.0231	0.0231
1.1	-0.0581	-0.0538	0.0264	0.0231
1.2	-0.0639	-0.0554	0.0298	0.0228
1.3	-0.0687	-0.0563	0.0327	0.0222
1.4	-0.0726	-0.0568	0.0349	0.0212
1.5	-0.0757	-0.0570	0.0368	0.0203
1.6	-0.0780	-0.0571	0.0381	0.0193
1.7	-0.0799	-0.0571	0.0392	0.0182
1.8	-0.0812	-0.0571	0.0401	0.0174
1.9	-0.0822	-0.0571	0.0407	0.0165
2.0	-0.0829	-0.0571	0.0412	0.0158
$\infty$	-0.0833	-0.0571	0.0417	0.0125



作用圧力 (kN/m <sup>2</sup> )		53.3	
パネル形状	a	(mm)	
	b	590	840
縦横比	b/a	1.4	
パネル板厚	t	(mm)	
モーメント 係数 $\beta$	O点	$M_L$	0.0349
		$M_\theta$	0.0212
	A点	$M_L$	-0.0726
B点	$M_\theta$	-0.0568	
曲げモーメントM (kN.m/m)	O点	$M_L$	0.65
		$M_\theta$	0.39
	A点	$M_L$	-1.35
B点	$M_\theta$	-1.05	
発生応力度 $\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	O点	$\sigma_L$	47.9 OK
		$\sigma_\theta$	29.1 OK
	A点	$\sigma_L$	99.6 OK
	B点	$\sigma_\theta$	78.0 OK
許容応力度	$\sigma_a$ (N/mm <sup>2</sup> )	210	
発生せん断応力度	$\tau$ (N/mm <sup>2</sup> )	1.5 OK	
許容応力度	$\tau_a$ (N/mm <sup>2</sup> )	120	

## 6.水圧照査(その1)

### ②補強材(青)の照査

側板が受ける水圧に対し、補強材と側板(有効幅 $\lambda$ )が成すフレームによって、浮力体が変形後の形状を維持できることを確認する。  
補強材のアーチ形状が崩れている状態を想定する。

#### ◆フレームについて、単純支持はりモデルとして

はりにかかる均等荷重

$$q = 53.3 \times 0.603 = 32.1 \text{ kN/m}$$

最大モーメント

$$M = 32.1 \times 1.18^2 / 8 = 5.6 \text{ kN.m}$$

最大せん断力

$$S = 32.1 \times 1.18 / 2 = 18.9 \text{ kN}$$

リブサイズ

$$\text{PL- } 125 \text{ x } 9 \text{ [SS400]}$$

$$\text{PL- } 50 \text{ x } 9 \text{ [SS400]}$$

フランジの有効幅

$$2b = 602 \text{ mm}$$

$$b/l = 0.255 \rightarrow \lambda = 178 \text{ mm}$$

断面定数

				A (mm <sup>2</sup> )	y (mm)	Ay (mm <sup>3</sup> )	Ay <sup>2</sup> (mm <sup>4</sup> )	I (mm <sup>4</sup> )
1	- Shl.	PL	355 × 9	3197	4.5	14385	64732	21577
2	- Web.	PL	125 × 9	1125	71.5	80438	5751281	1464844
3	- Stf.	PL	50 × 9	450	138.5	62325	8632013	3038
				4772		157148	14448026	1489459
								-5164849
								10772636

$$e = 32.9 \text{ mm}$$

$$W_1 = 327436 \text{ mm}^3$$

$$W_3 = 97844 \text{ mm}^3$$

発生応力度(はり中央)

$\sigma_1 = M/W_1 =$	17.1	<	210	N/mm <sup>2</sup>	(圧縮)	… OK
$\sigma_3 = M/W_3 =$	57.2	<	210	N/mm <sup>2</sup>	(引張)	… OK
$\tau = S/A_S =$	16.8	<	120	N/mm <sup>2</sup>		… OK

## 6.水圧照査(その1)

### ◆シェル構造としてのフレームの照査

円周方向

$$\sigma_{\theta} = \frac{p \cdot \pi r L}{n \cdot A} = 37.8 < 210 \text{ N/mm}^2 \quad \dots \text{OK}$$

ここで

$\pi r L$ : 半径 $r$ 高さ $L$ の円柱が変形した時の投影面積の最大値

$n$ : 補強材の本数

### ◆シェル応力に対する座屈照査

補強材方向

$$\sigma_{\theta} = 37.8 < 127.4 \text{ [N/mm}^2] \quad \dots \text{OK}$$

座屈応力

$$\sigma_a = 1.2\text{E}+06 / ( 6700 + ( \beta L/k )^2 )$$

$$= 127.4 \text{ [N/mm}^2]$$

$\beta$ : 端末条件 2.1

細長比

$L$ : 長さ 1.180 [m]

$$\beta L/k = 52.2 < 92$$

$k$ : 断面2次半径 47.5 [mm]

表-3.2.2(a) 局部座屈を考慮しない許容軸方向圧縮応力度  
(溶接箱形断面以外の場合)

(N/mm<sup>2</sup>)

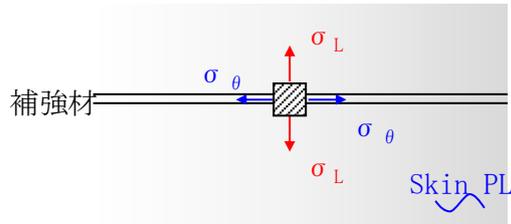
鋼種	SS400 SM400 SMA400W	SM490	SM490Y SM520 SMA490W	SM570 SMA570W
板厚 (mm)				
40 以下	$140: \frac{l}{r} \leq 18$ $140 - 0.82 \left( \frac{l}{r} - 18 \right):$ $18 < \frac{l}{r} \leq 92$ $\frac{1,200,000}{6,700 + \left( \frac{l}{r} \right)^2} :$ $92 < \frac{l}{r}$	$185: \frac{l}{r} \leq 16$ $185 - 1.2 \left( \frac{l}{r} - 16 \right):$ $16 < \frac{l}{r} \leq 79$ $\frac{1,200,000}{5,000 + \left( \frac{l}{r} \right)^2} :$ $79 < \frac{l}{r}$	$210: \frac{l}{r} \leq 15$ $210 - 1.5 \left( \frac{l}{r} - 15 \right):$ $15 < \frac{l}{r} \leq 75$ $\frac{1,200,000}{4,400 + \left( \frac{l}{r} \right)^2} :$ $75 < \frac{l}{r}$	$255: \frac{l}{r} \leq 18$ $255 - 2.1 \left( \frac{l}{r} - 18 \right):$ $18 < \frac{l}{r} \leq 67$ $\frac{1,200,000}{3,500 + \left( \frac{l}{r} \right)^2} :$ $67 < \frac{l}{r}$

## 6.水圧照査(その1)

### ◆パネル応力、はり応力、シェル応力の合成

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta} &= 17.1 + 37.8 = 54.9 < 210 \text{ N/mm}^2 \text{ (圧縮)} && \dots \text{ OK} \\ \sigma_L &= 78.0 - 5.0 = 73.0 < 210 \text{ N/mm}^2 \text{ (引張)} && \dots \text{ OK}\end{aligned}$$

### ◆A点(はりの中央)における二軸応力状態



$$\left( \frac{\sigma_{\uparrow}}{\sigma_a} \right)^2 - \left( \frac{\sigma_{\uparrow}}{\sigma_a} \right) \left( \frac{\sigma_L}{\sigma_a} \right) + \left( \frac{\sigma_L}{\sigma_a} \right)^2 + \left( \frac{\tau}{\tau_a} \right)^2 = 0.32 \leq 1.2 \dots \text{ OK}$$

$\sigma_{\theta} = -54.9 \text{ N/mm}^2$	: 周方向応力度 ※引張方向正
$\sigma_L = 78.0 \text{ N/mm}^2$	: 長さ方向応力度 ※引張方向正
$\sigma_a = 210 \text{ N/mm}^2$	: 許容応力度
$\tau = 16.8 \text{ N/mm}^2$	: せん断応力度
$\tau_a = 120 \text{ N/mm}^2$	: 許容応力度

## 6.水圧照査(その1)

### ③補強材(赤)の照査

#### ◆単純支持はりモデルとして

はりにかかる均等荷重

$$q = 53.3 \times 0.590 = 31.4 \text{ kN/m}$$

最大モーメント

$$M = 31.4 \times 0.840^2 / 8 = 2.8 \text{ kN.m}$$

最大せん断力

$$S = 31.4 \times 0.840 / 2 = 13.2 \text{ kN}$$

リブサイズ

$$\text{FB } 125 \times 9 \quad [\text{SS400}]$$

フランジの有効幅

$$2b = 590 \text{ mm}$$

$$b/1 = 0.351 \rightarrow \lambda = 126 \text{ mm}$$

断面定数

				A (mm <sup>2</sup> )	y (mm)	Ay (mm <sup>3</sup> )	Ay <sup>2</sup> (mm <sup>4</sup> )	I (mm <sup>4</sup> )
1	-	Shl. PL	252 × 9	2269	4.5	10212	45952	15317
2	-	Stf. PL	125 × 9	1125	71.5	80438	5751281	1464844
				3394		90650	5797233	1480161
								-2419713
								4857681

$$e = 26.7 \text{ mm}$$

$$W_1 = 181936 \text{ mm}^3$$

$$W_2 = 45272 \text{ mm}^3$$

発生応力度(はり中央)

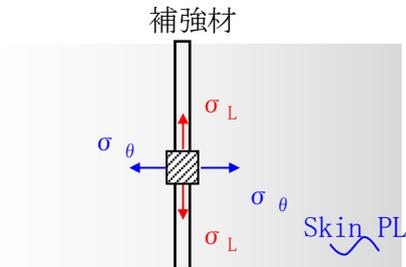
$\sigma_1 = M/W_U =$	15.4	<	210	N/mm <sup>2</sup>	(圧縮)	… OK
$\sigma_2 = M/W_L =$	61.8	<	210	N/mm <sup>2</sup>	(引張)	… OK
$\tau = S/A_S =$	11.7	<	120	N/mm <sup>2</sup>		… OK

## 6.水圧照査(その1)

### ◆パネル応力、はり応力、シェル応力の合成

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta} &= 99.6 - 10.0 = 89.6 < 210 \text{ N/mm}^2 \text{ (引張)} && \dots \text{ OK} \\ \sigma_L &= 15.4 + 5.0 = 20.4 < 210 \text{ N/mm}^2 \text{ (圧縮)} && \dots \text{ OK}\end{aligned}$$

### ◆B点(はりの中央)における二軸応力状態



$$\left( \frac{\sigma_{\uparrow}}{\sigma_{\downarrow}} \right)^2 - \left( \frac{\sigma_{\uparrow}}{\sigma_{\downarrow}} \right) \left( \frac{\sigma_L}{\sigma_{\downarrow}} \right) + \left( \frac{\sigma_L}{\sigma_{\downarrow}} \right)^2 + \left( \frac{\tau}{\tau_{\downarrow}} \right)^2 = 0.29 \leq 1.2 \dots \text{ OK}$$

$\sigma_{\theta} = 99.6 \text{ N/mm}^2$	: 周方向応力度 ※引張方向正
$\sigma_L = -20.4 \text{ N/mm}^2$	: 長さ方向応力度 ※引張方向正
$\sigma_a = 210 \text{ N/mm}^2$	: 許容応力度
$\tau = 11.7 \text{ N/mm}^2$	: せん断応力度
$\tau_a = 120 \text{ N/mm}^2$	: 許容応力度

## 6.水圧照査(その1)

### 4) 浮力体-隔壁

外板の亀裂から浮力体内に浸水した状態を想定する。

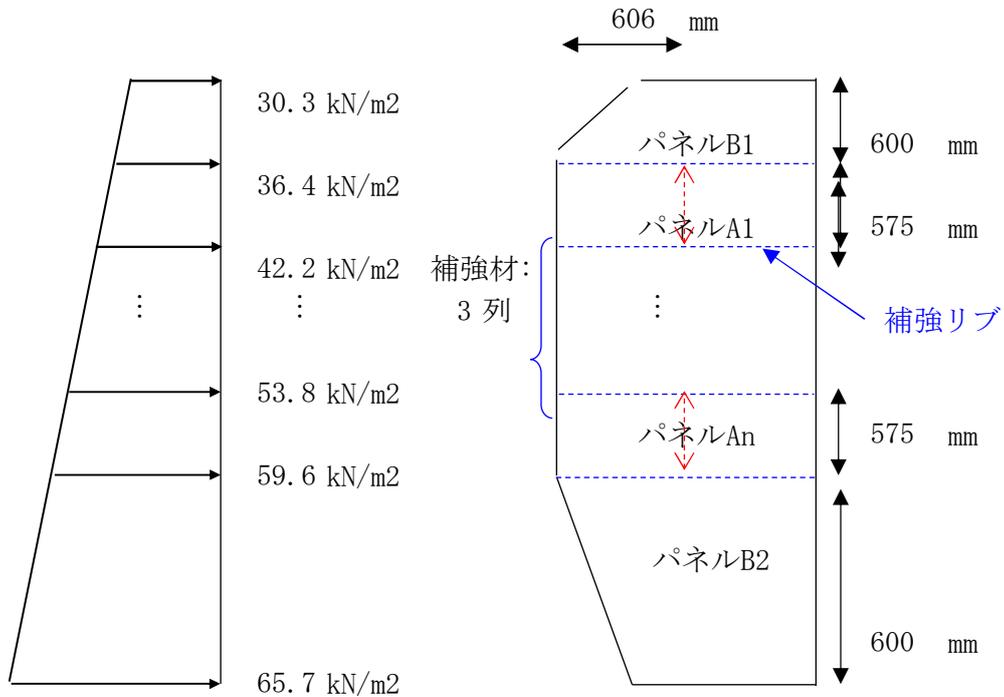
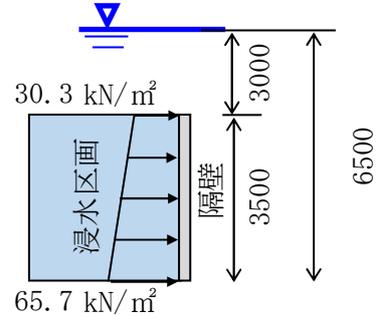
浸水時においては、静水圧 65.7 kN/m<sup>2</sup> が内部隔壁に作用するものとする。

浮力体は常に水面下にあることから、浸水区画は満水であるとして検討する。

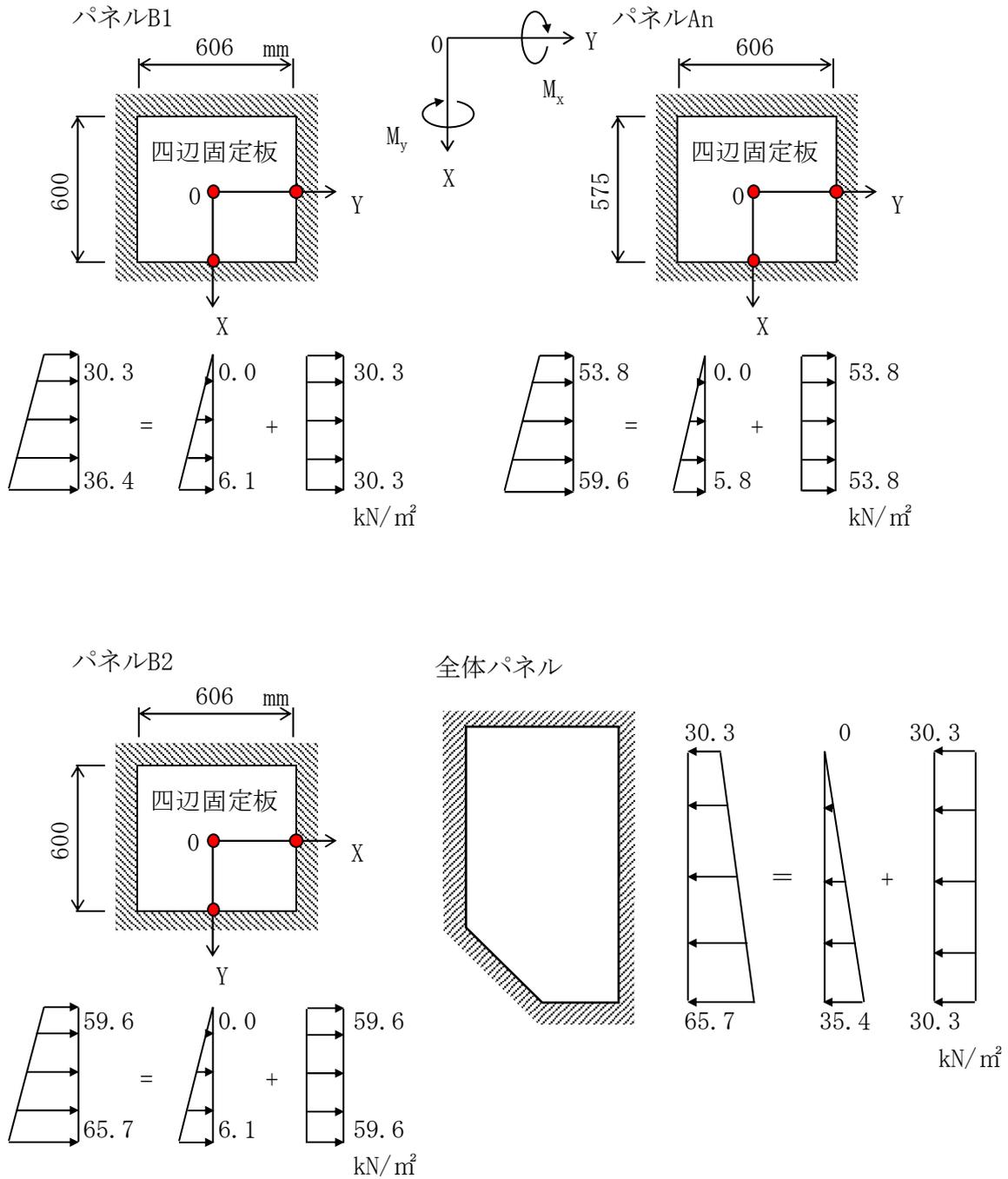
#### i) 水圧分布

$$\begin{aligned}
 f_w &= \rho_0 \cdot g \cdot z \\
 &= 30.3 \text{ kN/m}^2 \quad \text{at } z = 3.0 \text{ m} \\
 &= 65.7 \text{ kN/m}^2 \quad \text{at } z = 6.5 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$\rho_0 = 1.03 \text{ t/m}^3$	: 海水の密度
$g = 9.81 \text{ m/s}^2$	: 重力加速度



## 6.水圧照査(その1)



## 6.水圧照査(その1)

### ii) パネル照査

#### [a] 全体パネル

全体パネル外縁線に加わるせん断荷重は

$$S = (p_1 + p_2) / 2 \times A$$

$$= 203.5 \text{ [kN]}$$

せん断応力

$$\tau = S / (L \times t) = 2.4 < 120 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

... OK

ここで

外縁の線長  $L = 9424$

隔壁の板厚  $t = 9$

(簡単のため、パネルは長方形と見做した)

#### [b] パネルA1~An

水密隔壁を四辺固定板にモデル化して強度照査する。

四辺固定板に水圧分布  $q$  が作用した場合の曲げモーメントは

$$M = \beta \cdot q \cdot a^2$$

ここで、 $\beta$  は以下の通り。

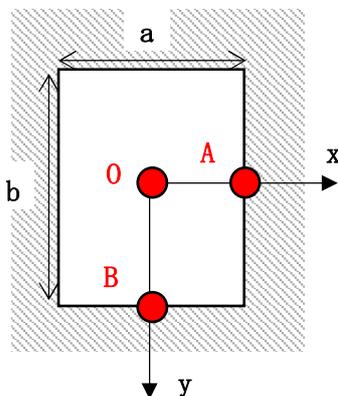
表 7.5 (i) 等変分布荷重を受ける周辺固定板のたわみおよびモーメント ( $\nu=0.3$ )<sup>1)</sup>

※下表では、変分布荷重方向をx軸とする

$\frac{b}{a}$	$x=0, y=0$			$x=a/2, y=0$	$x=-a/2, y=0$	$x=0, y=\pm b/2$
	$w = \alpha(p_0 a^4 / D)$	$M_x = \beta_1 p_0 a^2$	$M_y = \beta_2 p_0 a^2$	$M_x = \gamma_1 p_0 a^2$	$M_x = \gamma_2 p_0 a^2$	$M_y = \delta p_0 a^2$
0.5	0.000080	0.00198	0.00515	-0.0115	-0.0028	-0.0104
2/3	0.000217	0.00451	0.00817	-0.0187	-0.0066	-0.0168
1.0	0.00063	0.0115	0.0115	-0.0334	-0.0179	-0.0257
1.5	0.00110	0.0184	0.0102	-0.0462	-0.0295	-0.0285
$\infty$	0.00130	0.0208	0.0063	-0.0500	-0.0333	-

#### (1) 等分布荷重を受ける周辺固定板の曲げモーメント ( $\nu=0.3$ )

※下表では、短辺方向をx軸とする



$b/a$	$x=a/2, y=0$	$x=0, y=b/2$	$x=0, y=0$	$x=0, y=0$
	$M_x = \beta \cdot p_0 \cdot a^2$	$M_y = \beta \cdot p_0 \cdot a^2$	$M_x = \beta \cdot p_0 \cdot a^2$	$M_y = \beta \cdot p_0 \cdot a^2$
	$\beta$	$\beta$	$\beta$	$\beta$
1.0	-0.0513	-0.0513	0.0231	0.0231
1.1	-0.0581	-0.0538	0.0264	0.0231
1.2	-0.0639	-0.0554	0.0299	0.0228
1.3	-0.0687	-0.0563	0.0327	0.0222
1.4	-0.0726	-0.0568	0.0349	0.0212
1.5	-0.0757	-0.0570	0.0368	0.0203
1.6	-0.0780	-0.0571	0.0381	0.0193
1.7	-0.0799	-0.0571	0.0392	0.0182
1.8	-0.0812	-0.0571	0.0401	0.0174
1.9	-0.0822	-0.0571	0.0407	0.0165
2.0	-0.0829	-0.0571	0.0412	0.0158
$\infty$	-0.0833	-0.0571	0.0417	0.0125

## 6.水圧照査(その1)

### ◆パネルB1

※下表では、変分布荷重方向をx軸とする

等変分布荷重	[kN/mm <sup>2</sup> ]	0～ 6.1	
パネル形状	a	(mm)	600
	b		606
縦横比	b / a		1.0
パネル板厚	t (mm)	9	
モーメント係数 $\beta$	O点	$M_x$	0.018
		$M_y$	0.012
	A点	$M_x$	-0.046
	B点	$M_y$	-0.029
曲げモーメントM (kN. m/m)	O点	$M_x$	0.040
		$M_y$	0.025
	A点	$M_x$	-0.101
	B点	$M_y$	-0.062
発生垂直応力度 $\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	O点	$\sigma_x$	3.0
		$\sigma_y$	1.9
	A点	$\sigma_x$	7.5
	B点	$\sigma_y$	4.6

※下表では、短辺方向をx軸とする

等分布荷重	[kN/mm <sup>2</sup> ]	30.3	
パネル形状	a	(mm)	600
	b		606
縦横比	b / a		1.0
パネル板厚	t (mm)	9	
モーメント係数 $\beta$	O点	$M_x$	0.0231
		$M_y$	0.0231
	A点	$M_x$	-0.0513
	B点	$M_y$	-0.0513
曲げモーメントM (kN. m/m)	O点	$M_x$	0.252
		$M_y$	0.252
	A点	$M_x$	-0.560
	B点	$M_y$	-0.560
発生垂直応力度 $\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	O点	$\sigma_x$	18.7
		$\sigma_y$	18.7
	A点	$\sigma_x$	41.5
	B点	$\sigma_y$	41.5

※下表では、変分布荷重方向をx軸とする

合成荷重			
合成垂直応力度 $\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	O点	$\sigma$	21.6
		$\sigma$	20.5
	A点	$\sigma$	48.9
	B点	$\sigma$	46.1
許容応力度	$\sigma_a$ (N/mm <sup>2</sup> )		210
発生せん断応力度 $\tau$ (N/mm <sup>2</sup> )			0.6
許容応力度	$\tau_a$ (N/mm <sup>2</sup> )		120

... OK

... OK

... OK

... OK

... OK

## 6.水圧照査(その1)

### ◆パネルAn

※下表では、変分布荷重方向をx軸とする

等変分布荷重	[kN/mm <sup>2</sup> ]	0~	5.8
パネル形状	a	(mm)	575
	b		606
縦横比	b / a	1.1	
パネル板厚	t (mm)	9	
モーメント係数 $\beta$	O点	$M_x$	0.018
		$M_y$	0.012
	A点	$M_x$	-0.046
	B点	$M_y$	-0.029
曲げモーメントM (kN. m/m)	O点	$M_x$	0.035
		$M_y$	0.022
	A点	$M_x$	-0.089
	B点	$M_y$	-0.055
発生垂直応力度 $\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	O点	$\sigma_x$	2.6
		$\sigma_y$	1.6
	A点	$\sigma_x$	6.6
	B点	$\sigma_y$	4.1

※下表では、短辺方向をx軸とする

等分布荷重	[kN/mm <sup>2</sup> ]	53.8	
パネル形状	a	(mm)	575
	b		606
縦横比	b / a	1.1	
パネル板厚	t (mm)	9	
モーメント係数 $\beta$	O点	$M_x$	0.0231
		$M_y$	0.0231
	A点	$M_x$	-0.0513
	B点	$M_y$	-0.0513
曲げモーメントM (kN. m/m)	O点	$M_x$	0.411
		$M_y$	0.411
	A点	$M_x$	-0.912
	B点	$M_y$	-0.912
発生垂直応力度 $\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	O点	$\sigma_x$	30.4
		$\sigma_y$	30.4
	A点	$\sigma_x$	67.6
	B点	$\sigma_y$	67.6

※下表では、変分布荷重方向をx軸とする

合成荷重			
合成垂直応力度 $\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	O点	$\sigma$	33.0
		$\sigma$	32.1
	A点	$\sigma$	74.1
	B点	$\sigma$	71.6
許容応力度	$\sigma_a$ (N/mm <sup>2</sup> )	210	
発生せん断応力度 $\tau$ (N/mm <sup>2</sup> )	0.9		
許容応力度	$\tau_a$ (N/mm <sup>2</sup> )	120	

... OK

... OK

... OK

... OK

... OK

## 6.水圧照査(その1)

### ◆パネルB2

※下表では、変分布荷重方向をx軸とする

等変分布荷重	[kN/mm <sup>2</sup> ]	0~ 6.1	
パネル形状	a	(mm)	600
	b		606
縦横比	b / a		1.0
パネル板厚	t	(mm)	9
モーメント係数 $\beta$	O点	$M_x$	0.018
		$M_y$	0.012
	A点	$M_x$	-0.046
	B点	$M_y$	-0.029
曲げモーメントM (kN. m/m)	O点	$M_x$	0.040
		$M_y$	0.025
	A点	$M_x$	-0.101
	B点	$M_y$	-0.062
発生垂直応力度 $\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	O点	$\sigma_x$	3.0
		$\sigma_y$	1.9
	A点	$\sigma_x$	7.5
	B点	$\sigma_y$	4.6

※下表では、短辺方向をx軸とする

等分布荷重	[kN/mm <sup>2</sup> ]	59.6	
パネル形状	a	(mm)	600
	b		606
縦横比	b / a		1.0
パネル板厚	t	(mm)	9
モーメント係数 $\beta$	O点	$M_x$	0.0231
		$M_y$	0.0231
	A点	$M_x$	-0.0513
	B点	$M_y$	-0.0513
曲げモーメントM (kN. m/m)	O点	$M_x$	0.496
		$M_y$	0.496
	A点	$M_x$	-1.101
	B点	$M_y$	-1.101
発生垂直応力度 $\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	O点	$\sigma_x$	36.7
		$\sigma_y$	36.7
	A点	$\sigma_x$	81.5
	B点	$\sigma_y$	81.5

※下表では、変分布荷重方向をx軸とする

合成荷重			
合成垂直応力度 $\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	O点	$\sigma$	39.7
		$\sigma$	38.6
	A点	$\sigma$	89.0
	B点	$\sigma$	86.1
許容応力度	$\sigma_a$ (N/mm <sup>2</sup> )		210
発生せん断応力度 $\tau$ (N/mm <sup>2</sup> )			1.0
許容応力度	$\tau_a$ (N/mm <sup>2</sup> )		120

... OK

... OK

... OK

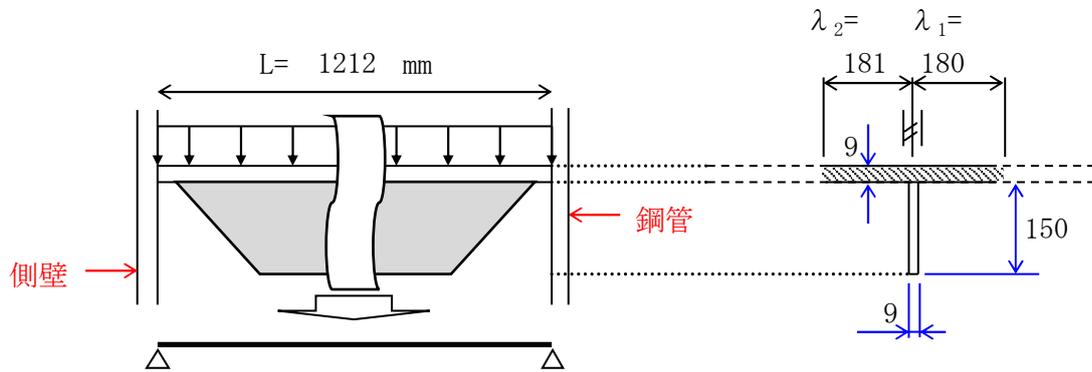
... OK

... OK

## 6.水圧照査(その1)

### iii)補強リブ強度(青)

側板と鋼管で支持された単純支持梁として照査する。



$$\begin{aligned} \text{作用荷重 } q_1 &= 59.6 \times 0.588 = 35.0 \text{ kN/m} \\ \text{設計断面力 } M &= 35.0 \times 1.212^2 / 8 = 6.4 \text{ kN.m} \\ S &= 35.0 \times 1.212 / 2 = 21.2 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

リブサイズ FB 150 x 9 [SS400]

フランジの片側有効幅

$$\begin{aligned} 2b_1 &= 575 \text{ mm} \\ b_1/l &= 0.24 \rightarrow \lambda_1 = 180 \text{ mm} \\ 2b_2 &= 600 \text{ mm} \\ b_2/l &= 0.25 \rightarrow \lambda_2 = 181 \text{ mm} \end{aligned}$$

断面定数

				A (mm <sup>2</sup> )	y (mm)	Ay (mm <sup>3</sup> )	Ay <sup>2</sup> (mm <sup>4</sup> )	I (mm <sup>4</sup> )
1	- Shl. PL	361	× 9	3252	4.5	14634	65854	21951
2	- Stf. FB	150	× 9	1350	84.0	113400	9525600	2531250
								4602
								128034
								9591454
								2553201
								-3562058
								8582598

$$e = 27.8 \text{ mm}$$

$$W_1 = 308492 \text{ mm}^3$$

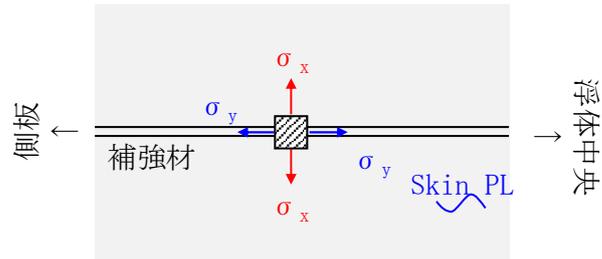
$$W_2 = 65427 \text{ mm}^3$$

発生応力度	$\sigma_1 = M/W_U =$	20.8	<	210	N/mm <sup>2</sup>	(圧縮)	… OK
	$\sigma_2 = M/W_L =$	98.3	<	210	N/mm <sup>2</sup>	(引張)	… OK
	$\tau = S/A_S =$	15.7	<	120	N/mm <sup>2</sup>		… OK

## 6.水圧照査(その1)

### iv) 二軸応力度の照査

はりの中央において



$$\left( \frac{\sigma_x}{\sigma_a} \right)^2 - \left( \frac{\sigma_x}{\sigma_a} \right) \left( \frac{\sigma_y}{\sigma_a} \right) + \left( \frac{\sigma_y}{\sigma_a} \right)^2 + \left( \frac{\tau}{\tau_a} \right)^2 = 0.25 \leq 1.2 \dots \text{OK}$$

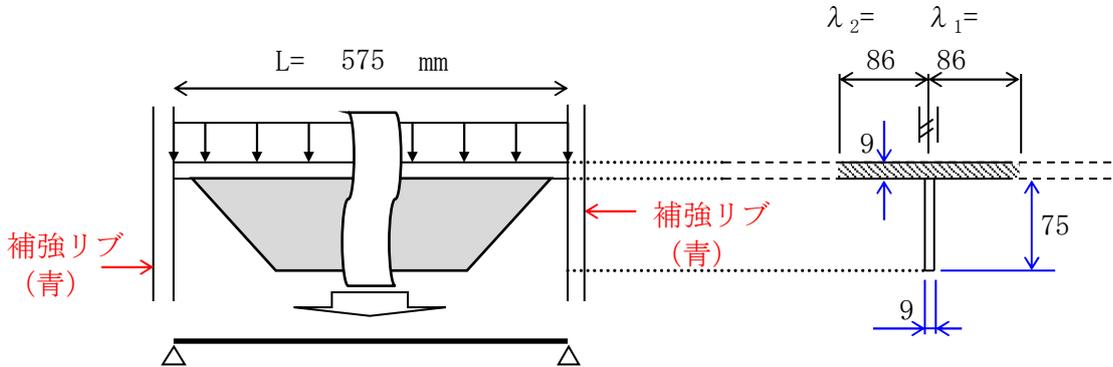
$\sigma_x = 89.0 \text{ N/mm}^2$	: パネル応力度	※引張正
$\sigma_y = -20.8 \text{ N/mm}^2$	: 補強リブ応力度	※引張正
$\sigma_a = 210 \text{ N/mm}^2$		
$\tau = 15.7 \text{ N/mm}^2$	: デッキせん断応力度	
$\tau_a = 120 \text{ N/mm}^2$		

## 6.水圧照査(その1)

### iv) 補強リブ強度 (赤)

#### ① 単純支持梁として

補強リブ (青) で支持された単純支持梁として照査する。



$$\begin{aligned} \text{作用荷重 } q_1 &= 59.6 \times 0.606 = 36.1 \text{ kN/m} \\ \text{設計断面力 } M &= 36.1 \times 0.575^2 / 8 = 1.5 \text{ kN.m} \\ S &= 36.1 \times 0.575 / 2 = 10.4 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

リブサイズ FB 75 x 9 [SS400]

フランジの片側有効幅

$$\begin{aligned} 2b_1 &= 606 \text{ mm} \\ b_1/l &= 0.53 \rightarrow \lambda_1 = 86 \text{ mm} \\ 2b_2 &= 606 \text{ mm} \\ b_2/l &= 0.53 \rightarrow \lambda_2 = 86 \text{ mm} \end{aligned}$$

断面定数

				A (mm <sup>2</sup> )	y (mm)	Ay (mm <sup>3</sup> )	Ay <sup>2</sup> (mm <sup>4</sup> )	I (mm <sup>4</sup> )			
1	- Shl. PL	173	×	9	1553	4.5	6986	31438	10479		
2	- Stf. FB	75	×	9	675	46.5	31388	1459519	316406		
								2228	38374	1490957	326886
											-661075
											1156767

$$e = 17.2 \text{ mm}$$

$$W_1 = 67147 \text{ mm}^3$$

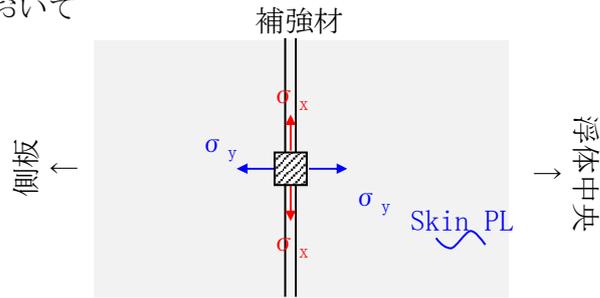
$$W_2 = 17324 \text{ mm}^3$$

発生応力度	$\sigma_1 = M/W_U =$	22.2	<	210	N/mm <sup>2</sup>	(圧縮)	… OK
	$\sigma_2 = M/W_L =$	86.2	<	210	N/mm <sup>2</sup>	(引張)	… OK
	$\tau = S/A_S =$	15.4	<	120	N/mm <sup>2</sup>		… OK

## 6.水圧照査(その1)

### ②二軸応力度の照査

はりの中央において



$$\left( \frac{\sigma_x}{\sigma_a} \right)^2 - \left( \frac{\sigma_x}{\sigma_a} \right) \left( \frac{\sigma_y}{\sigma_a} \right) + \left( \frac{\sigma_y}{\sigma_a} \right)^2 + \left( \frac{\tau}{\tau_a} \right)^2 = 0.18 \leq 1.2 \dots \text{OK}$$

$\sigma_x = -22.2 \text{ N/mm}^2$	: 補強リブ応力度	※引張正
$\sigma_y = 71.6 \text{ N/mm}^2$	: パネル応力度	※引張正
$\sigma_a = 210 \text{ N/mm}^2$		
$\tau = 15.4 \text{ N/mm}^2$		
$\tau_a = 120 \text{ N/mm}^2$		

## 6.水圧照査(その2)

### 5) 上部鋼管

上部鋼管は、円筒シェルとしてモデル化する。

#### i) 鋼管緒元

$$\phi D = 558.8 \text{ [mm]}$$

$$t = 12.7 \text{ [mm]}$$

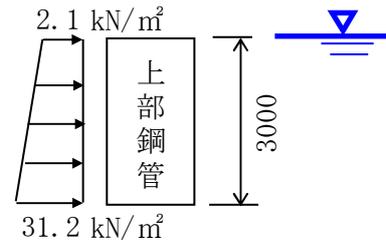
$$I = 8E+08 \text{ [mm}^4\text{]} \quad \text{断面二次モーメント}$$

#### ii) 作用荷重

右図より、大きい方

$$\text{作用圧力: } P = 31.2 \text{ kN/m}^2$$

内訳は、以下[a][b]の通り。



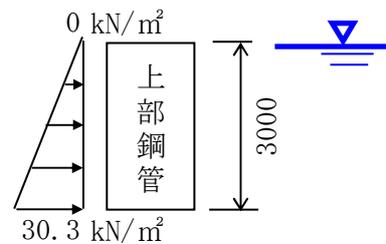
#### [a] 静水圧

$$f_w = \rho_0 \cdot g \cdot z$$

$$= 0 \text{ kN/m}^2 \quad \text{at } z = 0.0 \text{ m}$$

$$= 30.3 \text{ kN/m}^2 \quad \text{at } z = 3.0 \text{ m}$$

$\rho_0 =$	1.03 t/m <sup>3</sup>	: 海水の密度
$g =$	9.81 m/s <sup>2</sup>	: 重力加速度
$z =$	3.0 m	: 水深

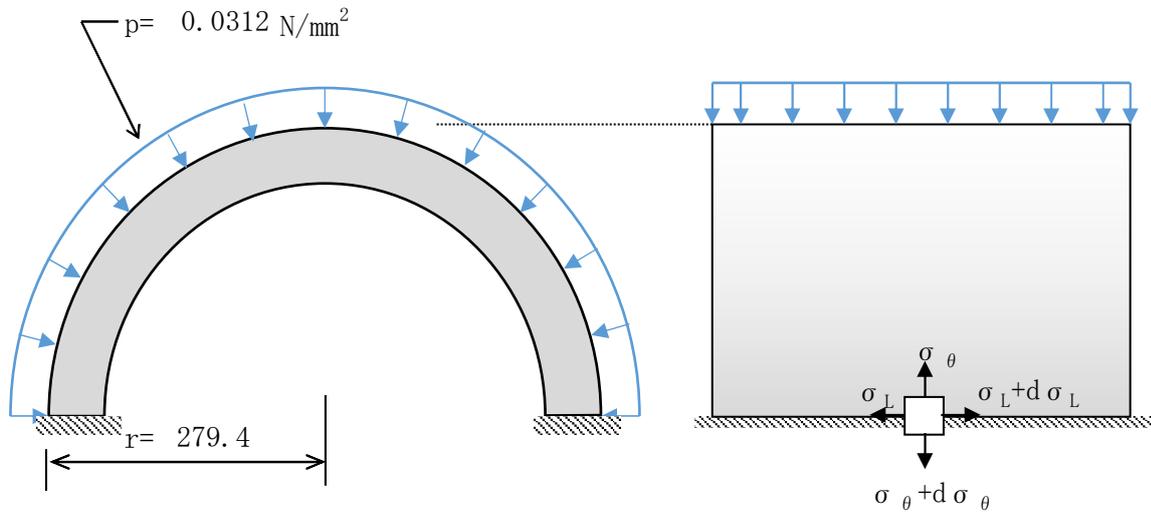




## 6.水圧照査(その2)

### iii)円筒シェルとしての照査

#### ①外圧が作用する薄肉円筒構造の照査



円周方向

$$\sigma_{\theta} = \frac{p \cdot r}{t} = 0.7 < 210 \text{ N/mm}^2 \quad \dots \text{OK}$$

高さ方向

$$\sigma_L = \frac{p \cdot r}{2 \cdot t} = 0.3 < 210 \text{ N/mm}^2 \quad \dots \text{OK}$$

ここで、p: 作用圧 (= 0.0312 N/mm<sup>2</sup>)

r: シェル半径 (= 279.4 mm)

t: シェル厚 (= 12.7 mm)

(発生応力度が小さいため2軸応力の照査は省略する.)

6.水圧照査(その2)

②7-1の圧壊照査

荷重はi)より

$P = 31.2 \text{ kN/m}^2$

圧壊強度は

$$P_r = \frac{3EI}{r^3} = \frac{2E+07 \text{ N/mm}^2}{2E+10 \text{ kN/m}^2} > P$$

... OK

ここで、E: 弾性係数(= 200000 N/mm<sup>2</sup>)  
 I: 断面二次モーメント(= 8E+08 mm<sup>4</sup>)  
 r: アーチ半径 (= 279.4 mm)

8.1.7.2 均等外圧をうける周輪および弧状アーチの圧壊圧力算定法  
 第 8.16 表

屈半波数	4	2					
屈圧力	$p_k = \frac{3EI}{r^3}$	$p_k = \frac{EI}{r^3} \left[ \left( \frac{\pi}{\alpha} \right)^2 - 1 \right]$	$p_k = \frac{EI}{r^3} (k^2 - 1)$				
ただし、k は次式または次表によって定まる。 $k \cdot \tan \alpha \cdot \cot k\alpha = 1$							
	α	30°	60°	90°	120°	150°	180°
	k	8.621	4.375	3	2.364	2.066	2

## 6.水圧照査(その2)

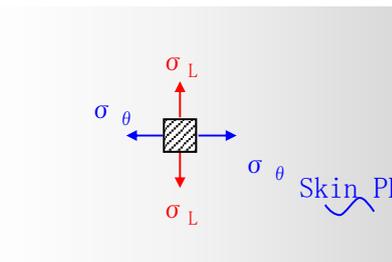
### iv) 二軸応力状態

#### ①合成荷重

##### ii)-①および5. 構造照査より

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta} &= 0.7 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (\text{圧縮}) \\ \sigma_L &= 2.7 + 0.3 = 3.0 < 210 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (\text{圧縮}) \quad \dots \text{ OK} \\ &= 2.8 < 210 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (\text{引張}) \quad \dots \text{ OK} \\ \tau &= 0.5 \text{ [N/mm}^2\text{]} \end{aligned}$$

#### ②二軸応力状態の照査



$$\left( \frac{\sigma_x}{\sigma_a} \right)^2 - \left( \frac{\sigma_x}{\sigma_a} \right) \left( \frac{\sigma_y}{\sigma_a} \right) + \left( \frac{\sigma_y}{\sigma_a} \right)^2 + \left( \frac{\tau}{\tau_a} \right)^2 = 0.00 \leq 1.2 \quad \dots \text{ OK}$$

$\sigma_L = -3.0 \text{ N/mm}^2$	: パネル応力度	※引張正
$\sigma_{\theta} = -0.7 \text{ N/mm}^2$	: 補強リブ応力度	※引張正
$\sigma_a = 210 \text{ N/mm}^2$		
$\tau = 0.5 \text{ N/mm}^2$	: デッキせん断応力度	
$\tau_a = 120 \text{ N/mm}^2$		

## 6.水圧照査(その2)

### 6) 尾筒

尾筒は、円筒シェルとしてモデル化する。

#### i) 鋼管緒元

$$\phi D = 558.8 \text{ [mm]}$$

$$t = 16 \text{ [mm]}$$

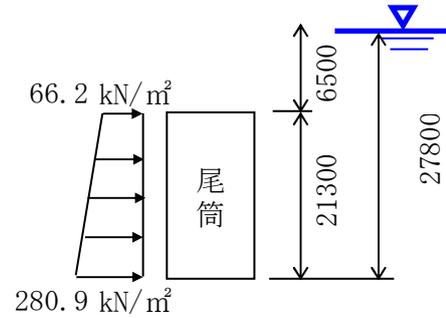
$$I = 1E+09 \text{ [mm}^4\text{]} \quad \text{断面二次モーメント}$$

#### ii) 作用荷重

右図より、大きい方

$$\text{作用圧力: } P = 280.9 \text{ kN/m}^2$$

内訳は、以下[a][b]の通り。



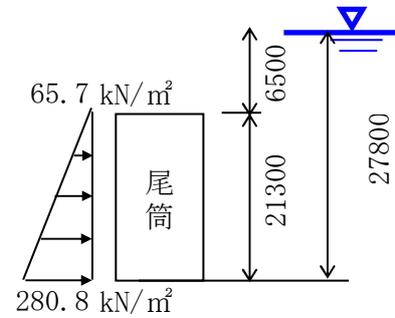
#### [a] 静水圧

$$f_w = \rho_0 \cdot g \cdot z$$

$$= 65.7 \text{ kN/m}^2 \quad \text{at } z = 6.5 \text{ m}$$

$$= 280.8 \text{ kN/m}^2 \quad \text{at } z = 27.8 \text{ m}$$

$\rho_0 =$	1.03 t/m <sup>3</sup>	: 海水の密度
$g =$	9.81 m/s <sup>2</sup>	: 重力加速度
$z =$	27.8 m	: 水深



## 6.水圧照査(その2)

### [b] 流体力

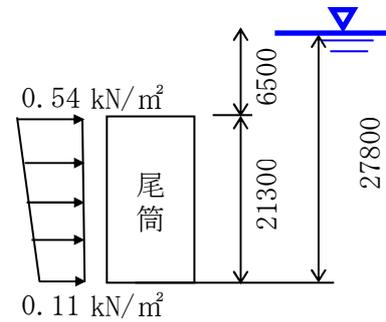
定常流中に置かれた尾筒に作用する流体力 $f_D$

$$f_D = \frac{1}{2} C_D \rho_0 V^2$$

$$= 0.54 \text{ kN/m}^2 \quad \text{at } z = 6.5 \text{ m}$$

$$= 0.11 \text{ kN/m}^2 \quad \text{at } z = 27.8 \text{ m}$$

$C_D = 1.0$	: 抗力係数
$\rho_0 = 1.03 \text{ t/m}^3$	: 海水の密度



流速総和 $V=V_W+V_T+V_B$

1.02 m/sec	at z = 6.5 m
0.47 m/sec	at z = 27.8 m

波粒子速度 $V_W$

0.23 m/sec	at z = 6.5 m
0.00 m/sec	at z = 27.8 m

潮流速度 $V_T$

0.25 m/sec	at z = 6.5 m
0.19 m/sec	at z = 27.8 m

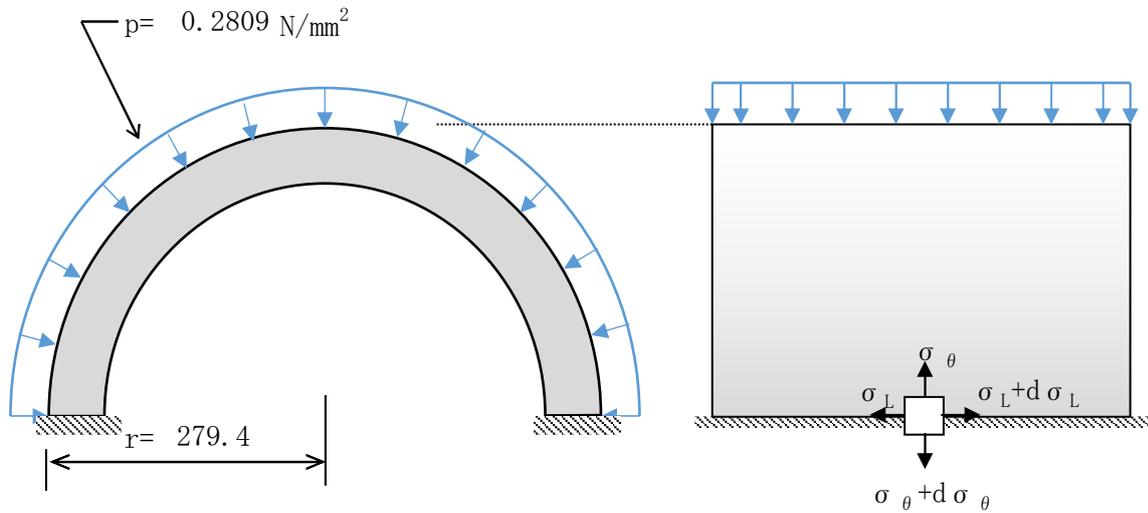
吹送流速 $V_B$

0.54 m/sec	at z = 6.5 m
0.28 m/sec	at z = 27.8 m

## 6.水圧照査(その2)

### iii)円筒シェルとしての照査

#### ①外圧が作用する薄肉円筒構造の照査



円周方向

$$\sigma_\theta = \frac{p \cdot r}{t} = 4.9 < 210 \text{ N/mm}^2 \quad \dots \text{OK}$$

高さ方向

$$\sigma_L = \frac{p \cdot r}{2 \cdot t} = 2.5 < 210 \text{ N/mm}^2 \quad \dots \text{OK}$$

ここで、 $p$ : 作用圧 (= 0.2809 N/mm<sup>2</sup>)

$r$ : シェル半径 (= 279.4 mm)

$t$ : シェル厚 (= 16 mm)

(発生応力度が小さいため2軸応力の照査は省略する.)

## 6.水圧照査(その2)

### ②7-1の圧壊照査

荷重はi)より

$$P = 280.9 \text{ kN/m}^2$$

圧壊強度は

$$P_r = \frac{3EI}{r^3} = \frac{3E+07 \text{ N/mm}^2}{3E+10 \text{ kN/m}^2} > P$$

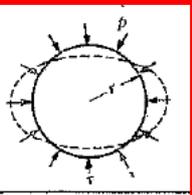
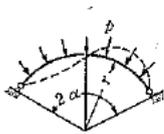
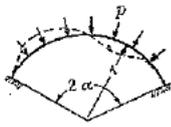
... OK

ここで、E: 弾性係数(= 200000 N/mm<sup>2</sup>)

I: 断面二次モーメント(1E+09 mm<sup>4</sup>)

r: アーチ半径 (= 279 mm)

8.1.7.2 均等外圧をうける周輪および弧状アーチの圧壊圧力算定法  
第 8.16 表

							
屈半波数	4	2					
屈圧力	$p_k = \frac{3EI}{r^3}$	$p_k = \frac{EI}{r^3} \left[ \left( \frac{\pi}{\alpha} \right)^2 - 1 \right]$	$p_k = \frac{EI}{r^3} (k^2 - 1)$				
ただし、k は次式または次表によって定まる。 $k \cdot \tan \alpha \cdot \cot k\alpha = 1$							
	$\alpha$	30°	60°	90°	120°	150°	180°
	k	8.621	4.375	3	2.364	2.066	2

船舶工学便覧 (日本造船学会編) 8.1.7.2 p.449

## 6.水圧照査(その2)

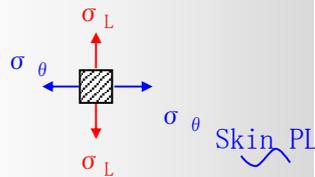
### iv) 二軸応力状態

#### ①合成荷重

ii) -①および5. 構造照査より

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta} &= 4.9 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (\text{圧縮}) \\ \sigma_L &= 31.8 + 2.5 = 34.3 < 210 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (\text{圧縮}) \quad \dots \text{ OK} \\ &= 24.8 < 210 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (\text{引張}) \quad \dots \text{ OK} \\ \tau &= 3.7 \text{ [N/mm}^2\text{]} \end{aligned}$$

#### ②二軸応力状態の照査



$$\left( \frac{\sigma_x}{\sigma_a} \right)^2 - \left( \frac{\sigma_x}{\sigma_a} \right) \left( \frac{\sigma_y}{\sigma_a} \right) + \left( \frac{\sigma_y}{\sigma_a} \right)^2 + \left( \frac{\tau}{\tau_a} \right)^2 = 0.02 \leq 1.2 \quad \dots \text{ OK}$$

$\sigma_L = -34.3 \text{ N/mm}^2$	: パネル応力度	※引張正
$\sigma_{\theta} = -4.9 \text{ N/mm}^2$	: 補強リブ応力度	※引張正
$\sigma_a = 210 \text{ N/mm}^2$		
$\tau = 3.7 \text{ N/mm}^2$	: デッキせん断応力度	
$\tau_a = 120 \text{ N/mm}^2$		

添付資料

設置予定場所で推定された分潮定数

(a) 夏季における北向き成分

海底上 (m)	分潮													
	M2	S2	K2	N2	L2	v2	$\mu$ 2	K1	O1	P1	Q1	M4	MS4	A0
28.72	9.8	10.2	2.8	1.3	1.6	0.3	0.5	1.6	0.3	0.5	0.8	1.9	1.9	-0.7
27.72	7.1	6.0	1.6	1.3	0.8	0.3	0.2	1.2	0.2	0.4	0.4	1.8	1.9	-0.9
26.72	5.1	5.8	1.6	1.0	0.8	0.2	0.1	0.3	0.1	0.1	0.4	1.5	1.6	-1.2
25.72	3.9	5.4	1.5	0.7	0.7	0.1	0.6	0.6	0.2	0.2	0.2	1.1	1.7	-1.2
24.72	3.1	5.1	1.4	0.6	0.7	0.1	0.9	1.0	0.1	0.3	0.2	1.1	1.8	-1.2
23.72	2.9	4.6	1.2	0.6	0.8	0.1	0.9	1.2	0.2	0.4	0.4	1.4	2.0	-1.1
22.72	2.6	4.6	1.3	0.6	0.8	0.1	0.9	1.1	0.4	0.4	0.5	1.5	1.7	-0.8
21.72	2.3	4.6	1.3	0.7	0.7	0.1	0.9	1.1	0.6	0.4	0.4	1.3	1.4	-0.8
20.72	2.2	4.3	1.2	1.0	0.5	0.2	0.9	1.0	0.5	0.3	0.5	1.2	1.1	-1.0
19.72	2.3	3.5	0.9	1.1	0.4	0.2	0.6	0.8	0.5	0.3	0.6	1.3	0.9	-1.3
18.72	2.6	2.8	0.8	1.2	0.3	0.2	0.2	0.6	0.5	0.2	0.6	1.3	0.6	-1.5
17.72	2.9	2.6	0.7	1.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.1	0.7	1.3	0.4	-1.7
16.72	3.1	2.8	0.8	1.2	0.2	0.2	0.4	0.2	0.4	0.1	0.6	1.3	0.3	-1.9
15.72	3.2	3.5	1.0	1.2	0.2	0.2	0.7	0.3	0.4	0.1	0.6	1.2	0.2	-2.1
14.72	3.5	4.3	1.2	1.2	0.3	0.2	0.8	0.4	0.3	0.1	0.7	1.0	0.2	-2.3
13.72	3.8	4.8	1.3	1.0	0.5	0.2	0.9	0.5	0.4	0.2	0.8	0.7	0.1	-2.5
12.72	4.2	5.0	1.4	0.9	0.5	0.2	0.9	0.6	0.4	0.2	0.7	0.6	0.2	-2.5
11.72	4.8	4.5	1.2	1.0	0.6	0.2	0.8	0.5	0.3	0.2	0.4	0.7	0.5	-2.6
10.72	5.3	3.8	1.0	1.1	0.6	0.2	0.8	0.5	0.2	0.2	0.2	0.9	0.7	-2.6
9.72	5.9	3.4	0.9	1.1	0.5	0.2	0.6	0.4	0.1	0.1	0.2	1.0	0.9	-2.6
8.72	6.4	3.3	0.9	1.1	0.3	0.2	0.5	0.4	0.2	0.1	0.2	1.0	1.0	-2.5
7.72	7.0	3.6	1.0	1.2	0.3	0.2	0.3	0.5	0.2	0.2	0.3	1.0	0.9	-2.3
6.72	7.3	4.0	1.1	1.3	0.4	0.3	0.2	0.5	0.2	0.2	0.3	1.0	0.7	-2.0
5.72	7.3	4.0	1.1	1.3	0.4	0.3	0.5	0.5	0.3	0.2	0.4	0.9	0.5	-1.6
4.72	7.0	3.8	1.0	1.2	0.3	0.2	0.6	0.6	0.4	0.2	0.4	0.6	0.4	-1.1
3.72	6.4	3.7	1.0	1.1	0.3	0.2	0.6	0.6	0.3	0.2	0.3	0.4	0.2	-0.4
2.72	5.7	3.5	1.0	0.9	0.3	0.2	0.6	0.4	0.2	0.1	0.3	0.4	0.3	0.2

## (b)夏季における東向き成分

海底上 (m)	分潮													
	M2	S2	K2	N2	L2	v2	$\mu$ 2	K1	O1	P1	Q1	M4	MS4	A0
28.72	4.1	0.7	0.2	2.7	1.1	0.5	1.1	0.3	0.4	0.1	0.8	0.6	0.8	1.2
27.72	4.6	2.0	0.6	2.6	1.7	0.5	1.0	1.0	0.7	0.3	0.6	0.9	0.7	1.4
26.72	5.1	2.7	0.7	2.5	2.0	0.5	0.9	1.2	1.7	0.4	0.6	1.2	1.1	1.4
25.72	5.8	2.3	0.6	2.2	1.6	0.4	1.4	1.0	2.3	0.3	0.6	1.3	1.3	1.2
24.72	6.6	1.8	0.5	2.2	1.5	0.4	1.9	0.9	2.5	0.3	0.8	1.4	1.5	1.2
23.72	7.4	1.5	0.4	2.4	1.5	0.5	2.4	0.9	2.4	0.3	0.8	1.7	1.6	1.2
22.72	8.2	1.8	0.5	2.6	1.5	0.5	2.5	0.9	2.0	0.3	0.7	1.9	1.8	1.3
21.72	8.8	2.1	0.6	2.6	1.4	0.5	2.3	0.9	1.8	0.3	0.7	2.3	2.3	1.4
20.72	9.5	2.3	0.6	2.4	1.1	0.5	2.0	0.9	1.5	0.3	0.8	2.6	2.8	1.5
19.72	10.2	2.7	0.7	2.2	0.7	0.4	1.6	0.7	1.2	0.2	0.9	2.7	3.4	1.6
18.72	10.7	3.7	1.0	1.8	0.4	0.4	1.3	0.5	1.0	0.2	0.7	2.8	3.9	1.9
17.72	11.1	4.8	1.3	1.6	0.3	0.3	1.2	0.4	0.9	0.1	0.5	2.9	4.2	2.2
16.72	11.6	5.4	1.5	1.3	0.4	0.2	1.0	0.4	0.9	0.1	0.4	3.2	4.4	2.6
15.72	12.2	5.2	1.4	1.0	0.5	0.2	0.7	0.5	1.0	0.2	0.3	3.6	4.5	3.0
14.72	12.8	4.7	1.3	0.9	0.6	0.2	0.3	0.6	0.9	0.2	0.4	4.0	4.7	3.3
13.72	13.6	4.4	1.2	0.8	0.8	0.2	0.4	0.7	0.9	0.2	0.5	4.2	5.0	3.7
12.72	14.4	4.1	1.1	1.0	0.8	0.2	0.7	0.7	1.0	0.2	0.8	4.3	5.2	4.2
11.72	15.3	4.1	1.1	1.2	0.7	0.2	1.0	0.5	0.9	0.2	1.0	4.4	5.2	4.8
10.72	16.2	4.7	1.3	1.3	0.5	0.3	1.4	0.2	0.7	0.1	1.1	4.6	5.1	5.3
9.72	17.1	5.4	1.5	1.4	0.1	0.3	1.5	0.1	0.6	0.0	1.0	4.9	4.9	5.6
8.72	18.1	6.1	1.7	1.4	0.3	0.3	1.7	0.1	0.5	0.0	1.0	5.2	4.8	5.8
7.72	19.1	7.1	1.9	1.4	0.6	0.3	1.9	0.0	0.4	0.0	1.0	5.2	4.7	6.0
6.72	19.7	7.6	2.1	1.3	0.8	0.3	2.0	0.1	0.3	0.0	1.0	5.1	4.6	6.1
5.72	20.0	7.8	2.1	1.2	0.8	0.2	2.2	0.3	0.2	0.1	0.9	4.7	4.6	6.3
4.72	20.0	7.8	2.1	1.1	0.8	0.2	2.4	0.4	0.1	0.1	0.9	4.3	4.5	6.5
3.72	19.7	7.7	2.1	1.0	0.7	0.2	2.5	0.5	0.3	0.2	0.9	3.8	4.3	6.9
2.72	18.9	7.3	2.0	1.2	0.7	0.2	2.5	0.5	0.5	0.2	0.8	3.4	4.2	7.2

(c) 冬季における北向き成分

海底上 (m)	分潮													
	M2	S2	K2	N2	L2	v2	μ2	K1	O1	P1	Q1	M4	MS4	A0
28.72	4.3	6.6	1.8	1.3	2.3	0.2	1.3	1.3	1.7	0.4	0.7	0.8	0.9	-1.7
27.72	2.9	4.4	1.2	1.0	1.9	0.2	0.9	0.7	1.4	0.2	0.3	0.3	0.0	-0.6
26.72	2.8	4.3	1.2	1.0	1.8	0.2	0.9	0.7	1.4	0.2	0.3	0.3	0.0	-0.5
25.72	2.8	4.2	1.1	0.9	1.8	0.2	1.0	0.7	1.3	0.2	0.3	0.3	0.0	-0.4
24.72	2.8	4.1	1.1	0.9	1.7	0.2	1.1	0.8	1.2	0.3	0.3	0.3	0.0	-0.4
23.72	2.7	4.1	1.1	0.8	1.6	0.2	1.2	0.7	1.2	0.2	0.3	0.3	0.0	-0.3
22.72	2.7	4.2	1.1	0.7	1.6	0.1	1.2	0.7	1.2	0.2	0.3	0.2	0.1	-0.2
21.72	2.8	4.1	1.1	0.7	1.6	0.1	1.2	0.8	1.2	0.3	0.3	0.2	0.1	-0.1
20.72	2.7	4.2	1.2	0.7	1.6	0.1	1.3	0.8	1.1	0.3	0.3	0.2	0.2	0.0
19.72	2.7	4.2	1.1	0.7	1.6	0.1	1.3	0.8	1.1	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1
18.72	2.7	4.3	1.2	0.6	1.5	0.1	1.3	0.9	1.0	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2
17.72	2.7	4.1	1.1	0.6	1.5	0.1	1.3	0.9	1.0	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2
16.72	2.6	4.1	1.1	0.6	1.5	0.1	1.3	0.9	0.9	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3
15.72	2.6	4.0	1.1	0.6	1.5	0.1	1.3	0.9	0.9	0.3	0.2	0.1	0.3	0.3
14.72	2.5	4.1	1.1	0.7	1.5	0.1	1.3	0.9	0.8	0.3	0.3	0.1	0.4	0.4
13.72	2.5	4.3	1.2	0.7	1.5	0.1	1.2	0.9	0.7	0.3	0.2	0.1	0.4	0.4
12.72	2.5	4.3	1.2	0.7	1.6	0.1	1.3	0.9	0.6	0.3	0.3	0.1	0.4	0.4
11.72	2.4	4.3	1.2	0.8	1.6	0.2	1.2	1.0	0.5	0.3	0.4	0.1	0.4	0.5
10.72	2.4	4.4	1.2	0.9	1.6	0.2	1.2	1.0	0.5	0.3	0.4	0.1	0.4	0.5
9.72	2.3	4.4	1.2	0.9	1.7	0.2	1.2	1.0	0.3	0.3	0.4	0.2	0.4	0.5
8.72	2.2	4.5	1.2	1.0	1.7	0.2	1.2	0.9	0.3	0.3	0.5	0.2	0.4	0.5
7.72	2.1	4.2	1.1	1.0	1.7	0.2	1.2	0.9	0.2	0.3	0.5	0.3	0.4	0.5
6.72	2.0	3.9	1.1	1.1	1.7	0.2	1.2	0.8	0.1	0.3	0.5	0.3	0.4	0.4
5.72	1.9	3.6	1.0	1.1	1.7	0.2	1.2	0.8	0.1	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4
4.72	1.8	3.1	0.8	1.3	1.6	0.2	1.2	0.7	0.0	0.2	0.4	0.3	0.5	0.3
3.72	1.7	2.9	0.8	1.4	1.5	0.3	1.2	0.6	0.0	0.2	0.4	0.3	0.5	0.4
2.72	1.7	2.6	0.7	1.5	1.5	0.3	1.1	0.4	0.0	0.1	0.3	0.4	0.5	0.4

(d) 冬季における東向き成分。

海底上 (m)	分潮													
	M2	S2	K2	N2	L2	v2	$\mu$ 2	K1	O1	P1	Q1	M4	MS4	A0
28.72	4.7	8.1	2.2	2.1	3.4	0.4	1.8	1.6	1.7	0.5	0.3	0.8	0.3	-0.3
27.72	4.6	10.0	2.7	2.3	3.8	0.5	2.2	1.5	1.8	0.5	0.3	0.8	0.4	-0.2
26.72	4.6	9.9	2.7	2.4	3.8	0.5	2.2	1.4	1.8	0.5	0.3	0.7	0.4	-0.1
25.72	4.6	10.0	2.7	2.4	3.8	0.5	2.2	1.4	1.7	0.5	0.3	0.7	0.4	-0.1
24.72	4.6	9.7	2.6	2.4	3.7	0.5	2.2	1.4	1.6	0.5	0.3	0.7	0.4	-0.1
23.72	4.5	9.5	2.6	2.4	3.7	0.5	2.3	1.4	1.5	0.5	0.3	0.7	0.4	-0.1
22.72	4.5	9.5	2.6	2.4	3.7	0.5	2.3	1.5	1.5	0.5	0.3	0.6	0.4	-0.1
21.72	4.4	9.4	2.5	2.5	3.7	0.5	2.3	1.4	1.4	0.5	0.2	0.6	0.4	0.0
20.72	4.3	9.2	2.5	2.5	3.7	0.5	2.3	1.4	1.4	0.5	0.2	0.6	0.3	0.0
19.72	4.3	9.0	2.5	2.5	3.6	0.5	2.3	1.4	1.3	0.5	0.3	0.7	0.4	0.0
18.72	4.2	8.8	2.4	2.5	3.6	0.5	2.3	1.4	1.3	0.5	0.3	0.7	0.4	0.1
17.72	4.2	8.6	2.3	2.5	3.6	0.5	2.3	1.4	1.2	0.5	0.3	0.7	0.3	0.2
16.72	4.1	8.3	2.3	2.6	3.6	0.5	2.3	1.4	1.2	0.5	0.3	0.8	0.3	0.2
15.72	4.1	8.0	2.2	2.5	3.5	0.5	2.3	1.4	1.1	0.5	0.4	0.8	0.2	0.3
14.72	4.0	7.7	2.1	2.6	3.5	0.5	2.4	1.4	1.1	0.5	0.4	0.9	0.3	0.3
13.72	4.1	7.4	2.0	2.6	3.4	0.5	2.5	1.4	1.0	0.5	0.5	0.9	0.2	0.4
12.72	4.1	7.3	2.0	2.6	3.4	0.5	2.5	1.4	1.0	0.5	0.5	0.9	0.2	0.5
11.72	4.1	6.9	1.9	2.6	3.4	0.5	2.5	1.4	0.9	0.5	0.5	0.8	0.1	0.6
10.72	4.1	6.6	1.8	2.6	3.4	0.5	2.4	1.3	0.9	0.4	0.5	0.8	0.1	0.6
9.72	4.1	6.3	1.7	2.6	3.3	0.5	2.4	1.3	0.9	0.4	0.6	0.8	0.0	0.7
8.72	4.1	6.1	1.7	2.7	3.3	0.5	2.4	1.3	0.9	0.4	0.6	0.8	0.1	0.8
7.72	4.1	5.8	1.6	2.7	3.3	0.5	2.4	1.2	0.9	0.4	0.6	0.7	0.1	0.9
6.72	4.1	5.4	1.5	2.8	3.2	0.5	2.4	1.2	0.9	0.4	0.6	0.6	0.2	0.9
5.72	4.2	5.2	1.4	2.9	3.1	0.6	2.5	1.1	0.9	0.4	0.6	0.4	0.3	1.0
4.72	4.2	5.0	1.3	2.9	3.0	0.6	2.4	1.0	0.9	0.3	0.6	0.3	0.3	1.1
3.72	4.0	4.8	1.3	3.0	2.9	0.6	2.4	0.9	0.9	0.3	0.6	0.4	0.3	1.3
2.72	3.8	4.8	1.3	3.0	2.8	0.6	2.2	0.9	1.0	0.3	0.7	0.4	0.3	1.5