

令和 5 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 6 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5年度事業の委託研究の概要

(R5_1_概要.pdf) 1-1

2. 研究成果

(1) 活動的カルデラ火山の地下構造調査 2-1-1-1

(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

(R5_2(1)1_地震観測による構造調査.pdf) 2-1-1-1

(1) - 1 - 1. 始良カルデラ臨時観測点の維持運用 2-1-1-1

(1) - 1 - 2. 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改善 2-1-1-3

(1) - 1 - 3. 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 2-1-1-15

(1) - 1 - 4. 地震波の振幅減衰から見たマグマ溜まりの位置推定についての検討 2-1-1-29

(1) - 1 - 5. 始良カルデラにおける地震活動 2-1-1-35

(1) - 1 - 6. まとめ 2-1-1-37

(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

(R5_2(1)1_長期連続反射法.pdf) 2-1-2-1

(1) - 2 - 1. はじめに 2-1-2-1

(1) - 2 - 2. 令和5年度基礎実験の実施 2-1-2-3

(1) - 2 - 3. 令和5年度基礎実験で得られた記録 2-1-2-32

(1) - 2 - 4. 考察 2-1-2-51

(1) - 2 - 5. まとめ 2-1-2-68

付録1 京都大学桜島観測所黒神観測室における試験発振坑設置に伴って出現した露頭断面 2-1-2-72

付録2 黒神観測室構内における試験発振坑設置工事写真 2-1-2-79

(2) 活動的カルデラ火山火山性地殻変動とマグマ活動に関する調査 2-2-1-1

(2) - 1. 始良カルデラの火山性地殻変動データの蓄積

(R5_2(2)1_火山性地殻変動とマグマ活動.pdf) 2-2-1-1

(2) - 1 - 1. 始良カルデラ臨時GNSS観測点の拡充と維持 2-2-1-3

(2) - 1 - 2. 始良カルデラ下の圧力源解析 2-2-1-13

(2) - 1 - 3. 始良カルデラへのマグマ供給量の推定 2-2-1-25

(2) - 1 - 4. まとめ 2-2-1-30

(2) - 2. 始良カルデラにおける海底地殻変動観測の検討	
(R5_2(2)_2_海底地盤変動観測の検討. pdf)	2-2-2-1
(2) - 2 - 1. はじめに	2-2-2-1
(2) - 2 - 2. 海底地盤変動観測装置の概要	2-2-2-2
(2) - 2 - 3. 海底地盤変動観測装置の運用と維持	2-2-2-7
(2) - 2 - 4. 海底地盤変動観測装置測位値の妥当性の検討	2-2-2-24
(2) - 2 - 5. まとめ	2-2-2-29
付録 ユニバーサルジョイントの摩耗特性	2-2-2-30
(3) 活動的カルデラ火山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	
(R5_2(3)_シミュレーション. pdf)	2-3-1
(3) - 1. はじめに	2-3-1
(3) - 2. 粘弾性地表面変位解析ツール	2-3-3
(4) 成果のまとめと今後の課題	
(R5_2(4)_成果のまとめと今後の課題. pdf)	2-4-1
(5) 委員会の開催	
(R5_2(5)_委員会の開催. pdf)	2-5-1

図表目次

1. 令和5年度事業の委託研究の概要

(R5_1_概要.pdf)	1-1
図1 本項目を構成する手法とその適用範囲	1-1
図2 トモグラフィ解析ロードマップ	1-2
図3 レシーバ関数解析ロードマップ	1-3
図4 長期連続反射法ロードマップ	1-4
図5 火山性地盤変動観測のロードマップ	1-6
図6 海底地盤変動観測装置ロードマップ	1-8

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

(R5_2(1)1_地震観測による構造調査.pdf)	2-1-1-1
(1) - 1 - 1. 始良カルデラ臨時地震観測点の維持運用	
図1 臨時地震観測点分布	2-1-1-1
表1. 臨時地震観測のデータ回収実施日	2-1-1-2
図2 地震イベント観測波形	2-1-1-2

(1) - 1 - 2. 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改善

図3 地震波トモグラフィ解析に使用した地震観測点	2-1-1-4
図4 2008年人工地震探査の発破点と地震観測点の分布	2-1-1-5
図5 解析に使用した435イベントの震源分布図	2-1-1-6
図6 3次元トモグラフィ解析の流れ	2-1-1-7
表3 初期構造となる1次元速度構造	2-1-1-8
図7 深さ5 km、10 km、15 km、20 km、25 kmにおけるチェッカーボードテスト結果	2-1-1-9
図8 深さ1 km、5 km、10 km、15 km、20 km、25 kmにおけるP波、S波速度およびその比	2-1-1-11
図9 深さ35 km、45 kmにおけるP波、S波速度およびその比	2-1-1-12
図10 始良カルデラの特徴的な地震波速度構造	2-1-1-14

(1) - 1 - 3. 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

図11 始良カルデラ周辺の地震観測点の分布 (+)	2-1-1-15
図12 観測点FUKにおけるレシーバ関数のRadial成分の波形	2-1-1-16
図13 観測点BENにおけるレシーバ関数のR成分の波形	2-1-1-17

表 4	遺伝アルゴリズムにおけるモデルパラメータの探索範囲	2-1-1-18
図 1 4	FUK でのレシーバ関数インバージョンの結果	2-1-1-19
図 1 5	BEN でのレシーバ関数インバージョンの結果	2-1-1-20
図 1 6	S 波速度構造のマッピングの結果	2-1-1-21
図 1 7	図 1 6 の結果を補間して得られた $Z = 10$ km から 35 km まで 5 km ごとの深さにおける S 波速度の不均質分布	2-1-1-22
図 1 8	$Z = 10$ km から 35 km まで 5 km ごとの深さにおける S 波速度の平均値からの偏差の不均質分布	2-1-1-23
図 1 9	$Y = -5$ km から 20 km まで 5 km ごとの東西断面における S 波速度の偏差の不均質分布	2-1-1-24
図 2 0	$X = -5$ km から 20 km まで 5 km ごとの南北断面における S 波速度の偏差の不均質分布	2-1-1-24
図 2 1	観測点 BEN におけるすべての到来方向のレシーバ関数を同時インバージョンして推定された傾斜境界面をもつ 2 層構造モデル	2-1-1-25
図 2 2	観測点 BEN におけるすべての到来方向のレシーバ関数を同時インバージョンして傾斜境界面をもつ 2 層構造モデルを推定した際の観測波形と理論波形の比較	2-1-1-26
図 2 3	BEN での傾斜構造モデルを用いたレシーバ関数インバージョンの結果	2-1-1-28
(1) - 1 - 4.	地震波の振幅減衰から見たマグマ溜まりの位置推定についての検討	
図 2 4	振幅減衰解析のための地震イベント候補	2-1-1-30
表 5	サイト特性を得るために使用したやや近地地震のリスト	2-1-1-31
表 6	サイト特性の振幅値	2-1-1-32
図 2 5	始良カルデラを通過する地震波の振幅減衰	2-1-1-33
図 2 6	振幅減衰が認められる波線の交点	2-1-1-34
(1) - 1 - 5.	始良カルデラにおける地震活動	
図 2 7	始良カルデラの地震活動と発震メカニズム	2-1-1-36
(1) - 1 - 6.	始良カルデラにおける地震観測による地殻構造調査のまとめ	
表 2	3 次元速度構造解析に用いた地震のイベントリスト	2-1-1-41
(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	
	(R5_2(1)1_長期連続反射法.pdf)	2-1-2-1
(1) - 2 - 1.	はじめに	
図 1	地震反射波による地下構造変化検出の模式図	2-1-2-1
図 2	Tsutsui et al. (2016)における地震反射波変化検出例	2-1-2-2
図 3.	長期連続反射法探査の検討のロードマップ	2-1-2-3

(1) - 2 - 2. 令和5年度基礎実験の実施

図4	黒神試験坑の位置	2-1-2-4
図5	試験発振坑全体と配筋	2-2-2-5
表1	工程概略	2-1-2-6
表2	ステップ位置	2-1-2-6
図6	発振実験終了後	2-1-2-8
図7	エアガン装置	2-1-2-9
図8	ボンベカードル	2-1-2-9
図9	水位センサー	2-1-2-10
表3	発振時刻	2-1-2-11
表4	水位監視結果	2-1-2-12
図10	2023/12/18以降1週間の水位変化	2-1-2-13
図11	発震実験中の水位変化	2-1-2-13
表5	亀裂分布表	2-1-2-14
図12	亀裂の分布	2-1-2-15
図13	のぞき込み撮影写真	2-1-2-15
図14	底から0.65 m高	2-1-2-16
図15	底から1.8 m高	2-1-2-20
図16	底から3.1 m高	2-1-2-22
図17	底から3.6 m高	2-1-2-24
図18	底から3.9 m高	2-1-2-27
図19	底から4.3 m高	2-1-2-29

(1) - 2 - 3. 令和5年度基礎実験で得られた記録

図20	近傍観測展開図	2-1-2-33
図21	近傍観測システムと発振システム	2-1-2-33
図22	中距離観測	2-1-2-34
図23	近傍観測波形	2-1-2-35
表6	近傍観測データチャンネル割り当て	2-1-2-36
図24	中距離観測波形	2-1-2-37
表7	中距離観測データチャンネル割り当て	2-1-2-37
図25	震源距離約100mにおける波形記録	2-1-2-38
図26	1150m地点における観測波形	2-1-2-39
図27	周波数解析結果	2-1-2-40
図28	NFH波形	2-1-2-41
図29	本実験におけるエアガン構成による波形変化	2-1-2-41

図 3 0	貯水池における 2000 psi 三重連発振で得られた振源距離 102m 地点の観測波形	2-1-2-42
図 3 1	90m 地点における 3 成分波形と振動軌跡	2-1-2-43
図 3 2	振源距離 1.15 km における観測波形	2-1-2-44
図 3 3	1.15 km 地点における 3 成分波形と振動軌跡	2-1-2-45
図 3 4	エアガン構成による上下動成分の周波数成分変化	2-1-2-46
図 3 5	2022 年実験（京都大学防災研究所，2023）との上下動成分周波数成分比較	2-1-2-46
図 3 6	京都大学防災研究所常設観測点	2-1-2-47
図 3 7	遠方における上下動成分観測波形	2-1-2-48
(1) - 2 - 4. 考察		
表 7	エアガン発振環境の比較	2-1-2-51
表 8	数値計算仕様	2-1-2-51
図 3 8	黒神観測室構内地震波速度	2-1-2-52
図 3 9	試験坑シミュレーションで用いた表層構造モデル	2-1-2-53
表 9	発振条件と放出エネルギー量	2-1-2-53
図 4 0	ピーク圧力	2-1-2-54
図 4 1	発振深度とピーク圧力	2-1-2-55
図 4 2	動作圧とピーク圧力	2-1-2-56
図 4 3	1000 psi	2-1-2-57
図 4 4	1500 psi	2-1-2-57
図 4 5	2000 psi の発振に対するシミュレーション結果	2-1-2-58
図 4 6	発振から 40ms 経過後の上下加速度振幅の空間分布	2-1-2-59
図 4 7	発振から 90ms 経過後の上下加速度の空間分布	2-1-2-59
図 4 8	数値実験測線図	2-1-2-61
図 4 9	為栗他(2022)をもとにした速度構造スライスと数値実験用速度構造モデル生成用の内 挿に用いた重み	2-1-2-62
図 5 0	合成波形例	2-1-2-62
図 5 1	差分波形記録	2-1-2-63
図 5 2	測線 1 走時曲線	2-1-2-63
図 5 3	測線 2 走時曲線	2-1-2-64
図 5 4	測線 3 走時曲線	2-1-2-64
図 5 5	低速度領域速度変化による波形変化の検討	2-1-2-65
図 5 6	低速度領域速度変化による波形変化の検討	2-1-2-66
図 5 7	低速度領域速度変化による波形変化の検討	2-1-2-67
図 5 8	低速度領域速度変化による波形変化の検討	2-1-2-68

(1) - 2 - 5. まとめ

図 5 9 長期連続反射法観測データ処理 2-1-2-70

付録 1 京都大学桜島観測所黒神観測室における試験発振坑設置に伴って出現した露頭断面

図 1 露頭断面 2-1-2-75
図 2 北側の断面写真 2-1-2-76
図 3 本露頭の模式柱状図 2-1-2-77
図 4 テフラの産状 2-1-2-78

付録 2 黒神観測室構内における試験発振坑設置工事写真 2-1-2-79

(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

(R5_2(2)_1_火山性地殻変動とマグマ活動.pdf) 2-2-1-1

図 1 始良カルデラ西縁の BM2474 の BM2469 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 2-2-1-1

(2) - 1 - 1. 始良カルデラ臨時 GNSS 観測点の拡充と維持

図 2 GNSS 観測点の位置 2-2-1-3
図 3 SVOG を基準点として求めた SNJ2、BNTJ、OSKB、KIHR、KGFP、WARI および SRHM 観測点の日毎の位置 2-2-1-4
図 4 中ノ島 (NAKN) における GNSS キャンペーン観測の機器設置状況 2-2-1-5
図 5 キャンペーン観測による NAKN の上下変動 2-2-1-5
図 6 2017 年-2023 年の GNSS 観測点の位置の時間変化 2-2-1-7
図 7 GNSS 基線解析による 2017 年 11 月-2022 年 11 月の GNSS 観測点の水平変位および上下変位 2-2-1-10
図 8 テクトニックな変動を補正した GNSS 観測点の水平変位 2-2-1-11
図 9 霧島火山の影響を補正した GNSS 観測点の水平変位 2-2-1-11
図 1 0 ソフトバンク独自基準点の水平変位の標準偏差と固定点からの距離の関係 2-2-1-12
図 1 1 2019 年 12 月~2022 年 11 月の GNSS 観測点の水平変位 2-2-1-13

(2) - 1 - 2. 始良カルデラ下の圧力源解析

表 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 2-2-1-14
図 1 2 GNSS キャンペーン観測で得られた 2022 年-2023 年の水平変位 2-2-1-15
表 2 GNSS キャンペーン観測による圧力源の位置と体積変化 2-2-1-16
図 1 3 水準測量による上下変位 (2017 年 11 月-2022 年 11 月) 2-2-1-17
図 1 4 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

表 3	圧力源解析で得られた圧力源位置と体積増加量	2-2-1-18
図 1 5	MAKI-YOSI 間の水平距離	2-2-1-19
表 4	有限要素法モデルで使用した剛性率	2-2-1-20
図 1 6	低 S 波速度領域を模した圧力源 (LS) の形状	2-2-1-21
図 1 7	圧力源 LS および圧力源 S による地表変位の計算結果	2-2-1-22
図 1 8	圧力源 LS および圧力源 S を設けた有限要素法モデルから予測される地盤変動観測点の変位と観測された変位の比較	2-2-1-22
表 5	モデル計算値と観測値の残差二乗和と体積変化量の比較	2-2-1-22
図 1 9	地盤変動観測点における LS モデルおよび茂木モデルの残差の絶対値の差	2-2-1-23
(2) - 1 - 3. 始良カルデラへのマグマ供給量の推定		
図 2 0	鹿児島県による降灰観測点の分布	2-2-1-25
表 6	鹿児島県による降灰量調査結果	2-2-1-26
図 2 1	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 (2023 年 10 月)	2-2-1-27
図 2 2	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)	2-2-1-27
図 2 3	GNSS 観測点 MAKI と YOSI の間の水平距離の時間変化	2-2-1-28
図 2 4	茂木モデルに基づく始良カルデラへのマグマ供給量の時間変化	2-2-1-29
図 2 5	圧力源 LS の体積変化量および始良カルデラへのマグマ供給量の時間変化	2-2-1-30
(2) - 2. 始良カルデラにおける海底地盤変動観測の検討		
	(R5_2(2)2_海底地盤変動観測の検討. pdf)	2-2-2-1
(2) - 2 - 1. はじめに		
図 1	本項目のロードマップ	2-2-2-2
(2) - 2 - 2. 海底地盤変動観測装置の概要		
図 2	始良カルデラと海底地盤変動観測装置設置位置	2-2-2-3
図 3	海底地盤変動観測装置全体図	2-2-2-4
表 1	海底地盤変動観測装置諸元	2-2-2-4
表 2.	搭載観測機器	2-2-2-5
図 4	海底地盤変動観測装置測定機器結線図	2-2-2-6
表 3	設置パラメータ	2-2-2-6
図 5	設置場所周辺の海底地形	2-2-2-7
(2) - 2 - 3. 海底地盤変動観測装置の運用と維持		

図 6	海底地盤変動観測装置自動データ処理システムハードウェア構成	2-2-2-8
図 7	海底地盤変動観測装置用自動データ処理装置	2-2-2-8
図 8	データ自動処理の流れ	2-2-2-9
図 9	姿勢補正の概念図	2-2-2-10
図 10	荒天時の海底地盤変動観測装置の挙動	2-2-2-11
表 4	測位点 F 座標推定値	2-2-2-11
図 11	測位点 F の座標値分布	2-2-2-12
表 5	運用開始後の経過	2-2-2-12
表 6	定期点検内容	2-2-2-14
図 12	アンカー底部洗掘見取り図	2-2-2-17
図 13	アンカー北面の状況	2-2-2-17
図 14	平均潮位より上位のクロフジツボ (<i>Tetraclita japonica</i>) の付着状況 (2023/11)	2-2-2-18
図 15	水中の本体表面 (2023/10/23) 最低潮位線付近	2-2-2-18
図 16	水中の本体表面 (2023/10) 浮力体上面付近	2-2-2-19
図 17	ユニバーサルジョイント付近 (2023/10)	2-2-2-19
図 18	アンカー上面 (2023/10)	2-2-2-19
図 19	関連観測点配置	2-2-2-20
図 20	潮位観測データ (FUTT および KURT)	2-2-2-21
図 21	FUTT の相対潮位 (FUTT-KURT)	2-2-2-22
図 22	気象観測点 SZKM における風速観測結果	2-2-2-22
図 23	令和 5 年台風 6 号暴風圏通過時の本装置の傾斜角と風速	2-2-2-24

(2) - 2 - 4. 海底地盤変動観測装置観測値の妥当性の検討

図 24	測位点 F の一日値における対流圏補正法の比較	2-2-2-25
表 7	対流圏補正オプションの統計量	2-2-2-25
図 25	海底地盤変動観測装置とその周辺の GNSS 連続観測点	2-2-2-26
図 26	海底地盤変動観測装置 SBB とその周囲における上下変動の比較	2-2-2-27
図 27	トレンド除去の比較	2-2-2-28

付録 ユニバーサルジョイントの摩耗特性

表 8	摺動試験条件	2-2-2-31
図 28	内径測定箇所	2-2-2-31
図 29	摩耗量の推移	2-2-2-31
図 29	推定摩耗進行曲線	2-2-2-32

(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

(R5_2(3)_シミュレーション.pdf)	2-3-1
(3) - 2. 粘弾性地表面変位解析ツール	
(3) - 2 - 1. システム要件と計算の実行	
図1 粘弾性地表面変位解析ツール	2-3-4
(3) - 2 - 2. 粘弾性モデルの説明	
図2 粘弾性地表面解析ツールで用いた粘弾性モデルの2次元断面図	2-3-5
(3) - 2 - 3. 計算結果データベース	
図3 粘弾性地表面解析ツールで用いた3次元線形補間の概念図	2-3-7
(3) - 2 - 5. 重ね合わせ原理	
図4 3つの変動源の振る舞い	2-3-7
図5 各地点の時間変化を示す自動出力図の例	2-3-11
(3) - 2 - 7. 出力ファイルと作図	
図6 地表面変位の全体を示す自動出力図の例	2-3-12

1. 令和5年度事業の委託研究の概要

令和5年度は次の項目を実施した。実施計画書の記述とそれに対応する報告書内容を、原則として実施計画書で記述された順番で列挙する。

(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である。本項目を構成する小項目とその適用範囲を図1に示す。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た。

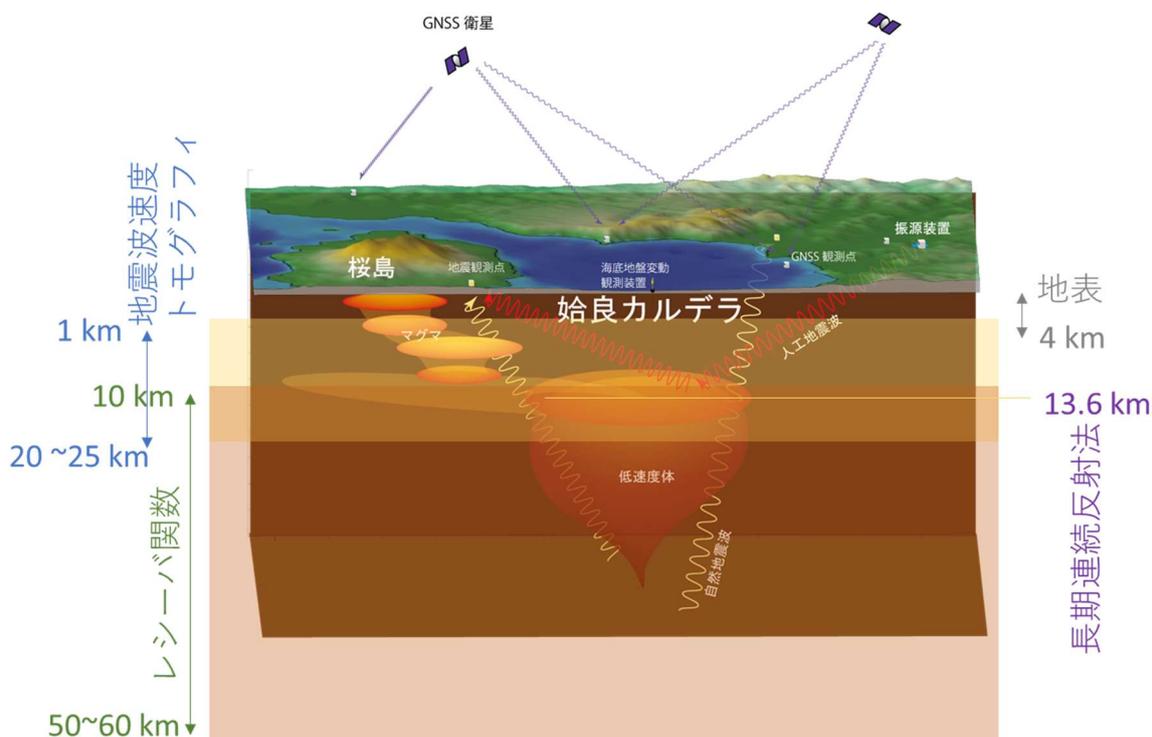


図1 本項目を構成する手法とその適用範囲

(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

令和5年度は原子力規制庁委託費による観測点、京都大学防災研究所が所有する桜島島内および始良カルデラ周辺の定常観測点、さらに防災科学技術研究所の所有する Hi-Net などの地震観測点を加えて、P 波及び S 波初動の到達時刻を用いた 3 次元地震波伝播速度トモグラフィ解析と遠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の高精度化を図った。

さらにトモグラフィ解析の結果とレシーバ関数解析の結果の比較を行い、始良カルデラの地下

構造について既往研究と合わせて全体像をまとめた。始良カルデラでは 1) 深さ 15km を中心として深さ 20km にまで及ぶカルデラ西部の S 波低速度領域および 2) 深さ 20-30km にかけての S 波低速度領域の存在が確実であることが示された。

(1) - 1 - 1. 始良カルデラ臨時地震観測点の維持運用

「原子力施設等防災対策等委託費（火山影響評価に係る技術的知見の整備）事業」により平成 27 年度から設置した始良カルデラ周辺の 10 か所の臨時観測点（短周期地震計）および、新たに平成 31 年度に設置した始良カルデラ北部の弁天島観測点、桜島北東部の新島の広帯域地震計観測点、令和 2 年度に新設した始良カルデラ周辺部の広帯域地震計観測点 2 点を維持し、これらの点における地震観測を継続した。期間中のデータ蓄積によって始良カルデラ内部を通過する地震波線のデータセットが強化された。

(1) - 1 - 2. 三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改善

この項目では原子力規制庁委託費による観測点、京都大学防災研究所が所有する桜島島内および始良カルデラ周辺の定常観測点、さらに防災科学技術研究所の所有する Hi-Net などの地震観測点を加えたデータセットに対して、P 波及び S 波初動の到達時刻を用いた 3 次元地震波伝播速度トモグラフィ解析を行い、始良カルデラの深部の地下構造モデルの信頼度の向上を図った。

図 2 にトモグラフィ解析による地下構造モデルの改善に関するロードマップを示す。

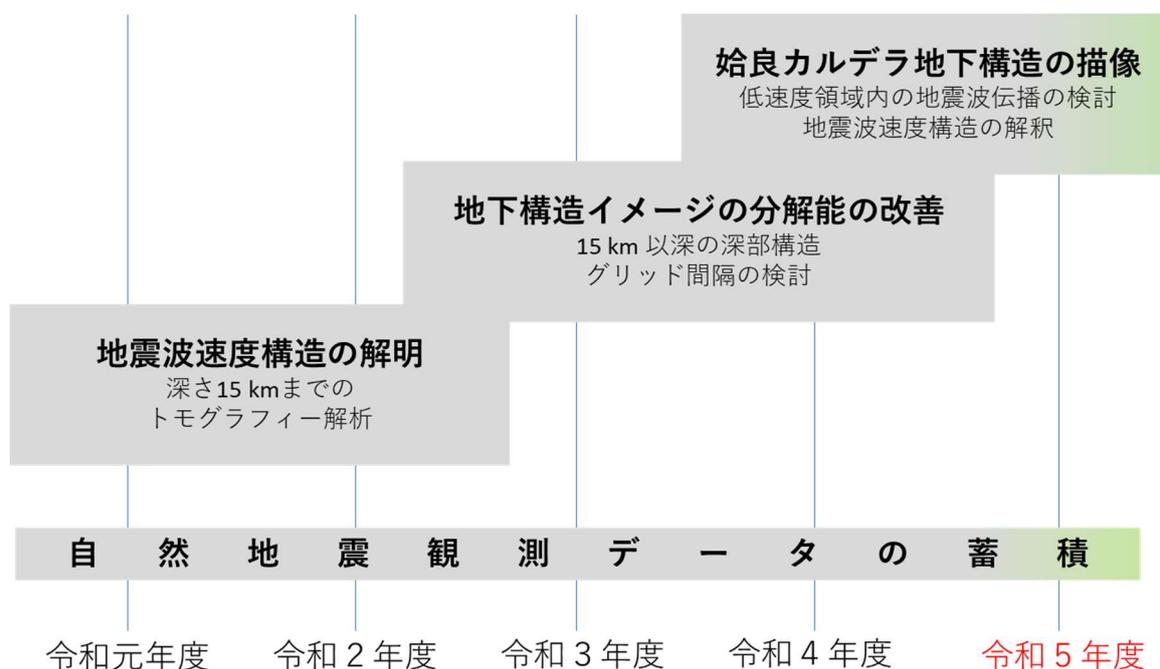


図 2 トモグラフィ解析ロードマップ

トモグラフィ解析では先述の観測網で得られた波形の P 波初動および S 波初動到来時刻を読み取って解析に用いた。令和 5 年度の解析に用いた読み取り値は、地震イベント 435 回から得られ

た自然地震 P 波が 16,361、自然地震 S 波が 11,903、人工地震 P 波が 3,121 であった。自然地震は発生場所に偏りがあるために複数の地震(イベント)で波線経路が重複することが避けられず、そのままではインバージョン結果に偏りを生ずる可能性がある。波線経路が重複するイベントを排除した結果、波線数の増加は P 波 250 本、S 波 65 本にとどまり、地下構造イメージの精度の改善はわずかであった。

(1) - 1 - 3. 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

次にレシーバ関数解析結果について述べる。この項目では観測で得られたデータセットのうち遠地地震観測記録を抽出し、S 波到達後の後続波に含まれる PS 変換波の走時と波形振幅をもちいたレシーバ関数解析の結果について述べる

図 3 にレシーバ関数解析のロードマップを示す。令和 5 年度のレシーバ関数解析は始良カルデラの深部構造の描像を中心に取り組んだ。

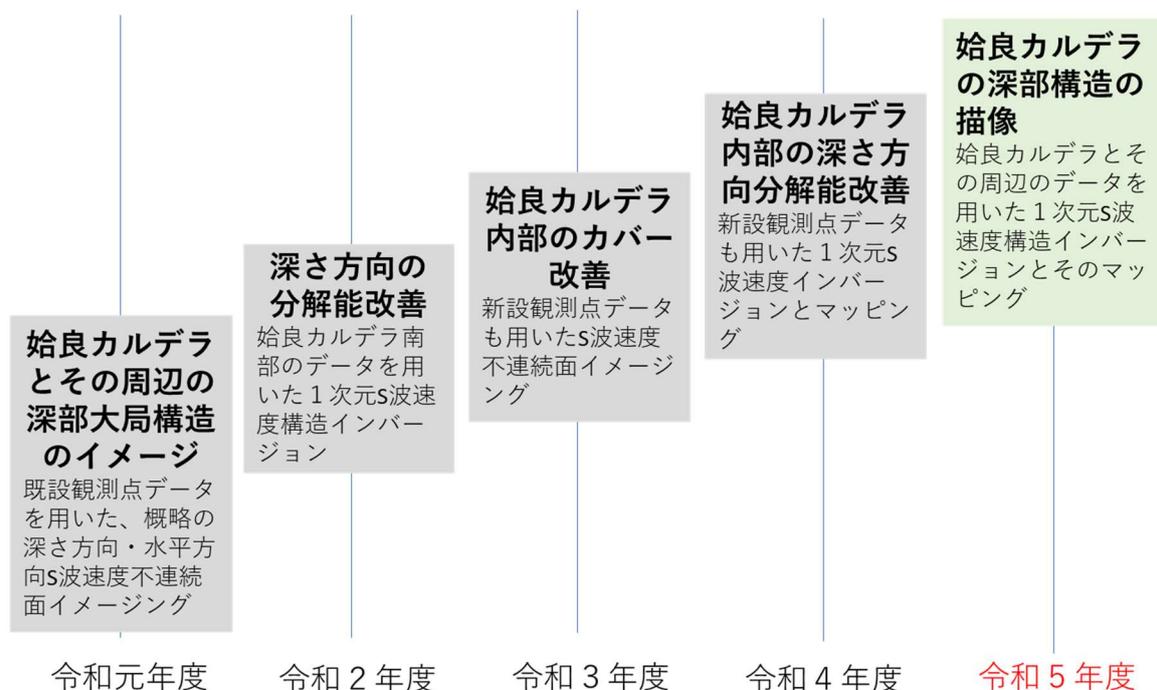


図 3 レシーバ関数解析ロードマップ

レシーバ関数解析では本委託研究による始良カルデラ北縁の臨時観測点地震波形データから得られた 323 本のレシーバ関数に対して地表付近の傾斜構造を考慮に入れたインバージョン解析を施した。インバージョン解析において傾斜構造を考慮することによって始良カルデラ北東部に対して令和 4 年度の結果より 10%の残差の改善がなされよく観測値を説明できる S 波速度構造を構築した。

(1) - 1 - 4. 地震波の振幅減衰から見たマグマ溜まりの位置推定についての検討

始良カルデラにおける S 波低速度領域の存在の傍証を得ることを目的として P 波振幅および S

波振幅の減衰についても調べ報告した。これまでの研究で明らかにされた S 波低速度領域内を通過する波線に対応する地震記録では P 波と S 波の両方に振幅の減衰が見られることと、特に S 波低速度領域の中心付近を通る波線に対応する地震記録における振幅減衰が著しいことが報告された。

(1) - 1 - 5. 始良カルデラにおける地震活動

過去から現在までに始良カルデラ周辺で発生した地震と地殻変動との関係を整理するとともに、火山性地殻変動観測データとマグマ活動についてとりまとめた。本項目は実施計画書において「(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」に記載されていた内容であるが、主に使用するデータセットと手法が(1)と密接に関連するので(1) - 1 - 5.として成果を記載することにした。

始良カルデラでは地震活動が集中的に発生する領域が複数存在しており、領域ごとに卓越する発震メカニズムが異なることが示されている。また始良カルデラ南西部では、カルデラ中央部の歪み速度の変化時に地震活動が活発化する傾向が見受けられることが報告されている。解析の対象とした 2011~2022 年の期間ではそれ以前に比べて領域ごとの卓越メカニズムに変化は見られないが、桜島南西部と始良カルデラ東部で活動領域が拡大していた。

(1) - 2. 長期連続反射法の検討

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自然地震より短い波長の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。長期連続反射法の分解能はもちいる人工地震波の波長の 1/4 程度であり、この特性から始良カルデラの地下構造における S 波低速度体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することで、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ことが目的である。

図 4 に本プロジェクトにおける長期連続反射法の研究のロードマップを示す。令和 4 年度までの基礎実験を通して発振装置の作動圧、水面や水底からの距離が発振波形に強く影響することが明らかにされてきた。構造変化検出に要求される安定した振源波形の実現をねらってこれらの条件を可能な限り制御するためには、振源装置の作動を第一目的とした専用水槽等の専用設備の存在が必要になった。

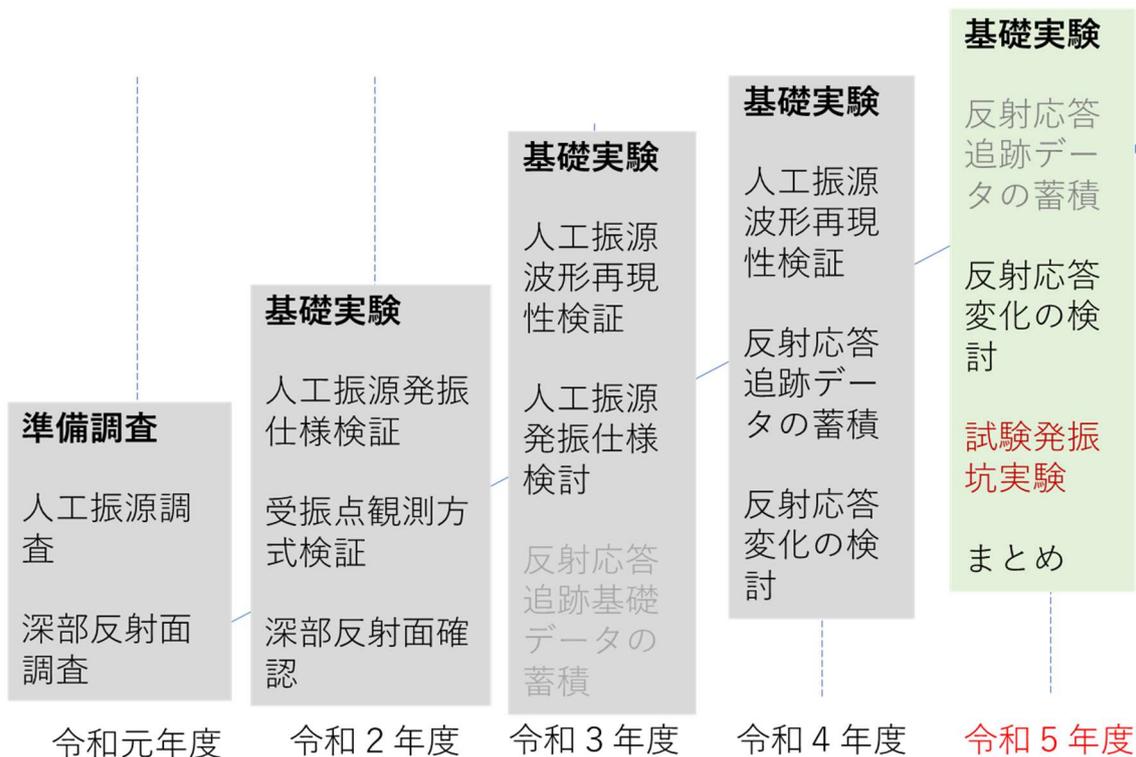


図4 長期連続反射法ロードマップ

(1) - 2 - 2. 令和5年度基礎実験の実施

令和5年度は京都大学防災研究所附属火山活動研究センターの黒神観測室構内に深さ約10m口径10mの試験発振坑（以下、試験発振坑）を建造した。この試験発振坑の概要と設計、建造の過程について報告したのち、試験発振実験の概要と発振実験終了後の試験発振坑壁の観察結果について述べる。

(1) - 2 - 3. 令和5年度基礎実験で得られた記録

試験発振坑をもちいて実施した発振実験から得られた人工地震観測記録について報告する。黒神試験発振坑で行われた試験発振に対して、発振坑内、発振坑近傍、中距離観測、広域観測の4ゾーンで観測を行い、坑内衝撃および放出される人工地震波の特徴を報告する。

(1) - 2 - 4. 考察

始良カルデラにおける令和4年度までの基礎実験観測による成果にもとづき地震反射の変化の観測の有効性を検討しまとめた。試験発振坑を含む構造モデルをもちいた数値シミュレーションを併用して観測波形の特徴と試験発振坑内の圧力の挙動を考察した。さらに(1) - 1でこれまでに得られた地震波速度構造モデルをもとに、始良カルデラ地下の反射面における地震波速度またはインピーダンスのコントラストの変化に伴う観測波形の変化についても調査した結果を報告する。

(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

(2) - 1. 火山性地盤変動観測

本項目では始良カルデラの現在のマグマ活動の推移の把握と理解、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。それとともにこれまでに得られた地下構造に関する情報を反映した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んだ。

図5に本項目のロードマップを示す

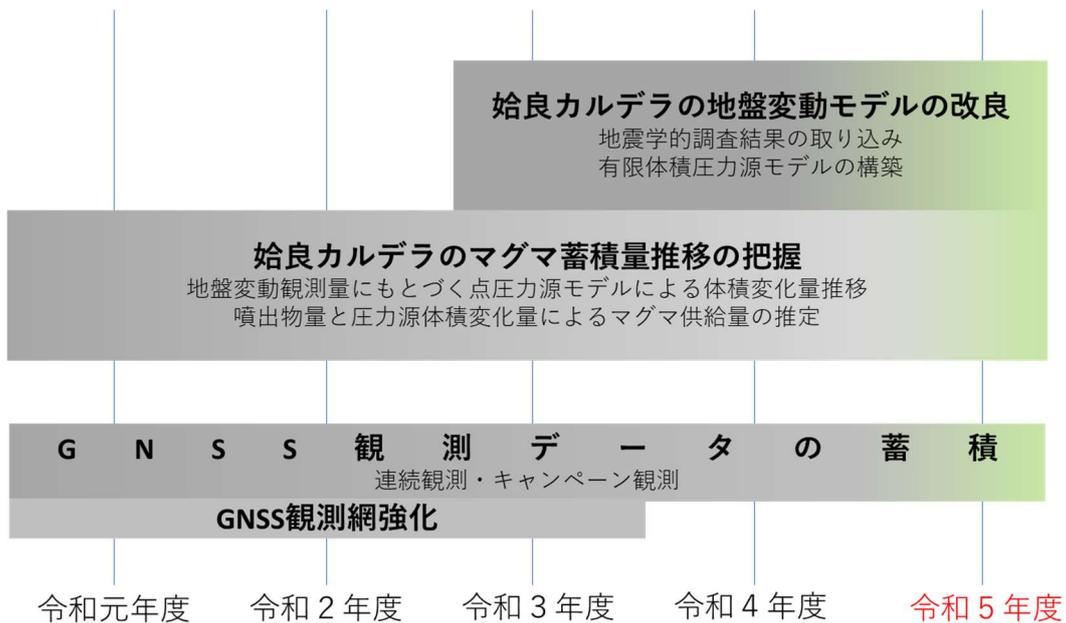


図5 火山性地盤変動観測のロードマップ

なお実施計画書の本項末尾に記述されている「過去から現在までに始良カルデラ周辺で発生した地震と地殻変動との関係を整理するとともに、火山性地殻変動観測データとマグマ活動についてとりまとめる」については、先述のように主に使用するデータセットと手法が(1)と密接に関連するので(1) - 1 - 5として成果を記載することにした。

(2) - 1 - 1. 始良カルデラ臨時 GNSS 観測点の拡充と維持

原子力規制庁が「原子力施設等防災対策等委託費(火山影響評価に係る技術的知見の整備)事業」により平成27年度から設置した始良カルデラ周辺の10か所のGNSS観測点と新たに平成31年度に設置した始良カルデラ北部の弁天島GNSS観測点、桜島北東部海域の新島GNSS観測点(令和元年度設置)、始良カルデラ西部の大崎ヶ鼻GNSS観測点(令和2年度設置)のほか、令

和3年度に設置したカルデラ内外の4点を維持し、これらの点における地殻変動観測を継続しデータを蓄積した。また、新島北方の岩礁である中之島におけるキャンペーン観測を実施しデータを蓄積した。

(2) - 1 - 1. d. 入手可能な GNSS 連続観測データの品質評価 では始良カルデラを含む地域における GNSS 観測点密度を高めることを狙いとして利用可能なデータを (ソフトバンク社) 購入して検討を行った。始良カルデラ中央部から概ね 70km 以内に位置するソフトバンク株式会社の独自 GNSS 基準点 (以下ソフトバンク独自基準点と称する) 98 点の 2019 年 12 月から 2022 年 3 月までの GNSS 受信データを入手し基線解析を行った。ソフトバンク独自基準点の多くでは水平変位の標準偏差が 10cm を超えており、水平変位の標準偏差が 6cm 以下であったのは 19 点にとどまった。

(2) - 1 - 2. 始良カルデラ下の圧力源解析

先述の観測網で得られた GNSS 観測結果に水準測量データも加えることにより、始良カルデラ下の圧力源解析を行い、昨年度にひきつづきマグマの蓄積増加量を評価した。

2017 年 11 月 - 2023 年 11 月の期間のキャンペーン GNSS 観測をデータセットとして茂木モデルを適用した場合は始良カルデラ中央部の深さ 11.9 km に圧力源が推定され 6 年間で $36.5 \times 10^6 \text{m}^3$ の体積増加が推定された。2017 年 11 月 - 2022 年 11 月までの GNSS 観測結果に同期間の水準測量データも加えたデータセットに対して、茂木モデルを適用した場合は始良カルデラの中央部の深さ 10.4km の圧力源では 5 年間で $20.8 \times 10^6 \text{m}^3$ の体積増加が推定された。これらの量はそれまでの期間の量と概ね一致することから始良カルデラ下のマグマ蓄積速度には大きな変化が認められないとされた。

(2) - 1 - 2. d. 圧力源モデルの改良の試み ではこれまでに得られた始良カルデラの地下構造を踏まえ変動源形状を改良したマグマ蓄積増加量推定を行った。

従来からもちいられている無限小圧力源を仮定したいわゆる茂木モデルの場合は始良カルデラの中央部の深さ 10.4km の圧力源では $20.8 \times 10^6 \text{m}^3$ の体積増加が推定された。一方、これまでに明らかにされた深さ 15 km を中心とする S 波低速度領域を圧力源と仮定した場合 (LS モデル; 圧力源体積約 190km^3) には $31.4 \times 10^6 \text{m}^3$ の体積増加が推定された。

(2) - 1 - 3. 始良カルデラへのマグマ供給量の推定

桜島からの火山灰放出量も考慮することにより、始良カルデラへのマグマの供給量の推移を評価した。鹿児島県の調査にもとづく 2023 年の月別推定総降灰重量の合計は 48 万トンで、特に降灰量の少なかった 2021 年、2022 年よりやや多い程度であった。2023 年の平均的な供給速度は、この期間の火山灰の放出が少ないため DRE 換算密度が 2500kg/m^3 および 1000kg/m^3 のいずれの場合も約 $10 \times 10^6 \text{m}^3/\text{年}$ となる。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) とほぼ同等であった。

(2) - 2. 海底地盤変動観測装置の検討

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んだ。図 6

に本項のロードマップを示す。海底地盤変動観測装置は令和5年3月7日に桜島北東沖に設置されて以来実験観測に供されている。

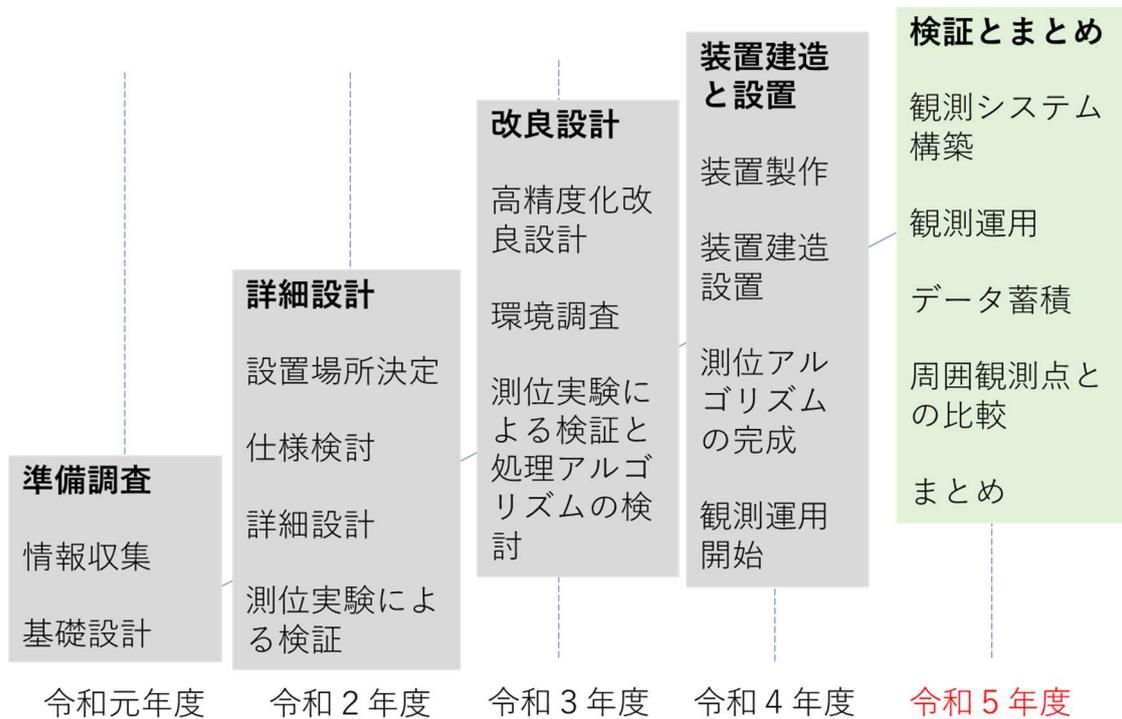


図6 海底地盤変動観測装置ロードマップ

(2) - 2 - 2. 海底地盤変動観測装置の概要

令和4年度に桜島北東沖の始良カルデラ海底に設置された海底地盤変動観測装置の概要について説明する。海底地盤変動観測装置は海底に設置されたアンカーに結合されたブイから構成されており、水面上に突出したブイ頂上のGNSSアンテナで海底のアンカー上に設定した仮想点(測位点)を測位する。海底地盤変動観測装置の主要な仕様と設置時の測定値を整理して示す。

(2) - 2 - 3. 海底地盤変動観測装置の運用と維持

令和4年度に設置された海底地盤変動観測装置の運用のための観測システムを構築して継続的運用を行った。海底地盤変動観測装置は水面上に突出した揺動するブイの頭を測位する構造になっているため、ブイの頭における測位値にブイの姿勢に基づく補正量を与えて海底のアンカー上のベンチマークの位置を推定しなければならない。海底地盤変動観測装置は連続して観測を行う必要があるため、海上の装置からのデータ回収、姿勢補正、1日データの生成までを自動的に行うシステムを構築した。そのほか海上での運用で表面化した問題とその対策について述べる。

さらに海底地盤変動観測装置が置かれている自然環境のデータを取得する目的で本プロジェクトで桜島北岸(二俣)に潮位計を、新島州崎に気象観測装置を設置して観測を実施中であり、その観測結果について報告するとともに、令和5年8月に海底地盤変動観測装置が直接暴風圏内に飲み込まれた台風6号通過時の状況についても報告する。

(2) - 2 - 4. 海底地盤変動観測装置測位値の妥当性の検討

2023年3月の設置以来8ヶ月分の海底地盤変動観測装置で得られた変動データを同じ期間の周辺観測点の変動結果と比較検討することで、海底地盤変動観測装置直下海底の圧密沈下成分の抽出を試みた。また推定された圧密沈下成分を観測値から差し引き地盤変動成分の推定を行った。

(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5年度は3次元有限要素モデルを用いてシミュレートした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、水準やGNSSにより捉えられた地表面変位の上下・水平両成分から、静的及び動的なマグマ蓄積状態を把握していくための技術的知見の整備をおこない、上層を弾性体、下層を粘弾性体とする二層媒質モデルを用いて、地下のシル状マグマ貫入とその後の消長に対する地表面変位応答の空間分布の計算ツールを構築した。

項目(3)-2 粘弾性地表面変位解析ツール には構築されたツールの内容紹介とともに使用方法の記載がなされている。なお、成果品である粘弾性地表面変位解析ツールはポータブルハードディスクに収録されたソフトウェアパッケージであった。

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維持運用

2023年度は地震観測点の増設を行なっておらず、昨年度に引き続き臨時観測点を維持し、図1の観測点においてデータ取得を継続した。図1の黄○の観測点では、地震計はサイモテック株式会社製 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の赤○においては、1Hz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臨時観測点において2ヶ月に1度のデータ回収を行った。2023年度の実施日を表1に示す。特に大きな異常は発生していない。地震観測波形例を図2に示す。

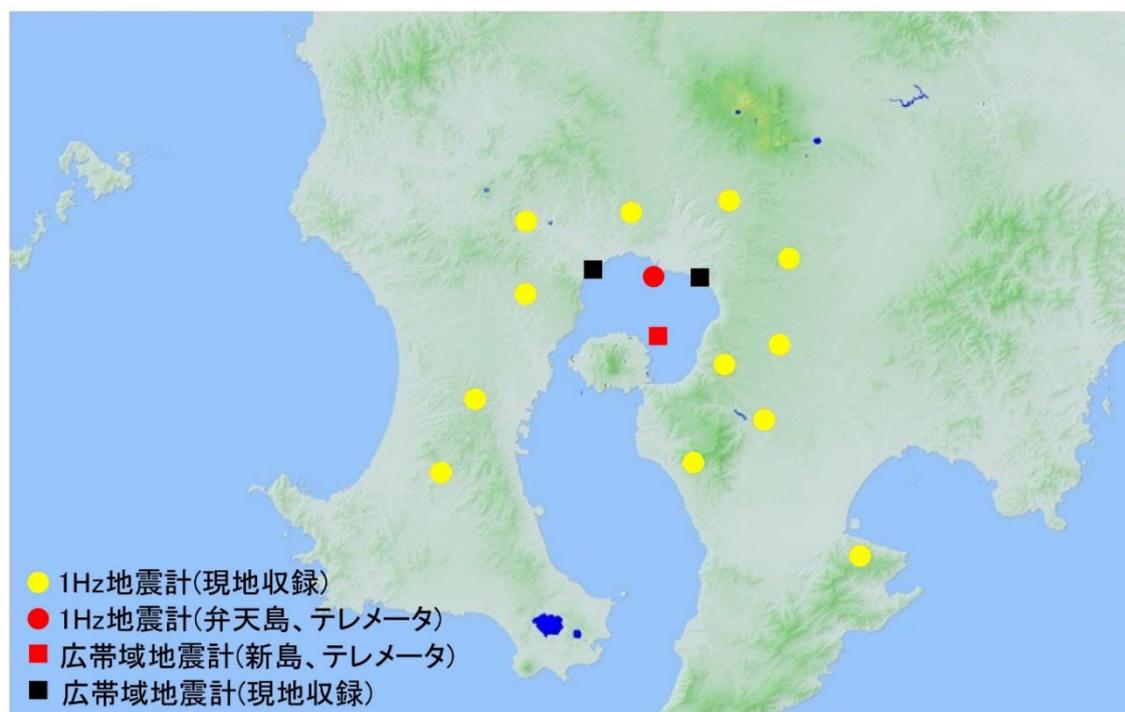


図1 臨時地震観測点分布

表1. 臨時地震観測のデータ回収実施日

	実施日（多点のため作業は複数日）	異常報告
第1回	2023年4月11日、12日、14日、18日、25日	なし
第2回	2023年6月7日、9日、12日、13日、14日	なし
第3回	2023年8月18日、21日、22日、23日、24日	なし
第4回	2023年10月4日、6日、11日、13日、16日	なし
第5回	2023年12月8日、12日、15日、18日、22日	なし
第6回	2024年2月6日、7日、9日、14日、20日	なし

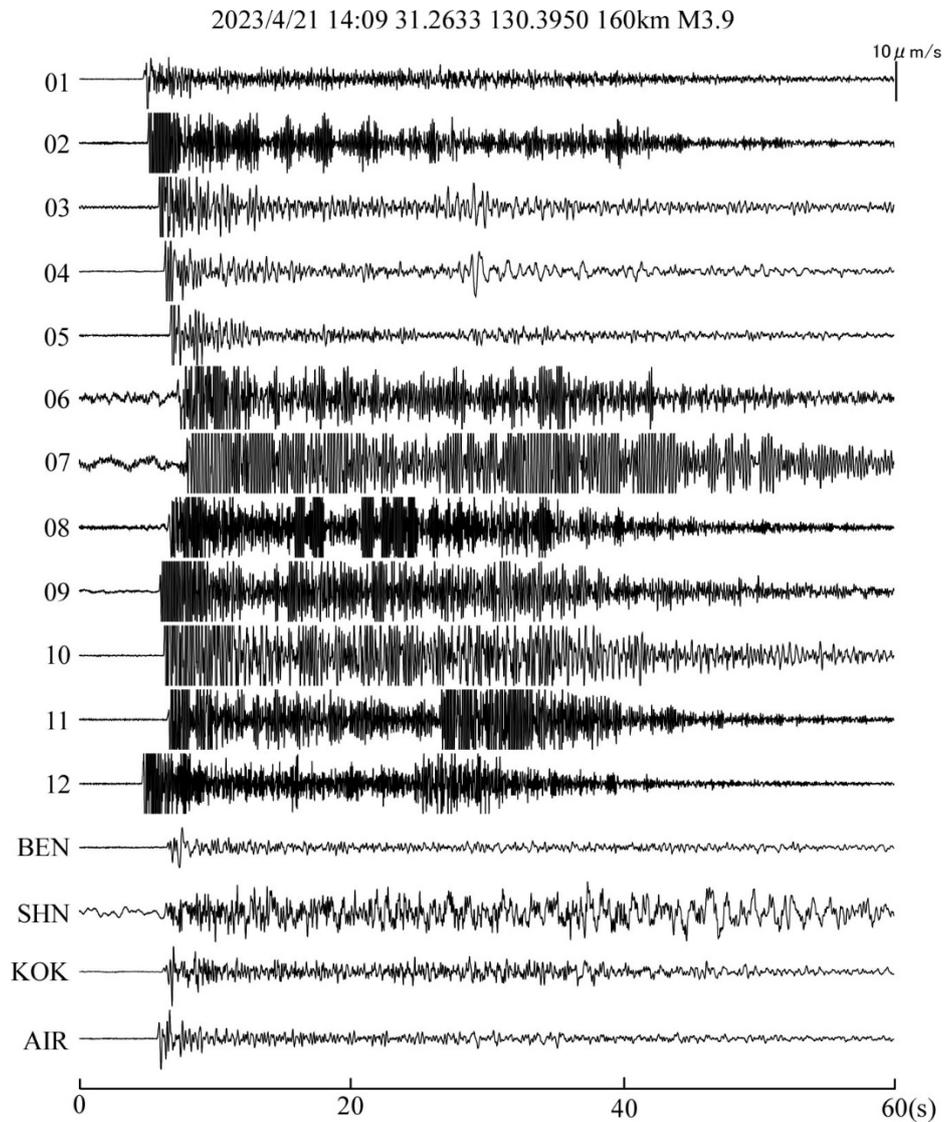


図2 2023/4/21 14:08（表2）の地震観測波形。震源情報を図最上部に示す。横軸は時間経過、各観測点の上下動記録を示す。

(1) - 1 - 2. 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改善

15km 以深の始良カルデラ地下構造の検討

a. 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。本章では深さ 45 km 以浅（地殻内）に見出された地震波速度異常領域についての考察と精度向上について報告する。

b. 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 3 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 3 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 で流通している地震観測点（図 3 の青○）を使用した。2008 年～2018 年に観測を行なった宮崎県の 5 点（図 3 の黒○）も使用した。臨時観測点ではデータロガーは近計システム社製 EDR-X7000、白山工業社製 LS8800 を使用し、100Hz～250Hz サンプリングで収録している。地震計は 2Hz3 成分型（近計システム社製 KVS-300）を 12 台、1Hz3 成分型（Mark Products L4）を 5 台設置し、観測を行ってきた。また、図 3 の黒□において Nanometrics 社製 Trillium120Q およびデータロガー LT-7700 にて 200Hz サンプリングで現地収録を行なっている観測点データも用い、計 47 点の観測点で得られた P 波、S 波到達時を用いた。

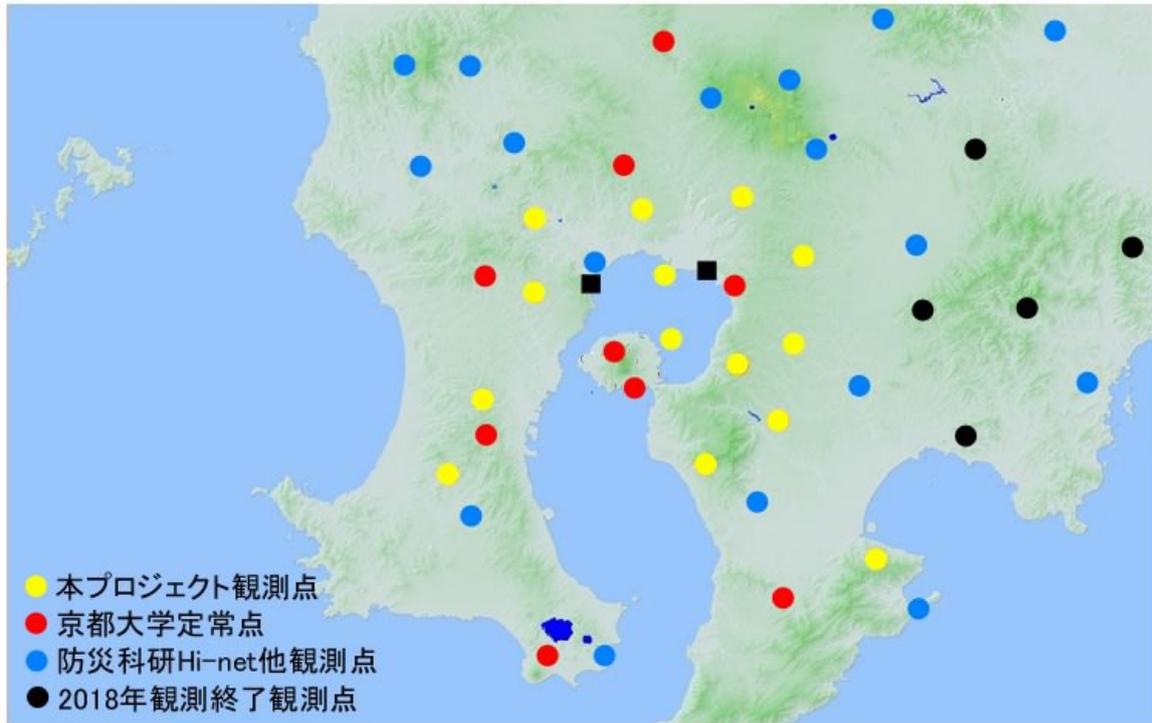


図3 地震波トモグラフィ解析に使用した地震観測点

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京都大学防災研究所（2022）と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4）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。

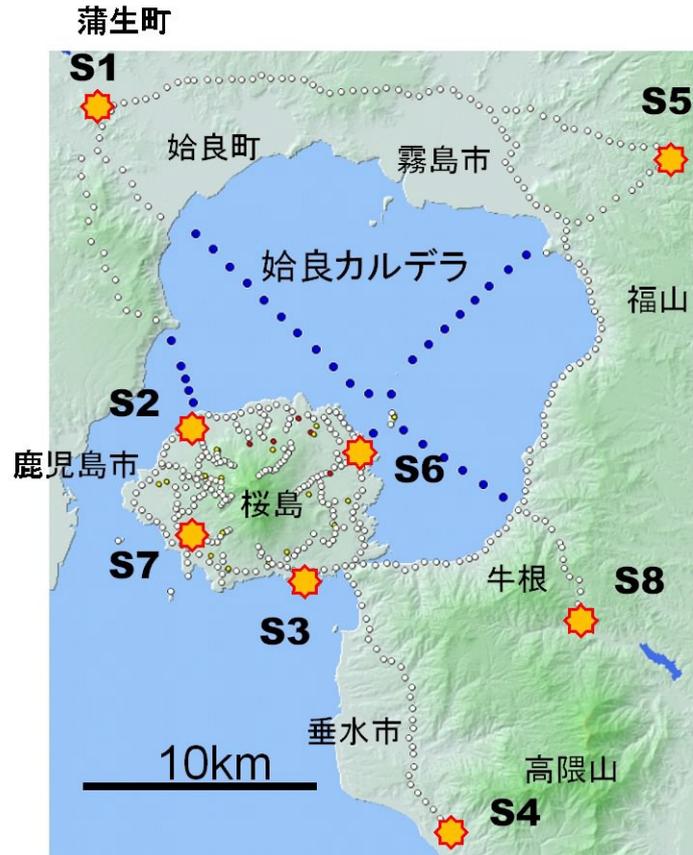


図4 2008年人工地震探査の発破点（黄色）と地震観測点（白○と青○）の分布

上述の47点における自然地震のP波、S波到達時および人工地震データの直達P波を用いて3次元地震波速度構造解析を行った。2010年以降に南九州一帯で発生した主にマグニチュード2.0以上の地震を対象として近傍で発生した地震については波線重複を避けながら、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用いた。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M1.5程度の地震のP波、S波到達時も解析に使用した。M1.5程度の微小地震では1イベントの初動読み取り数は少ないが、読み取り対象とするイベント数が増加するため解析領域を高分解能化できる。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435であった。図5に使用した地震の震源分布および表2（本項末尾）にイベントリストを示す。地殻内と沈み込みの地震はほぼ同数を使用した。また、2008年に行った始良カルデラを通過する人工地震探査のP波初動読み取り値（井口・他、2009）を解析に追加することで、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。そのため、為栗・他（2022）と同様に解析に使用する到達時には人工地震探査によるP波初動到達時（井口・他、2009）を加えている。解析に使用した読み取り値は、自然地震P波が16,361、自然地震S波が11,903、人工地震P波が3,121である。波線重複を避けるため震源が近いイベントは使用しておらず波線数は昨年度からあまり増加していない。

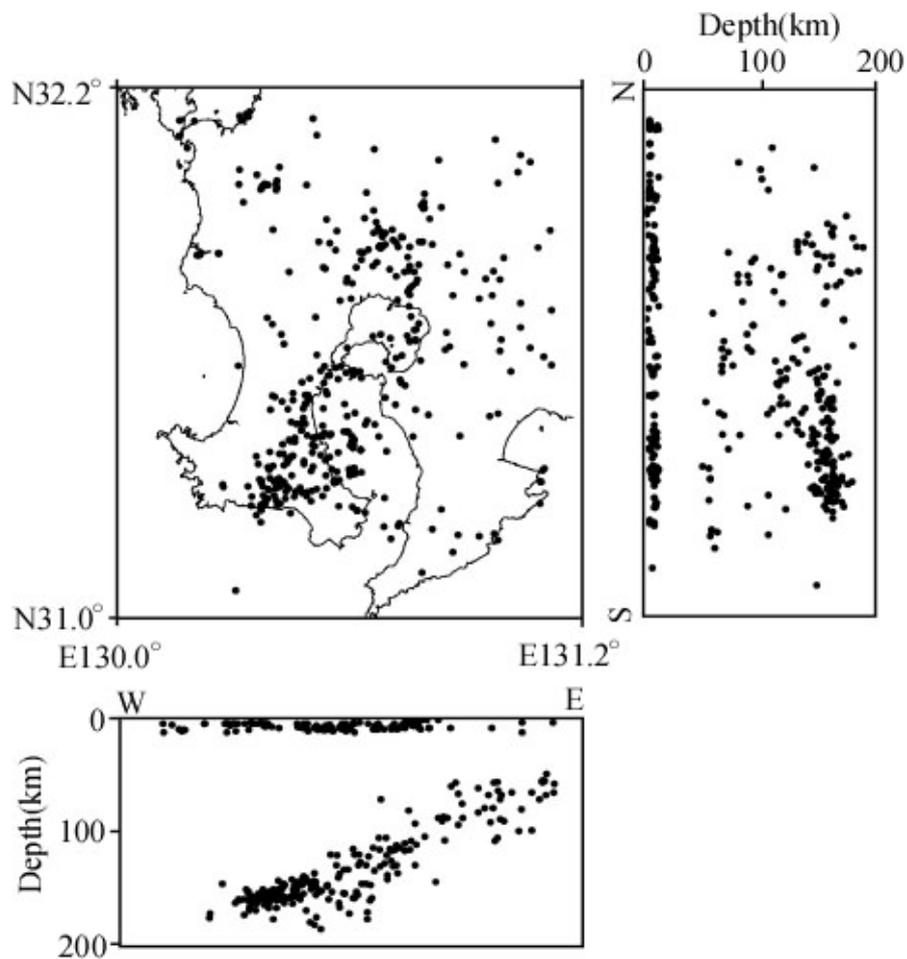


図5 解析に使用した435イベントの震源分布図

c. 解析方法

解析は京都大学防災研究所(2022)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6に示す。解析精度の評価で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戻りと、Resolution matrixの対角要素値(RDE)とで評価を行った。

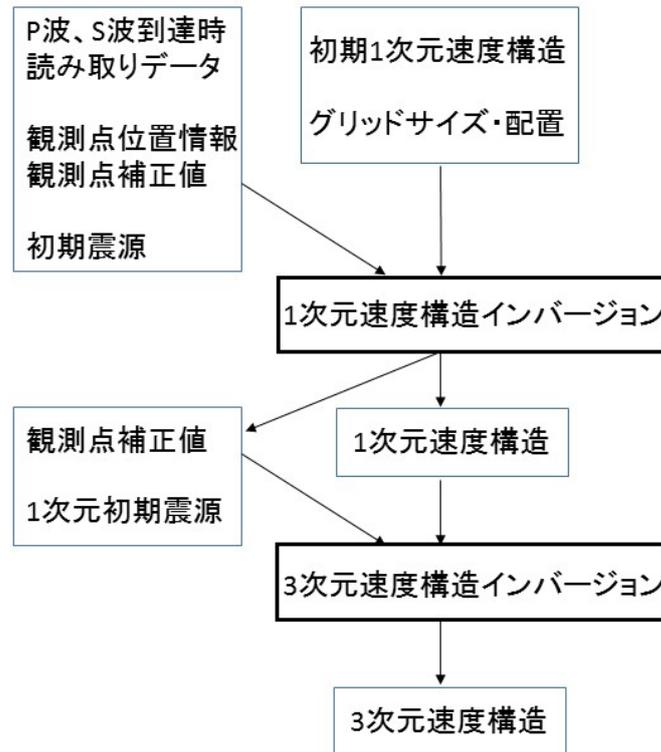


図6 3次元トモグラフィ解析の流れ

データの読み取り値の精度によりランク分けを行い、読み取り誤差 ± 0.01 秒は1、 ± 0.03 秒は0.33、 ± 0.10 秒は0.1でそれぞれデータに重み掛けを行っている。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)を参考としている(表3)。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0~200kmである。グリッド間隔は水平方向、深さ方向とも0.1度(約10km)としたが、カルデラ内については、現在のデータセットで十分な精度が得られる最小の間隔として水平方向を0.05度(約5km)とし、深さ方向は25kmまで5km間隔、25km以深を10km間隔とした。カルデラ内においては、水平方向、深さ方向ともに5kmの基準グリッドを構築した後、緯度方向(北方向)に0~5kmの範囲で1km毎、経度方向(西方向)に0~5kmの範囲で1km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。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戻りとResolution matrixの対角要素値(RDE)を精度評価の参考とした。初期モデルの走時残差は0.385秒で、得られた解モデルの走時残差は0.221秒となり、昨年度より若干残差が向上した。図7にチェッカーボードテストにおけるパターンの戻りを示す。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。深さ 25 km 以深では 5 km グリッドでは解像度が悪いため、深さ方向のグリッドを 10 km とした。本解析領域の範囲では深さ 45 km 以深は深発地震の波線のみとなるため、深さ 45 km までの結果について示す。

表 3 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

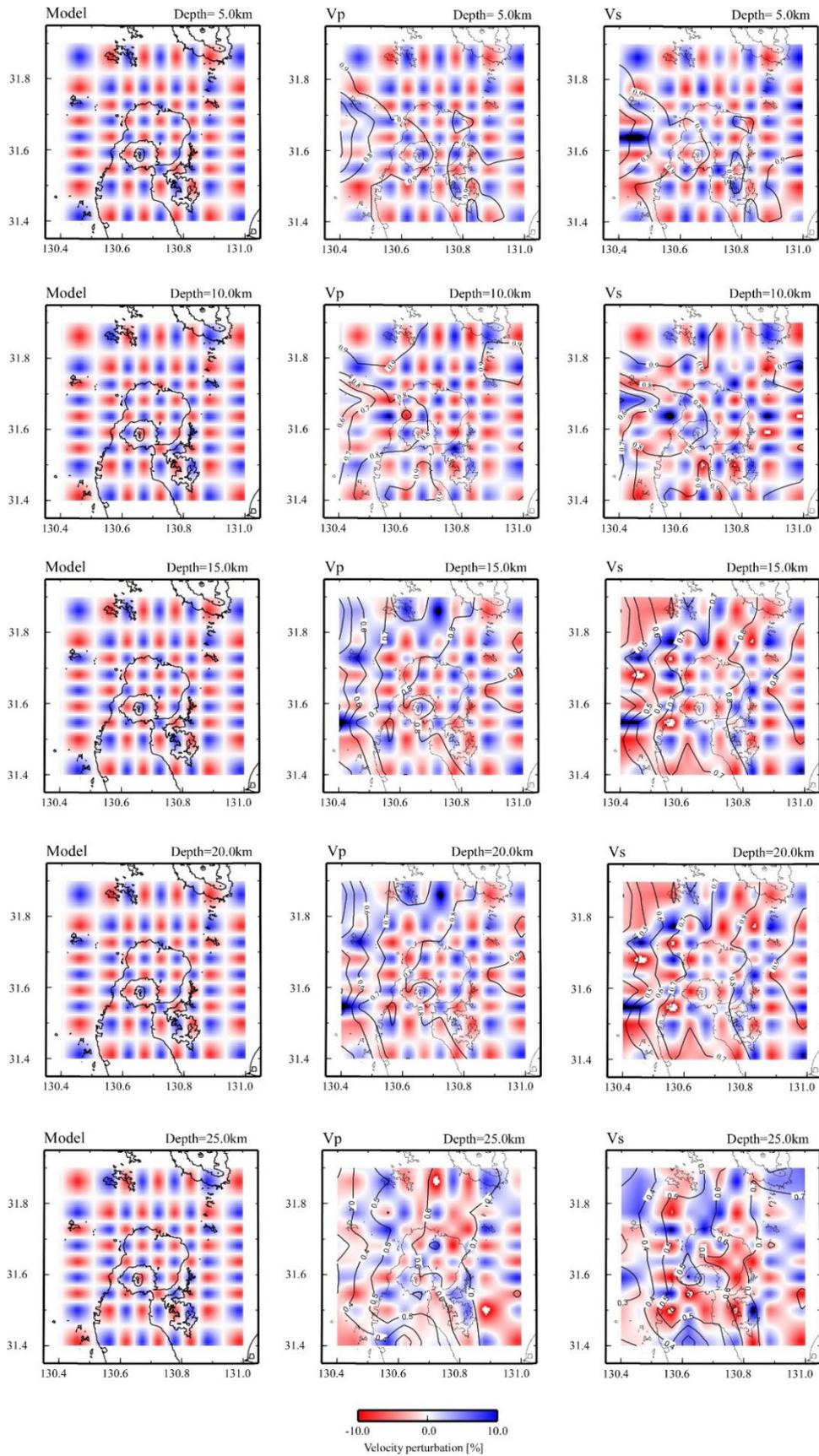


図7 深さ 5 km、10 km、15 km、20 km、25 km におけるチェッカーボードテスト結果

d. 解析結果

深さ 1 km, 5 km, 10 km, 15 km, 20 km, 25 km における P 波及び S 波の地震波速度分布を図 8 に示す。昨年度の地震波速度構造分布と差異は見られない。

深さ 15km までの速度構造解析結果については、波線数の大幅増加がないため昨年度報告とほぼ相違は見られず、以下のような結果が得られた。深さ 1 km では始良カルデラ北東部の若尊カルデラ下 (図 8 の Wa) において、S 波速度が遅く、一方でカルデラ北縁では 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 8 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 3.8 と大きい。

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、 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 8 の Depth=20 km 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から大隅半島のみであるが、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 波速度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。為栗・他 (2022) が示している S 波低速度異常 LS の領域は、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。

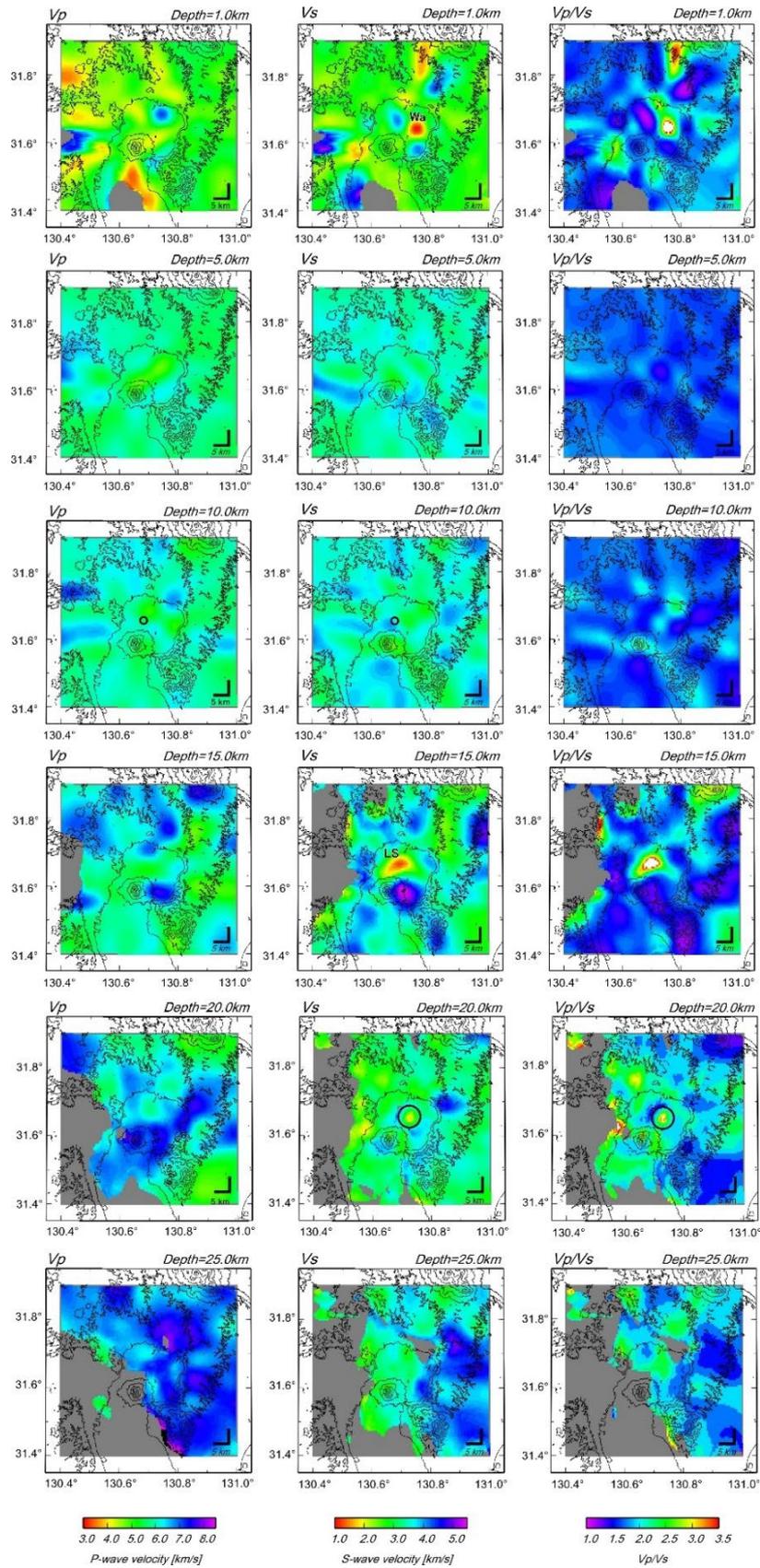


図8 深さ 1 km、5 km、10 km、15 km、20 km、25 km における P 波、S 波速度およびその比

図9に深さ 35 km および 45 km の 10 km グリッドにおける P 波及び S 波の速度分布を示す。深さ 35 km においては、P 波速度には顕著な異常は見られないが、始良カルデラ周辺部は比較的速度が早い。また、S 波速度については桜島南西部において速度が遅い領域があり、その領域における V_p/V_s 比が 3.2 と高くなっている (図9の V_p/V_s 中の○)。深さ 45 km においては薩摩半島側の解像度が悪いいため明確には言えないが、始良カルデラ下に速度異常は見られない。

昨年度の解析結果において、桜島南西部の深さ 35 km に高 V_p/V_s の領域が見出された。今年度の解析においても同様位置に高 V_p/V_s の領域が見られる。桜島南西部においては深さ 25 km~30 km 付近で多数の深部低周波地震が発生しており (例えば、気象庁火山活動解説資料桜島)、高 V_p/V_s 領域はその震源の直下に位置している。火山下の深部低周波地震の発生メカニズムは流体移動が関連しており (例えば、Nakamichi et al., 2003)、この深さ 35 km の高 V_p/V_s 領域は流体の存在を示唆している可能性が考えられる。本解析ではこの深さはグリッドサイズが 10 km しか計算できておらず、高 V_p/V_s 領域は 1 ノードのみにあらわれるのみである。また、深さ 45 km においては解像度の関係でこの領域が見えていない。深部低周波地震と高 V_p/V_s 領域の関係を明らかにするためにこの深さの解像度を向上させる必要がある。特に深さ 45km では桜島より西側の解像度が足りないのは図 1 で示す観測点分布で分かるように西側の観測点が不足していることが原因である。薩摩半島西部に地震観測点を設置することで日向灘の深さ 10-20 km で発生する沈み込みの地震や大隅半島で発生するやや深発地震の地震波の波線を得ることができればこの領域の解像度向上が見込まれる。

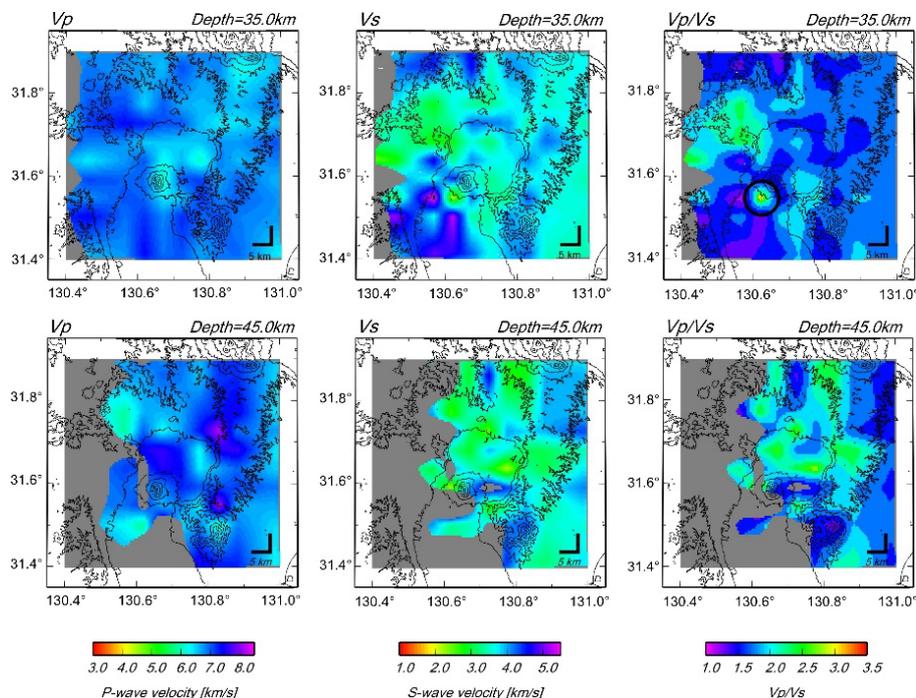


図9 深さ 35 km、45 km における P 波、S 波速度およびその比

図10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8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8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。既往の地盤変動の説明に用いられている微小球状圧力源は、等価な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る。そのように考えると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波低速度領域からの移動する物質の集積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10)により示されているが(筒井・他, 2021)、この強いコントラストは物質の集積の傍証になるかもしれない。

為栗・他(2022)で指摘している深さ15 kmを中心とするS波低速度異常LSの領域について、深さ20 km付近では、S波速度2 km/s程度の低速度領域が見られるが、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。南北断面(図10の(bc))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深部にかけてやや東寄りになり、深さ12 kmから22 km付近の範囲にあると言える。

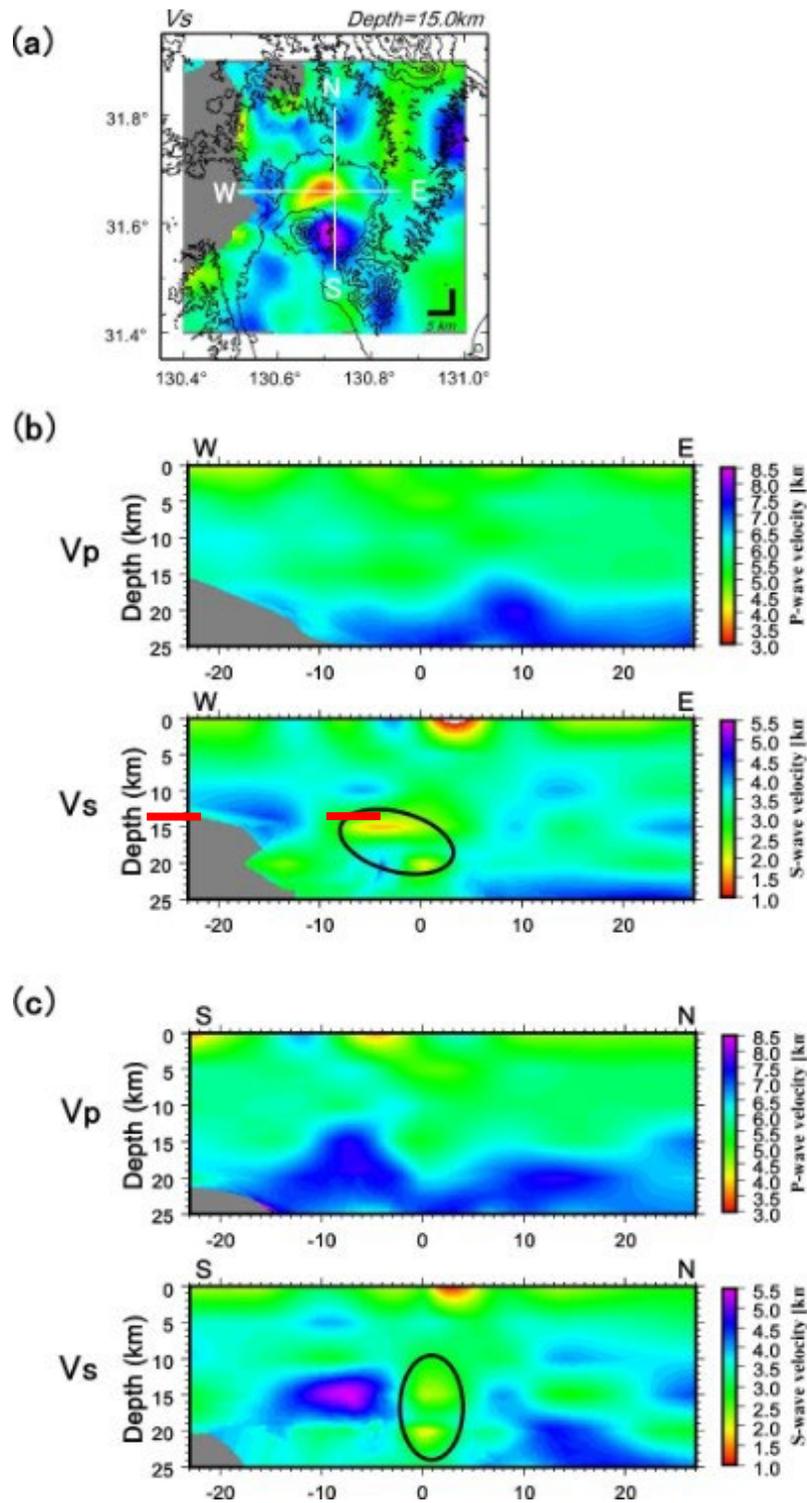


図10 始良カルデラの特徴的な地震波速度構造。(a)深さ15 kmにおけるS波速度分布、(b)始良カルデラ中心付近を通る東西断面におけるP波速度およびS波速度分布、(c)南北断面におけるP波速度およびS波速度分布。(b)中の赤太線は筒井・他(2021)のS波反射面を示す。

(1) - 1 - 3. 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

a. レシーバ関数インバージョンによる S 波速度構造の推定

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)。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。

レシーバ関数解析では、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。

本研究プロジェクトの令和 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 次元分布を推定した。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。

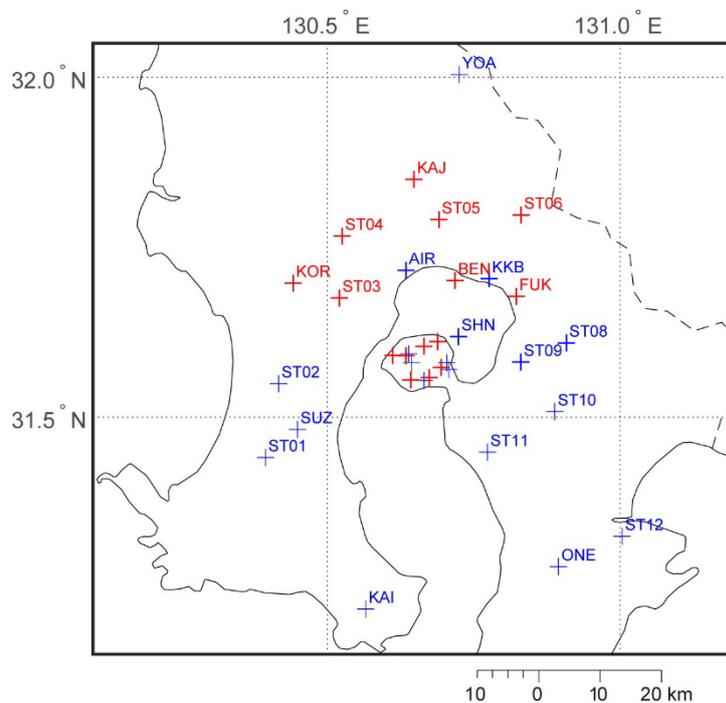


図 1 1 始良カルデラ周辺の地震観測点の分布 (+)。今回のレシーバ関数解析で用いた点を赤色で示す。

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、錦江湾の湾奥部を囲む広範囲の観測点でのレシーバ関数解析が必要となる。そこで昨年度は、これらの地域にある定常観測点と本プロジェクトの臨時観測点についても、レシーバ関数の波形インバージョンと得られた1次元S波速度構造のマッピングを行い、始良カルデラ下のS波速度構造の3次元的分布の推定を試みた。

この解析に用いた観測点を図1-1に赤い+で示す。湾奥部の海岸線付近の観測点はとくに重要である。湾奥北東部のFUKと湾奥北部のBENのレシーバ関数のR成分(radial成分)の波形を図1-2と図1-3にそれぞれ示す。レシーバ関数を求める際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。なお、湾奥南部のSHN、湾奥北西部のAIR、湾奥北東部のKKB、湾奥東部のST08とST09も重要な観測点であるが、良いレシーバ関数が十分蓄積されていないので、今回の解析には用いていない。

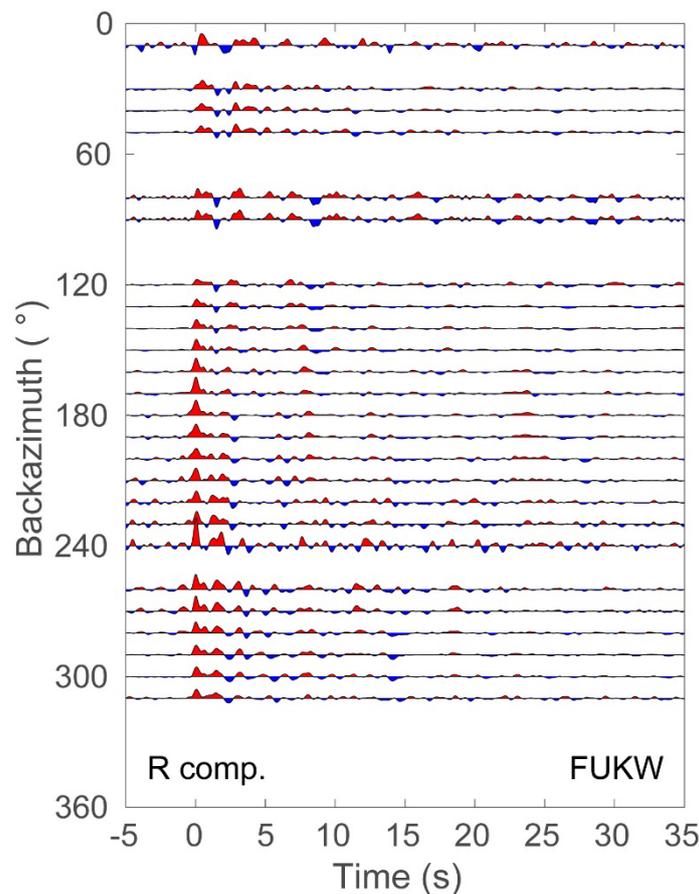


図1-2 観測点FUKにおけるレシーバ関数のRadial成分の波形。到来方向の 10° ごとに $\pm 10^\circ$ の範囲に入るレシーバ関数を重ねた波形。振幅の正の部分を赤で、負の部分を青で示す。

図1-2は到来方向の 10° ごとに $\pm 10^\circ$ の範囲に入るレシーバ関数を重ねたものである。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。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° 以上違うと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。

図1-3は、BENで得られたレシーバ関数のR成分の波形である。FUKより複雑な波形をし

ている。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。

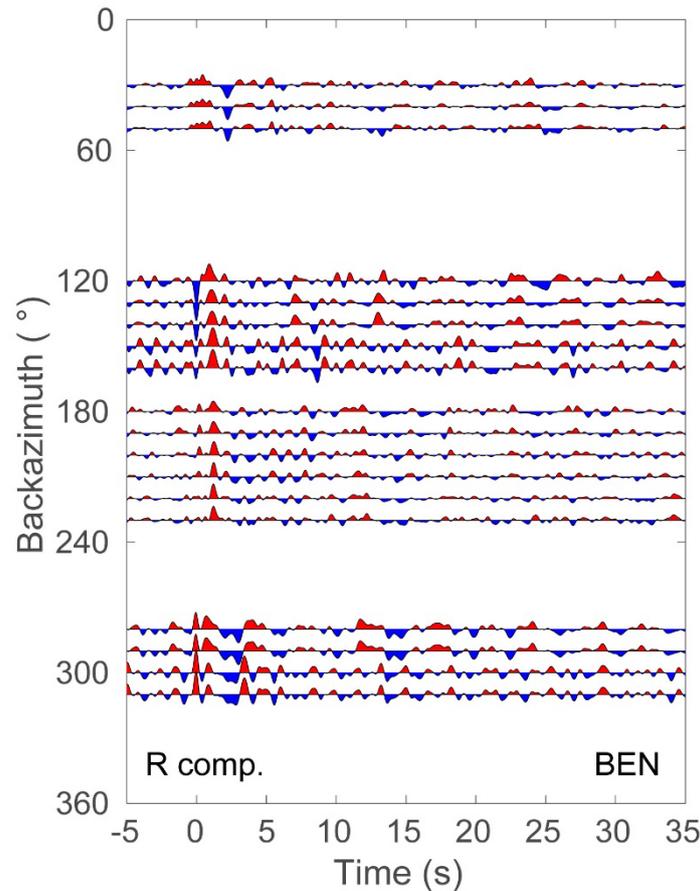


図 1 3 観測点 BEN におけるレシーバ関数の R 成分の波形。到来方向の 10° ごとに $\pm 10^\circ$ の範囲に入るレシーバ関数を重ねた波形。振幅の正の部分を赤で、負の部分を青で示す。

レシーバ関数の波形インバージョンにおける 1 次元地震波速度モデルは、水平多層モデルを仮定し、モデルパラメータは各層の厚さと S 波速度 (V_s) とした。ただし、層内では S 波速度は一定である。P 波速度と S 波速度の比 (V_p/V_s) は各層において典型的な値に固定した (表 1)。ただし、第 1 層～第 3 層においては V_p/V_s もモデルパラメータとした。密度 (ρ) は、P 波速度 (V_p) の関数として、 $\rho = 0.036(V_p - 3.0)^2 + 2.35$ (Kurita, 1973) で与える。

波形インバージョンには遺伝アルゴリズム (GA) を用いた (Shibutani et al., 1996)。GA はグリッドサーチの一種であるが、生物の進化の過程 (淘汰、交配、変異) を模し、探索の効率化を図るものである。速度構造モデルのモデルパラメータの探索範囲の例を表 4 に示す。レシーバ関数の理論波形の計算には、Thomson-Haskell 法 (Haskell, 1962) を用いた。観測波形から得られたレシーバ関数と理論波形とのミスフィット値は、サンプリング点ごとのそれぞれの振幅の差の平方和で定義した。ミスフィット値が最小のモデルを最適モデル、小さい方から 1000 番目までのモデルを許容モデル、それらの重み付き平均を取ったものを平均モデルと呼ぶ。

表4 遺伝アルゴリズムにおけるモデルパラメータの探索範囲

層	層厚1	層厚2	Δ層厚	Vs1	Vs2	ΔVs	Vp/Vs1	Vp/Vs2	ΔVp/Vs
1	0.1	1.6	0.1	1.0	2.5	0.1	1.50	3.00	0.1
2	0.1	1.6	0.1	1.0	2.5	0.1	1.50	3.00	0.1
3	1.0	8.0	1.0	1.7	3.2	0.1	1.50	3.00	0.1
4	1.0	8.0	1.0	2.5	3.2	0.1	1.73	1.73	0.0
5	1.0	8.0	1.0	2.5	3.2	0.1	1.73	1.73	0.0
6	1.0	8.0	1.0	2.5	3.2	0.1	1.73	1.73	0.0
7	1.0	8.0	1.0	2.8	3.5	0.1	1.73	1.73	0.0
8	1.0	8.0	1.0	2.8	3.5	0.1	1.73	1.73	0.0
9	1.0	8.0	1.0	3.1	3.8	0.1	1.75	1.75	0.0
10	1.0	8.0	1.0	3.1	3.8	0.1	1.75	1.75	0.0
11	1.0	8.0	1.0	3.5	4.2	0.1	1.75	1.75	0.0
12	1.0	8.0	1.0	3.5	4.2	0.1	1.75	1.75	0.0
13	1.0	8.0	1.0	3.8	4.5	0.1	1.80	1.80	0.0
14	(半無限)			3.8	4.5	0.1	1.80	1.80	0.0

層厚1、Vs1、Vp/Vs1はそれぞれ層厚 (km)、S波速度 (km/s)、P波速度とS波速度の比の下限、層厚2、Vs2、Vp/Vs2はそれらの上限、Δ層厚、ΔVs、ΔVp/Vsはそれらの刻み幅を表す。

図14にFUKのインバージョンの結果を示す。(a)、(b)、(c)はそれぞれ到来方向140°、190°、290°に対するS波速度構造である。(a)と(c)はカルデラの外側、(b)は内側の構造とみることが出来る。以下では推定されたS波速度構造の特徴を平均モデルに基づいて述べる。3つの方向に共通して言えることは、厚く(4 km程度)S波速度が遅い(2.2 km/s程度)の表層をもつことと、全体的に標準的な速度構造(例えば気象庁が震源決定に用いるJMA2001(上野・他, 2002))より速度が遅いということである。中でもカルデラの内側をサンプリングすると考えられる(b)は深さ40 kmでもS波速度が3.3 km/sと非常に遅い。(d)、(e)、(f)に到来方向140°、190°、290°に対するレシーバ関数の波形を示す。観測波形(青線)と理論波形(赤線)がよく一致していること、許容モデルに対する理論波形の範囲が観測波形の±1標準偏差の範囲にほぼ収まっていることが見て取れる。

図15にBENのインバージョンの結果を示す。FUKの場合と同様、(a)、(b)、(c)はそれぞれ到来方向140°、190°、290°に対するS波速度構造である。これら3方向のS波速度構造に共通する特徴は、2~4 km程度の厚さをもつ遅い(2.0 km/s)表層と、FUKより速い(3.0 km/s)上部地殻(深さ約13 kmまで)と、その直下の低速度層(S波速度が2.6 km/s程度、厚さ7~10 km)である。(d)~(f)に示すレシーバ関数は、図4でも述べたように、FUKより複雑な波形をしているが、観測波形の特徴は理論波形においてもかなりよく再現されている。290°の到来方向のS波速度構造も11~21 kmの深さに低速度層をもつことから、このあたりまではカルデラ内部をサンプリングしているものと考えられる。

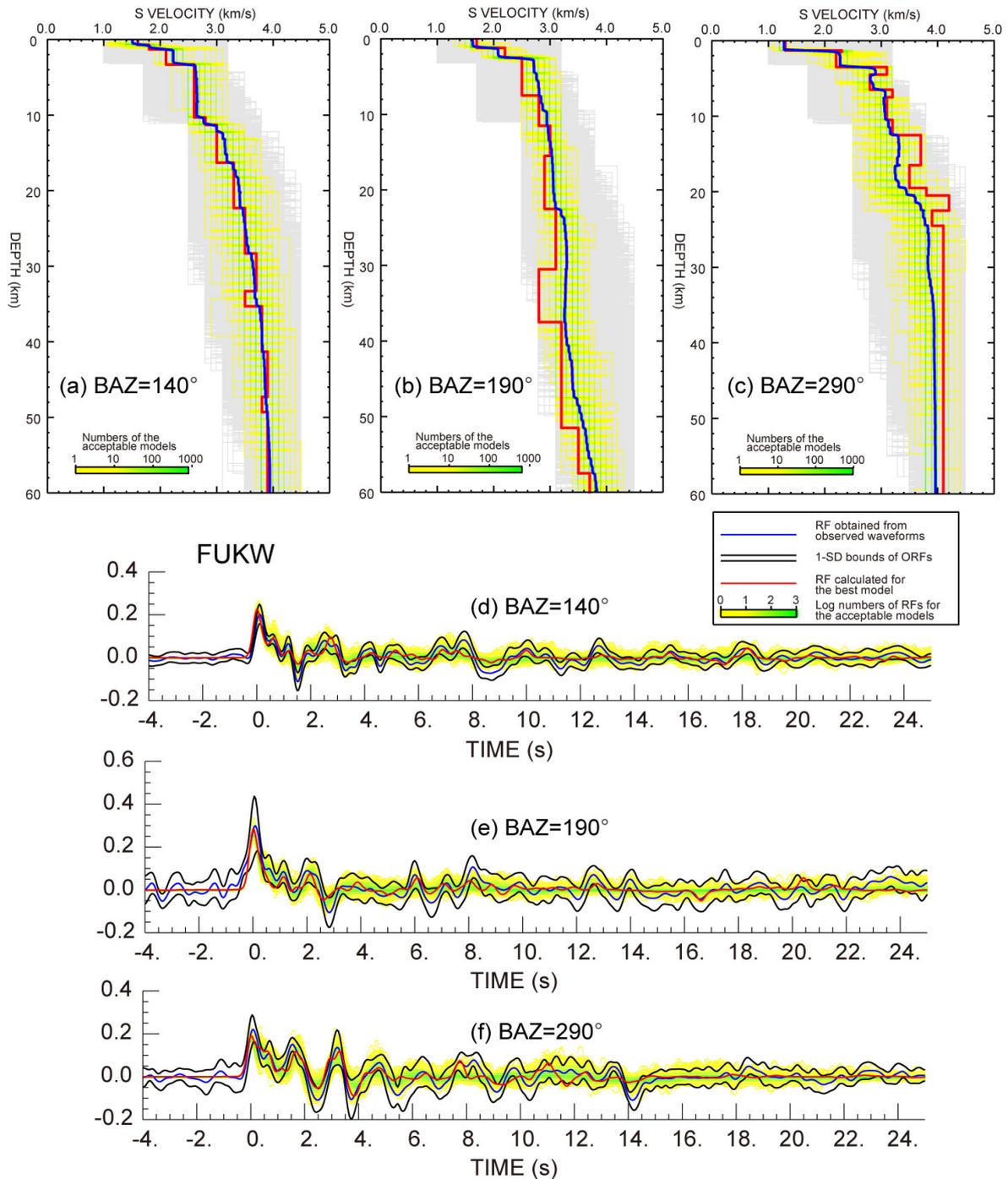


図14 FUKでのレイシーバ関数インバージョンの結果。(a)、(b)、(c)はそれぞれ到来方向 140° 、 190° 、 290° に対するS波速度構造である。最適モデルを赤線で、許容モデルの範囲をその個数に応じて緑から黄色で、平均モデルを青線で示す。(d)、(e)、(f)は到来方向 140° 、 190° 、 290° に対するレイシーバ関数の波形である。観測レイシーバ関数の重合波形を青線で、その ± 1 標準偏差の範囲を黒線で、最適モデルに対する理論波形を赤線で、許容モデルに対する理論波形の範囲を緑から黄色で示す。

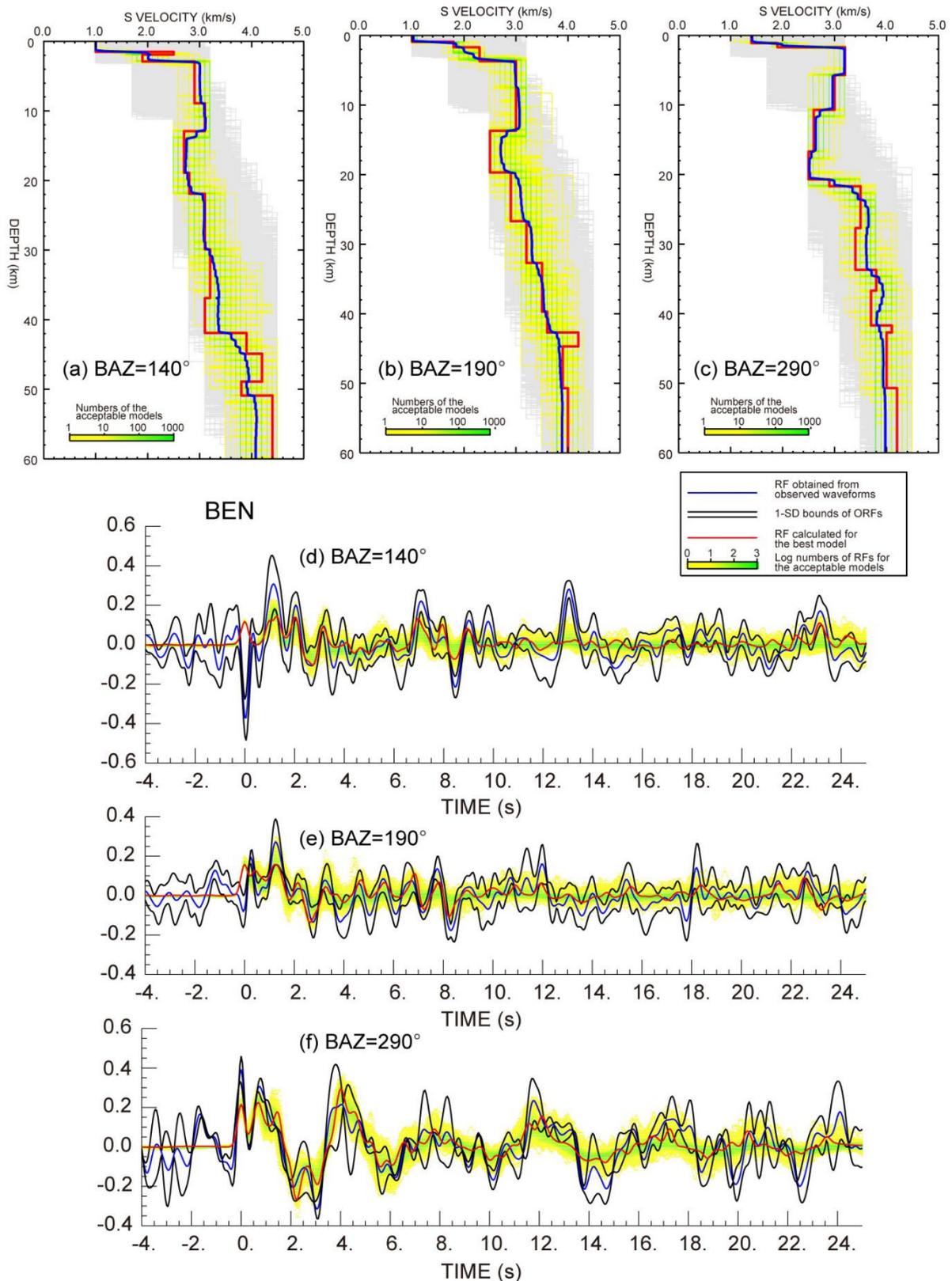


図15 BENでのレーザー関数インバージョンの結果。(a)、(b)、(c)はそれぞれ到来方向140°、190°、290°に対するS波速度構造であり、(d)、(e)、(f)はそれらに対応するレーザー関数の波形である。その他の説明は図14のキャプションを参照のこと。

b. 始良カルデラのS波速度構造のマッピング

ある一つのレーザ関数（到来方向 ϕ_1 、波線パラメータ p_1 ）から波形インバージョンにより推定されたS波速度構造の深さ z_1 におけるS波速度を β_1 とする。まず、その観測点から到来方向 ϕ_1 の断面において、S波速度構造と波線パラメータ p_1 を用いて波線追跡を行う。その波線において、深さ z_1 での観測点からの水平距離 r_1 を求め、深さ z_1 における到来方向 ϕ_1 かつ水平距離 r_1 のピクセル（ $1\text{km}\times 1\text{km}\times 1\text{km}$ ）にS波速度 β_1 をマッピングする。この手順をすべての観測点のすべての到来方向に対して推定されたS波速度構造について行う。ピクセル内に複数のS波速度がマッピングされた場合はそれらの平均をとる。結果を図16に示す。なお、図16～図20においてX座標（東西方向）とY座標（南北方向）の原点は、桜島火山の山頂付近の（ 31.5767° E , 130.6608° N ）とした。

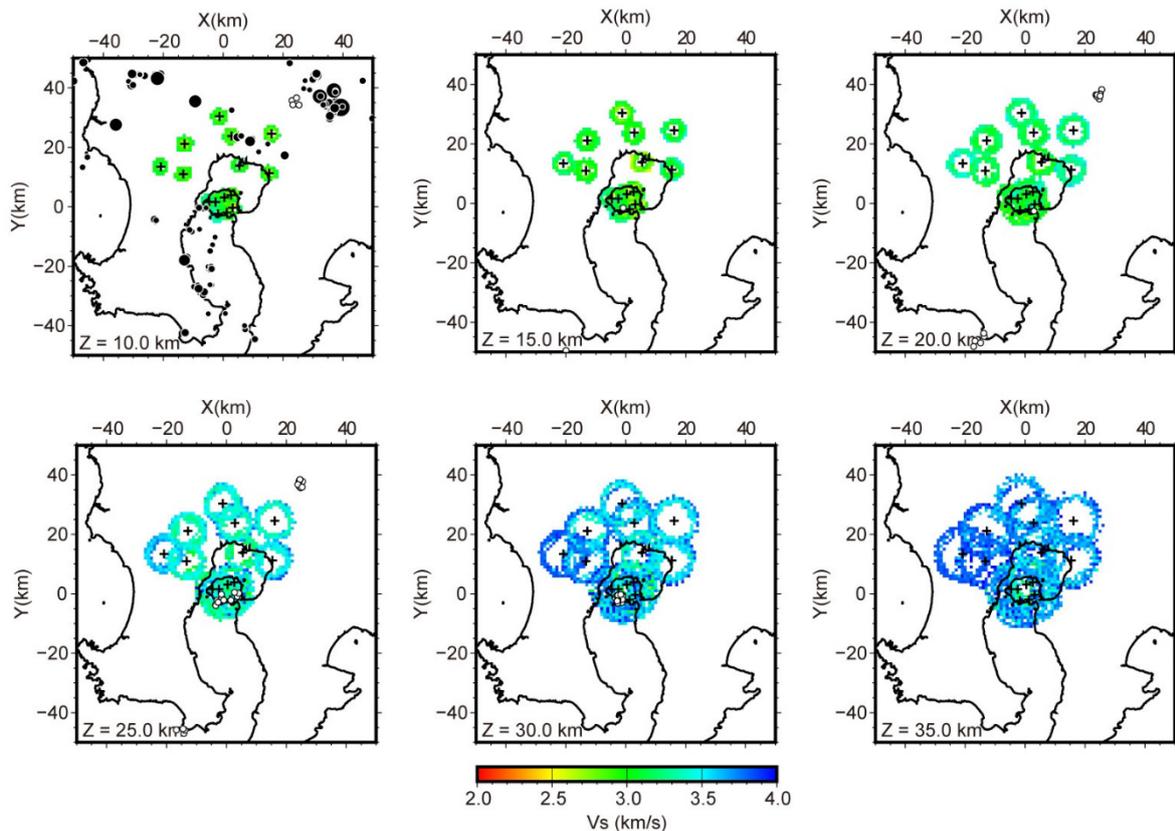


図16 S波速度構造のマッピングの結果。Z = 10 km から 35 km まで 5 km ごとの深さで示す。+は解析に用いた観測点である。黒丸は通常地震、白丸は低周波地震を示す。これらは各深さ断面の $\pm 0.5 \text{ km}$ の範囲に入るものをプロットした。

次に各深さの2次元断面において、GMT (Generic Mapping Tool, Wessel et al., 2019) のblockmeanを用いて、 $4 \text{ km}\times 4 \text{ km}$ の格子でS波速度を平均し、surfaceのtension factorを0.25に設定して補間し、 $1 \text{ km}\times 1 \text{ km}$ の格子点でのS波速度を求め、図示した。その結果を図17に示す。Z = 15 kmの深さにおいて、湾奥部にS波速度 (V_s) が 2.7 km/s 程度の低速度領域が見られ

る。また、 $Z = 20$ km の深さにおいても桜島を中心として、 $V_s = 3.0$ km/s 程度の低速度域が見られる。

速度異常を分かりやすく示すために、1 km ごとの深さ断面において、S 波速度 (V_s) の平均値 \bar{V}_s を求め、 $dV_s = (V_s - \bar{V}_s)/\bar{V}_s \times 100$ により S 波速度の偏差を求めた。これを 5 km ごとの深さ断面、東西断面、南北断面において、上記と同じ補間を行い、それぞれ図 18、図 19、図 20 に示す。

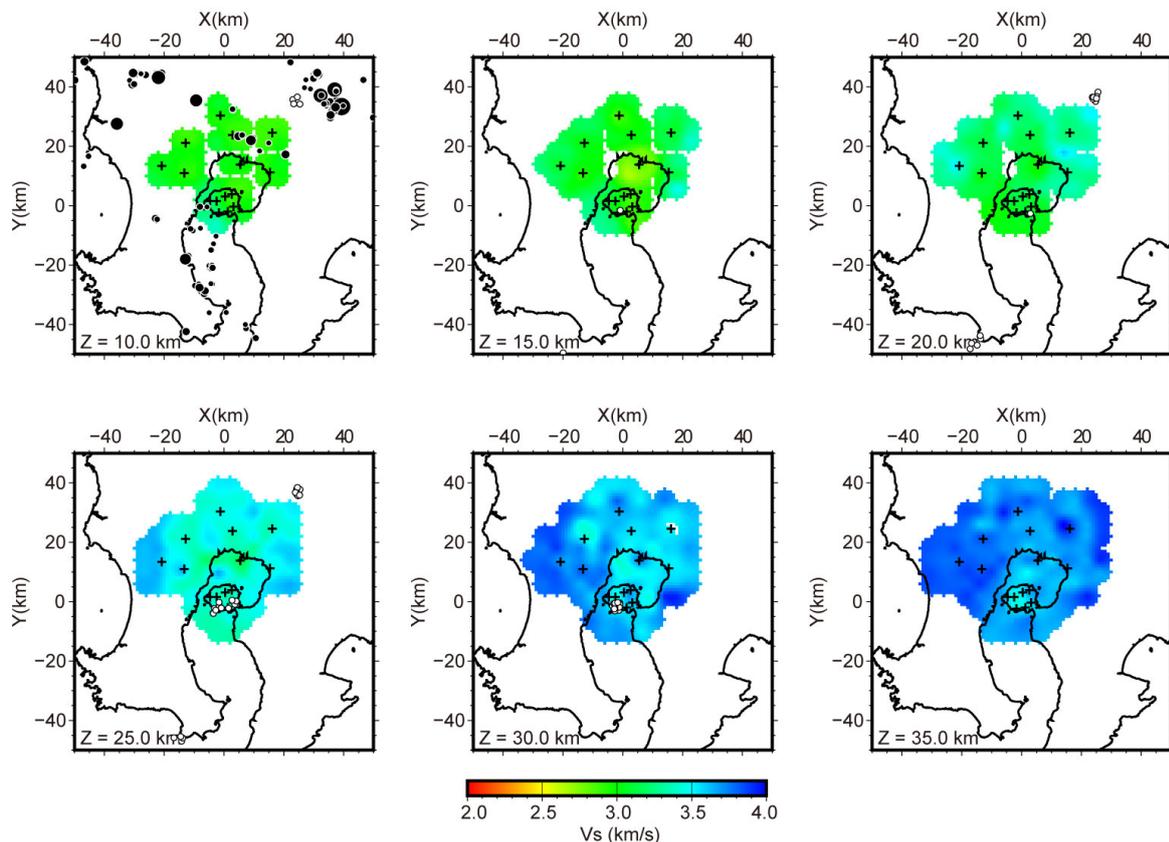


図 17 図 16 の結果を補間して得られた $Z = 10$ km から 35 km まで 5 km ごとの深さにおける S 波速度の不均質分布。その他の説明は図 16 のキャプションを参照のこと。

図 18 を見ると、 $Z = 10$ km から 35 km の深さまで、始良カルデラを中心として広範囲に低層度異常域が分布していることがわかる。とくに深さ 15 km において -10% 以上の顕著な低速度異常が見られる。これは、図 15 に示した湾奥北部の観測点 BEN の S 波速度構造において、深さ 13 km ~ 20 km に低速度層が見られることと対応していると考えられる。図 19 に示す東西断面では、湾奥北端部の $Y = 15$ km と湾奥中部の $Y = 10$ km の断面において、深さ 15 km 付近をトップとする顕著な低速度領域が見られる。これらの低速度領域は深さ 30 ~ 40 km 付近まで続いているように見える。また、桜島の中央部を通る $Y = 0$ km の断面では、 $Z = 20 \sim 40$ km の深さに -10% をこえる低速度異常域が見られる。深さ 20 km ~ 30 km に見られる低周波地震もこれらの低速度領域の端部で発生している。桜島の東部では深さ 20 km 以浅においても低速度領域が見られ、桜島火山の直下まで続いているように見える。図 20 に示す南北断面では、湾奥中部から桜島東部を通る $X = 5$ km の断面において、深さ 15 km 付近をトップとする低速度領域が湾奥北岸の $Y = 20$ km

から桜島南岸の $Y = -5$ km まで低速度領域が見られる。桜島中央部を通る $X = 0$ km の断面では、深さ 15 km 付近をトップとして深さ 40 km まで低速度領域が続いている。中でも $Z = 30 \sim 40$ km に -10% を超える顕著な低速度異常域が存在する。また、桜島火山の北側直下にも -10% に近い低速度領域が見られる。これらの低速度異常の原因としてマグマなどの流体の関与が示唆される。

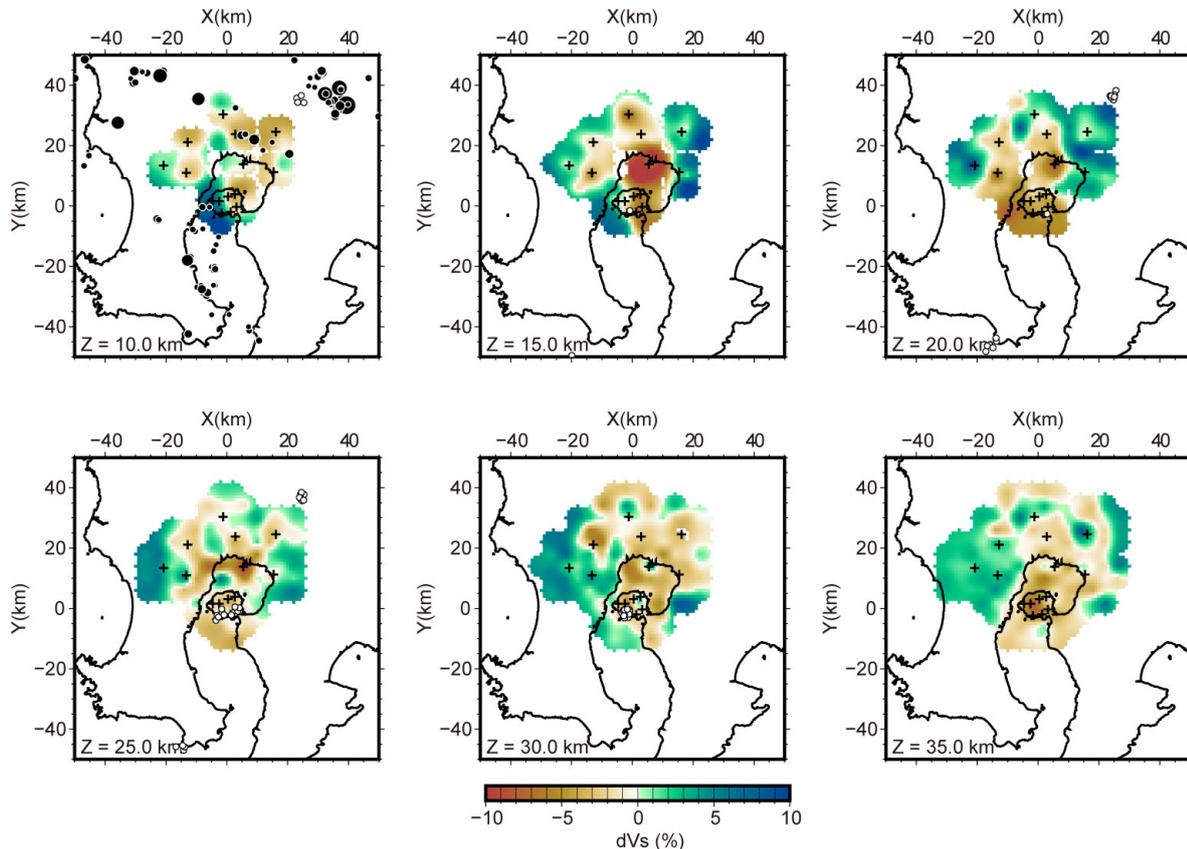


図 18 $Z = 10$ km から 35 km まで 5 km ごとの深さにおける S 波速度の平均値からの偏差の不均質分布。なお、各深さでの S 波速度の平均値は、3.01、3.07、3.22、3.46、3.64、3.73 km/s である。その他の説明は図 16 のキャプションを参照のこと。

桜島島内の 7 観測点と錦江湾の湾奥部を囲んで広範囲に分布する 8 観測点において、レーバ関数の波形インバージョンにより、到来方向 10° ごとの 1 次元 S 波速度構造を求め、それを 10 km から 35 km まで 5 km ごとの深さ断面にマッピングして、S 波速度の不均質分布を推定した。これらの深さにおいて、始良カルデラを中心として広範囲に低層度異常域が分布していて、とくに深さ 15 km において低速度異常が顕著であることがわかった。

ただし、今回の解析では、定常観測で得られたレーバ関数に加えて、本委託研究による臨時観測の地震波形データから得られたレーバ関数を 323 本使用したが、低速度領域の推定においてはマッピングされた S 波速度の補間に負うところが大きく、その大きさを正しく求められているかについてはさらなる検討が必要である。湾奥南部の SHN、湾奥北西部の AIR、湾奥北東部の

KKB、湾奥東部の ST08 と ST09 などの観測点は、十分なレーザ関数が蓄積されていないため、今回の解析では使用できなかったが、これらの観測点を使うと、低速度異常域の大きさをより正確に推定できるようになると考えられる。

加えて、湾奥北部に位置する BEN は低速度異常域の推定に重要な観測点であるが、2019 年に設置された臨時観測点であるため、今回使用したレーザ関数の数がまだ少ない。今後、未解析期間のレーザ関数を追加し、波形重合によるレーザ関数の SN 比の向上を図る必要がある。

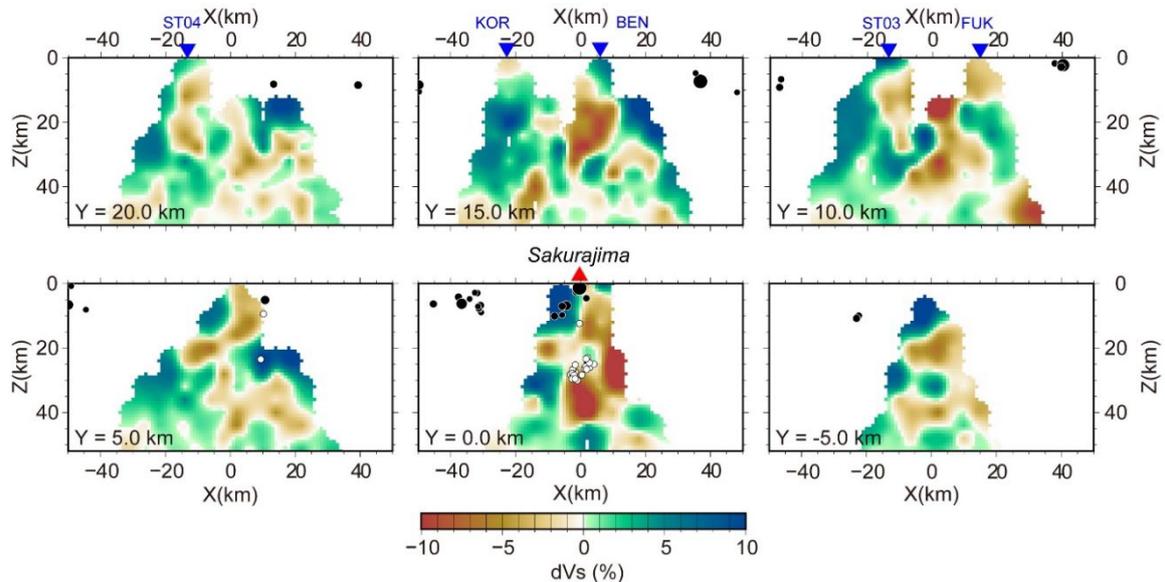


図 19 Y = -5 km から 20 km まで 5 km ごとの東西断面における S 波速度の偏差の不均質分布。黒丸は通常地震、白丸は低周波地震を示す。これらは各断面の±0.5 km の範囲に入るものをプロットした。桜島火山を赤い三角で、断面近傍の観測点を青い逆三角で示す。

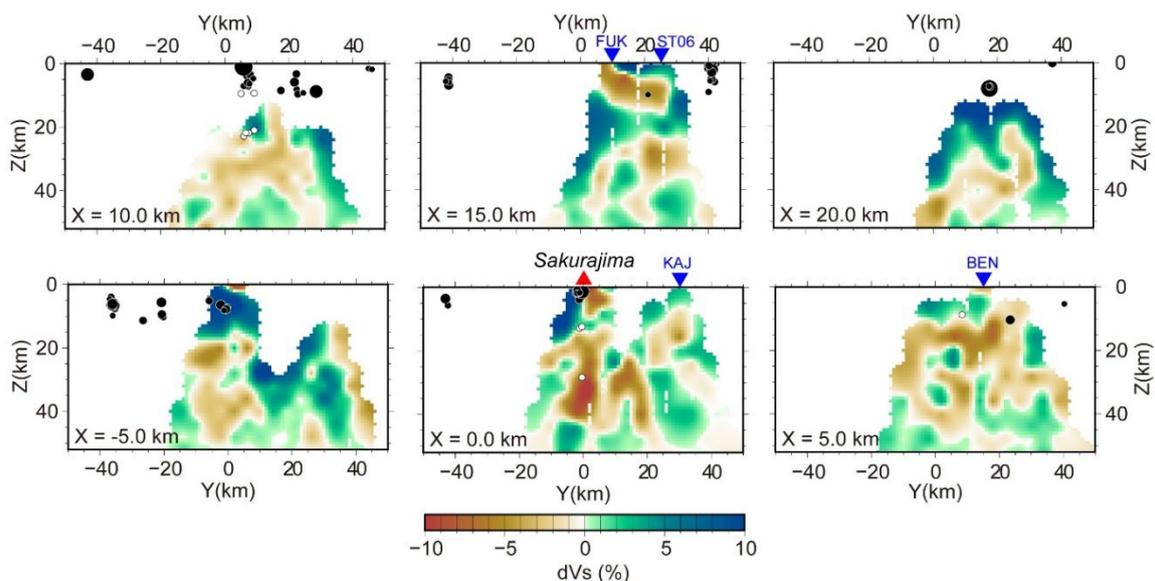


図 20 X = -5 km から 20 km まで 5 km ごとの南北断面における S 波速度の偏差の不均質分布。その他の説明は図 19 のキャプションを参照のこと。

c. 観測点 BEN における傾斜構造を含むモデリング

図 1 3 に示す観測点 BEN におけるレシーバ関数の R 成分の重合波形をよく見ると、 $120^\circ \sim 160^\circ$ の到来方向において時間軸の 0 s における直達 Pp 波の振幅が負になっていることに気付く。これは、これまで行ってきた水平成層構造のモデリングでは説明できない。そこで、観測点直下に傾斜する地震波速度不連続面が存在するモデルを検討した。

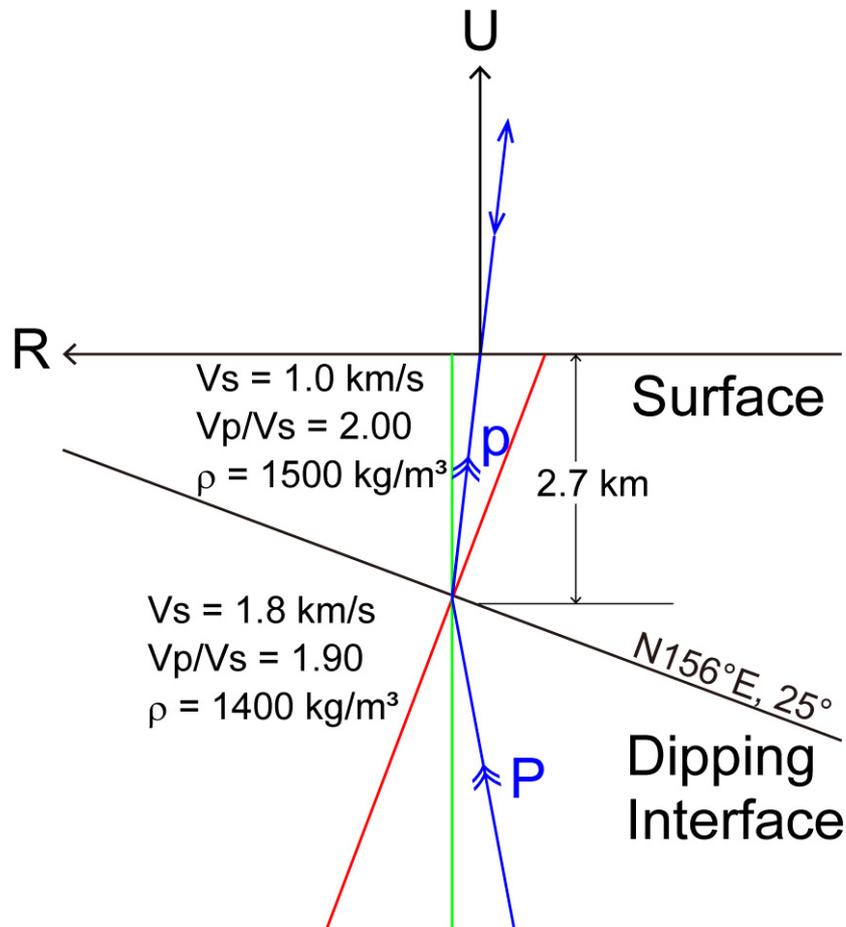


図 2 1 観測点 BEN におけるすべての到来方向のレシーバ関数を同時インバージョンして推定された傾斜境界面をもつ 2 層構造モデル。矢印付きの青線は、負の振幅をもつ直達 Pp 波の波線を模式的に表したものの。赤線は傾斜境界面の法線、緑線は地表面の法線を示す。

まず、上記のような傾斜境界面をもつ 2 層構造モデルを考え、図 1 3 に示す 18 本のレシーバ関数の $-2 \sim 5$ s のタイムウィンドウの波形を同時に説明できるように、第 1 層の厚さ、S 波速度 (V_s)、P 波速度と S 波速度の比 (V_p/V_s)、密度、第 2 層 (半無限層) の V_s 、 V_p/V_s 、密度、および層境界面の傾斜方向と傾斜角度をインバージョンにより推定した。この際の理論レシーバ関数の計算には、generalized ray theory (Helmberger, 1974; Langston, 1977) を用いた。得られた 2 層構造モデルを図 2 1 に示す。推定された層境界面は、観測点直下の 2.7 km にあり、東南方向に 25° で傾き下がっている。この図には、振幅が負となる直達 Pp 波の波線が模式的に描かれている。

第1層の V_p が第2層の V_s より小さい場合、傾斜境界面の down-dip 側から up-dip 方向に P 波が入射すると、透過 p 波はスネルの法則により傾斜境界面の法線（赤線）に近づくように屈折する。このため観測点には +R の方向から -R の向きに入射することになり、レシーバ関数の R 成分において直達 Pp 波の振幅が負になることが説明できる。レシーバ関数における観測波形とこのモデルの理論波形の比較を図 2 2 に示す。時間軸の 0 s に見られる直達 Pp 波について、到来方向 $120\sim 160^\circ$ の負のピークの振幅は説明できていないが、少なくとも正のピークは立っていない。到来方向 $280\sim 310^\circ$ の正のピークはほぼ説明できている。

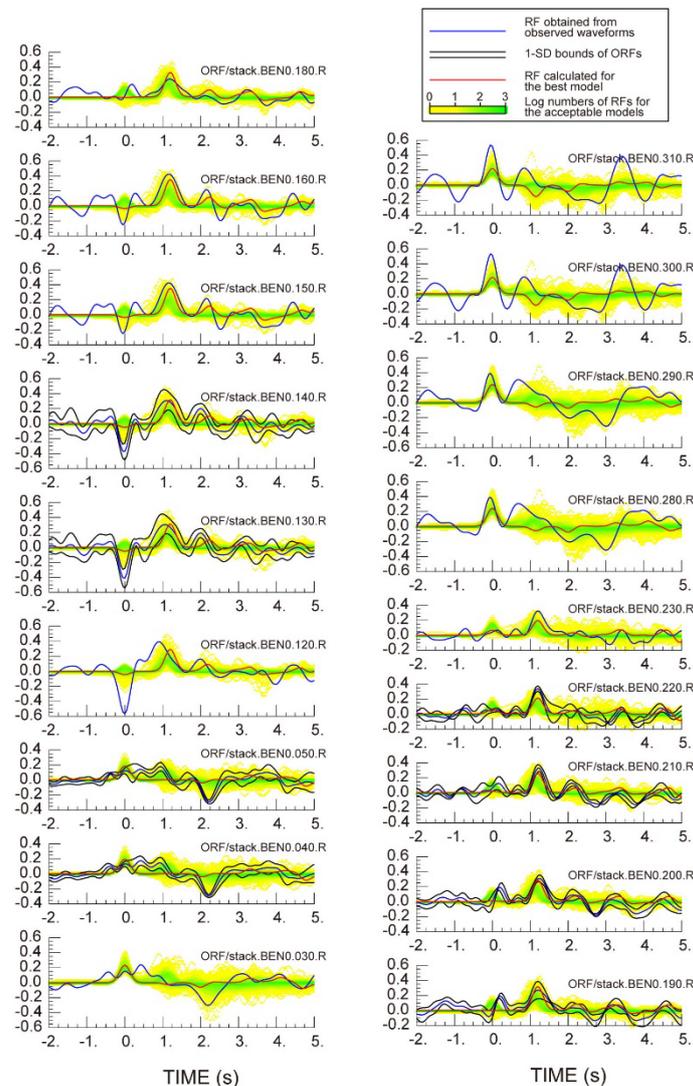


図 2 2 観測点 BEN におけるすべての到来方向のレシーバ関数を同時インバージョンして傾斜境界面をもつ 2 層構造モデルを推定した際の観測波形と理論波形の比較。各波形の右肩のファイル名において R の前に書かれている数値が到来方向を表す。

次に、第1層の厚さ、 V_p 、 V_p/V_s と第2層の V_s 、 V_p/V_s は、図 2 1 に示す値に固定し、第2層の厚さと第3層から第13層までの層厚と V_s 、および第14層（半無限層）の V_s をモデルパラメータとし、到来方向 140° 、 190° 、 290° のレシーバ関数の $-5\sim 35$ s のタイムウィンドウの波形を別々にインバージョンして、それぞれの到来方向の速度構造を推定した。その結果を図 2 3 に示す。

図15に示した水平成層構造モデルを用いたインバージョンの結果と比較する。140°の到来方向では、低速度層が深さ8~20 kmと、水平成層モデルより3~5 km浅く求まっているが、深さ20~40 kmの V_s が3 km/s程度であることと深さ40 km付近で V_s が4 km/sにジャンプする特徴は似ている。観測波形と理論波形のフィッティングは傾斜構造モデルの方が良く、ミスフィット値は10%程度小さい。190°の到来方向では、水平成層モデルの深さ4~14 kmの $V_s = 3$ km/sの層に対応するものは傾斜構造モデルには見られない。深さ40 kmまで速度が徐々に増加する傾向は似ているが、傾斜モデルの方が低速度である。波形のフィッティングは同等である。290°の到来方向では、表層の下に $V_s = 3$ km/sの層があり、その下に低速度層があるパターンは、傾斜構造モデルと水平成層モデルで似ているが、それらの深さは傾斜構造モデルのほうが少し深めに求まっている。波形のフィッティングは水平成層モデルの結果より劣っている。これらのインバージョンでは、最上部の2層を前段の全方位のレシーバ関数の同時インバージョンで得られた値に固定したため、到来方向によっては浅部の局所的な不均質性を反映できなかったことが、水平成層モデルより良い結果が得られなかった原因ではないかと思われる。

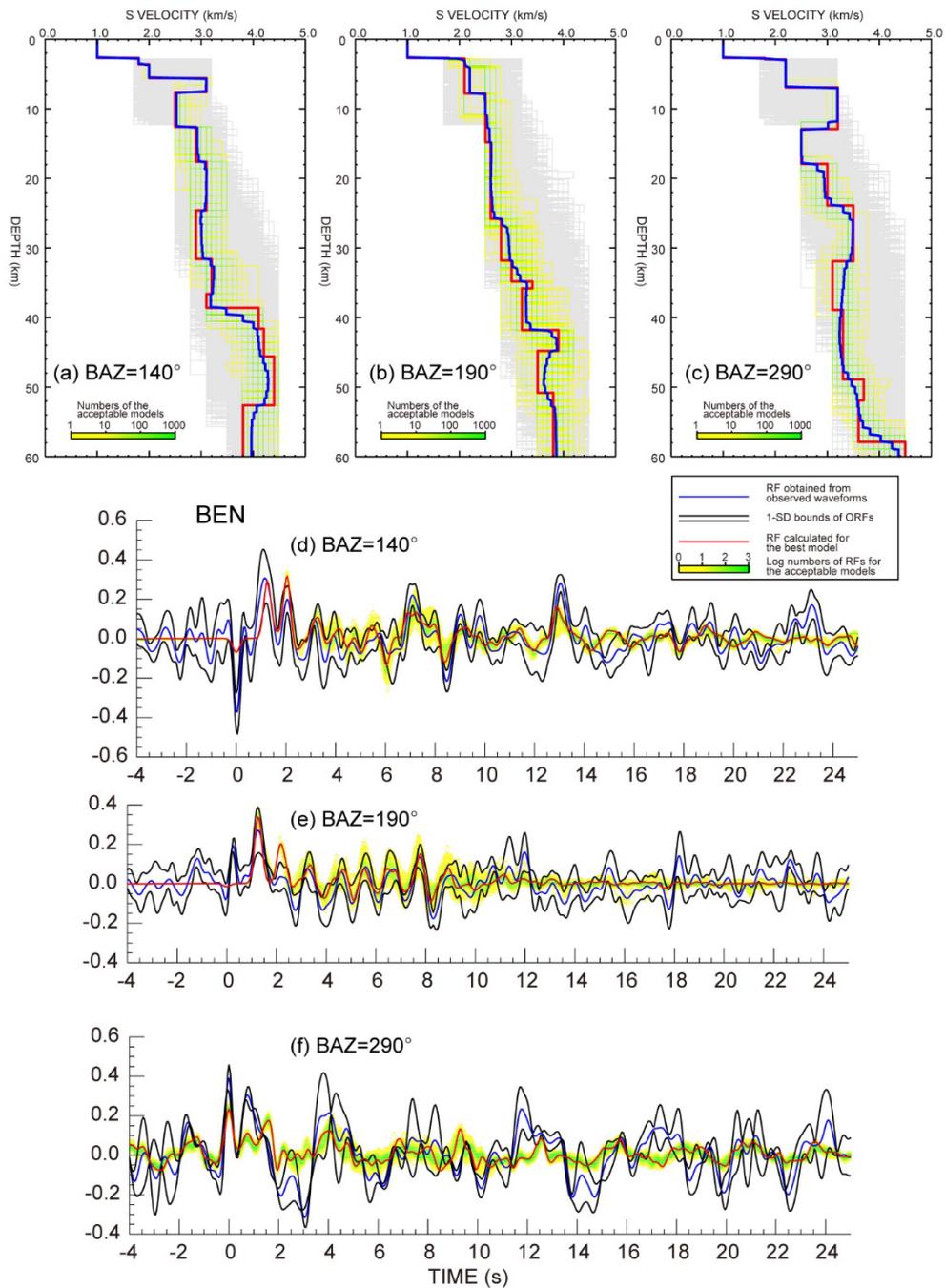


図 2 3 BEN での傾斜構造モデルを用いたレーザ関数インバージョンの結果。(a)、(b)、(c) はそれぞれ到来方向 140° 、 190° 、 290° に対する S 波速度構造であり、(d)、(e)、(f) はそれらに対応するレーザ関数の波形である。その他の説明は図 1 4 のキャプションを参照のこと。

(1) - 1 - 4. 地震波の振幅減衰から見たマグマ溜まりの位置推定についての検討

本パートでは、始良カルデラ下の深さ 12-22 km 付近に見いだされた S 波低速度領域と始良カルデラ下を通過する地震波の減衰がどのような関係にあるか調査を行う。

始良カルデラ下の過去の研究では該当領域を通過する地震波の振幅が著しく減衰することが知られている。Ono et al. (1978) は大隅半島の 2 個所で人工地震を発生させ桜島および始良カルデラの西側と北側における地震観測点で振幅の減衰を確認している。P 波速度が 6km/s の層（深さ 2.5km より深部）で振幅の減衰が見られると報告しているがその深部についての情報は得られていない。加茂・他 (1980) は桜島および始良カルデラの北西部の薩摩半島側で発生した自然地震を大隅半島側で観測した記録に地震波の振幅の減衰を見出し、始良カルデラから桜島北部にかけての深さ 6-17 km を通過してくる地震波が減衰していることが明らかにされていた。

地震波の振幅を取り扱う際には以下の注意や補正が必要となる。

- ・観測点に対して多方位のデータを使用すること
- ・観測点直下の振幅増幅効果（サイト特性）の振幅補正
- ・震源放射特性（震源メカニズム）による振幅補正

今年度は観測点直下の振幅増幅効果の補正のための評価を行った。図 2 4 に振幅減衰の解析のための地震イベント分布を示す。多方位データを収集するために始良カルデラ近傍の観測点においては 16 方位の震源を選択している。対象としている S 波低速度領域の大きさを約 10 km×10 km とすると、地震波の減衰を見るためには波長がそれ以下の物を使用する必要があり、より周波数が高いものほど減衰の影響を受けると考えられ、近地地震を振幅減衰の解析対象としている。また、S 波低速度領域の深さ方向の振幅減衰を見るため深さ 20 km までの浅部の地震（図 2 4 の赤○）、やや深発地震（図 2 4 の橙と黄色○）と深発地震（図 2 4 の緑と青色○）を解析候補のデータに含んでいる。

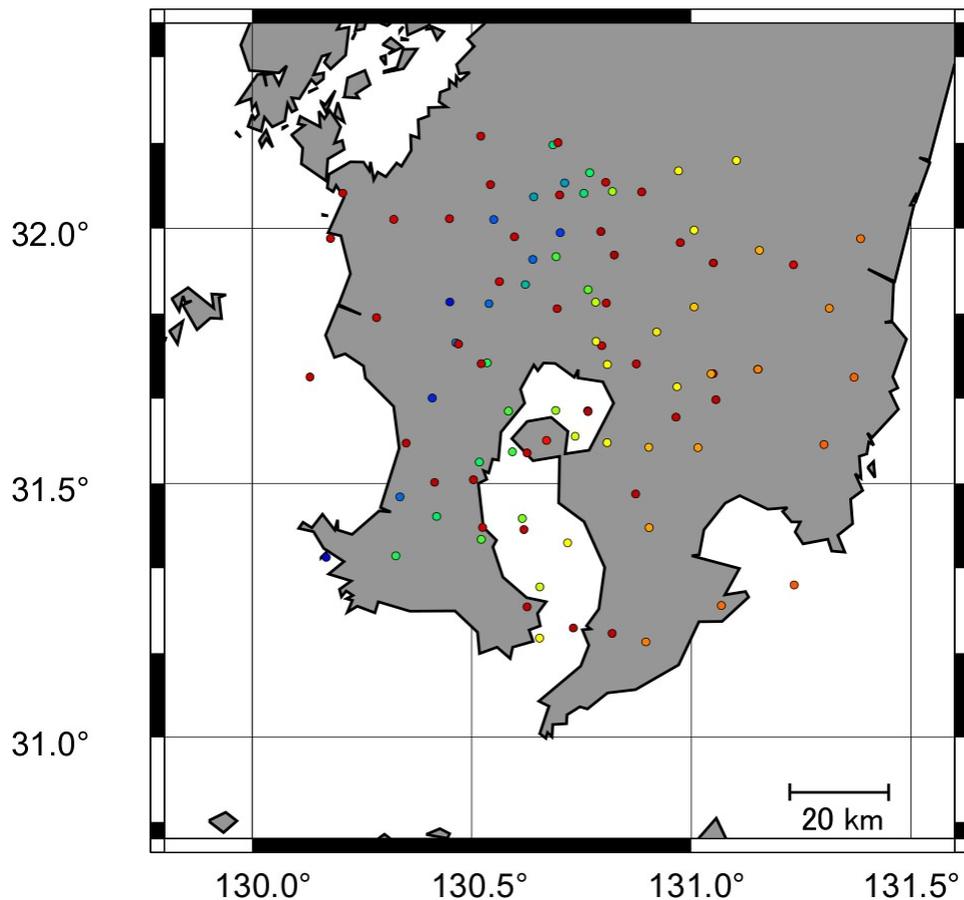


図 2 4 振幅減衰解析のための地震イベント候補

観測点直下の振幅増幅効果（サイト特性）を得るために、やや近地地震の初動振幅の読み取り値を用いて補正を行なった。サイト特性の補正値を得るために通常は十分に観測点から離れた遠地地震を用いることで震源メカニズムによる放射特性を無視するが、サイト特性には周波数依存性があるため遠地地震の周波数では周期が長すぎて対象としている近地地震の周波数と合わない。本来は解析に用いる近地地震と同様の周波数を使用して補正値を算出するべきであるが、補正に用いるイベント自体が減衰の影響を受けてしまうため、今回は震央距離が 100 km 程度でほぼ全ての観測点で振幅が読める M3.5~4.9 のやや近地地震の振幅を使用してサイト特性の補正を行なった。補正に使用したイベントの卓越周波数は 2~5 Hz で、多方位および震源の深さが異なる 15 イベント（表 5 参照）を選びそれぞれの観測点で平均化することで震源メカニズムによる放射特性も平均化されると見なした。

得られたサイト特性を表 6 に示す。臨時観測点 1 の補正値を 1 とした場合で示している。臨時観測点 1-17 では地震計は地表設置であり、地盤の影響を受けて観測点間で値が大きく異なる。また、代表的に防災科研 Hi-net の AIRA を示しているが、地表と地中では理論的には振幅値が 2 倍異なるが、地表の地盤の状況によっては約 5 倍もの振幅値の違いが出ている。振幅減衰の評価にはサイト特性の補正が必要である。

表5 サイト特性を得るために使用したやや近地地震のリスト

日時	緯度	経度	深さ	マグニ チュー ド
2012年01月30日 03:18	32.6143	132.0035	39	4.9
2013年09月28日 04:37	31.2523	131.5923	25	4.2
2014年05月04日 19:01	32.2278	132.1345	20	4.1
2015年05月24日 09:03	31.2738	130.3765	157	3.9
2016年01月26日 06:18	31.8700	129.2323	11	3.8
2016年11月10日 17:49	31.2937	131.9272	25	3.7
2017年04月06日 18:31	31.0432	129.0007	10	4.1
2018年04月28日 13:27	31.8632	132.1180	28	4.3
2019年01月25日 14:41	31.8515	129.1795	6	4.6
2020年07月17日 14:54	32.7633	130.7417	10	3.9
2020年12月25日 05:38	30.8317	130.5083	105	4.4
2021年02月28日 23:31	30.0467	131.3167	23	3.9
2021年05月14日 06:38	32.3283	131.8950	25	3.5
2021年08月30日 11:15	33.0567	131.1567	8	3.6
2021年11月13日 13:45	31.1917	130.4633	149	4.7
2022年01月11日 12:23	32.9950	131.9133	10	3.9

表6 サイト特性の振幅値(SK01を1.00とした場合)

臨時観測点	サイト 特性値
SK01	1.00
SK02	0.93
SK03	1.23
SK04	2.19
SK05	1.82
SK06	2.67
SK07	1.56
SK08	2.11
SK09	1.14
SK10	2.45
SK11	0.86
SK12	0.95
SK13	0.85
SK14	1.12
SK15	1.04
SK16	0.98
SK17	1.15
AIRA	0.57

図25に震源距離の振幅値補正(1/r)とサイト特性の振幅値補正を行なった波形を示す。震源は図25の星印で錦江湾南部の喜入沖である。図の4と5の観測点では地震波は始良カルデラを通過して到達しており、著しい振幅の減衰が見られ、始良カルデラを通過していない波線の約1/10に減衰している。また観測点4と5の震源寄りとなる桜島島内のS1-S3の波形を見ると全体の振幅は若干減衰しているように見えるが、P波とS波の位相は比較的明瞭である。図24の解析候補から始良カルデラを通過し振幅が減衰する地震波を抽出し、減衰領域を明らかにする。

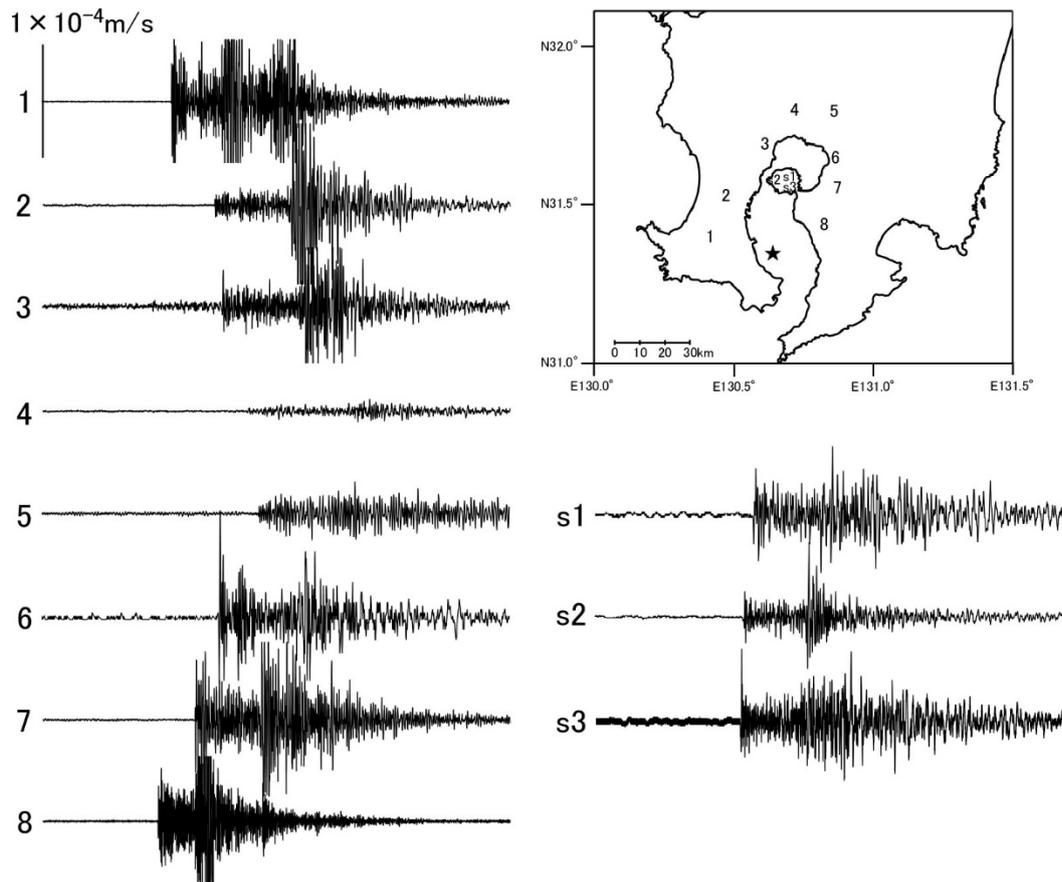


図 2 5 始良カルデラを通過する地震波の振幅減衰

地震観測点において地震波振幅が理論値より 0.2 以下、0.5 以下になる波線を抽出し、それぞれ減衰する波線が交差する場所で地震波の減衰が起こっていると仮定する。図 2 6 に地震波が減衰する波線の交点を示す。理論値より振幅が 0.2 以下になっている波線が交差する点を黒丸で、0.5 以下もしくは 0.2 と 0.5 以下が交差する点を灰色丸でプロットしている。深さ 12-22 km に見られる S 波低速度領域で交差する波線はほぼ全て 0.2 以下の振幅となっており強く減衰していると言える。一方、S 波低速度領域の周辺で交差する波線も振幅が 0.2 以下もしくは 0.5 以下となっており、地震波速度構造で得られた S 波低速度領域の周囲でも地震波の減衰が生じていることが言える。

トモグラフィによる地震波速度構造解析ではグリッドサイズが 5km であり、そのグリッド内を通過する波線の平均的な速度を見ていることになる。地震波の振幅減衰の解析では 1 本の波線ごとに振幅を評価しているため小さな領域の異常を検知できると思われ、トモグラフィ解析で見出されている低速度異常領域の周囲でも地震波振幅に影響を及ぼす異常が約 2 倍に広がっている可能性が見出された。その減衰の強度や領域の範囲をより定量的に求めるために地震観測を維持し解析数を増やす必要がある。

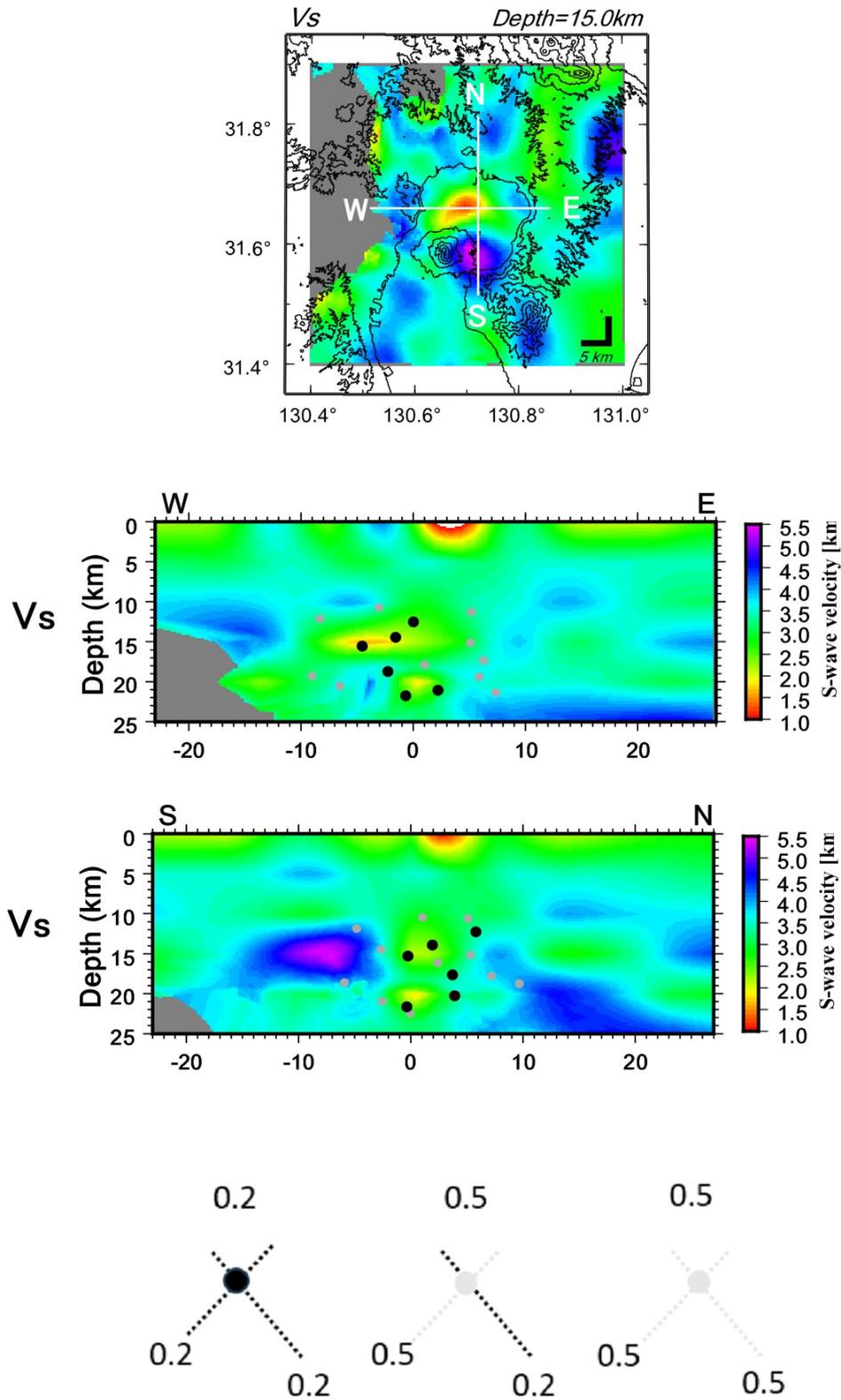


図 2 6 振幅減衰が認められる波線の交点

(1) - 1 - 5. 始良カルデラにおける地震活動

マグマ蓄積が進む始良カルデラにおいて地震活動（火山構造性地震）の震源位置および震源メカニズムの時空間変化を明らかにすることが重要である。トモグラフィで得られた3次元速度構造を使用した震源再決定結果を報告する。図2-7に始良カルデラの震源分布を示す。aは2011年～2022年に始良カルデラ内と周辺で発生した地震の震源分布で、始良カルデラ膨張期にカルデラ周辺で発生している火山構造性地震は主に、1. カルデラ内の若尊海底火山周辺の深さ6 km以浅（領域3）、2. 始良カルデラ縁の東から南東付近の深さ5-10 km（領域3）、3. 始良カルデラおよび桜島の南西部の深さ6-12 km（領域2）で発生している。震源メカニズムとしては1. は北東-南西方向にP軸を持つ横ずれ断層もしくは正断層型、2. は北東-南西方向にP軸を持つ横ずれ断層型、3. は正断層型が主である。図2-7bにHidayati et al. (2007)で報告されている1998年～2005年の震源分布を示す。a図(2011～2022年)ではb図(1998年～2005年)当時と比較すると領域3（若尊火山周辺）での地震と領域4（桜島東側）の地震が増加しており、桜島南西部の地震（領域2）については北西-南東方向に震源が広がってきていることが分かる。領域3の浅部（特に5km以浅）の地震活動は直上に活発な熱水放出活動を行っている若尊火山があることから、その熱水活動に関連した地震と考えられる。ただし、領域3および領域4の5km以深の地震については始良カルデラの縁辺部の地下で発生しており、始良カルデラの活動に関連していると考えられる。領域2の地震に関してはHidayati et al. (2007)によると始良カルデラから桜島へのマグマ貫入に伴うダイクの先端で発生していると解釈されている。領域2において2015年3月に地震活動が増加しており同年8月に桜島島内の浅部マグマ貫入に先行して地震が発生していた可能性が考えられる。領域2、3、4ともに1998年～2005年と比べ2011～2022年の期間では震源の広がりが見られており地震活動に注視する必要がある。

図2-7cに始良カルデラを東西に挟むGNSS観測点の基線長変化と領域3および4（赤）と領域2（青）の月別地震回数を示す。カルデラ近傍の北東域にある福山観測点と南西の錫山観測点で震源決定には至らない微小地震まで含め地震発生回数を精査した。GNSS基線長で2015前半から2017前半に見られた伸び（始良カルデラの膨張加速）時に領域3および4の地震数が通常の1.5倍程度増えていた。2021年のやや東西基線の伸びが進行している際にはカルデラ外の北西域で有感地震が発生している。領域2においては2015年3月～5月に有感地震を含む微小地震が増加し2015年8月15日の桜島浅部へのダイク貫入イベント時には減少していた。2015年3月～5月の領域2の地震活動活発化は始良カルデラから桜島直下へのマグマ貫入に伴って発生し、その後はそのマグマが桜島浅部に上昇していたとすれば、領域2のひずみは解放に向かい、8月ころには地震活動が低下していたと考えられる。

カルデラ周辺で発生している火山構造性地震の震源の深さは12 km以浅に限られ、GNSS観測から見られる膨張期に微小地震も含め局所的な地震活動が活発化する。トモグラフィ解析から得られたカルデラ内のS波低速度異常領域の上端は深さ12 km付近であることから、S波低速度領域のマグマ溜まりと考えられる領域の上部からのマグマ等の流体移動に伴い局部的にひずみが蓄積して火山構造性地震が発生していると考えられる。

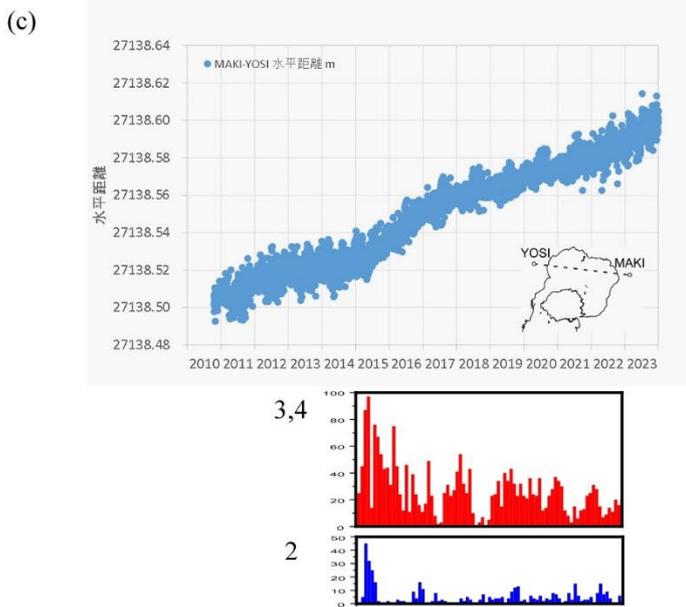
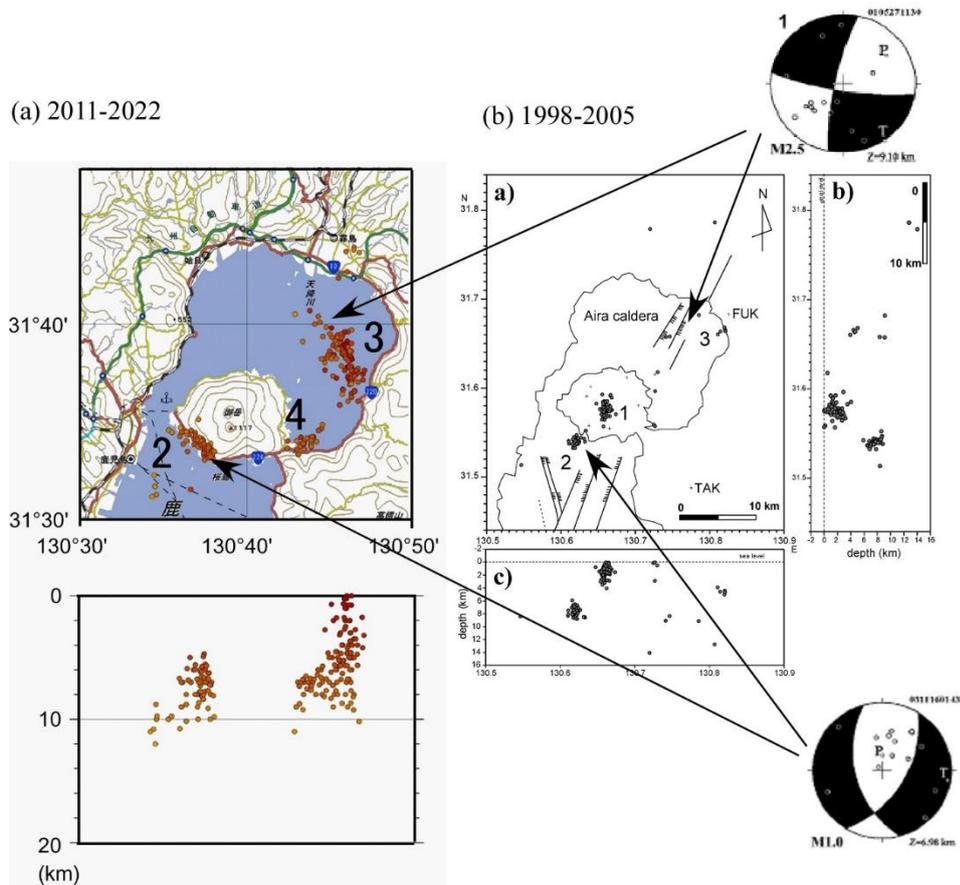


図 27 始良カルデラの地震活動と発震メカニズム。a) 2011 年～2022 年に発生した火山構造的な地震の震源分布。b) Hidayati et al. (2007) で報告されている 1998 年～2005 年に発生した地震の震源分布。ただし a) では南岳火口周辺（領域 1）の地震は省いている。c) 始良カルデラを挟む基線長変化と 2015 年～2022 年に発生した領域 3, 4（赤）および領域 2（青）の微小地震の月別回数。

(1) - 1 - 6. 始良カルデラにおける地震観測による地殻構造調査のまとめ

a. 令和5年度まとめ

令和5年度において桜島を含む始良カルデラ地域における臨時地震観測点の維持管理データ回収を継続的に行い、得られた地震観測記録を用いて3次元地震波トモグラフィ解析とレシーバ関数解析から地殻構造調査を行った。トモグラフィでは解析に用いる地震イベントについて波線が重複するイベントを除くと波線数の大幅な増加はなく、昨年度の結果と差異はなかった。S波低速度異常領域の範囲を補足的に得るために近地地震波の振幅減衰の調査を行ったところ、トモグラフィで得られたS波低速度領域で交差する波線は振幅が理論値の0.2以下に減衰しており、さらにS波低速度領域のほぼ2倍の範囲で振幅が理論値の0.5まで減衰する波線が見られた。このことはトモグラフィ解析で使用している5kmグリッドよりサイズの小さな異常領域が周辺にある可能性を示唆している。

レシーバ関数インバージョン解析で始良カルデラ下のS波速度構造の推定を行った。表層の速度を考慮して1次元S波速度構造のマッピングを行ない、各観測点の結果を統合することで始良カルデラ下のS波速度構造の3次元的分布の推定を行なった。その結果、深さ10kmから35kmまで、始良カルデラを中心として広範囲に低速度異常域が分布していて特に深さ15kmにおいて-10%以上の顕著な低速度異常が見られた。鹿児島湾奥では深さ15km付近を上端とする顕著な低速度領域があり、深さ30-40km付近まで続いている。また、桜島中央部では深さ20-40kmの深さに-10%を超える低速度異常が見られる。カルデラ北部縁にある弁天島観測点において到来方位120-160度における直達Pp波の振幅が負になっている現象は観測点直下に傾斜する地震波速度不連続面が存在するモデルで説明でき、始良カルデラ中央部で得られた速度構造の信頼性が改善された。

レシーバ関数解析と地震波速度トモグラフィ解析から始良カルデラ下の地殻から上部マントルにかけての地下構造がほぼ明らかになった。双方の解析結果から得られたS波低速度異常はカルデラ内の深さ15km付近を上端として分布していること、桜島直下の深部(20-30km)にも低速度異常があることなど両者の特徴はよく一致している。S波速度について、トモグラフィでは周辺速度と比較して最大44%の速度低下に対してレシーバ関数の解析結果では10%程度の低下と割合が異なる理由は、解析に使用しているイベントの関係で、トモグラフィは短周期の波長のため細かい異常領域を検知しており、レシーバ関数は長周期の波長のためより広い領域の平均的な速度異常を検知していると考えられる。

2011年から2022年にかけて始良カルデラで発生した火山構造性地震の震源およびメカニズム解などの調査を行い、地震の多くはカルデラ北東部、桜島東部、桜島南西部で発生していることを明らかにした。震源メカニズムは先行研究であるHidayati et al. (2006)の1998-2005年ころに発生していたものと変わりはない。地震は深さ12kmより浅部で発生しており、S波低速度領域より上部で発生している。マグマをはじめとする流体がマグマ溜まりと考えられるS波低速度領域上部から桜島や若尊カルデラへ移動することに伴い、局部的にひずみが蓄積して火山構造性地震が発生していると考えられる。局所的な震源の領域の広がりが見られることからマグマ蓄積によるひずみの影響が広がっている可能性が考えられ今後も注視が必要である。

b. 5ヶ年まとめ

平成 31 年から令和 5 年度において始良カルデラにおける地震観測による地殻構造調査を行い、主にトモグラフィおよびレシーバ関数を用いた 3 次元地震波速度構造解析結果から始良カルデラ下の地殻から上部マントルにかけての地下構造がほぼ明らかになった。カルデラ下の速度異常を見出す上で観測点配置としては、トモグラフィ解析、レシーバ関数解析ともに観測点を 10 km 間隔程度で設置すればある程度の結果が得られると言える。両者の解析から始良カルデラほぼ中央部の深さ 15km 付近を上端としマグマ溜まりと考えられる S 波低速度領域があり、その領域は深さ 20km を超え、レシーバ関数では 40km 付近まで繋がっている結果が得られた。低速度異常域の S 波低速度異常はトモグラフィ解析とレシーバ関数解析で絶対値に違いがあるものの周辺と比べ 10% 以上低速度となっていると言える。トモグラフィ解析で S 波速度 2.45km/s 以下の領域を低速度領域としてその体積は約 300km³ と見積もられた。メルト量推定の方法として P 波の速度低下を基準として、P 波速度の低下は空隙率によって表現され、そこに流体が包有されていると考えることで始良カルデラ下のメルト量の推定を行ったところ、P 波速度が平均速度より -5 % 以下となる領域の体積は約 380 km³ となり、Taylor and Singh (2002) を参考としメルトインクルージョンが 7% と仮定するとメルト量は 26.6 km³ となる。始良カルデラ膨張期にカルデラ周辺で発生している火山構造性地震は主に、カルデラ内の若尊海底火山周辺の深さ 6 km 以浅、始良カルデラ縁の東から南東付近の深さ 5-10 km、始良カルデラおよび桜島の南西部の深さ 6-12 km で発生していて震源メカニズムは 1998-2005 年ころと差異はない。しかしながら、特に始良カルデラ縁南東部と桜島南西部の地震については震源の領域の広がりが見られることからマグマ蓄積の進行によるひずみの影響が広がっている可能性が考えられる。

今後もトモグラフィ解析、レシーバ関数解析ともに現在の地震観測を継続しデータの蓄積と解析数を増加させることが必要である。特にカルデラ深部構造をより詳細に求めるためには薩摩半島西部に地震観測点を設置して日向灘および大隅半島で発生するやや深発地震の地震波の波線を得ることができれば解像度向上が見込まれる。また、カルデラ東縁および南部で火山構造性地震が増加しこれまでより震源の範囲が広がっていることの詳細を明らかにするためにはカルデラ東岸付近に観測点を増設する必要があると考えられる。

参考文献

- Abe, Y., T. Ohkura, K. Hirahara, T. Shibutani (2013) 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. (1962) Crustal reflection of plane P and SV waves, *J. geophys. Res.*, 67, 4751-4767.
- Helmburger, D. V. (1974) Generalized ray theory for shear dislocations, *Bull. Seismo. Soc. Am.*, 64, 45-64.
- Hidayati, Sri, 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, 6, 289-309.
- 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>
- 井口正人・他 82 名 (2009) : 2008 年桜島人工地震探査の目的と実施, 京都大学防災研究所年報, 52B, pp. 293-307.
- 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
- 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>
- 加茂幸介・西 潔・高山鉄朗・植木貞人 (1980) : 桜島南方の地震活動と地震波異常伝搬域, 第 3 回桜島火山の集中総合観測, pp. 11-15.
- Kurita, T. (1973) 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
- 京都大学防災研究所 (2022) 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 令和 4 年 3 月
- Langstone, C. A. (1977) The effect of planar dipping structure on source and receiver responses for constant ray parameter, *Bull. Seismo. Soc. Am.*, 67, 1029-1050, 1977
- Nakamichi, H., Hamaguchi, H., Tanaka, S., Ueki, S., Nishimura, T. and Hasegawa, A. (2003) Source mechanisms of deep and intermediate-depth low-frequency earthquakes beneath Iwate volcano, northeastern Japan. *Geophysical Journal International*, Vol. 154(3), pp. 811- 828.

- 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
- 澁谷拓郎・平原和朗・上野友岳 (2009) 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 (1996) Genetic algorithm inversion for receiver functions with application to crust and uppermost mantle structure beneath Eastern Australia, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 1829-1823.
- 澁谷拓郎・寺石眞弘・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 (2019) 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.
- Shibutani, T., T. Ueno, K. Hirahara (2008) Improvement in the extended-time multitaper receiver function estimation technique, *Bull. Seismo. Soc. Am.*, 98, 812-816, doi: 10.1785/0120070226.
- 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, 69-76.
- 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.
- 上野 寛・畠山信一・明田川 保・舟崎 淳・浜田信生 (2002) 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.
- Um, J. and Thurber, C. (1987) A fast algorithm for two-point seismic ray tracing. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 77, 972-986.
- Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F., Tian, D. (2019) The Generic Mapping Tools version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20, 5556-5564, <https://doi.org/10.1029/2019GC008515>
- 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.

表2 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	2010/11/13 16:44:24	31.9825	130.3992	4	3.7
2010/01/04 22:24:48	31.3124	130.5867	8	2.1	2010/11/13 22:06:20	31.6844	130.7734	1	1.5
2010/01/08 14:10:00	31.5729	130.3200	4	2.5	2010/11/21 15:25:05	31.2946	130.4180	169	4.0
2010/01/15 17:53:18	32.1484	130.3510	4	2.7	2010/12/02 07:18:43	31.3092	131.1156	57	3.0
2010/02/05 23:35:08	31.3661	130.5598	8	2.4	2010/12/04 03:48:27	31.5960	130.7506	9	1.5
2010/02/06 01:20:47	31.3099	130.4336	157	3.8	2010/12/07 05:37:22	31.6783	130.9967	67	1.6
2010/02/14 21:45:48	31.8067	130.6967	10	1.2	2010/12/11 12:48:13	31.1790	130.7221	108	4.2
2010/03/26 00:56:24	31.2329	130.3668	164	4.4	2010/12/27 13:47:10	32.1421	130.3403	4	3.0
2010/03/27 07:38:58	31.7467	130.7667	7	1.5	2011/01/05 16:27:37	31.2758	130.3555	165	4.4
2010/04/02 02:34:15	32.0048	130.3695	4	2.5	2011/01/14 18:54:41	32.1394	130.3438	4	2.8
2010/04/06 20:35:40	31.8187	130.7656	6	1.7	2011/02/05 03:01:16	31.4880	130.4974	161	3.5
2010/04/27 18:09:29	31.7874	130.9899	81	2.9	2011/03/13 11:35:48	31.3310	130.6429	12	2.4
2010/05/01 14:31:27	31.2687	130.3910	162	4.9	2011/03/26 03:03:00	31.7687	130.7909	6	2.7
2010/05/12 06:28:49	31.7408	130.7658	6	1.8	2011/04/09 07:40:42	31.9617	130.8093	9	2.6
2010/06/06 03:34:50	31.9429	130.3330	6	2.0	2011/04/10 21:55:54	32.1296	130.3321	4	2.5
2010/06/10 16:27:54	31.3379	130.5661	10	3.0	2011/04/15 11:39:13	31.3685	130.4644	161	4.2
2010/06/19 07:10:27	31.4587	130.9796	69	3.3	2011/04/16 01:55:12	31.4370	130.5418	8	1.8
2010/07/11 12:00:57	31.2454	130.3808	174	4.6	2011/08/01 19:10:00	31.4100	130.5226	8	2.5
2010/07/13 02:37:19	31.7078	130.7689	3	1.4	2011/08/03 02:06:32	31.4733	130.7853	111	4.0
2010/07/13 22:14:48	31.7536	130.7780	3	2.0	2011/08/17 04:36:30	31.7918	130.7176	9	2.0
2010/07/15 21:16:40	31.5618	130.6165	7	1.9	2011/09/22 16:25:34	31.3234	130.5511	10	2.6
2010/07/19 21:03:13	31.5598	130.6400	118	2.4	2011/10/26 06:58:02	31.9851	130.3898	4	4.6
2010/08/25 00:06:27	31.7985	130.7702	6	1.7	2011/11/18 03:47:01	31.2137	130.7439	4	2.7
2010/08/29 04:55:57	31.6693	130.7949	95	2.3	2011/11/24 08:16:19	31.6692	130.9842	94	4.5
2010/09/11 03:11:22	31.4649	130.6268	137	2.5	2012/03/10 19:08:29	31.6142	131.0866	67	4.4
2010/09/14 15:42:07	31.7888	130.7696	120	4.2	2012/03/28 08:29:09	31.6543	130.7816	3	1.9
2010/09/24 05:59:24	31.1763	131.0019	57	3.0	2012/04/21 10:33:02	31.6325	131.0113	69	2.3
2010/09/30 02:55:22	31.2956	130.4823	162	3.7	2012/04/28 20:38:08	31.9307	130.8100	1	2.5
2010/09/30 21:16:15	31.4300	130.5217	6	1.5	2012/05/12 09:38:36	32.0220	130.4281	4	2.2
2010/10/01 20:33:49	31.7609	130.7880	6	1.8	2012/05/22 11:12:30	31.7252	130.9527	85	2.7
2010/10/29 05:42:32	31.3106	131.1132	57	3.4	2012/06/26 17:27:09	32.0945	130.5258	4	3.3
2010/10/31 18:09:58	31.9843	130.3223	4	2.6	2012/08/16 19:38:39	31.6298	130.7851	3	3.0
2010/11/02 14:56:23	31.7852	130.7567	8	1.7	2012/08/25 04:44:34	31.3315	130.5790	6	2.9
2010/11/06 20:02:32	31.7321	130.9873	8	2.2	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	2015/02/09 00:22:03	31.5431	130.5832	123	2.2
2012/09/29 17:12:52	32.1271	130.2041	9	3.0	2015/02/14 05:55:42	31.9037	130.5519	8	2.8
2012/10/18 16:50:31	31.8415	130.7713	7	2.9	2015/02/26 00:30:43	32.0940	130.1650	4	3.2
2012/11/30 13:21:17	32.1385	130.3228	4	2.9	2015/03/09 18:41:35	31.2946	130.5515	8	2.0
2012/12/01 22:56:19	32.1278	130.3268	4	2.3	2015/03/23 08:58:18	31.3756	130.5146	150	4.0
2012/12/04 07:31:07	31.5596	131.0367	67	2.9	2015/03/29 12:23:22	31.4139	130.6173	137	4.4
2013/01/11 16:12:01	31.9645	130.6566	3	2.6	2015/03/30 04:43:20	31.9922	130.4224	4	2.4
2013/04/20 06:35:16	31.2766	130.5424	149	3.9	2015/03/31 05:45:24	31.5537	130.6232	7	2.0
2013/04/20 15:22:29	31.9791	130.3861	4	2.9	2015/03/31 07:27:45	31.5508	130.6217	7	2.9
2013/04/24 14:42:07	31.9826	130.4996	4	2.5	2015/04/04 23:41:35	31.8734	130.6756	182	2.6
2013/05/29 11:02:57	31.9821	130.3909	4	3.4	2015/04/23 05:51:14	31.4643	131.0028	65	3.9
2013/08/31 04:06:44	31.5935	131.1229	69	3.1	2015/05/24 09:09:38	31.2460	130.3785	157	4.3
2013/09/09 07:42:23	31.7859	130.4540	8	2.7	2015/07/26 16:30:48	31.8780	130.5789	164	2.8
2013/09/17 05:09:40	31.1852	130.9534	63	3.6	2015/07/27 01:51:20	31.9702	130.4195	4	3.0
2013/10/15 17:46:42	31.2380	130.4566	159	4.6	2015/08/06 04:33:13	31.5852	130.7987	114	3.0
2013/10/26 01:55:03	31.2176	130.3796	164	3.6	2015/08/15 10:47:30	31.5683	130.6633	1	2.3
2013/11/02 00:18:34	31.2582	130.3910	167	4.3	2015/08/19 04:32:32	31.3934	130.5148	149	3.7
2013/11/30 19:04:19	31.3574	130.4927	158	4.2	2015/09/15 23:11:10	31.8577	130.7262	146	3.1
2013/12/05 18:58:25	32.1274	130.1654	12	2.8	2015/09/22 04:51:43	31.2760	130.4666	150	4.0
2014/01/11 22:01:00	32.0635	130.6771	4	2.3	2015/09/30 16:39:14	31.7602	130.6197	159	2.6
2014/02/16 17:13:58	31.7322	130.8833	8	2.6	2015/10/01 14:05:34	31.4754	130.4903	155	2.5
2014/03/01 17:07:03	32.1373	130.3468	11	2.6	2015/10/03 04:09:57	32.0666	130.1868	5	3.9
2014/03/22 16:24:51	31.2714	130.4444	163	4.0	2015/11/02 08:08:37	31.9052	130.8236	1	2.5
2014/03/22 23:38:50	31.2655	130.5121	8	3.0	2015/11/04 22:45:17	31.4416	130.4720	163	2.6
2014/04/21 13:08:55	31.5047	130.4101	3	2.1	2015/12/17 18:11:18	31.6596	131.0622	3	2.8
2014/05/16 03:59:42	31.5747	131.1422	67	2.9	2016/01/01 11:14:34	31.1916	130.9918	58	3.0
2014/05/23 10:06:02	31.3755	130.5817	5	2.3	2016/01/03 09:07:20	31.7862	130.9144	90	2.6
2014/07/12 20:20:03	31.2926	130.3971	165	4.3	2016/01/19 15:45:59	31.4756	130.5438	140	2.7
2014/08/01 07:38:43	31.8279	130.2691	4	2.1	2016/02/12 04:41:10	31.8283	130.2676	4	2.3
2014/09/10 05:27:14	31.9286	130.8065	1	2.6	2016/02/17 16:50:30	31.5100	130.4633	154	2.5
2014/09/11 22:42:10	31.2067	130.7031	4	3.3	2016/02/27 12:11:02	32.1330	130.5165	4	2.7
2014/10/15 15:39:33	31.3386	131.1236	50	2.8	2016/03/05 10:46:10	31.8072	130.6839	151	2.6
2014/11/02 00:03:59	31.3616	130.4482	172	3.8	2016/03/20 09:11:52	31.2537	130.5840	10	2.6
2014/11/15 05:56:41	31.3698	130.5362	155	3.7	2016/04/14 03:36:14	31.3062	130.3816	172	3.6
2014/12/20 04:01:29	31.2997	130.4447	163	4.0	2016/05/05 02:45:24	31.4865	130.4968	159	2.6
2014/12/26 04:27:25	31.3345	131.1200	56	3.2	2016/05/25 02:22:43	31.7953	130.6302	177	2.8
2014/12/28 22:03:21	31.8530	130.7346	7	2.2	2016/06/04 05:14:03	31.8401	131.1066	73	2.8
2015/02/04 07:29:14	31.2771	130.4994	154	4.4	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	2017/05/02 20:37:53	31.5509	130.5567	157	3.1
2016/07/05 07:49:34	31.3170	130.4022	165	2.7	2017/05/19 15:55:48	31.8020	130.7940	6	3.1
2016/07/13 17:07:45	31.5505	130.5608	156	3.1	2017/06/12 15:53:19	31.6088	130.8631	93	4.1
2016/07/13 20:36:04	31.2784	130.3862	167	3.4	2017/07/02 06:49:31	31.5753	130.9130	77	3.5
2016/07/16 19:01:30	31.5436	130.5075	150	2.9	2017/07/04 15:55:45	31.5816	130.7082	134	3.2
2016/07/19 21:17:19	31.4414	130.4842	162	3.5	2017/07/12 05:13:10	31.4050	130.6242	10	2.0
2016/08/05 21:31:14	31.5575	130.6025	144	3.1	2017/07/18 05:05:21	31.6059	131.0078	73	3.9
2016/08/08 05:10:11	31.6323	130.7860	3	2.1	2017/08/08 17:46:32	31.4859	130.6002	124	3.4
2016/08/17 06:39:02	31.9788	130.3832	3	2.8	2018/01/03 11:39:19	31.3334	130.5116	151	2.7
2016/09/01 01:30:16	31.8290	130.6488	157	2.8	2018/01/09 06:58:26	31.3813	130.6417	4	2.5
2016/10/04 08:23:40	31.7926	130.5479	180	3.4	2018/01/13 11:05:15	31.3812	130.6416	4	2.7
2016/10/16 05:54:02	31.7209	130.5877	157	2.5	2018/01/15 05:05:45	31.3814	130.6416	3	2.5
2016/11/08 18:20:39	31.2516	130.6199	9	2.3	2018/01/17 17:03:00	31.2846	130.4872	162	3.0
2016/11/11 15:11:20	31.8510	130.5604	191	3.0	2018/01/19 12:03:00	31.2561	130.3799	172	3.1
2016/11/18 12:07:34	31.2008	130.8302	8	2.7	2018/01/26 07:12:04	31.3166	130.4269	164	3.1
2016/11/26 07:44:05	31.6434	130.6941	138	4.2	2018/01/27 01:56:16	31.3774	130.4035	159	2.6
2016/12/01 13:28:39	31.7624	130.6053	167	3.4	2018/01/29 04:49:58	31.4615	130.8198	107	3.6
2016/12/12 22:50:00	31.3791	130.7093	73	2.7	2018/01/29 12:11:53	31.4004	130.6179	8	2.7
2016/12/17 12:20:13	32.0109	131.0552	102	4.3	2018/02/03 06:51:40	31.4264	130.4859	161	3.0
2016/12/21 19:02:32	31.7223	130.7376	120	3.9	2018/02/05 11:52:24	32.0165	130.3234	12	3.3
2016/12/25 01:49:22	31.4896	131.2130	53	3.4	2018/02/14 15:04:29	31.2778	130.4141	162	3.4
2017/01/02 12:13:58	31.8126	130.6440	163	2.8	2018/02/15 14:53:52	31.3232	130.4602	164	4.1
2017/01/03 22:49:35	31.8811	130.4111	206	2.7	2018/02/28 04:39:11	31.3270	130.6214	10	2.4
2017/01/07 02:31:09	31.3962	130.6175	8	2.7	2018/02/28 07:50:18	31.2854	130.4996	148	2.9
2017/01/10 00:28:03	31.3155	130.4284	172	2.5	2018/03/15 20:59:44	32.0845	130.9954	111	2.9
2017/01/12 13:39:16	31.1485	130.8846	61	3.2	2018/03/21 12:45:25	31.4050	130.4717	158	2.0
2017/01/18 07:23:21	31.8417	131.2583	63	3.4	2018/03/24 01:36:48	31.4083	130.5160	159	3.1
2017/01/22 11:06:41	31.8535	130.5320	185	3.5	2018/03/25 03:38:53	31.3284	130.6233	6	2.2
2017/01/31 16:28:53	31.3920	130.6214	8	2.5	2018/03/26 20:14:00	31.3125	130.4194	164	2.5
2017/02/10 19:02:48	31.3909	130.6145	6	2.5	2018/04/02 23:54:10	31.3672	130.3669	178	3.1
2017/02/11 10:02:07	32.0342	131.0868	101	4.4	2018/04/05 04:14:42	31.3962	130.6206	7	2.3
2017/02/23 06:47:51	31.9856	130.4201	4	3.1	2018/04/07 02:00:10	31.4146	130.5020	162	3.1
2017/03/07 01:05:23	31.6815	130.3961	174	2.5	2018/04/08 13:54:27	31.3261	130.6145	8	2.7
2017/03/07 05:36:04	31.7858	130.7824	119	3.3	2018/04/11 10:00:30	31.2867	130.4453	159	2.6
2017/03/11 21:10:25	31.3861	130.6221	11	4.1	2018/04/24 20:33:59	32.0382	130.8474	148	2.9
2017/03/12 05:03:48	31.7690	131.0077	91	3.4	2018/04/26 01:02:31	31.7145	131.0621	12	2.3
2017/03/19 21:56:58	31.2597	131.1122	56	3.0	2018/05/03 08:10:49	31.8542	130.7951	133	3.3
2017/03/22 19:44:08	31.5910	130.7350	129	3.8	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	2019/01/01 12:22:15	31.5983	130.5266	11	1.9
2018/05/07 21:40:20	32.1500	130.1417	12	2.0	2019/01/11 03:49:25	31.7333	130.7700	8	1.7
2018/05/24 18:59:32	31.6438	130.4335	200	3.0	2019/01/17 04:06:11	31.4133	130.5350	151	1.6
2018/05/24 20:41:46	31.9862	131.0019	108	2.8	2019/01/17 20:00:52	31.6133	130.6066	141	1.8
2018/05/25 17:43:11	32.0502	131.0612	82	2.9	2019/01/27 15:54:17	31.7250	130.6166	158	1.8
2018/05/26 19:21:03	31.4033	130.4233	153	2.0	2019/02/14 02:40:19	31.4050	130.4533	147	1.6
2018/06/03 14:12:18	31.3937	130.6234	9	2.4	2019/02/25 18:12:38	31.8483	130.8300	8	1.8
2018/06/22 20:45:38	31.2923	130.5267	148	3.0	2019/02/26 21:21:39	31.8016	130.8700	110	1.8
2018/06/27 20:47:47	31.9242	130.6758	176	4.2	2019/03/01 14:19:24	31.8816	130.7250	142	1.9
2018/06/30 17:11:08	31.3283	130.6275	9	2.4	2019/03/05 07:52:54	31.4266	130.4866	146	1.6
2018/07/09 21:17:20	31.8794	131.1402	3	2.2	2019/03/10 03:06:25	31.6400	130.6733	133	1.9
2018/07/16 04:43:31	31.4051	130.6223	4	2.2	2019/03/10 15:43:06	31.8416	130.6900	9	2.8
2018/07/26 13:22:01	31.3996	130.4691	163	3.0	2019/03/13 00:53:02	31.7983	130.6733	150	1.6
2018/07/31 23:42:58	31.2948	130.4525	162	2.8	2019/03/18 03:29:23	31.5066	130.4966	151	1.7
2018/08/26 21:58:19	31.4838	130.7324	118	2.8	2019/03/20 20:10:15	31.7483	130.7700	113	1.7
2018/09/03 04:13:02	31.3080	130.4283	168	2.9	2019/03/22 07:43:05	31.8416	130.6933	9	2.2
2018/09/03 08:18:23	31.2517	130.3950	155	2.3	2019/03/23 08:18:33	31.5333	130.7483	115	1.9
2018/09/05 04:53:04	31.4481	130.6586	130	3.5	2019/03/24 04:55:55	31.4733	130.4050	165	1.9
2018/09/07 23:25:01	31.9316	130.8535	1	2.4	2019/04/02 13:17:58	31.8400	130.6950	9	1.7
2018/09/18 05:07:12	31.9359	130.8003	1	2.4	2019/04/06 02:01:14	31.5083	130.5533	9	2.1
2018/09/22 10:40:54	31.2564	130.3824	165	3.5	2019/04/23 09:46:53	31.8633	130.7516	140	1.8
2018/09/23 15:46:19	31.3724	130.4284	157	2.8	2019/05/07 15:07:47	31.8433	130.7000	9	1.9
2018/09/25 01:05:17	31.9783	131.3850	55	2.8	2019/05/08 13:08:50	31.5616	130.5366	148	1.6
2018/09/25 21:29:32	31.6150	130.5450	164	2.1	2019/05/20 23:13:47	31.6216	130.4400	182	1.9
2018/09/25 23:37:51	31.4454	130.4584	160	2.7	2019/05/24 12:47:27	31.4416	130.4966	155	2.7
2018/10/02 09:04:46	31.9384	130.8064	2	2.5	2019/06/14 09:52:28	31.8650	130.7000	8	2.4
2018/10/12 14:49:31	31.3116	130.3806	166	2.6	2019/06/15 16:26:56	31.4983	130.5083	164	2.0
2018/10/25 14:36:39	31.2715	130.3980	168	3.6	2019/06/20 19:22:33	31.6666	130.4100	200	2.6
2018/10/26 17:45:34	31.2391	130.6541	123	4.6	2019/06/25 22:25:27	31.8683	130.6983	8	2.0
2018/10/30 18:10:45	31.8173	131.0169	93	2.9	2019/07/14 16:53:18	31.5283	130.7583	117	1.5
2018/11/19 04:42:43	31.4233	130.5983	133	1.5	2019/07/30 03:44:49	31.4400	130.6783	125	1.9
2018/11/20 23:09:01	31.5000	130.7066	119	2.3	2019/08/04 05:13:19	31.5683	130.5750	152	1.5
2018/12/07 06:59:07	31.5416	130.7450	119	1.5	2019/08/06 00:43:16	31.8300	130.6400	163	2.1
2018/12/08 08:44:18	31.5066	130.5033	7	2.0	2019/08/10 16:56:29	31.7700	130.9700	81	1.5
2018/12/15 06:24:39	31.7966	130.5433	187	1.7	2019/08/14 11:18:20	31.8266	130.9033	96	2.1
2018/12/27 03:25:38	31.4950	130.4633	152	1.5	2019/08/17 20:21:00	31.8533	130.8050	8	2.0
2018/12/27 20:23:24	31.6350	130.7200	131	1.7	2019/08/19 12:35:50	31.6833	130.5233	174	2.3
2018/12/30 09:03:14	31.6283	130.7700	6	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	2020/03/04 17:30:37	31.9067	130.6517	160	2.8
2019/09/15 00:26:37	31.8650	130.7483	133	2.1	2020/03/05 02:08:37	31.3450	130.4117	163	2.7
2019/09/24 11:26:34	31.8366	130.6616	150	2.0	2020/03/08 06:44:54	31.3100	130.5750	7	2.1
2019/09/26 20:38:58	31.4533	130.4916	160	1.5	2020/03/09 12:08:08	31.3417	130.3983	164	2.1
2019/10/16 21:13:31	31.4233	130.6083	8	2.2	2020/03/10 04:14:07	31.3067	130.5717	10	1.5
2019/10/18 03:58:31	31.4233	130.6066	7	1.5	2020/03/12 03:27:15	31.4200	130.5467	148	2.2
2019/10/26 05:27:52	31.5683	130.7233	124	2.7	2020/03/12 19:36:33	31.3117	130.5717	6	1.5
2019/11/05 18:53:49	31.5450	130.6433	123	2.0	2020/03/19 22:40:42	31.3383	130.6200	6	1.5
2019/11/18 15:19:28	31.5333	130.5450	151	1.7	2020/03/22 12:25:28	31.5600	130.6250	7	2.0
2019/11/19 22:10:24	31.4016	130.4566	164	2.3	2020/03/22 13:42:05	31.3033	130.2800	181	2.7
2019/11/26 06:11:43	31.5716	130.5466	160	1.8	2020/03/24 22:37:18	31.2550	130.3533	164	2.1
2019/12/02 16:00:24	31.4400	130.6533	133	1.7	2020/03/25 02:50:21	31.3500	130.4933	151	3.1
2019/12/08 15:58:07	31.4916	130.4350	164	2.0	2020/03/26 03:03:38	31.5617	130.6233	6	1.6
2019/12/12 02:31:22	31.7716	130.6066	171	1.8	2020/03/27 20:14:57	31.2967	130.2817	177	2.3
2019/12/19 17:41:26	31.5016	130.4166	6	1.6	2020/03/28 07:35:32	31.8250	130.2150	10	2.0
2019/12/22 12:07:48	31.4133	130.9033	68	2.1	2020/04/06 21:40:41	31.3583	130.5483	6	1.6
2019/12/22 15:19:26	31.8450	130.6933	7	1.5	2020/04/14 12:52:19	31.3083	130.4400	155	2.3
2019/12/23 02:12:03	31.8450	130.7000	9	2.1	2020/04/14 20:04:32	31.0617	130.3133	150	2.2
2020/01/02 03:13:31	31.4117	130.6900	117	2.4	2020/04/18 10:13:37	31.3383	130.6117	7	1.5
2020/01/07 17:25:55	31.4117	130.5417	147	2.6	2020/04/30 10:59:30	31.2600	130.4300	160	3.0
2020/01/16 09:10:32	31.7750	130.7350	9	1.9	2020/05/05 16:15:32	31.2900	130.4017	160	2.1
2020/01/16 18:50:15	31.3500	130.3733	155	2.1	2020/05/05 17:50:00	31.3083	130.4150	155	2.1
2020/01/17 18:44:56	31.2983	130.3850	161	2.6	2020/05/16 18:17:52	31.3400	130.6250	7	1.6
2020/01/19 14:33:11	31.4083	130.4683	167	2.1	2020/05/27 14:00:43	31.3433	130.5167	143	2.3
2020/01/23 04:50:42	31.5350	130.4883	168	2.2	2020/06/05 14:09:25	31.2567	130.4233	159	2.1
2020/01/25 07:07:53	31.4583	130.6067	8	1.5	2020/06/12 12:43:17	31.4117	130.7783	83	1.6
2020/01/26 02:19:34	31.2467	130.8533	90	1.5	2020/06/16 13:39:55	31.3733	130.4383	158	2.6
2020/01/28 02:58:13	31.8767	130.6950	6	1.5	2020/06/16 13:48:34	31.3667	130.4600	161	2.2
2020/01/29 06:12:25	31.6417	130.7633	5	2.1	2020/06/27 09:03:43	31.3467	130.4400	159	2.5
2020/02/10 14:03:46	31.9433	130.8083	1	2.3	2020/06/27 19:32:06	31.2433	130.6317	9	1.8
2020/02/14 02:00:58	31.8733	130.7067	8	1.6	2020/07/04 06:50:36	31.4183	130.5633	10	1.5
2020/02/14 02:51:22	31.5717	130.5900	11	1.5	2020/07/10 21:42:50	31.3900	130.5217	144	2.1
2020/02/17 08:55:00	31.8233	130.2117	11	2.0	2020/07/23 01:45:42	31.3317	130.6150	7	1.7
2020/02/22 00:22:22	31.3117	130.5750	9	3.3	2020/07/24 05:07:10	31.3617	130.4533	155	2.1
2020/02/22 16:14:26	31.3100	130.5733	7	1.6	2020/07/24 09:49:33	31.2883	130.5133	145	2.4
2020/02/22 17:44:01	31.3067	130.5717	10	1.6	2020/07/28 00:11:08	31.3950	130.4367	7	1.9
2020/02/24 15:00:12	31.3100	130.5767	7	2.2	2020/08/07 02:49:14	31.4750	130.4500	162	2.3
2020/03/04 04:48:47	31.6983	131.1433	59	1.7	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	2021/01/17 09:16:15	31.3183	131.1650	52	1.8
2020/08/15 05:31:32	31.2667	130.4200	159	2.1	2021/01/20 03:09:23	31.4983	130.4183	5	1.7
2020/08/19 13:37:42	31.2867	130.4700	151	2.6	2021/01/24 06:16:06	31.8333	130.7983	5	1.9
2020/08/22 04:57:23	31.4150	130.5600	9	1.5	2021/01/28 02:47:01	31.5483	130.0650	6	2.0
2020/08/22 18:28:58	31.2983	130.3450	167	3.3	2021/02/06 02:44:15	31.1900	131.2767	44	1.5
2020/09/06 12:57:53	31.1883	130.8967	58	2.0	2021/02/12 12:23:06	31.9766	131.0200	102	2.5
2020/09/11 17:27:25	31.8250	130.2183	10	1.8	2021/02/15 10:29:42	31.4550	130.6933	92	1.6
2020/09/15 15:15:23	31.3367	130.4017	165	2.4	2021/02/21 23:27:55	31.9950	130.2616	10	2.7
2020/09/23 20:06:22	31.8483	130.7067	7	2.0	2021/03/01 22:32:52	31.3250	130.6183	8	2.4
2020/09/28 19:19:35	31.3317	130.6150	9	1.8	2021/03/03 11:37:13	31.3300	130.6183	9	2.5
2020/09/29 05:04:02	31.5150	130.5500	154	2.5	2021/03/10 09:07:26	31.6600	130.7683	4	3.1
2020/10/01 11:22:08	31.3333	130.6200	8	2.3	2021/03/11 05:14:42	31.6067	130.0700	8	2.0
2020/10/02 05:46:04	31.2717	130.7050	108	1.8	2021/03/12 20:22:09	31.8467	130.7150	9	1.9
2020/10/05 01:49:14	31.8983	130.6817	165	3.3	2021/03/15 19:31:24	31.3300	130.6200	6	2.8
2020/10/06 10:55:40	31.3150	130.3767	158	2.1	2021/03/27 19:24:08	31.4133	130.5633	9	1.9
2020/10/08 00:23:55	31.1017	130.8033	6	2.0	2021/04/02 06:38:28	31.7350	130.5216	8	2.8
2020/10/24 01:54:39	31.6667	130.7350	7	1.9	2021/04/05 13:39:49	31.8250	130.2150	10	1.5
2020/10/24 10:23:45	31.5417	130.0633	6	2.2	2021/04/05 21:35:57	31.6700	130.1400	10	1.5
2020/10/24 11:04:20	31.5617	130.6317	30	1.5	2021/04/19 03:36:19	31.5050	130.6083	11	1.6
2020/10/25 15:43:42	31.3900	130.6200	10	2.3	2021/04/27 05:27:59	31.3250	131.2817	47	1.8
2020/10/30 05:10:56	31.3283	130.6166	6	2.9	2021/04/28 18:49:57	31.2650	130.5933	5	1.7
2020/10/31 22:36:44	31.5733	130.3300	8	2.9	2021/04/29 04:55:10	31.2800	130.4300	154	2.5
2020/11/05 08:15:03	31.5700	130.3383	9	1.6	2021/05/29 05:14:12	31.6983	130.5017	164	2.2
2020/11/06 21:06:25	31.3117	130.5517	7	1.6	2021/06/06 01:40:58	31.7150	131.0450	67	2.0
2020/11/14 10:19:55	31.9283	131.1350	70	2.5	2021/06/16 21:46:52	31.8833	131.1883	66	2.5
2020/11/26 09:15:51	31.5167	130.0733	3	2.3	2021/07/09 06:04:58	31.5867	130.0867	9	2.1
2020/11/27 09:33:23	31.3066	130.4683	154	2.5	2021/07/12 10:40:24	31.3917	131.2950	46	1.6
2020/11/29 13:26:22	31.5383	130.0617	5	2.1	2021/07/19 22:32:21	31.5000	130.4167	5	1.7
2020/12/01 09:09:24	31.3033	130.5833	9	1.5	2021/07/27 08:32:12	31.2900	130.7200	111	3.1
2020/12/10 12:47:12	31.4083	131.2883	46	2.6	2021/07/29 18:31:24	31.3600	130.5483	7	1.5
2020/12/19 05:09:59	31.4000	130.6083	9	2.2	2021/07/29 22:31:39	31.7133	131.1517	59	1.6
2020/12/25 23:21:57	31.4983	130.5700	5	2.6	2021/08/08 08:49:01	31.2450	130.6150	8	3.5
2020/12/31 15:31:13	31.4317	130.6167	8	1.7	2021/08/08 18:59:55	31.6900	130.1667	7	1.5
2021/01/01 07:35:07	31.7417	131.1117	6	1.6	2021/08/12 04:17:24	31.1917	130.1867	7	2.0
2021/01/08 06:03:39	31.5700	130.6150	6	1.6	2021/08/12 09:53:44	31.5633	130.5800	9	1.7
2021/01/09 06:57:10	31.8617	131.0233	75	1.7	2021/08/12 19:26:41	31.2866	130.3650	158	2.5
2021/01/14 22:06:23	31.3983	130.6083	7	2.4	2021/08/13 14:59:12	31.2617	130.6350	7	2.1
2021/01/15 04:04:01	31.8283	131.0817	9	1.5	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	2022/03/12 04:44:09	31.7783	130.7917	9	1.5
2021/08/30 03:55:34	31.6517	131.0633	63	1.6	2022/03/20 12:59:23	31.7700	130.7900	7	1.6
2021/08/31 09:50:46	31.8433	130.9933	76	2.8	2022/03/29 07:01:47	31.5700	131.0400	67	1.6
2021/09/06 02:21:28	31.2600	131.0683	53	2.0	2022/03/29 08:09:54	31.9900	130.9933	104	1.7
2021/09/08 23:50:53	31.3967	130.6267	7	1.5	2022/03/31 21:43:31	31.5500	130.7133	119	1.9
2021/09/09 03:56:52	31.7600	131.0383	76	1.6	2022/04/16 18:31:28	31.9050	130.9733	13	1.7
2021/09/10 01:26:18	31.4683	130.5700	5	2.9	2022/04/30 11:16:37	31.9750	130.9267	6	2.6
2021/09/11 12:04:01	31.3117	130.5750	9	1.9	2022/05/18 11:07:29	31.7367	130.9383	88	2.3
2021/09/17 02:54:13	31.2700	130.3800	161	3.3	2022/05/23 01:54:04	31.3983	130.6267	9	1.8
2021/09/25 05:17:37	31.6383	130.9667	88	1.9	2022/06/07 09:37:21	31.2167	130.6333	113	2.0
2021/09/28 05:25:35	31.8233	130.9217	99	1.9	2022/06/08 11:09:36	31.9750	130.5150	8	2.1
2021/09/30 05:58:17	31.3150	130.4466	157	2.8	2022/06/15 14:30:39	31.3383	130.7833	4	1.8
2021/10/19 20:52:58	31.8617	131.0383	10	1.6	2022/06/18 22:55:16	31.9333	131.0267	6	1.5
2021/10/30 19:18:47	31.3300	130.4283	152	2.7	2022/06/29 18:27:45	31.3283	130.9400	68	3.0
2021/11/03 23:13:18	31.7683	130.7883	9	2.0	2022/07/05 09:49:36	31.9283	130.8900	1	1.6
2021/11/09 21:10:29	31.3266	130.4250	164	2.7	2022/07/10 22:29:07	31.5983	130.7583	3	2.0
2021/11/20 06:42:14	31.2283	130.6800	11	1.6	2022/07/19 20:55:54	31.2033	130.8150	7	2.0
2021/11/21 16:07:15	31.8933	129.2700	5	1.8	2022/08/15 02:12:38	31.4717	130.5667	6	1.8
2021/11/22 02:19:12	31.4183	130.9100	87	1.5	2022/09/17 06:30:50	31.3983	130.6200	119	1.6
2021/11/26 17:04:23	31.6083	130.7750	4	1.5	2022/09/22 06:19:52	31.9250	131.0133	9	1.8
2021/11/27 06:01:17	31.6267	130.7767	4	3.2	2022/09/26 08:17:27	31.8017	130.9150	83	1.6
2021/11/29 07:13:54	31.9400	130.8116	1	3.3	2022/10/12 17:39:24	31.8033	131.0367	73	1.8
2021/12/07 14:57:12	31.3783	130.5900	2	2.2	2022/10/30 23:41:00	31.0583	130.7433	69	2.0
2021/12/09 14:59:47	31.3350	130.5000	154	2.9	2022/11/15 06:15:49	31.8033	131.0867	68	1.6
2021/12/18 22:56:39	31.8583	130.9433	94	1.6	2022/12/08 22:29:55	31.3033	130.6933	9	4.1
2021/12/18 23:45:48	31.9700	130.4800	9	2.8	2022/12/23 04:49:23	31.5716	130.6783	28	2.9
2021/12/29 15:36:24	31.4767	130.5883	7	1.5	2023/01/28 19:13:51	31.8217	130.2783	10	2.0
2022/01/17 11:13:50	31.3833	130.7183	110	3.0	2023/02/18 22:50:22	31.4267	130.2750	190	2.8
2022/01/18 01:28:33	31.3100	130.6083	9	1.6	2023/04/04 09:11:34	31.9550	131.0250	97	2.8
2022/01/29 12:37:18	31.1850	130.6033	115	2.7	2023/04/21 14:09:47	31.2633	130.3950	160	3.9
2022/01/31 18:05:40	31.8533	130.8267	1	1.5	2023/05/09 19:25:00	31.3067	130.6867	4	2.2
2022/02/14 04:03:33	31.6300	130.9650	7	3.4	2023/06/27 23:28:03	31.6817	130.7617	6	2.0
2022/02/18 10:28:13	31.3400	130.5550	10	2.2	2023/07/11 16:12:32	31.5633	130.6517	138	2.0
2022/02/26 01:15:08	31.6817	130.9767	71	1.6					

(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

(1) - 2 - 1 はじめに

始良カルデラの地下深部における地下構造変化の検出手法を検討することを目的として、令和5年度は基礎実験として長期連続反射法探査の発振坑に関する実験を実施した。

長期連続反射法探査は人工地震波を地下に放射することによって始良カルデラの地下深部で生ずる地震反射波をとらえ、その地震反射波の振幅・走時等の変化を継続的に長期間追跡することによって始良カルデラの火山活動に伴うマグマの変化を知ることが狙っている。火山活動に伴う地震反射波の変化に関する先行研究例としては、Tsutsui et al. (2016)が桜島の火山活動に伴う地震反射強度の変化を検出するとともにその変化が地下のマグマの状態変化で説明できることをすでに報告している。

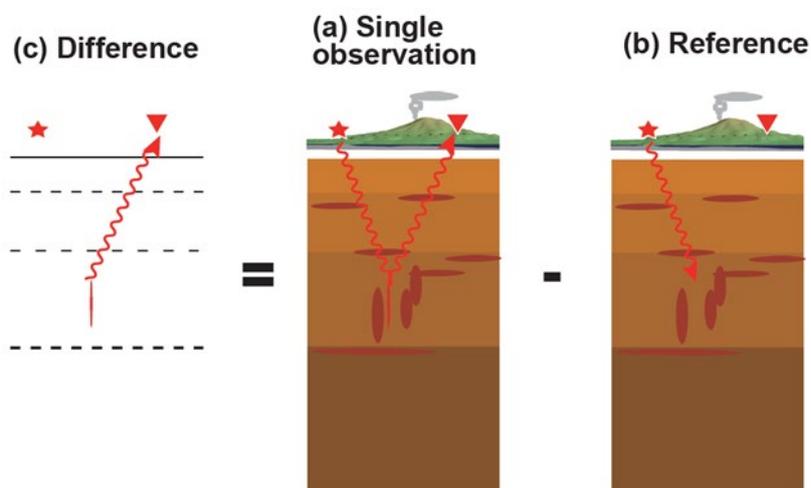


図1 地震反射波による地下構造変化検出の模式図。aは1回分の観測波形を示し、bは参照波形を、cは両者の差の差分波形に相当する概念をそれぞれ示す。

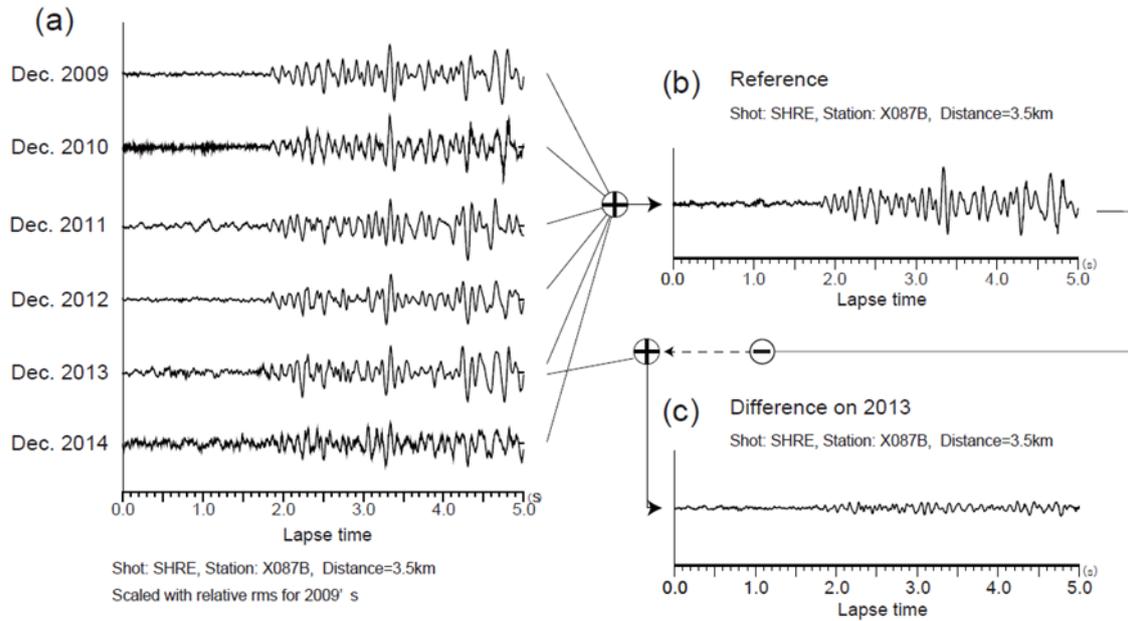


図2 Tsutsui et al. (2016)における地震反射波変化検出例。a は同一の観測点におけるそれぞれの年における発振の観測波形を示し、b は a を重ねて得られた参照波形を示す。c は 2013 年の観測波形の参照波形との差分波形を示す。

本項目のロードマップを図 1 に示す。本項目では令和元年度に準備調査を実施し（京都大学防災研究所, 2020）、最適な震源装置とその能力に関する予備調査を実施し推奨されるエアガンの構成と能力を検討する一方、既存の人工地震観測記録における後続相の検討を行い始良カルデラ深部の地震波反射面の存在を確認した。ひきつづき令和 2 年度は前年度に行った調査結果の検証を行うとともに、新たに設置した振源と受振点の位置関係において始良カルデラ深部からの地震反射波の検討を行い、さらには長期連続反射法の実装に向けた情報を収集した（京都大学防災研究所, 2021）。令和 3 年度は諸般の事情から基礎実験の準備のみを実施した（京都大学防災研究所, 2022）。令和 4 年度は令和 2 年度に実施された発振条件のうち、最適と判断された発振条件を採用して同一地点で発振を行い観測波形の再現性を検証した（京都大学防災研究所, 2023）。

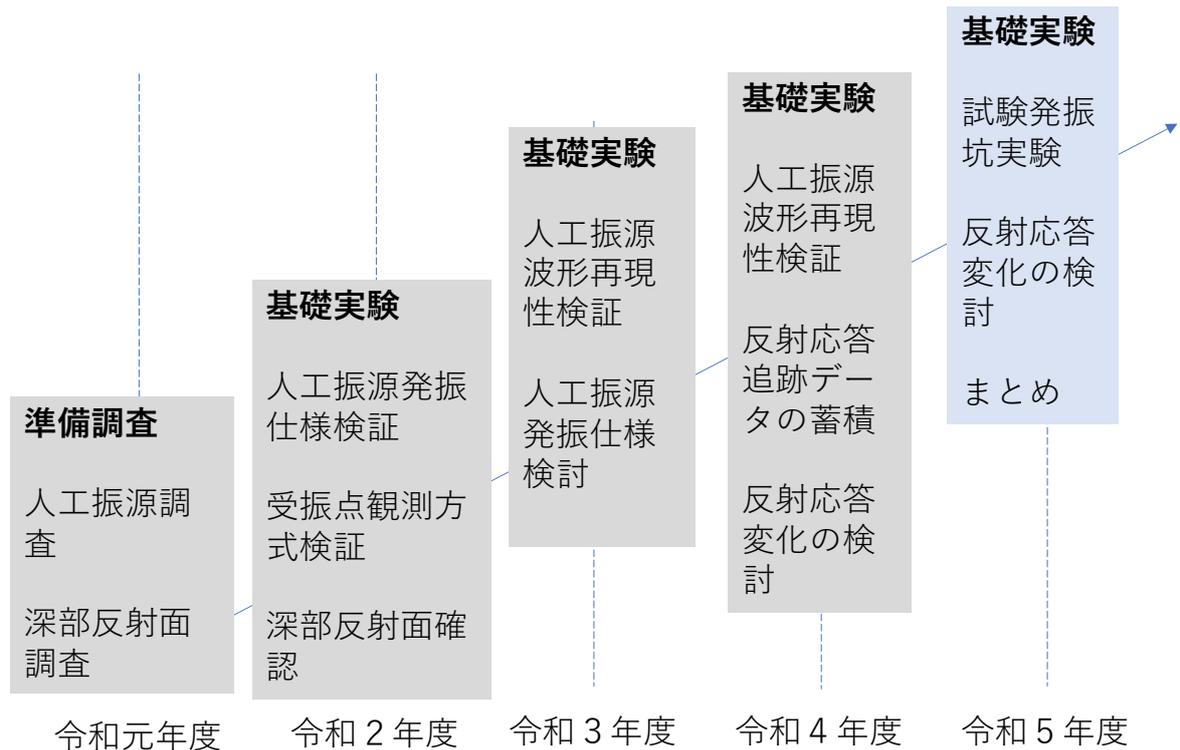


図3. 長期連続反射法探査の検討のロードマップ

(1) - 2 - 2. 令和5年度基礎実験の実施

本項目では令和4年度までの基礎実験で振源に関して次のようなことが明らかになった（京都大学防災研究所、2021；2022；2023）。

長期連続反射法の振源として、波形再現性の高いエアガンが有効な振源装置であると考えられた（京都大学防災研究所、2020）。実際に発振実験を実施してエアガンの有効性を確認した。既存の農業用貯水池を利用した場合、1050 cui，エアガン深度（Tow depth）10 m，動作圧 2000 psi のエアガンを発振することによって、始良カルデラをはさんだ振源距離 20 km の地点で後続相まで含めて十分な品質の記録を得ることができることが明らかにされた（京都大学防災研究所、2021）。エアガンを振源装置として用いることで単一観測ラウンド内での高い波形再現性が得られたことと、振源近傍で取得された波形による振源効果除去が可能であることが明らかになった（京都大学防災研究所 2021，2023）。これらのことはエアガン振源を用いることで始良カルデラの地下構造に対して入力される振源波形の同一性が確保されるという基礎的な条件が満足できることを示している。

また基礎実験を実施してゆく中で問題点も明らかになった。既存の貯水池を反復利用した場合、水門などの貯水池設備への影響が懸念されること、もともとの貯水池の管理目的とは別に発振波形維持を目的とした貯水池水位管理が不可能であることや、貯水池近隣への騒音など社会的な問題が表面化し、高頻度化には障壁となることが判った（京都大学防災研究所、2023）。

専用の発振水槽を手に入れることが出来れば上で述べた問題点のうち2つは完全に解消できることから、令和5年度は試験発振坑を作成してそのなかでの試験発振を試みることになった。試

験坑で実施したエアガンの発振を観測し、連続的な陸上発振が可能な発振点に関する基礎データと発振オペレーションのノウハウを得ることを目的とした。

試験発振坑での発振実験によって以下の情報を得ることとした。

- ・試験発振坑の設計に関する情報
- ・試験発振坑を用いた発振の振源特性

試験発振坑は京都大学防災研究所附属火山活動研究センター黒神観測室構内に建造し、黒神試験発振坑（または試験発振坑）、略称を KURP と呼ぶことにする（図 4）。



図 4 黒神試験坑の位置

a. 試験発振坑の設計

- ・設計の基礎データと応力計算

試験坑内に満たされた水中のエアガン発振では狭小空間の中で高压ガスを解放するため、試験発振坑の壁面は十分な強度を与える必要がある。必要な強度の推定を次のように行った。

円筒内の過剰圧 P によって円筒壁面の周方向に生ずる引っ張り応力 σ_{θ} は竹内(1969)によれば下式で算出することができて、工学分野でフープ応力と呼ばれている。ここに R_1 は内壁半径、 R_2 は外壁半径(内壁半径+壁厚)とする。

$$\sigma_{\theta} = \frac{(R_1^2 + R_2^2)}{(R_2^2 - R_1^2)} P$$

ここでエアガンの発振の衝撃圧は京都大学防災研究所(2021; 2023)によって測定が行われ、 $0.8\text{MPa}\cdot\text{m}$ であった。円筒の内半径を 1.25m 、円筒の外半径を 1.55m とすれば円筒壁に作用する過剰圧は 0.68MPa で、それによって生ずる引っ張り応力は 2.5MPa である。

一般にコンクリートの圧縮強度は 21 から 24MPa とされているが、引っ張り強度はその $1/10$ 以下である。エアガン発振に伴う引っ張り応力に持ちこたえるためには鉄筋による補強が必要である。直径 16mm の鉄筋(引っ張り強度 440MPa 、JIS G 3112 規格)を用いた場合、少なくとも 9cm 間隔で鉄筋を並べる必要がある。

以上の計算を勘案して試験発振水槽の設計がなされた。全体図と配筋構成を図5に示す。

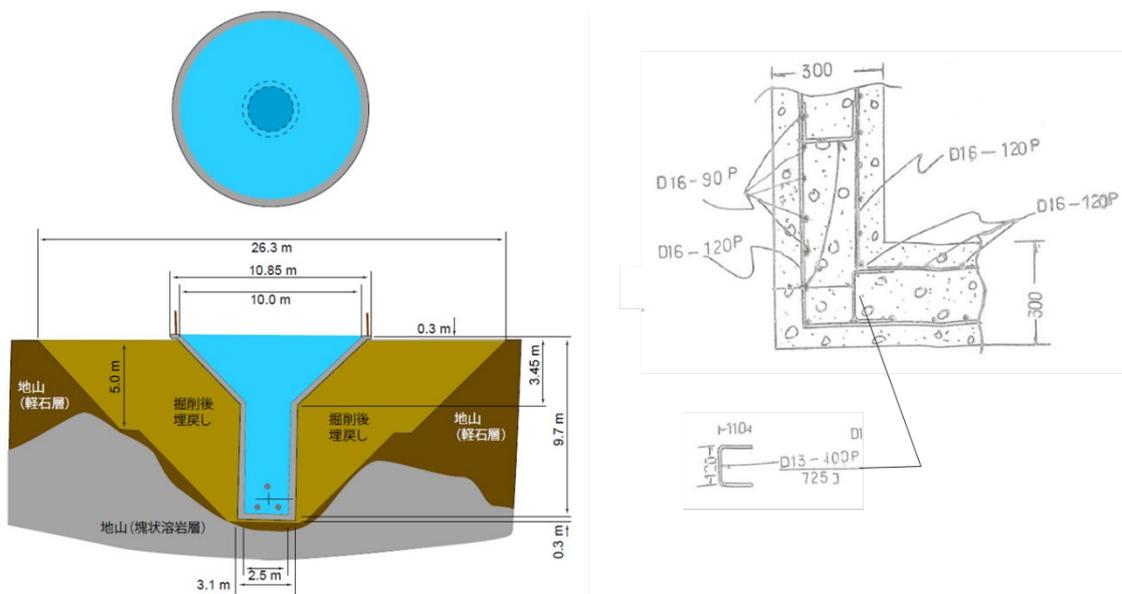


図5 試験発振坑全体と配筋

試験発振坑の全体形状は漏斗形である。縦断面を漏斗形にすることで発振後の気泡の上昇にともなう一時的な水位上昇の影響を小さくすることを狙った。試験発振坑底の深さはその縁から 9.7m で直径 2.5m の円筒形の壁で囲まれている。坑底から 6.25m 高以上では坑壁は円錐面となって広がり試験坑の縁で直径 10m となる形状にした。先述の強度計算を考慮して試験発振坑の坑壁は直径 16mm の鉄筋を 9cm 間隔の格子状に組んだ厚さ 30cm の鉄筋コンクリートとした。

b. 試験発振坑の建造

工程の概略を表1に示す。各種許認可手続きを経て掘削工事に着手したのは9/21のことであった。掘削が5mに達したのは9/28で、予定深度の10mに達したのは9/30のことであった。掘削に伴って桜島火山の噴出物で構成される地層の露頭が表れた。

表1 工程概略

掘削開始から10日目：掘削
13日目～83日目：構体建造
85日目～86日目：湛水作業

詳細な地質記載は付録1に記述するが、掘削地点の地質の概要を以下に述べる。地表から3m深までは黒神観測室敷地造成時の盛り土と火山灰性土壌を挟在する桜島火山由来の軽石層（大正軽石、安永軽石、文明軽石）が卓越した「ボラ」と呼ばれる未固結土質で、それ以深はボラの中に安山岩質溶岩塊が混在していた。安山岩質溶岩塊はその出現層序より天平宝字噴火の際に噴出した溶岩流の最上部であろうと考えられる。掘削深度は全面的にボラ（未固結軽石層）主体の地層で構成されているため、法面角度を45度に抑えねばならず最終的に直径26mの倒立円錐台形の掘削を行い掘削土量は3000立方メートルに達した。建造作業全般の写真を付録2に示す。

掘削が予定深度に達した後、10/3より発振坑本体の建造が始まった。発振坑本体の建造は呼び強度24MPaのコンクリートを用いて、下地コンクリート打ち、鉄筋組み、型枠配置、コンクリート打設、型枠外し、発振坑周囲埋め戻し転圧、コンクリート接合面清掃、のサイクルで5回に分けて行われた。発振坑最下段（底から1.8m高まで）の壁面のコンクリート打設は10/19、下から2段目（1.8m～3.6m高まで）の壁面のコンクリート打設は10/24であった。

全てのコンクリート打設が完了した後にステップの取り付けが行われた。最終的に試験発振坑ができあがったのは12/12であった。その後湛水作業が12/14-15の2日間に4t散水車2台のピストン輸送で行われ、12/15午後5時には総水量177m³の湛水が完了した。コンクリート打設から発振実施までは最下段で63日後、下から第二段で46日後であった。

実験前の12/7-8に坑内観察の目印としてマーカーペイントを坑底から0.7m高に東西南北の4箇所と、エアガンに最も接近したジョイントである1.8m高に施した。さらに水位判別の目安としてステップにも付番を施した。ステップの状況を下表に整理する。

表2 ステップ位置

ステップ 番号	水位読み <ステップ 根元底からの高さ > (m)	ステップ根 元深度(m: 縁基準)	ステップ先端 深度 (m: 縁基 準)	縁からの 深度 (m)	実施後亀 裂有無 (231222)	固定状況 (231222, 231225)
33	9.60	0.10	-0.03			
32	9.39	0.31	0.18			
31	9.18	0.52	0.40			
30	8.96	0.74	0.61			
29	8.75	0.95	0.82			
28	8.54	1.16	1.03			
27	8.33	1.37	1.25			
26	8.12	1.58	1.46			
25	7.90	1.80	1.67			
24	7.69	2.01	1.88			
23	7.48	2.22	2.09			
22	7.27	2.43	2.31			
21	7.05	2.65	2.52			
20	6.84	2.86	2.73			
19	6.63	3.07	2.94			
水位計セン サー	6.50	3.20				
18	6.42	3.28	3.15			
17	6.21	3.49	3.37			
16	5.99	3.71	3.58			
15	5.90	3.80	3.80	3.80		
14	5.50	4.20	4.20	4.20		
13	5.10	4.60	4.60	4.60		
12	4.70	5.00	5.00	5.00		
11	4.30	5.40	5.40	5.40	有	
10	3.90	5.80	5.80	5.80	有	
9	3.50	6.20	6.20	6.20	有	
8	3.10	6.60	6.60	6.60	有	
7	2.70	7.00	7.00	7.00	有	ややゆるい
6	2.30	7.40	7.40	7.40	有	抜けかけ
5	1.90	7.80	7.80	7.80	有	
4	1.50	8.20	8.20	8.20	有	
3	1.10	8.60	8.60	8.60	有	
エアガン中心	1.00			8.70		
2	0.70	9.00	9.00	9.00	有	ゆるみ
1	0.30	9.40	9.40	9.40	有	

試験坑の周囲には防護用のフェンス枠を設置したが、保安度を高めるために実験中には

野生動物の転落および不用意な立ち入りを避けるための防護網を側面に巡らした。さらに実験終了後には鳥類の転落を防ぐためフェンス上端を覆うような防護網も追加設置した(図6)。



図6 発振実験終了後

c. 試験発振の概要

試験発振には京都大学防災研究所(2023)の実験と同じ個体の1500LL型エアガン(Teledyne BOLT社製)350 cui×3を、坑底から1mの位置に懸架して用いた(図7)。エアガン懸架には25tラフタークレーンを用い、坑内での位置決めは底面のそれぞれ東西南北に設けたアンカーに通したロープを用いた。作業用の足場として京都大学防災研究所(2022)で用いた6m四方の足場を用いた。なお、この足場で作業可能な最低水位は坑底から8.9m高であった。

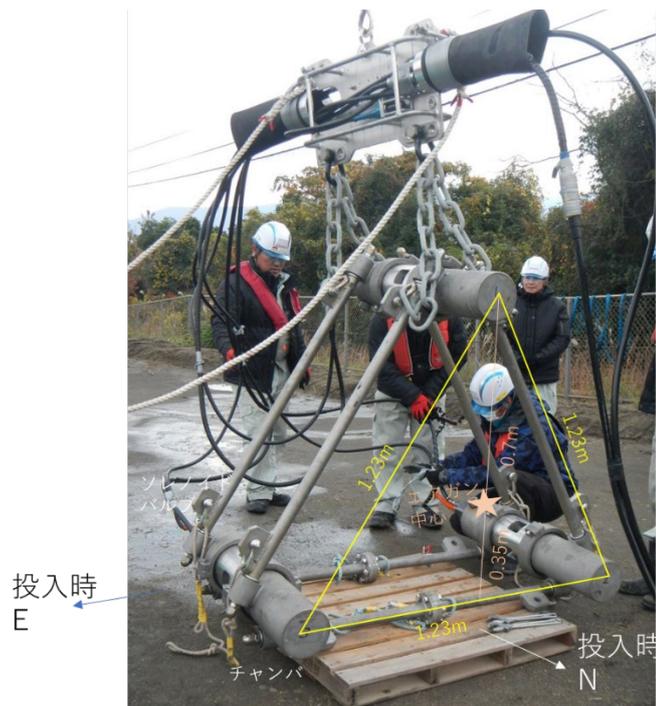


図7 エアガン装置。Teledyne BOLT 社製 1500LL 型 350cui の単体エアガンを1辺1.23mの正三角形の頂点になるように組み合わせてある。

エアガン装置はチャンバ容量350 cuiの1500LL型エアガン（Teledyne BOLT社製）を1辺1.23mの正三角形の頂点になるように組み合わせたエアガンアレイである。また、エアガン上方1.5 mにはエアガン発振を監視するための近接ハイドロフォン（以下でNFHと称する）が組み付けられている。

また今回のエアガンの作動には、あらかじめ用意した高圧窒素ガスを19.6 MPaで充填したポンペをボンベカードルとして複数組み合わせたものを用いた。ボンベカードルを下に示す。



図8 ボンベカードル（19.6 MPa 200m³/一組×2）

ボンベカードルは一組 200m³を 2 組用意した。ボンベカードルのガス取りだし口につけたレギュレータでエアガンへの供給圧を設定した。

エアガン発振による衝撃圧力が内壁コンクリートの破壊強度を超した場合にコンクリート表面にひび割れや欠損・剥離が起きることが予想される（日本消防設備安全センター，2008）。本実験では発振坑内が湛水されておりエアガン発振作業の合間に壁面を直接目視することができないので、水位監視によって壁面状態把握を行うことにした。

水位監視では水位センサー（SATOTECH 社製 MJ-WL11）をデジタルパネルメータ（渡辺電機工業株式会社製 WPMZ-1-3BX-XE-X00）と組み合わせて 12/17 に設置し水位監視を行った。用いたセンサーを下図に示す。センサーは内径 30mm の塩化ビニールパイプをガイドとして試験坑のステップに固定した。



図9 水位センサー(型番 MJ-WL11-20 製造番号 F20061805. 胴直径 28 mm)。同センサー用ガイドパイプ（画面左上）

内壁の観察は湛水完了後（発振作業前）・発振作業途中・発振作業終了後の 3 回にわたり実施した。最初に湛水完了後に水中ドローンの潜行による水中写真撮影を実施し、内壁に特段の異常のないことを確認した。

発振作業途中の 800 psi のシングルガン発振を実施した直後に水中ドローンによる壁面観察を試みたが、水中ドローン制御用のテザーケーブルのエアガンプレートへの絡みつきにより目標深度に達することが出来なかったうえにその解消に時間を要した。そのために以降の発振作業途中の潜行は行わないこととした。

発振作業終了エアガン引き揚げ後後にあらためて水中ドローンの潜行による水中撮影を実施したが、水の濁りが甚だしかったことと、壁面に向かう大きな流速により位置および姿勢制御が困難であったために湛水中の亀裂の状況に関する十分な記録を得ることができなかった。

d. 試験発振の経過

発振内容とその発振時刻とを下表に整理する。

表 3 発振時刻

<ul style="list-style-type: none">• 50 cui(5.7L), 800 psi(5.52 MPa)• 13:42:12.650• 13:47:46.786• 14:35:49.850• 14:37:48.166• 14:41:18.186• 14:42:52.578	<ul style="list-style-type: none">• 350 cui(5.7L), 1500 psi(10.2 MPa)• 15:23:26.838• 15:24:42.362• 15:26:20.010• 15:27:56.114• 15:29:03.010• 15:30:12.198
<ul style="list-style-type: none">• 350cui X2 (11.4L), 800 psi(5.52 MPa)• 15:02:08.290• 15:03:53.666	<ul style="list-style-type: none">• 350 cui X2(11.4L), 1500 psi(10.2 MPa)• 15:32:01.426• 15:38:16.862
<ul style="list-style-type: none">• 350 cui X3(17L), 800 psi(5.52 MPa)• 15:09:20.234• 15:11:31.858	<ul style="list-style-type: none">• 350 cui X3(17L), 1500 psi(10.2 MPa)• 15:41:43.918• 15:47:11.486• 15:59:50.202

試験発振坑への湛水は 12/15 の午後 5 時に完了した。湛水完了後の 12/18 から 1 週間（実験期間を含む）の水位変化を下表に示す。12/20 の発振実験の前は水量変化が後で水位変化率がおおむね $10^{-1} \text{m}^3/\text{hour}$ であったものが、発震実験終了後には $3 \sim 8 \text{m}^3/\text{hour}$ に変化している。

急速な水位低下は 12/20 実験終了後の 17 時台にはじめて認知された。騒音対策の関係上同日の 17 時以降の実験続行ができなかったが、翌日の給水による実験続行を検討した。翌 21 日 9 時始業時に発振作業不可能な水位（6.9m 高）まで低下していることが確認された。この時点で実験に必要な水位までに要求される補水量 97m^3 が 1 日分給水能力 $64 \text{m}^3/\text{day}$ を超え、当日中に発振作業が可能な水位に復することができないと判断されたために、発震実験を終了した。

表4 水位監視結果

水位記録	沿面測定 (m; 緯=0 m)	緯基準換 算水位	基準線の 目視水位 (m)	水位計表示 (m)	基準線換算 水位(m)	水位低下速度 (m/h)	時間差	水面半径 (m)	体積変化 量(m ³)	積算体積 変化速度 (m ³ /hour)	累積変化 量(m ³)	備考
2023/12/15 16:35	0.01	0.007						5				
2023/12/17 12:20	0.13	0.092		3.022	9.522	0.0019	43.75	4.908	-6.54	-0.150	-6.54	
2023/12/17 15:57				3.016	9.516	0.0017	3.62	4.902	-0.45	-0.125	-7.00	
2023/12/18 9:36	0.17	0.120		2.988	9.488	0.0016	17.65	4.874	-2.10	-0.119	-9.10	
2023/12/19 9:48				2.973	9.473	0.0006	24.20	4.859	-1.12	-0.046	-10.21	ポンツーン投入後水位
2023/12/20 9:25				3.063	9.563	-0.0038	23.62	4.949	6.80	0.288	-3.41	注水後
2023/12/20 10:40				3.062	9.562	0.0008	1.25	4.948	-0.08	-0.062	-3.49	
2023/12/20 11:36				3.059	9.559	0.0032	0.93	4.945	-0.23	-0.247	-3.72	
2023/12/20 12:57	0.068	0.048		3.063	9.563	-0.0030	1.35	4.949	0.31	0.228	-3.41	エアガン投入直後
2023/12/20 13:44				3.061	9.561	0.0026	0.78	4.947	-0.15	-0.196	-3.57	800 psi 1回目
2023/12/20 14:53				3.057	9.557	0.0035	1.15	4.943	-0.31	-0.267	-3.87	800 psi シングル#3ま で終了
2023/12/20 15:05				3.056	9.556	0.0050	0.20	4.942	-0.08	-0.384	-3.95	800psi ダブル終了
2023/12/20 15:12				3.055	9.555	0.0086	0.12	4.941	-0.08	-0.658	-4.03	800 psi フルポリユ ーム終了
2023/12/20 15:25				3.055	9.555	0.0000	0.22	4.941	0.00	0.000	-4.03	1500 psi シングル#1終 了
2023/12/20 15:26				3.053	9.553	0.1200	0.02	4.939	-0.15	-9.200	-4.18	1500 psi シングル#2 1回目
2023/12/20 15:27				3.053	9.553	0.0000	0.02	4.939	0.00	0.000	-4.18	1500 psi シングル#2 2 回目後
2023/12/20 15:30				3.053	9.553	0.0000	0.05	4.939	0.00	0.000	-4.18	1500psi シングル#3 2 回目後
2023/12/20 15:32				3.052	9.552	0.0300	0.03	4.938	-0.08	-2.299	-4.26	1500 psi ダブル 1回目 (あふれ発生) 後
2023/12/20 15:38				3.049	9.549	0.0300	0.10	4.935	-0.23	-2.297	-4.49	1500 psi ダブル 2回目 (あふれ発生) 後
2023/12/20 15:41				3.043	9.543	0.1200	0.05	4.929	-0.46	-9.170	-4.95	1500 psi フル 1 回目 (あふれ発生) 後
2023/12/20 16:02				3.003	9.503	0.1143	0.35	4.889	-3.03	-8.653	-7.97	
2023/12/20 16:06				2.99	9.49	0.1807	0.07	4.876	-0.97	-13.533	-8.95	
2023/12/20 16:08				2.983	9.483	0.2100	0.03	4.869	-0.52	-15.663	-9.47	
2023/12/20 16:18				2.955	9.455	0.1735	0.16	4.841	-2.07	-12.848	-11.54	
2023/12/20 16:22				2.916	9.416	0.5850	0.07	4.802	-2.85	-42.725	-14.39	エアガン引き揚げ後
2023/12/20 16:52				2.838	9.338	0.1560	0.50	4.724	-5.56	-11.119	-19.95	ポンツーン引き揚げ後
2023/12/20 18:04				2.687	9.187	0.1258	1.20	4.573	-10.25	-8.543	-30.20	
2023/12/21 9:05				0.309	6.809	0.1584	15.02	2.195	-89.07	-5.932	-119.28	
2023/12/21 9:42				0.127	6.627	0.2951	0.62	2.013	-2.53	-4.107	-121.81	
2023/12/21 9:43				0.123	6.623	0.2400	0.02	2.009	-0.05	-3.049	-121.86	注水直前
2023/12/21 9:49				0.355	6.855	-2.3200	0.10	2.241	3.29	32.947	-118.57	4t注水直後
2023/12/21 11:01				0.065	6.565	0.2417	1.20	1.951	-4.01	-3.341	-122.58	水位はまだ逆円錐部。
2023/12/22 13:29			1.1 -		1.1	0.2065	26.47	2.5	-27.91	-1.055	-150.49	水位は円筒部まで下 がった。ステップ高目 安の目視
2023/12/25 14:40			0.65 -		0.65	0.0061	73.18	2.5	-2.21	-0.030	-152.70	水位はステップ高目安 の目視
2024/1/12 11:39					0.61	0.0001	428.98	2.5	-0.20	0.000	-152.89	水位はメジャーで直 視。12/25以降の降水 は12/30 20.5 mm, 12/31 0.5 mm, 1/3 0.5 mm, 1/9 0.5 mm, 1/10 0.5 mm。漏水無しなら 水位上昇35.2cmのは ず。

上表をもとにした水位と水量の累積変化量を下図に示す。

湛水完了から1週間の水位／水量変化

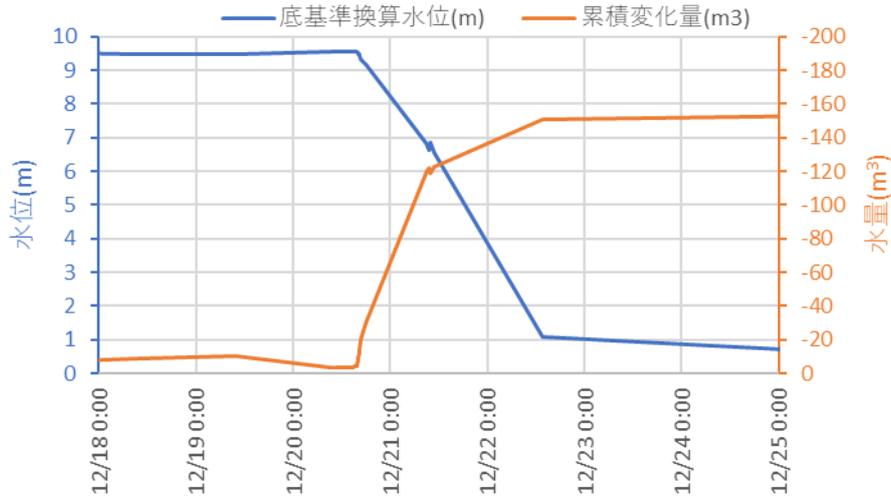


図 1 0 2023/12/18 以降 1 週間の水位変化

12/20 以降の急激な水位減少は後述のように発振作業による試験坑壁面の亀裂発生に伴うものである。なお、12/21 の 09 時ころに微妙な水位上昇があるが、これはあらかじめ準備していた給水車から約 4m³ の給水を行ったためである。

さらに、12/20 の発振実験中の水位変化の詳細を下図に示す。

12/20発振中の水位／水量変化

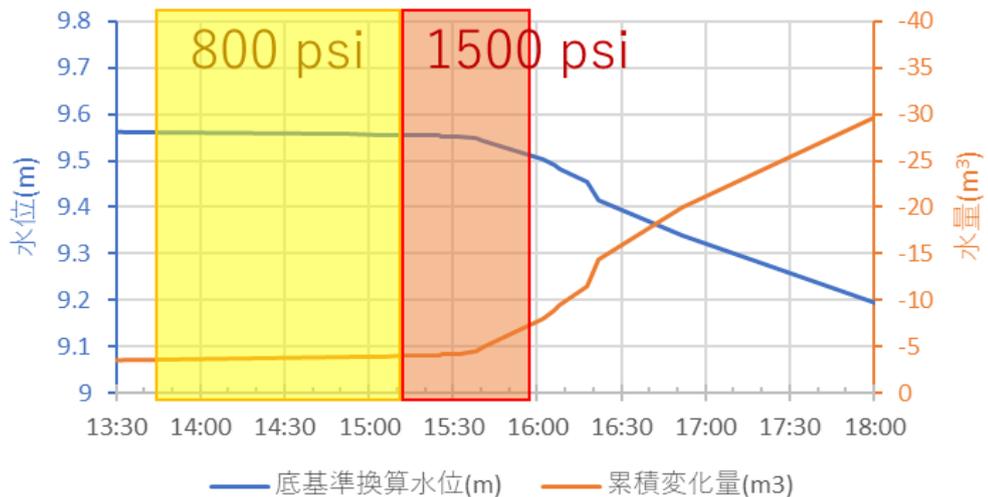


図 1 1 発震実験中の水位変化

上図に示されるように、15:30 までに終了した 1500psi (5. 52MPa) の 350cui 発振までは顕著な水位変化が認められないが、15:30 以降に実施された 1500psi (5. 52MPa) の 350cui × 2 発振以降では顕著な水位減少が認められる。従って試験発振坑は少なくとも 800psi (5. 52Mpa)

350 cui×3 発振には耐えたと推察される。

e. 試験発振後の試験発振坑の状況

発振作業終了後逸水により試験坑内部の水の大部分が抜けたので、担当者が試験坑内に降下し坑壁の亀裂をいくつかの深度で撮影したものを目視によって調べた結果を下表に示す。また確認された亀裂の本数の分布を下図に示す。

発生した亀裂は垂直走向のものが卓越していた。亀裂が 20 本以上見られたのは底から 1.8m 高（縁から 7.9m 深）までで、それより上では亀裂本数が減少する。一方、水平方向の亀裂はエアガン中心深度（深度 9m）付近に 2 箇所、エアガン近傍のジョイント部に 1 箇所見られるだけであった。坑壁の剥離は微小なもの以外認められなかった。

なお、坑底への降下の際に二酸化炭素濃度を計測したが、12/22 は水面上で 0.03Vo1%, 12/25 は水面上で 0.04Vo1%、1/12 は水面上で 0.02Vo1%で安全に問題なしと判断した。

表 5 亀裂分布表

縁からの 深さ	底からの 高さ(m)	垂直亀裂本数					合計本数	水平亀裂 数
		W-N	N-E	W-S	S-E			
4.6	5.1					0		
5.4	4.3	1	2	3		6		
5.8	3.9	3		1		4		
6.1	3.6	4	2	2	4	12		
6.6	3.1	4	2	1	0	7		
7.9	1.8	8	5	6	5	24	1	
9.05	0.65	8	9	8	10	35	1	

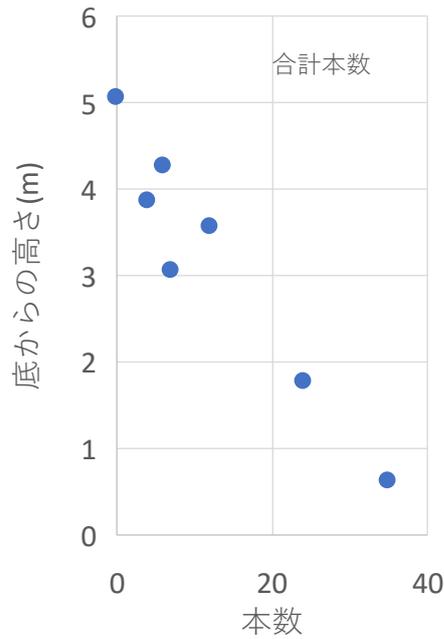


図1.2 亀裂の分布

発振実験終了2日後に上方から試験発振坑の底をのぞき込んだ写真を2つ下に示す。試験発振坑の四方(およそ東西南北)の底にはそれぞれアンカーが設けられ、エアガン固定用ロープが取り付けられている。これらのロープを以降ではNロープ、Sロープ、Eロープ、Wロープと称し、方位位置の目安とすることにする。ロープの太さは12mm、隣接するロープの間の壁面に沿った距離はそれぞれ約1.96mである。



図1.3 のぞき込み撮影写真。(a)東-北-西の壁面、(b)東-南-西の壁面

上図からは坑壁に顕著なへこみ等の変形や大規模な剥離は認められない。試験発振坑内部に降下した際にエアガン中心深度の約2m上方(3m高付近)のステップ周辺でハンマーによる打撃聴音を行ったが、コンクリート表層の浮きや鉄筋の破断を思わせる打撃音(空洞音)

は認められなかった。

坑壁写真を以下に整理する。坑壁写真はステップにつかまりながら撮影できるレベル別に撮影されている。写真中の亀裂には次に示す要領で付番されたコード番号を表示している。

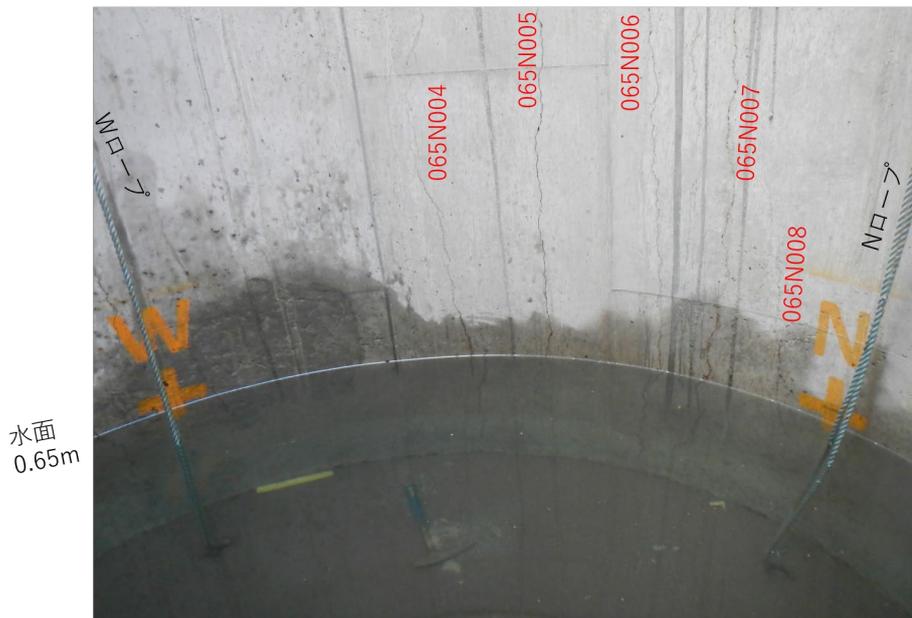
- ・半角文字で深さコード+周回コード+通し番号を記載したものとする。
 - ・深さコードは底からの高さを cm 単位で記載する。例として 3.9m ならば 390。
 - ・周回コードは時計回りか反時計回りの区別。時計回りなら N、反時計回りなら S の文字。
- 通し番号は W ロープから離れる順に付番。
- ・通し番号は垂直方向亀裂ならば 3 桁の数字、水平方向亀裂ならば H+2 桁の数字を与える。

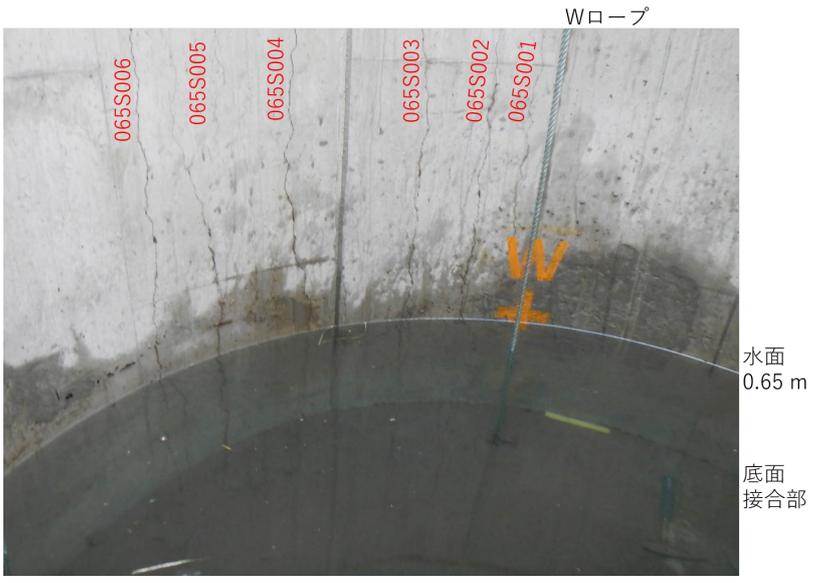


Nロープ



水面 0.65m







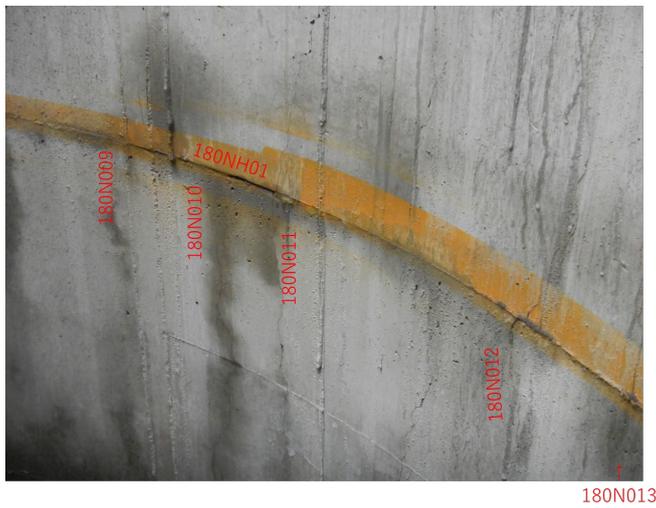
水面
0.65 m 底面接合部

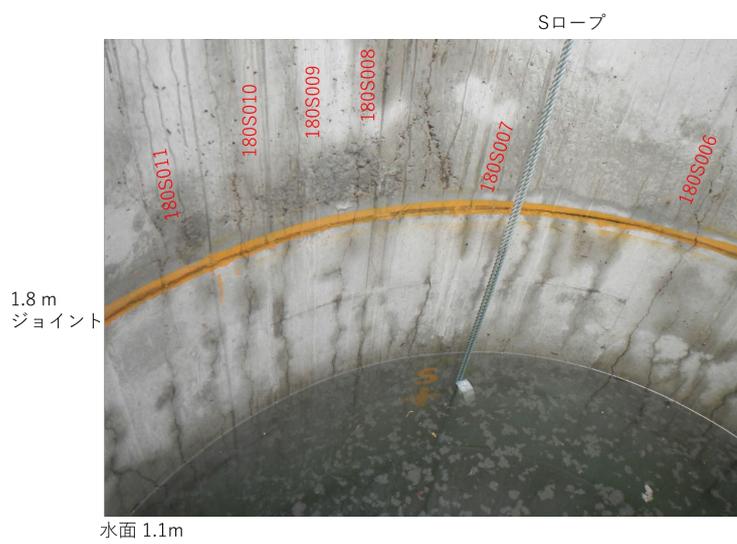


水面
0.65 m 底面接合部



図14 底から0.65 m高





Eロープ

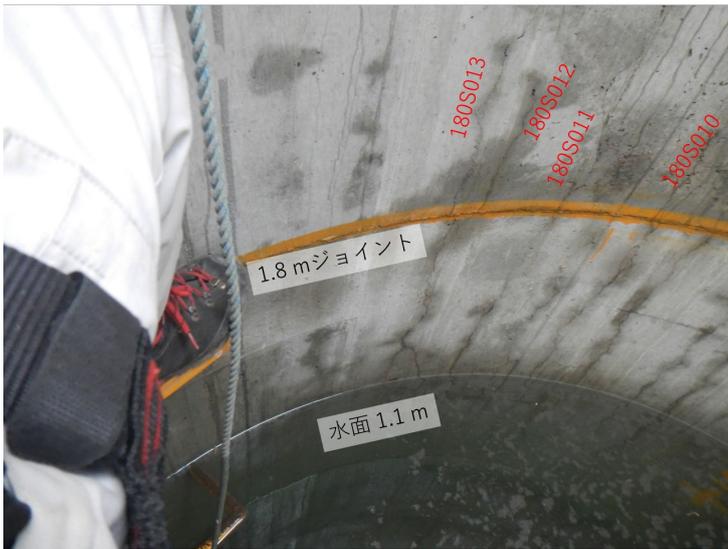
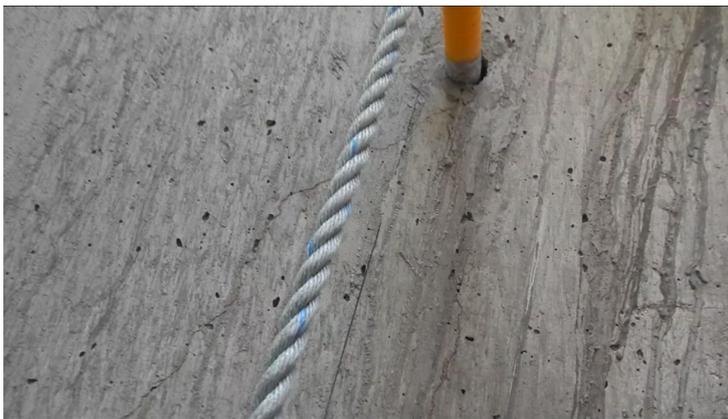


図 1 5 底から 1.8 m 高 (打設時の最下段ジョイント)

Eロープ ステップ



↑ 310N005

Nロープ

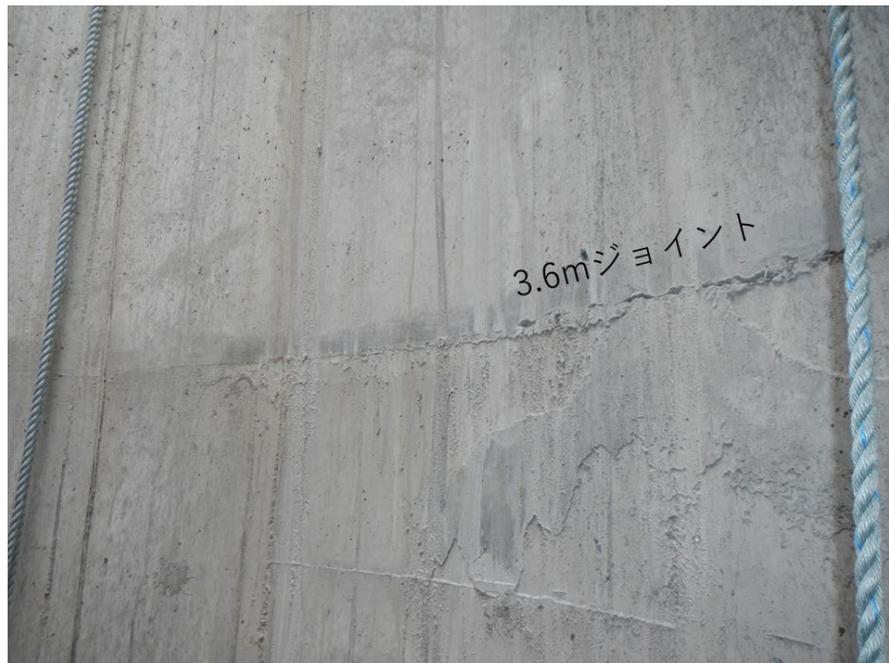


310N004 ↑



図16 底から 3.1 m 高

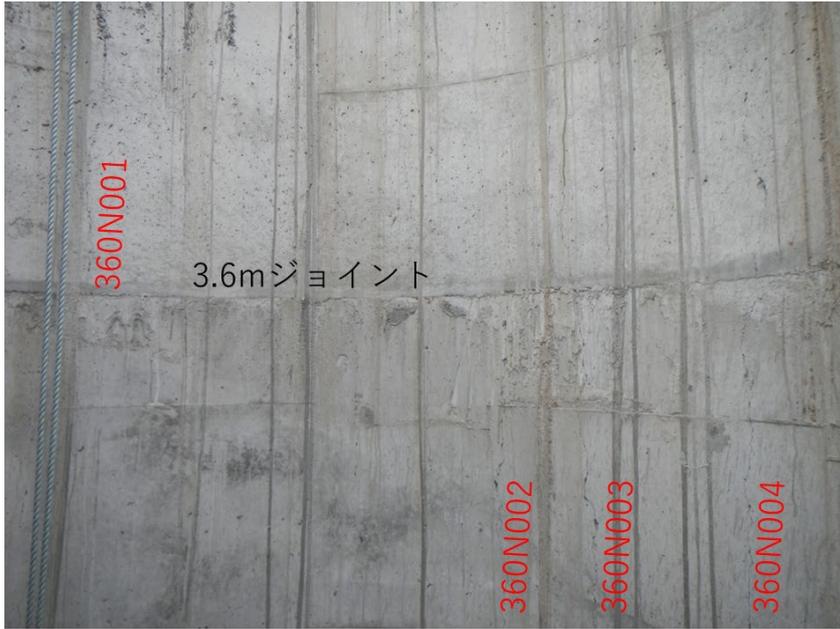
360N006



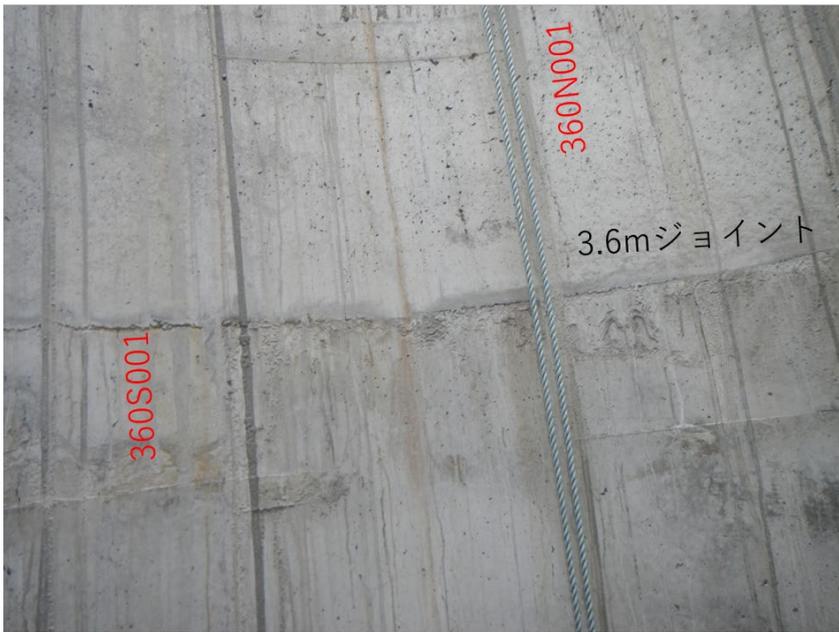
↑ Nロープ

360N005 ↑

↑ Eロープ (1)



↑wロープ



↑wロープ



3.6mジョイント

↑Sロープ



3.6mジョイント

↑Sロープ

↓ 360S006



↑ Eロープ (2)

図17 底から 3.6 m 高 (打設時第二段ジョイント=3.6m ジョイント)

Eロープ



↑ 390S001



↑ 390N004

Nロープ



↑ 390N003

↓ 390N001

Nロープ



↑ 390N001

↑ 390N002

↑ 390N003

Wロープ



390N001 ↑

図18 底から 3.9 m 高

ステップ

ステップ Eロープ



↑ 430N004

↓ 430N003



Nロープ

Nロープ



↑ 430N002

Wロープ



↑ 430S002

↑ 430N001

Sロープ



↑ 430S003

ステップ

ステップ Eロープ



↑ 430N004

図19 底から 4.3 m 高

なお、底から 4.7 m 高、5.1 m 高では目視で亀裂を認めなかった。最後に調査を行った 1/12 時点では水面下の 0.61 m 高以下の壁面および底面の調査はできなかった。12/25 から 17 日間経過した 1/12 に再度行った坑内観察では水位が 0.3 m 低下し 0.61 m 高であった。1/12 現在で底面を含む 0.65 m 高以下に存在する亀裂からの漏水速度は発振実験終了直後の 1/100 程度まで減少している。

また、ステップの取り付けが緩んでいる箇所が複数認められた。ステップ 2 (0.7m 高) , 5 (1.5m 高) , 6 (1.9m 高) , 7 (2.3m 高) の 4 箇所である。

以上の観察から底から 4.3 m 高以上には亀裂が及んでいないと判断された。

亀裂は垂直走向のものがエアガン中心深度付近に一番多く分布しており、水平方向の亀裂は同じくエアガン中心深度付近にしか見られなかった。このことから、エアガン発振時に坑壁に作用した過剰圧（おそらく衝撃相；Urick, 1967、京都大学防災研究所, 2023）によって、壁面に周方向の大きな引張り力が発生し大きな歪みを生じてコンクリートを破壊したものと推察される。また坑壁にくぼみなどの変形や大きな崩壊を認めることがなかったことから内部の鉄筋は破断に至っていないことが推察される。また坑壁にはエアガン中心深度付近でも大規模な剥離は見いだせなかった。

垂直方向の一番長い亀裂は底から 4.3 m の高さにまで達している。エアガン発振による衝撃はエアガン本体から $4.3 - 1\text{m}$ （エアガン中心深度）= 3.3m 離れば水槽壁の引張り強度を超えていなかったことが推察される。このことからエアガン発振にともなう近接効果（衝撃相）のおよぶ範囲はエアガン中心から約 3m 程度であることを示していると推察される。

(1) - 2 - 3. 令和 5 年度基礎実験で得られた記録

エアガン発振による人工地震記録の取得は下記 3 種類の観測で行った。

- ・近傍観測
- ・中距離観測
- ・遠方観測

近傍観測は試験発振坑内部と試験発振坑から 100 m 以内の距離に観測点を展開した。先述の試験発振坑内観測と黒神観測室構内観測が相当する。エアガン発振にともなう水中圧力時刻歴と衝撃圧の測定を目的としたハイドロフォン観測、後述のシミュレーション結果の検証を目的とした地表地震観測、騒音レベル測定を目的とした低周波マイクロフォン観測で構成した。

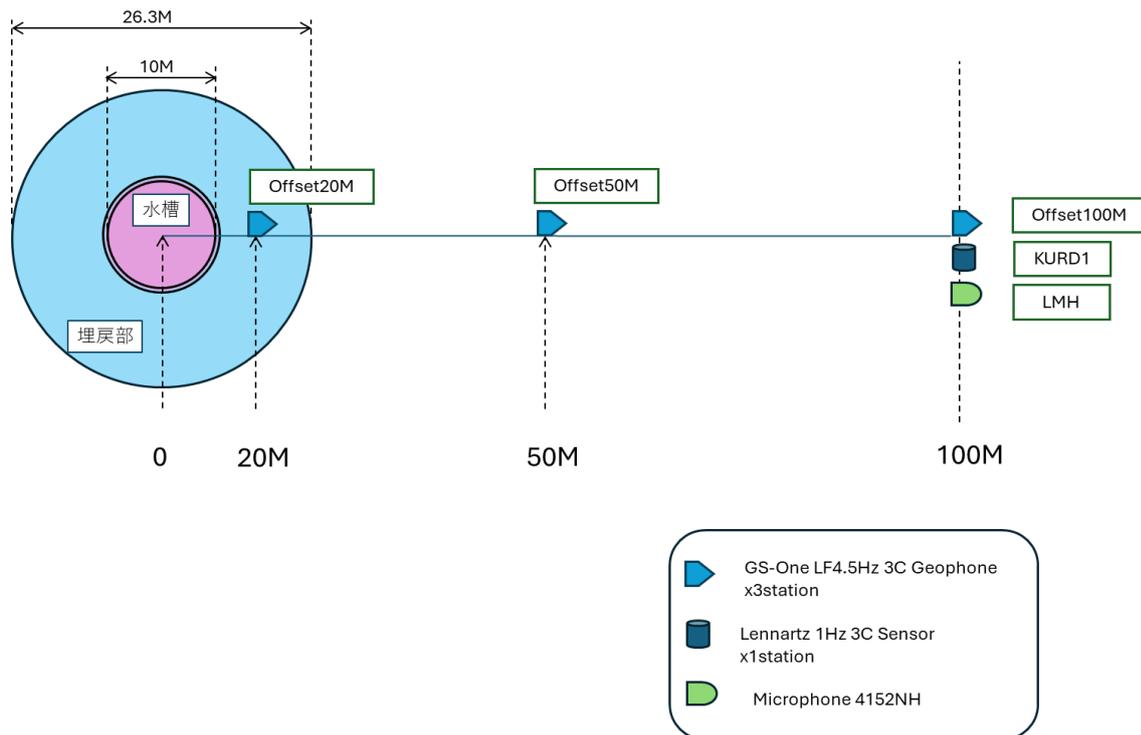


図 2 0 近傍観測展開図

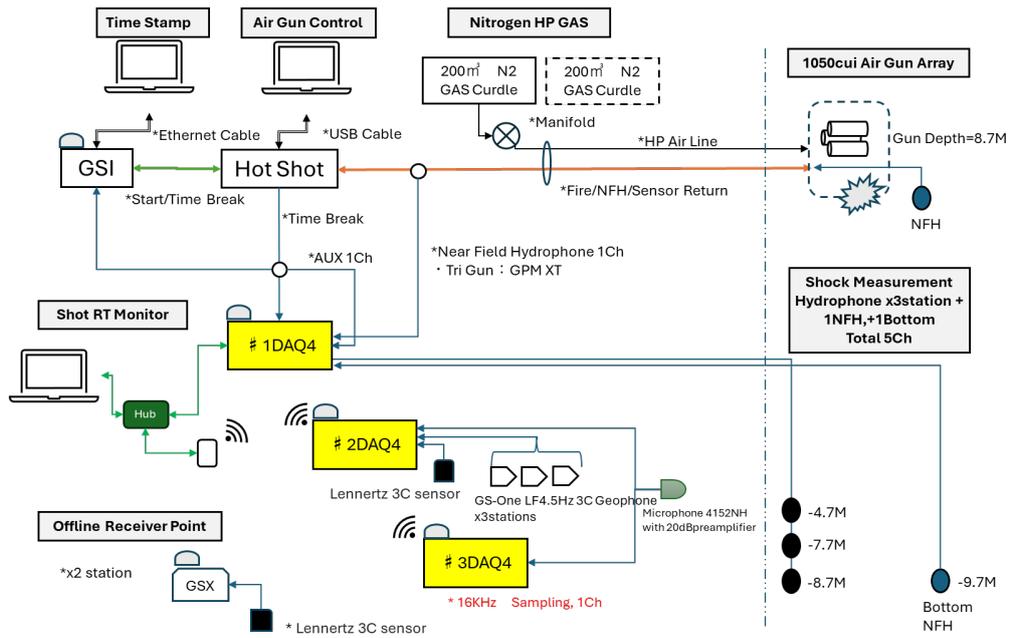


図 2 1 近傍観測システムと発振システム

中距離観測ではエアガン発振に伴う人工地震波形の記録と過去の実験との波形比較とを目的として、試験発振坑を起点として 0.05 ~ 4 km の距離に展開された地表および孔中地震計観測点 BKUR(SVO-KUR1)を用いた。先述の高免地震計アレイと黒神観測室構内観測、1.15km 地点（黒神小学校）がこれに相当する。

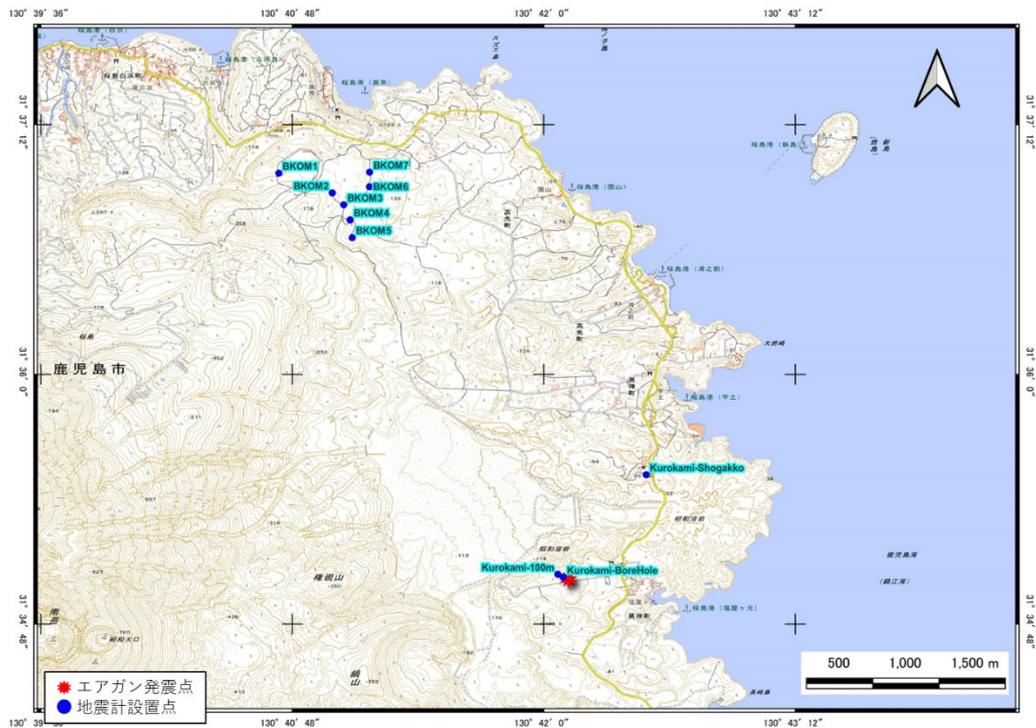


図 2 2 中距離観測

遠方観測ではエアガン発振に伴う人工地震波形の S/N 比の距離分布観測を目的として、京都大学防災研究所の常設観測点の短周期地震計（固有周波数 1Hz，減衰定数 1.0）によって得られたデータを用いた。

近傍観測波形例を下図に示す。発振時刻は 0.1 秒として表示している。近傍観測はエアガン直近から振源距離 100 m 以内の観測波形を含み、チャンネル割り当てを下表に示す。エアガンソレノイド信号(Ch. 1)、坑内圧力波形(Ch. 2, ch.9-12)、近傍地表波形(Ch. 3-5; 50m 地点, Ch. 6-8 20m 地点, Ch. 13-18, 90m 地点)、低周波マイクロフォン波形が順番に含まれる。低周波マイクロフォン (ch. 19) は 90m 地点に設置され、音波到来時刻は 0.384 秒（走時 0.284 秒）であった。90m 地点の地震計(Ch. 13-15, ch. 16-18)で得られた初動到来時刻は音波に先行する 0.273 秒（走時 0.173 秒）であった。

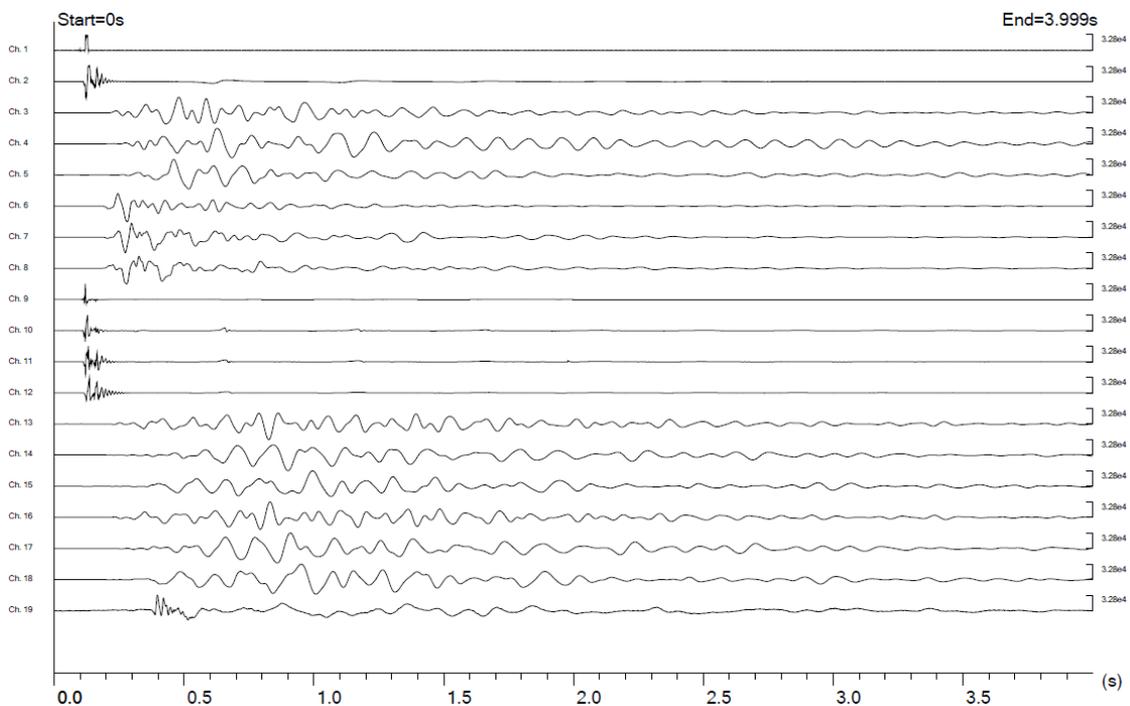


図 2 3 近傍観測波形。 1500 psi, 三重連発振。上から順にソレノイド信号、NFH, 50m 観測点 (3 成分)、20m 観測点 (3 成分)、坑内ハイドロフォン 1-4、90m 地点 (3 成分)、90m 地点 (3 成分)、低周波マイクロフォン。発振時刻は時刻 0.1 秒で、それぞれのチャンネルの最大振幅で規格化してある。

表 6 近傍観測データチャンネル割り当て

SEQ	Ch ID	Ch	Loc ID	Input Signal	X	Y	Z	Remarks
31	001F	1	TimeBreak	GunController PTB	N/A	N/A	N/A	N/A
32	0020	2	NFH1	トリガンNFH	31.58361979	130.701883	-7.15	型式:GPM-XT, エアガン深度8.7m時, ガンプレートNFH, 深度基準:水面からの深度
33	0021	3	Offset50M	Surface UD	31.58380539	130.7015017	62.04	4.5Hz地震計, 発振坑中心から50M
34	0022	4	Offset50M	Surface NS	31.58380539	130.7015017	62.04	〃
35	0023	5	Offset50M	Surface EW	31.58380539	130.7015017	62.04	〃
36	0024	6	Offset20M	Surface UD	31.58367075	130.7017751	61.81	4.5Hz地震計, 発振坑中心から20M
37	0025	7	Offset20M	Surface NS	31.58367075	130.7017751	61.81	〃
38	0026	8	Offset20M	Surface EW	31.58367075	130.7017751	61.81	〃
39	0027	9	NFH2	トリガンNFH	31.58361979	130.701883	-9.70	型式:GPM-XT, 坑底NFH,途中1/11減圧, 深度基準:水面からの深度
40	0028	10	HYD3	衝撃測定ハイドロフォン	31.58361979	130.701883	-8.70	型式:P44A, 1/20減圧, 深度基準:水面からの深度
41	0029	11	HYD2	衝撃測定ハイドロフォン	31.58361979	130.701883	-7.70	型式:P44A, 1/20減圧, 深度基準:水面からの深度
42	002A	12	HYD1	衝撃測定ハイドロフォン	31.58361979	130.701883	-4.70	型式:P44A, 1/20減圧, 深度基準:水面からの深度
43	002B	13	Offset100M	Surface UD	31.58399099	130.7011204	63.83	4.5Hz地震計, 発振坑中心から100M
44	002C	14	Offset100M	Surface NS	31.58399099	130.7011204	63.83	〃
45	002D	15	Offset100M	Surface EW	31.58399099	130.7011204	63.83	〃
46	002E	16	KURD1	Surface UD	31.58399099	130.7011204	63.83	Lennartz 1Hz, DAQ観測,黒神観測室敷地内,KUR1と併設
47	002F	17	KURD1	Surface NS	31.58399099	130.7011204	63.83	〃
48	0030	18	KURD1	Surface EW	31.58399099	130.7011204	63.83	〃
49	0031	19	LMH	低周波マイクロフォン	31.58399099	130.7011204	63.83	型式:TYPE4152NH, サンプリング間隔16KHz, 0→20Bに変更

外挿値/測量未実施

水深値

中距離観測波形例を下図に示す。中距離観測には振源距離 50m から 5 km 以内の地表観測および孔中観測（京都大学防災研究所，2021）が含まれる。中距離観測のチャンネル割り当てを下表に示す。近傍観測記録と異なり、以降の中距離観測記録および長距離観測記録では発振時刻を 0 秒としている。100m 地点の地震計（ch. 25-27）で得られた初動到来時刻は 0.173 秒、1.15km 地点（ch. 28-30）では 0.842 秒、3.8km 離れた高免アレイ BKOM3 観測点（Ch. 7-9）では 2.43 秒であった。

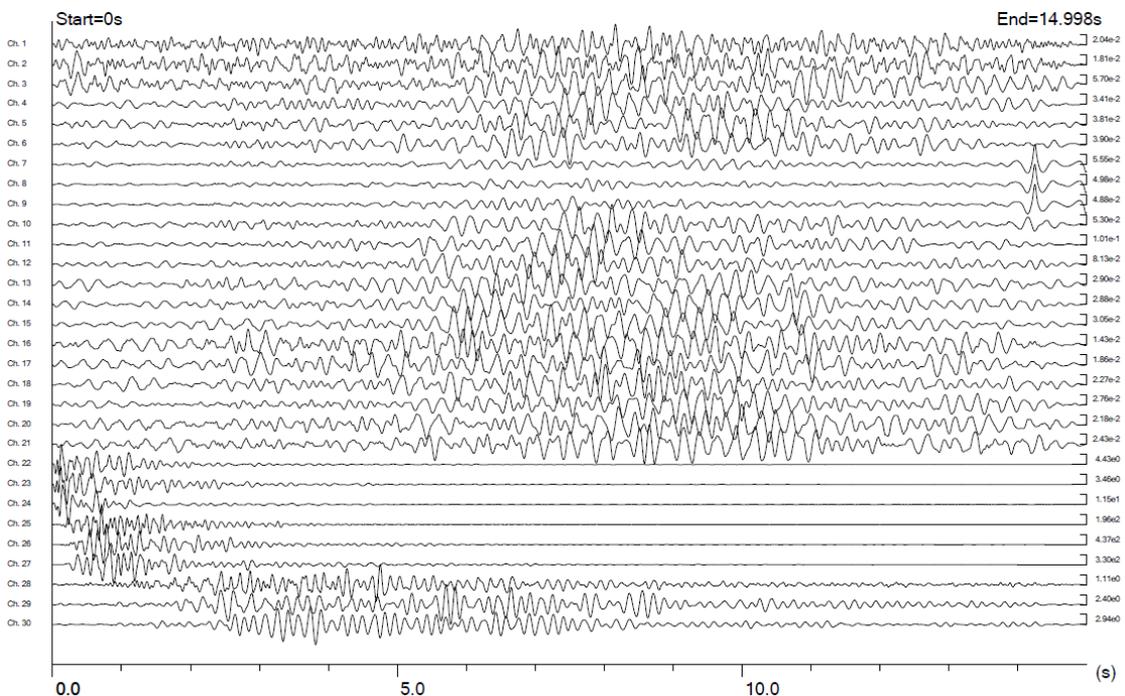


図 2 4 中距離観測波形。1500 psi, 三重連発振, BPF(4-15Hz)。1 観測点あたり 3 成分観測を実施した。上から順に BKOM1-7 観測点（振源距離約 3.8 km）、孔中観測点 KUR、100m 観測点、1.15km 観測点の順に並べて、各それぞれのチャンネルの最大振幅で規格化してある。発振時刻は 0 秒である。

表7 中距離観測データチャンネル割り当て

SEQ	Ch ID	Ch	Loc ID	Input Signal	X	Y	Z	Remarks
1	0001	1	BKOM1	Borehole UD	31.61611N(deg)	130.67893E(deg)	140.90	2020/11/24 GNSSで測量。標高は地理院-10.0m
2	0002	2	BKOM1	Borehole NS	31.61611N(deg)	130.67893E(deg)	140.90	〃
3	0003	3	BKOM1	Borehole EW	31.61611N(deg)	130.67893E(deg)	140.90	〃
4	0004	4	BKOM2	Borehole UD	31.61453N(deg)	130.68318E(deg)	129.50	〃
5	0005	5	BKOM2	Borehole NS	31.61453N(deg)	130.68318E(deg)	129.50	〃
6	0006	6	BKOM2	Borehole EW	31.61453N(deg)	130.68318E(deg)	129.50	〃
7	0007	7	BKOM3	Borehole UD	31.61358N(deg)	130.68409E(deg)	125.50	〃
8	0008	8	BKOM3	Borehole NS	31.61358N(deg)	130.68409E(deg)	125.50	〃
9	0009	9	BKOM3	Borehole EW	31.61358N(deg)	130.68409E(deg)	125.50	〃
10	000A	10	BKOM4	Borehole UD	31.61237N(deg)	130.68460E(deg)	116.60	〃
11	000B	11	BKOM4	Borehole NS	31.61237N(deg)	130.68460E(deg)	116.60	〃
12	000C	12	BKOM4	Borehole EW	31.61237N(deg)	130.68460E(deg)	116.60	〃
13	000D	13	BKOM5	Borehole UD	31.61095N(deg)	130.68477E(deg)	102.20	〃
14	000E	14	BKOM5	Borehole NS	31.61095N(deg)	130.68477E(deg)	102.20	〃
15	000F	15	BKOM5	Borehole EW	31.61095N(deg)	130.68477E(deg)	102.20	〃
16	0010	16	BKOM6	Borehole UD	31.61502N(deg)	130.68614E(deg)	117.30	〃
17	0011	17	BKOM6	Borehole NS	31.61502N(deg)	130.68614E(deg)	117.30	〃
18	0012	18	BKOM6	Borehole EW	31.61502N(deg)	130.68614E(deg)	117.30	〃
19	0013	19	BKOM7	Borehole UD	31.61619N(deg)	130.68615E(deg)	113.10	〃
20	0014	20	BKOM7	Borehole NS	31.61619N(deg)	130.68615E(deg)	113.10	〃
21	0015	21	BKOM7	Borehole EW	31.61619N(deg)	130.68615E(deg)	113.10	〃
22	0016	22	BKUR1	Borehole UD	31.58374566	130.7015456	-25.47	追加点, 黒神100m孔中地震計, センサ深度GL-88M
23	0017	23	BKUR1	Borehole NS	31.58374566	130.7015456	-25.47	追加点, 黒神100m孔中地震計, センサ深度GL-88M
24	0018	24	BKUR1	Borehole EW	31.58374566	130.7015456	-25.47	追加点, 黒神100m孔中地震計, センサ深度GL-88M
25	0019	25	KUR1	Surface UD	31.58399099	130.7011204	63.83	Lennartz 1Hz, 黒神観測室敷地内, 発振坑中心から100M
26	001A	26	KUR1	Surface NS	31.58399099	130.7011204	63.83	〃
27	001B	27	KUR1	Surface EW	31.58399099	130.7011204	63.83	〃
28	001C	28	KUR2	Surface UD	31.59195552	130.7081494	33.81	Lennartz 1Hz, 黒神小学校
29	001D	29	KUR2	Surface NS	31.59195552	130.7081494	33.81	〃
30	001E	30	KUR2	Surface EW	31.59195552	130.7081494	33.81	〃

R5新設点

まず中距離観測の記録を用いた検討の結果を紹介する。発振坑から 90m 地点において本実験の 1500 psi 三重連発振で得られた記録を京都大学防災研究所(2023)で得られた記録と比較したものを下に示す。

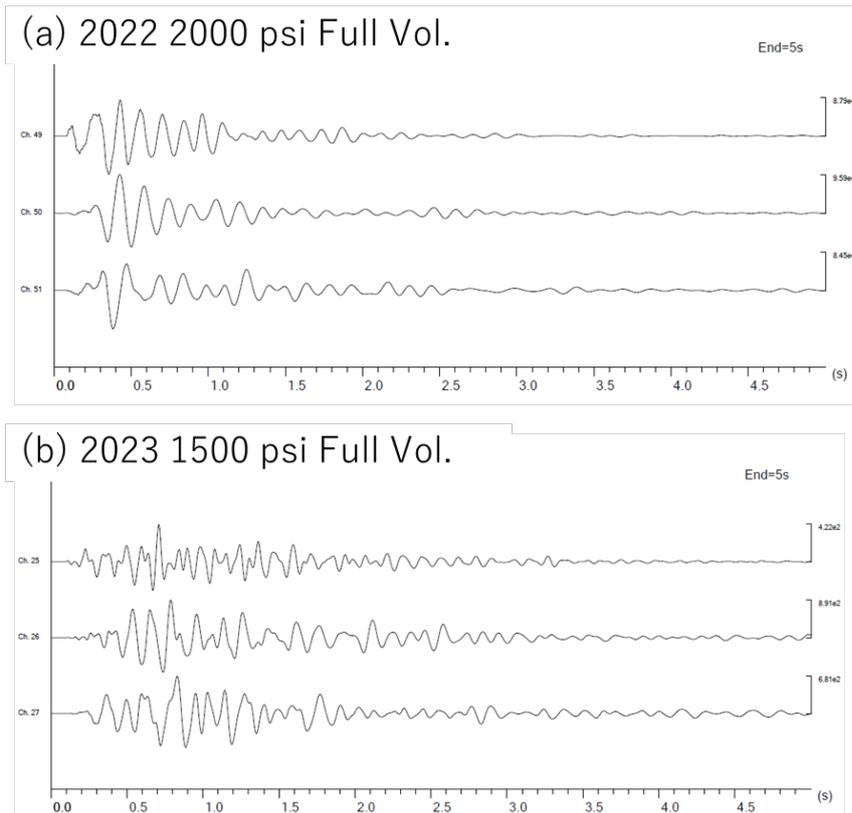


図 2 5 震源距離約 100m における波形記録。(a)2022 年実験 (SUM1 観測点 102m 地点；京都大学防災研究所, 2023)、(b)本実験(90 m 地点)。各図は上から上下動成分、南北動成分、東西動成分の順に並ぶ。

(a)はエアガンの周囲に十分な空間が確保されている住吉池における 2000psi, 10.5m 深における発振による波形 (京都大学防災研究所, 2023) を示し、(b)は試験発振坑内で 1500psi, 8.7m 深における発振による波形を示す。(b)は(a)に比べてあきらかに波形継続時間が長く、より周期の短い成分が目立つ。

本実験による発振波形(b)の継続時間が(a)の観測波形のそれよりも長い傾向は、より振源距離の大きい観測点で一層明瞭である。両実験の振源距離 1.15 km の地点 (黒神小学校) における観測波形を下に示す。

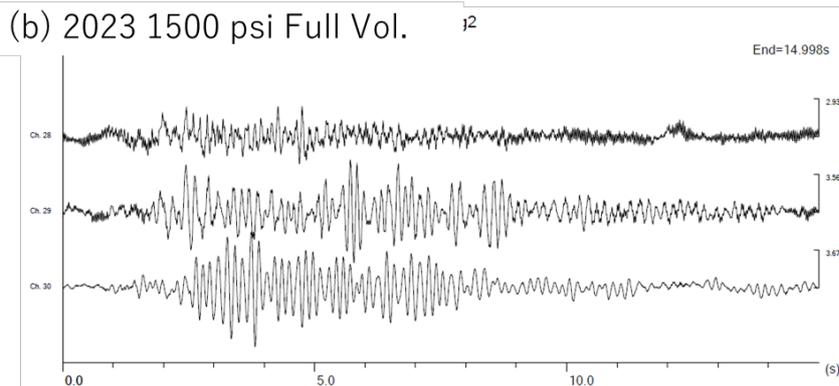
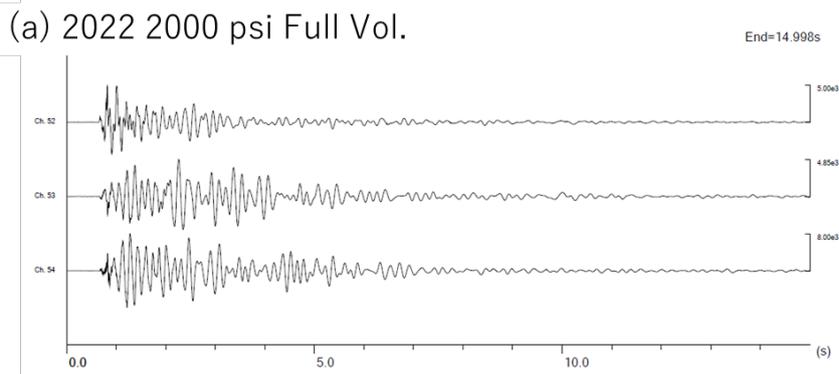


図 2 6 1150m 地点における観測波形。(a)2022 年実験 SUM1 観測点、(b)本実験。

90m 地点における観測記録の周波数解析結果を下に示す。

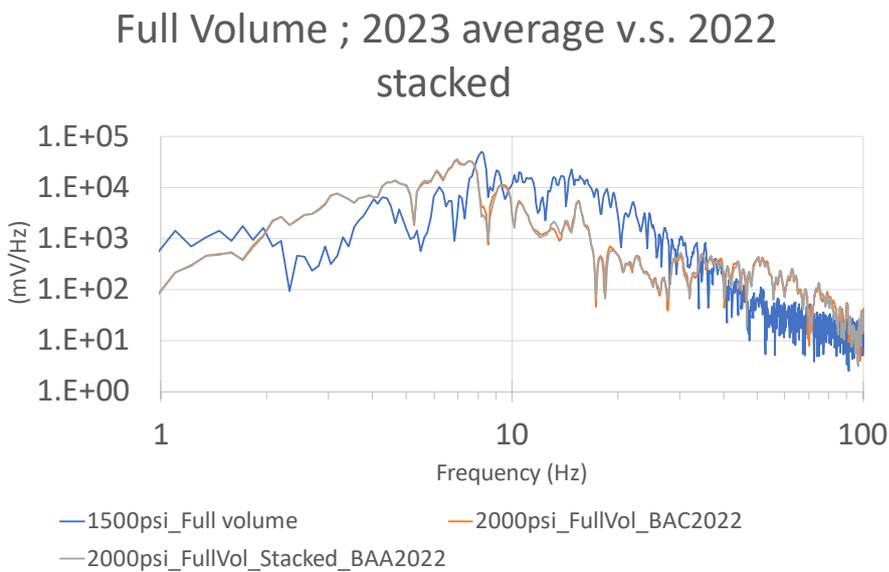


図 2 7 周波数解析結果

上図から本実験の発振は 2022 年の発振より 8 Hz 以上の成分が強いことが示されており、先述

の生波形の観察結果の特徴を反映している。この周波数成分の差は動作圧の差異または発振坑の狭小空間の影響などが関係していると考えられる。

[発振条件による波形変化]

つぎに2種類の作動圧において異なるエアガン構成で発振を行った場合の波形変化について述べる。観測坑内のもっともエアガンに近接したハイドロフォン(NFH)による観測波形の例を下に示す。NFHはエアガンクラスタ中心の上方1.55m、最上位エアガンから0.7m上方に位置している。

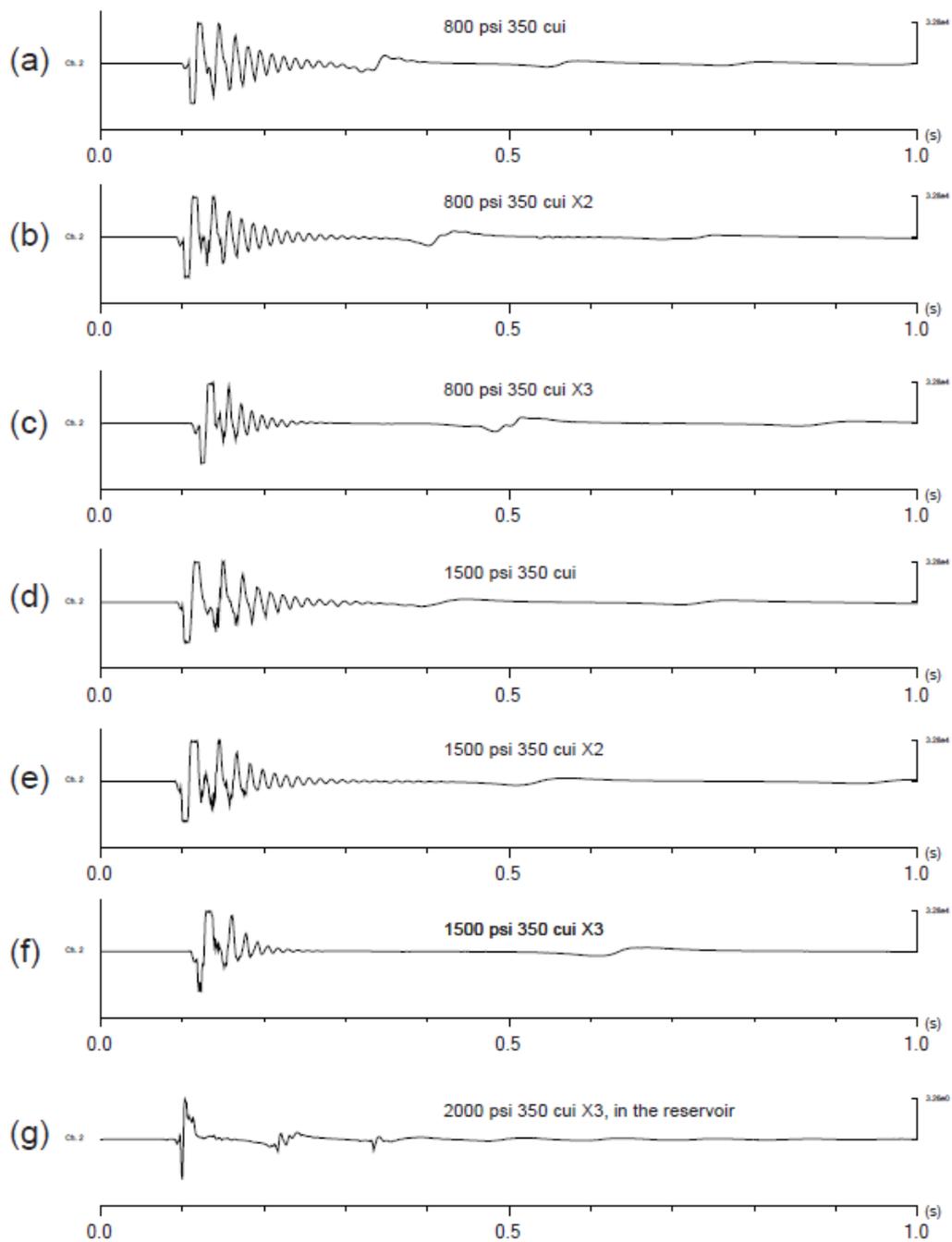
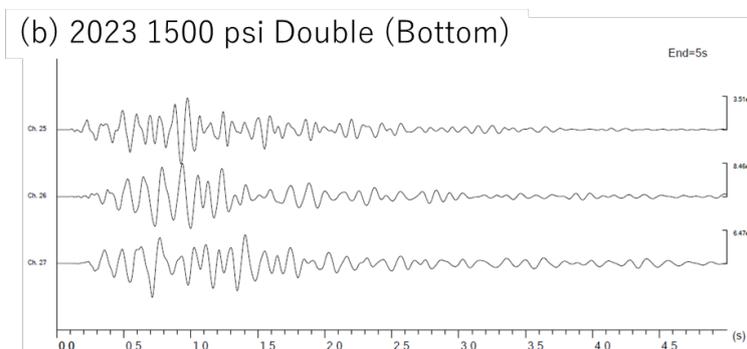
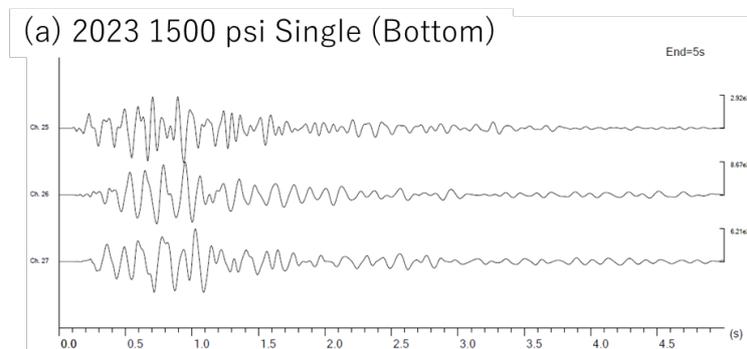


図 2 8 NFH 波形。フルスケールは 0.32 MPa。 (a) 800 psi 350 cui、 (b) 800 psi 350 cui×2、 (c) 800 psi 350 cui×3、 (d) 1500 psi 350 cui×1、 (e) 1500 psi 350 cui×2、 (f) 1500 psi 350 cui×3、 (g)2020 実験における 2000 psi 350 cui ×3。

(a)～(f)は試験発振坑を用いた本実験による観測波形、(g)は京都大学防災研究所(2023)で実施された貯水池を用いた NFH 波形を示す。いずれも振幅フルスケールは 0.32 MPa である。(a)～(f)は最初の 2 サイクル分が明らかにオーバースケールしており、正しい最大値を示していない。

上図から発振条件が異なると NFH 波形は変化していることが示される。一般に半無限媒質と見なせる空間でエアガン発振を行うと、エアガン近傍で得られる NFH 波形は(g)に示されるように先頭の衝撃部分とそれに続いて周期的に現れる比較的周囲の長いバブル部分とで構成される(京都大学防災研究所, 2023)。(g)では先頭の衝撃波パルスの継続時間が 0.022 秒である。一方、今回の実験(a)～(f)のいずれも先頭の衝撃波部分が 0.1 秒以上継続することが特徴である。またバブル部分に注目すると 2 回目のバブル振動相の終了までの継続時間は(g)では 0.4 秒であるのに対して(a)～(f)では 0.6 秒であった。(a)～(g)はいずれも同一個体のエアガンによる発振であるが、(a)～(g)は直径 2.5m の狭小な試験発振坑内の発振であるのに対して、(g)は直径 550m の貯水池における発振であることを考慮すると、本実験で得られた NFH 波形(a)～(f)の発振波形継続時間の伸長は試験発振坑の狭小空間の効果が大きいと考えられる

次に坑外で得られた地表波形について記述する。観測坑から 90m 地点で得られた 1500psi で作動させたエアガン単一構成、重連構成、三重連構成の観測波形を下に示す。



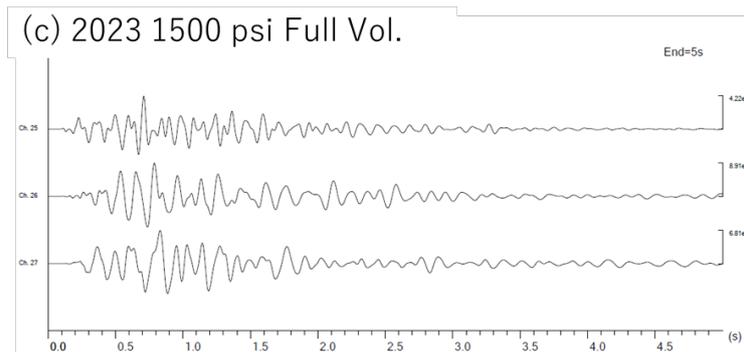


図 2 9 本実験におけるエアガン構成による波形変化。(a)単エアガン、(b)重連エアガン、(c)三重連エアガン。各図は上から上下動成分、南北動成分、東西動成分の順に並ぶ。

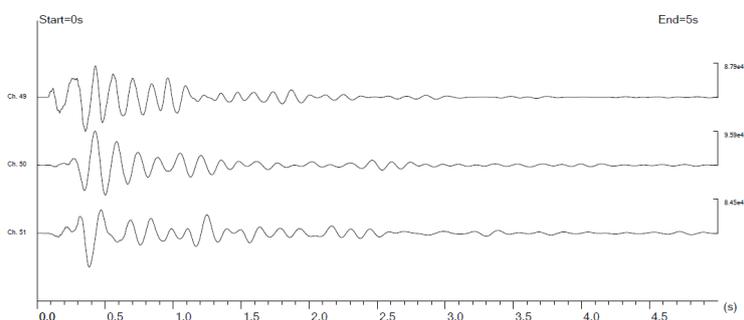


図 3 0 貯水池における 2000 psi 三重連発振で得られた振源距離 102m 地点の観測波形（観測点 SUM1；京都大学防災研究所, 2023）。各図は上から上下動成分、南北動成分、東西動成分の順に並ぶ。

上図(a)～(c)では主要動が約 5 秒の継続時間をしめしており、エアガン構成が相違しても波形の継続時間に大きな差異は認められない。しかし、上図に示す貯水池における発振波形では約 3 秒である。両者を比較すると、今回の実験では主要動部分継続時間の顕著な伸張が認められる。本実験で得られた 90m 地点の継続時間の 2.0 秒の伸張は先述の NFH 波形の継続時間の 0.2 秒伸張より大きい。

波形継続時間伸長部分に到来している波の振動様式を下図に示す。到来時刻によって波の振動様式が変化しているので、初動付近は約 0.1 秒長の時間窓を複数とって振動様式を検討した。

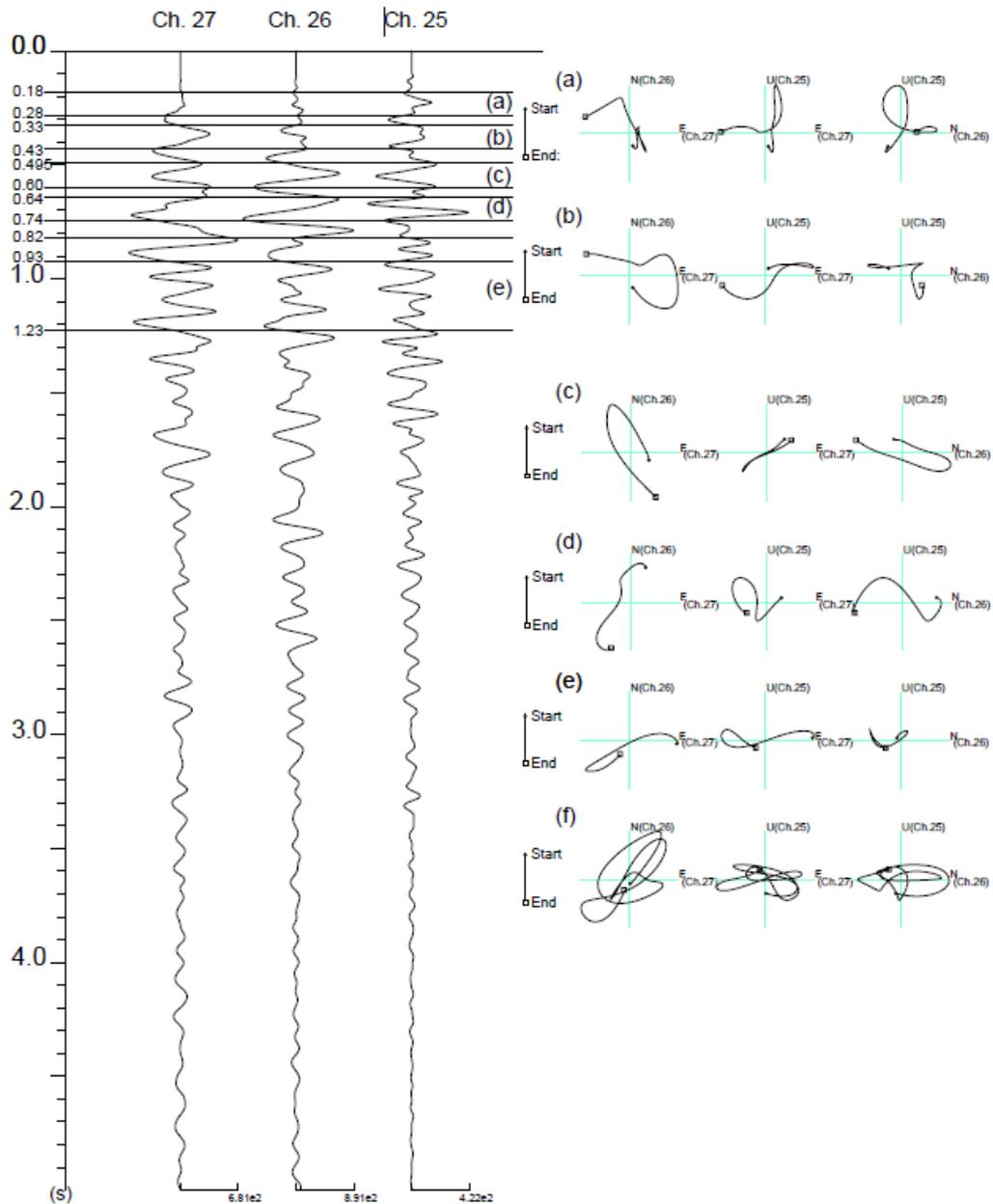


図 3 1 90m 地点における 3 成分波形と振動軌跡

上図から区間 0.18-0.25 秒の (a) では上下成分の振幅が卓越し、明らかに P 波の到来を示している。0.25 秒付近では水平動が卓越するようになるが、この直後の 0.284 秒には音波が到来する。0.33 秒から以降 (b 図以降) は水平動成分が卓越し S 波的な振動が継続する傾向がある。さらに (e) に示される 0.9 秒付近では垂直面内で楕円形を描くレイリー波的な振動様式が見受けられる。このことから 90m 地点では P 波が明瞭であるのは初動の直後だけで音波到来直前以降で水平動が卓越する振動が卓越していることから、水平動成分が卓越する到来相が波形継続時間の伸長に寄与していることが示唆される。

継続時間の伸長は振源距離が大きくなると一層顕著である。1.15km 地点 (黒神小学校) で観測された波形を下図に示す。

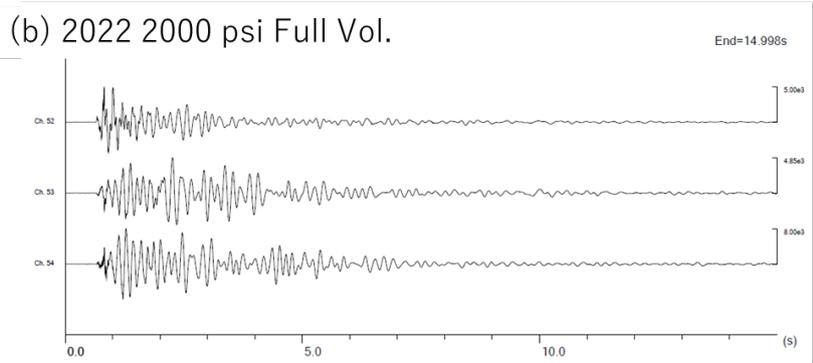
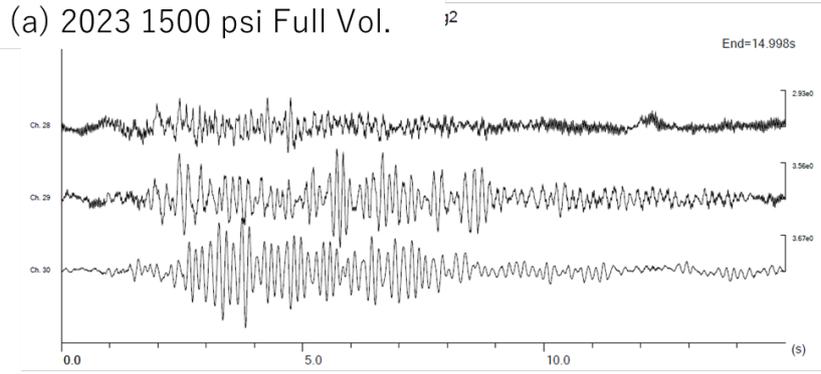


図 3 2 振源距離 1.15 km における観測波形。(a)本実験 1500 psi 350 cui×3 発振、(b)貯水池発振 2000 psi 350 cui×3 発振（京大防災研究所, 2023）。各図は上から上下動成分、南北動成分、東西動成分の順に並ぶ。

上図(a)では主要動継続時間が 15 秒を超えているのに対して、(b)の貯水池での発振は 10 秒程度である。主要動振幅が極大になる時刻も(a)が約 5 秒であるのに対して、(b)では 1.3 秒である。

1150m 地点における初動到来時刻は 0.842 秒付近であるが、上下動成分だけでは初動の確認が困難である。この地点における振動軌跡を下図に示す。

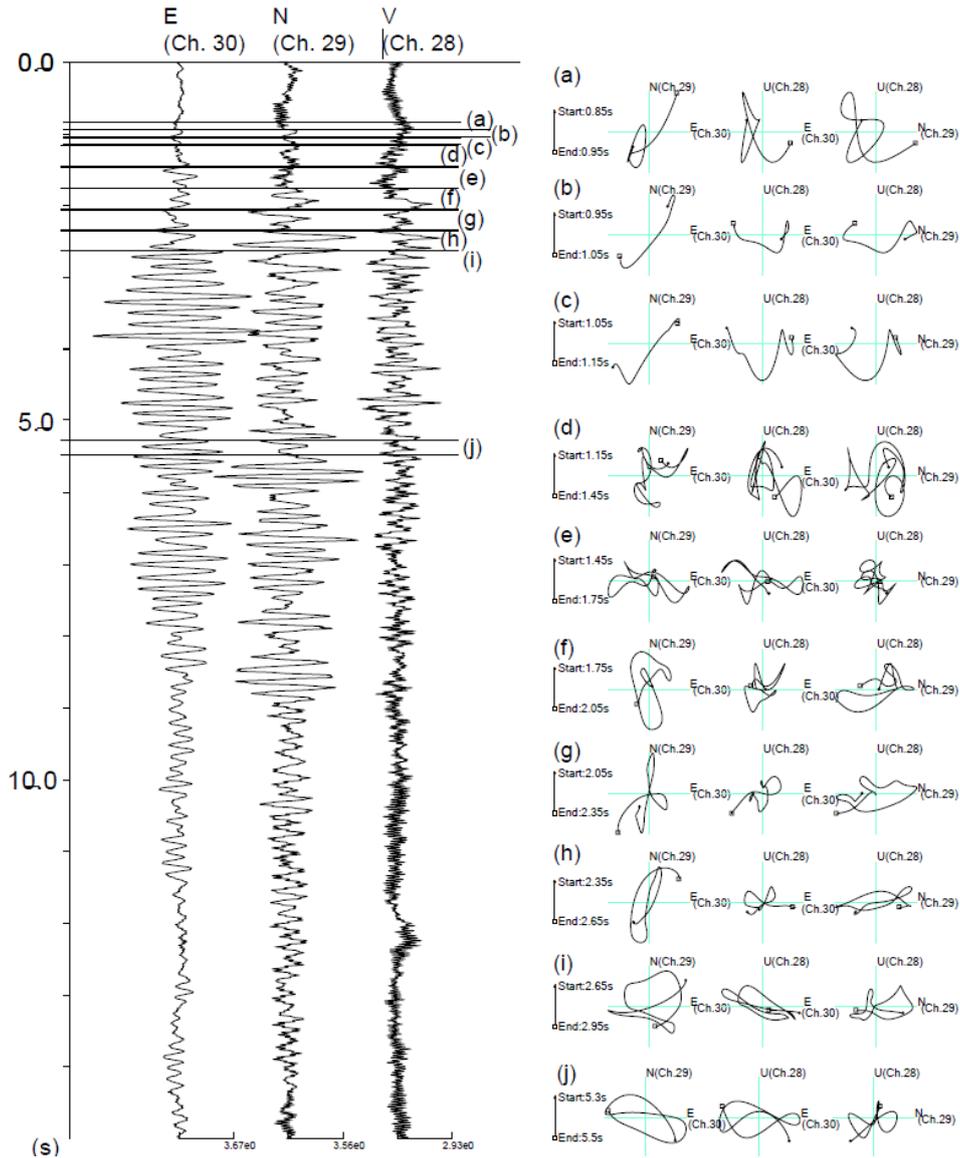


図 3 3 1.15 km 地点における 3 成分波形と振動軌跡

この地点では(a)に示されるように初動から約 0.2 秒間は上下動の振動が卓越するが、それ以降は(c)に示されるように水平動も動く複雑な振動様式を示す。その後(d)に示されるように 1.3 秒付近から回転運動をする振動様式を示したのち 1.6 秒付近から水平動が卓越する S 波的な振動様式に移行する。(j)に示されるように 5 秒以降は水平動が卓越する。このことからこの地点における振動継続時間の伸長は S 波など遅い到来相による寄与が大きいと考えられる。

さらに遠方の 3.7 km 地点 (観測点 BKOM3) における振動様式は初動到来時刻 2.43 秒から時刻 5.4 秒までは上下動卓越のパターンを示し、時刻 5.4 秒以降で水平動成分の振動が顕著である。このことから今回の観測坑における発振では P 波より S 波または表面波が強く発生していたことがうかがわれ、距離が大きくなると水平動成分の振幅が顕著になることから相対的に S 波の発生効率が高かったと解釈される。以上のことは本実験において遠方で観測された波形は、これまでの実験のそれより S 波等速度が遅い成分の発達が顕著であることを示している。

次に動作圧 1500psi の各構成における 90m 地点観測波形の周波数解析結果を以下に示す。

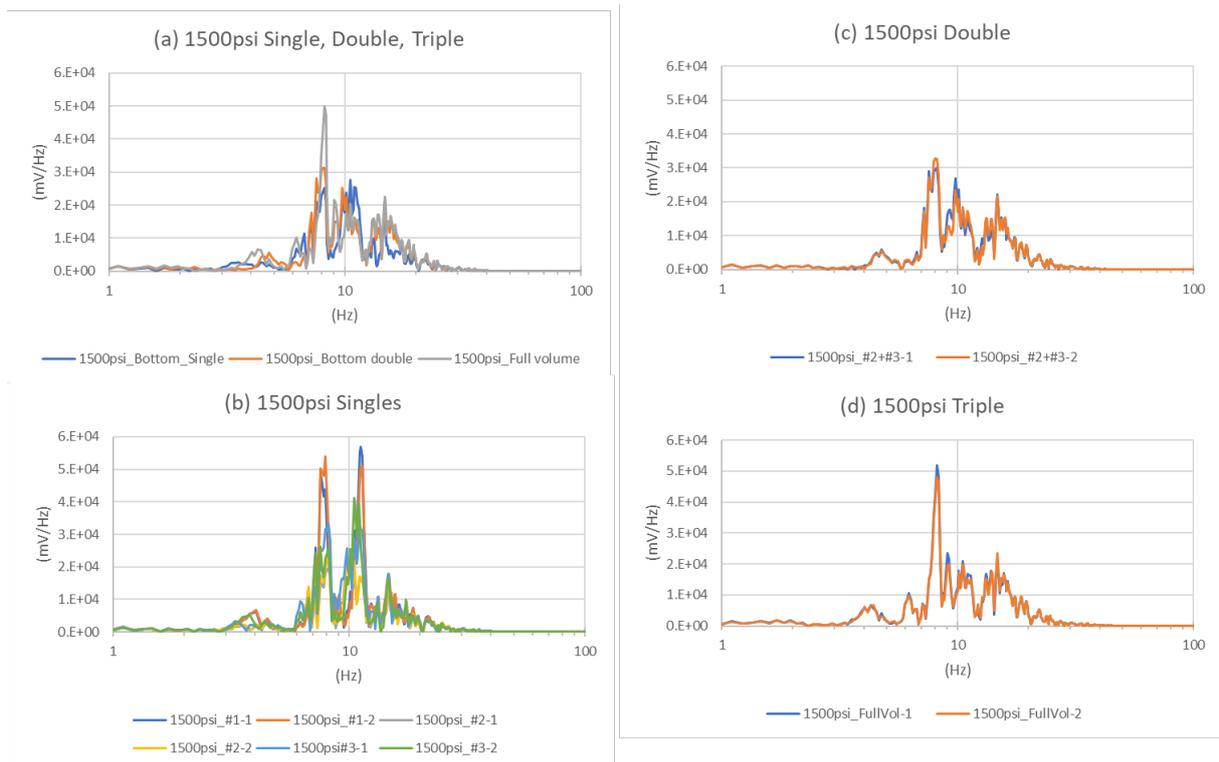


図 3 4 エアガン構成による上下動成分の周波数成分変化。いずれも 1500 psi による発振。(a)比較、(b)単エアガン、(c)重連エアガン、(d)三重連エアガン

上図(a)ではいずれも 15Hz 付近にピークが現れる特徴を示している。エアガンの構成が変わっても 15Hz 付近のピークが現れることは共通している。(b)はシングルエアガンを示すが、12Hz と 8Hz 付近に鋭いピークが#1 エアガンの発振で現れる一方、#2 エアガンおよび#3 エアガンではこの 2 つのピークは前者ほど明瞭ではない。#1 エアガンは底から 1.7m 高、#2 および#3 エアガンは底から 0.7m 高に位置することから、坑内位置の差による影響が示唆される。また(d)では三重連エアガンをういた場合には 8Hz 付近のピークが卓越することが示される。

次に本実験の三重連エアガンの 2 種類の動作圧による発振で得られた波形のスペクトルを 2022 年実験の三重連発振のそれと比較して下図に示す。

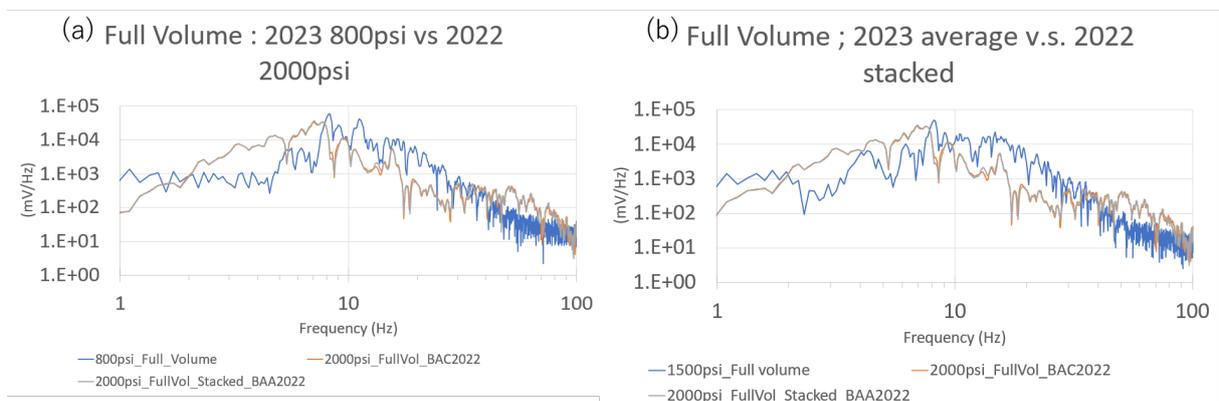


図3 5 2022年実験（京都大学防災研究所, 2023）との上下動成分周波数成分比較。(a) 動作圧 800psi 三重連発振、(b)動作圧 1500psi 三重連発振発振（再掲）。

上図(a)は 800psi 三重連発振、(b)は 1500psi 三重連発振をそれぞれ示している。いずれも 2022 年実験のそれと比較して 10Hz 以上の高周波成分が大きいことが示されている。また (a) より (b) のほうが 10Hz 以下の周波数成分が大きいことが示されている。

さらに遠方の京都大学防災研究所の常設観測点で得られた観測記録について述べる。京都大学防災研究所では桜島島内に 8 点、桜島から 50km 以内に 8 点の常設観測点を展開している（下図）。

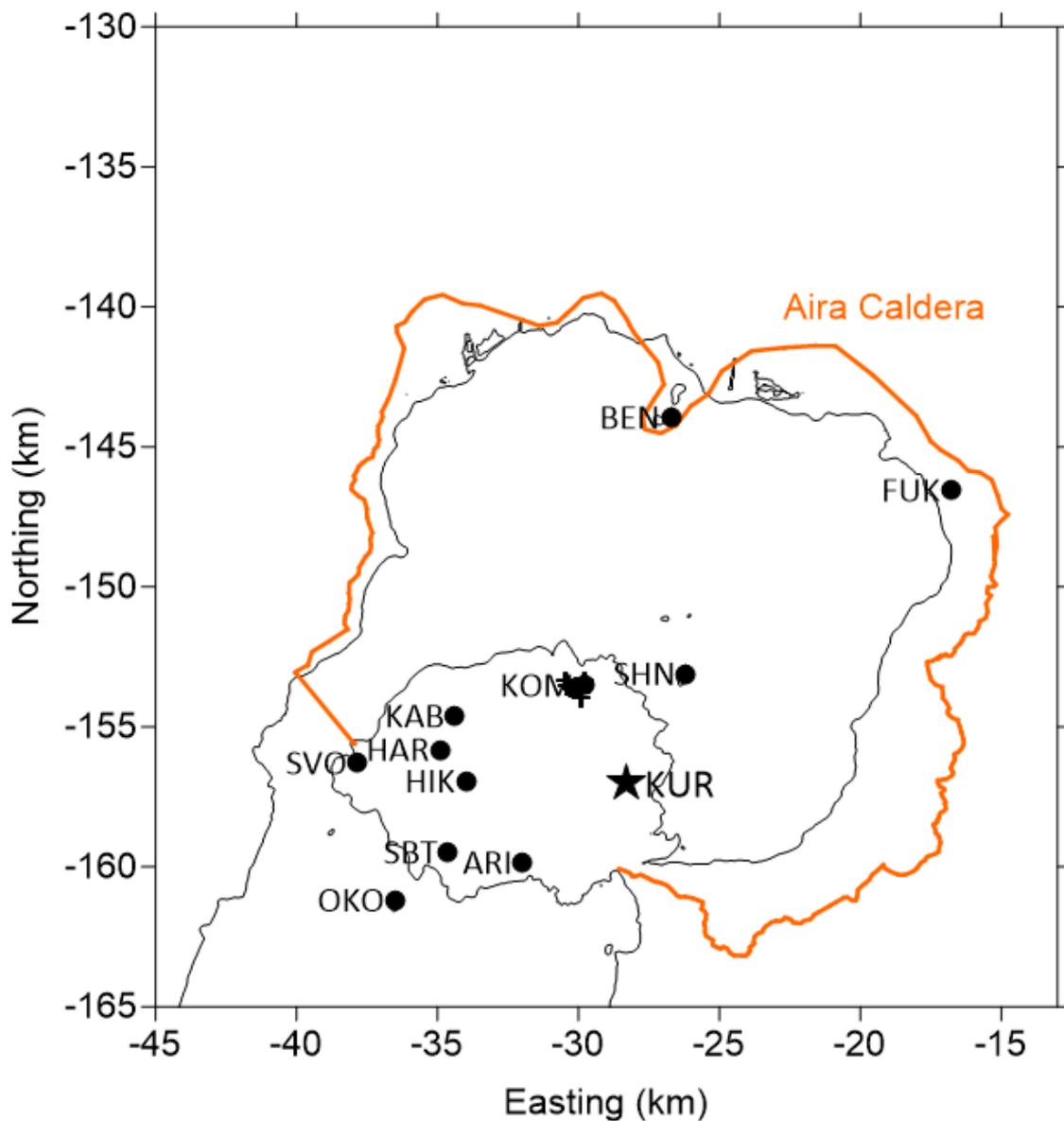
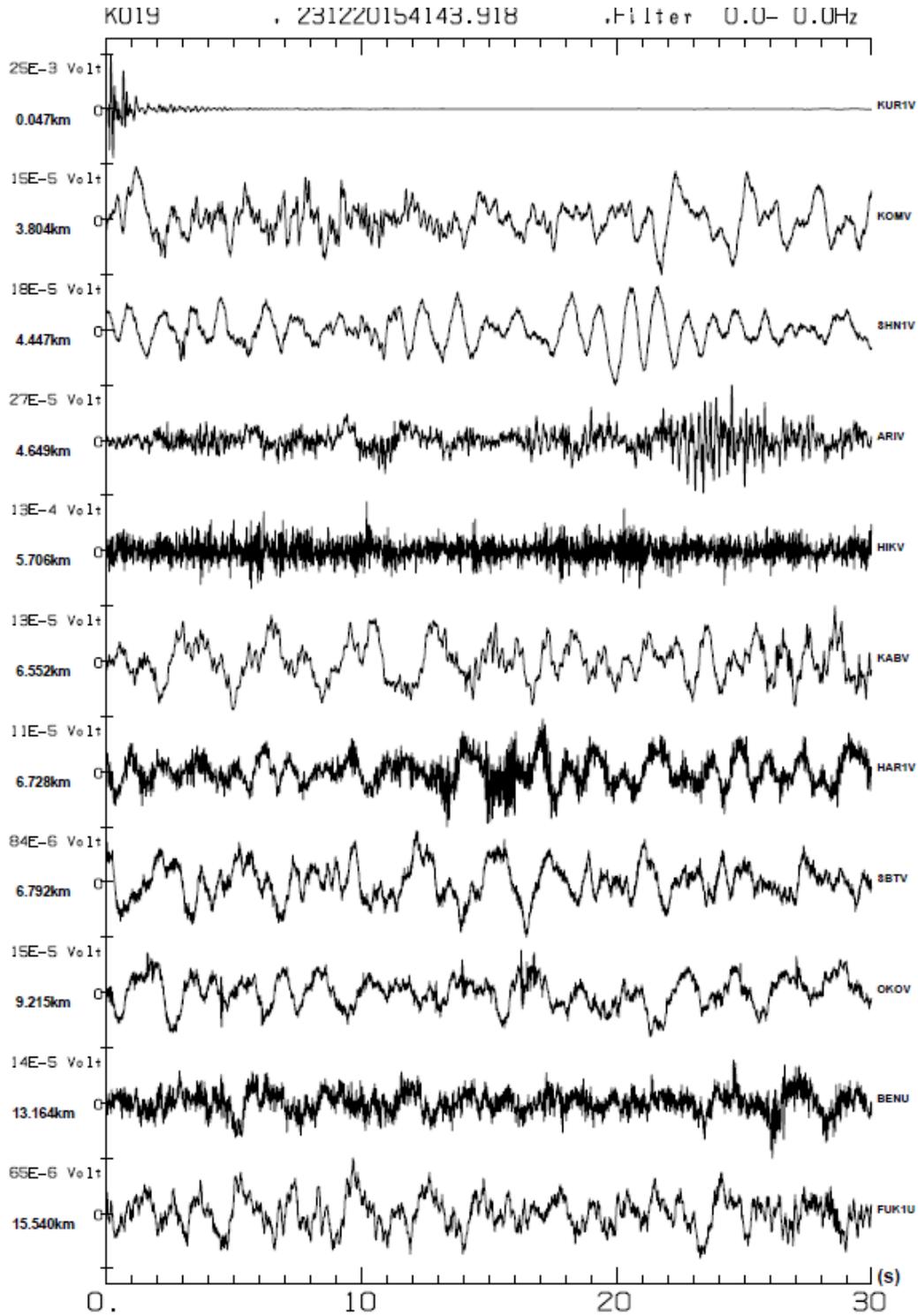


図3 6 京都大学防災研究所常設観測点。波形評価に用いた観測点を●で、発振点を★で示す。高免アレイを+で示す。2系平面直角座標による。

本実験でもっともエネルギー放射の大きかった 1500 psi 三重連発振の 1 回分の観測波形と、本実験の全ての発振で得られた観測記録を重合したうえにフィルター処理を施した波形とを下图に示す。

(a)



(b)

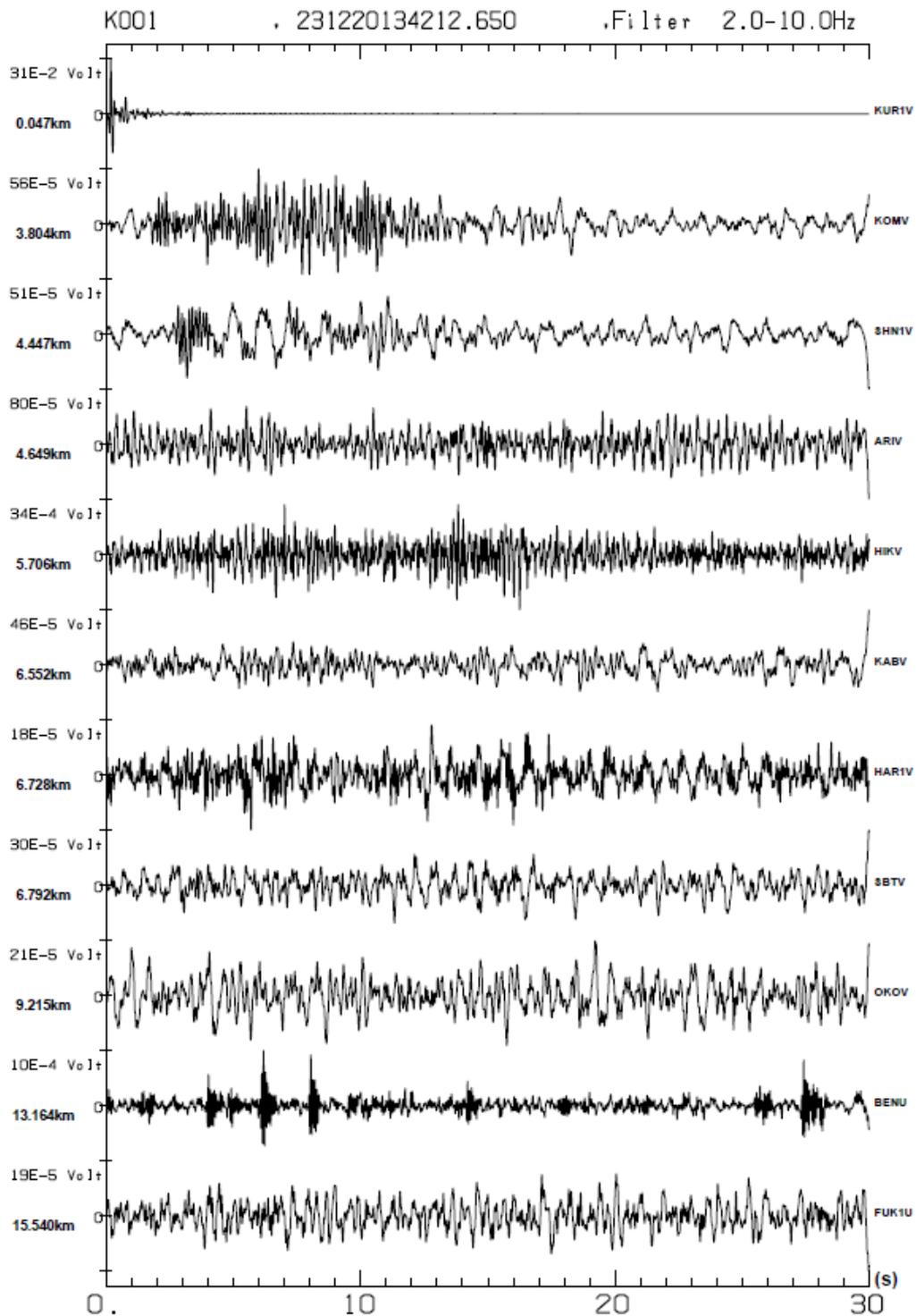


図3-7 遠方における上下動成分観測波形。(a)1500 psi 三重連発振、(b)全発振(20回)重合の上帯域通過フィルター(2-10Hz)処理後波形。いずれも各記録の最大値で振幅を正規化し、各波形左端に振源距離を表示する。発振時刻は0秒である。

上図(a), (b)いずれの場合も振源距離6.55kmのKAB観測点では上下動成分の4秒付近に初動を認めることができる。また(b)では重合の上フィルター処理をすることでS/N比改善の効果が認

められる。しかしそれ以遠の鹿児島湾を挟んだ対岸の観測点 BEN や FUK では発振による波の到来を見いだすことはできなかった。過去に黒神観測室構内で行われた深度 10m における 20kg 発破の観測（筒井他，2010;2011;2013;2014）では振源距離 6km までは初動が確認できていることから、本実験による 1500psi 350 cuiX3 をはじめとする 20 回の発振の重合結果は、S/N 比の点からは 20kg のダイナマイト発破と同等であることが示された。

(1) - 2 - 4. 考察

狭小空間内のエアガン発振による坑内衝撃波形と坑外の観測波形を知ることが目的として、実際の実験を評価するための数値シミュレーションを行った。

令和5年度実験とこれまで行われた基礎実験（京都大学防災研究所，2021；2023）との条件を下表に整理する。

表7 エアガン発振環境の比較

項目	試験発振坑	住吉池
直径	2.5 m	550 m
発振点水深	9.7 m	20 m（最大 30 m）

令和5年度実験の試験発振坑と既往の実験で用いた住吉池の大きな違いはエアガン周囲の空間である。エアガンクラスタのサイズは1.5 m四方であるのに対して、住吉池は直径550 m、試験発振坑 KURP は直径2.5 mである。住吉池では直径に対してエアガンクラスタサイズが1/367、KURP では1/1.67の比率になり、試験坑の直径が振源の周波数特性に強く影響する可能性がある。また、水深に関してはエアガン深度（Tow depth）を10 mとすると、住吉池では発振点水深の50%付近、KURP では発振点水深の90%付近にエアガンを位置させることとなり、このパラメータも振源の特性に強く影響する可能性がある。

a. 表層構造モデルとシミュレーション諸元

京都大学防災研究所(2020)で行われてきたシミュレーションの結果を振り返ると、エアガンの Tow depth が浅くなるとエアガンの効き、つまり振動エネルギーの放射効率が低下することが示されている。本試験発振坑の場合には Tow depth の差による放射効率の低減効果に狭小空間における発振による係数が掛け合わされてトータルな放射効率になることが予想される。

また、エアガンクラスタの空間サイズと試験発振坑の空間サイズが同程度のオーダーであることから周波数特性にも試験発振坑の周波数特性が影響することも予想される。

以上のことを考慮すると、シミュレーションとして次のような項目が必要であると考えられる。

- 1) 振源深さと動作圧に関する調査
- 2) 狭小プールにおける発振の影響の調査

シミュレーションには全成分を計算の対象とする差分法を用いて以下の仕様で数値計算を実施した。

表8 数値計算仕様

数値計算手法	時間領域有限差分法
--------	-----------

グリッド配置	スタガードグリッド
空間方向離散化精度	4 次
時間方向離散化精度	2 次
グリッド間隔	0.1 m
X 方向グリッド数 (含側面吸収境界)	1520 (152 m)
Y 方向グリッド数 (含側面吸収境界)	1520 (152 m)
Z 方向グリッド数 (含底面吸収境界)	720 (72 m)
吸収境界グリッド数 (片面)	100
時間ステップ間隔	1.0 E-5 s
時間ステップ数	101001 ステップ (- 0.01~1.0 s)
振源波形生成アプリケーション	Nucleus+

坑外観測波形のシミュレーションに必要な構造モデルは、多田 (2019MS) が黒神観測室構内で行った屈折法地震探査によって推定された P 波速度構造をもとにして構築した。多田 (2019MS) が実施した 2 本の屈折法測線の一つは試験発振坑付近を横断している。多田 (2019MS) による大局的な地震波速度構造を下図に示す

黒神観測室構内地震波速度

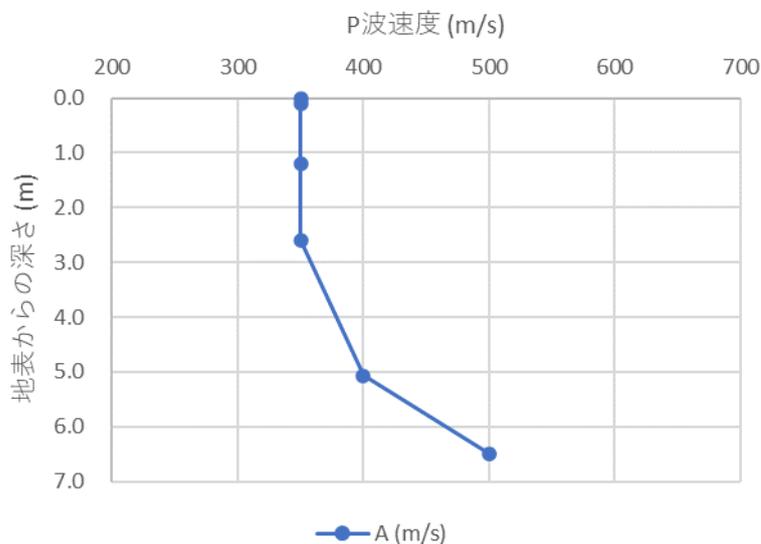


図 3 8 黒神観測室構内地震波速度 (多田, 2019MS)。A 地点は試験観測坑付近。

上図地震波速度構造の解釈は次のようなものである。観測室構内の地表から 3m 深までは 340 m/s を示しておりこれは軽石層に相当する。3m 以深から速度が漸次増加し始め 5m 深では 400 m/s に達した後に速度が急増している。5m 以深で速度勾配が急増することは実際の

試験坑建造時の掘削において 3m-5m 深で溶岩流表層の塊状溶岩が出土しはじめることと、深くなるほど塊状溶岩の分布密度が増大していたこと（付録 1 参照）と対応している。また掘削時の観察から発振坑をとりまく軽石層は水に不飽和であったことから密度を 300～400kg/m³ に設定した。

以上のことを総合して下図の試験発振坑シミュレーション地震波速度構造モデルを構築し、以降の波形合成計算に用いた。

なお、坑内の音響インピーダンスは $1.5 \times 10^6 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ 、坑外の軽石層の音響インピーダンスは $1.36 \times 10^5 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ とした。

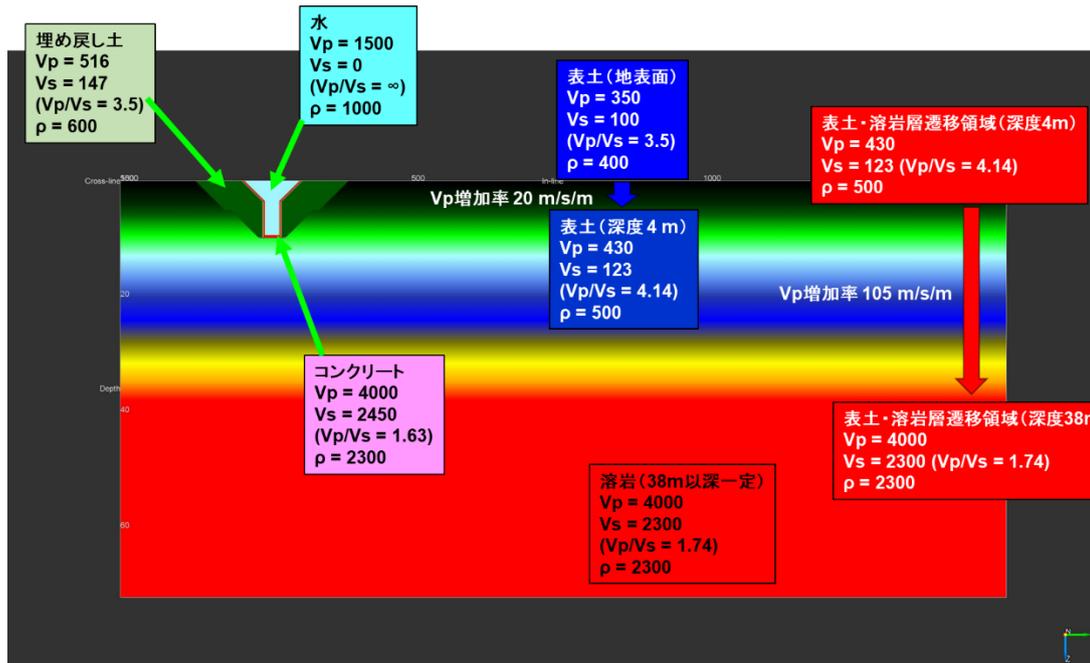


図 3 9 試験坑シミュレーションで用いた表層構造モデル

波形観測点は発振坑直下 20 m, 50 m, 100 m の深度に設定したほか、地表では発振坑中心から 20m, 50 m, 100 m に設定し、理論観測波形（地動速度）を得た。

発振条件の検討

以下の発振条件で波形合成を行った。作動圧とエアガン Tow Depth との組み合わせをそのときの放出エネルギー (J) とともに下表に示す。

表 9 発振条件と放出エネルギー量

Tow Depth	1000 psi (50 Mpa)	1500 psi (90 MPa)	2000 psi (13.6 MPa)
8.7 m	51688	36765	22418
7.7 m	52488	37409	22886
6.7 m	53401	38148	23415

同じ動作圧であれば Tow depth が浅いほどエネルギーが大きくなる傾向が上表に示されている。

なお上表に示される放出エネルギーは無限に広がる水中のエアガンのチャンバ出口（ポート）における値であり、発振坑から周囲の地層に放出されるエネルギー値そのものではない。

b. 計算結果

それぞれの条件におけるピーク圧力の深度分布を下図に示す。

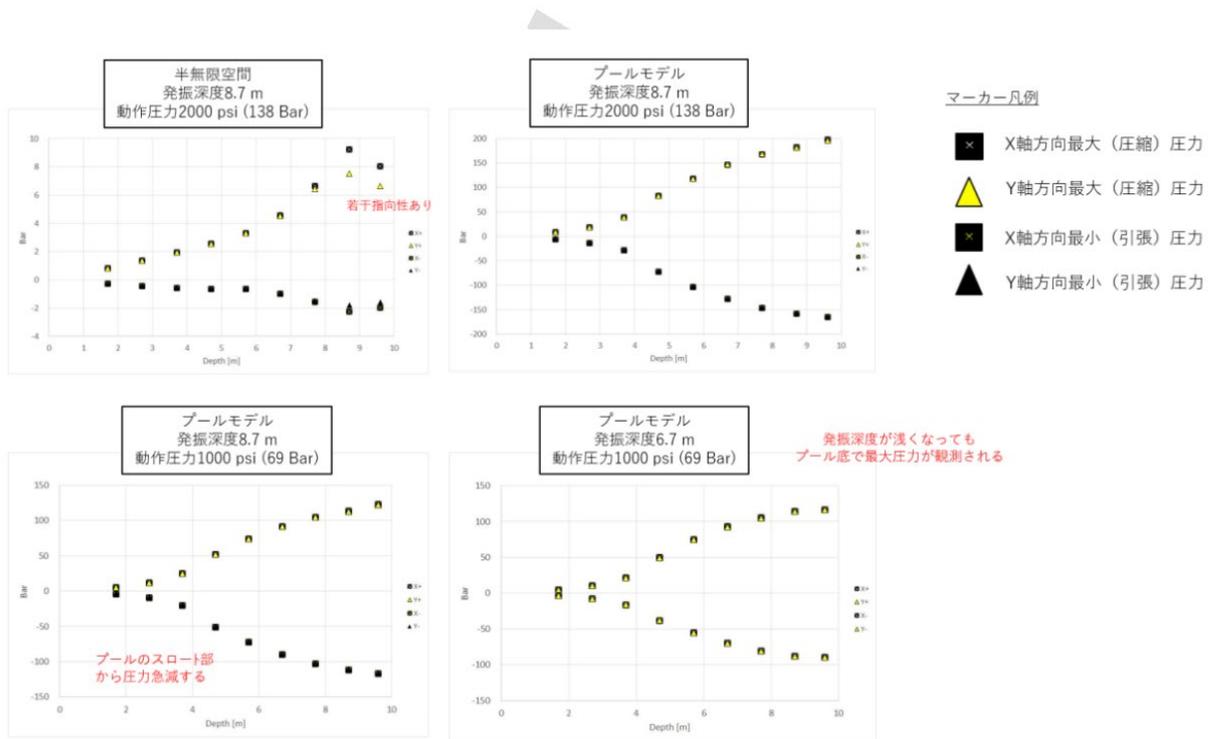


図4 0 ピーク圧力

発振坑中の深度が増大するにつれてピーク圧力が増大することが示されている。注目されることは発振坑底でエアガン作動圧の2倍の圧力が推定されていることである。

坑底における最大圧力をエアガン Tow depth に注目して整理した図を下に示す。

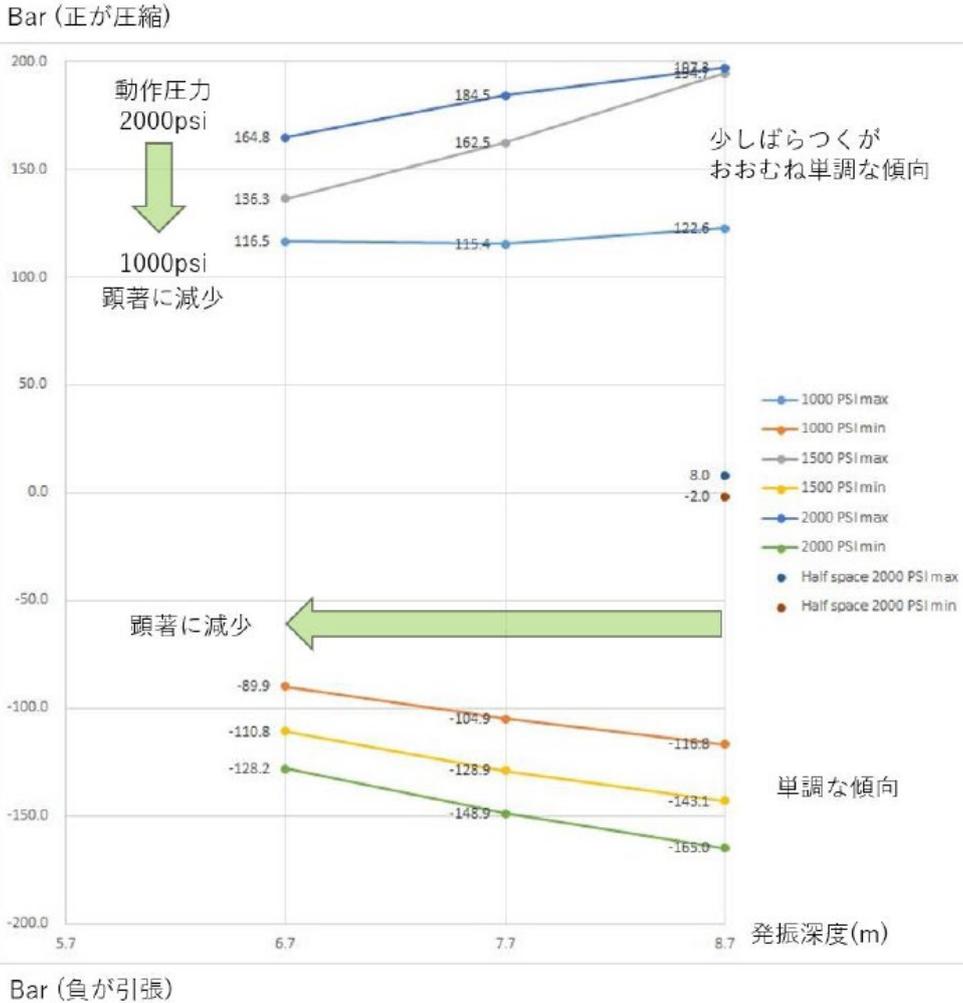


図4 1 発振深度とピーク圧力。作動圧 2000 psi 時の 8.0,-2.0 の値は無限水中におけるピーク圧力

上図では発振深度を減少させると最大圧はそれにともなって小さくなることが示されており、2000 psi では水深 8.7m から 6.7m に減少させるとピーク圧力は 2 割減少するが、それでも無限水中の 15 倍に達する値を示す。また作動圧が小さくなると Tow Depth 減少にともなう最大圧の減少は顕著ではなくなり、1000 psi では水深減少の影響は顕著ではない。

次に作動圧に対する最大ピーク圧力を下図に整理する。

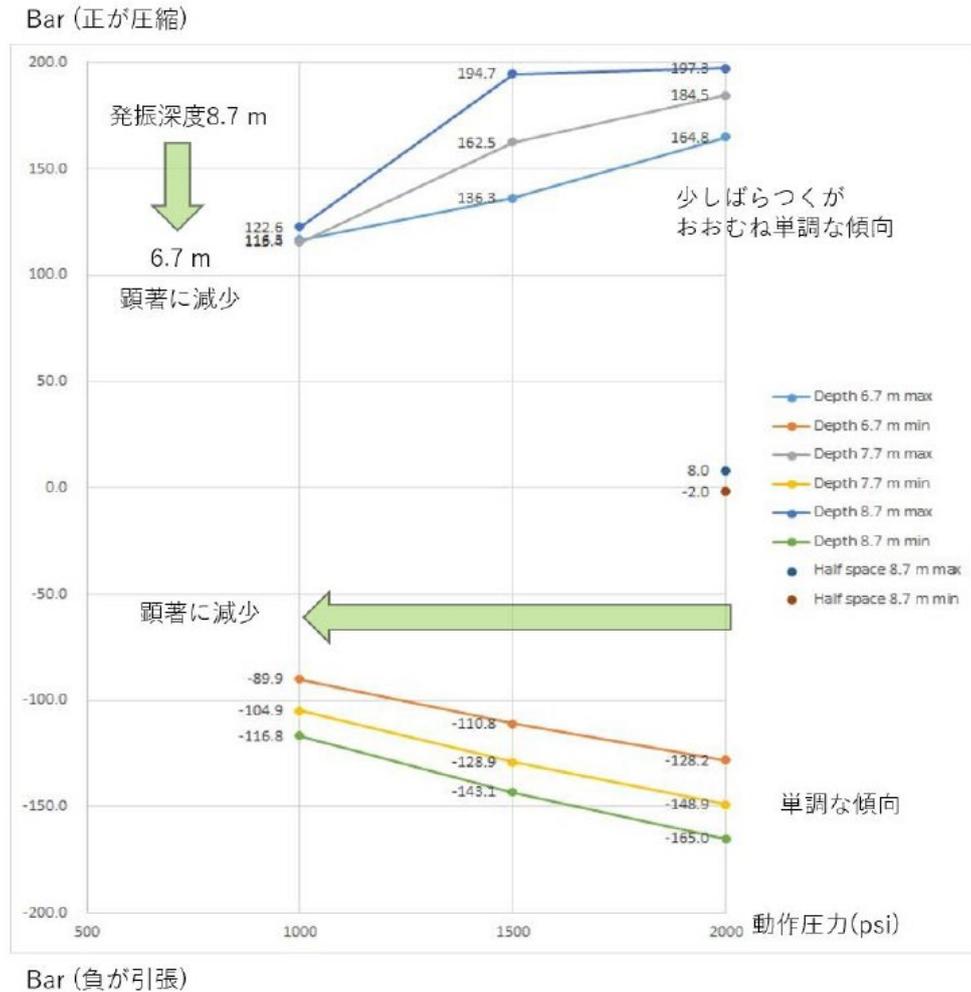


図 4 2 動作圧とピーク圧力

作動圧を減少させるとそれとともに単調にピーク圧力が減少することが示されるが、それでも無限水中におけるピーク圧力の 15 倍である。

以上のことから発振坑における発振では坑底で最大のピーク圧が出現し、少なくともその値は無限水中で観測される値の 15 倍であることが判った。

c. 試験発振坑直下の波形

実際の観測点に到達する地震波は、試験発振坑の外に放出されるエネルギーで構成される。本数値実験では試験発振坑の直下 50m における理論波形を計算して試験発振坑から発生する振源波形を合成した。

Tow depth 1000 psi, 1500 psi, 2000 psi のそれぞれの動作圧合成された振源波形を下図に示す。

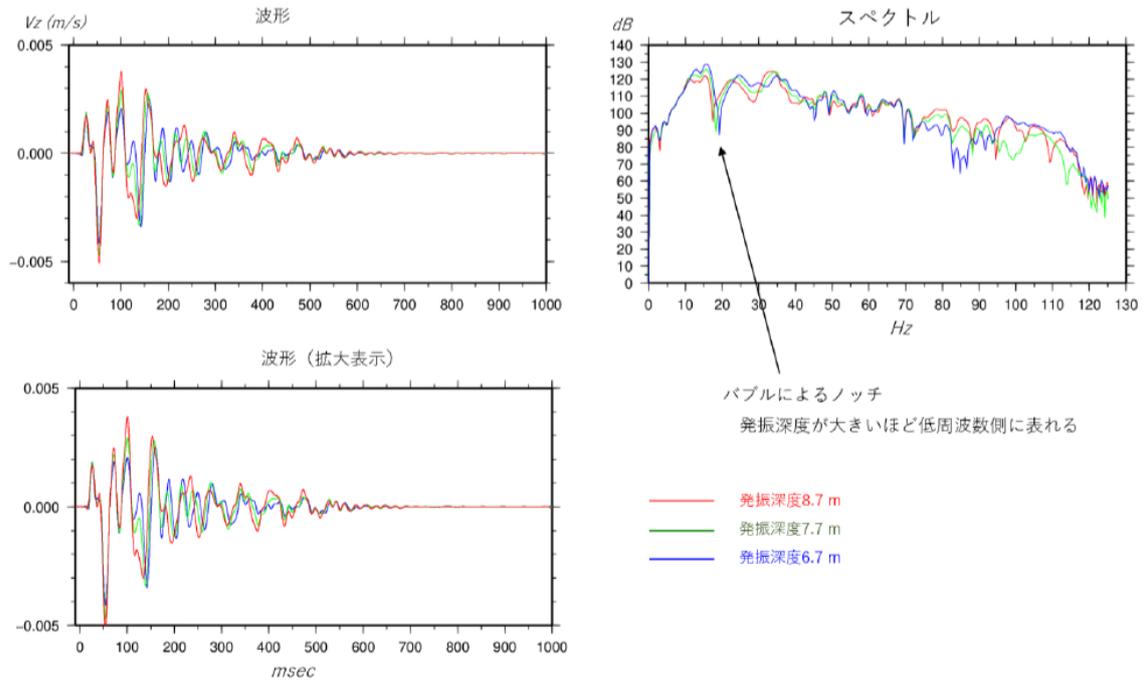


図 4 3 1000 psi

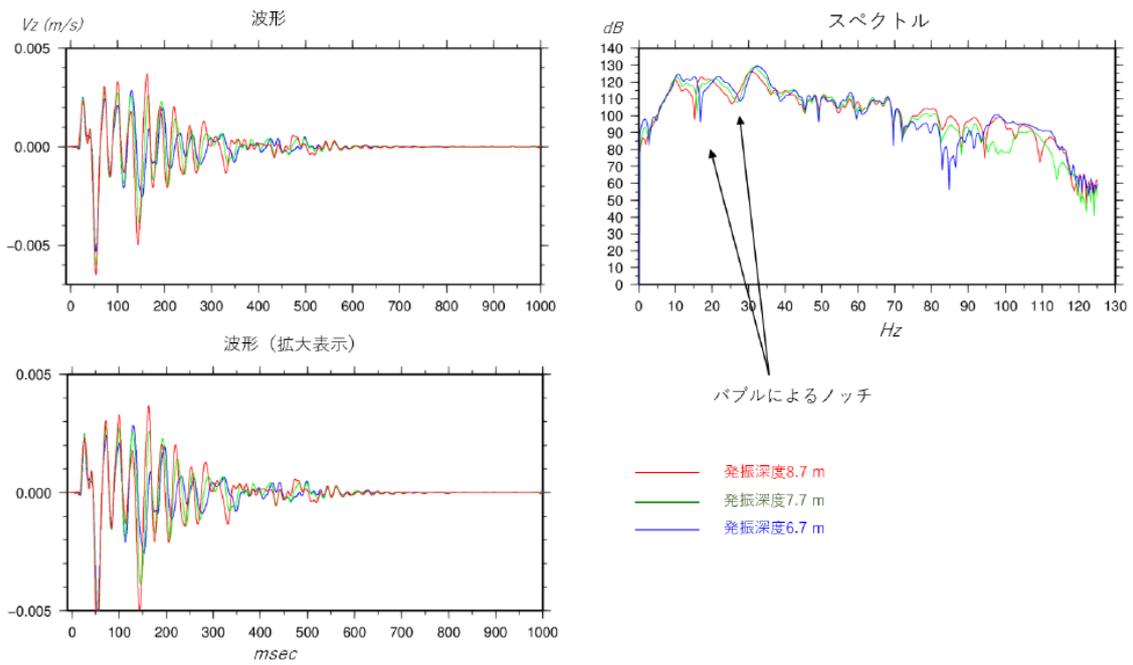


図 4 4 1500 psi

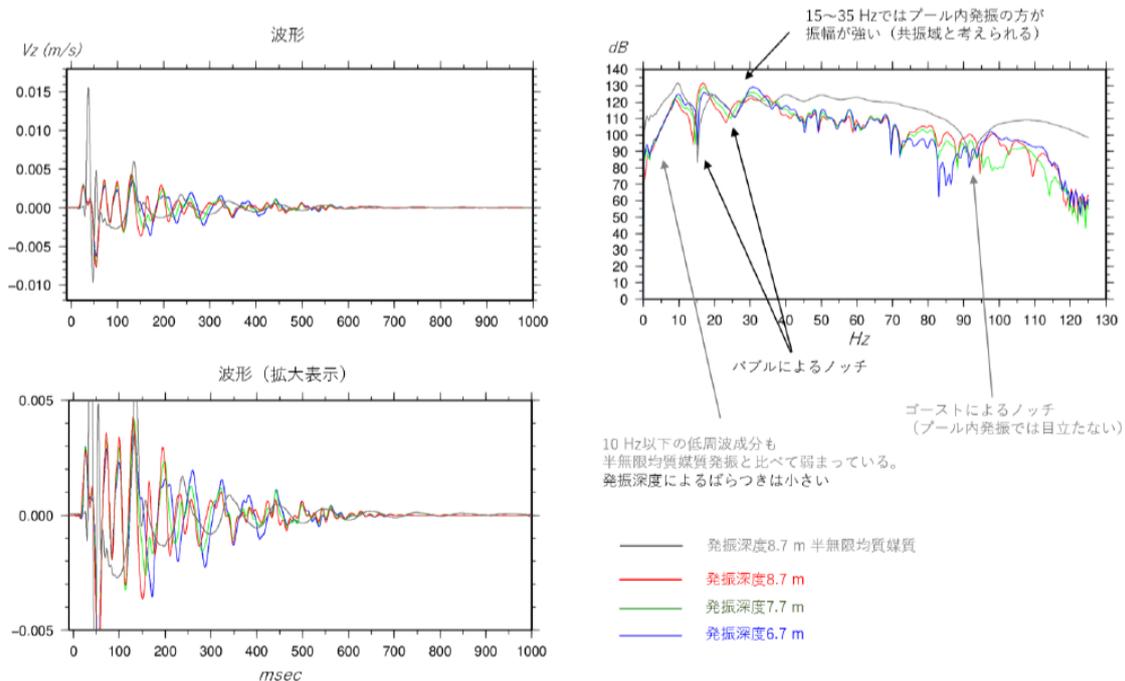


図4 5 2000 psi の発振に対するシミュレーション結果。半無限均質媒質における発振結果とともに示す。

上図では今回の発振坑による発振と半無限均質媒質中での発振とを比較している。振源から 50m 下方において観測された半無限媒質中での発振では最初に衝撃相に相当する大振幅の孤立した正極性パルスとそれに引き続くやや周期の長いバブル相を反映した単純な波形が得られるのに対して、発振坑中の発振では最初の衝撃相に相当する正極性大振幅パルスが認められない一方で顕著な負極性パルスとリングングを伴った複雑な波形が得られることを示している。負極性のパルスはその走時の点で表面で反射した衝撃相に相当し、半無限媒質中の発振と発振坑中の発振とで同程度の振幅で共通に認められる。したがって発振坑中の発振では、もっとも大きなエネルギーをとまって下方に伝わっているのは衝撃相の表面における反射であると考えられる一方で、半無限媒質中の発振記録の先頭に見られるもっとも振幅の大きい衝撃相の大部分は直接下方に伝わっていないと推察される。この負極性パルスとリングングを伴う記録波形の特徴は発振坑を使用した発振において作動圧やエアガン深度を変化させても現れることから、発振坑の狭小空間を反映していると考えられる。また半無限媒質中の発振で見られる先頭の大きなエネルギーは発振坑内発振では水中の共鳴によるリングング相として下方に順次放射されるか、あるいは横方向に放射されている可能性がある。

次に波動場の空間分布を検討する。発振から 40 ms 経過後の上下成分加速度の空間分布（スナップショット）を次の図に示す。(a)図はモデルに与えた振源波形を示し、赤矢印はスナップショット時刻を示す。(b)および(c)は発振によって生じた波動場の空間分布を示す。両者を比較すると下方に進行する波面の振幅は(b)より(c)のほうが明瞭である。(b)の最大の特徴は傾斜した波面を持ち側方に放射される波動場が非常に明瞭なことである。側方に放射される波面は垂直ではなく傾斜していることから、斜め上方に放射されている波であろうと考えられる。また(b)では与

えた発振坑の縦断面が明瞭に認識できる（大きな加速度を示している）ことから、発振後に大きなエネルギーが発振坑内に残留することを示している。

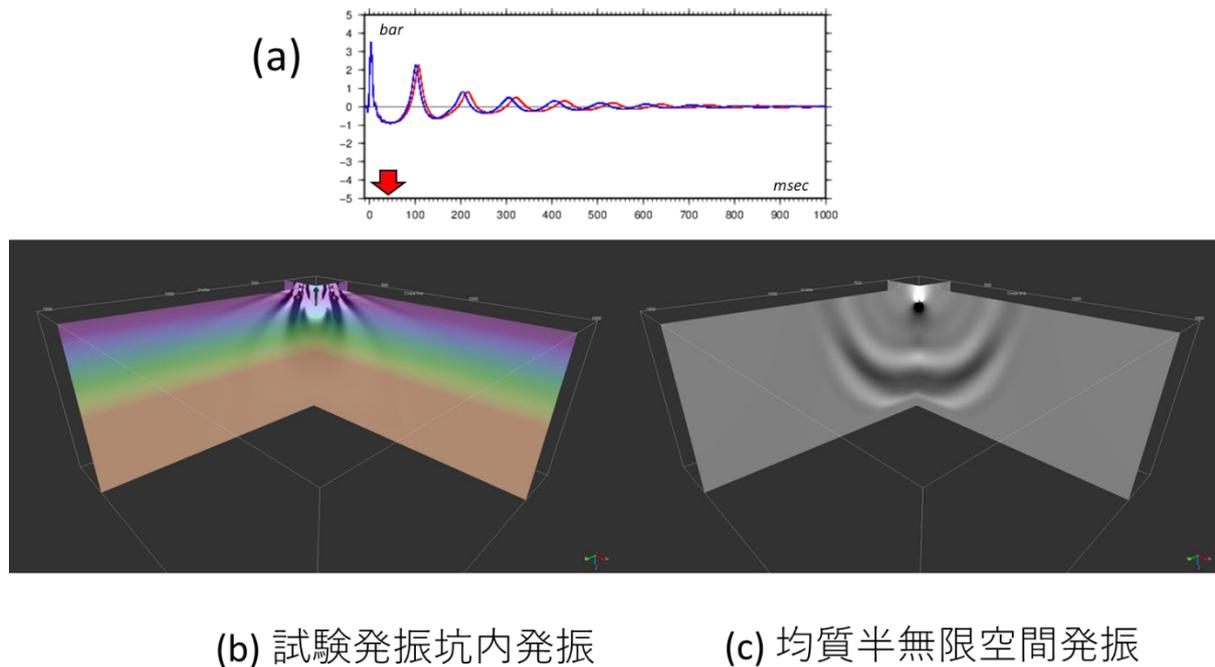


図4 6 発振から 40ms 経過後の上下加速度振幅の空間分布。動作圧 2000psi, 発振深度 8.7m の場合。(a) エアガン発振波形、(b)発振坑内発振（本実験に相当）、(c)均質半無限空間における発振。濃色ほど大きな振幅を示す。

発振坑内の大きなエネルギーの残留はより遅い時刻のスナップショットでも明瞭に確認できる。下図は発振から 90ms 経過後のスナップショットを示す。

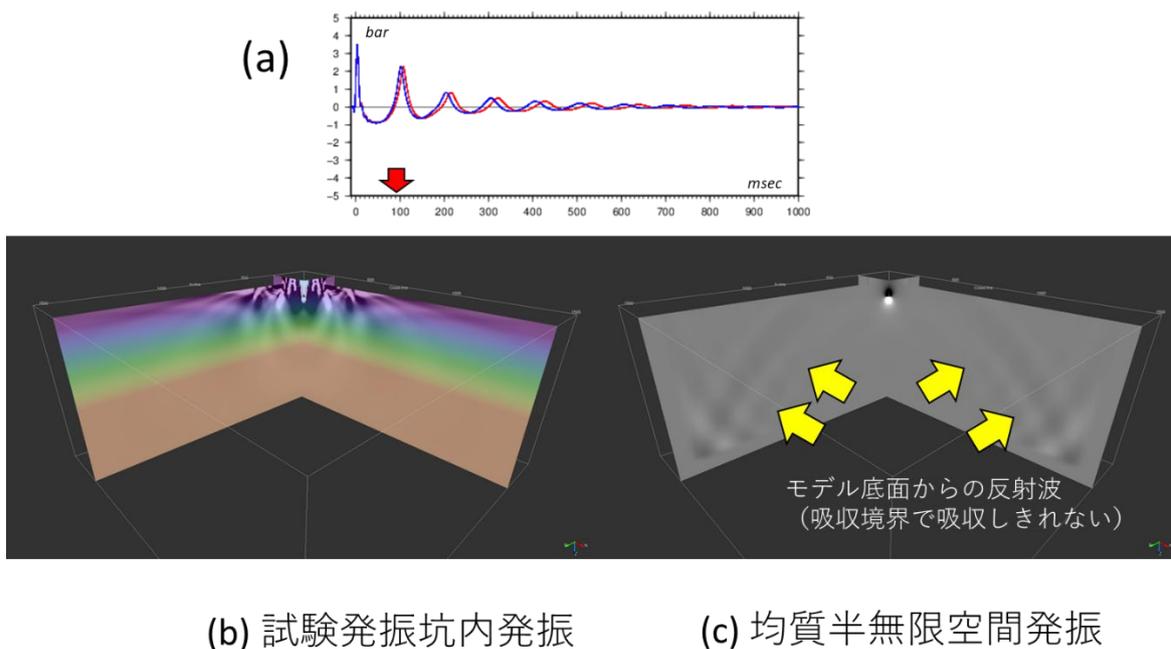


図4-7 発振から90ms経過後の上下加速度の空間分布。動作圧2000psi、発振深度8.7mの場合。(a)エアガン発振波形、(b)発振坑内発振(本実験に相当)、(c)均質半無限空間における発振。(c)中の黄色い矢印はモデル境界で発生する偽反射波を示す。濃色ほど大きな振幅を示す。

上図(b)では発振から90ms経過しても発振坑の輪郭が明瞭に認められることから、この時点でも依然として大きなエネルギーが発振坑内に残留していることが示されている。また(c)では主要な波面が領域から走り去った様子が示されているのに対して、(b)では依然として発振坑の近傍の表面付近に大きな振幅を持つ波が発達していることも特徴である。表面付近に大きな振幅をもつ波は垂直方向の振幅分布パターンは複雑であるが、その特徴から表面波であろうと考えられる。

d. 発振シミュレーションのまとめ

黒神観測室構内における発振坑をモデル化して発振シミュレーションを行った結果、次のことが判明した。

発振坑の狭小空間でのエアガン発振ではエアガン近傍の衝撃圧が半無限媒質での発振のその1.5倍に達することが明らかになり、発振坑壁は半無限媒質内発振の場合の1.5倍以上の圧力にさらされている可能性のあることが判った。

また坑内発振において近傍の水圧波形は半無限媒質のそれに比べて複雑で継続時間の長いものになることが示された。この傾向は動作圧あるいはエアガン深度を変えても変わらなかったことから、狭小空間における発振の特徴であると考えられる。

また発振坑内における発振で発生した地震波を発振坑直下で見た場合、負極性をもったパルスとリング相が卓越し波形継続時間が長くなる傾向が認められた。この傾向も動作圧あるいはエアガン深度を変えても変わらなかったことから、狭小空間における発振の特徴であると考えられる。このことから狭小坑内における発振では半無限媒質における発振よりも坑内共鳴や側方放射に分配されるエネルギーが大きい傾向があることが示された。

e. 地震反射の変化の観測の有効性の検討

始良カルデラでは為栗他(2022)が自然地震記録から得られた地震波速度トモグラフィーによって地表から15kmの深度までの地震波速度構造を報告している。ここでは為栗他(2022)が指摘した深さ15kmを中心とするS波低速度領域の速度変化が黒神試験坑KURPにおける発振によって得られるであろう観測記録におよぼす影響について数値実験を行った結果について報告する。

数値実験では為栗他(2022)が得た地震波速度構造から下図の3測線に沿った地震波速度断面スライスを作成して二次元シミュレーションを行った。測線1は始良カルデラ西部を横断する京都大学防災研究所(2021;2023)の測線展開をなぞったKURPと始良市住吉池とを結ぶ測線、測線2は始良カルデラ中央部を横断してKURPと既設観測点KAJとを結ぶ測線、測線3は始良カルデラ東部を横断する測線とした。なお今回の測線1の展開は既往の基礎実験の観測(京都大学防災研究所, 2021, 2023)の逆測線に相当する配置であるため、後述の12.5km地点は海中に相当し、15km以遠が陸地に相当する。

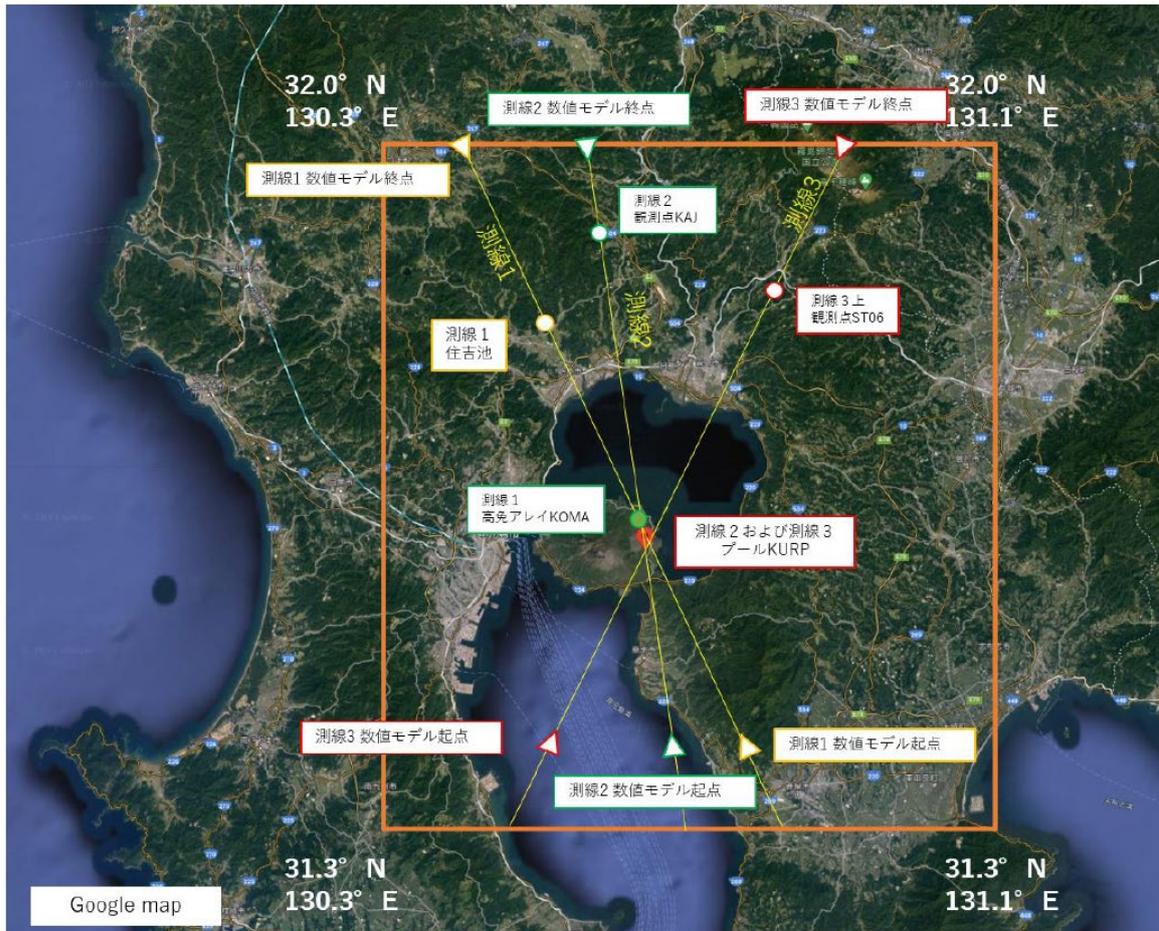


図 4 8 数値実験測線図

数値実験の速度構造モデルには設定された測線の近傍の為栗他 (2022) の計算グリッドの節点で得られた速度値を内挿したものを用いた。為栗他 (2022) の地震波速度構造から作成した速度構造スライスの例と隣接グリッド間の垂直方向の内挿に用いた重みとを下図に示す。

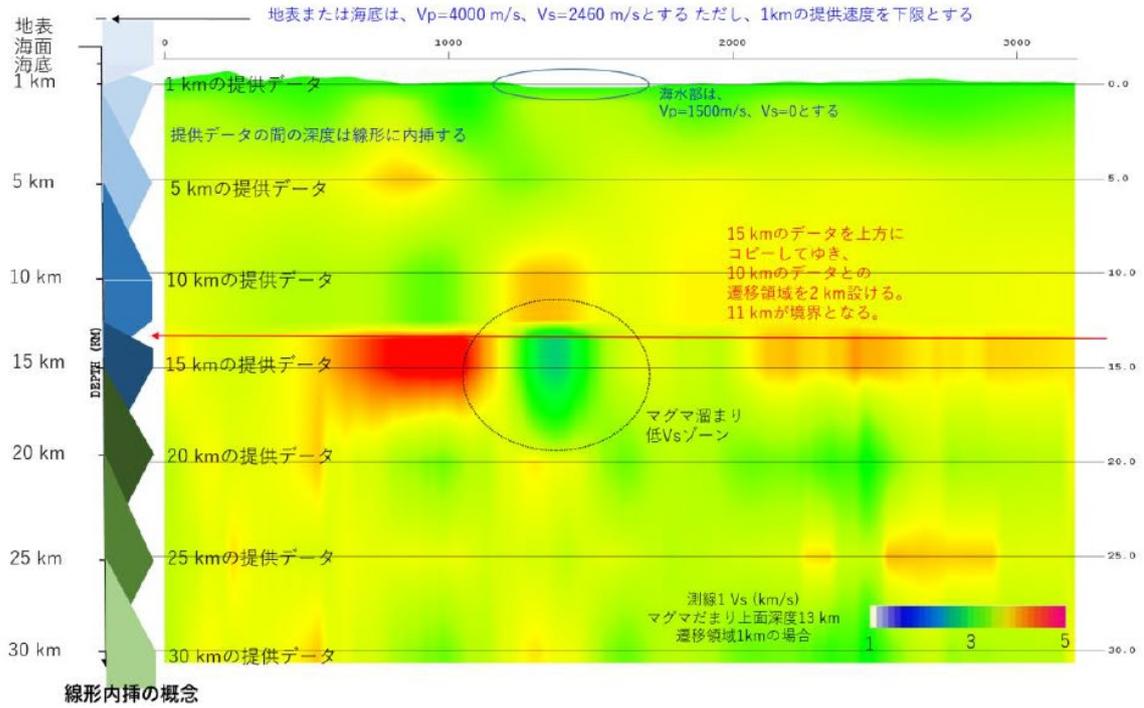


図4-9 為栗他(2022)をもとにした速度構造スライスと数値実験用速度構造モデル生成用の内挿に用いた重み

数値実験で得られた地動速度波形の例を下に示す。数値計算では垂直成分と測線に沿った方向の水平成分の地動速度を得た。

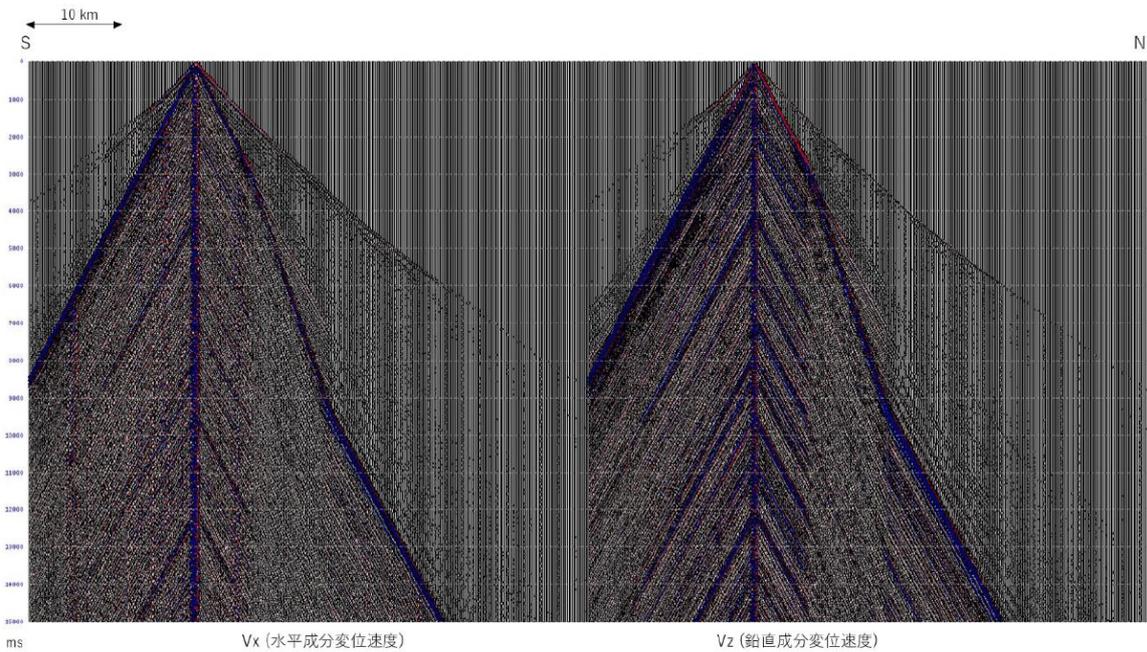


図5-0 合成波形例

上図に示されるように数値計算結果は複雑な波形が得られ、そのままでは注目すべきカ

ルデラ深部の構造が寄与する反射波の判別が難しい。カルデラ深部からの反射波の識別を容易にするために、上で得られた波形記録から為栗他(2022)のそれぞれの深度の平均速度を与えた横方向に一樣な速度構造で数値計算を行った結果を引き算した波形記録(ここでは「参照波形」と呼ぶことにする)を作った。その結果の例を下図に示す。

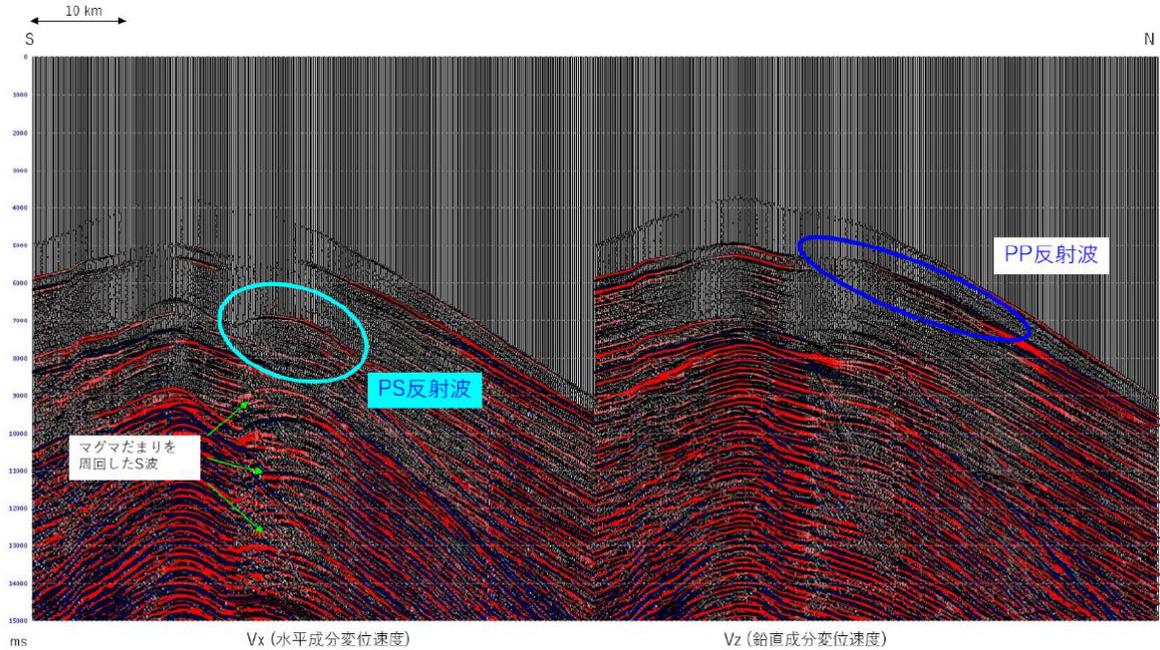


図5 1 差分波形記録。モデル構造理論波形振幅から参照構造理論波形振幅を引き去ったもの。

設定された3つの測線において参照波形から得られた反射波の走時曲線を下に示す。

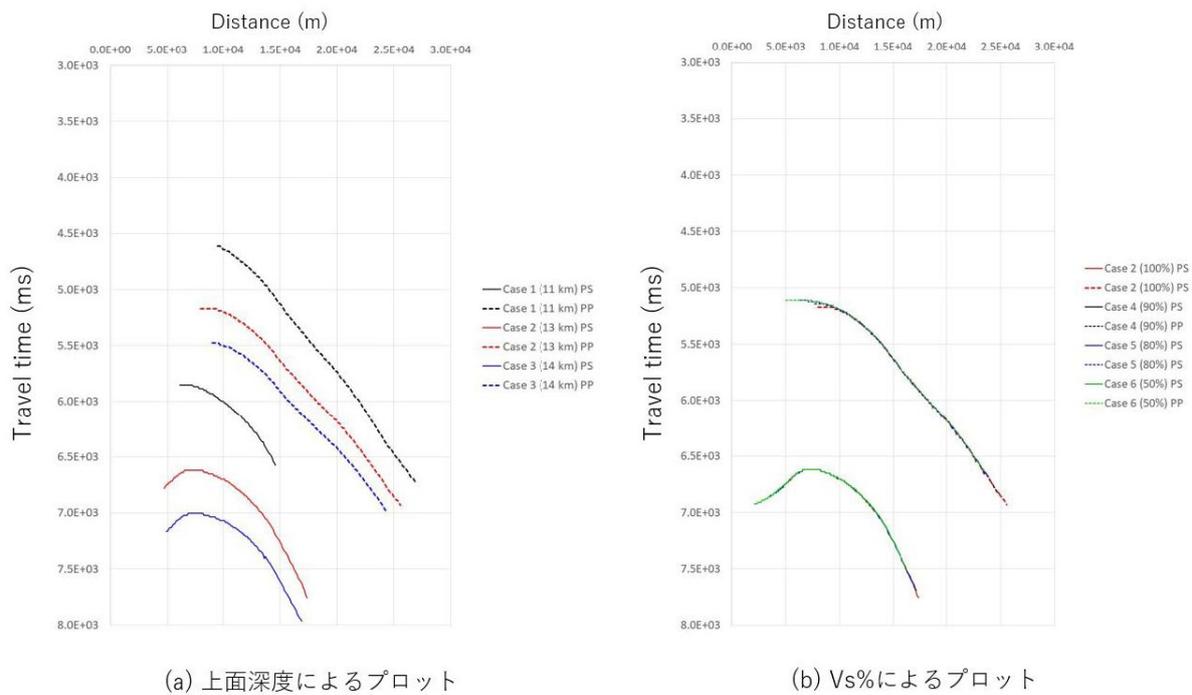


図5 2 測線 1 走時曲線 (a)は低速度領域の上面深度を変えた場合の反射波走時曲線、(b)は反射面コントラストを変えた場合の反射波走時曲線を示す。

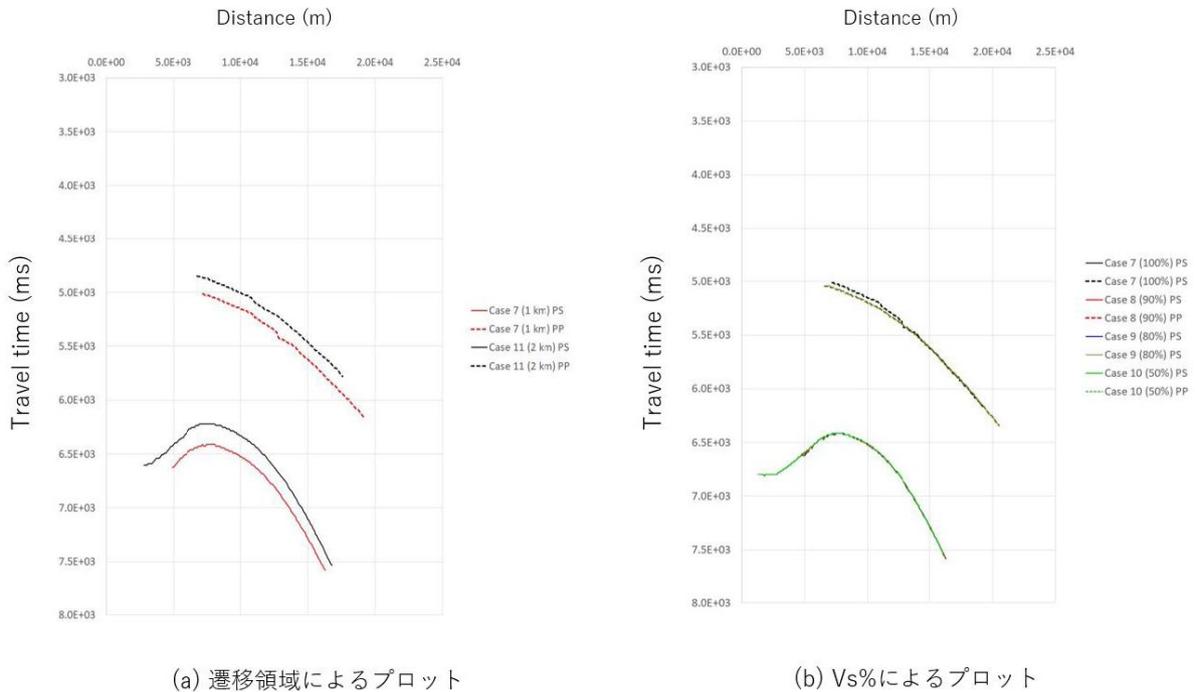


図5 3 測線 2 走時曲線。(a)は低速度領域上面の速度勾配を変えた場合の走時曲線、(b)は低速度領域上面のコントラストを変えた場合の走時曲線

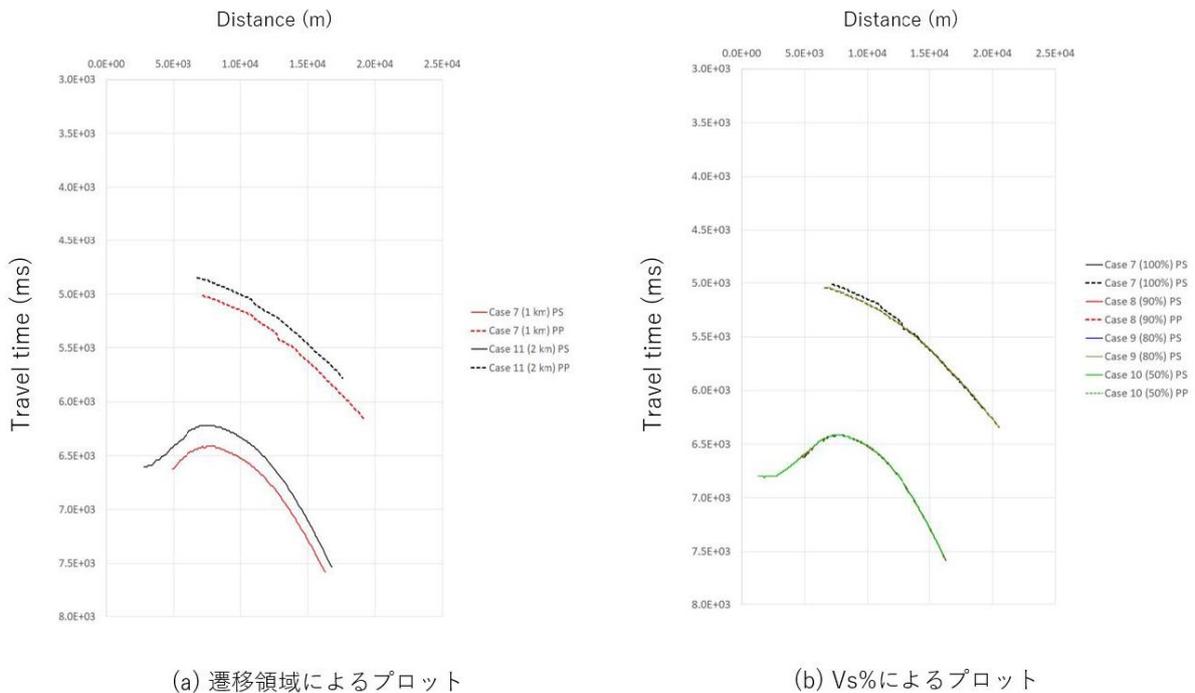


図5 4 測線 3 走時曲線。(a)は低速度領域上面の速度勾配を変えた場合の走時曲線、(b)は低速度領域上面のコントラストを変えた場合の走時曲線

度領域上面のコントラストを変えた場合の走時曲線。

上図では低速度領域のコントラストあるいは速度勾配を変化させても走時曲線は目だつて変化しないことを示している。反射面深さの変化は反射波走時の変化として現れることが示されている。また走時曲線からは低速度領域上面の速度遷移領域の幅を変えると PS 変換反射波の走時が変化することが示されている。

低速度領域上面のコントラスト変化は波形振幅の変化に反映される。為栗他(2022)が指摘した深さ 15 km を中心とする S 波低速度領域の S 波速度を変化させた場合の波形記録の変化を下に示す。S 波速度の低下量が大きいほど PS 変換反射波の振幅は大きくなる傾向がある。

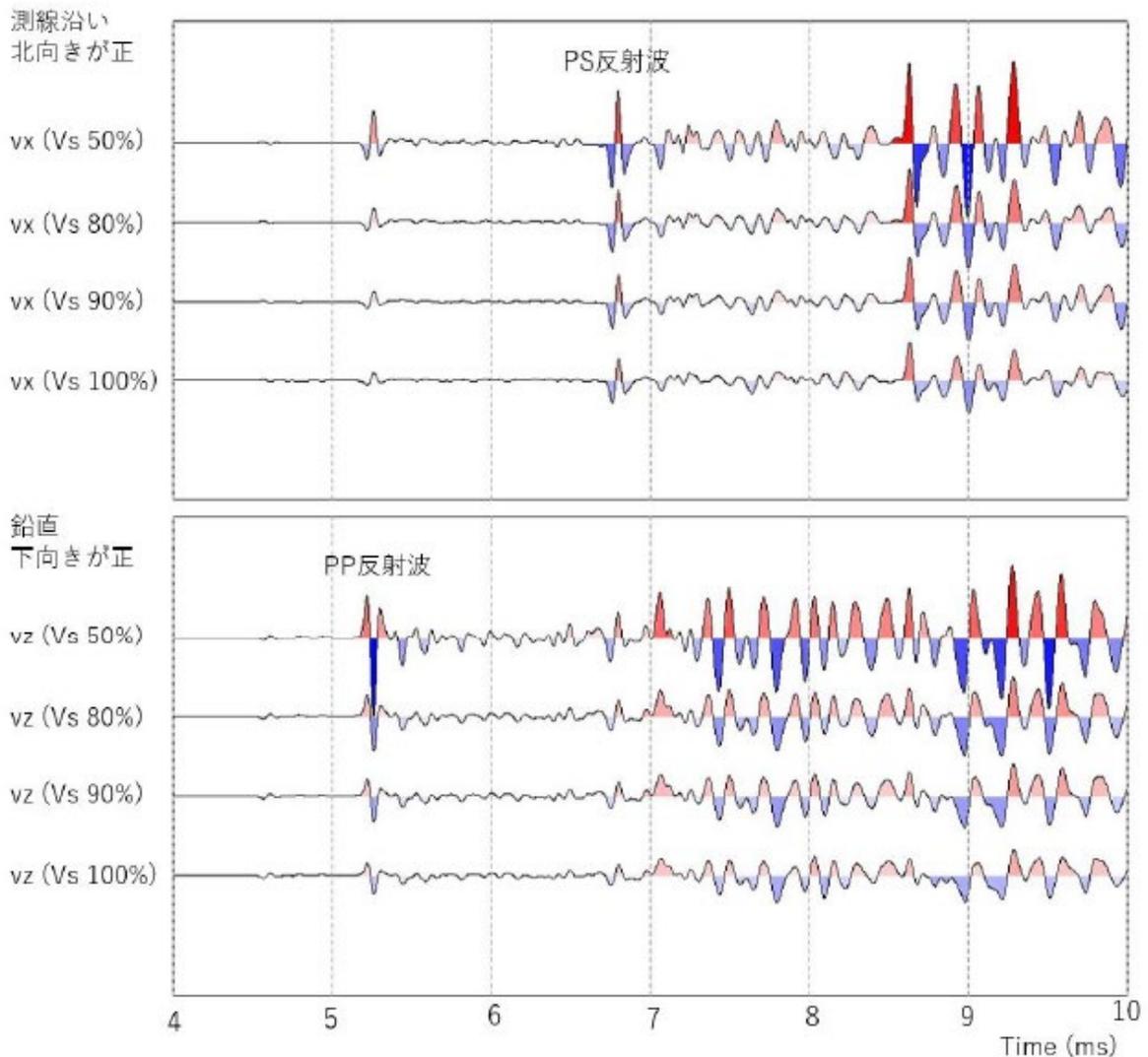


図 5 5 低速度領域速度変化による波形変化の検討 (測線 1 KURP から 12.5 km 地点)。上図 (a)放射方向水平成分、下図(b)上下成分を示す。

測線 1 の 12.5 km (12500m) 地点では顕著な PS 変換反射波が観測され、特に (a) に示す水平成分では低速度領域の S 波速度の減少にともなって PS 変換波の振幅が顕著に増大することが示されている。PS 変換反射波とは反射面に入射した P 波が反射するときに S 波に変換したものを指している。

しかしながらこの PS 変換反射波の出現は限定的な範囲であることを次の例が示している。下の図は同じ測線 1 の 20 km 地点における数値計算波形を示すが、PS 変換反射波に相当する到来相は見当たらず、SS 反射波（反射面に入射した S 波がそのまま S 波として反射された波）のみが現れている。SS 反射波においても低速度領域の S 波速度の減少にともないその振幅が増大する。

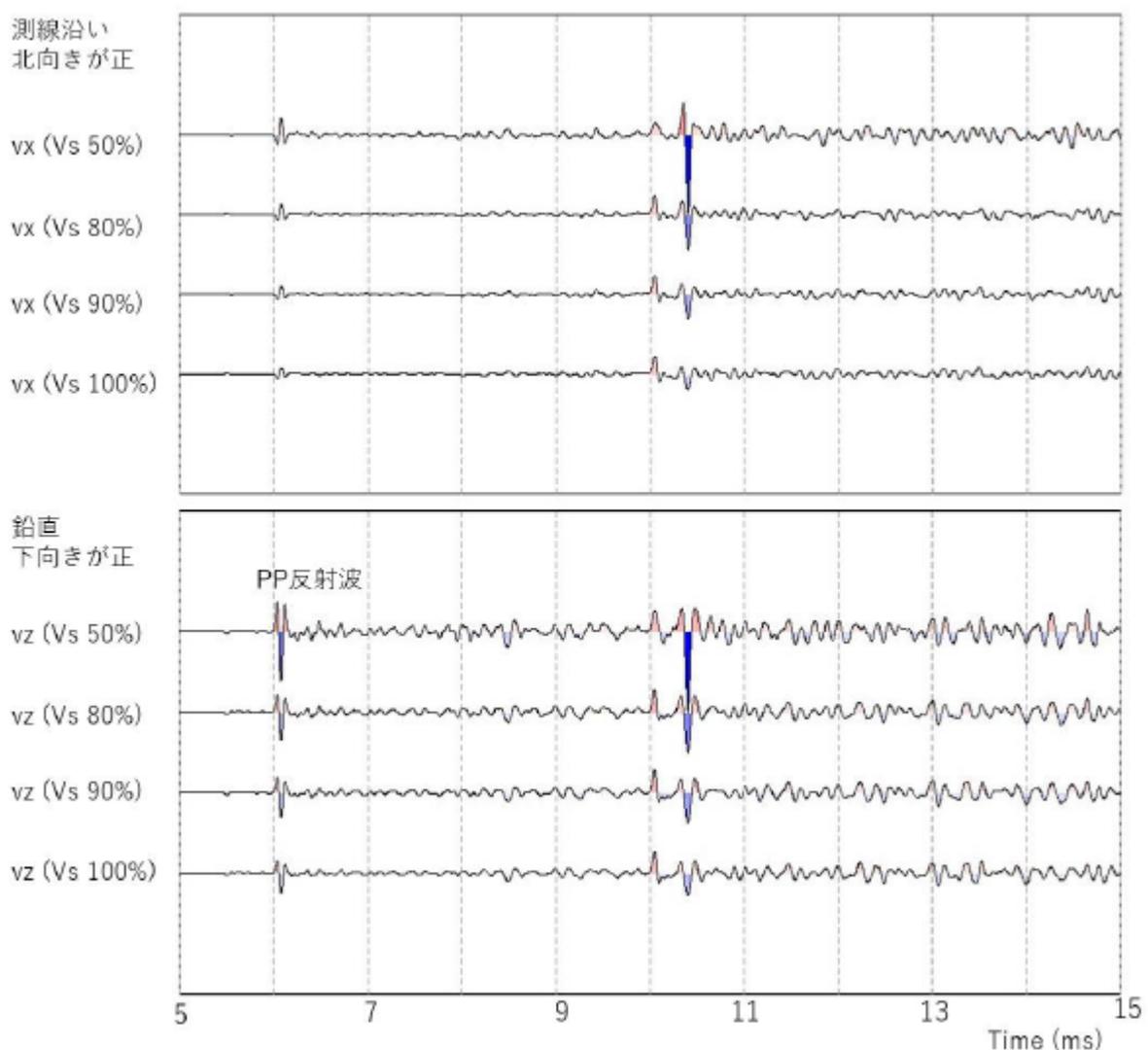


図 5 6 低速度領域速度変化による波形変化の検討（測線 1 KURP から 20 km 地点）。上図(a)放射方向水平成分、下図(b)上下成分を示す。

為栗他 (2022) の S 波低速度領域の東端をかすめる測線 2 では設定観測点において PS 変換

反射波を見いだすことが出来ず、もっぱら SS 反射波の確認にとどまった（下図）。低速度領域の速度変化に対する SS 反射波の振幅変化のふるまいは測線 1 のそれと同様である。

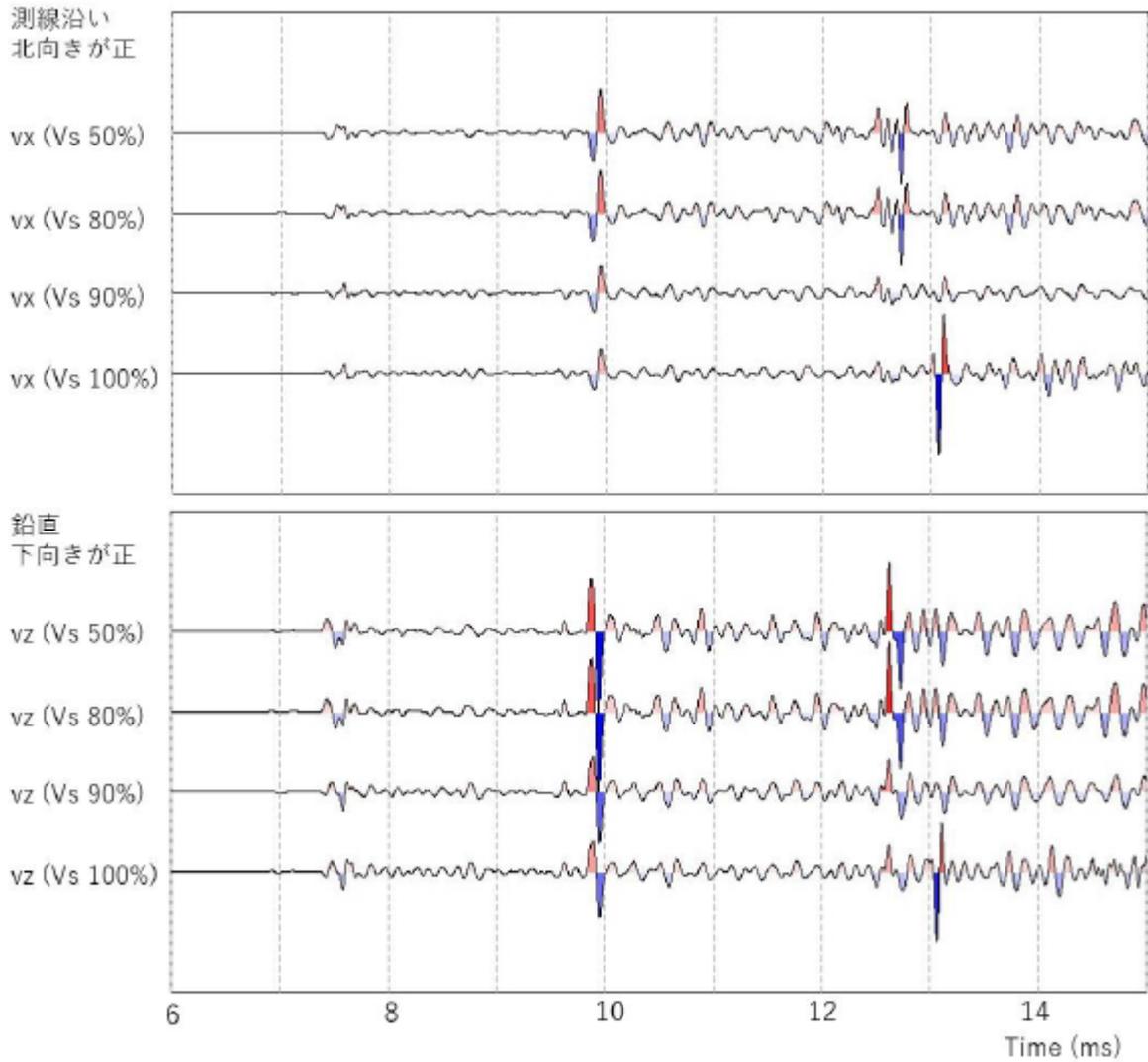


図 5 7 低速度領域速度変化による波形変化の検討（測線 2 KURP から KAJ 観測点 30 km 地点）。上図(a)放射方向水平成分、下図(b)上下成分を示す。

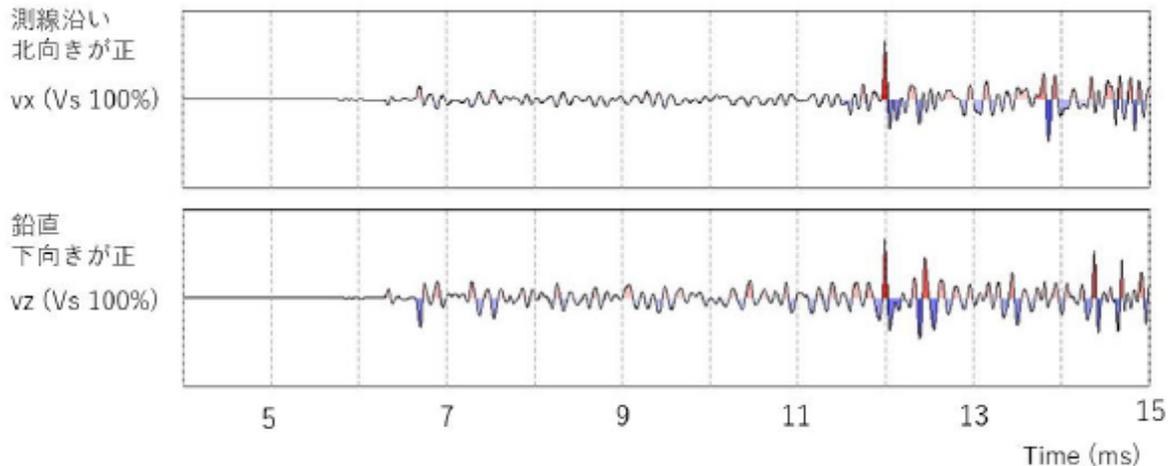


図 5 8 低速度領域速度変化による波形変化の検討（測線 3 KURP から ST06 観測点 26.7 km 地点）。上図放射方向水平成分、下図上下成分を示す。

(1) - 2 - 5. まとめ

a. 令和 5 年度まとめ

令和 5 年度は長期連続反射法の基礎実験の一環として試験発振坑を建造し、その中における発振実験を行った。さらに試験発振坑をモデル化したシミュレーションを行い、試験発振坑における発振時の地震波発生について検討を行った。

建造した試験発振坑は深さ 9.7m、底直径 2.5m、坑口直径 10m の漏斗形の縦断面とし、で、直径 16mm 鉄筋を 9 cm 間隔で組み合わせた厚さ 30 cm の鉄筋コンクリート造壁とした。この試験坑の坑口から深さ 8.7m にエアガンを置き、作動圧 800psi および 1500psi を組み合わせて発振作業を行った。

発振作業から得られた観測波形は既往の実験のそれより高い周波数成分に富み、長い継続時間が認められる傾向が見られた。全ての観測波形を重合した結果では振源距離 6.55 km 地点まで発振波形が認められ、20kg ダイナマイトと同等の S/N が提供されたが、振源距離の大きい観測点ほど観測波形の継続時間は伸長する傾向があった。観測波形の伸長部分では水平動成分の振動が卓越しているとともに伝播速度の遅い波で構成されていた。観測記録では振源距離にかかわらず走時の遅い水平動成分が顕著であることから、今回の試験坑発振では当初期待された下方に放射される P 波そのものよりも表面波等の発生が顕著であったと考えられる。

合計 20 回の発振作業を実施したのちに坑壁調査を行った。坑壁には垂直走向の亀裂が卓越して発生しており、エアガン設置位置にのみ水平方向の亀裂が見いだされた。エアガンから 3.3 m 以上の距離では坑壁損傷が生じていないことが確認された。このことからエアガン発振にともなう近接効果はエアガン中心から約 3m の範囲内にとどまると推察され、水位観測から亀裂は動作圧 1500psi 発振によって生じたと考えられる。

一方黒神観測室構内の地下の軽石層中に設置した発振坑中におけるエアガン発振の波形シミュレーションからは、発振坑水中の最大圧力が半無限水中におけるその 1.5 倍に達

することと、発振エネルギーの大部分は坑内の共鳴と表面波に分配される傾向があり、発振坑から下方に放射されるエネルギーは半無限水中における発振より相対的に小さくなることであきらかになった。シミュレーションで得られた発振坑水中の最大圧力の理論値は発振実験において発振坑壁の亀裂が生じた圧力の大きさを示すものである。またこのエネルギー分配は今回建造した発振坑から外側にエネルギーが出て行きにくいことを示すものである。すなわち発振坑中の水層の音響インピーダンスが発振坑周囲の軽石層のそれの約 15 倍に達することに由来するために、1 回の発振パルスに対して外側に約 6 % 程度のエネルギーしか伝わらず残りの 94 % は発振坑内に残留してしまうのである。これが坑内における過大な最大圧力をもたらしていると考えられる。さらに発振坑内に残留するエネルギーは坑壁における反射を重ねながら時間をかけて周囲にエネルギーを伝えることによって散逸してゆくことになり、これが波形継続時間の伸長をもたらしていると考えられる。

このことから黒神観測室構内は発振坑内とのインピーダンスコントラストが大きく、試験発振坑に不向きな弾性的性質をもつ地層を有していたと結論される。発振坑内とのインピーダンスコントラストがより小さい地層であれば発振坑外へのエネルギー伝達効率が高くなり、坑内の最大圧力はより小さくできるうえに下方へ効率よく地震波を放出できる発振坑になると考えられる。

以上のことから新規発振坑を建造する場合には、以下の仕様にするのがのぞまれる。

- ・発振坑坑壁はエアガンから 3 m の間隔を確保する
- ・発振坑坑壁は KURP のそれより靱性の高い素材の方が望ましい

今後建造する発振坑の口径は最小でも 6m が必要である。発振坑の内張に靱性の高い鋼板または防水膜が必要であろうと考えられる。さらに漏斗形の縦断面が建造時の工程を難しいものにしてきたことを考慮すると発振坑縦断面形状および横断面形状は方形を選択すれば費用対効果が高くなると考える。

さらに発振坑中の共鳴を小さくするためには、発振坑内外のインピーダンスコントラストを小さくする必要があり、軽石層よりインピーダンスの大きな地層を発振坑建造地にえらぶべきであると考えられる。坑内の音響インピーダンスが $1.5 \times 10^6 \text{kg/m}^2\text{s}$ であるのに対して、軽石層の音響インピーダンスは $1.02 \times 10^5 \text{kg/m}^2\text{s}$ 、凝灰岩層の音響インピーダンスは概ね $4 \times 10^6 \text{kg/m}^2\text{s}$ である。このことを考慮すると今回の軽石層中の発振では 1 回で 6% しかエネルギーが放射されなかったが、もし凝灰岩層中の発振であったら 1 回で 25% のエネルギーが出て行くことになり、軽石層の 4 倍程度の利きが期待できることになるうえ、最大圧力も半無限水中の 4 倍程度で済む可能性がある。

b. 5ヶ年総まとめ

- 1) 長期連続反射法に必要な振源装置の検討では令和元年度に机上検討を行い、圧縮空気をを用いるエアガン装置が本項目の検討に最適であることが判った。また、令和 2 年度に実際のエアガン装置を用いた発振実験からは、総容量 1050 立方インチの 3 連エアガンを水深 10 m にて圧力 13MPa で用いて 50 回の繰り返し発振を行った記録を重合すれば振源距離約 60 km まで初動が確認できることが明らかになった。そのために令和 2 年度以

降の実験では総容量 1050 立方インチの 3 連エアガンを調達して用いた。

2) 令和 2 年と令和 4 年に行った実験では動作圧、エアガン水深、エアガン水底間距離を共通の値として振源波形と始良カルデラを通過した後続相波形の再現性を検討した。新たに調達されたエアガン個体を用いて令和 4 年に行った 2 回目の実験では 1 回目の実験とエアガン水深を一致させて行った発振波形とエアガン水底間距離を一致させて行った発振波形との差はほとんど認められなかった。いずれの条件でも 10Hz 以下の帯域で同じ周波数特性の振源特性が再現された。波形の再現に必要な要素はエアガンのチャンバ容量、湛水水深、作動圧、個体差、水温構造である。これらの要素の変化による観測波形変化は、エアガン近傍の観測波形を用いたデコンボリューション処理で一定程度補償できることが明らかにされた。以上のことから長期連続反射法のデータ処理の流れを以下のように提案する。

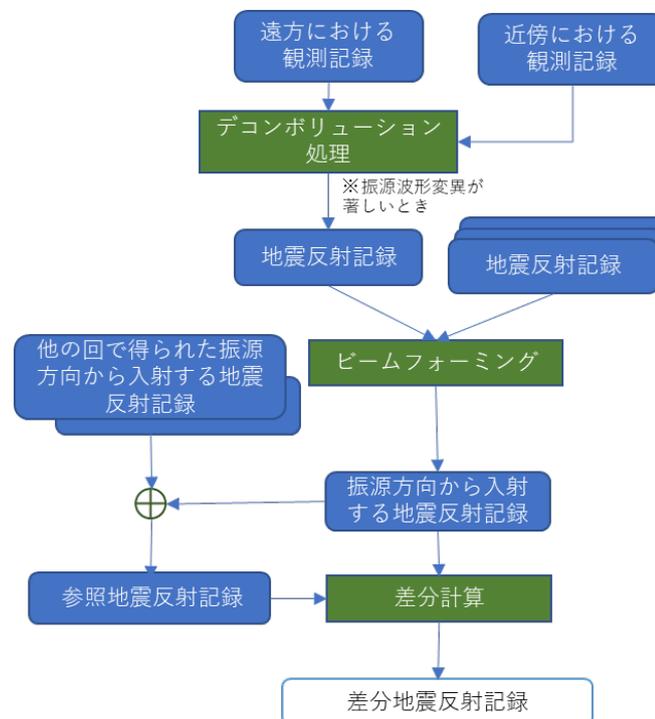


図 5 9 長期連続反射法観測データ処理

3) 発振点に対して始良カルデラを挟んだ場所における孔中地震計アレイによる地震観測を採用し、始良カルデラ地下からの反射波を検出した。地表設置に比べてノイズの減少が期待できる孔中地震計を用いたことに加えて、繰り返し発振を行った記録を足し合わせる（スタックする）ことによって振源からの地震波を強調した。孔中地震計アレイ観測による地震波の到来時間差からの到来方向推定結果に加えて、始良カルデラ地下 10~20km 深からやってくる反射波が既存の地震波速度構造による理論走時では 5~10 秒の間に到着することとあわせて、始良カルデラの地下から戻ってくる反射波を認めることができた。令和 2 年度と令和 4 年度の 2 回の実験では初動および走時 5~10 秒の時間帯に

おける始良カルデラの地下からの反射波を含む後続相がともによく再現され、始良カルデラ地下の反射面に由来する地震波が確実に捉えられていることが示された。

4) 令和2年と令和4年の実験では既存の農業灌漑用ため池をもちいてエアガン発振実験を実施した。農業灌漑用ため池は灌漑を目的として水位がコントロールされるために同一発振条件を再現することが難しい。季節の進行に伴う水需要によって水位が左右されることに加えて、維持管理のために水位が下げられることもあり、同一条件の実験ができる時期が限定される。そのために長期にわたり連続して発振を行うためには専用の発振設備が必要であることが明らかになった。令和2年と令和4年に行った実験では振源装置の近傍における衝撃観測も行い、先述のエアガンの発振による衝撃は $0.8\text{MPa}\cdot\text{m}$ という値を得ている。この値をもとに令和5年度は試験発振坑を建造し発振試験に用いた結果、エアガン発振にともなう近接効果はエアガン中心から約3mの範囲内にとどまることと試験発振坑の周囲の表層地震波速度構造が発振波形にあたる影響等が判明し、継続的な発振を行うための発振坑に関する重要な情報を得た。

今後の課題：

今後解決されなければならない課題は 1)長期にわたる使用が可能な発振設備の造営、2)観測頻度の増大である。

参考文献

- 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 令和2年3月
- 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 令和3年3月
- 京都大学防災研究所(2022)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 令和4年3月
- 京都大学防災研究所(2023)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 令和5年3月
- 竹内 均(1969)大学演習弾性論、裳華房, 198pp.
- 多田悠也(2019)火山地帯における浅部地震探査、秋田大学国際資源学部国際資源学科 平成30年度卒業論文、70pp.
- 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, 69-76.
- TSUTSUI, T., Iguchi, M., Tameguri, T., Nakamichi, H. (2016) "Structural evolution beneath Sakurajima Volcano, Japan, revealed through rounds of controlled seismic experiments.", Journal of Volcanology and Geothermal Research, 315, 1-14, DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2016.02.008.
- Urick, R. J., 1967, Principles of underwater sound, McGraw-hill Inc., 414pp.

付録1 京都大学桜島観測所黒神観測室における試験発振坑設置に伴って出現した露頭断面

a. はじめに

桜島火山は、約3万年前の超巨大噴火によって形成された始良カルデラの後カルデラ火山であり、北岳の斜面に南岳が重なる複合成層火山である (Matumoto, 1943; Aramaki, 1984; Smith *et al.*, 2013)。本火山は、少なくとも約26,000年前に活動を開始し (奥野, 2002)、現在までに軽石の噴出を伴う大規模噴火を多数繰り返している (小林, 1986)。それらは歴史時代にも発生しており、天平宝字噴火 (764年)、文明噴火 (1471年)、安永噴火 (1779年) および大正噴火 (1914年) が知られている。これらの噴火に伴う軽石層には順に P4~P1 テフラの名称が付けられている (小林, 1986)。また、歴史時代の大規模噴火ではいずれも前兆現象、プリニー式噴火、火砕流噴火、溶岩流出、後遺症 (地震・地盤沈降) が共通して認められているが (小林・溜池, 2002)、各噴火の詳細な推移などについては明らかになっていないことも多い。こうしたことを解明する上で露頭記載は極めて重要であり、貴重な基礎データとなりうる。桜島島内では大正軽石 (P1 テフラ) やその後続くブルカノ式噴火などによる堆積物が厚く表面を覆っている。そのため、現在では歴史時代の大規模噴火堆積物の層序関係を1度に確認することができる地点はごく限られている。しかし今回、京都大学桜島観測所黒神観測室における試験発振坑の設置工事に伴って歴史時代の噴出物を含む大規模な露頭が出現した。そこで本報ではその概要について報告する。

b. 露頭記載

掘削された穴は円錐台を上下逆にした形状をしており、深さが約10m、地表掘削面の直径は約27mである (図1)。その断面の最も基底には塊状溶岩が露出し、その上に黒褐色腐食土壌を挟んで軽石層が3枚認められる (図2)。塊状溶岩は、分布と層準から天平宝字噴火に由来する長崎鼻溶岩である (小林, 1982; 小林・他, 2013)。3枚の軽石層は下位から、P3 テフラ、P2 テフラ、P1 テフラである。さらに P1 テフラの上位は本施工以前の土地整理に伴う盛り土に覆われている。露頭柱状図は図3に示すとおりである。以下に本地点の P1~P3 テフラの概要を記載する。なお、本地点内でも各テフラの層厚は場所により変化するため、層厚値は代表的な値を採用している。

P1 テフラは層厚約150cmの降下軽石層で、中礫サイズの粗粒な灰白色軽石を主体とする下部 (層厚約100cm) と、下部よりやや細粒な軽石を主体とし、黒色岩片に富む上部 (層厚約50cm) に区分することができる (図2)。Todde *et al.* (2017) によれば、P1 テフラは T1~T4 の4つのユニットから構成される。本地点の P1 テフラ下部は、このうち Unit T1 および Unit T2 に相当すると考えられるが、本露頭ではその境界は明瞭でなく顕著な鉛直方向の粒径変化も認められない。基底付近には内部が赤色で高温酸化したと思われる軽石がしばしば見られ、そのような軽石は他の軽石と比べて発泡が良い。また、岩片は黒色と赤色を呈した火山岩が主体で、それらの含有量は上部に向かうにつれて増加する傾向にある。軽石と岩片の最大粒径 (最大の軽石・岩片3個の長さの平均値; 以下同様) は、それぞれ102mm, 25mmである。一方、上部は Todde *et al.* (2017) の Unit T3 に相当し、黒色岩片をよく含有する部分とそうではない部分が互層する。そのため、遠望すると Unit T1, Unit T2 と異なり縞模様を呈していることがよくわかる (図2)。黒色岩片はガラス質で光沢のあるものが多い。軽石と岩片の最大粒径は、それぞれ55mm, 25mmである。

P2 テフラは層厚約100cmで、全体として中礫サイズの灰白色軽石を主体とする降下軽石層で

ある。構成粒子の特徴と粒径から3ユニット（下部・中部・上部）に分けられる（図4A）。下部（層厚約40 cm）では、中心部が高温酸化し赤色を呈する軽石がよく含まれ（図4B）、稀に縞状軽石や暗色軽石が認められる。岩片は赤色のものが目立つが、黒色～灰色の岩片もしばしば含まれる。中部（層厚約30 cm）は、粗粒な灰白色軽石の粒間を埋める径1～2 mmの岩片が多い傾向にあり、やや淘汰が悪い。含まれる岩片の種類は黒色でガラス質のものが主体であるが、赤色のものも少量認められる。また、細礫サイズの軽石も下部・上部と比較すると多い。上部（層厚約30 cm）では、前述のような粒間を埋める岩片や細礫サイズの軽石が再び減少する。岩片は黒色ガラス質のものが多く、赤色のものは稀である。軽石と岩片の最大粒径は、下部でそれぞれ107 mm、27 mm、中部でそれぞれ68 mm、23 mm、上部でそれぞれ68 mm、22 mmである。

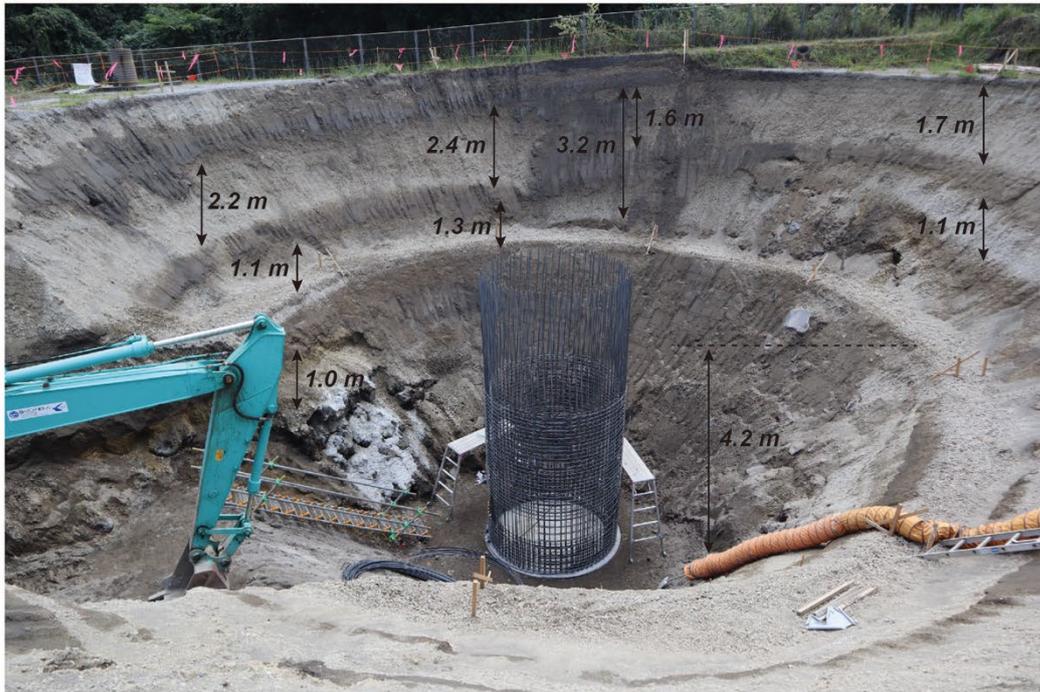
P3テフラは層厚約150 cmで、主として淡黄色で角張った軽石から構成される。P1やP2よりも岩片の含有量は少なく、含まれる岩片は黒色や灰色を呈した火山岩片が大半である。軽石の色調にはバリエーションが見られ、淡黄色軽石の他に灰色軽石や縞状軽石、黒色スコリアも普通に含まれている（図4C）。また、2枚の薄い火山灰層を挟在するため（図2、図4Dの白矢印）、下位から下部軽石層、下部火山灰層、中部軽石層、上部火山灰層、上部軽石層に区分できる。下部軽石層（層厚約80 cm）は中礫サイズの淡黄色軽石を主体とする淘汰の良い礫支持層である。層内には2回の級化構造が明瞭に認められる。P1やP2と同様に、基底部には高温酸化を受けたと考えられる赤色軽石が散見され、そのような軽石の中心部はよく発泡している。軽石と岩片の最大粒径は、それぞれ108 mm、30 mmである。下部火山灰層（層厚4～8 cm）は、淘汰の悪い基質支持層である。岩片は少なく、細礫サイズ以下の軽石片を主体とする。中部軽石層（層厚18～25 cm）は、下部軽石層より少し細粒な軽石礫からなり、淘汰のやや悪い礫支持層である。軽石と岩片の最大粒径は、それぞれ47 mm、12 mmである。上部火山灰層（層厚1～2 cm）は、中粒砂程度の黒色岩片に富み、P3テフラ中で黒い帯のように見える。上部軽石層（層厚15～30 cm）は、中部軽石層よりさらに細粒で、細礫サイズ以下の軽石片もよく含まれるやや淘汰の悪い礫支持層である。軽石と岩片の最大粒径は、それぞれ40 mm、10 mmである。上部軽石層はP3最上位にあるため保存が悪い。この上位には局所的に暗灰色を呈する粗粒砂層が堆積している（図4E）。しかし、これらはレンズ状に認められ、層内には構成粒子の違いに起因する細かなクロスラミナが発達している。このような特徴から、本堆積物は二次的なものである可能性が高い。なお、P3直下には黒色腐食土を20～30 cmほど挟んで塊状の長崎鼻溶岩が露出する（図4F）。長崎鼻溶岩の上面は不規則な形状を示しており、露頭西部では岩塊がP3の層位にまで突出している（図1）。

付録引用文献

- Aramaki, S. (1984) Formation of the Aira caldera, southern Kyushu, 22,000 years ago. *J. Geophys. Res.*, **89**, 8485–8501. <https://doi.org/10.1029/JB089iB10p08485>.
- 小林哲夫（1982）桜島火山の地質：これまでの研究の成果と今後の課題。火山，**27**，277-292. https://doi.org/10.18940/kazanc.27.4_277.
- 小林哲夫（1986）桜島火山の形成史と火砕流。文部省科学研究費自然災害特別研究，計画研究「火山噴火に伴う乾燥粉体流（火砕流等）の特質と災害」（課題番号A-61-1，代表者：荒牧重雄）研究成果報告書，137-163.

- 小林哲夫・溜池俊彦 (2002) 桜島火山の噴火史と火山災害の歴史. 第四紀研究, **41**, 269–278.
<https://doi.org/10.4116/jaqua.41.269>.
- 小林哲夫・味喜大介・佐々木 寿・井口正人・山元孝広・宇都浩三 (2013) 桜島火山地質図 (第 2 版). 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- Matumoto, T. (1943) The four gigantic caldera volcanoes of Kyushu. *Japan. J. Geol. Geogr.*, **19**, 1–57.
- 奥野 充 (2002) 南九州に分布する最近約 3 万年間のテフラの年代学的研究. 火山, **41**, 225–236.
<https://doi.org/10.4116/jaqua.41.225>.
- Smith, V. C., Staff, R. A., Blockley, S. P. E., Bronk Ramsey, C., Nakagawa, T., Mark, D. F., Takemura, K., Danhara, T. and Suigetsu 2006 Project Members (2013) Identification and correlation of visible tephra in the Lake Suigetsu SG06 sedimentary archive, Japan: chronostratigraphic markers for synchronising of east Asian/west Pacific paleoclimatic records across the last 150 ka. *Quat. Sci. Rev.*, **67**, 121–137.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.01.026>.
- Todde, A., Cioni, R., Pistolesi, M., Geshi, N., and Bonadonna, D. (2017) The 1914 Taisho eruption of Sakurajima volcano: stratigraphy and dynamics of the largest explosive event in Japan during the twentieth century. *Bull. Volcanol.* **79**(10), 72. <https://doi.org/10.1007/s00445-017-1154-4>.

(A) Photo



(B) Sketch

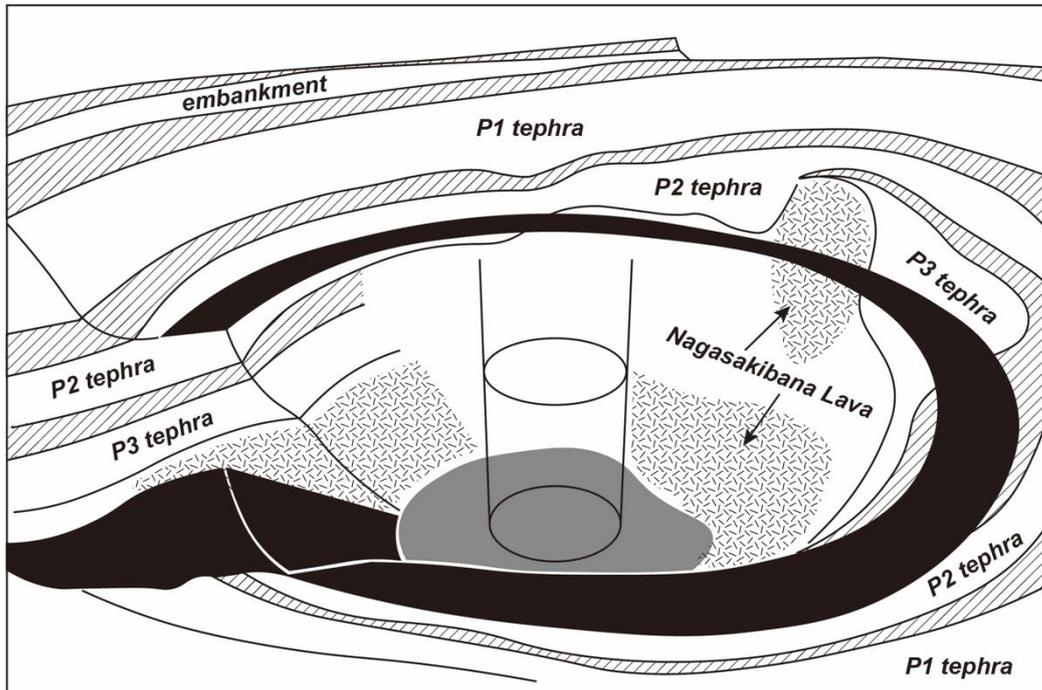


図1 露頭断面。(A) 地震計設置に伴って出現した露頭断面。北側から南側を望む。(B) 断面スケッチ。

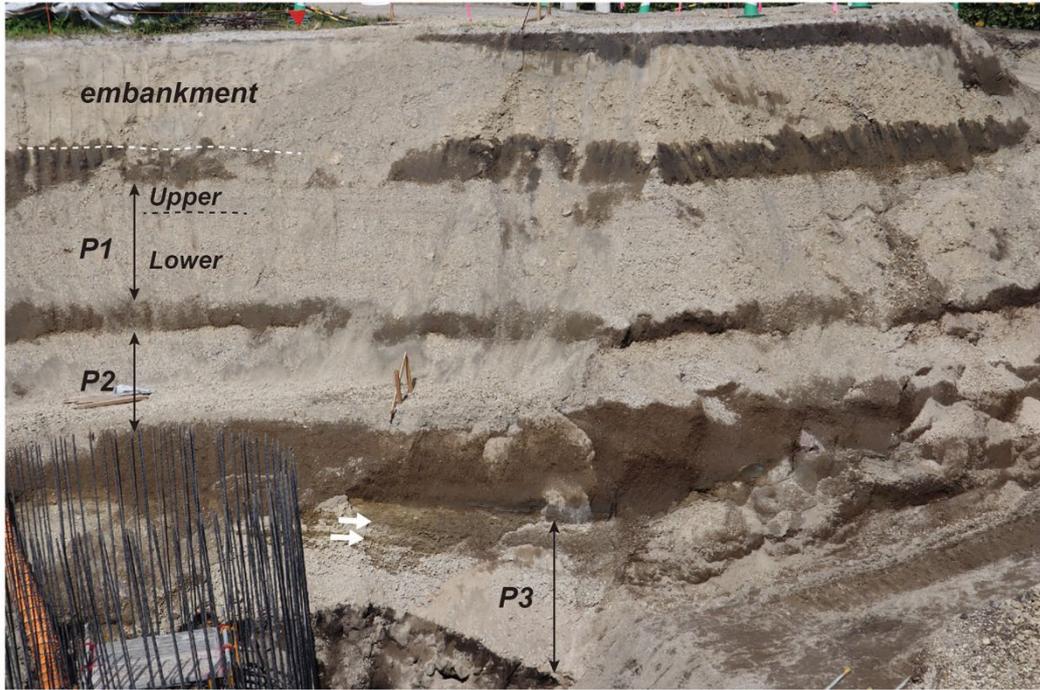


図2 北側の断面写真。

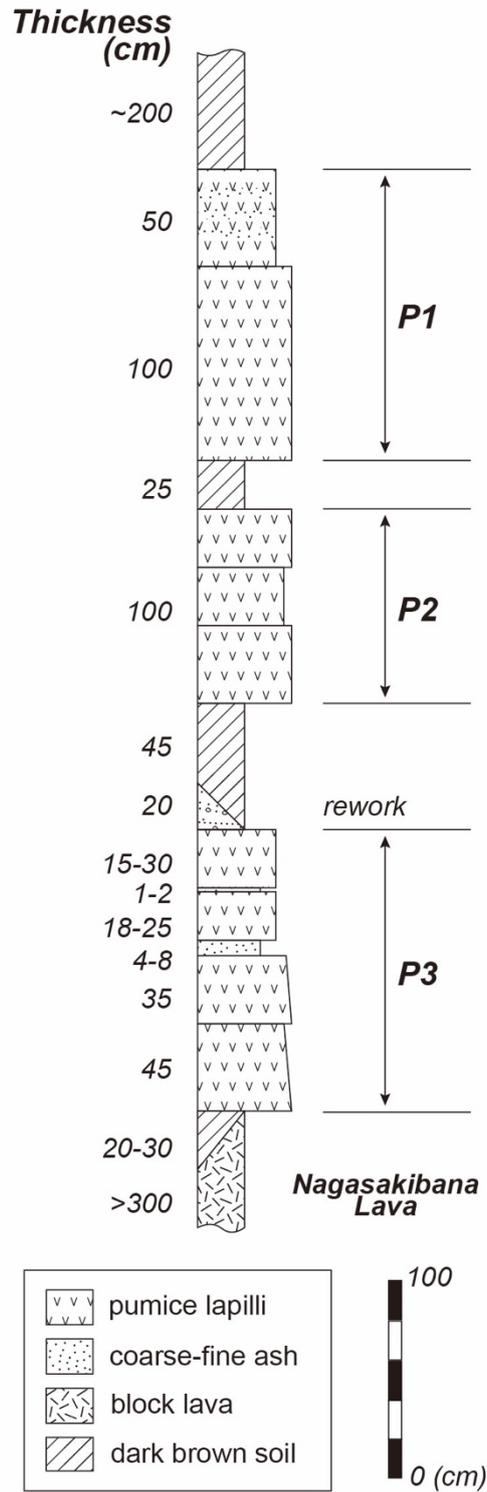


図3 本露頭の模式柱状図。

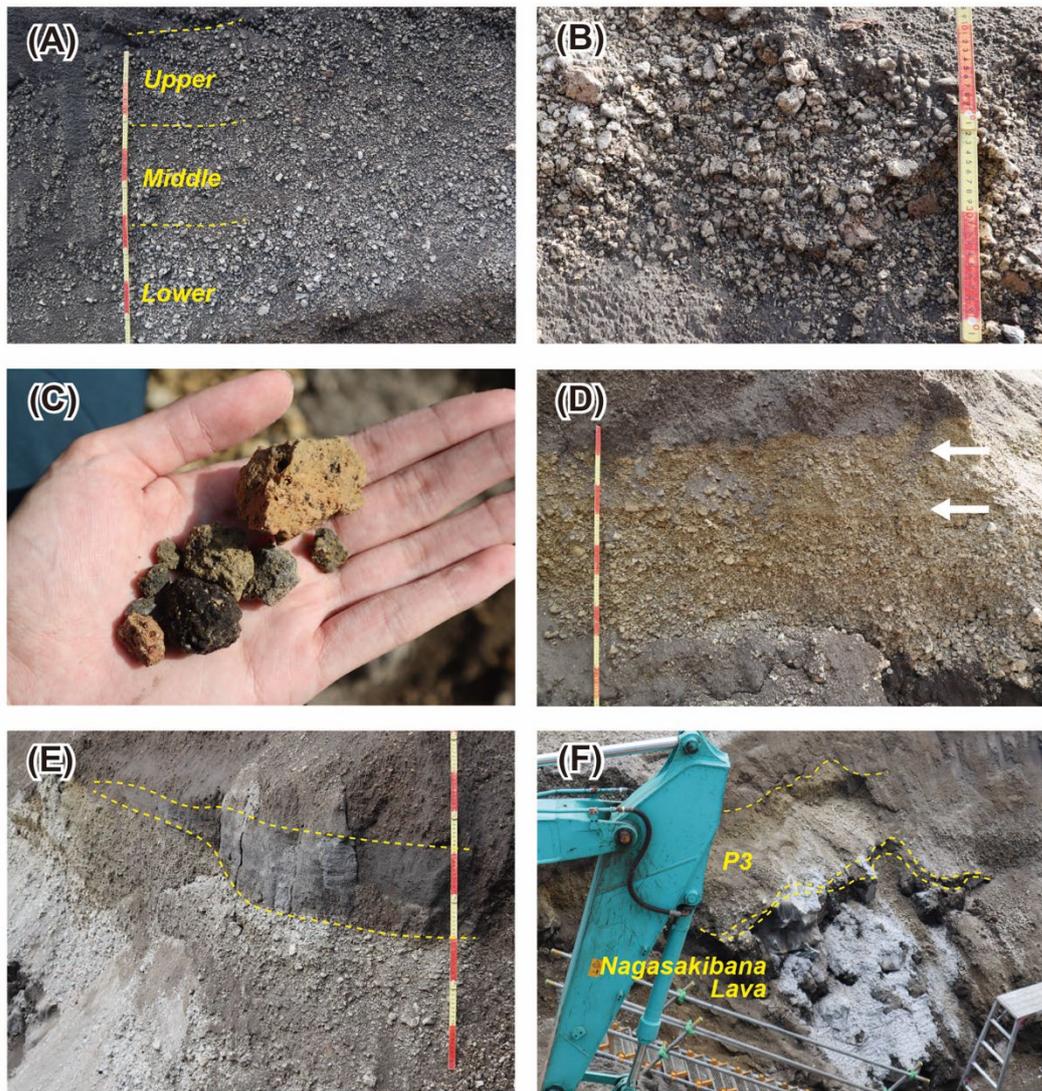
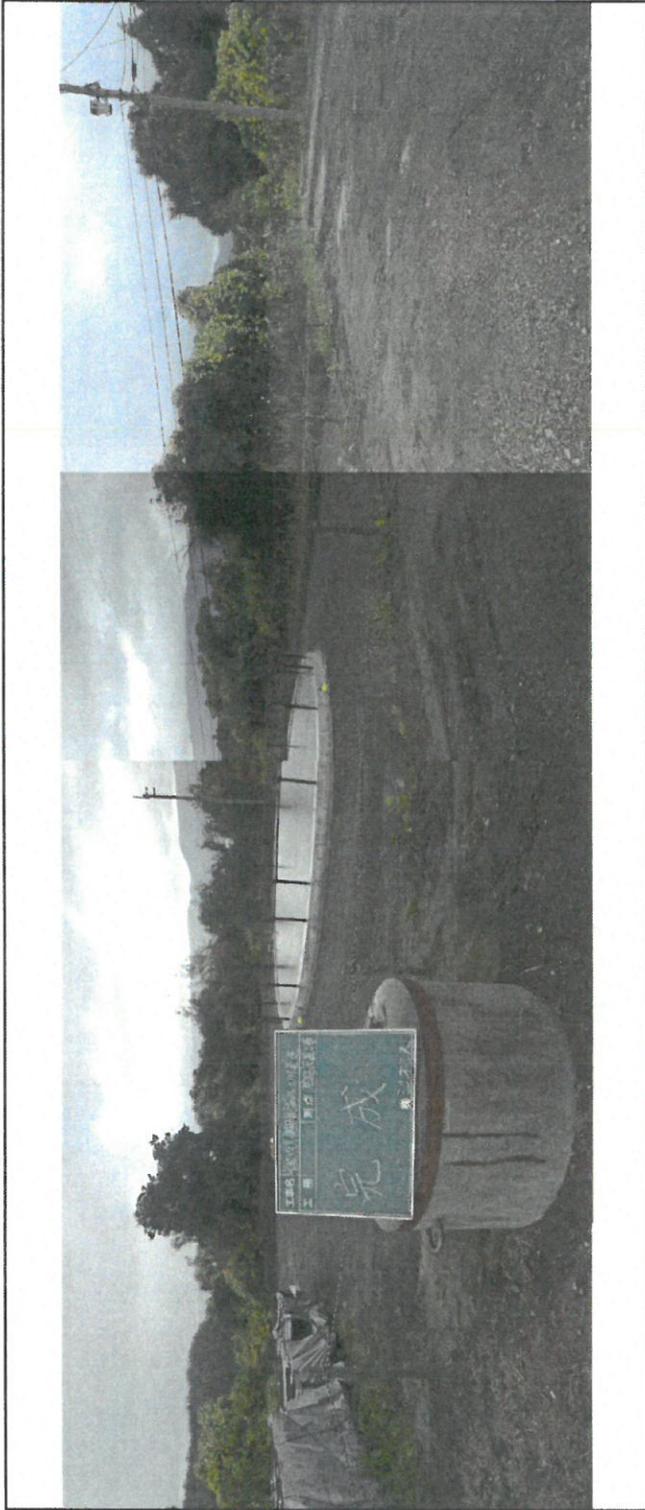


図4 テフラの産状。(A)P2 テフラの接写。(B)P2 テフラ基底に多産する赤色軽石。(C)P3 テフラに含まれる多様な軽石。(D)P3 テフラの接写。白矢印は火山灰層。(E)P3 直上に局所的に堆積する粗粒砂層。(F) P3 テフラと長崎鼻溶岩。P3 テフラの層厚が約 1 m。長崎鼻溶岩の露出面にはコンクリートが塗られている。

黒神観測室構内における発振堅坑設置工事

株式会社ジオシス



発振坑設置
完成
京都大学黒神観測室構内



発振豎坑設置
完成
京都大学黒神観測室構内



発振豎坑設置
完成
京都大学黒神観測室構内



発振豎坑設置
完成
京都大学黒神観測室構内

発振整坑設置

着工前

京都大学黒神観測室構内

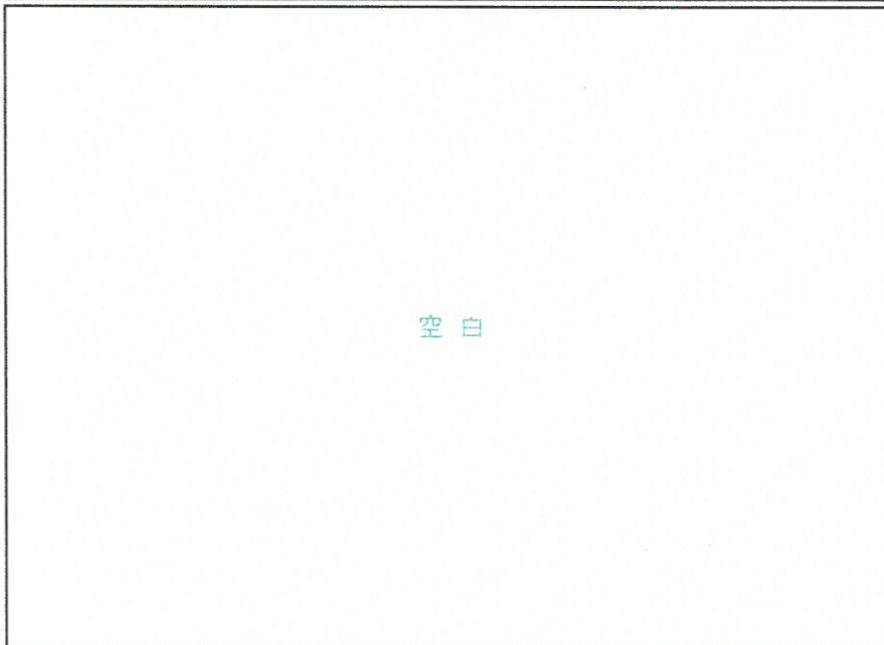


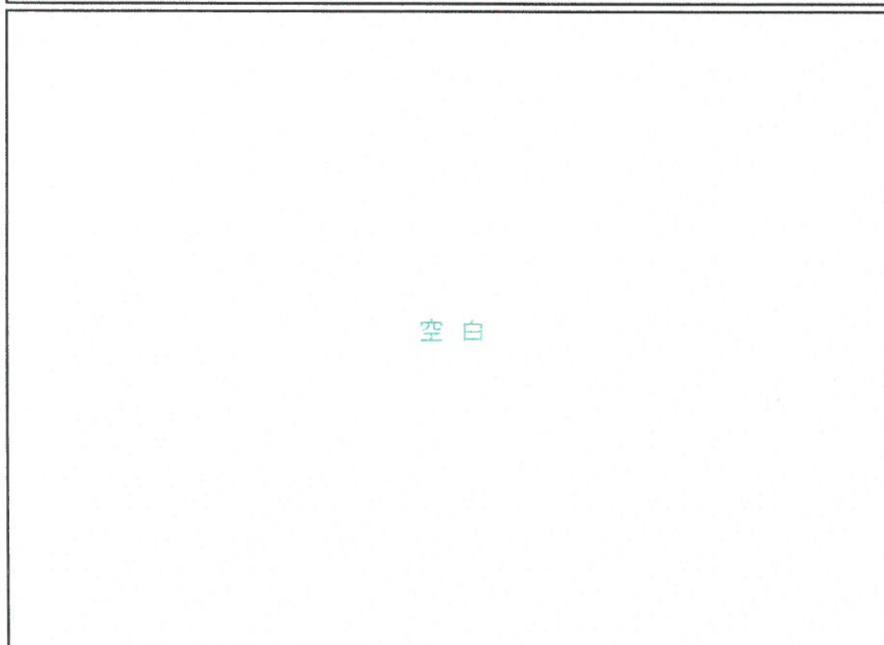
空白

空白



発振堅坑設置
完成
京都大学黒神観測室構内





発振豎坑設置
準備工
伐開状況
京都大学黒神観測室構内

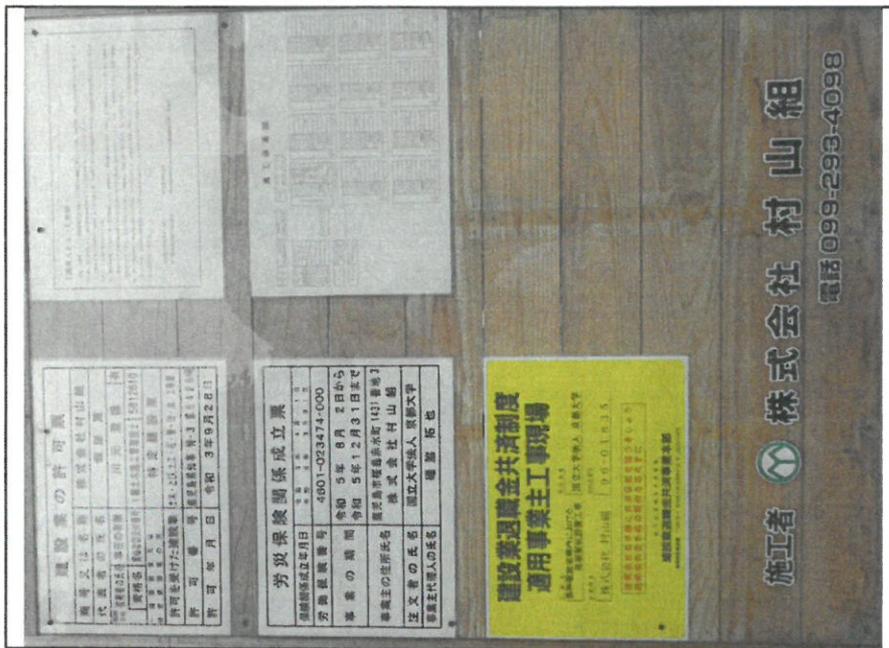


発振豎坑設置
準備工
伐開状況
京都大学黒神観測室構内

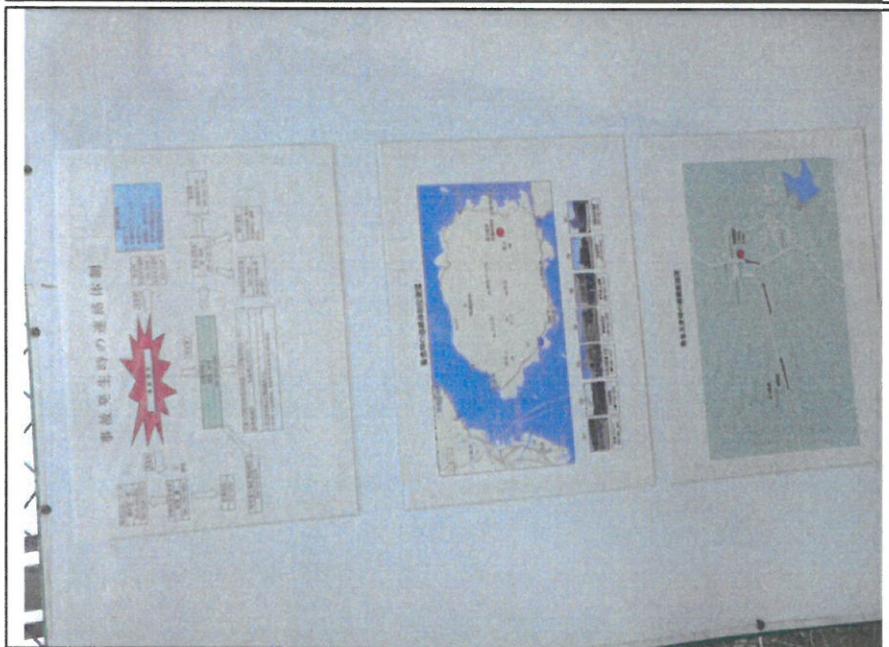


発振豎坑設置
準備工
工事看板等設置
京都大学黒神観測室構内

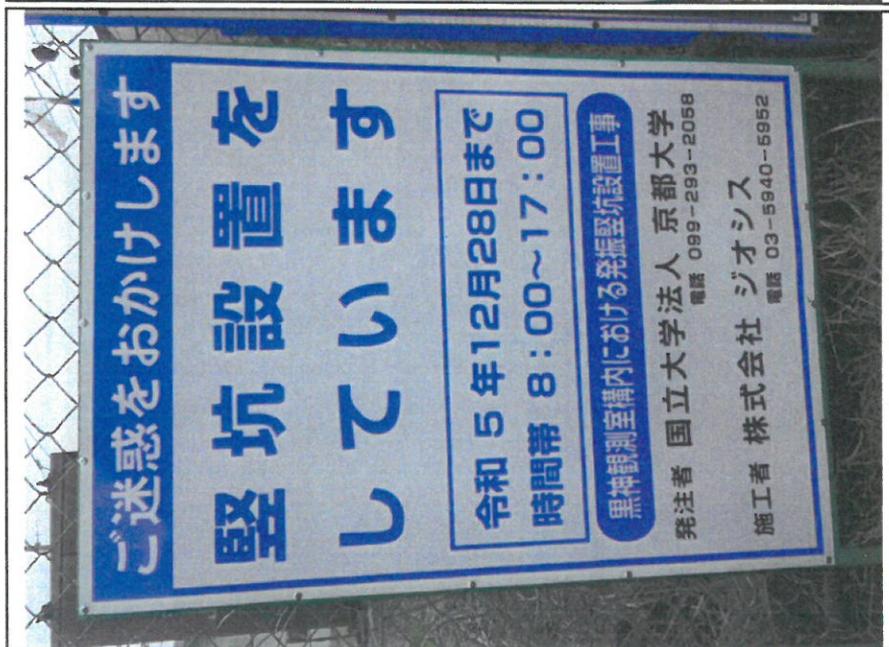




発振堅坑設置
安全管理
掲示板設置
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
安全管理
掲示板設置
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
安全管理
工事看板設置
京都大学黒神観測室構内

発振豎坑設置
安全管理
工事看板設置
京都大学黒神観測室構内



発振豎坑設置
準備工
現場作業環境の整備
現場事務所兼休憩所
京都大学黒神観測室構内



発振豎坑設置
準備工
現場作業環境の整備
簡易水栓トイレ
京都大学黒神観測室構内





発振堅坑設置
準備工
現場作業環境の整備
一坪倉庫
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
準備工
重機搬入
Bh0. 2m3
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
準備工
重機搬入
Bh0. 7m3
京都大学黒神観測室構内

発振堅坑設置
準備工
重機搬入
Bh0. 4m3
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
準備工
重機搬入
ローラー
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
準備工
重機搬入
BH0. 2m3
京都大学黒神観測室構内





発振堅坑設置
準備工
丁張設置状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
準備工
丁張設置状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
準備工
丁張設置状況
京都大学黒神観測室構内

発振堅坑設置
準備工
丁張設置状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
準備工
丁張設置状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
準備工
丁張設置状況
京都大学黒神観測室構内





発振堅坑設置
土工
捨場整地状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
土工
捨場整地状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
土工
捨場敷均し状況
京都大学黒神観測室構内

発振縦坑設置
土工
円形内
掘削状況
京都大学黒神観測室構内



発振縦坑設置
土工
円形内
掘削状況
京都大学黒神観測室構内



発振縦坑設置
土工
円形内
掘削状況
京都大学黒神観測室構内





発振堅坑設置
土工
円形内
掘削状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
土工
円形内
掘削状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
土工
円形内
合図者 指示状況
京都大学黒神観測室構内

発振堅坑設置
土工
円形内
合図者 指示状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
土工
円形内
積込状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
土工
円形内
積込状況
京都大学黒神観測室構内





発振堅坑設置
土工
円形内
積込状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
土工
円形内
積込状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
土工
円形内
運搬状況
京都大学黒神観測室構内

発振堅坑設置
土工
円形内
運搬・荷下し状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
土工
床掘
基面整正状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
土工
床掘
基面転圧状況
京都大学黒神観測室構内

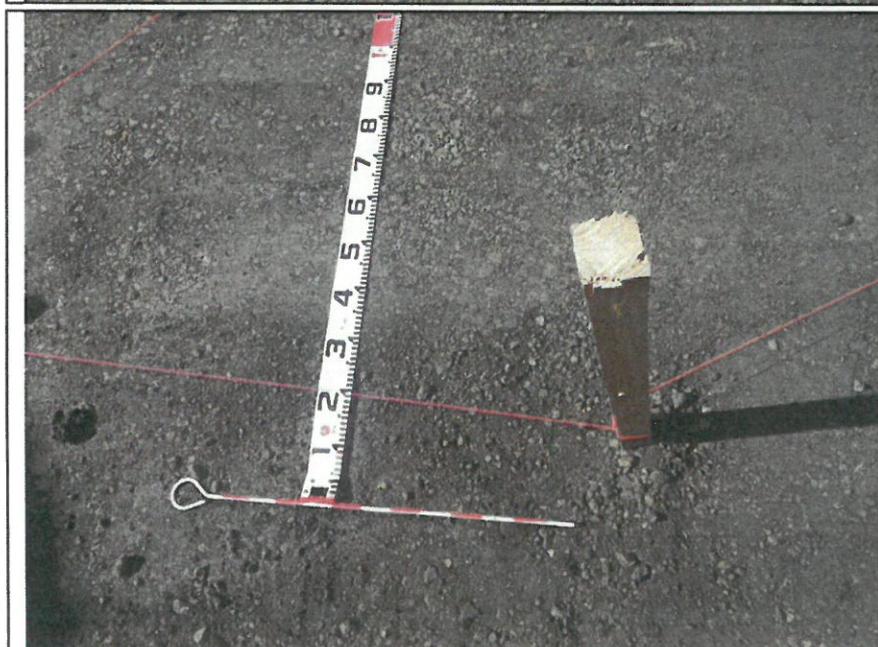




発振堅坑設置
土工
床掘
基面出来形
京都大学黒神観測室構内
W=4,300 W=4,300
H= 100 H= 100



発振堅坑設置
土工
床掘
基面出来形
京都大学黒神観測室構内
W=4,300 W=4,300
H= 100 H= 100



発振堅坑設置
土工
床掘
基面出来形
京都大学黒神観測室構内