

発振堅坑設置
堅坑工
均しコンクリート
打設状況
京都大学黒神観測室構内

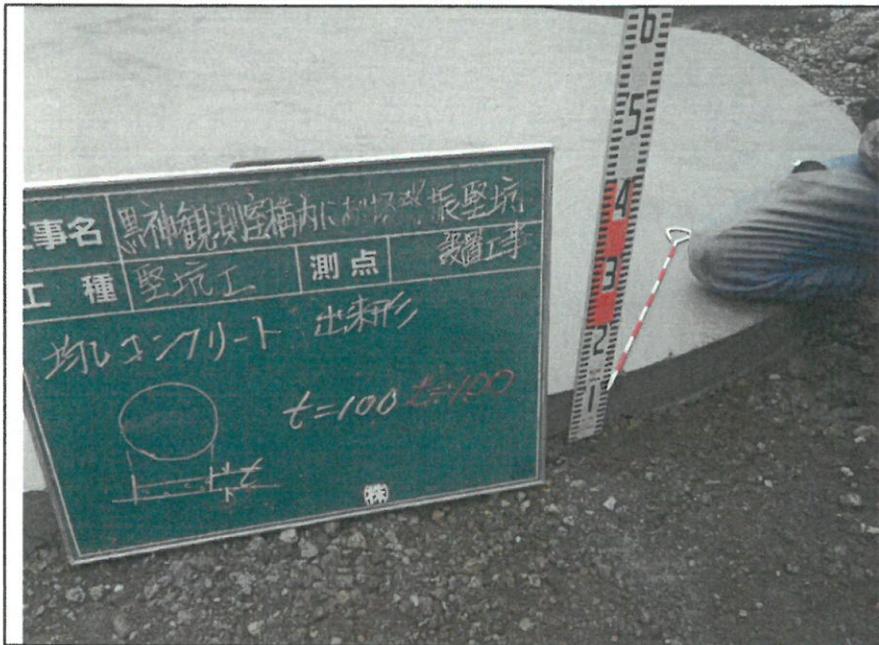


発振堅坑設置
堅坑工
均しコンクリート
養生状況
京都大学黒神観測室構内

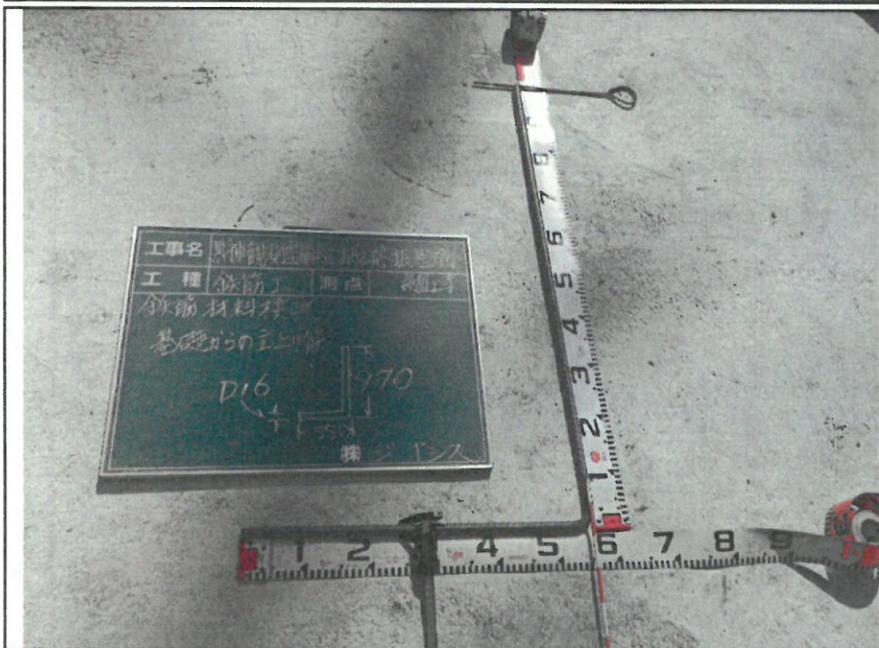


発振堅坑設置
堅坑工
均しコンクリート
出来形
京都大学黒神観測室構内
t=100 t=100

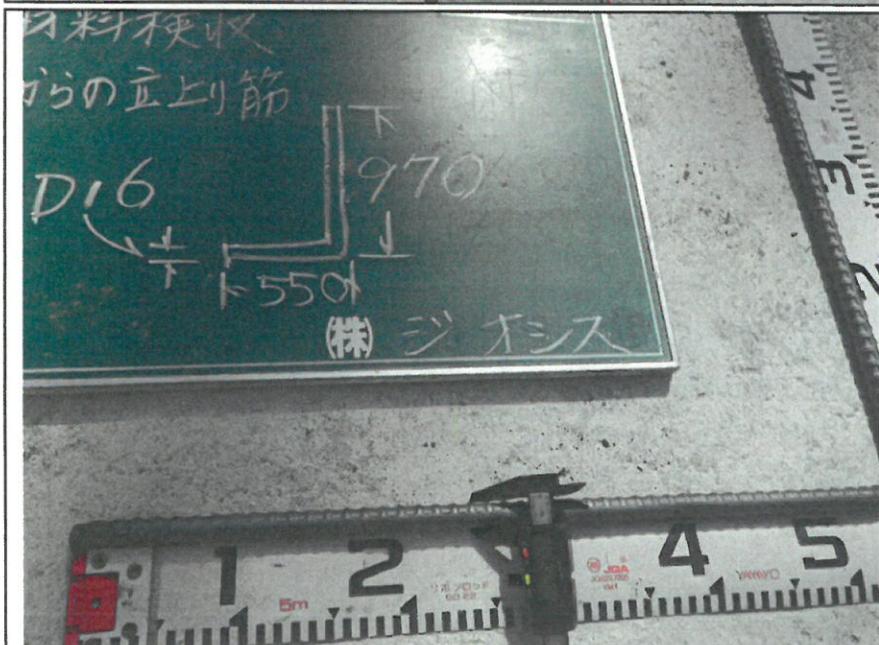




発振堅坑設置
堅坑工
均しコンクリート
出来形
京都大学黒神観測室構内
t=100 t=100

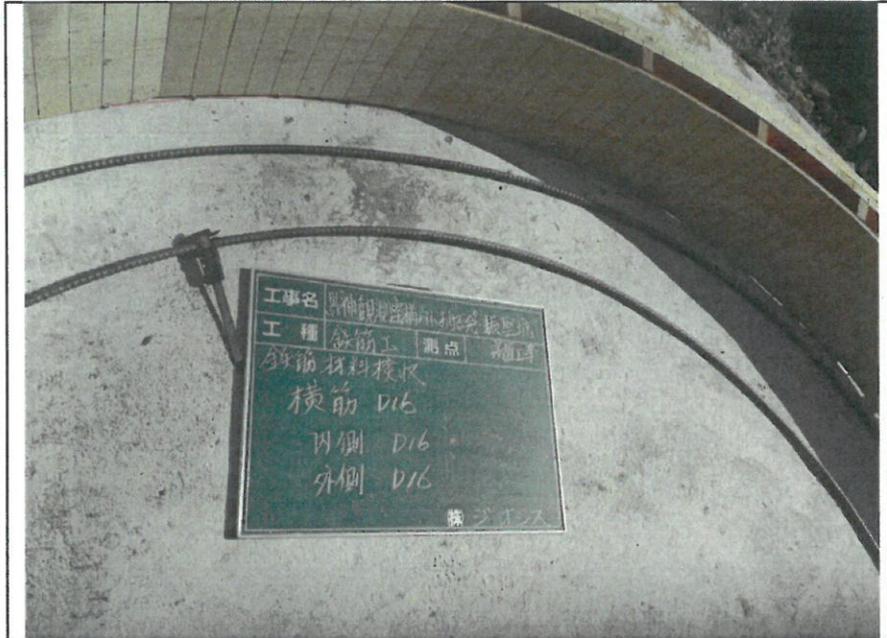


発振堅坑設置
鉄筋工
基礎からの立上り筋 D16
材料検収
京都大学黒神観測室構内
D16
L =970
L1=550

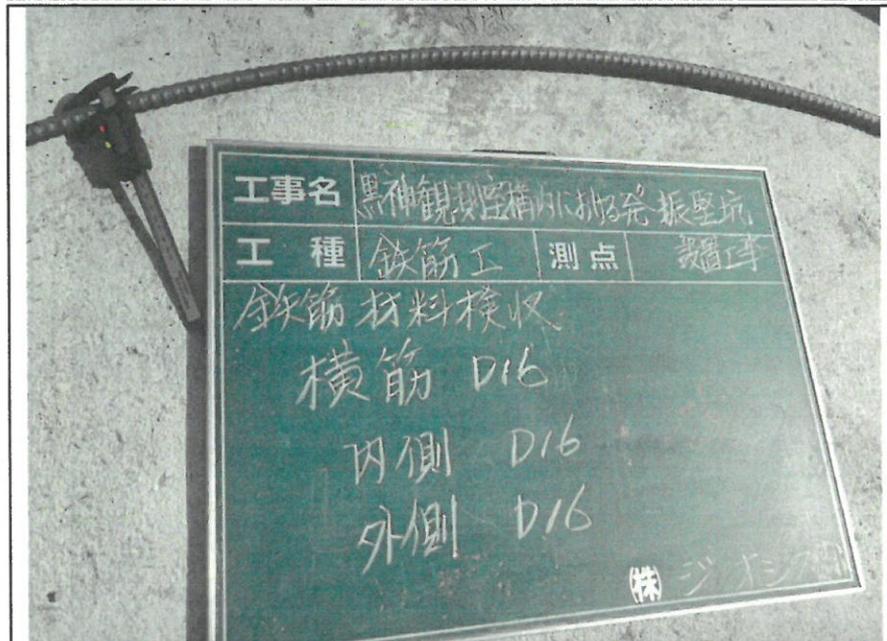


発振堅坑設置
鉄筋工
基礎からの立上り筋 D16
材料検収
京都大学黒神観測室構内
D16

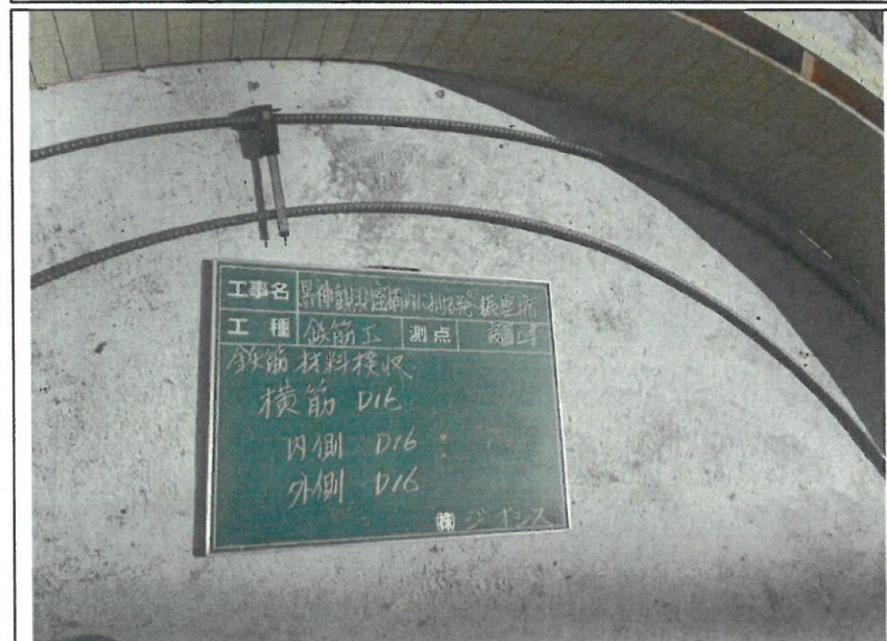
発振堅坑設置
鉄筋工
横筋 D16
材料検収
京都大学黒神観測室構内
内側 D16

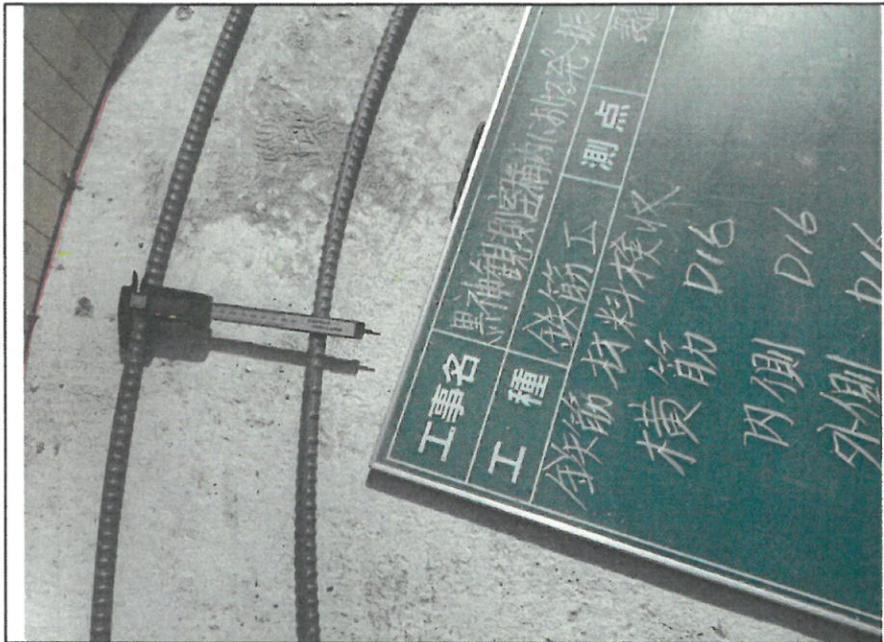


発振堅坑設置
鉄筋工
横筋 D16
材料検収
京都大学黒神観測室構内
内側 D16

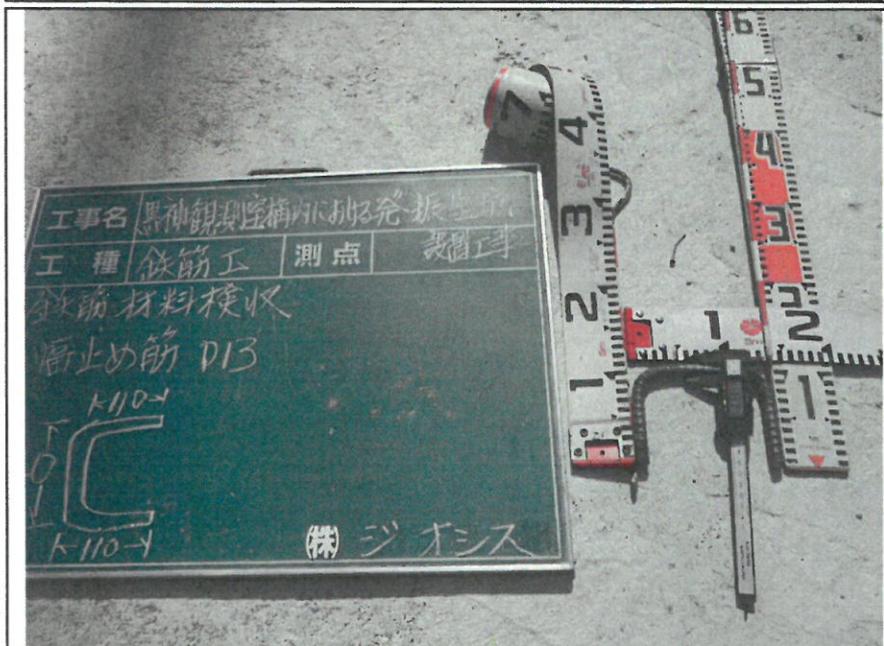


発振堅坑設置
鉄筋工
横筋 D16
材料検収
京都大学黒神観測室構内
外側 D16

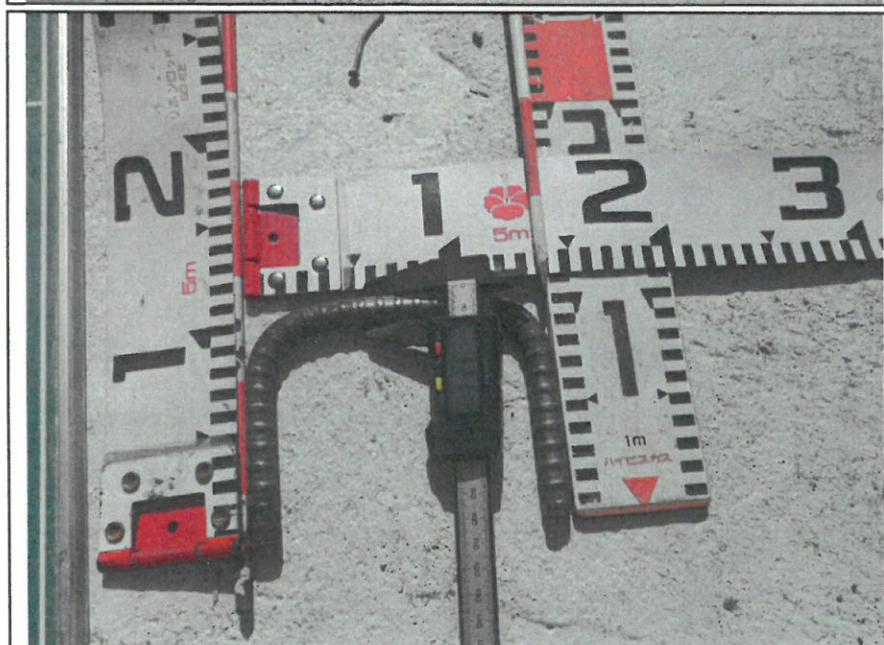




発振堅坑設置
鉄筋工
横筋 D16
材料検収
京都大学黒神観測室構内
外側 D16



発振堅坑設置
鉄筋工
幅止め筋 D13
材料検収
京都大学黒神観測室構内
L =110
L1=140



発振堅坑設置
鉄筋工
幅止め筋 D13
材料検収
京都大学黒神観測室構内
L =110
L1=140

発振豎坑設置
鉄筋工
ベース筋
組立状況
京都大学黒神観測室構内



発振豎坑設置
鉄筋工
ベース筋
組立状況
京都大学黒神観測室構内



発振豎坑設置
鉄筋工
ベース筋
組立完了
京都大学黒神観測室構内





発振堅坑設置
鉄筋工
ベース筋
組立完了
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
鉄筋工
基礎型枠
組立完了
京都大学黒神観測室構内



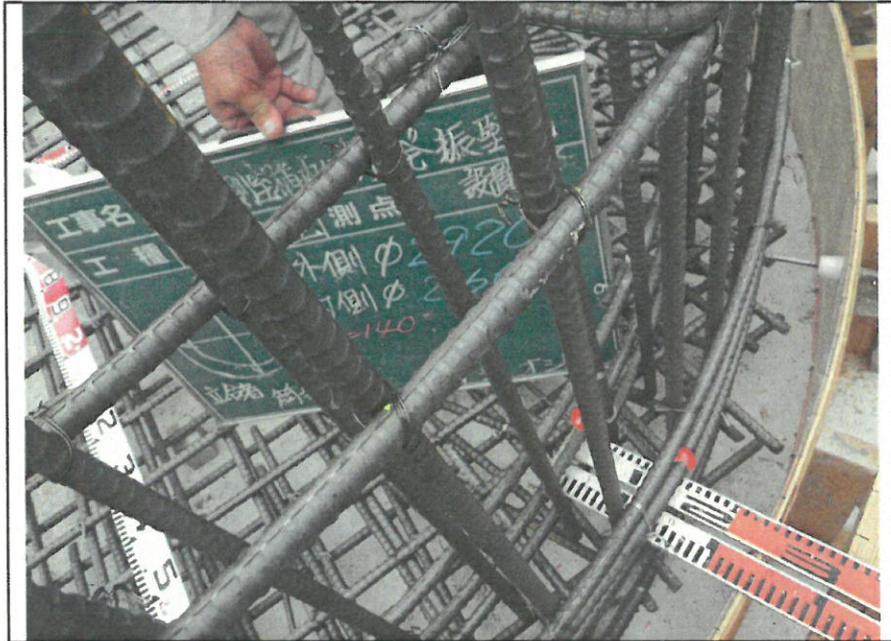
発振堅坑設置
鉄筋工
配筋検査
出来形
京都大学黒神観測室構内
立会者：筒井教授

外側 φ 2,920  
内側 φ 2,660

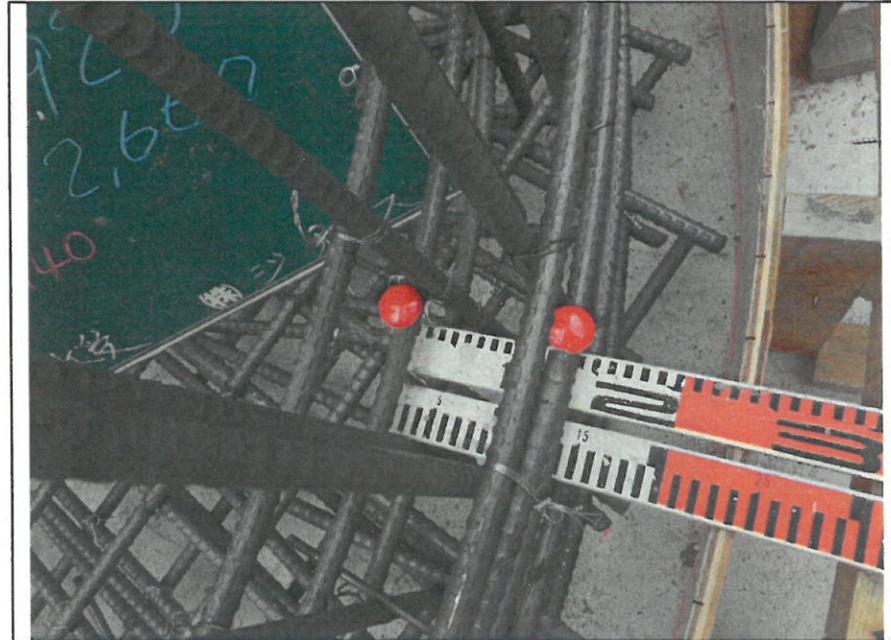
発振堅坑設置
鉄筋工
配筋検査
出来形
京都大学黒神観測室構内
外側 φ 2,920
内側 φ 2,660



発振堅坑設置
鉄筋工
配筋検査
出来形
京都大学黒神観測室構内
外側 φ 2,920
内側 φ 2,660

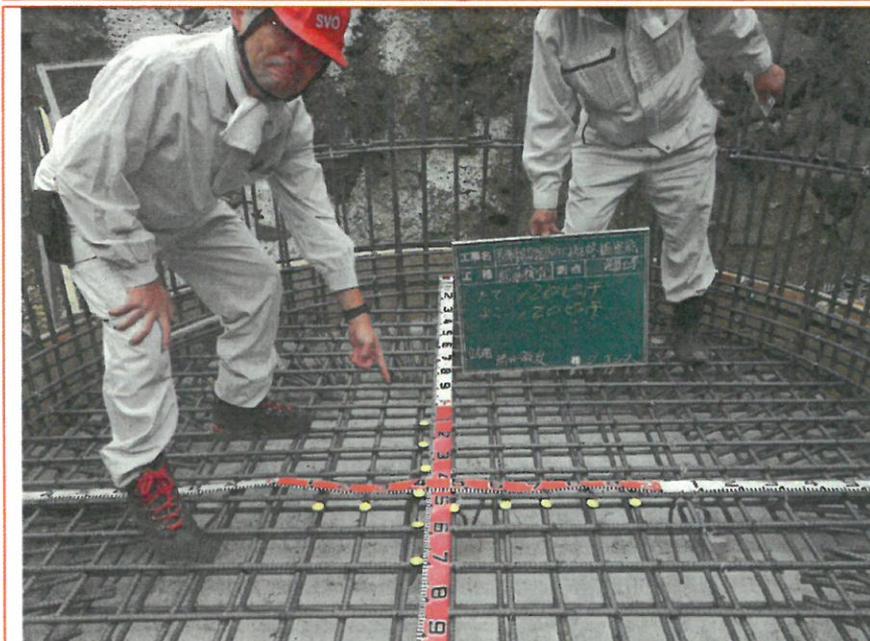


発振堅坑設置
鉄筋工
配筋検査
出来形
京都大学黒神観測室構内
W=140

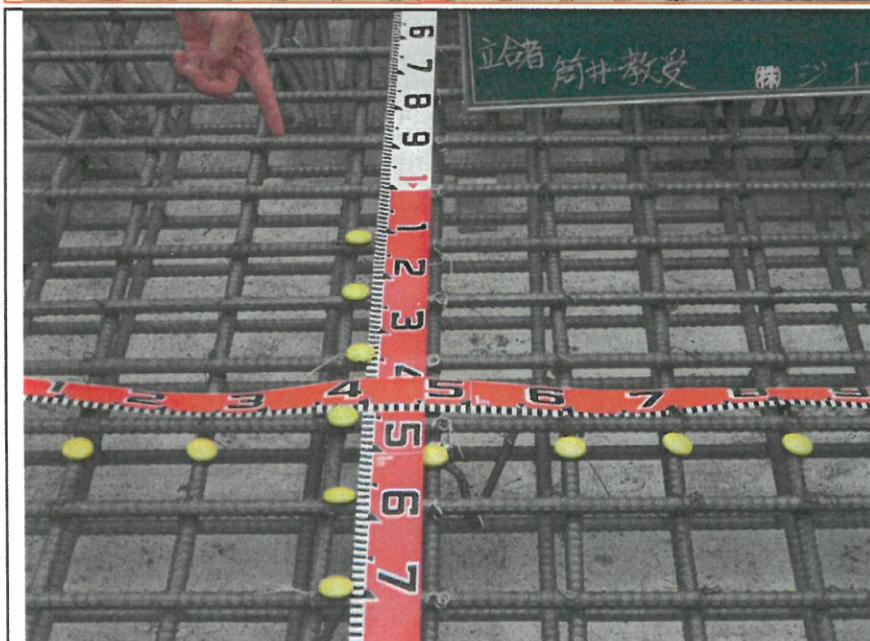




発振竖坑設置
鉄筋工
配筋検査
出来形
京都大学黒神観測室構内
立会者：筒井教授
縦 120ピッチ
横 120ピッチ

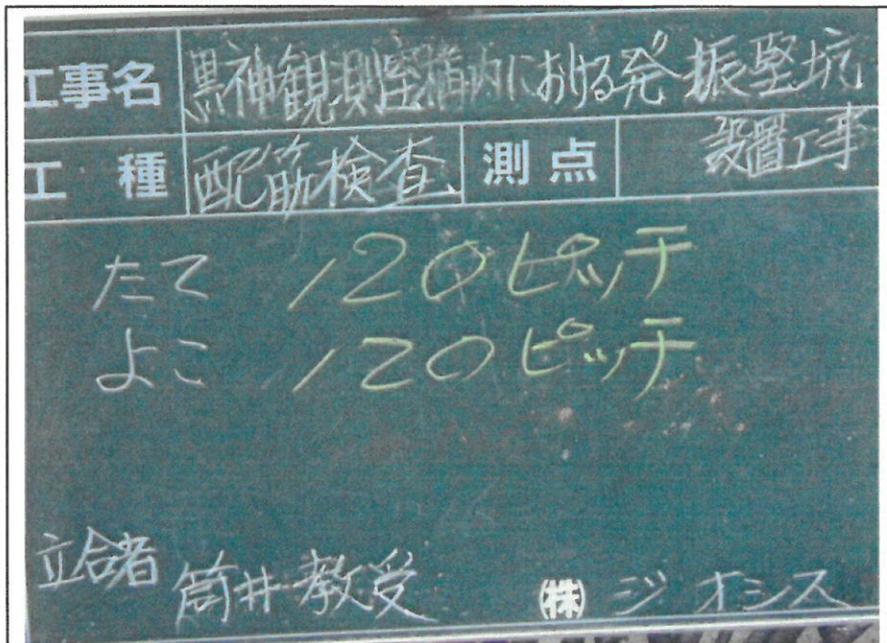


発振竖坑設置
鉄筋工
配筋検査
出来形
京都大学黒神観測室構内
立会者：筒井教授
縦 120ピッチ
横 120ピッチ



発振竖坑設置
鉄筋工
配筋検査
出来形
京都大学黒神観測室構内
縦 120ピッチ
横 120ピッチ

発振堅坑設置
鉄筋工
配筋検査
出来形
京都大学黒神観測室構内

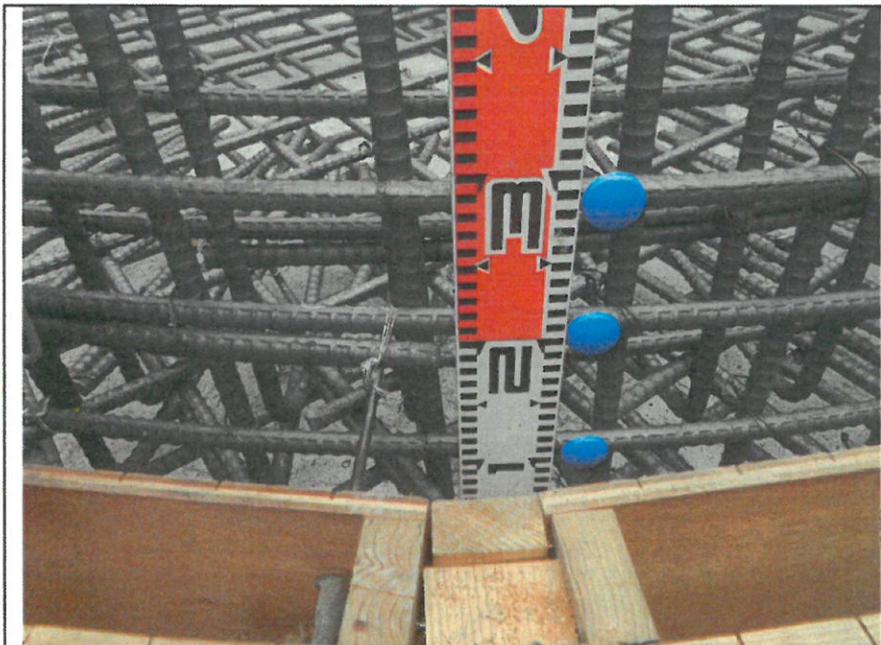


発振堅坑設置
鉄筋工
配筋検査
出来形
京都大学黒神観測室構内
立会者：筒井教授
主筋D16 120ピッチ
横筋D16 90ピッチ



発振堅坑設置
鉄筋工
配筋検査
出来形
京都大学黒神観測室構内
主筋D16 120ピッチ





発振堅坑設置
鉄筋工
配筋検査
出来形
京都大学黒神観測室構内
横筋D16 90ピッチ

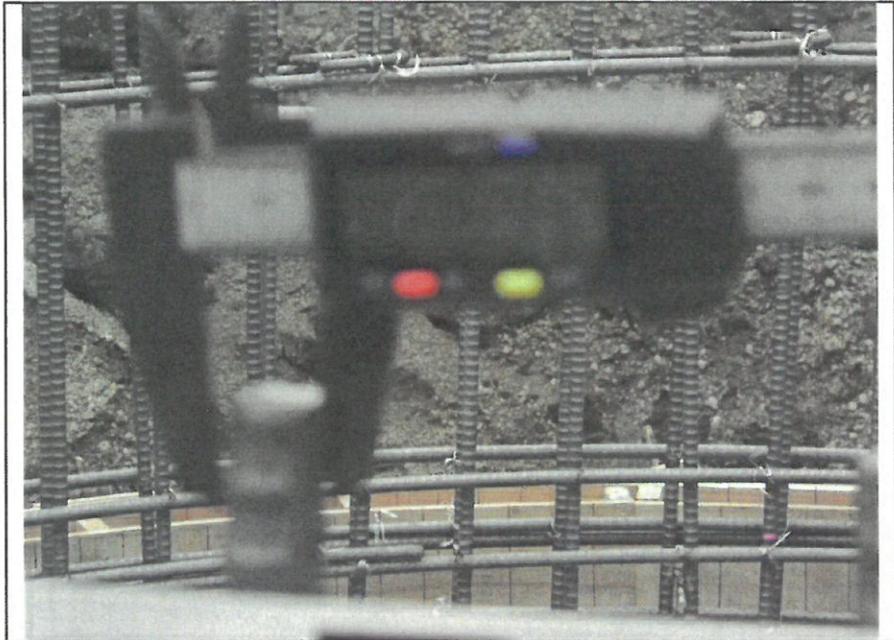


発振堅坑設置
鉄筋工
配筋検査
出来形
京都大学黒神観測室構内
立会者：筒井教授
(内側)主筋D16 120ピッチ
(内側)横筋D16 90ピッチ



発振堅坑設置
鉄筋工
配筋検査
出来形
京都大学黒神観測室構内
(内側)主筋D16 120ピッチ
(内側)横筋D16 90ピッチ

発振堅坑設置
鉄筋工
配筋検査
出来形
京都大学黒神観測室構内
主筋D16



発振堅坑設置
堅坑工
基礎コンクリート
打設状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
底盤コンクリート
打設状況
京都大学黒神観測室構内





発振堅坑設置
堅坑工
底盤コンクリート
養生状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
底盤コンクリート
出来形
京都大学黒神観測室構内
$\phi$ 3, 100 $\phi$ 3, 100
H= 300    H= 300



発振堅坑設置
堅坑工
底盤コンクリート
出来形
京都大学黒神観測室構内
$\phi$ 3, 100 $\phi$ 3, 100
H= 300    H= 300

発振堅坑設置
堅坑工
底盤コンクリート
出来形
京都大学黒神観測室構内
H= 300 H= 300



発振堅坑設置
堅坑工
底盤コンクリート
出来形
京都大学黒神観測室構内
φ 3, 100 φ 3, 100



発振堅坑設置
堅坑工
底盤コンクリート
出来形
京都大学黒神観測室構内
φ 3, 100 φ 3, 100





発振堅坑設置
堅坑工
底盤コンクリート
Pコン補修状況
京都大学黒神観測室構内

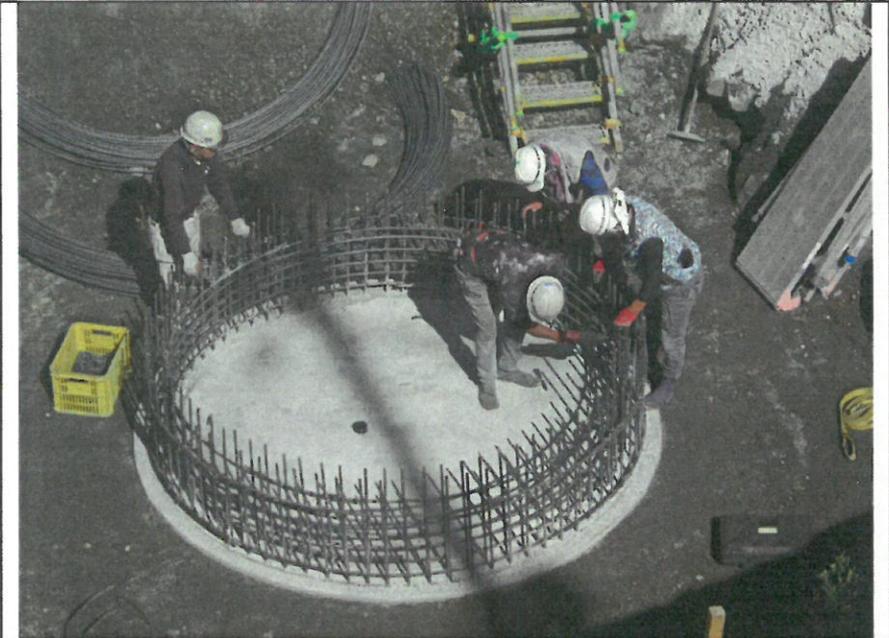


発振堅坑設置
堅坑工
底盤コンクリート
Pコン補修状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
底盤部分 埋戻し
転圧状況
京都大学黒神観測室構内

発振堅坑設置
堅坑工
1段目 鉄筋
組立状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
1段目 鉄筋
組立状況
京都大学黒神観測室構内

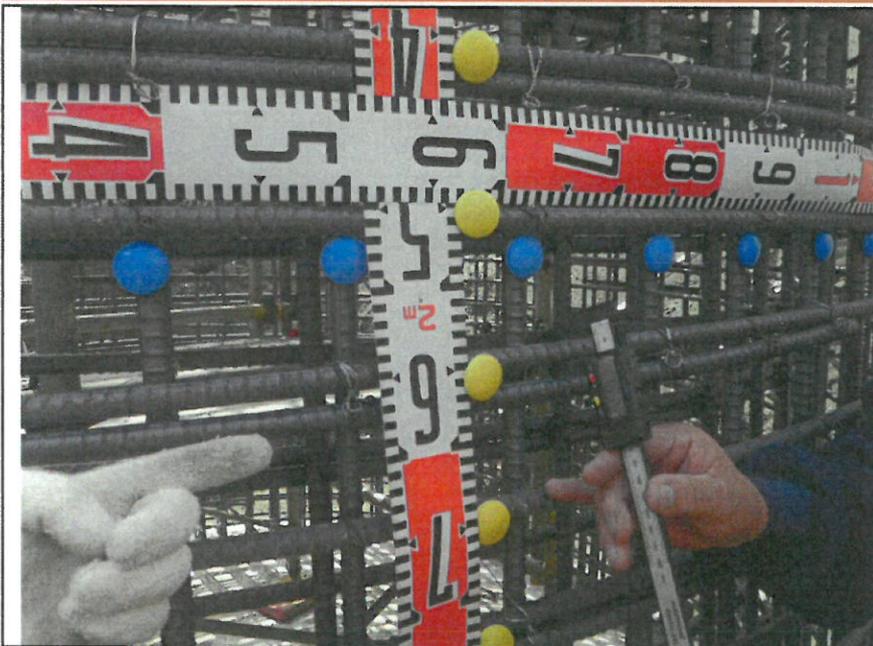


発振堅坑設置
堅坑工
配筋検査
出来形
京都大学黒神観測室構内
立会者：筒井教授
縦筋D16 120ピッチ
横筋D16 90ピッチ

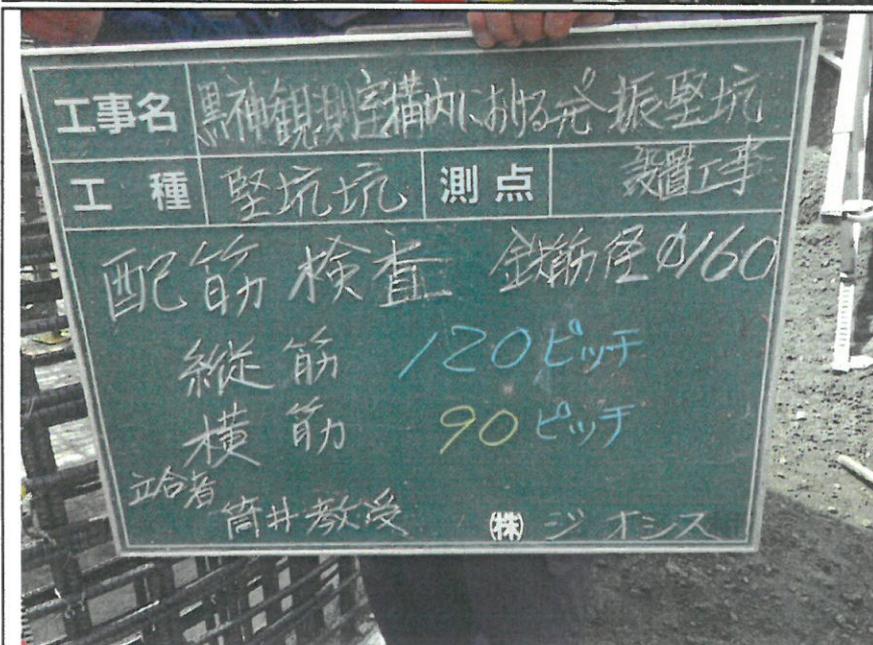




発振堅坑設置
堅坑工
配筋検査
出来形
京都大学黒神観測室構内
立会者：筒井教授
縦筋D16 120ピッチ
横筋D16 90ピッチ



発振堅坑設置
堅坑工
配筋検査
出来形
京都大学黒神観測室構内
縦筋D16 120ピッチ
横筋D16 90ピッチ

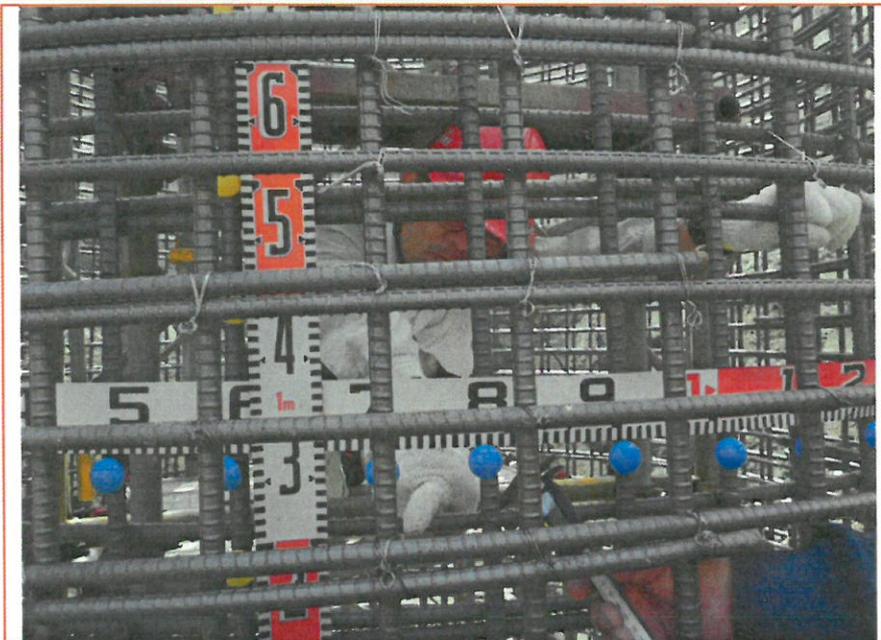


発振堅坑設置
堅坑工
配筋検査
出来形
京都大学黒神観測室構内

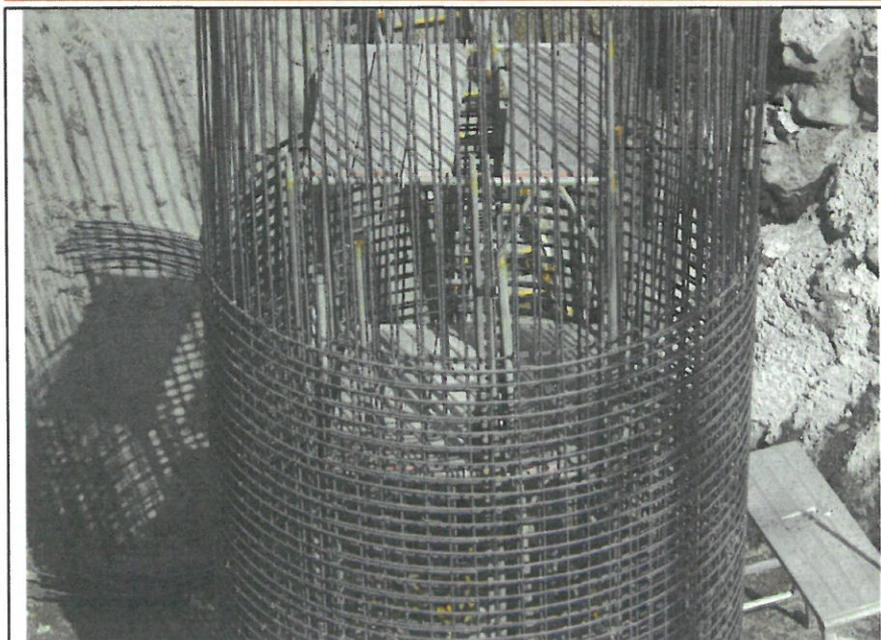
発振堅坑設置
堅坑工
配筋検査
出来形
京都大学黒神観測室構内
(内側)縦筋D16 120ピッチ
(内側)横筋D16 90ピッチ

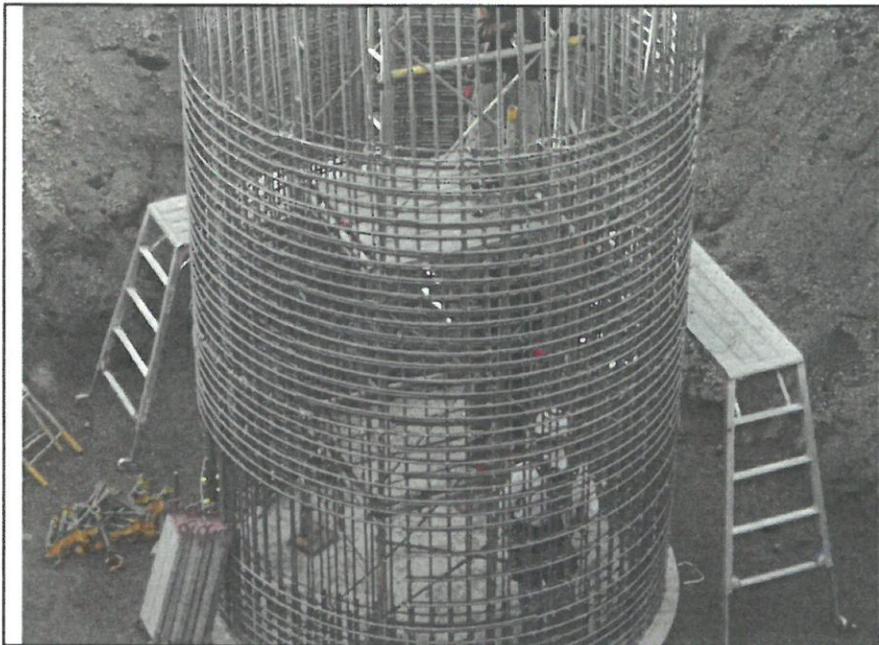


発振堅坑設置
堅坑工
配筋検査
出来形
京都大学黒神観測室構内
立会者：筒井教授
(内側)縦筋D16 120ピッチ
(内側)横筋D16 90ピッチ

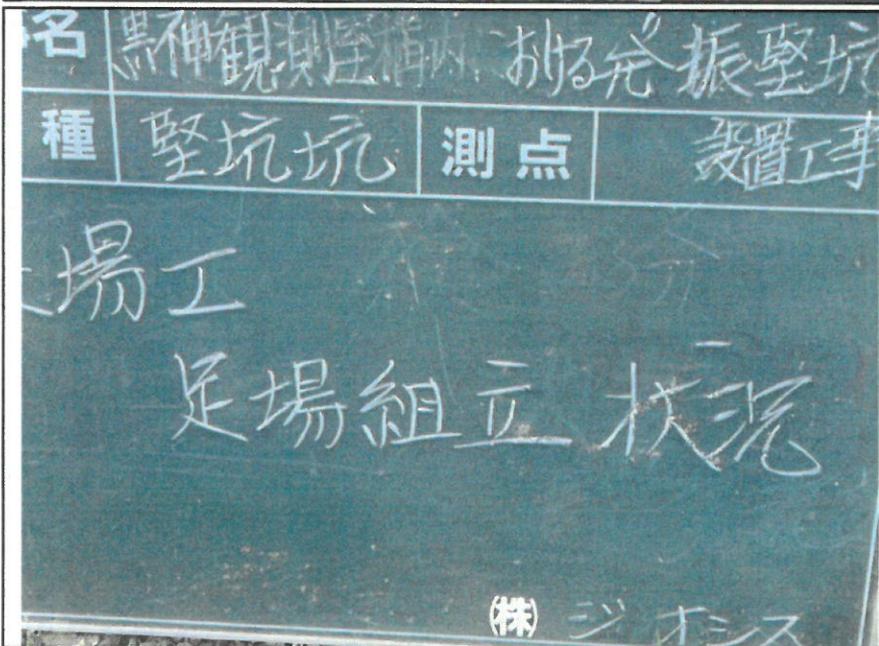


発振堅坑設置
堅坑工
足場
組立状況
京都大学黒神観測室構内





発振堅坑設置
堅坑工
足場
組立状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
足場
組立状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
型枠 1段目
組立完了
京都大学黒神観測室構内

発振堅坑設置
堅坑工
立上りコンクリート 1段目
打設状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
立上りコンクリート 1段目
打設状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
立上りコンクリート 1段目
打設状況
京都大学黒神観測室構内

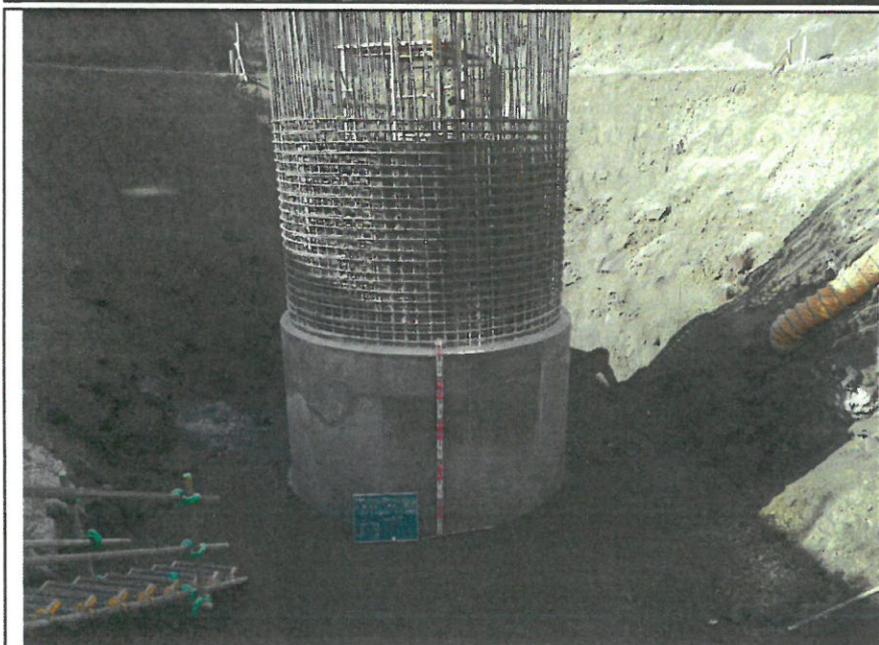




発振堅坑設置
堅坑工
立上りコンクリート 1段目
レイタンス除去状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
立上りコンクリート 1段目
養生状況
京都大学黒神観測室構内

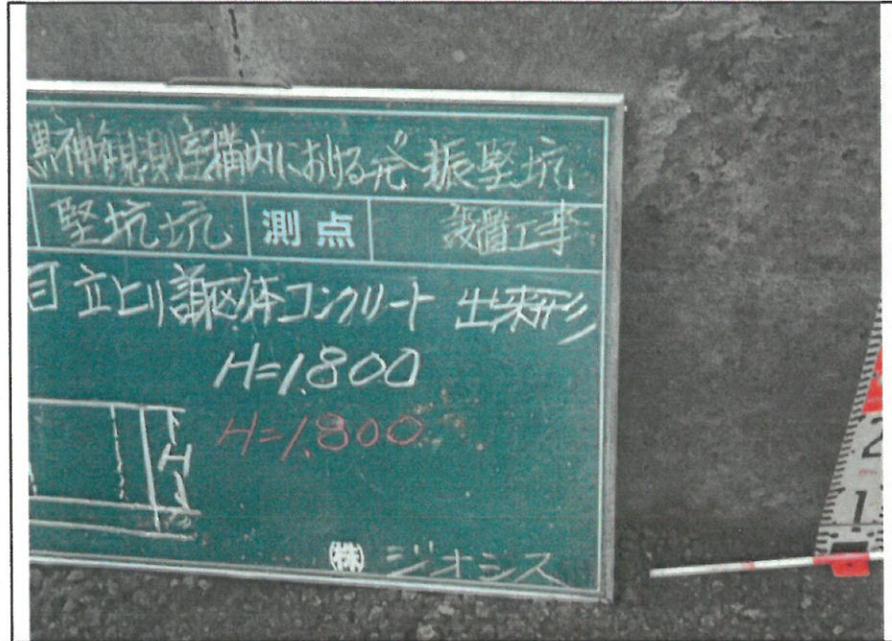


発振堅坑設置
堅坑工
立上り躯体コンクリート 1段目
出来形
京都大学黒神観測室構内
H=1,800 H=1,800

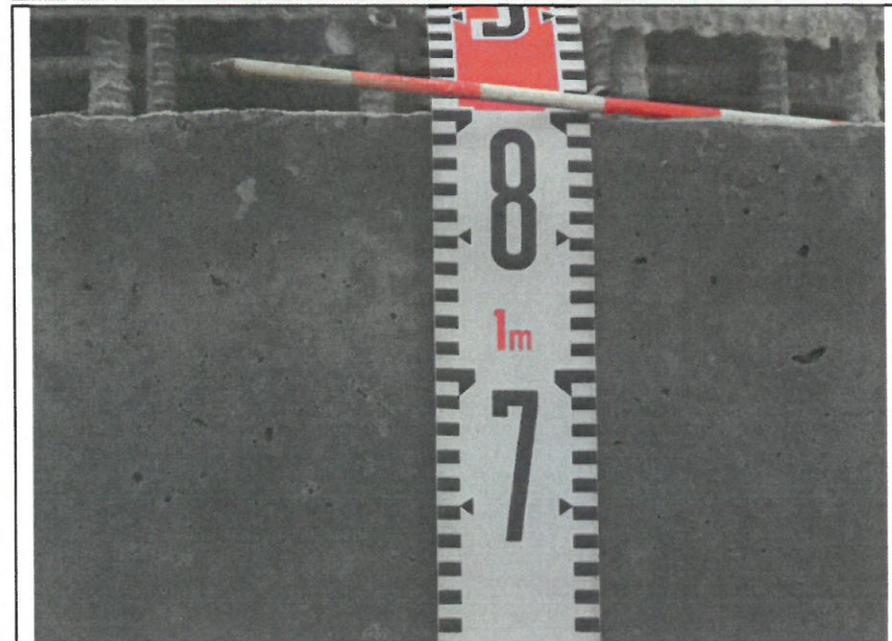
発振堅坑設置
堅坑工
立上り躯体コンクリート 1 段目
出来形
京都大学黒神観測室構内
H=1,800 H=1,800



発振堅坑設置
堅坑工
立上り躯体コンクリート 1 段目
出来形
京都大学黒神観測室構内

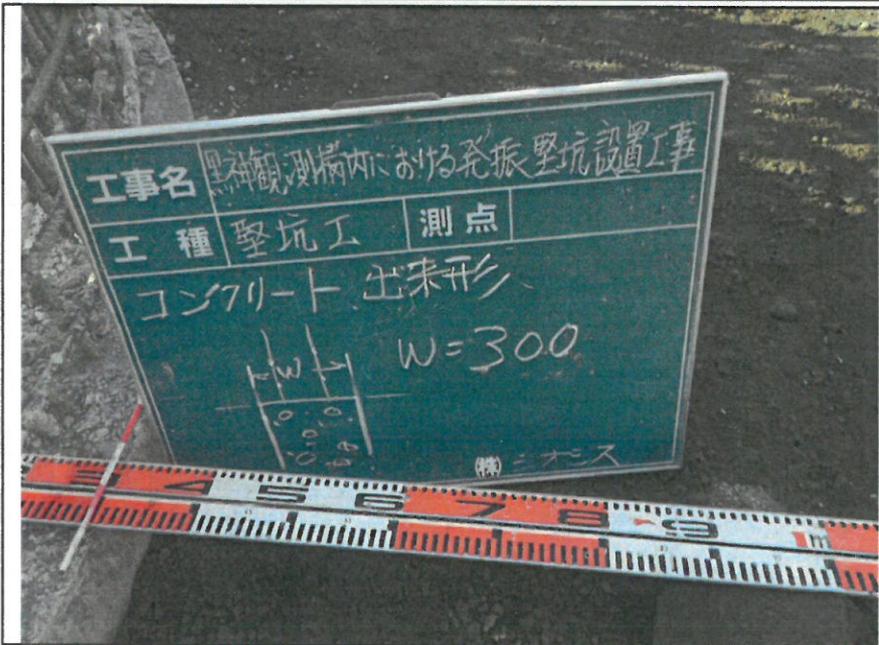


発振堅坑設置
堅坑工
立上り躯体コンクリート 1 段目
出来形
京都大学黒神観測室構内
H=1,800 H=1,800

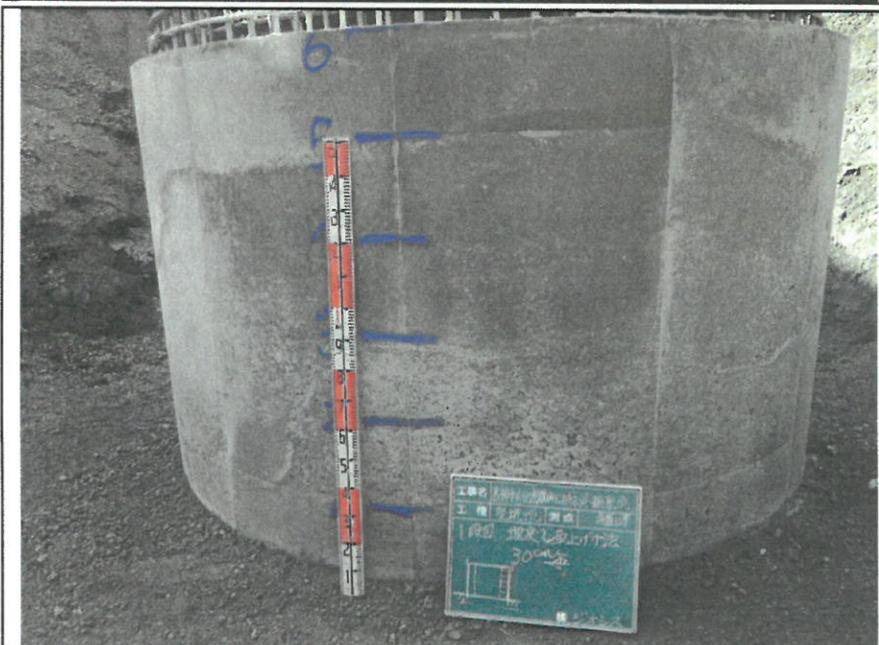




発振堅坑設置
堅坑工
立上り躯体コンクリート 1 段目
出来形
京都大学黒神観測室構内
W=300 W=300

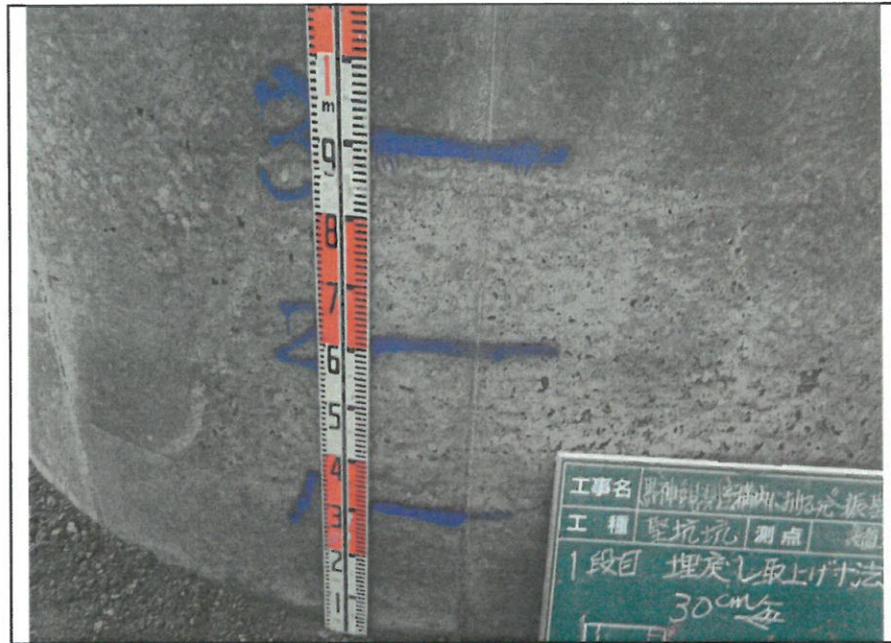


発振堅坑設置
堅坑工
立上り躯体コンクリート 1 段目
出来形
京都大学黒神観測室構内
W=300 W=300



発振堅坑設置
堅坑工
立上り躯体コンクリート 1 段目
出来形
京都大学黒神観測室構内

発振堅坑設置
堅坑工
立上り躯体コンクリート 1 段目
取上げ寸法 30cm毎
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
1段目 埋戻し
1層目 転圧状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
1段目 埋戻し
1層目 転圧完了
京都大学黒神観測室構内





発振堅坑設置
堅坑工
1段目 埋戻し
2層目 転圧状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
1段目 埋戻し
3層目 転圧状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
1段目 埋戻し
4層目 転圧状況
京都大学黒神観測室構内

発振堅坑設置
堅坑工
1段目 埋戻し
5層目 転圧状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
1段目 埋戻し
6層目 転圧状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
型枠 2段目
組立完了
京都大学黒神観測室構内

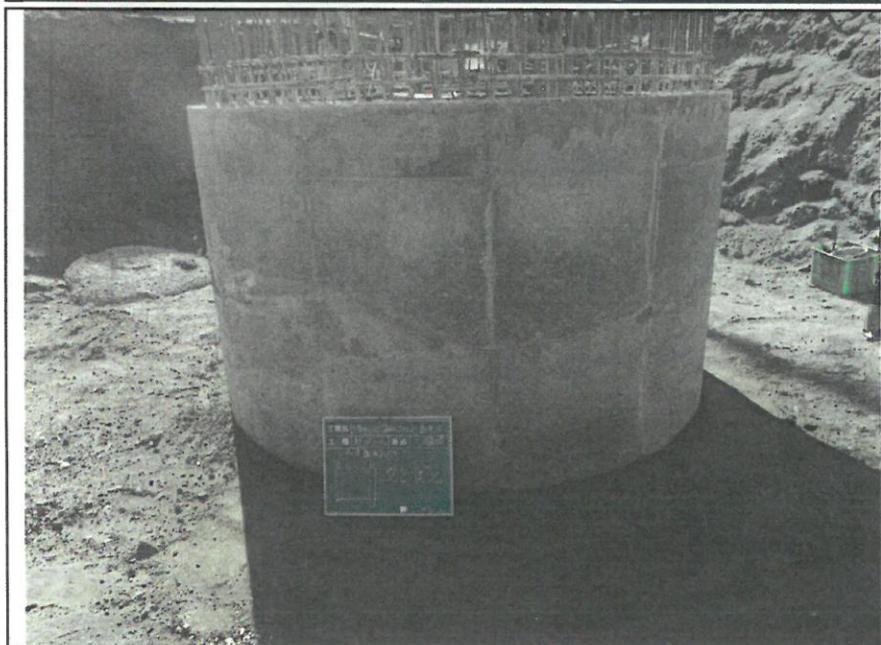




発振堅坑設置
堅坑工
躯体コンクリート 2段目
打設状況
京都大学黒神観測室構内

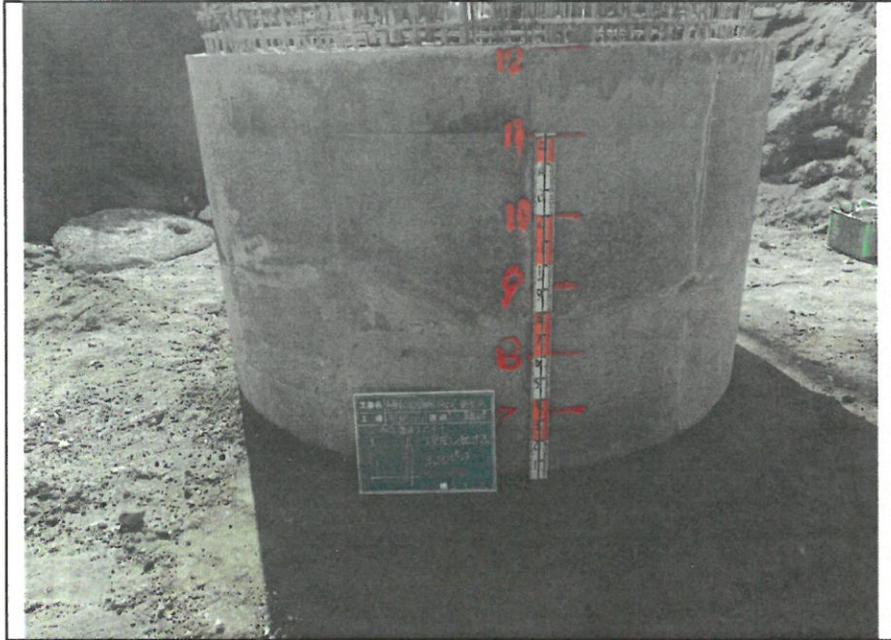


発振堅坑設置
堅坑工
躯体コンクリート 2段目
養生状況
京都大学黒神観測室構内

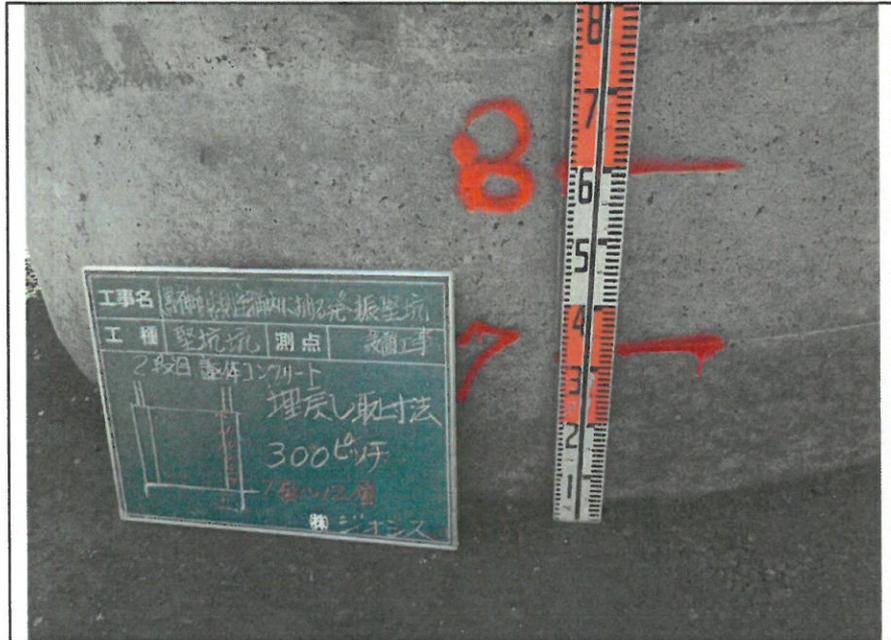


発振堅坑設置
堅坑工
躯体コンクリート 2段目
完了
京都大学黒神観測室構内

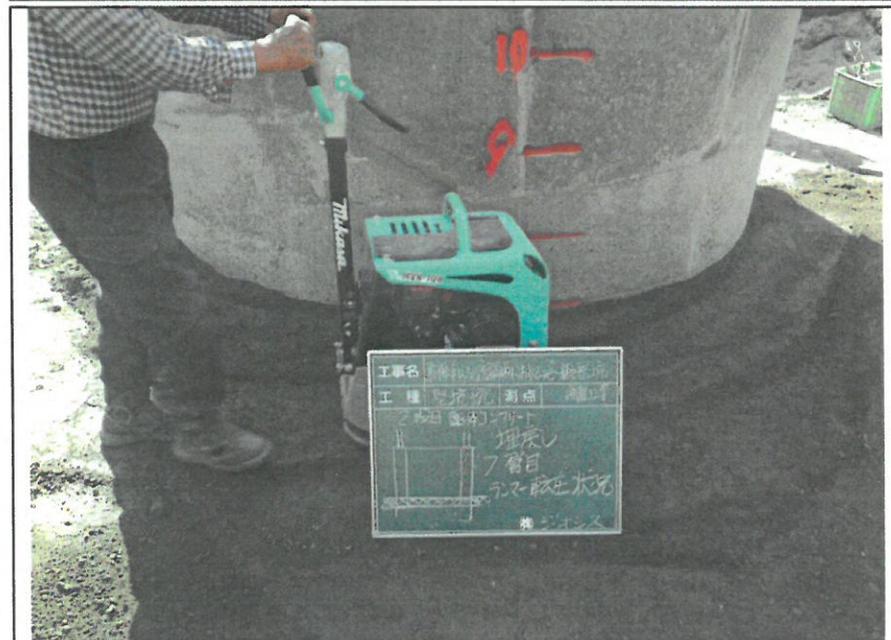
発振堅坑設置
堅坑工
2段目 埋戻し
取上げ寸法 30cm毎
京都大学黒神観測室構内

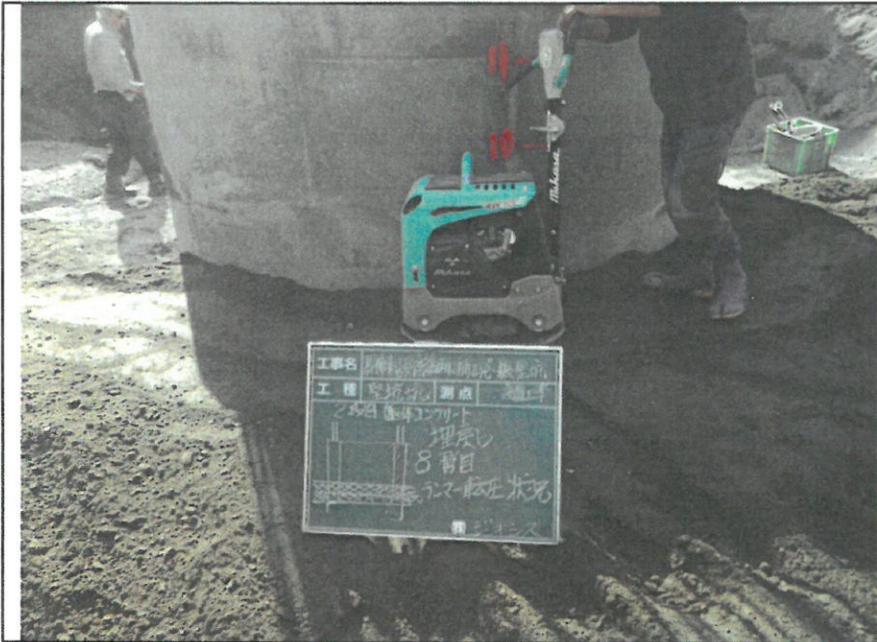


発振堅坑設置
堅坑工
2段目 埋戻し
取上げ寸法 30cm毎
京都大学黒神観測室構内

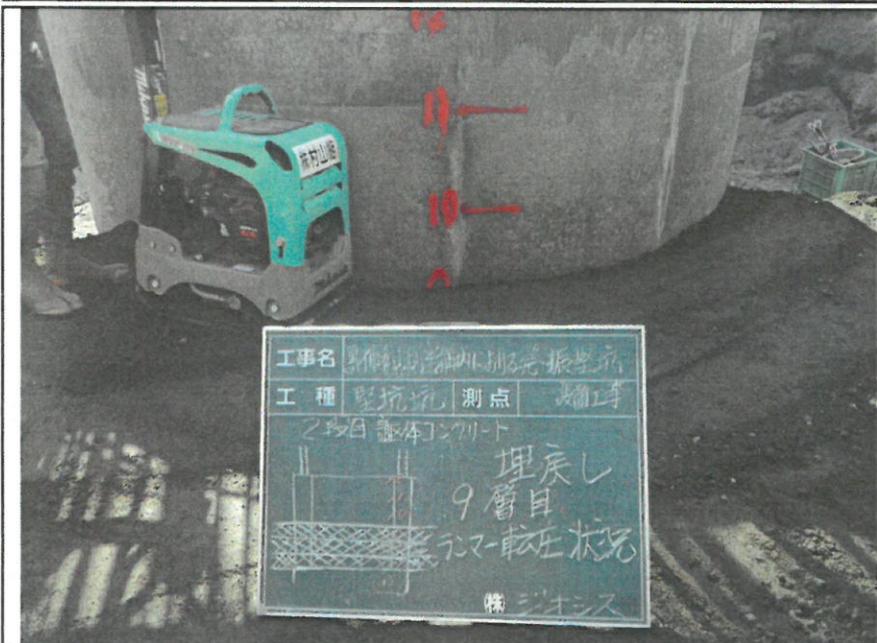


発振堅坑設置
堅坑工
2段目 埋戻し
7層目 転圧状況
京都大学黒神観測室構内





発振堅坑設置
堅坑工
2段目 埋戻し
8層目 転圧状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
2段目 埋戻し
9層目 転圧状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
2段目 埋戻し
10層目 転圧状況
京都大学黒神観測室構内

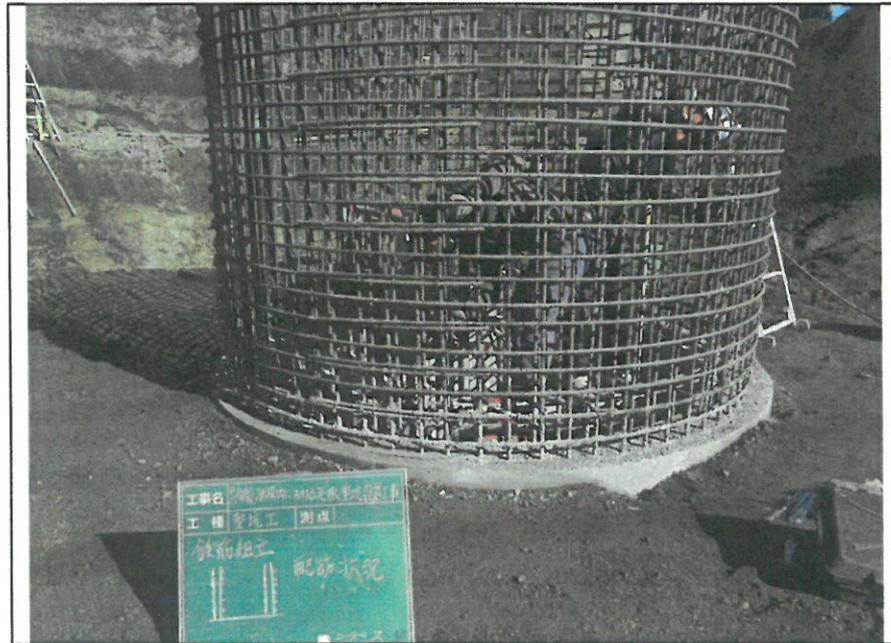
発振堅坑設置
堅坑工
2段目 埋戻し
11層目 転圧状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
2段目 埋戻し
12層目 転圧状況
京都大学黒神観測室構内

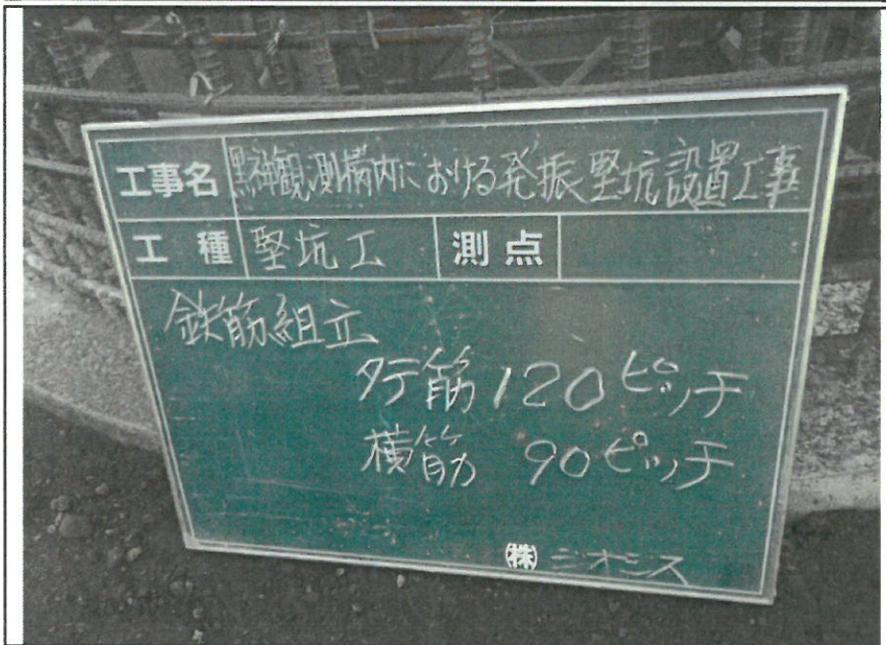


発振堅坑設置
堅坑工
鉄筋組立
配筋状況
京都大学黒神観測室構内





発振堅坑設置
堅坑工
配筋検査
出来形
京都大学黒神観測室構内
縦筋D16 120ピッチ
横筋D16 90ピッチ



発振堅坑設置
堅坑工
配筋
出来形
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
配筋
出来形
京都大学黒神観測室構内
縦筋D16 120ピッチ
横筋D16 90ピッチ

発振堅坑設置
堅坑工
足場
組立状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
型枠 3段目
型枠完了
京都大学黒神観測室構内

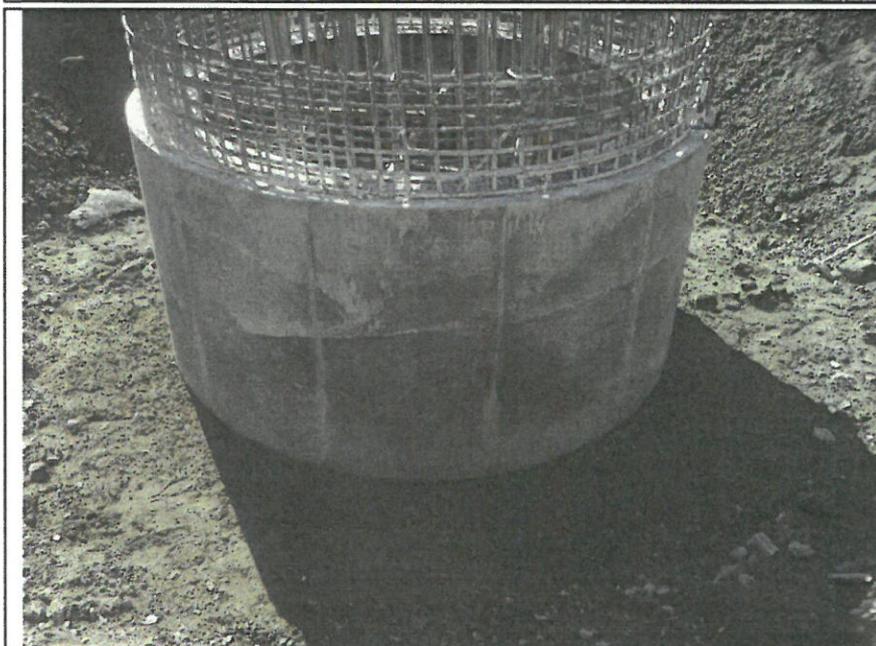


発振堅坑設置
堅坑工
躯体コンクリート 3段目
打設状況
京都大学黒神観測室構内

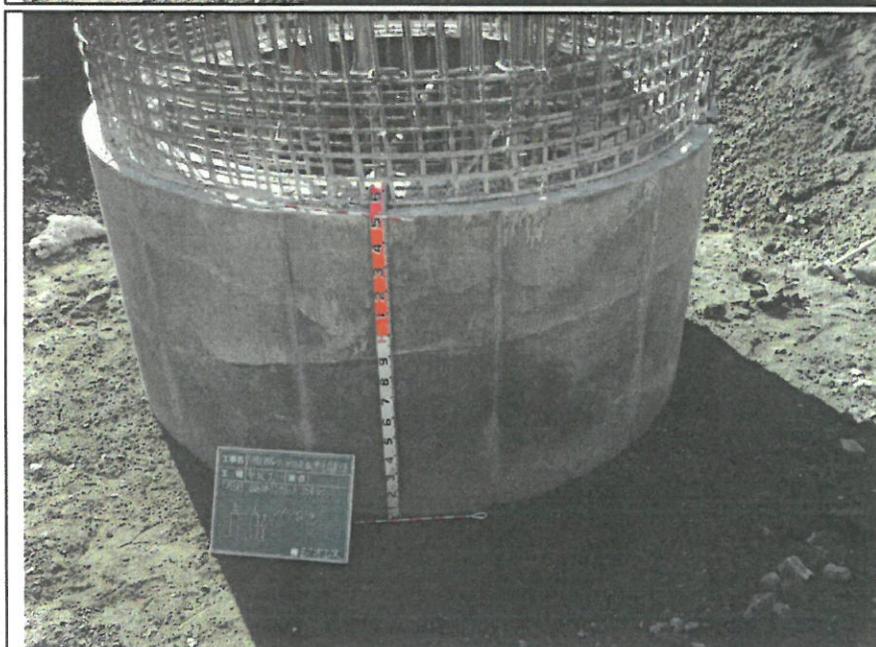




発振堅坑設置
堅坑工
躯体コンクリート 3段目
養生状況
京都大学黒神観測室構内

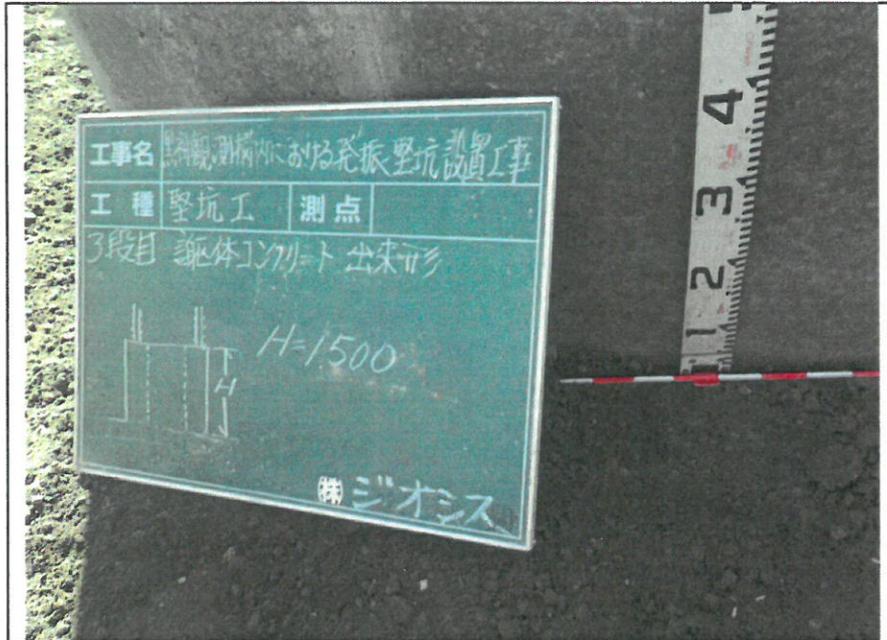


発振堅坑設置
堅坑工
躯体コンクリート 3段目
完了
京都大学黒神観測室構内

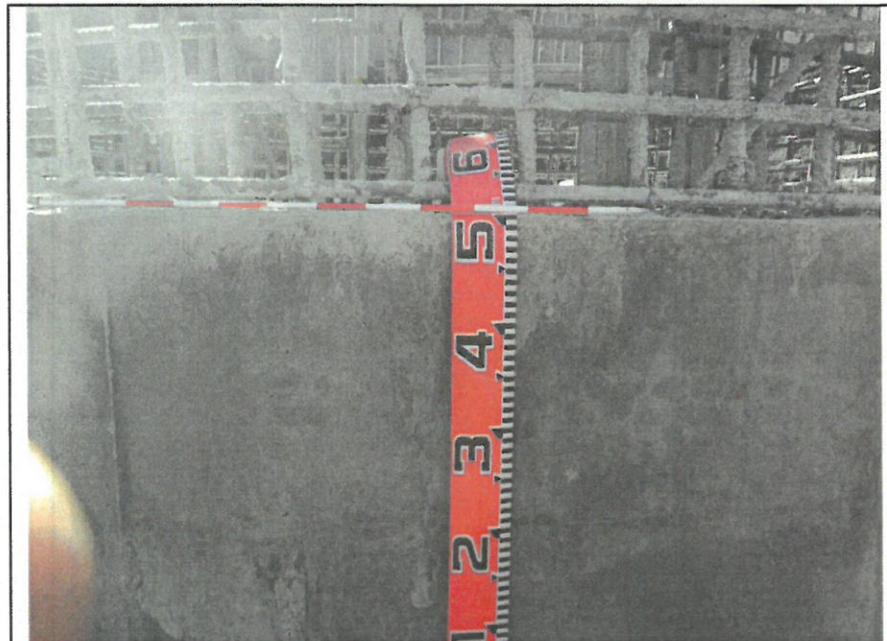


発振堅坑設置
堅坑工
躯体コンクリート 3段目
出来形
京都大学黒神観測室構内
H=1,500 H=1,500

発振堅坑設置
堅坑工
躯体コンクリート 3段目
出来形
京都大学黒神観測室構内
H=1,500 H=1,500

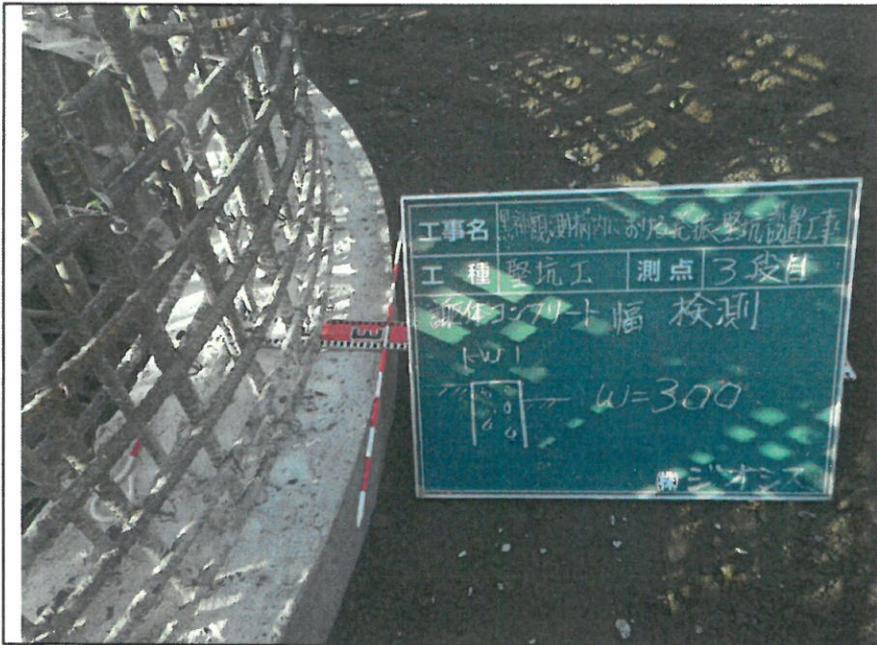


発振堅坑設置
堅坑工
躯体コンクリート 3段目
出来形
京都大学黒神観測室構内
H=1,500 H=1,500

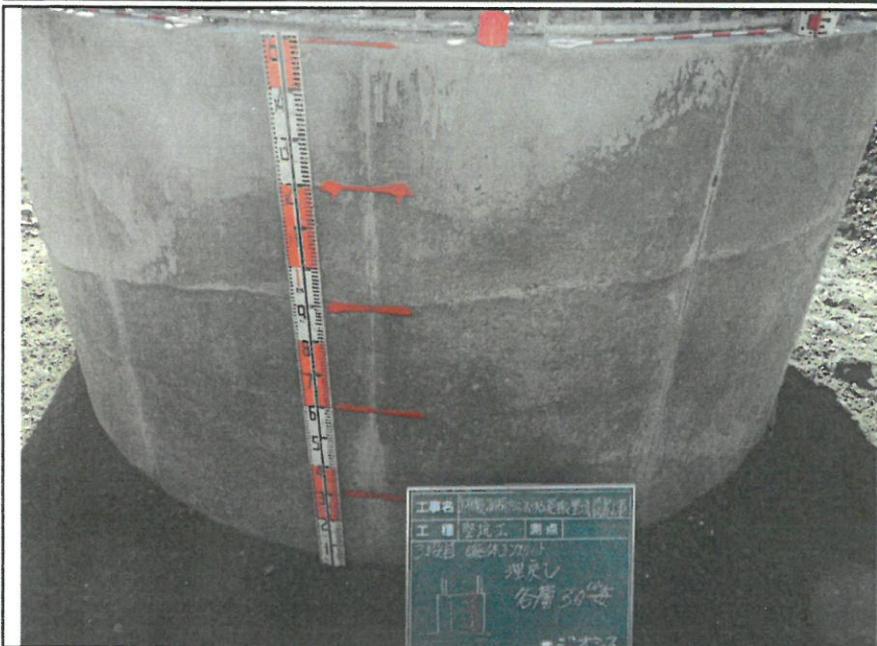


発振堅坑設置
堅坑工
躯体コンクリート 3段目
出来形
京都大学黒神観測室構内

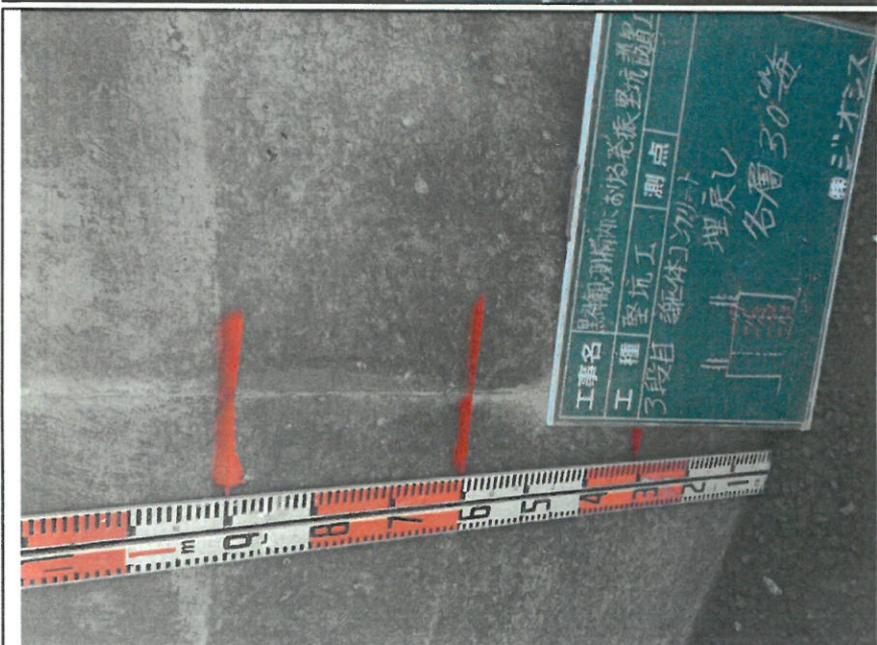




発振堅坑設置
堅坑工
躯体コンクリート 3段目
出来形
京都大学黒神観測室構内
W=300 W=300



発振堅坑設置
堅坑工
3段目 埋戻し
取上げ寸法 30cm毎
京都大学黒神観測室構内

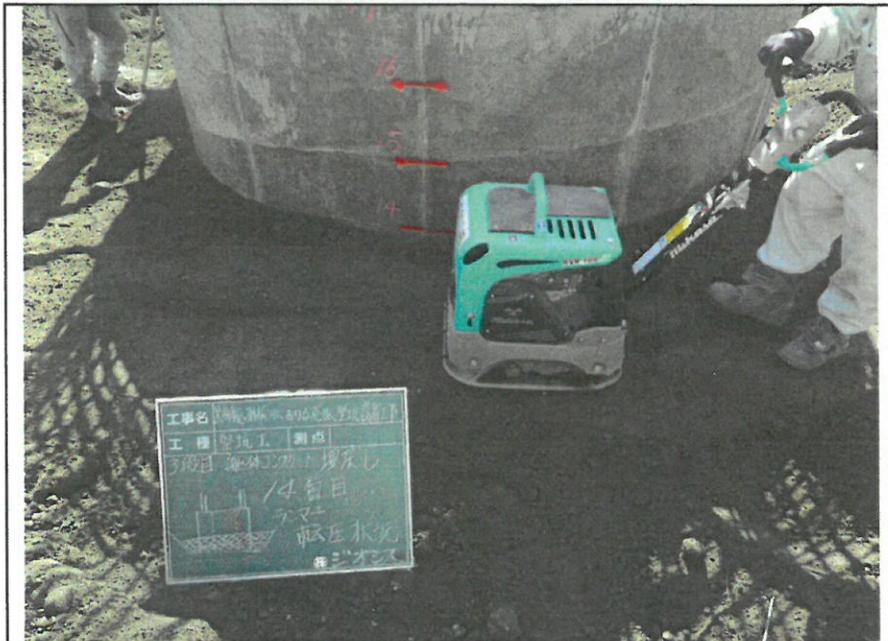


発振堅坑設置
堅坑工
3段目 埋戻し
取上げ寸法 30cm毎
京都大学黒神観測室構内

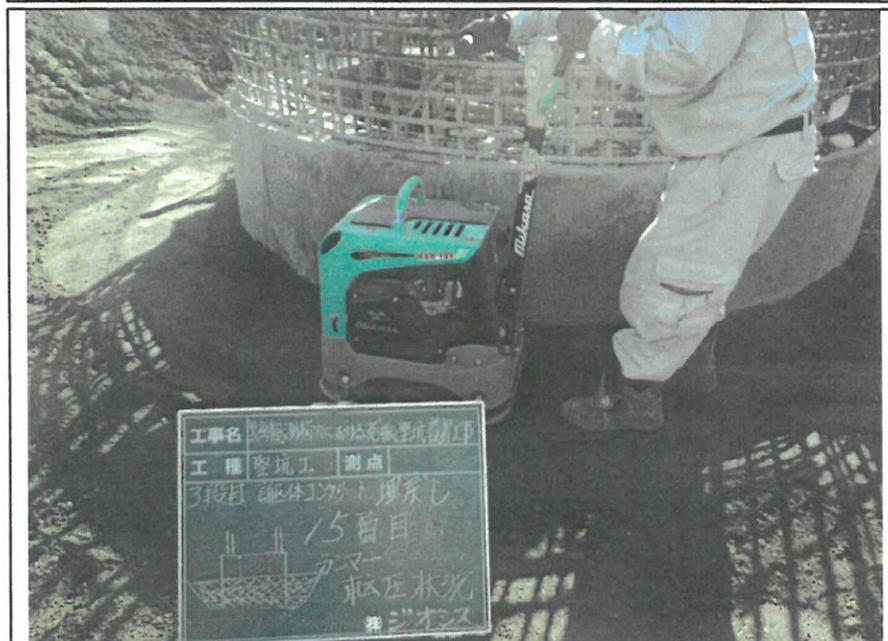
発振堅坑設置
堅坑工
3段目 埋戻し
13層目 転圧状況
京都大学黒神観測室構内

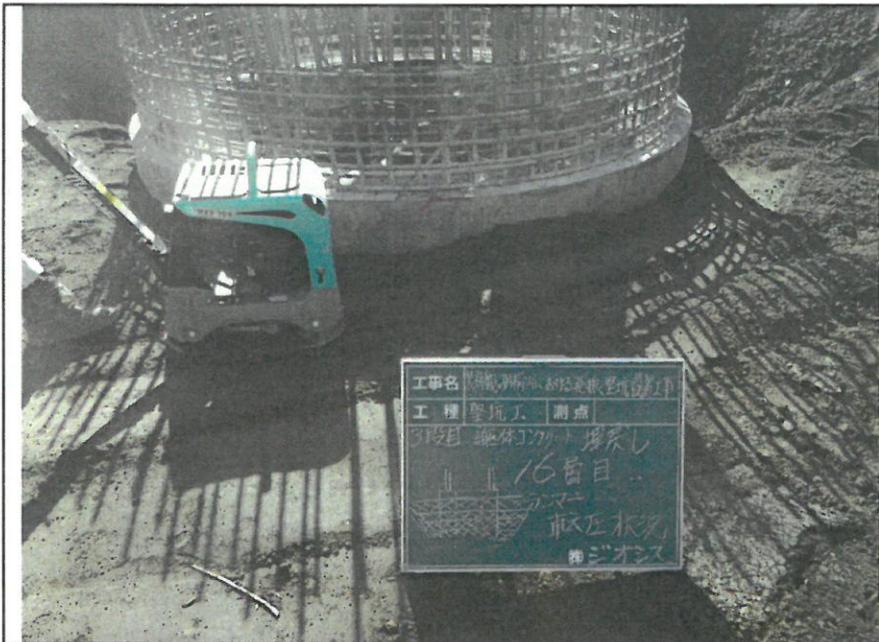


発振堅坑設置
堅坑工
3段目 埋戻し
14層目 転圧状況
京都大学黒神観測室構内

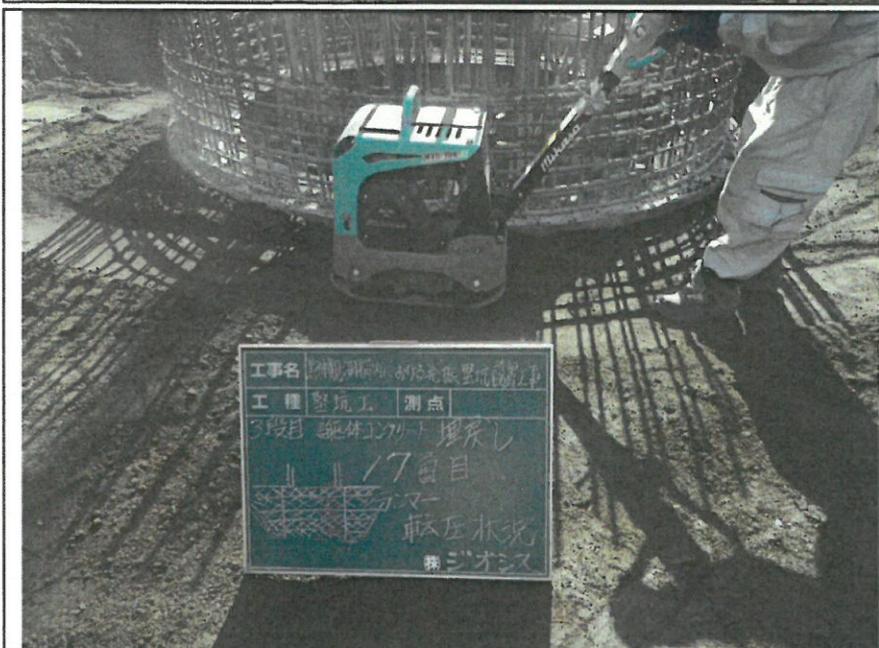


発振堅坑設置
堅坑工
3段目 埋戻し
15層目 転圧状況
京都大学黒神観測室構内

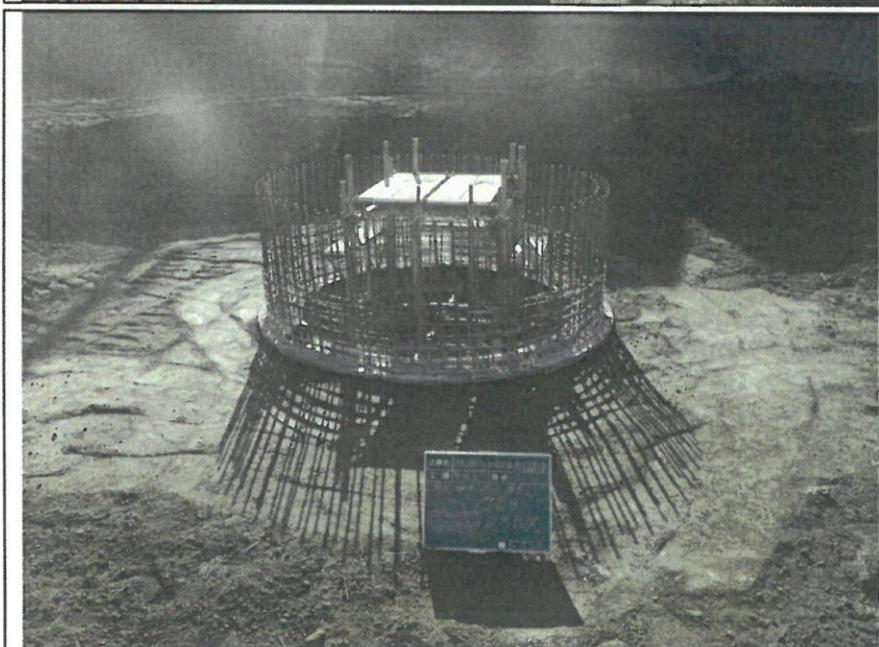




発振堅坑設置
堅坑工
3段目 埋戻し
16層目 転圧状況
京都大学黒神観測室構内

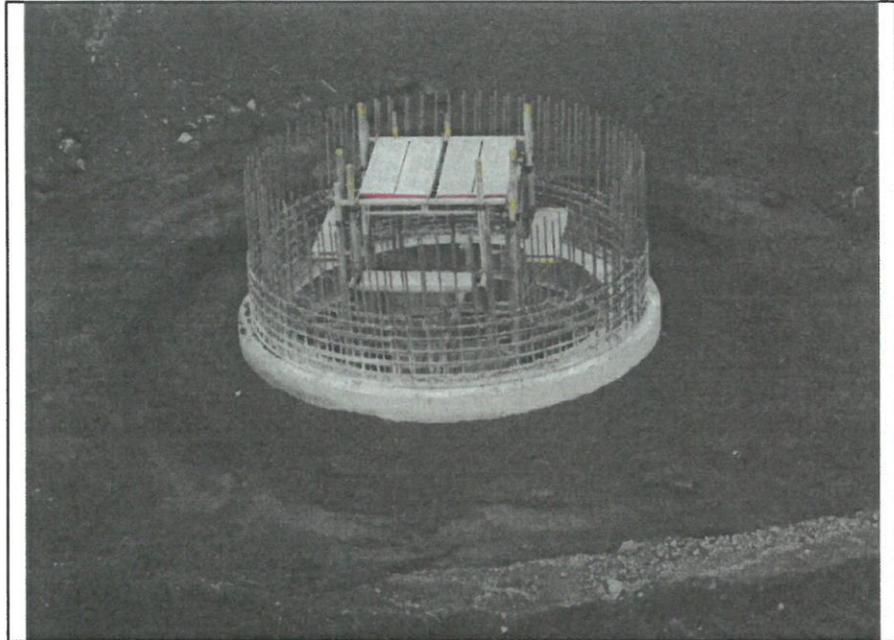


発振堅坑設置
堅坑工
3段目 埋戻し
17層目 転圧状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
3段目 埋戻し
17層目 転圧完了
京都大学黒神観測室構内

発振堅坑設置
堅坑工
4段目 床掘
床掘完了
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
外側石積工
転石積状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
外側石積工
転石積状況
京都大学黒神観測室構内





発振堅坑設置
堅坑工
外側石積工
転石積完了
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
外側石積工
転石積完了
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
張コンクリート
下地完了
京都大学黒神観測室構内

発振堅坑設置
堅坑工
張コンクリート
下地完了
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
張コンクリート
下地完了
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
張コンクリート
下地完了
京都大学黒神観測室構内





発振堅坑設置
堅坑工
張コンクリート
完了
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
張コンクリート
完了
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
立上り 鉄筋組立
組立状況
京都大学黒神観測室構内

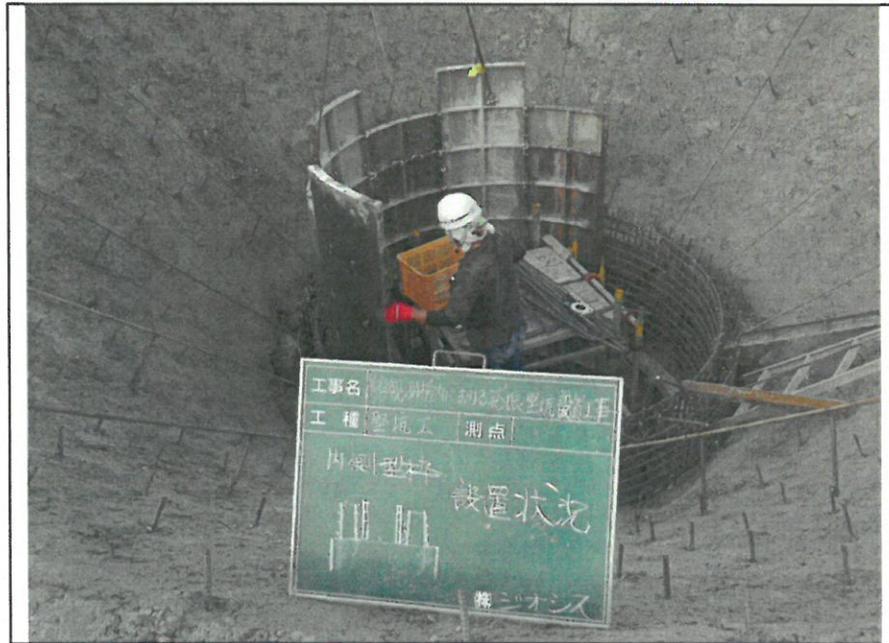
発振堅坑設置
堅坑工
立上り 鉄筋組立
組立状況
京都大学黒神観測室構内

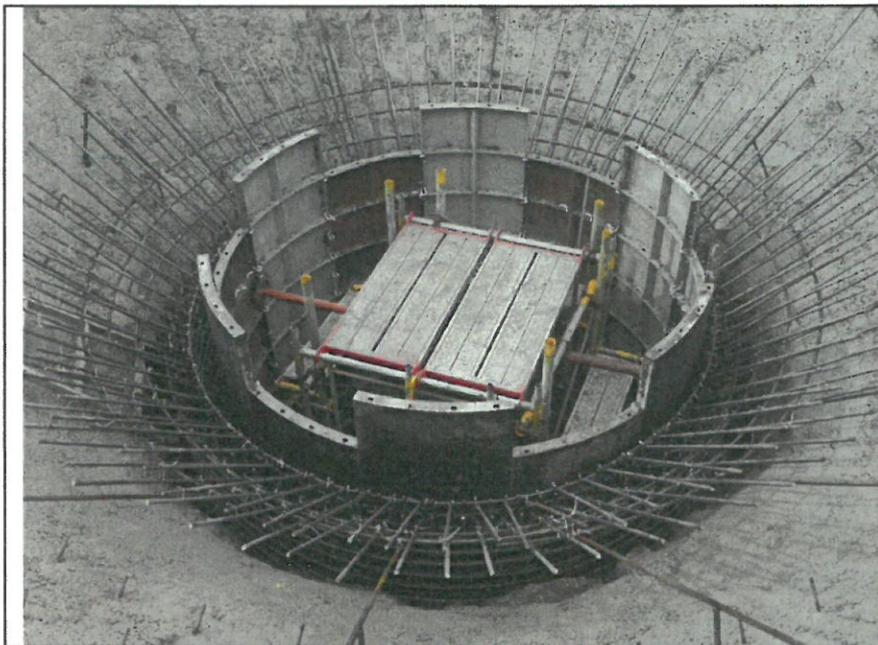


発振堅坑設置
堅坑工
立上り 鉄筋組立
組立状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
内型枠組立
組立状況
京都大学黒神観測室構内





発振堅坑設置
堅坑工
立上り 鉄筋組立・足場組立
配筋・足場完了
京都大学黒神観測室構内

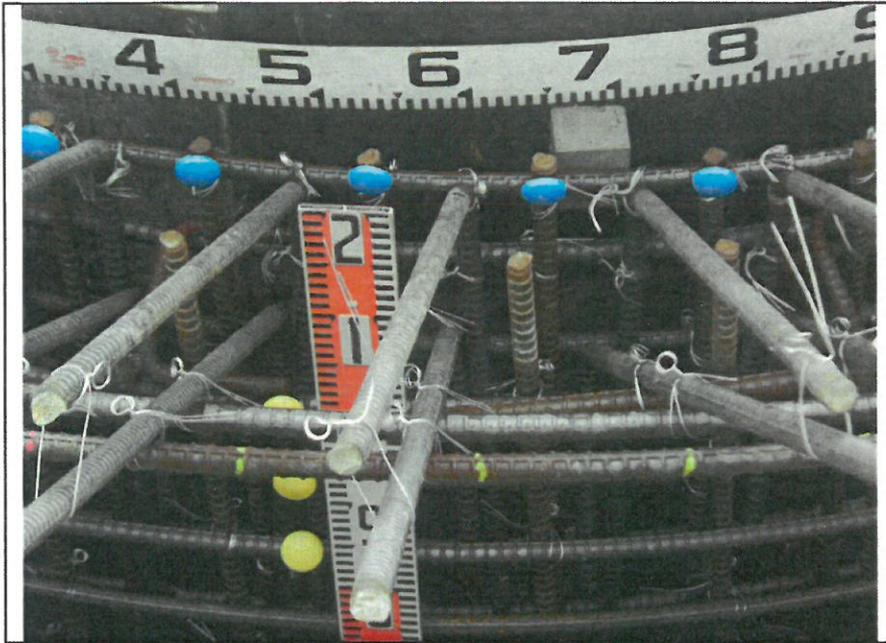


発振堅坑設置
堅坑工
配筋検査
出来形
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
配筋検査
出来形
京都大学黒神観測室構内
縦筋D16 120ピッチ
横筋D16 90ピッチ

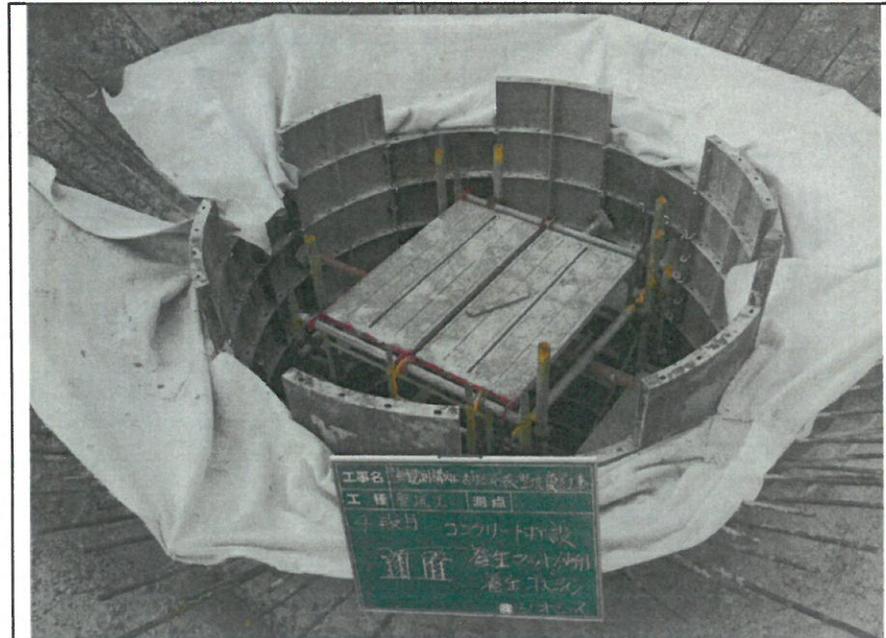
発振堅坑設置
堅坑工
配筋検査
出来形
京都大学黒神観測室構内
縦筋D16 120ピッチ
横筋D16 90ピッチ



発振堅坑設置
堅坑工
躯体コンクリート 4段目
打設状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
躯体コンクリート 4段目
養生状況
京都大学黒神観測室構内





発振堅坑設置
堅坑工
4段目から上へ
配筋状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
4段目から上へ
配筋状況
京都大学黒神観測室構内

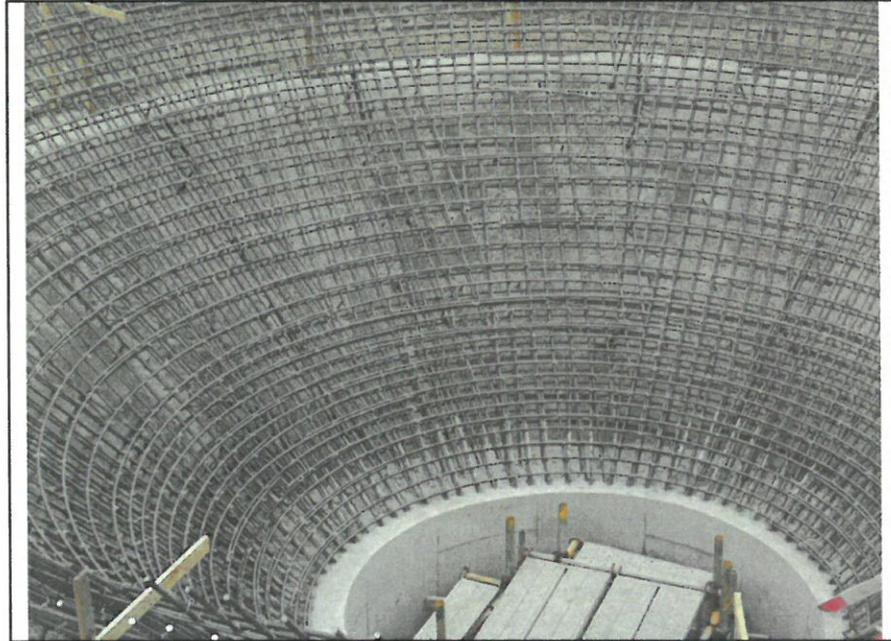


発振堅坑設置
堅坑工
5～6段目 鉄筋組立
組立状況
京都大学黒神観測室構内

発振堅坑設置
堅坑工
5～6段目 鉄筋組立
組立状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
5～6段目 鉄筋組立
組立状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
土工
埋戻し
搬入・荷下し状況
京都大学黒神観測室構内

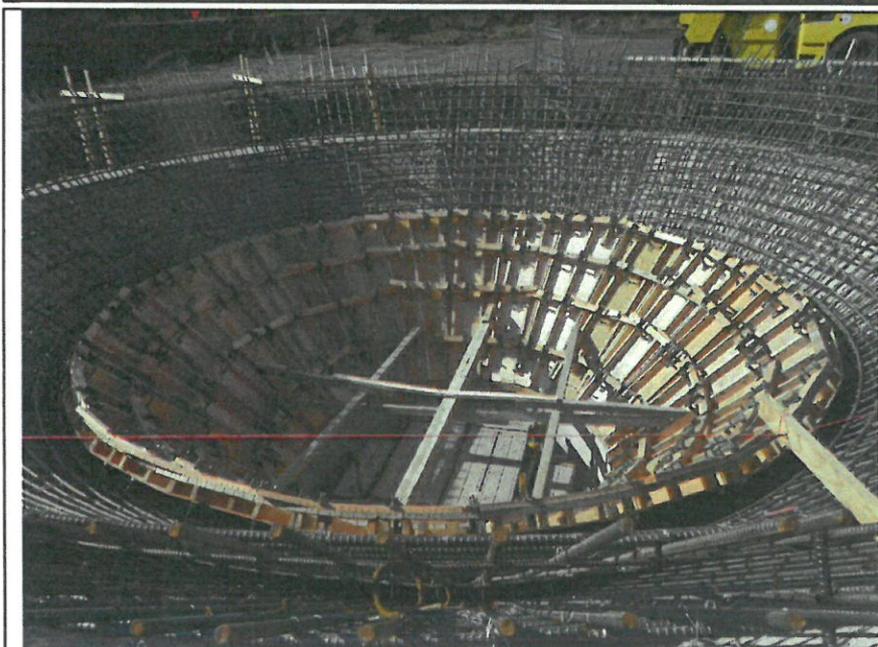




発振堅坑設置
土工
埋戻し
敷均し状況
京都大学黒神観測室構内

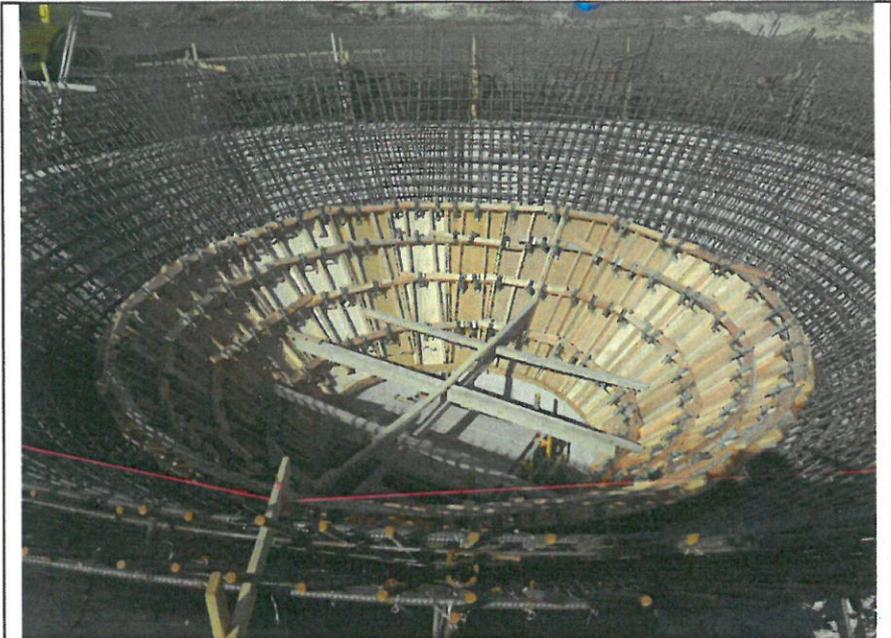


発振堅坑設置
土工
埋戻し
転圧状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
型枠 5段目
組立完了
京都大学黒神観測室構内

発振堅坑設置
堅坑工
型枠 5段目
組立完了
京都大学黒神観測室構内

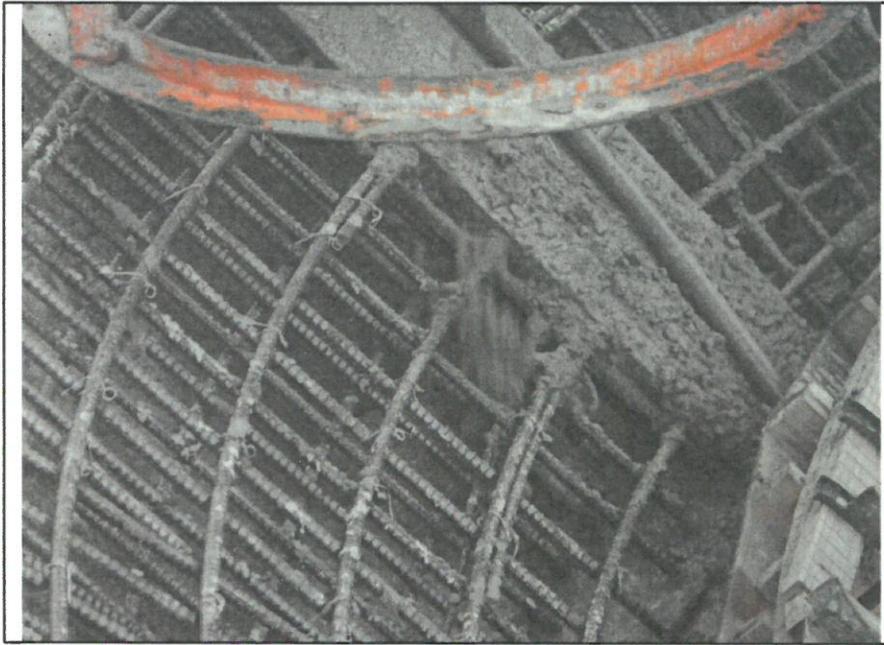


発振堅坑設置
堅坑工
コンクリート 5段目
打継目モルタル処理
京都大学黒神観測室構内

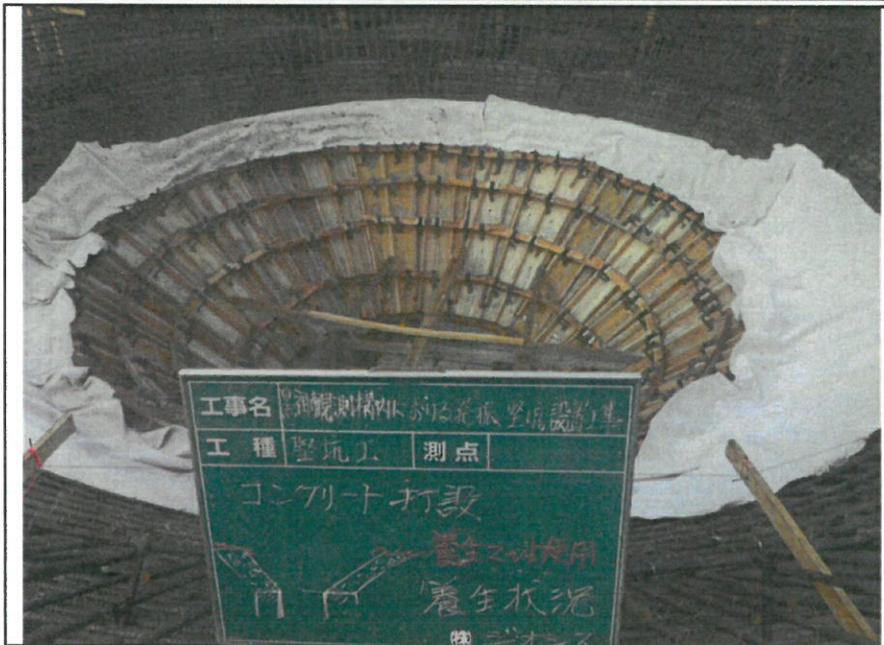


発振堅坑設置
堅坑工
コンクリート 5段目
打設状況
京都大学黒神観測室構内





発振堅坑設置
堅坑工
コンクリート 5段目
打設状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
コンクリート 5段目
養生状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
型枠 6段目
組立完了
京都大学黒神観測室構内

発振堅坑設置
堅坑工
型枠 6段目
組立完了
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
張コンクリート 7段目
下地施工状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
張コンクリート 7段目
下地施工状況
京都大学黒神観測室構内





発振堅坑設置
堅坑工
張コンクリート 7段目
打設状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
張コンクリート 7段目
打設完了
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
張コンクリート 7段目
打設完了
京都大学黒神観測室構内

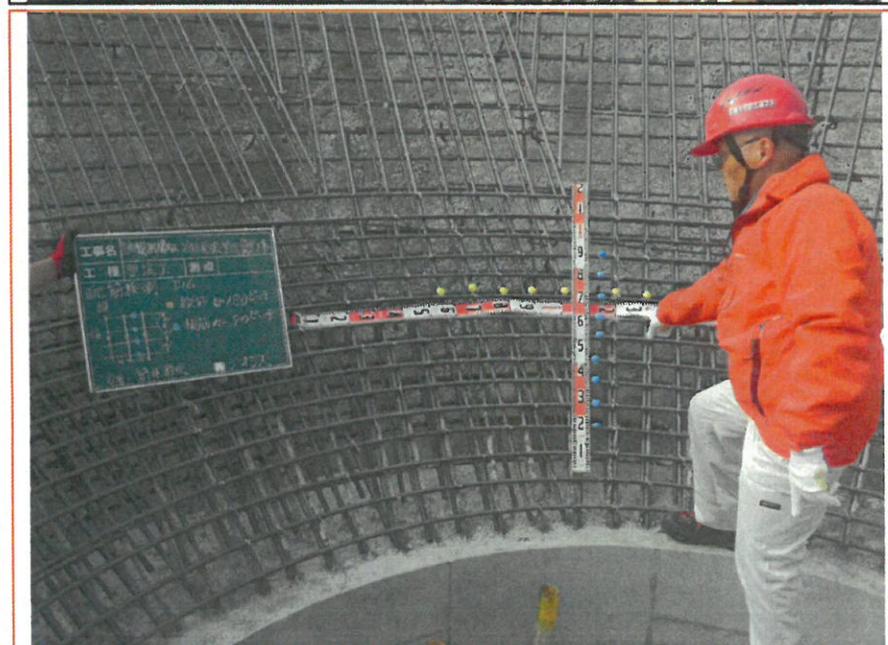
発振堅坑設置
堅坑工
鉄筋組立 最上段
配筋状況
京都大学黒神観測室構内

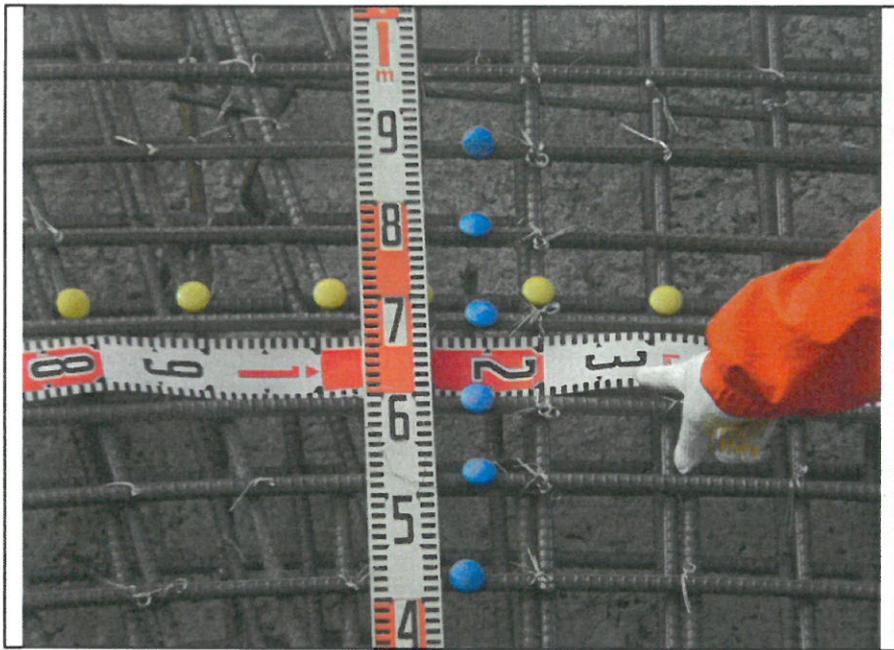


発振堅坑設置
堅坑工
鉄筋組立 最上段
配筋状況
京都大学黒神観測室構内

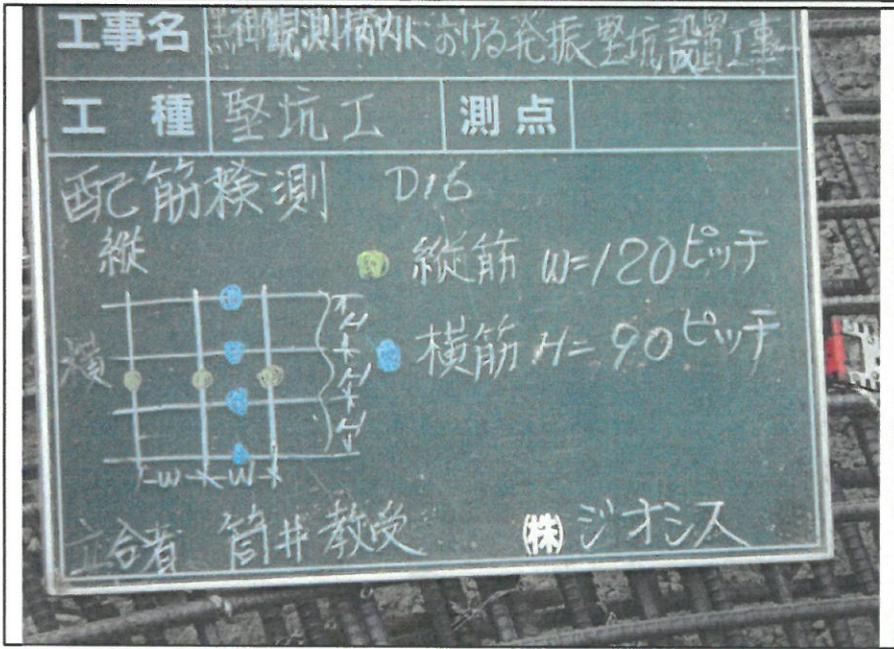


発振堅坑設置
堅坑工
鉄筋組立 最上段
配筋検査
京都大学黒神観測室構内
立会者：筒井教授
縦筋D16 120ピッチ
横筋D16 90ピッチ

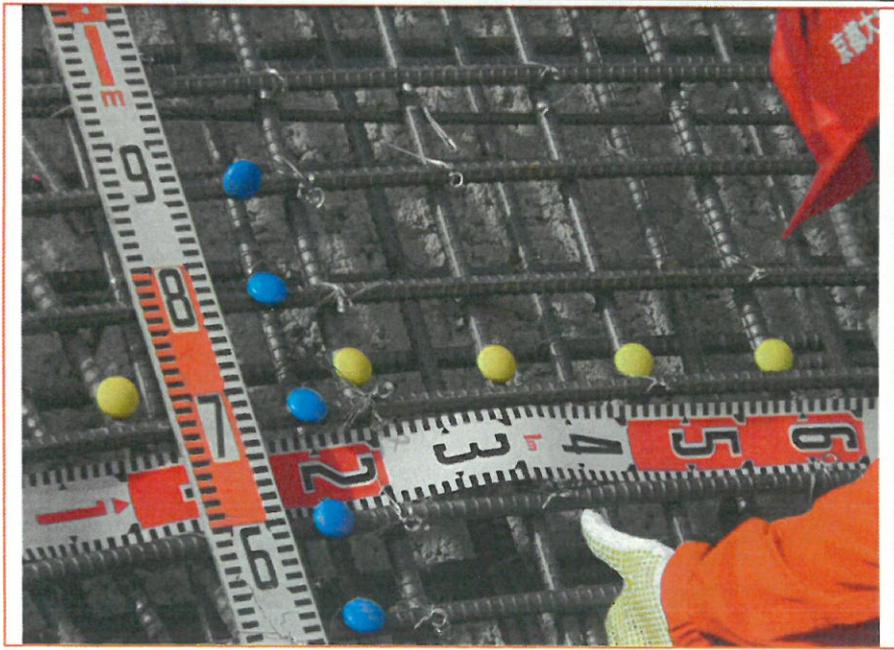




発振堅坑設置
堅坑工
鉄筋組立 最上段
配筋検査
京都大学黒神観測室構内
縦筋D16 120ピッチ
横筋D16 90ピッチ



発振堅坑設置
堅坑工
鉄筋組立 最上段
配筋検査
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
鉄筋組立 最上段
配筋検査
京都大学黒神観測室構内
縦筋D16 120ピッチ
横筋D16 90ピッチ

発振堅坑設置
堅坑工
鉄筋組立 最上段
配筋検査
京都大学黒神観測室構内
立会者：筒井教授
縦筋D16 120ピッチ
横筋D16 90ピッチ



発振堅坑設置
堅坑工
鉄筋組立 最上段
組立完了
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
鉄筋組立 最上段
組立完了
京都大学黒神観測室構内





発振堅坑設置
堅坑工
鉄筋組立 最上段
組立完了
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
鉄筋組立 最上段
組立完了
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
鉄筋組立 最上段
組立完了
京都大学黒神観測室構内

発振堅坑設置
堅坑工
型枠組立 最上段
組立状況
京都大学黒神観測室構内

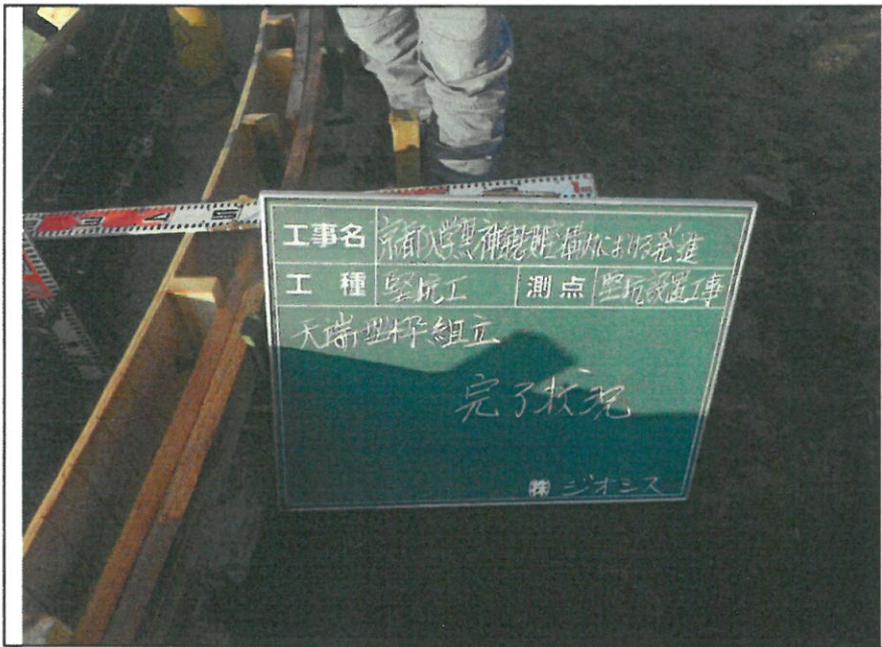


発振堅坑設置
堅坑工
型枠組立 最上段
組立状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
型枠組立 最上段
組立完了
京都大学黒神観測室構内





発振堅坑設置
堅坑工
型枠組立 最上段
組立完了
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
型枠組立 最上段
組立完了
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
コンクリート 最上段
打設状況
京都大学黒神観測室構内

発振堅坑設置
堅坑工
コンクリート 最上段
打設状況
京都大学黒神観測室構内

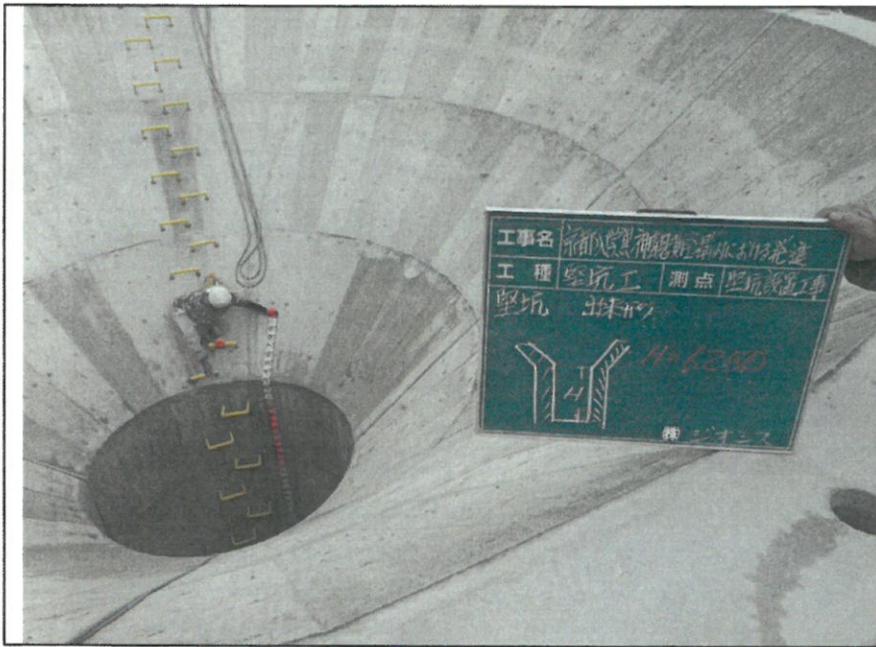


発振堅坑設置
堅坑工
コンクリート 最上段
養生状況
京都大学黒神観測室構内



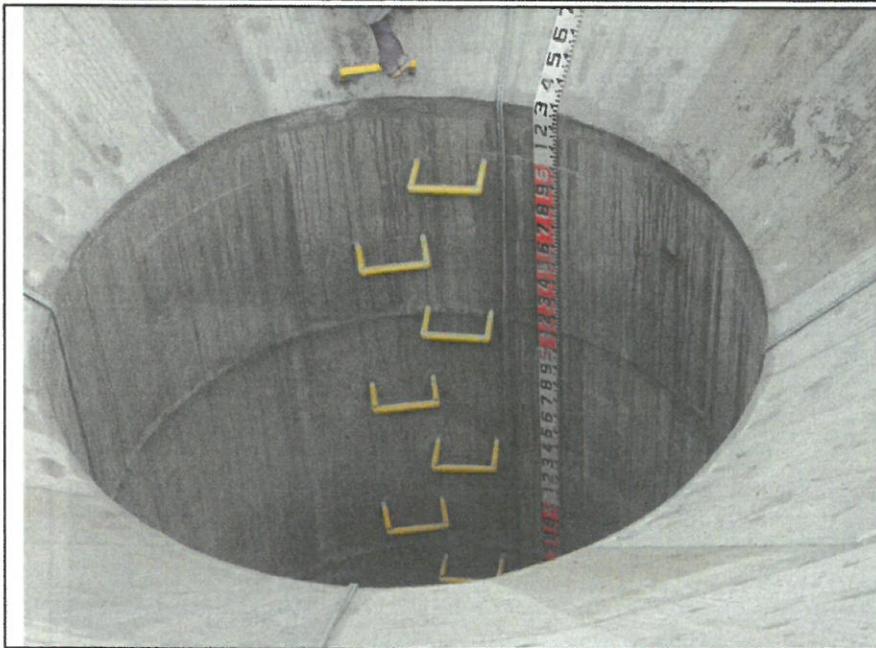
発振堅坑設置
堅坑工
コンクリート 最上段
養生状況
京都大学黒神観測室構内





工事名 京都大学黒神観測室水圧計設置  
 工種 堅坑工 測点 堅坑設置工事  
 堅坑 仕様あり  
 H=6,250  
 株式会社 ジオニマ

発振堅坑設置
堅坑工
出来形
京都大学黒神観測室構内
H=6, 250 H=6, 250



発振堅坑設置
堅坑工
出来形
京都大学黒神観測室構内
H=6, 250 H=6, 250



発振堅坑設置
堅坑工
出来形
京都大学黒神観測室構内
H=6, 250 H=6, 250

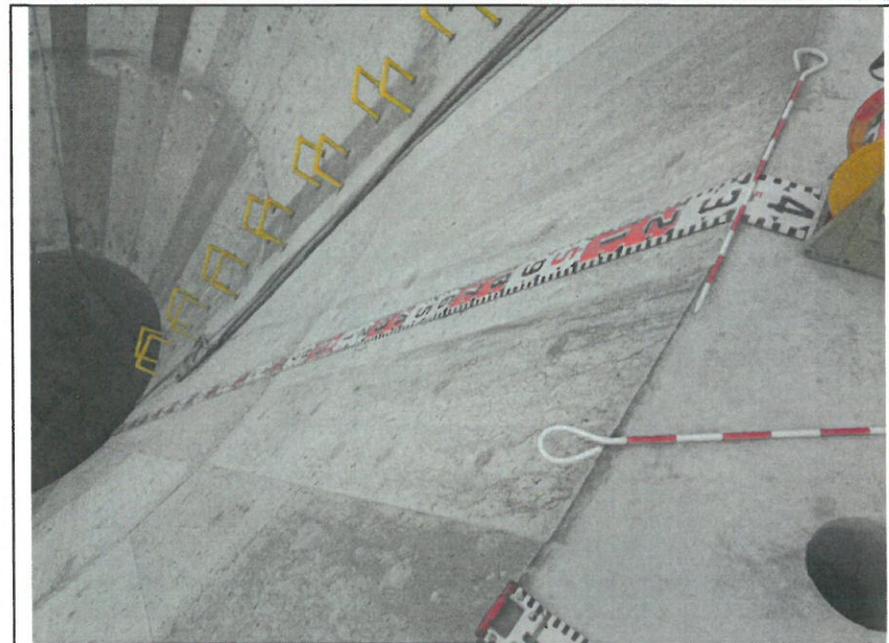
発振堅坑設置
堅坑工
出来形
京都大学黒神観測室構内
t = 425 t = 425
H = 300 H = 300
L1=5,340 L1=5,340



発振堅坑設置
堅坑工
出来形
京都大学黒神観測室構内
t = 425 t = 425
H = 300 H = 300



発振堅坑設置
堅坑工
出来形
京都大学黒神観測室構内
L1=5,340 L1=5,340





発振堅坑設置
堅坑工
出来形
京都大学黒神観測室構内

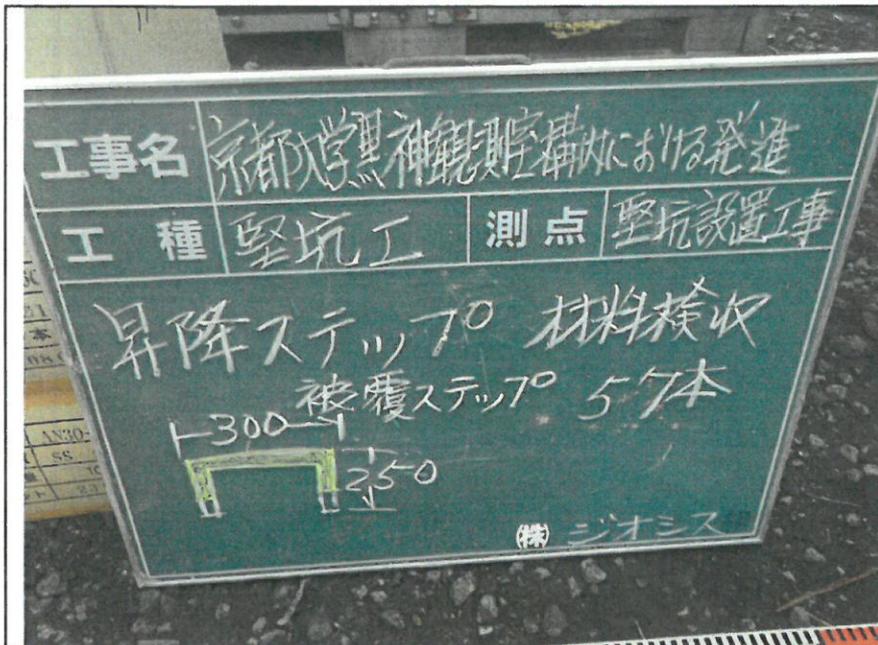


発振堅坑設置
堅坑工
出来形
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
出来形
京都大学黒神観測室構内





発振堅坑設置
堅坑工
昇降ステップ
材料検収状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
堅坑工
昇降ステップ
アンカー用削孔状況
京都大学黒神観測室構内

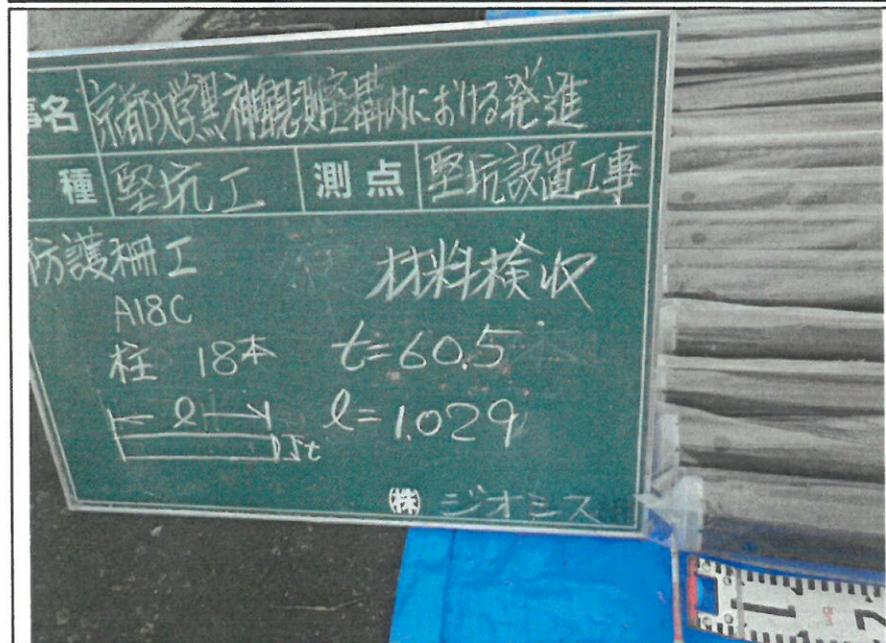


発振堅坑設置
堅坑工
昇降ステップ
取付状況
京都大学黒神観測室構内

発振堅坑設置
防護柵工
材料検収状況
京都大学黒神観測室構内
柱 18本
t= 60.5
L=1,029

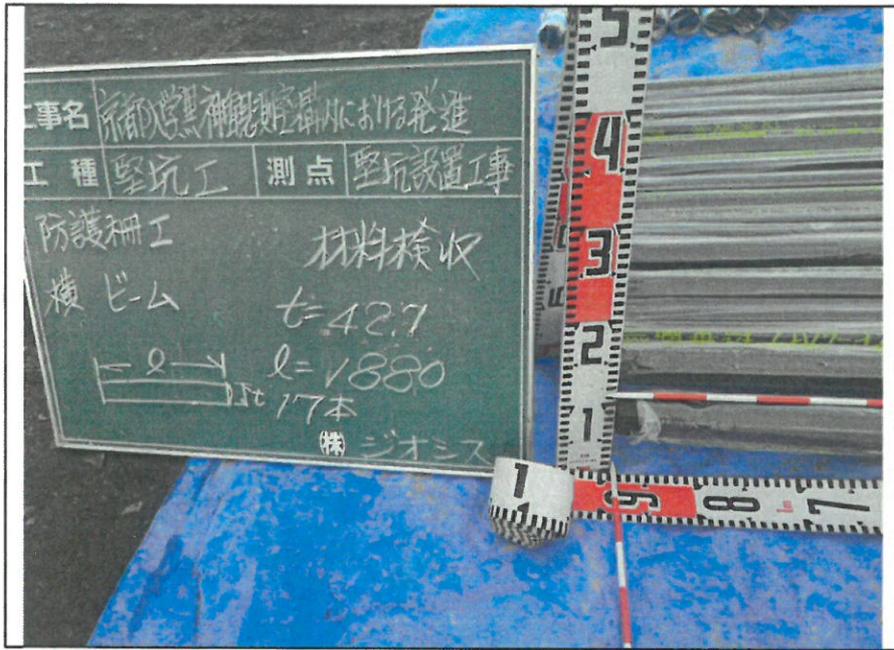


発振堅坑設置
防護柵工
材料検収状況
京都大学黒神観測室構内

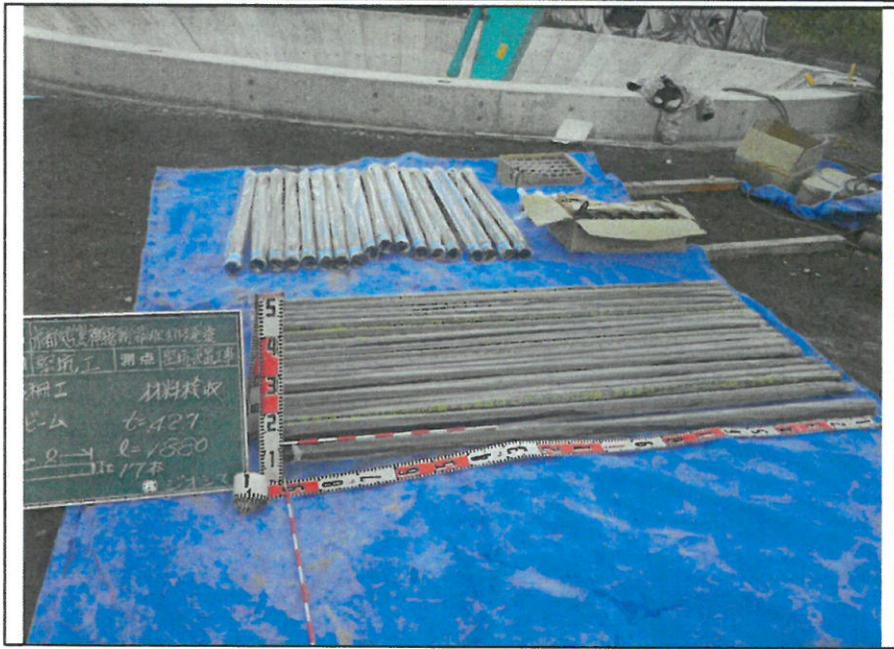


発振堅坑設置
防護柵工
材料検収状況
京都大学黒神観測室構内
柱 18本
t= 60.5
L=1,029

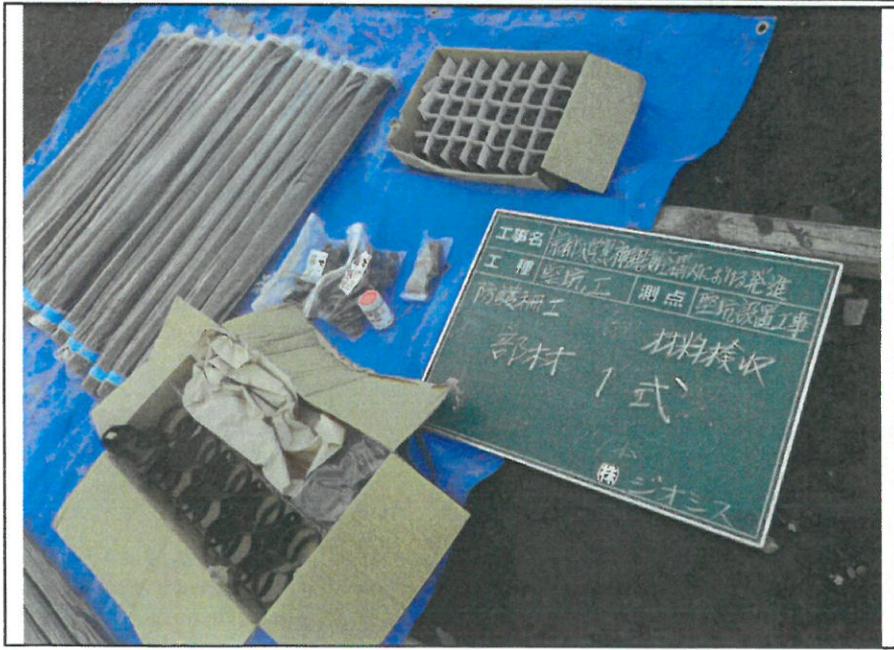




発振堅坑設置
防護柵工
材料検収状況
京都大学黒神観測室構内
横ビーム 17本 t= 42.7 L=1,880



発振堅坑設置
防護柵工
材料検収状況
京都大学黒神観測室構内
横ビーム 17本 t= 42.7 L=1,880



発振堅坑設置
防護柵工
材料検収状況
京都大学黒神観測室構内
部材 1式

発振堅坑設置
防護柵工
材料検収状況
京都大学黒神観測室構内
部材 1式



発振堅坑設置
防護柵工
材料検収状況
京都大学黒神観測室構内
部材 1式



発振堅坑設置
防護柵工
設置状況
京都大学黒神観測室構内





発振堅坑設置
防護柵工
設置状況
京都大学黒神観測室構内

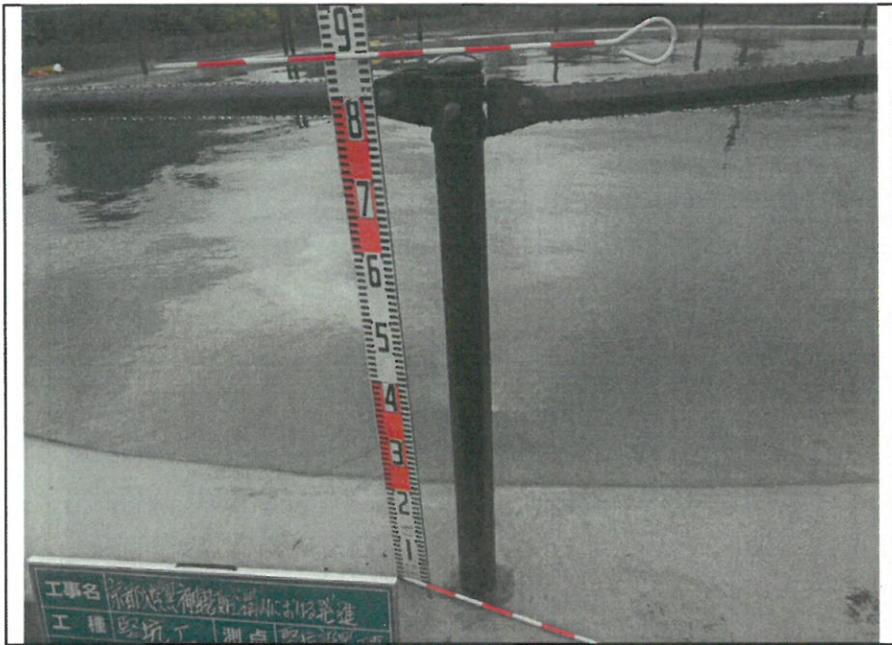


発振堅坑設置
防護柵工
出来形
京都大学黒神観測室構内
H=840 H=840



発振堅坑設置
防護柵工
出来形
京都大学黒神観測室構内
H=840 H=840

発振堅坑設置
防護柵工
出来形
京都大学黒神観測室構内
H=840 H=840



発振堅坑設置
水入れ状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
水入れ状況
京都大学黒神観測室構内





発振堅坑設置
水入れ状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
水入れ状況
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置
防護柵工
水入れ完了
京都大学黒神観測室構内



発振堅坑設置  
 防護柵工  
 水入れ完了  
 京都大学黒神観測室構内

空白

空白

## (2) 活動的カルデラ火山の火山性地殻変動とマグマ活動に関する調査

### (2) -1. 始良カルデラの火山性地殻変動データの蓄積

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

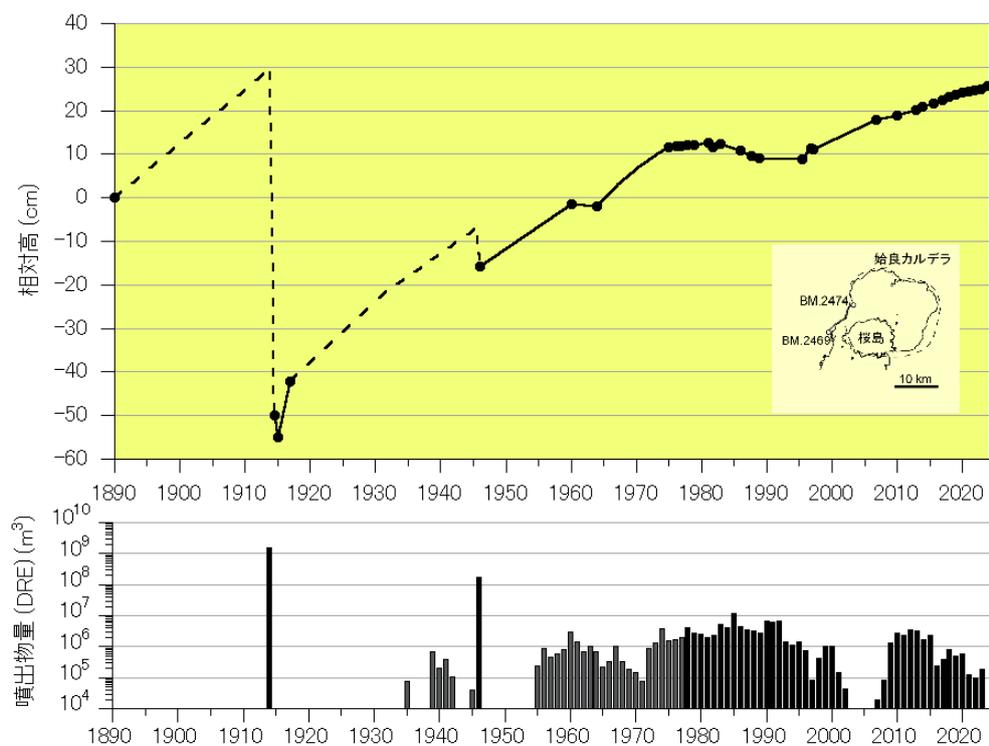


図1 始良カルデラ西縁のBM2474のBM2469(鹿児島市)に対する相対上下変動および桜島の噴火による噴出物量の時間変化

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

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

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

以下では、始良カルデラ周辺の地殻変動観測網の維持・強化について述べ、次に2017年11月から2022年11月の期間についてGNSS観測で得られた水平変動からテクトニックな定常的変動および霧島火山の活動による影響を除いたデータと水準測量による上下変位データを統合する形で従来より広範囲のデータを用いて始良カルデラ下の圧力源の位置と体積変化量を求めた結果を報告する。また、有限要素法モデルを用いて始良カルデラ下の地殻変動圧力源の形状について検討した結果を示す。さらに桜島からの噴出物量を考慮した始良カルデラ下へのマグマ供給量の見積もりを示す。

(2) -1-1. 始良カルデラ臨時 GNSS 観測点の拡充と維持

a. 既設 GNSS 観測点における観測の継続

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

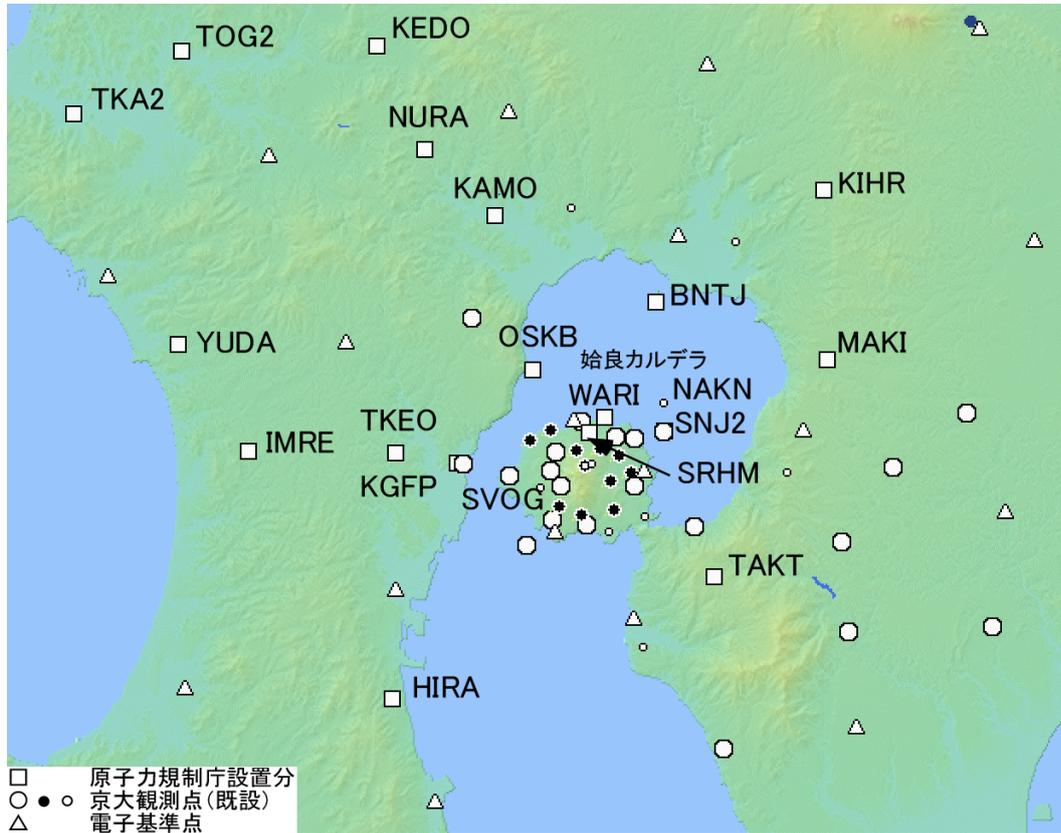


図2 GNSS 観測点の位置

これらの観測点での観測は順調で、長期の欠測は生じていない。また、現地での定期点検においても機器の動作状況や設置状況等に異状はみられなかった。

原子力規制庁および京都大学が設置した GNSS 観測点で得られた観測データは、SVOG を基準点として基線解析を行い、1 日毎の各観測点の位置データが蓄積されている。ここでの基線解析には Leica Geo Office ソフトウェアを用い、対流圏補正には Hopfield モデルを使用している。使用得られた位置データの例として、図3に2019年度から2021年度にかけて設置した7観測点の日毎の位置を示す。季節変化が認められるものの、日毎の測位結果は概ね安定している。図に示した7観測点のうち、KGFP および KIHR は既設建物の屋上に設置し、その他の5観測点は地表に設置したものである。SNJ2 および BNTJ においては、水平および上下方向の位置変化のトレンドが設置後1年程度までとそれ以降では異なっている傾向が認められる。両観測点のこのような位置変化は、アンテナピラー埋設後に周辺の比較的軟弱な地盤が落ち着く過程を示していること

が考えられ、設置直後の1年間は地殻変動を正しく反映していない可能性がある。

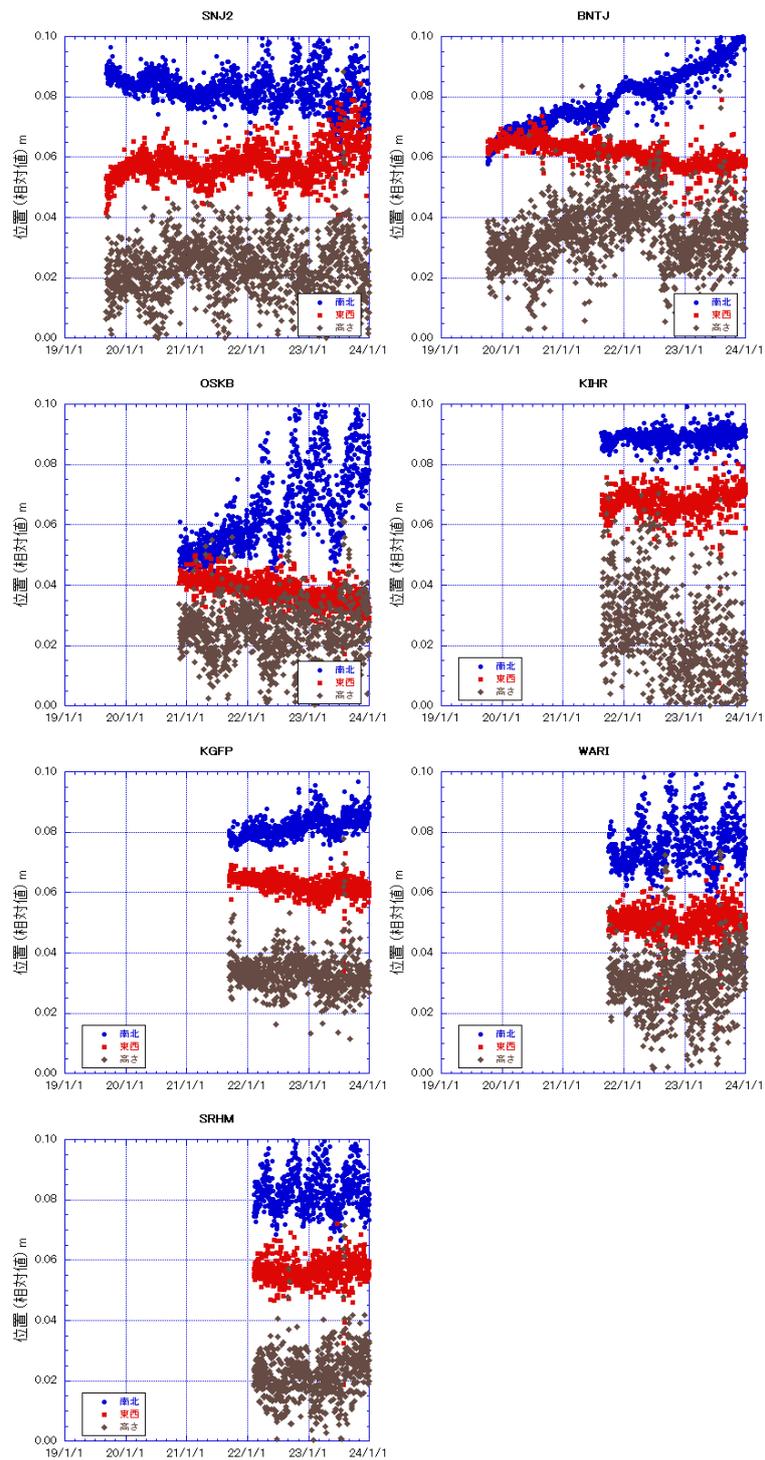


図3 SVOGを基準点として求めたSNJ2、BNTJ、OSKB、KIHR、KGFP、WARIおよびSRHM観測点の日毎の位置

なお、OSKB、WARIおよびSHRM観測点においてはSNJ2やBNTJのような不規則な位置変

化は認められない。特に WARI および SHRM 観測点においては 1m 立方のコンクリート製基礎を設けたうえでアンテナピラーを設置したことが観測値の安定化に寄与していると考えられる。

また、OSKB や SNJ2 では 2022 年以降季節変動が大きくなっているが、c 節に示す国土地理院の電子基準点 950487 (鹿島) を基準局とする解析ではこのような特徴はみられないことから、解析条件や気象補正の有無の際によるものと考えられる。

#### b. 新島北方の中ノ島におけるキャンペーン観測の実施

2023 年 11 月 28 日から 12 月 2 日の期間、新島北方の中ノ島において、既設のベンチマークを利用したキャンペーン観測を行った (図 4)。使用した機器はライカジオシステムズ社製 GNSS 受信機 System500 および同社製アンテナ AT502 で、欠測等はなく所期の観測データが得られた。



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

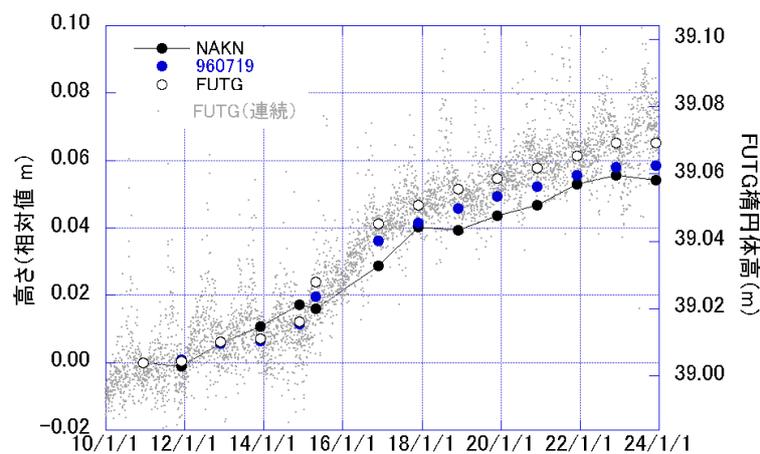


図 5 キャンペーン観測による NAKN (黒丸) の上下変動  
電子基準点 960719 (青丸)、FUTG (白丸、灰色の点は連続観測) をあわせて示した。

中ノ島観測点 (NAKN) で得られた上下変動量を図 5 に示す。NAKN では 2010 年 11 月に対して 5cm 余の隆起が観測され、2022 年からは 2mm 弱の沈降を示している。近隣の京都大学の連続観測点 (FUTG) および電子基準点 (960719) と比べてみると、いずれも停滞または僅かな沈降と示しており、変動のパターンが互いによく似ていることから本観測点におけるキャンペーン観測の信頼性は高いと考えられる。

### c. GNSS 連続観測による始良カルデラ周辺の地殻変動

始良カルデラ周辺のより広域の地殻変動を把握するため、原子力規制庁および京都大学の GNSS 連続観測点に加えて始良カルデラ中央部から概ね 60km 以内に位置する国土地理院の電子基準点を合わせた 90 点余りの観測データを用いて、始良カルデラ中央部から約 80km 離れた甕島に位置する国土地理院の電子基準点 950487 (鹿島) を固定点とした基線解析を行い、2017 年以降の各観測点の日々の位置を算出している。基線解析には Leica Geo Office ソフトウェアを使用した。基線解析においては精密暦を使用し、電離層モデルおよび対流圏モデルはそれぞれ computed model および computed とした。求められた観測点毎の日々の位置から外れ値を除外し、斎藤・井口 (2006) が示した水蒸気圧と相対位置の比を用いる気象補正を適用した。補正には、鹿児島地方気象台における日毎の蒸気圧 (気象庁、2022) を用いた。基線解析結果の例として、原子力規制庁が設置した観測点で得られた気象補正後の日毎の位置を図 6 に示す。

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

一方、霧島火山周辺ではその火山活動に関連する地盤変動もみられる。図 6 に示した 950486 を例にとると、2019 年 5 月頃を境に変動のトレンドが変化するとともに変動量も小さくなる。また、霧島火山で噴火が発生した 2018 年 3 月 6 日前後に位置のギャップが認められる。同様の変動は 960714 (えびの) や 021087 (都城 2)、YOSG などでも認められる。このことから、2019 年 5 月頃までの地殻変動には霧島火山地下の圧力源による変動が含まれていると考えられる。その後 2022 年初めから 10 月頃まで再び霧島火山周辺の観測点において 2019 年 4 月頃以前と同様の変動のトレンドがみられ、変位量は 2019 年 5 月頃までの変位のおよそ 4 分の 1 であった。

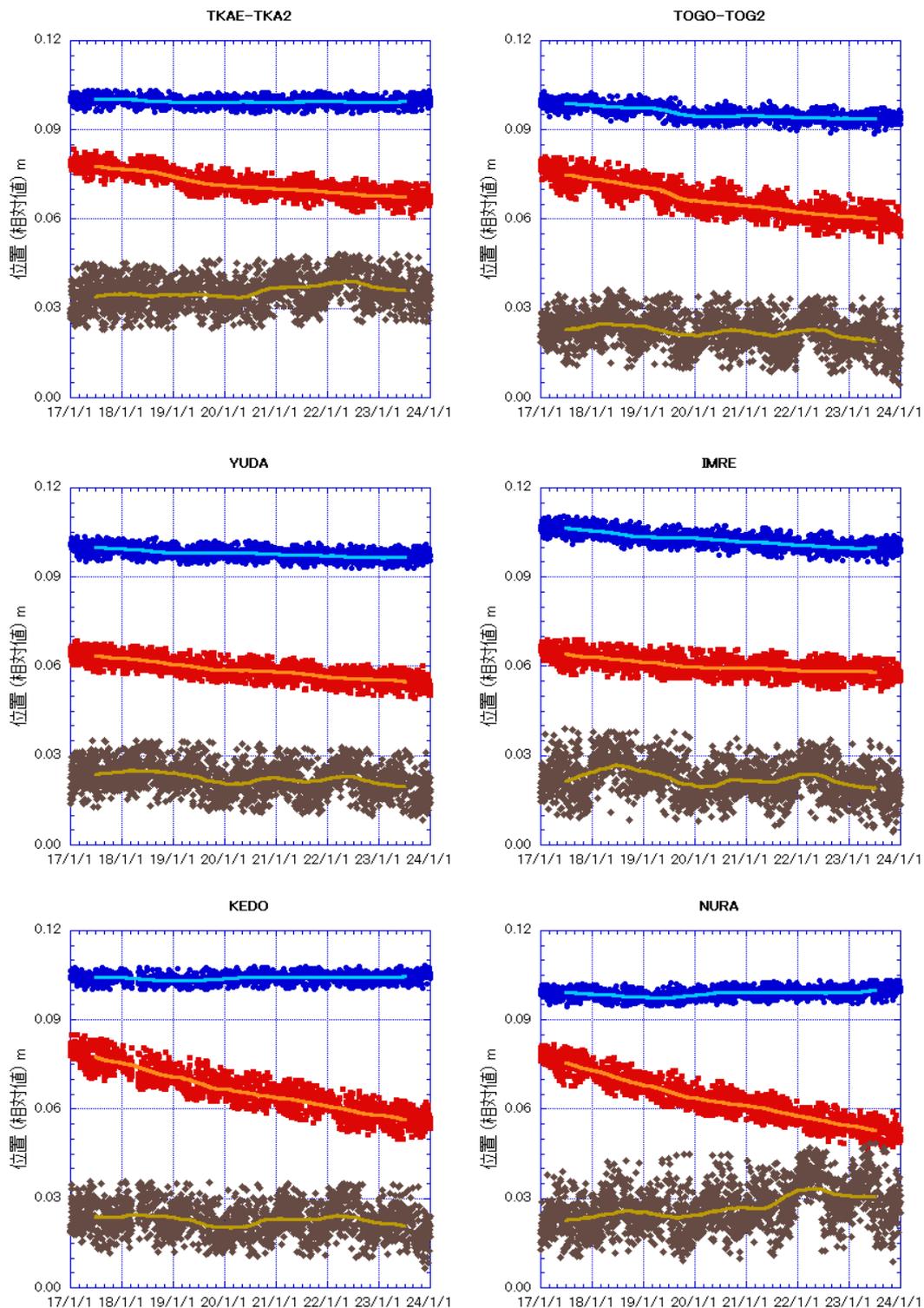


図6 2017年-2023年のGNSS観測点の位置の時間変化（基準点：電子基準点950487）。各観測点の日々の位置の南北（青色）、東西（赤色）、上下（茶色）成分とそれぞれの365日移動平均。値は相対値でそれぞれ北、東、上が正の値をとる。TKA2およびTOG2はそれぞれTKAEおよびTOGOを移設したもので移設前後の差分を補正している。

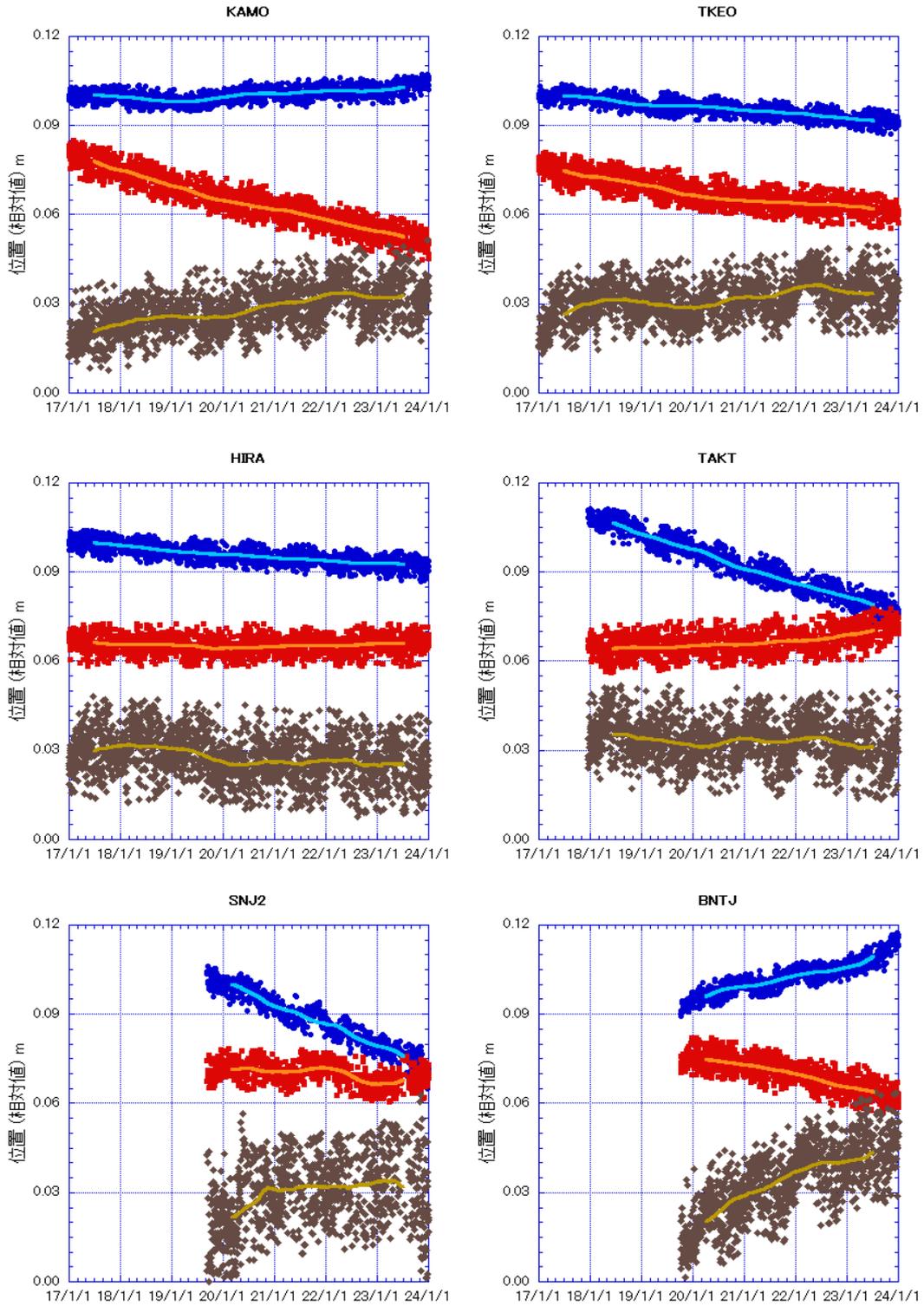


図6 (続き)。TKEO には差分を補正した仮設点での観測結果が含まれる。

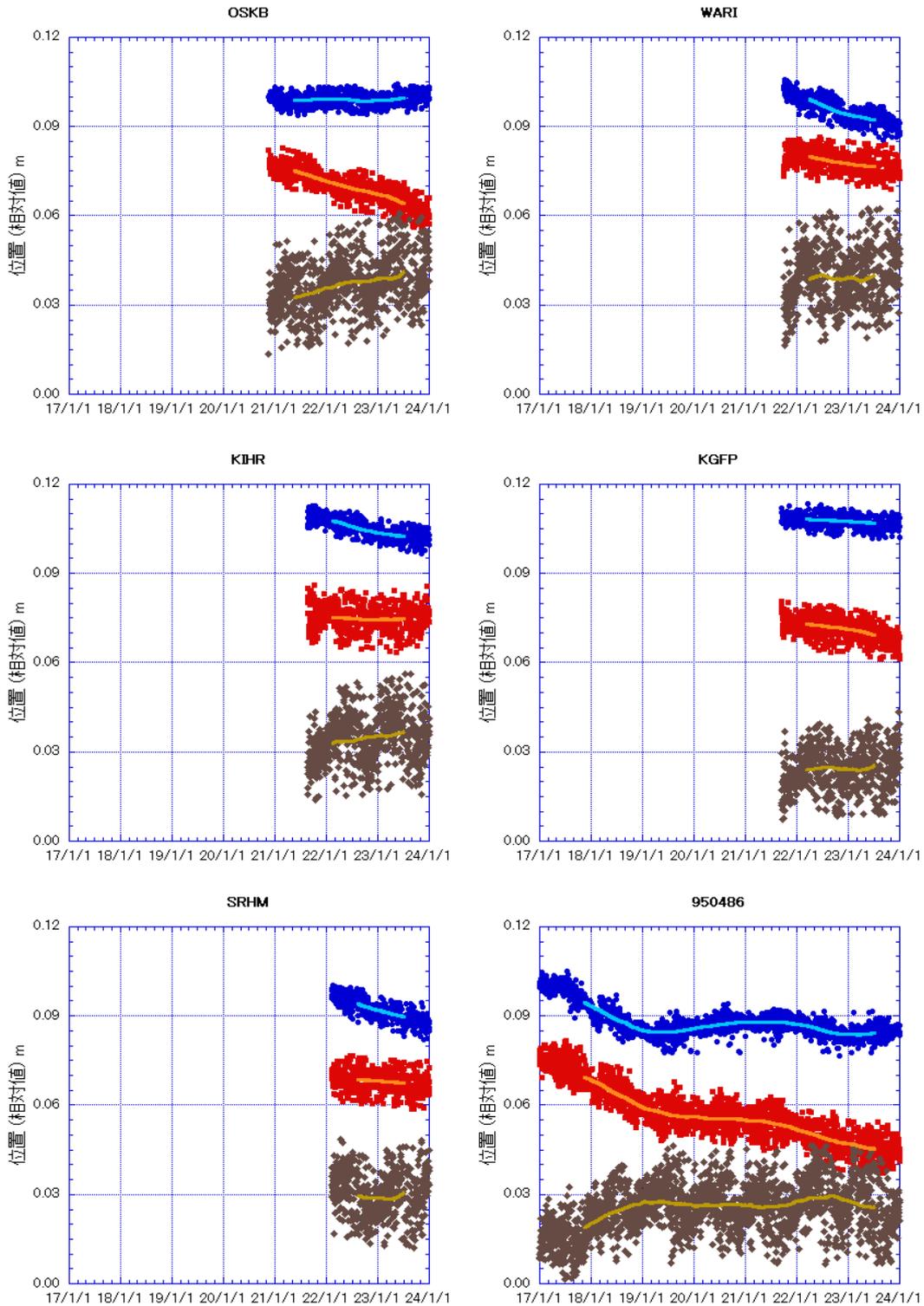


図6 (続き)。950486 は国土地理院電子基準点 (牧園)。

こうして得られた観測点の位置データを基に、2017年11月および2022年11月の日々の位置の平均の差から各観測点の位置の変化量(変位)を求めた。2017年12月に観測を開始したTAKT観測点については、観測開始から30日間と2022年11月の平均位置との差に観測期間の比を乗

じたものを変位とした。その他の 2017 年 11 月の時点で未設置の観測点は除外した。図 7 はこうして求めた GNSS 観測点の変位を地図上にプロットしたものである。水平変位をみると、全体として北東－南西方向に伸長するようなテクトニックな広域変動（渡部・田部井、2004）が支配的であるが、始良カルデラの近傍および霧島火山周辺ではそれとは異なる傾向がみられ、火山性地殻変動を反映していると考えられる。上下変位においては、始良カルデラ周縁部で隆起する傾向が認められる。なお、GNSS による上下変位の決定精度は水平変位に比べて劣るため、2.1-2c 節で示す圧力源解析では同時期に行われた水準測量の結果を使用する。

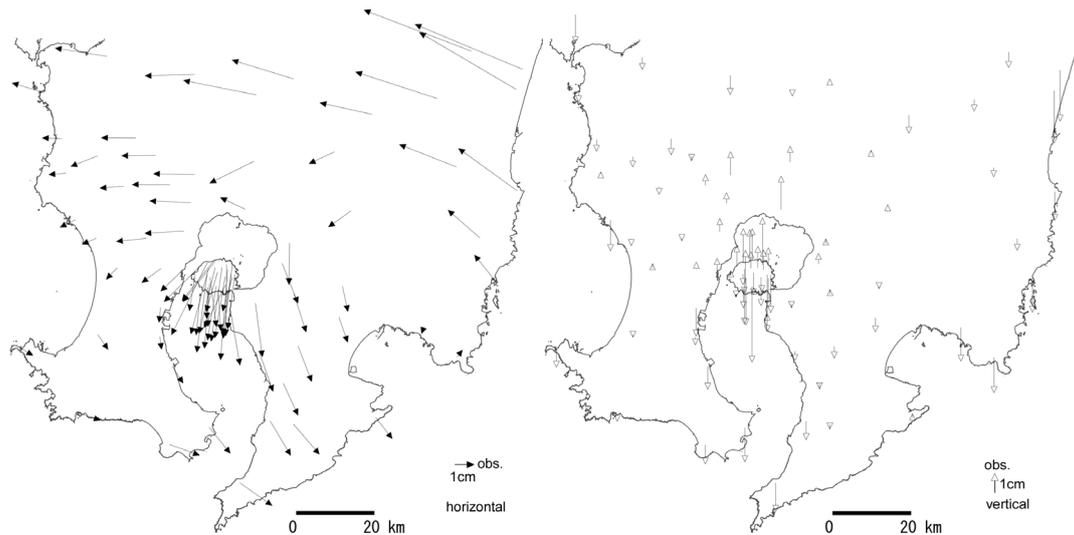


図 7 GNSS 基線解析による 2017 年 11 月－2022 年 11 月の GNSS 観測点の水平変位（左）および上下変位（右）。電子基準点 950487 を固定点として求めたもの。

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

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

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

ここで、 $T_x$ 、 $T_y$ は変位の東西および南北成分、 $\Delta\varphi$ 、 $\Delta\lambda$ は観測点の経度および緯度の固定点との差である。図 8 右図に示した各観測点の水平変位ベクトルから、火山性地殻変動の影響が大きいと考えられる桜島内および霧島周辺（図 8 左図の破線内）を除き(1)式に近似することでテクトニックな広域地盤変動による水平変位ベクトル（同図の赤矢印）を求めた。

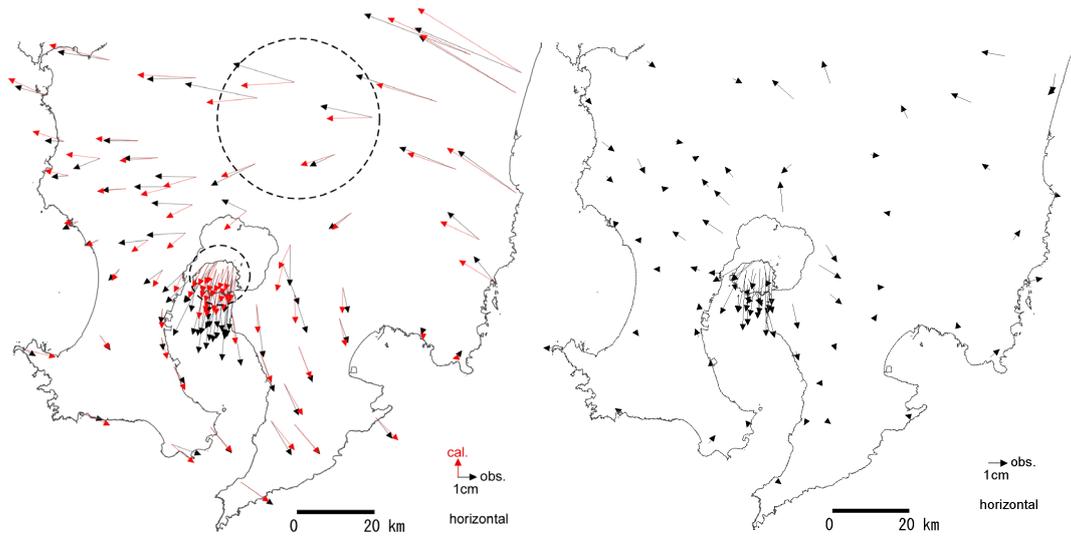


図8 テクトニックな変動を補正した GNSS 観測点の水平変位

左図：テクトニックな変動を補正する前の変位（黒矢印、図7に示したものと同一）および三次多項式近似によるテクトニックな水平変位（赤矢印）。

右図：テクトニックな広域地殻変動の影響を除去した GNSS 観測点の水平変位

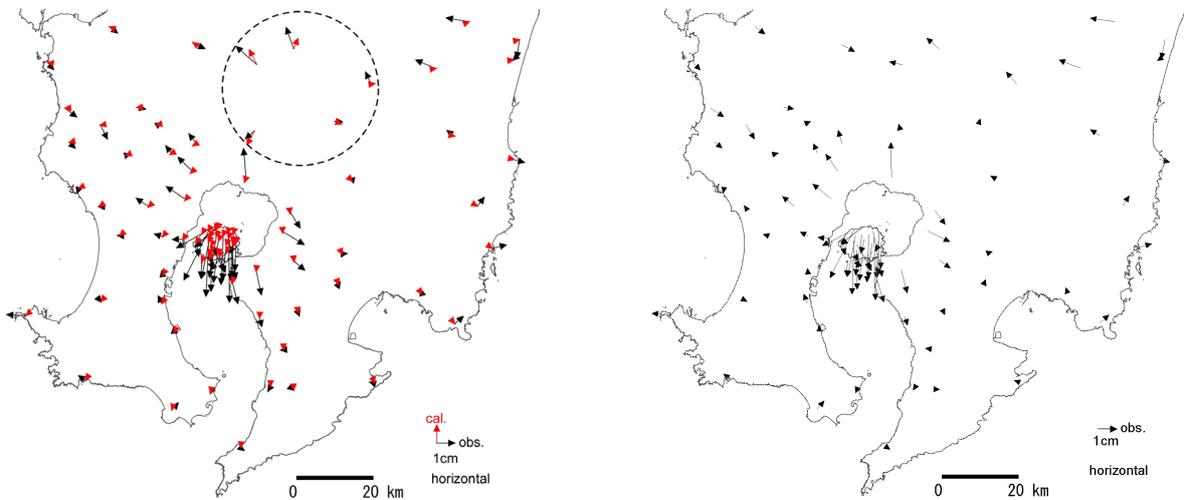


図9 霧島火山の影響を補正した GNSS 観測点の水平変位

左図：霧島火山の影響を補正する前の変位（黒矢印、図8右図と同じ）および霧島火山地価の茂木圧力源から予測される水平変位（赤矢印）。

右図：霧島火山の影響を除去した GNSS 観測点の水平変位

ここで求めたテクトニックな地殻変動による水平変位ベクトルを観測値から引くことでその影響を除去した。

さらに始良カルデラ下の圧力源解析を行うにあたり、始良カルデラの北北東側で局所的に現れ

ている霧島火山の影響を補正した。この補正では、茂木モデルを適用して、圧力源位置を気象庁（2018）が求めた値に固定し、霧島周辺5点（図9左図の円内）の水平変位を用いて体積変化量を求めたところ、 $14.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ の体積増加が得られ、そこから予測される変位（同図の赤矢印）を補正量として用いた。補正後の水平変位には、始良カルデラ中央部から約25kmの範囲で放射状に伸長するパターンが認められ（図9右図）、始良カルデラを中心に地盤の膨張が継続していることを示唆する。2.1-2c節で示す圧力源解析ではここで得られた水平変位データを用いる。

#### d. 入手可能なGNSS連続観測データの品質評価

近年、携帯電話各社が独自に設置したGNSS基準点のデータを提供するサービスを開始した。このようなデータを用いることで地盤変動観測点網の稠密化を期待できる。一方、これらのGNSS基準点は精密測量を目的として設置されたものではないため、得られた測位データが本研究で利用可能な品質であるかを検討した。

令和5年度は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）のデータを入手し、試験的に基線解析を行った。入手したデータは98点の2019年12月から2022年3月までのGNSS受信データである。これらのデータを用いて、電子基準点950487（鹿島）を固定点とした基線解析を行った。基線解析の解析条件は前節と同様である。

得られた日々の位置データに対して前節と同じ条件で気象補正および外れ値の除外処理を行った。解析を行った98点のうち、100日以上データ欠落を含む観測点が24点あった。残りのうち、不規則な位置変化や位置のギャップが認められる基準点が33点あった。図10は、残りの41点の日々の水平変位の標準偏差を基線長（固定点からの距離）に対してプロットしたものである。

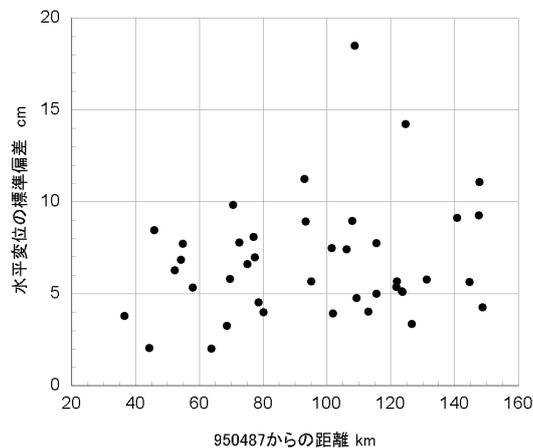


図10 ソフトバンク独自基準点の水平変位の標準偏差と固定点からの距離の関係

全体として、基線長が大きくなるほど水平変位のばらつきが大きくなる傾向が認められる。また多くの観測点では2022年終り頃以降のばらつきが、それ以前より大きくなる傾向がみられた。前節で述べた原子力規制庁、京都大学のGNSS連続観測点および国土地理院の電子基準点から得られる日々の水平変位の標準偏差は概ね1cm以下であり、それと比べるとソフトバンク独自基準

点から求めた水平変位は明らかにばらつきが大きいことがわかる。上下変位についてはほとんどのソフトバンク独自基準点で標準偏差が 10cm を超えている。

最大でも数 cm 程度の火山性地殻変動を極端にばらつきの大きいデータの中から検出するのは困難であるため、ここでは水平変位の標準偏差が 6cm 以下の 19 点について、さらに外れ値除外処理をしたうえで、位置の相対変化を直線近似して 2019 年 12 月～2022 年 11 月の期間の水平変位を算出した。こうして得られた水平変位を、同じ方法で原子力規制庁、京都大学および国土地理院の観測点から算出したものと合わせて図 11 に示す。

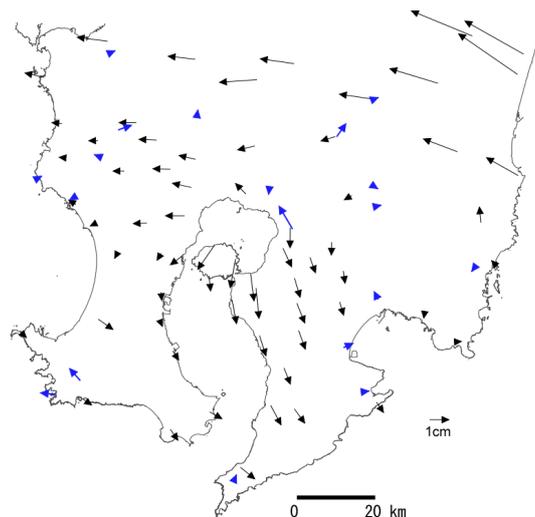


図 1 1 2019 年 12 月～2022 年 11 月の GNSS 観測点の水平変位

黒矢印：原子力規制庁、京都大学および国土地理院の観測点 青矢印：ソフトバンク独自基準点

ソフトバンク独自基準点から得られた水平変位は、近隣の観測点と比べて方位は異なっている場合があるものの大きさは近隣の観測点と概ね調和的であることがわかる。このように、すべての観測点から良好なデータが得られるわけではないが、一部の観測点からは実際の地盤変動をある程度反映する測位データが得られると考えられる。また、今回は電子基準点 950487 を固定局とした基線解析を行ったが、より近距離の観測点を固定局とした基線解析を行うことで変位データのばらつきを軽減できる可能性がある。図 2.1-1-11 に示したソフトバンク独自基準点の変位の決定精度は十分とは言えないが、今後、より近距離の観測点を固定局とすることで変位の決定精度の向上をはかれるかなど、さらに検討が必要である。

## (2) -1-2. 始良カルデラ下の圧力源解析

### a. 圧力源解析に使用した圧力源モデル

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

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

ここで  $\mu$  は媒質の剛性率、 $K$  は圧力源の強度を表す係数である。

圧力源における体積変化量  $\Delta V$  は Delaney and McTigue (1994) により、

$$\Delta V = \frac{4\pi K}{3}
 \tag{3}$$

となる。

圧力源解析では、このモデルを使用して圧力源の位置および体積変化量を未知パラメータとして、観測値とモデルによって計算される変位の差の自乗和が最小となるパラメータをグリッドサーチによって決定した。以下では、GNSS キャンペーン観測で得られた水平変位データのみを用いた圧力源解析の結果と、および図 2.1-1-9 右図に示した GNSS 連続観測点の水平変位データと水平変位の解析期間とほぼ同時期に実施された水準測量で得られた上下変位データを統合する形でともに用いた圧力源解析の結果とを示す。

#### b. GNSS キャンペーン観測による圧力源の同定

以下では、2015 年以降の GNSS キャンペーン観測で得られた水平変位データのみを用いた圧力源解析結果について報告する。GNSS キャンペーン観測は、表 1 に示した期間に実施され、中ノ島を含むキャンペーン観測点に加えて、原子力規制庁および京都大学防災研究所の GNSS 連続観測点、さらに国土地理院の電子基準点においてキャンペーン観測実施期間に得られた観測データから、基線解析によって各観測点の位置を決定した。

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

観測期間 (UT)		観測点数	サンプリング間隔
2015 年	11 月 23 日～11 月 26 日	49	1 秒
2016 年	11 月 21 日～11 月 24 日	58	1 秒
2017 年	11 月 27 日～11 月 30 日	63	1 秒
2018 年	11 月 26 日～11 月 29 日	65	1 秒
2019 年	11 月 25 日～11 月 28 日	68	1 秒
2020 年	11 月 30 日～12 月 3 日	69	1 秒
2021 年	11 月 29 日～12 月 2 日	68	1 秒
2022 年	11 月 28 日～12 月 1 日	68	1 秒
2023 年	11 月 30 日～12 月 3 日	67	1 秒

2023年のキャンペーン観測においては、2022年から2023年の間に桜島北岳付近を中心として放射状に広がる水平変位（図12）が検出された。同様の変位は2017年以降には検出されていなかった。これは桜島北部の地下浅部の膨張を示すと考えられる。そこで、桜島内（図12の灰色の円内）のうち、周辺と比べて大きく異なる変位を示した観測点を除いた28点の水平変位データ（図の黒矢印）を用いて、茂木モデルを用いた圧力源解析を行った。

モデルの未知パラメータは、圧力源の位置（東西、南北、深さ）および体積変化量とし、それぞれの観測点の変位の観測値とモデルから予測される値の差の二乗和が最小になるようこれらの未知パラメータをグリッドサーチによって決定した。

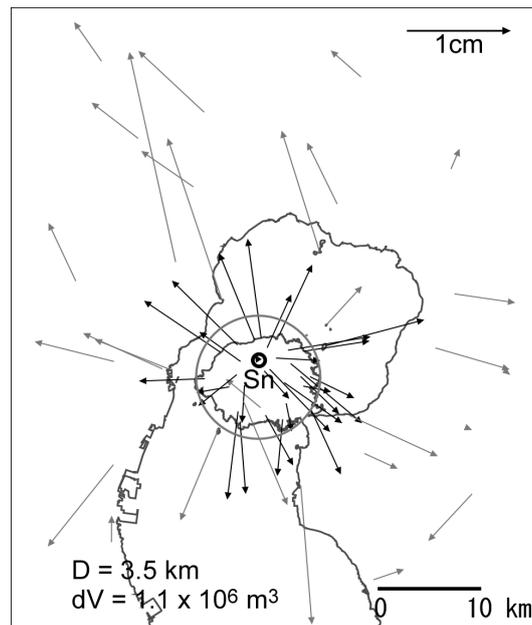


図12 GNSS キャンペーン観測で得られた2022年-2023年の水平変位

グリッドサーチにおいては、始良カルデラ下の圧力源の水平位置を始良カルデラの中心から東西南北それぞれに20kmの範囲を0.1km間隔で、圧力源の深さを海面下0kmから0.1km間隔で20kmまで、体積変化量を0 m<sup>3</sup>から1×10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>間隔で±50×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>まで、を探索範囲とした。その結果、北緯31° 36′ 22″ 東経130° 39′ 23″（図2.1-2-1のSn）の深さ3.5kmに体積変化量1.1×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>の膨張源（以下、圧力源Sn）が得られた。圧力源Snによる影響を除くため、2年以上の期間の水平変位データについては圧力源Snによる予測変位を用いた補正を行ったうえで茂木モデルによる圧力源解析を行った。

表2に2023年を含む期間の変位を基に求めた圧力源の位置と体積変化量を平成31年度から令和4年度までの報告書（京都大学防災研究所、2020、2021、2022、2023）において報告された圧力源解析結果（A-U）とあわせて示す。

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

	期間	緯度	経度	深さ km	体積変化量 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	体積変化率 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /年
A	2015-2017 (2年)	31° 40' 24"	130° 41' 10"	5.7	6.6	3.3
B	2015-2018 (3年)	31° 40' 28"	130° 40' 32"	5.8	8.2	2.7
C	2016-2018 (2年)	31° 41' 31"	130° 39' 19"	11.6	15.7	7.8
D	2015-2019 (4年)	31° 40' 18"	130° 40' 56"	6.2	10.8	2.7
E	2016-2019 (3年)	31° 41' 23"	130° 39' 59"	10.8	16.3	5.4
F	2017-2019 (2年)	31° 40' 32"	130° 40' 32"	10.4	9.6	4.8
G	2015-2020 (5年)	31° 40' 13"	130° 41' 42"	6.8	15.4	3.1
H	2016-2020 (4年)	31° 40' 58"	130° 41' 54"	10.2	23.4	5.8
I	2017-2020 (3年)	31° 40' 29"	130° 41' 50"	11.4	17.0	5.7
J	2018-2020 (2年)	31° 39' 50"	130° 41' 46"	10.7	11.2	5.6
K	2015-2021 (6年)	31° 40' 49"	130° 41' 50"	7.4	22.4	3.7
L	2016-2021 (5年)	31° 42' 55"	130° 42' 24"	10.3	32.4	6.5
M	2017-2021 (4年)	31° 41' 15"	130° 42' 09"	11.1	22.5	5.6
M	2018-2021 (3年)	31° 41' 15"	130° 42' 51"	12.4	22.9	7.6
O	2019-2021 (2年)	31° 40' 16"	130° 42' 17"	12.0	13.1	6.9
P	2015-2022 (7年)	31° 40' 52"	130° 44' 37"	7.4	20.1	2.9
Q	2016-2022 (6年)	31° 41' 25"	130° 44' 03"	10.6	39.7	6.6
R	2017-2022 (5年)	31° 41' 28"	130° 40' 27"	12.5	26.5	5.3
S	2018-2022 (4年)	31° 41' 22"	130° 44' 18"	10.8	29.6	7.4
T	2019-2022 (3年)	31° 37' 33"	130° 41' 28"	11.3	12.8	4.3
U	2020-2022 (2年)	31° 39' 15"	130° 43' 41"	11.2	10.1	5.1
V	2015-2023 (8年)	31° 41' 12"	130° 43' 52"	9.1	32.9	4.1
W	2016-2023 (7年)	31° 41' 08"	130° 42' 59"	11.3	44.9	6.4
X	2017-2023 (6年)	31° 40' 33"	130° 43' 33"	11.9	36.5	6.1
Y	2018-2023 (5年)	31° 40' 23"	130° 43' 21"	12.3	34.7	6.9
Z	2019-2023 (4年)	31° 39' 54"	130° 43' 03"	13.4	28.6	7.2
a	2020-2023 (3年)	31° 41' 25"	130° 44' 45"	13.7	25.3	8.4
b	2021-2023 (2年)	31° 38' 42"	130° 44' 15"	11.7	11.9	6.0

新たに得られた2023年を含む期間(表2.1-2-2のV-b)の水平変位から得られた圧力源の位置はいずれも始良カルデラの中央部付近で、そのうち2015年を含まない期間(表2.1-2-2のW-b)の圧力源の深さは11.3–13.7 kmで、2015年-2023年(表2.1-2-2のV)はそれより浅い。2015年を含む期間の圧力源の深さが浅くなる傾向は、2017年以降のキャンペーン観測でも認められ、京都大学防災研究所(2020、2021、2022、2023)で指摘されているのと同様に、桜島北部の浅部の膨張の影響を受けて圧力源が見かけ上浅く求められた可能性がある。この影響が少ないと考え

られる 2016 年 11 月以降の期間について求められた圧力源の位置や圧力源における体積変化率は ややばらつきはあるがおおむね一致する。このことから、2022 年以降においても始良カルデラ下の マグマの蓄積状況には大きな変化がないものと考えられる。しかし、上記のように桜島北部の 地下浅部の膨張が認められることから、始良カルデラ下に蓄積されたマグマの一部が桜島北部の 地下に移動した可能性が示唆される。

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

以下では、GNSS 連続観測で得られた 2017 年 11 月–2022 年 11 月の水平変位と、同時期に実 施された水準測量による上下変位をともに用いた圧力源解析の結果を示す。水平変位データとし て図 2.1-1-9 右図に示した水平変位を用いた。上下変位データとして用いたのは 2017 年 11 月お よび 2022 年 11 月に公共測量として実施された水準測量結果（九州電力株式会社、2020、2023） であり、GNSS 観測による水平変位とほぼ同時期をカバーする。図 1 3 に水準測量路線の端点で ある 2436、2785、021092A、2514 を不動点とした上下変位を示す。始良カルデラ周縁部に近づ ぐにつれて隆起が大きくなる傾向が顕著である。また、始良カルデラ周縁部においては、GNSS 観 測点で得られた上下変位（図 8 右図）と近傍の水準点の上下変位は概ね一致する。

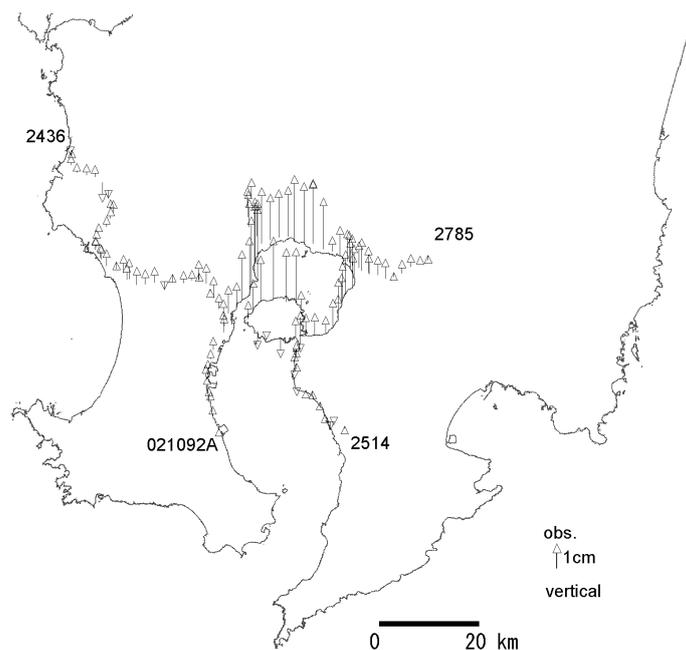


図 1 3 水準測量による上下変位（2017 年 11 月-2022 年 11 月）  
水準点 2436、2785、021092A、2514 を不動点としたもの。

これまでの桜島および始良カルデラ周辺の地盤変動の観測から始良カルデラ下の他に、桜島島 内にも圧力源の存在が推定されている。例えば Yoshikawa (1961) や江頭 (1988) は水準測量によ る上下変位を説明するため、南岳の直下にも圧力源を導入した。図 9 右図や図 1 2 に示されるよ うに、桜島北岸部に比べて桜島南岸部の変位量がかなり小さく、桜島島内の圧力源の存在を考慮

する必要がある。そこで、ここで行う圧力源解析でも始良カルデラ下の圧力源に加えて、桜島南岳直下にもう一つの圧力源が存在すると仮定した。モデルの未知パラメータは、前節で示したものに加えて、南岳直下の圧力源の水平位置を北緯 $31^{\circ} 34' 50''$ 、東経 $130^{\circ} 39' 30''$ に固定として、深さおよび体積変化量を未知とした。それらの未知パラメータを前節と同様のグリッドサーチによって決定した。圧力源解析に使用するデータは、水準測量による上下変位データ 129 点と、水準測量路線近傍 (図 1 4 の灰色の楕円内) の GNSS 観測による水平変位データ 59 点を使用した。これらの変位データのうち、近隣の観測点と極端に異なる変位を示した地点については異常値として除外した。

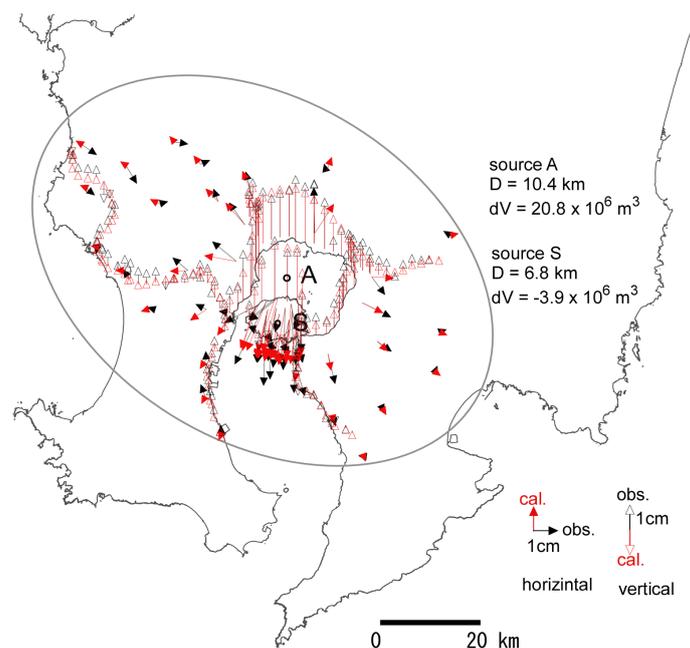


図 1 4 GNSS 観測による水平変位と水準測量による上下変位を統合した圧力源解析結果。黒矢印：変位の観測値、赤矢印：モデルから予測される変位、A：始良カルデラ下の圧力源の位置、S：桜島南岳直下の圧力源の位置、灰色の楕円内の観測値を圧力源解析に使用した

表 3 圧力源解析で得られた圧力源位置と体積増加量

期間	データ数	始良カルデラ下の圧力源				桜島南岳直下の圧力源			
		水平変位	上下変位	緯度	経度	深さ km	体積増加量 $10^6 \text{ m}^3$	深さ km	体積増加量 $10^6 \text{ m}^3$
統合	201711-202211	59	128	$31^{\circ} 39' 44''$	$130^{\circ} 40' 38''$	10.4	20.8	6.8	-3.9
	201701-201912	56	130	$31^{\circ} 40' 03''$	$130^{\circ} 41' 04''$	11.2	15.2	3.6	-0.8
	201911-202211	60	128	$31^{\circ} 38' 58''$	$130^{\circ} 40' 27''$	11.7	15.7	7.8	-4.0

南岳直下の圧力源の水平位置は固定

GNSS 観測による 2017 年 11 月–2022 年 11 月の水平変位と水準測量による上下変位を統合した圧力源解析の結果、始良カルデラ下の圧力源は始良カルデラの中央部の深さ 10.4km に求められ、 $20.8 \times 10^6 \text{ m}^3$  の体積増加を示した。また桜島南岳直下の圧力源は深さ 6.8km、 $3.9 \times 10^6 \text{ m}^3$  の体積減少と求められた。始良カルデラ下の圧力源の位置は 2017 年から 2022 年を通じてほぼ同じであり、体積変化量の年率もほぼ一定である。このことは前節で述べたのと同様に始良カルデラ下のマグマの蓄積状況に大きな変化がないことを示している。さらに、ここで求めた圧力源の位置は、先行研究 (Mogi, 1958 ; 江頭, 1988 ; 井口・他, 2008 ; Hotta et al., 2016 など) において得られたものともほぼ一致している。このことは、今回の圧力源解析で得られた圧力源位置が妥当なものであるとともに、桜島の大正噴火以降大きく変化していないことを示すと考えられる。

GNSS 観測点 MAKI と YOSI の水平距離の変化は、基線が始良カルデラ中央部の圧力源の直上をほぼ東西に横切ることから、始良カルデラ下の圧力源における体積変化を直接的に反映していると考えられる。京都大学防災研究所 (2021) は、MAKI-YOSI 間の水平距離がほぼ一様な伸長を示す時期と停滞する時期を繰り返していることを指摘し、伸長を示す時期の圧力源における体積変化率が  $9 \sim 10 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$  であることを示した。2017 年 11 月–2022 年 11 月の平均的な体積変化率は約  $4.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$  であるが、図 1 5 に示すように、MAKI-YOSI 間の水平距離をみると、この期間には伸長が停滞している時期が含まれており、2020 年 7 月頃からの停滞が 2021 年 4 月頃から伸長に転じ、2023 年初めごろから伸長速度が大きい傾向がみられる。全体としては MAKI-YOSI 間の水平距離は伸長を続けており、始良カルデラ下においてマグマの蓄積が進行していることを示唆している。

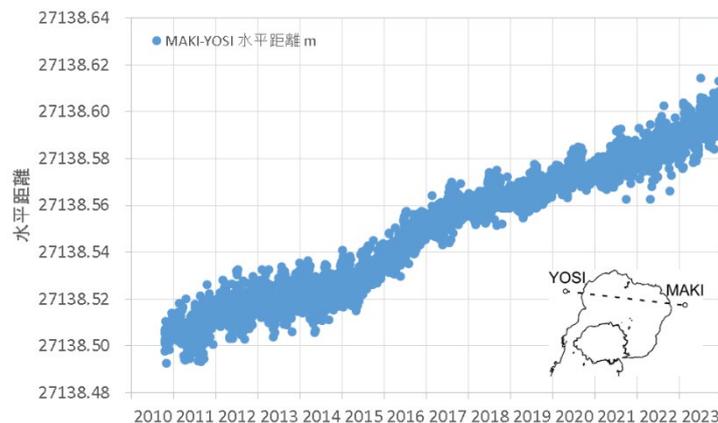


図 1 5 MAKI-YOSI 間の水平距離 (m)

#### d. 圧力源モデルの改良の試み

ここまで本稿で示した圧力源解析においては、始良カルデラ下および桜島南岳直下に 2 つの茂木モデルによる圧力源を仮定することで、対象期間の地殻変動を大きな矛盾なく説明できた。また、得られた始良カルデラ下の圧力源の位置は始良カルデラ中央部の深さ 10km 付近であり先行研究とも一致する。一方で、本研究では始良カルデラの地下構造に関する地震学的な知見が蓄積されてきている (為栗・他, 2022 ; 筒井・他, 2021)。為栗・他は始良カルデラ下の深さ 15km に

S波低速度領域の存在を明らかにし、また、筒井・他は始良カルデラ中央部の深さ 13.6km に地震波の反射面の存在を示唆したが、いずれもこれらは地盤変動から示唆される圧力源の深さとは隔たりがある。茂木モデルでは地表で観測される地盤変動を説明する地下の圧力源における体積変化量を知ることができるが火山活動の評価にとって重要なマグマの総体積を知ることができない。一方、為栗・他(2022)では地震学的手法によって 139~255 km<sup>3</sup> に達する体積の地震波低速度領域が示されており、速度異常の原因をメルト（部分熔融物）の存在に求めるのであればこの低速度領域はマグマ蓄積領域として見なすことができるうえに、その広がりにはマグマ蓄積領域の体積に相当する。このような観点から京都大学防災研究所(2023)では始良カルデラ地下の圧力源として、扁平率の異なる回転楕円体圧力源をおいた場合、また為栗・他が見出した S 波低速度領域の形状を模した多面体をおいた場合のそれぞれについて有限要素法による計算を行い、両者とも茂木モデルと同程度に地表面変位を説明できることを示した。

以下では、上述の 2017 年 11 月–2022 年 11 月の地盤変動データを用いて、S 波低速度領域の形状を模した多面体圧力源によるモデル計算を行った結果を示し、前節で示した茂木モデルによる圧力源解析結果と比較検討する。始良カルデラ地下の地震学的な地下構造の特徴をもとに、メルトの存在が推定される領域に圧力源を置くことで、圧力源における体積変化量の推定精度の向上が期待できる。

有限要素法の計算には FlexPDE7 を用いた。計算領域は、水平方向は始良カルデラ中央部から東西南北に 60km、深さ方向は海拔-50km までとした。モデル上端の形状は、陸域と鹿児島湾内については既存の地形データ(国土地理院、2023;海上保安庁、2003)を基に作成した地形データ(始良カルデラ周辺で約 100m メッシュ、最も遠方では 500m メッシュ)を用い、それ以外の領域では海拔 0 km とした。媒質には地震波速度構造 (Ono ほか、1978) を参考に深さにより剛性率の異なる水平成層構造 (表 4) を用いた。節点数は、最大の節点間隔を 4 km とし FlexPDE7 の自動分割機能を使用した結果、2 万個程度であった。モデル計算においては、圧力源表面にその法線方向に作用する内部圧力を与え、それによる圧力源表面の変位から各接点の変位を Hooke の法則に従って算出した。

表 4 有限要素法モデルで使用した剛性率

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

モデル計算では圧力源 LS に加えて桜島南岳直下に球形の圧力源 (半径 200m、深さ 6.8km、体積変化量-3.9×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>) を設けた。桜島南岳直下の圧力源 (以下では圧力源 S と呼ぶ) の位置や体積変化量は、前節の茂木モデルを用いた圧力源解析から得られたもの (表 3) であり、今回のモデル計算においてはこの値で固定した。そのうえで、FlexPDE7 の最適化機能を用いてモデル計算による変位と観測値の残差の二乗和が最小になる始良カルデラ下の圧力源の内部圧力を探索し、その時の地表変位と圧力源の体積変化量を求めた。観測値としては前節と同じ 2017 年 11 月から 2022 年 11 月までの GNSS 測位による水平変位と水準測量による鉛直変位を使用した。

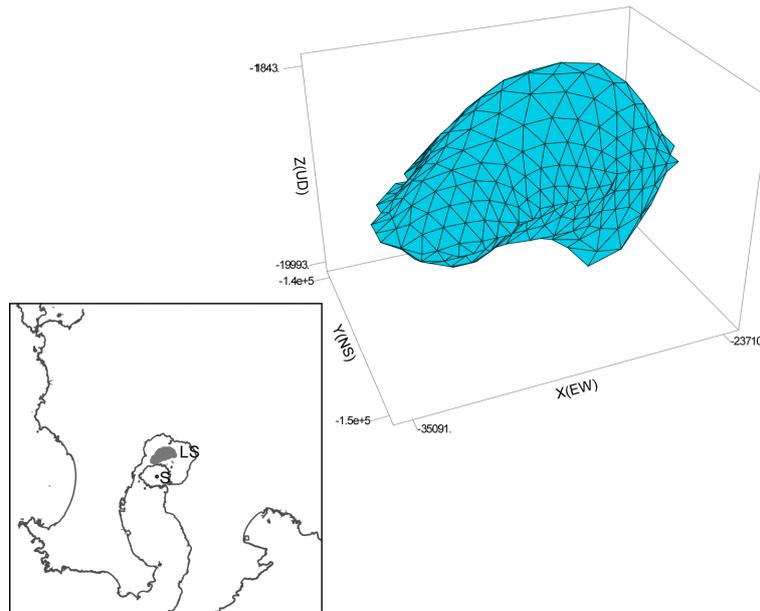
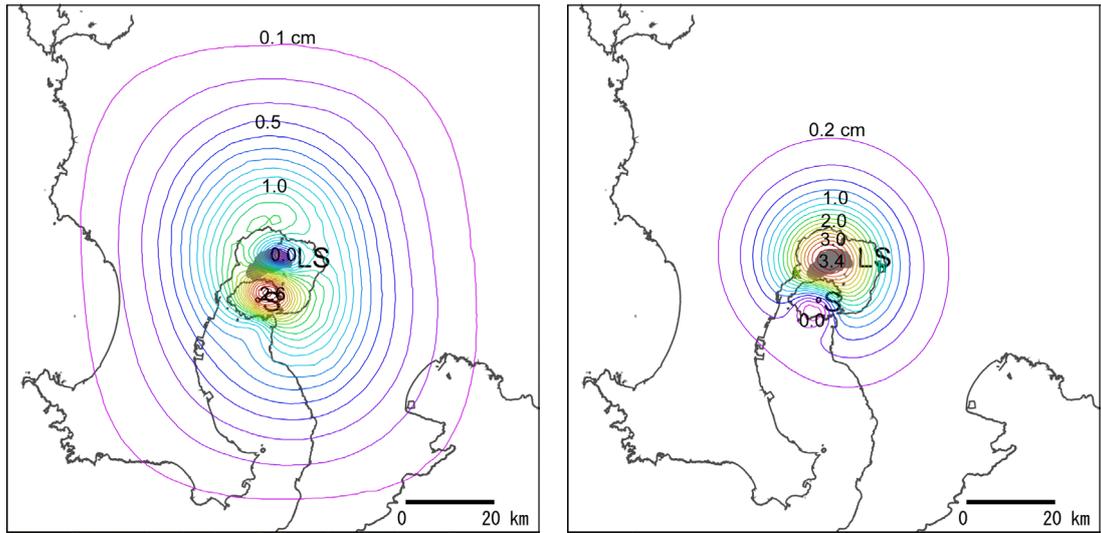


図16 低S波速度領域を模した圧力源 (LS) の形状 (右図)。左図のLS、Sは圧力源LSおよび圧力源Sの水平位置。

始良カルデラ下の圧力源 (以下、圧力源LS) は、為栗・他(2022)が求めた深さ15 kmのS波速度の分布を基に、深さ10 kmおよび20 kmのS波速度を按分してS波速度が2.45 km/sより小さい領域を深さの下限を20 kmとして抽出し、さらに極端な凹凸を平滑化した。こうして得た始良カルデラ下の圧力源 (以下ではLSと呼ぶ) の形状を図16に示す。圧力源LSの体積は約190 km<sup>3</sup>である。筒井・他(2021)が深さ13.6 kmの反射面の存在を指摘した領域では圧力源LSの上面の深さは13-14 kmとなっている。

モデル計算では圧力源LSに加えて桜島南岳直下に前述と同じ圧力源Sを設け、地表変位の計算値と観測値の残差二乗和が最小になるときの地表変位と圧力源LSの体積変化量を求めた。

2017年11月から2022年11月までの期間のGNSSによる水平変位と水準測量による水平変位に対して、上記のモデルによって計算された地表変位を図17に示す。桜島南部に圧力源Sの影響が認められるが、等値線は全体的にはほぼ同心円状のパターンを示し、茂木モデルや扁平な回転楕円体圧力源から得られるものと大きく異ならないが、水平変位・上下変位ともにやや南北に伸びた形状を示す。また、圧力源LS直上に出現する変位のピークの水平位置は同じ観測データから茂木モデルによって求めた圧力源の水平位置とほぼ一致する。



水平変位

上下変位

図17 圧力源 LS および圧力源 S による地表変位の計算結果。LS、S は圧力源 LS および圧力源 S の水平位置。

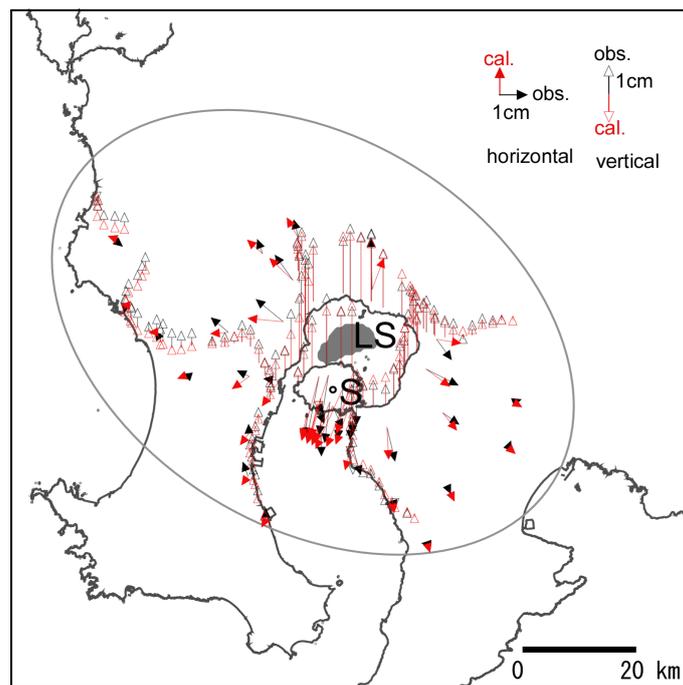


図18 圧力源 LS および圧力源 S を設けた有限要素法モデルから予測される地盤変動観測点の変位と観測された変位の比較。

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

始良カルデラ下の圧力源の形状	平均二乗平方根残差	体積変化量
----------------	-----------	-------

	水平変位	上下変位	
	cm	cm	$10^6 \text{ m}^3$
LS	0.61	0.31	31.4
微小球体 (茂木モデル)	0.52	0.33	20.8

図18に地表変位の計算値と観測値の比較を示す。水平変位・上下変位ともに計算値と観測値はおおむね合致しており、地表で観測される地盤変動を説明可能なことが示された。計算値と観測値の平均二乗平方根残差(表5)は、水平変位がやや大きいものの茂木モデルから得られるものと概ね同じ値をとる。一方で圧力源の体積変化量はモデルによって異なっており、今回の圧力源LSを用いたモデルによれば圧力源の体積変化量は  $31.4 \times 10^6 \text{ m}^3$  と求められた。茂木モデルを仮定した場合の1.5倍程度大きく推定されたことになる。

図19は、地盤変動観測点におけるLSモデルと茂木モデルの残差の差を示したものである。桜島内の水平残差では茂木モデルのほうの残差が小さいが、始良カルデラの北方および東方ではLSモデルのほうの残差が小さい傾向が認められる。それ以外の領域ではLSモデルと茂木モデルの予測値に大きな差はない。上下残差においては始良カルデラ北方および東方に図上で赤色の円で示される観測点が卓越しておりLSモデルのほうの残差がよく再現できていることがわかる。

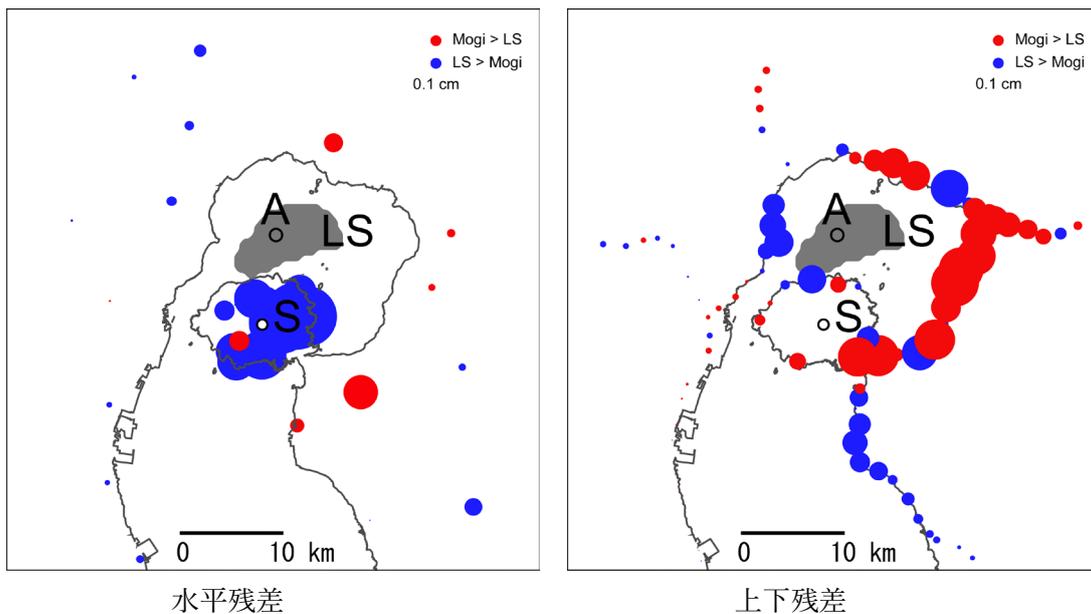


図19 地盤変動観測点におけるLSモデルおよび茂木モデルの残差の絶対値の差。円の直径は残差の差の大きさに比例し、赤い円はLSモデルのほうの残差が小さい観測点を、青い円は茂木モデルのほうの残差が小さい観測点をそれぞれ示す。

圧力源LSは従来のモデルより始良カルデラの地下構造に関する地震学的知見との整合性が高いと考えられる。LSモデルは、平均二乗平方根残差で見ると茂木モデルと顕著な差はなくどちらのモデルがより適切かを判断することは難しい。しかし、始良カルデラ近傍では特にカルデラ北方および東方の地表変位をよりよく再現できていることがわかった。圧力源に近い鹿児島

湾北部の海域で地盤変動観測点が存在しないことが適切なモデルの判断を難しくする要因になっていると考えられる。本研究で設置した海底地盤変動観測装置など、圧力源に近い観測点でのデータの蓄積が期待される。また、圧力源における体積変化量は圧力源モデルの与え方によって異なった結果が得られている。媒質の物性にも最近の地震学的な知見を反映させるなどの形で圧力源モデルをより現実的なものにする試みを今後も続ける必要がある。

## (2) -1-3. 始良カルデラへのマグマ供給量の推定

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

### a. 桜島からの火山灰放出量の検討

桜島から放出される火山灰の放出量を見積もるための基礎データとして、鹿児島県が行っている降灰量調査のデータを利用する。鹿児島県危機管理防災局は、1978年以降、県内の約60か所（図20）に観測点を設けて降下火山灰の量を調査しており、各観測点における月毎の面積あたり降灰重量（以下では降灰量と表記する）を公表している（鹿児島県、2023）。本稿執筆時点で2023年12月までのデータが存在する。表6に2023年の観測結果を示す。

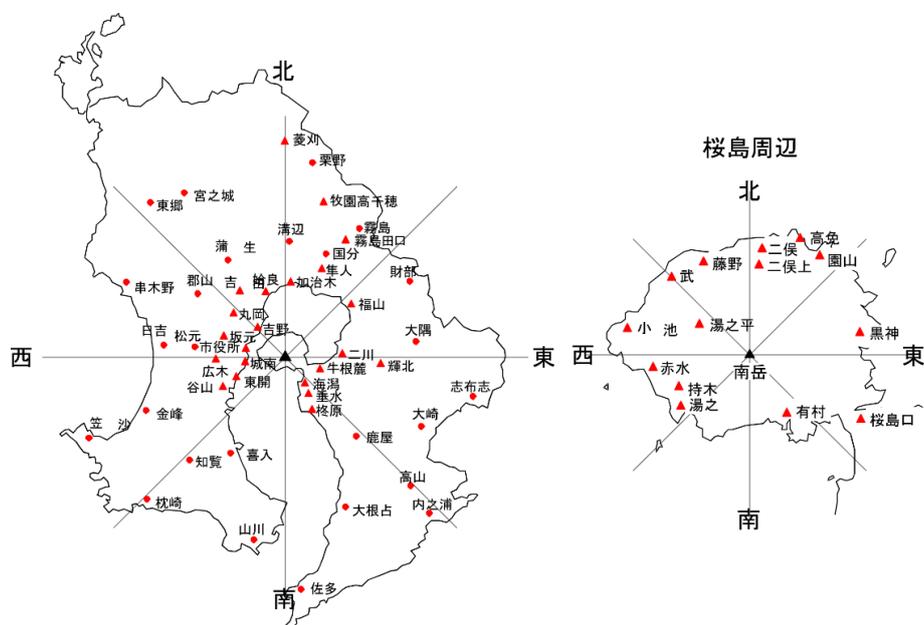


図20 鹿児島県による降灰観測点の分布（鹿児島県、2023を改変）

桜島から放出された火山灰量の総量を推定するのに、江頭・石原(1979)、Eto (1989, 2001)の方法を用いた。これは、中心角 $45^\circ$ の8方位の扇形の領域について、それぞれ領域毎に、火口近傍(3 km以内)では指数関数、遠方(3 km以上)ではべき関数を仮定して火口からの距離に対する降灰量の分布関数を求め、これを積分して領域内の総降灰重量を算出するものである。遠方では降灰量分布関数において降灰量が $10 \text{ g/m}^2$ になる距離を限界距離として3 kmから限界距離までを積分範囲としている。ここでは、鹿児島県危機管理防災局が公表しているものに鹿児島県農政部が行っている降灰調査の観測点を加えた約100地点の観測結果から月毎の火山灰放出量を求めた。例として、図21に、2023年10月の各観測点の降灰量と南岳からの距離の関係を示す。

表6 鹿児島県による降灰量調査結果

各観測点の月毎の面積あたり降灰重量（鹿児島県、2023）および南岳火口からの距離

観測点名	南岳からの距離 km	月間降灰量（2023年） g/m <sup>2</sup>											
		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	12月		
湯ノ平	3.0	27	358	242	12	158	101	12	363	52	28		
二俣上	4.5	4	92	257	17	205	22	807	26	12	30		
二俣武	5.0	3	67	92	7	131	23	592	14	8	8		
藤野	4.9	18	42	71	11	162	39	124	25	22	25		
赤水	4.5	8	46	236	27	83	48	3	37	17	4		
小池	5.7	15	97	52	16	73	25	5	56	9	20		
高免	5.1	14	76	190	10	55	3	80	17	7	9		
園山	5.8	14	156	74	18	81	24	130	20	4	7		
黒神	4.5	95	45	191	7	51	81	4	3	4	22		
有村	3.1	1749	384	448	45	293	550	3	40	8	25		
湯之持木	3.5	10	70	52	57	156	92	7	88	17	7		
持木	3.8	12	59	59	14	235	96	2	87	10	4		
桜島口	5.3	34	42	154	6	52	165	3	6	3	3		
海潟	7.3	644	167	104	18	38	28	8	7	5	21		
垂水	10.5	65	115	39	20	17	7	3	6	3	7		
牛根麓	9.0	4	6	15	8	15	7	3	3	3	3		
柘原	14.8	35	121	55	16	14	8	3	11	6	6		
二川	12.5	6	7	47	6	7	6	3	3	3	3		
市役所	9.7	4	7	8	3	16	3	3	25	4	3		
坂元	10.8	3	9	6	2	5	3	2	12	1	2		
吉野	8.6	3	36	13	2	31	9	2	190	3	11		
丸岡	14.8	2	2	5	2	3	1	1	46	1	2		
東開	12.0	4	2	3	3	18	2	2	3	2	2		
広木	13.7	3	2	18	3	5	1	1	4	1	1		
谷山	15.7	2	2	3	2	5	2	1	3	2	1		
城南	9.0	12	24	18	9	32	11	4	30	13	6		
福山町	18.7	4	4	5	4	3	3	4	3	1	2		
輝北町	20.0	3	2	3	2	2	2	2	2	1	1		
加治木町	17.8	2	2	4	2	3	2	2	3	1	2		
隼人町	20.0	1	1	3	1	5	1	1	1	1	1		
始良町	16.7	1	1	6	1	5	1	27	2	1	1		
吉田町	17.4	1	2	3	1	13	1	1	1	1	1		
国分	20.4	6	4	4	2	1	1	4	3	2	2		
溝辺	27.8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
蒲生	21.9	1	1	1	1	2	4	4	2	1	2		
霧島	31.3	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1		
栗野	41.8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
郡山	20.2	18	3	3	1	1	11	1	6	2	1		
松元	21.4	2	3	3	2	1	1	1	2	2	1		
日吉	29.6	1	1	1	3	1	1	1	2	2	1		
串木野	39.2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
金峰	33.2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
宮之城	40.8	1	1	1	0	2	1	1	1	1	1		
東郷	43.8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
知覧	32.8	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1		
笠沙	48.4	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0		
枕崎	48.4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
大隅	32.0	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1		
財部	35.7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
大崎	37.2	5	1	13	1	1	1	1	1	1	1		
志布志	43.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
喜入	25.2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
山川	41.8	1	1	2	2	1	1	1	0	1	1		
鹿屋	28.4	21	3	2	2	2	1	1	1	1	1		
高山	38.2	3	1	1	1	1	1	1	1	1	2		
大根占	39.5	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
内之浦	51.8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
佐多	54.2	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1		
霧島田口	36.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
牧園高千穂	37.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
菱刈	48.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

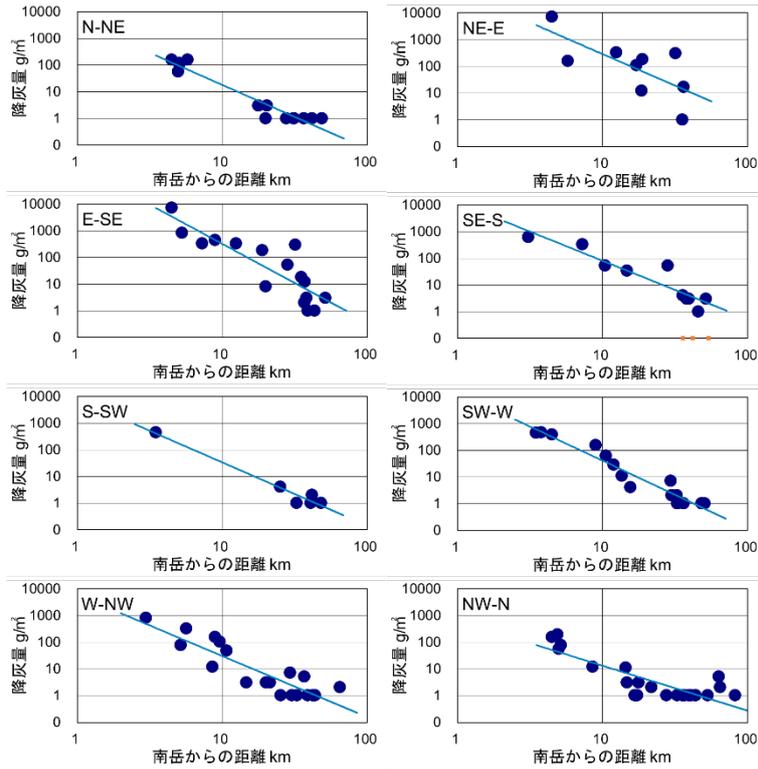


図 2 1 鹿児島県の降灰観測点における月別降灰量と南岳からの距離の関係  
(2023 年 10 月)

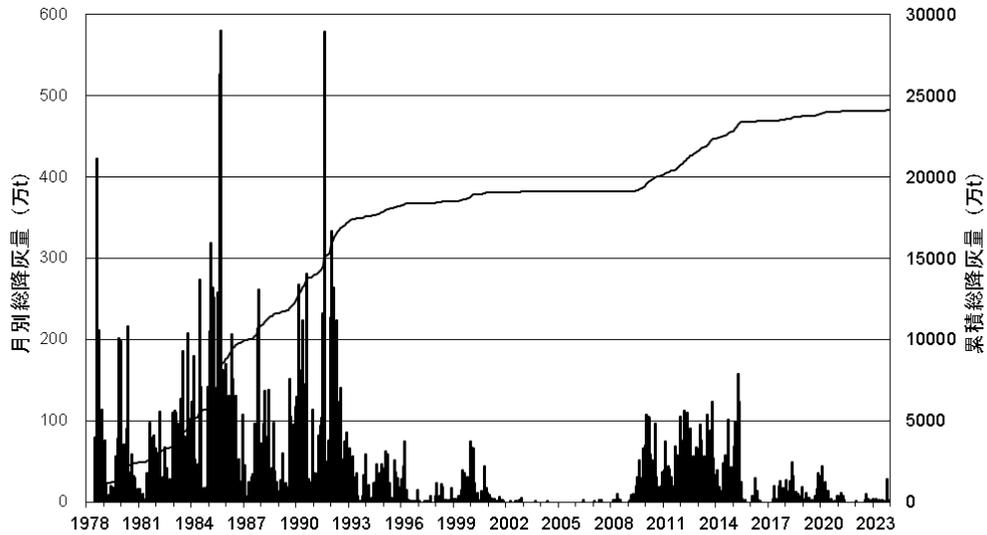


図 2 2 桜島から放出された月別推定総降灰量とその累積値 (1978 年 6 月以降)  
縦棒は月別推定総降灰量、線はその累積値をそれぞれ示す。単位：万トン。

鹿児島県が調査を開始した 1978 年 6 月以降は、このようにして得られた月毎の推定総降灰重量データが蓄積されている (図 2 2)。2023 年は 2020 年 7 月以降の降灰が少ない状態が続いているが 10 月 24 日の噴火では桜島東方に多量の降灰をもたらした。月別の推定総降灰重量では、

10月の28万トンが最も多く、ほかの月は3万トン以下であった。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る。

#### b. 始良カルデラへのマグマ供給量の推定

既に述べたように、GNSS観測点 MAKI および YOSI の間の水平距離の変化（図23）は、始良カルデラ下の圧力源における体積変化を直接的に反映していると考えられる。MAKI-YOSI 間の水平距離は2010年から2023年までにおよそ10cm伸長しているが、時期によって伸長率が異なり、2015年から2017年までの期間は12mm/年に達する。2021年4月頃以降は約7mm/年の伸長であったが2022年末頃からそれよりやや大きい10mm/年の割合での伸長が継続している。

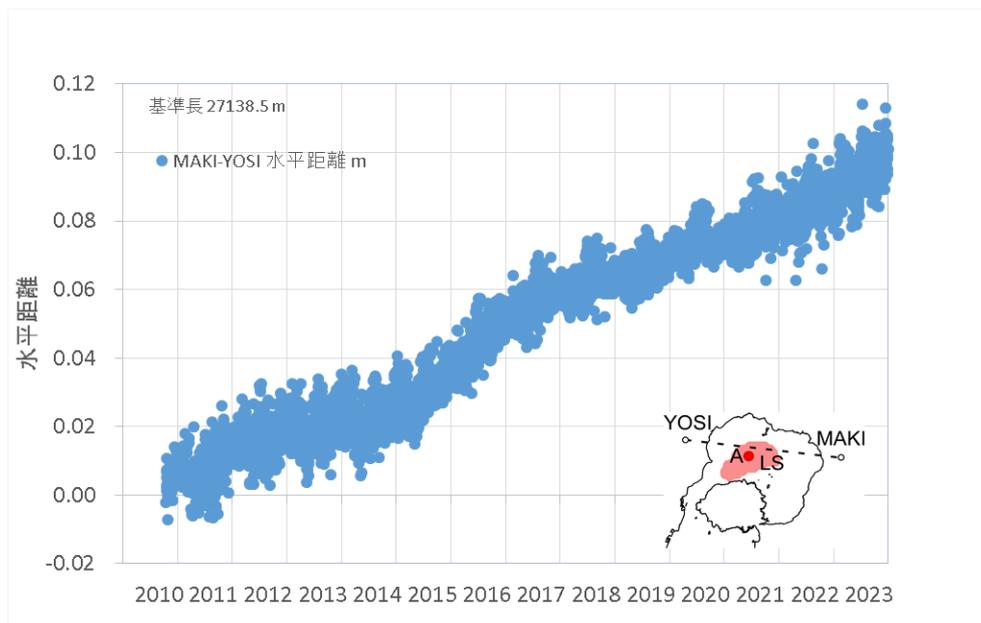


図23 GNSS観測点 MAKI と YOSI の間の水平距離の時間変化 (m)

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

以下では、MAKI-YOSI 間の月平均の水平距離の変化を始良カルデラ下の圧力源における体積変化に起因するものとして圧力源における体積変化量を見積り、これに月毎の火山灰放出量を体積に換算したものを加えることで始良カルデラへのマグマ供給量を求めた結果を示す。始良カルデラ下の圧力源として、2017年1月から2019年12月までのGNSSによる水平変位とほぼ同時期に行われた水準測量による上下変位を統合した茂木モデルによる圧力源解析から得られた位置（北緯 $31^{\circ} 40' 03''$ 、東経 $130^{\circ} 41' 04''$ 、深さ11.2km、表2.1-2-3）、および、(2) -1-2.d. 節で示した圧力源 LS を用いた。降下火砕物の重量を圧力源におけるマグマの体積に換算する際に仮定する密度（以下ではDRE換算密度）は $2500\text{kg}/\text{m}^3$ がよく用いられる（例えば、江頭・他、1998）が、降下火砕物に含まれない揮発成分の寄与を考慮するとDRE換算密度はより小さい値をとるほうが妥当かもしれない。ここではDRE換算密度として $2500\text{kg}/\text{m}^3$ および $1000\text{kg}/\text{m}^3$ とした場合のマグマ供給量を求めた。

MAKI-YOSI 間の水平距離の変化が始良カルデラ下の茂木モデルによる圧力源の体積変化に起因するものとして求めた始良カルデラへのマグマ供給量を図24に示す。2010年以降2023年までの

圧力源のマグマ供給量は、DRE 換算密度を  $2500\text{kg/m}^3$  とした場合  $101 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、DRE 換算密度を  $1000\text{kg/m}^3$  とした場合  $124 \times 10^6 \text{ m}^3$  と求められた。マグマ供給速度は時期により変動はあるが、平均的には、DRE 換算密度を  $2500\text{kg/m}^3$  とした場合  $7.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ 、 $1000\text{kg/m}^3$  とした場合  $9.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$  である。これまで知られているマグマの供給速度  $1 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{年}$  (Ishihara,1981) とほぼ同等であるといえる。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  $2500\text{kg/m}^3$  および  $1000\text{kg/m}^3$  のいずれの場合も約  $10 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$  となる。

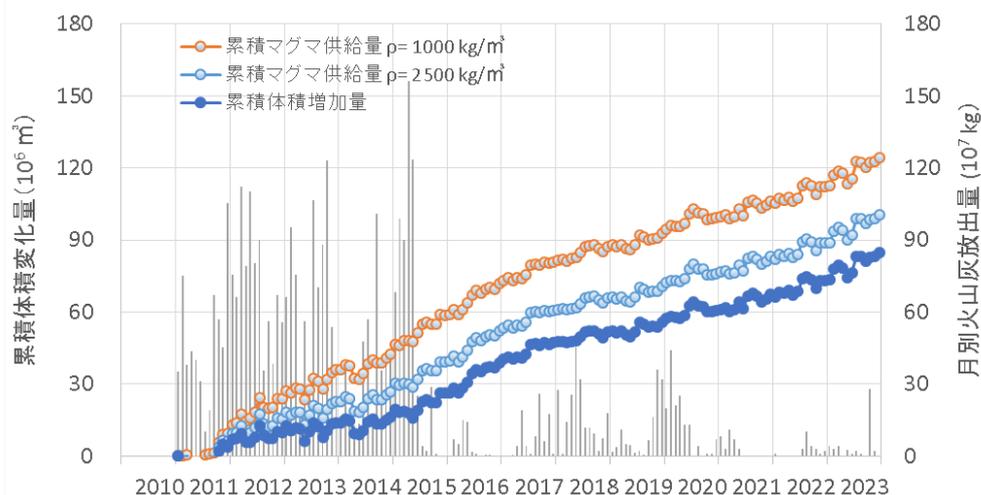


図 2 4 茂木モデルに基づく始良カルデラへのマグマ供給量の時間変化

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

次に MAKI-YOSI 間の水平距離の変化が始良カルデラ下の圧力源 LS の体積変化に起因するとして始良カルデラへのマグマ供給量を求める。始良カルデラ周辺の地盤が弾性体であるとする、圧力源の体積変化と地表の変位量は比例する。そこで (2) -1- 2.d.節で述べた有限要素法モデルに圧力源として LS のみを設け、圧力源の内部圧力を様々な値にとって圧力源の体積変化量と MAKI および YOSI の水平変位を計算し、そこから MAKI-YOSI 間の水平距離の変化量と圧力源 LS の体積変化量の関係を求めた。

こうして求めた始良カルデラへのマグマ供給量を図 2 5 に示す。2010 年以降 2023 年までの圧力源のマグマ供給量は、DRE 換算密度を  $2500\text{kg/m}^3$  とした場合  $130 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、DRE 換算密度を  $1000\text{kg/m}^3$  とした場合  $154 \times 10^6 \text{ m}^3$  と求められた。

圧力源 LS を用いたモデル計算はメルトを包有すると考えられる始良カルデラ下の低 S 波速度領域全体が圧力源として作用することを想定したものであり、茂木モデルなど従来のモデルより始良カルデラの地下構造に関する地震学的知見との整合性は高いと考えられる。このモデルによれば、始良カルデラ下へのマグマ供給量は従来の茂木モデルを仮定した推定より 20-30%程度大きくなる。

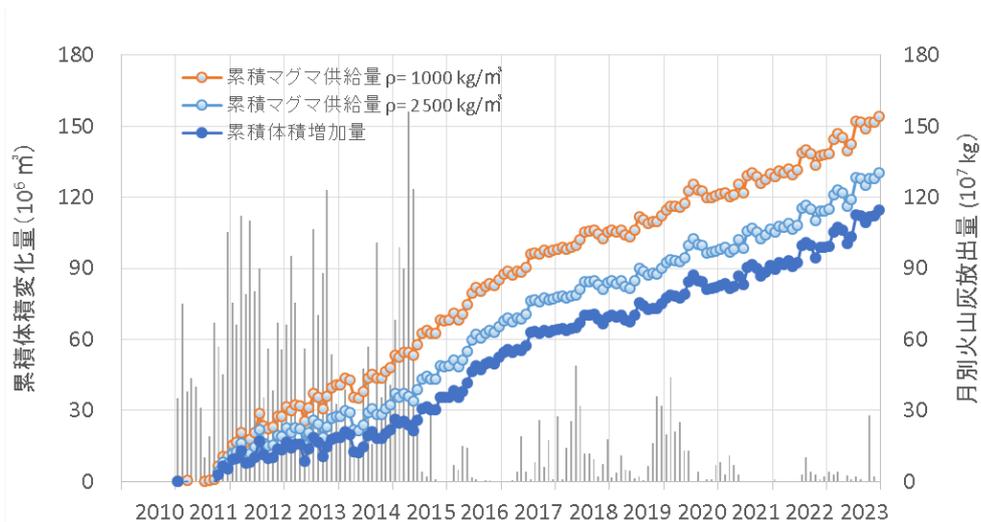


図 25 圧力源 LS の体積変化量および始良カルデラへのマグマ供給量の時間変化  
火山灰放出量を体積に換算する際の密度を  $2500\text{kg/m}^3$  および  $1000\text{kg/m}^3$  とした場合のマグマ供給  
量について示す。圧力源における体積変化および月別火山灰放出量（縦棒）も合わせて示した。

(2) -1-4. まとめ

a. 令和 5 年度まとめ

始良カルデラ周辺における GNSS 観測による地殻変動観測網からは順調に観測データが蓄積されている。

GNSS キャンペーン観測において、2022 年 11 月-2023 年 11 月の期間に桜島北部地下浅部の膨張を示す地盤変動が検出された。このことは蓄積されたマグマの一部が桜島北部地下に移動したことを示すと考えられる。この影響を補正した水平変位データを用いた圧力源解析から得られた圧力源の位置は、先行研究で得られていたものと同様に、始良カルデラ中央部の深さ 11km 前後であった。さらに、GNSS 連続観測によって得られた水平変位と水準測量による上下変位を統合する形で、2017 年 11 月-2022 年 11 月の期間について、始良カルデラ下の圧力源の位置と体積変化量を求めた。圧力源の位置は、先行研究で得られていたもの、また GNSS キャンペーン観測で得られたものとほぼ一致する。これらは、始良カルデラ下のマグマの蓄積状況には大きな変化がないことを示している。

また、ソフトバンク株式会社の独自基準点の GNSS 観測データを入手し、試験的に解析を行ったところ、すべての観測点から良好なデータが得られるわけではないが、一部の観測点からは実際の地盤変動をある程度反映する測位データが得られることがわかった。

マグマ供給量の推定精度向上のために始良カルデラの地下構造に関する知見を取り込んだ圧力源モデルを構築する試みとして、為栗・他（2022）が示した始良カルデラ下の低 S 波速度領域の形状を模した多面体圧力源を用いた有限要素法モデル（以下、LS モデル）によるモデル計算を行った。このモデルから求められた地表変位の計算値は茂木モデルによるものと概ね一致する。さらに始良カルデラ近傍の東方や北方において、LS モデルによる計算値と観測値の残差が茂木モデルによるものより小さくなる観測点が卓越する。しかし、使用した観測点全体の平均二乗平方根

残差は茂木モデルのほうがやや小さく、観測値との比較によってより適切なモデルを決定することは現状では困難である。本研究で設置した海底地盤変動観測装置は既存の地盤変動観測点より始良カルデラ中央部に近い位置にあることから、今後海底地盤変動観測装置から得られる変位データは圧力源モデルの改良に寄与すると期待される。また、媒質の物性にも最近の地震学的な知見を反映させるなどの形で圧力源モデルをさらに現実的なものにする試みを今後も続ける必要がある。

桜島から放出された噴出物量を始良カルデラからのマグマ流出量とみなして始良カルデラへのマグマ供給量を見積もった。茂木モデルを基に見積もった 2011 年以降 2023 年までの平均的なマグマ供給速度は  $8\sim 10\times 10^6$  m<sup>3</sup>/年であり、これまで知られている値と同等であった。2021 年 4 月以降のマグマ供給速度が上記の平均的な値に近い。

始良カルデラの地下構造との整合性がより高いと考えられる LS モデルを基にすると、始良カルデラへのマグマ供給量は、茂木モデルによるものより 20-30%大きく見積もられる。

#### b. 5ヶ年まとめ

本研究の 5 か年においては、既設の原子力規制庁の GNSS 観測点を維持することとした。定期的に点検や消耗品の交換を実施したほか、必要に応じて障害対応や機器の移設等を行い、長期の欠測なしに観測を継続することができた。また、始良カルデラ周縁部およびカルデラ内の観測点の稠密化を企図して 6 か所の GNSS 連続観測点を新設した。いずれの観測点も設置時あるいは設置直後の局所的な変動がおさまって以降数年しか経過しておらず、今後も観測を継続することで始良カルデラ近傍の地盤変動をより精密に知ることに寄与することが期待できる。

これらの観測点に加えて京都大学や国土地理院の観測点のデータを収集解析することで、より広範囲の地盤変動データが得られ、広域のテクトニックな変動や霧島火山の活動に伴う変動などの影響を評価および補正することが可能になった。

こうして得られた始良カルデラ周辺の GNSS 観測による地盤変動データに加えて水準測量による上下変動データを基に茂木モデルによる圧力源解析を行った。その結果、異なる観測期間について得られた圧力源の位置はいずれも始良カルデラ中央部の深さ 10 数 km に求められた。GNSS キャンペーン観測で得られたデータに基づく圧力源解析でも同様の結果が得られており、本研究の期間において始良カルデラ下のマグマの蓄積状況に大きな変化がなかったことを示唆する。

他方、始良カルデラ地下のマグマ蓄積量推定の高精度化のため、始良カルデラの地下構造の不均質性に整合する圧力源モデルの構築を目指し、回転楕円体圧力源や本研究で明らかになった S 波低速度領域の形状を模した多面体圧力源による地表変位を有限要素法モデル計算によって求め、これらのモデルによって観測された地表変位を説明可能であることが示された。しかし、どのようなモデルがより適切かの判断は現状では難しく、より変動の大きいことが期待される鹿児島湾北部海域に設置された海底地盤変動観測装置や始良カルデラ周縁部に新設された GNSS 観測点の今後のデータの蓄積がこの問題に寄与することが期待される。

圧力源解析の結果に、桜島からの火山灰放出量のデータを加えることで始良カルデラ地下へのマグマの供給量を推定した。茂木圧力源に基づく推定ではマグマ供給量は、2010 年以降 2023 年までの期間で DRE 換算密度を 2500kg/m<sup>3</sup>とした場合  $100\times 10^6$  m<sup>3</sup>、DRE 換算密度を 1000kg/m<sup>3</sup>と

した場合  $124 \times 10^6 \text{ m}^3$  と求められた。S 波低速度領域の形状を模した多面体圧力源を用いた場合はそれより 20-30% 大きい見積もりが得られる。

#### 参考文献

- Delaney, P.T. and McTigue, D.F. (1994) Volume of magma accumulation or withdrawal estimated from surface uplift or subsidence, with application to the 1960 collapse of Kilauea Volcano, Bull. Volcanol., 56, 417-424.
- 江頭庸夫(1988)桜島火山周辺における地盤変動—1982年～1985年—, 第6回桜島火山の集中総合観測, 15-19.
- Eto, T. (1989) An estimation of the amount and the dispersal of volcanic ash-falls ejected by summit eruptions at Sakurajima Volcano, Proceedings, Kagoshima International Conference on Volcanoes 1988, 448-451.
- Eto, T. (2001) Estimation of the amount and dispersal of volcanic ash-fall deposits ejected by vulcanian type eruption, Rep. Fac. Sci. Kagoshima Univ., 34, 35-46.
- 江頭庸夫・石原和弘(1979)桜島火山周辺における火山灰の降下堆積状態, 火山, 24, 88.
- 江頭庸夫・高山鐵朗・山本圭吾・Muhamad Hendrasto・味喜大介・園田忠臣・木股文昭・宮島力雄・松島健・内田和也・八木原寛・王彦賓・小林和典(1998a)桜島火山周辺における水準測量結果について—1991年12月～1996年10月—, 第9回桜島火山の集中総合観測, 15-29.
- 江頭庸夫・高山鐵朗・園田忠惟・山本圭吾(1998b)桜島火山周辺における光波測量結果—1992年1月～1996年12月—, 第9回桜島火山の集中総合観測, 31-37.
- Hotta, K., Iguchi, M., Ohkura, T. and Yamamoto, K. (2016) Multiple-pressure-source model for ground inflation during the period of high explosivity at Sakurajima volcano, Japan – Combination analysis of continuous GNSS, tilt and strain data –, Jour. Volcanol. Geotherm. Res., 310, 12-25.
- 井口正人(2006)マグマの蓄積過程にある始良カルデラ, 月刊地球, 28, 2, 115-121.
- 井口正人・高山鐵朗・山崎友也・多田光宏・鈴木敦生・植木貞人・太田雄策・中尾茂・前野直・長尾潤・馬場幸二・大重吉輝・放生会正美(2008)桜島および始良カルデラ周辺におけるGPS観測, 第10回桜島火山の集中総合観測, 53-62.
- Ishihara, K. (1981) A quantitative relation between the ground deformation and the volcanic materials ejected, Abstract 1981 IAVCEI Symposium - Arc Volcanism, 143.
- 石原和弘・高山鐵朗・田中良和・平林順一(1981)桜島火山の溶岩流(I)—有史時代の溶岩流の容積—, 京都大学防災研究所年報, 24, 1-10.
- 海上保安庁(2002)「沿岸の海の基本図」シェープファイル, 販売元:(財)日本水路協会 海洋情報研究センター
- 鹿児島県(2023)鹿児島県ホームページ,  
URL: <http://www.pref.kagoshima.jp/bosai/sonae/sakurajima/index.html>
- 加茂幸介・石原和弘(1980)地盤変動から見た桜島の火山活動, 桜島地域学術調査協議会研究報告,

- 鹿児島県, 19-28.
- 気象庁(2018)第 141 回火山噴火予知連絡会資料,26.
- 気象庁(2022)気象庁ホームページ, URL: <http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>.
- 国土地理院 (2023) 数値標高モデル(10m メッシュ), 国土地理院ホームページ, URL: <https://www.gsi.go.jp/kiban/index.html>
- Kriswati, E. and Iguchi, M. (2003) Inflation of the Aira caldera prior to the 1999 eruptive activity at Sakurajima volcano detected by GPS network in south Kyushu. *Ann. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, 46B, 817-826.
- 京都大学防災研究所 (2020) 平成 31 年度原子力規制庁委託研究成果報告書、原子力施設等防災対策等委託費 (火山性地殻変動と地下構造及びマグマ活動に関する研究) 事業、329pp.
- 京都大学防災研究所 (2021) 令和 2 年度原子力規制庁委託研究成果報告書、原子力施設等防災対策等委託費 (火山性地殻変動と地下構造及びマグマ活動に関する研究) 事業、469pp.
- 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、189pp.
- 京都大学防災研究所 (2023) 令和 4 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、xxxpp.
- 九州電力株式会社 (2020) 国土地理院九州地方測量部公共測量成果, 令 1 九公第 268 号.
- 九州電力株式会社 (2023) 国土地理院九州地方測量部公共測量成果, 令 4 九公第 430 号.
- Mogi, K. (1958) Relation between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surface around them, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, 38, 99-134.
- Omori, F. (1918) The Sakura-Jima eruptions and earthquakes, II. *Bull. Imp. Earthq. Inv. Comm.*, 8(6).
- Ono, K., Ito, K., Hasegawa, I., Ichikawa, K., Iizuka, S., Kakuta, T., and Suzuki, H. (1978) Explosion Seismic Studies in South Kyushu Especially Around the Sakurajima Volcano, *J. Phys. Earth*, 26, Supplement, S309 - S319.
- 斎藤英二・井口正人 (2006) 口永良部島火山における GPS 連続観測による気象要素を加味した 3 次元変位検出, *火山*, 51, 21-30.
- 佐々憲三 (1956) 地震予知に関する 2,3 の問題(II),地殻変動について; 京都大学防災研究所設立 5 周年記念論文集, 3-7.
- Takayama, H. and A. Yoshida (2007) Crustal deformation in Kyushu derived from GEONET data. *J. Geophys. Res.*, 112, B06413.
- 為栗健・八木原寛・筒井智樹・井口正人 (2022) 高分解能な 3 次元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*, 第 67 巻, 69-76.
- 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*, 第 66 巻, 71-81.
- 渡部豪・田部井隆雄 (2004) 南西諸島の GPS 速度場とサイスモテクトニクス. *地震*, 57, 1-10.
- Yamamoto, K., Sonoda, T., Takayama, T., Ichikawa, N., Ohkura, T., Yoshikawa, S., Inoue, H., Matsushima, T., Uchida, K., Nakamoto, M. (2013) Vertical ground deformation associated

with the volcanic activity of Sakurajima volcano, Japan during 1996 - 2010 as revealed by repeated precise leveling surveys, Bull. Volcanol. Soc. Japan, 58, 137-151.

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

## (2) - 2 始良カルデラにおける海底地盤変動観測の検討

### (2) - 2 - 1. はじめに

本委託費の事業を構成する項目の一つである、活動的カルデラにある火山の火山性地殻変動とマグマ活動に関する調査では、地球物理学的調査の一環として九州南部の始良カルデラにおける海底地殻変動観測の検討を実施する。この計画の重要な一翼を担うのが海底地盤変動観測装置

(以下、本装置と称する)である。本装置は火山観測において測地測量における電子基準点に相当する役割を担う。本装置を始良カルデラに相当する北部鹿児島湾の海底に設置することによって、始良カルデラの火山活動に伴って生ずる地盤変動をその変動源の直近で直接計測できることが期待される。また変動源の直近における地盤変動は始良カルデラの地下における火山活動の詳細な情報をもたらすことが期待される。

始良カルデラにおける既往の観測研究(たとえば、京都大学防災研究所, 2021; Yamamoto et al., 2013 等)によれば、始良カルデラ中央部では火山活動にともなって大きな地盤変動量の出現が期待されるうえ、圧力源近傍の地盤変動は圧力源の形状と大きさに関する情報を含んでいるはずである(京都大学防災研究所, 2022)。本研究の対象とする始良カルデラは九州南端から北に約 50km 入り込む幅約 20 km の細長い鹿児島湾の北端部に位置しており、カルデラ内部とされる部分はそのほとんどが水深 100m 前後の海底であるため一部地域を除き地盤変動観測が困難であった。本項目で取り扱う海底地盤変動観測装置は海域における地盤変動観測を可能にするものである。

これまでも複数の海底地盤変動観測の試みがなされてきている。プレート運動に伴う水平変動の観測では Spiess (1985)による音響結合型 GNSS(GNSS/A)測位法が実用化され、Fujita et al. (2006)を初めとする観測研究によって日本周辺の海域の水平変動の姿が明らかにされてきている。またイタリア INGV がポッツオーリ湾におけるブイを用いた GNSS による火山性地盤変動の垂直成分の観測を実施している(Iannacone et al., 2018; Martino et al. 2016)ほか、Xie et al. (2019)は INGV と同様なシステムを用いて米国マイアミ沖で連続地盤変動観測を実施している。

本装置設置地点付近では 1 cm/Year 程度の地盤変動の検知が期待される(たとえば、京都大学防災研究所, 2021; Yamamoto et al., 2013 等)。鹿児島湾は通常は穏やかではあるものの、夏季から秋季にかけて台風の接近あるいは上陸が毎年のように見られる海域であるうえ、音響試験の海域として用いられている。このような環境を考慮し、本装置は年 1 cm 程度のスケールの地盤変動の検出を狙い、海底に定置したアンカーとユニバーサルジョイントで結ばれたピラーを水面上の GNSS アンテナと海底との結合に用いるピラー直結形の構成を採用した。

本項目のロードマップを図 1 に示す。

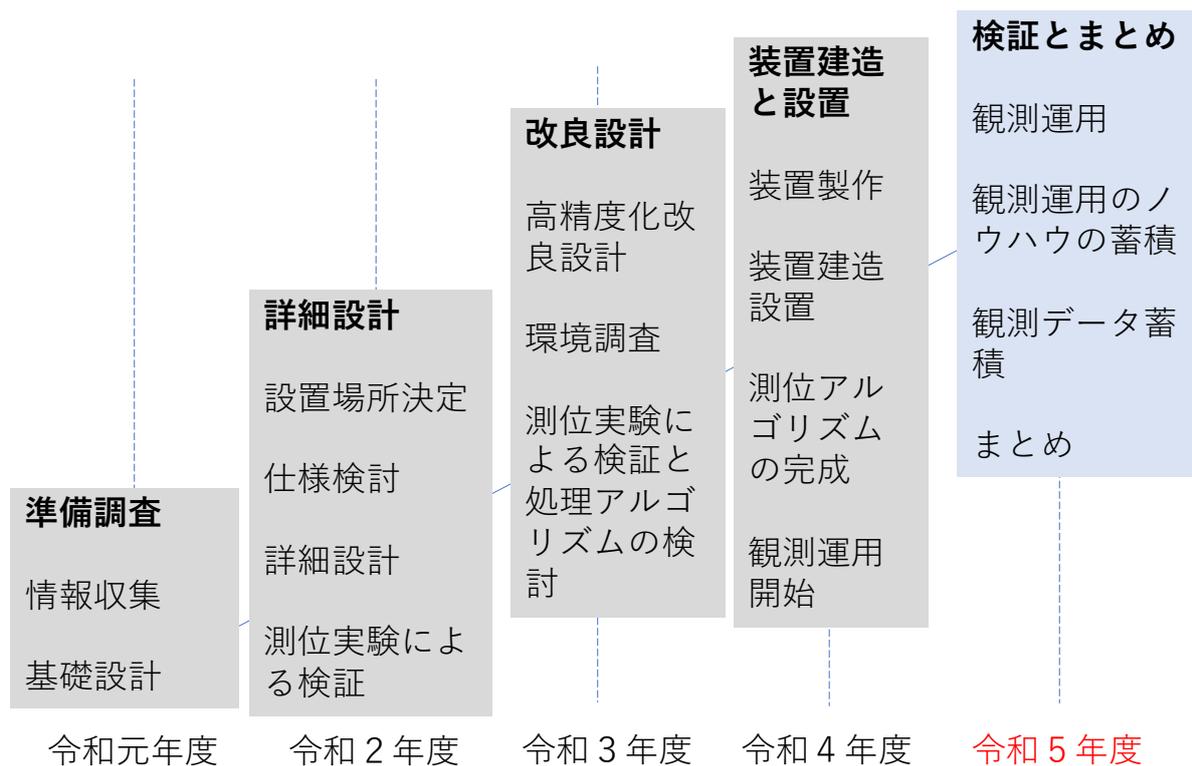


図1 本項目のロードマップ

上に示すロードマップにもとづき、令和5年度は以下の項目に取り組んだ。

- 1) 海底地盤変動観測装置の運用と維持
- 2) 関連観測点の運用
- 3) 海底地盤変動観測装置データ処理システムの構築
- 4) 海底地盤変動観測装置測位結果の妥当性の検討

1) では令和4年度末に海底に設置された海底地盤変動観測装置の運用と維持について経過を報告する。2) では本装置の設置予定地点周辺で実施された環境計測データについて報告する。3) では海底地盤変動観測装置でえられたデータの処理システムについて報告する。4) では海底に設置された本装置から得られた測位データを、桜島陸上に展開された常設観測点測位結果と比較して、その妥当性を検証する。

#### (2) - 2 - 2. 海底地盤変動観測装置の概要

海底地盤変動観測装置設置地点と始良カルデラとの位置関係を図2に示す。

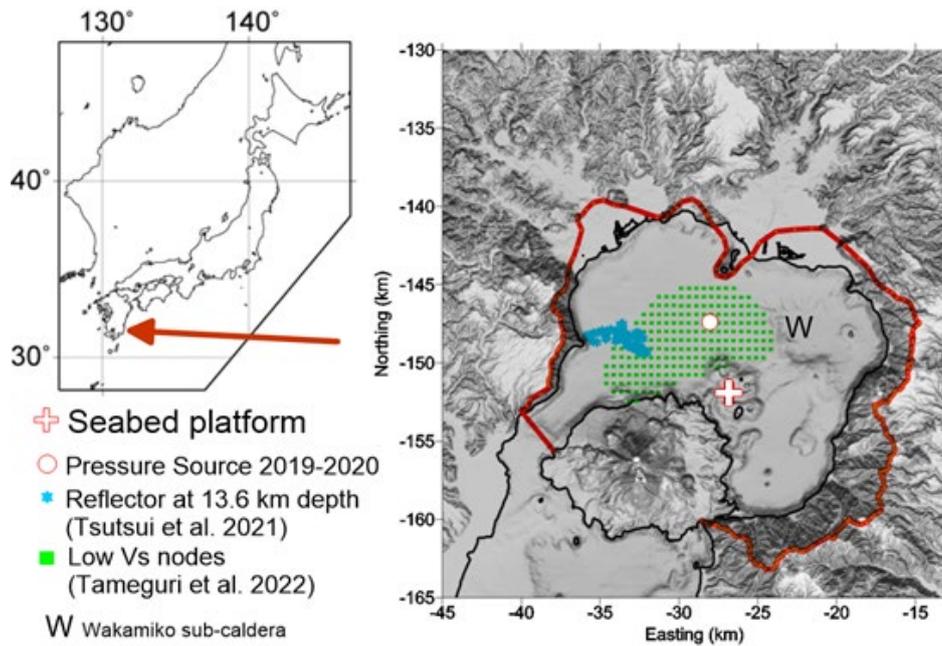


図2 始良カルデラと海底地盤変動観測装置設置位置。Seabed platformが海底地盤変動観測装置SBBを指す。Pressure sourceは京都大学防災研究所(2022)による推定結果を示す。陸上標高データは国土地理院(2000)を、海域水深データは日本水路協会(2002)によるものを用いた。

本装置は桜島北東沖に設置された。この場所は始良カルデラの地下活動に伴う地盤変動を明瞭に観測できることが期待され、かつ観測機材の試験設置が可能な水深である。Yamamoto et al. (2013)等の既往の研究によれば桜島北岸から北東岸は始良カルデラの活動に伴う隆起／沈降が明瞭に表れる場所とされている。また Mogi (1958)をはじめ江頭他(1998a)、江頭他(1998b)、Hotta et al. (2016)は桜島の火山活動に伴う地盤変動圧力源の一つを桜島北方の鹿児島湾中央部に推定しており、近年の地盤変動観測結果を解析した京都大学防災研究所(2022)でも既往の研究と変わらない位置に圧力源を推定している。

本装置は年 1 cm 程度のスケールの地盤変動の検出を狙い、海底に定置したアンカーとユニバーサルジョイントで結ばれた柱（ピラー）の頂上に設置された GNSS アンテナで測位を行う。本装置の構成を下図に、諸元を下表に示す（京都大学防災研究所, 2023）。

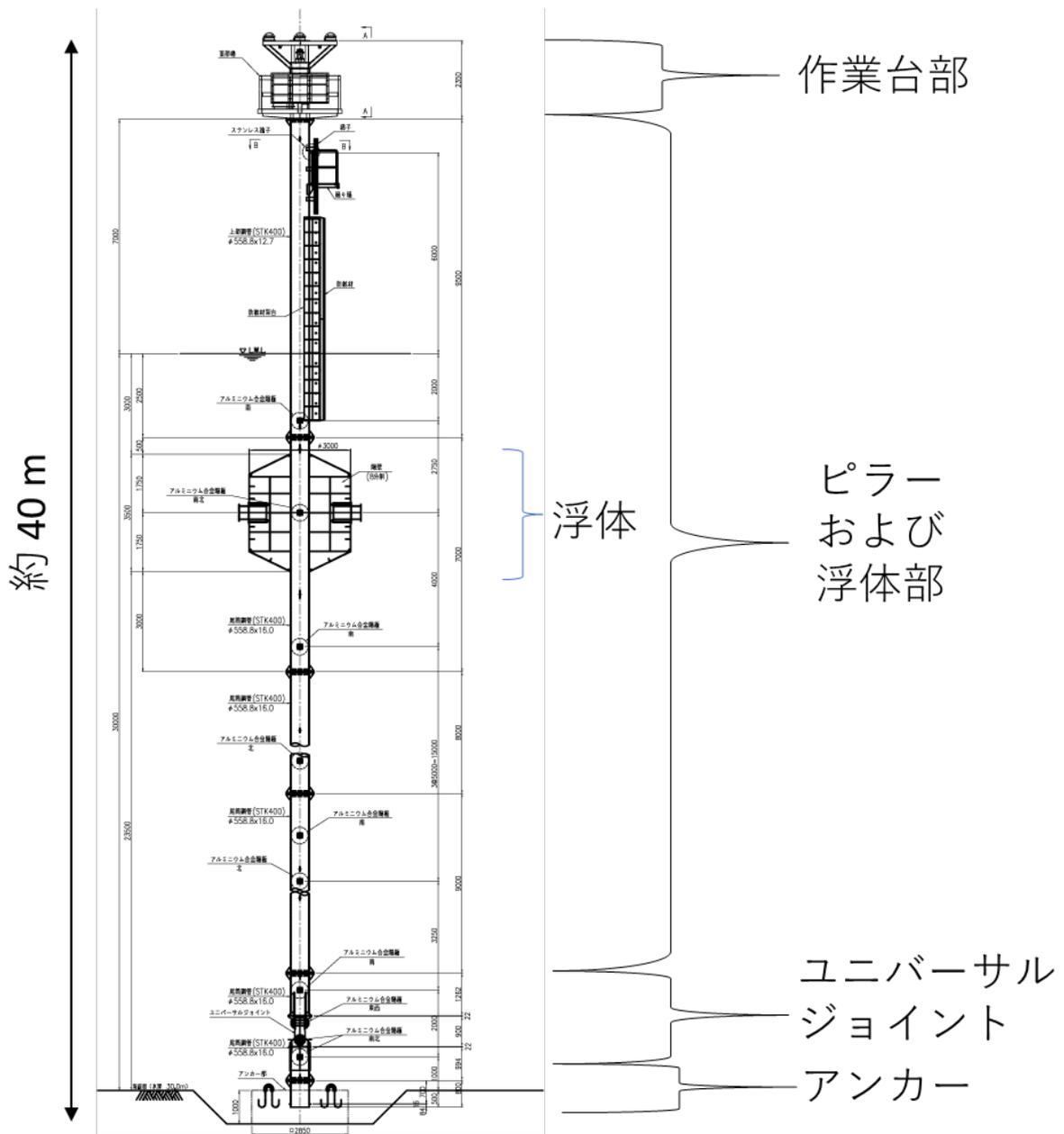


図3 海底地盤変動観測装置全体図 (京都大学防災研究所, 2023)

表1 海底地盤変動観測装置諸元

測位法	GNSS ポストプロセッシングキネマティック(PPK)法 測位
構造	アンカーとユニバーサルジョイントとで結合された剛体柱
全長 (アンカー上端からアンテナ間)	39.55 m
全重量	40.34 t

材質	鋼材
作業台サイズ	NS 3.1 m × EW 2.4 m
干潮時総浮力	259.5 kN
干潮時余剰浮力	54.5 kN
アンカー材質	鉄筋コンクリート
アンカー底面積	2.85 m × 2.85 m
アンカー重量	19.08 t
塗色	最低潮位以上白色、最低潮位以下灰色
設計寿命	5 年

また本装置では直交する 2 つの軸で構成されるユニバーサルジョイントを採用して、GNSS アンテナを搭載した柱の外力による傾斜を許す構造とした。本装置の精度を左右するユニバーサルジョイント軸受けの摩耗量については付録に記述する。

令和 5 年度の運用を経た現在の本装置の搭載観測機器を下表に示す。

表 2. 搭載観測機器

機器名	型式	製造元 (供給元)	数量
GNSS 受信機	PW7720-DDD-LZN- TMN (PwrPak-7D)	NovAtel	2
GNSS アンテナ	GNSS-802	NovAtel	4
チャージコントローラ	RENOGY ROVER 40A	RENOGY	1
LTE アンテナ	FMM800W-4T-10M- BP-LTE	日精 (センチュリーシステムズ)	1
モバイルルータ	Future Net NXR-G110/L	センチュリーシステムズ	1
タイマースイッチ	H3CR-F	OMRON	1
リン酸鉄リチウム電池	Lithium Blue DLB-G24- 12V	Discover	3
ソーラーパネル	DBG100-12	電菱	3

設置当初の機器構成は京都大学防災研究所(2023)に示されているが、後述する運用中に明らかになった問題を解決するために改良を行った結果、上表に示す構成となって現在に至った。さらに令和 5 年度末の計測系統の結線を下図に示す。

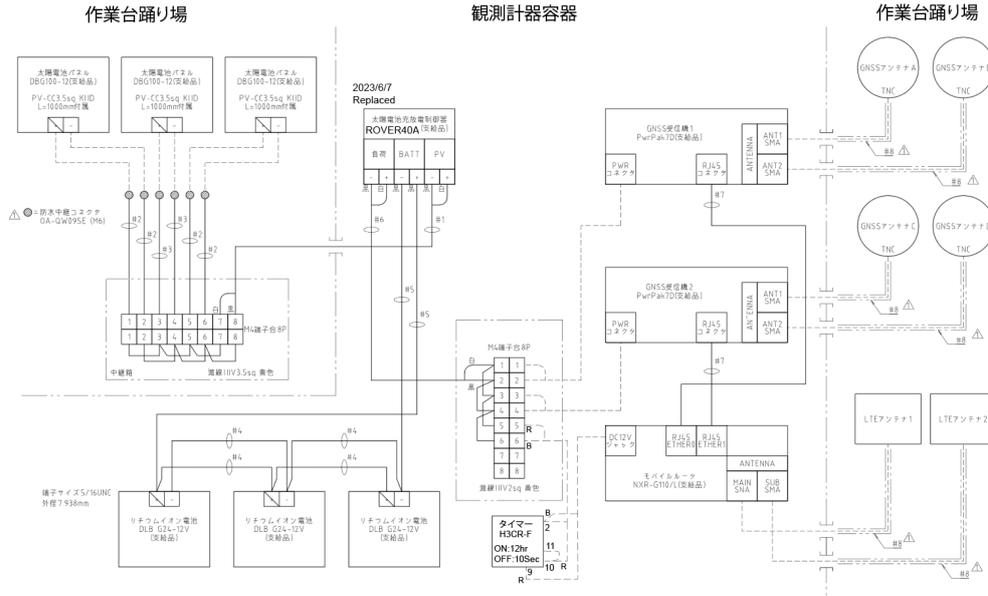


図4 海底地盤変動観測装置測定機器結線図

令和5年3月7日の設置時に計測された本装置の設置パラメータを下表に示す（京都大学防災研究所, 2023）。

表3 設置パラメータ（京都大学防災研究所, 2023）

項目	値	備考
設置水深 (m)	30.7	アンカー設置場所
設置点座標	31°37'52.38"N, 130°43'03.71"E	アンテナ A 平均位置
F 点平均座標	31°37'52.38"N, 130°43'03.69"E (31.6312166667°N, 130.717691667°E)	F 点推定位置
L1 (mm)	37754.12	E 軸中心からアンテナ A 位相中心
L2 (mm)	500	F 軸- E 軸中心間距離
$\beta$ (°)	0.49	F 軸方位; 北を基準として時計回り正
$\gamma$ (°)	-1.61	F 軸傾斜; 北下りを正

京都大学防災研究所（2023）による設置場所とその周囲の詳細な海底地形を下図に示す。

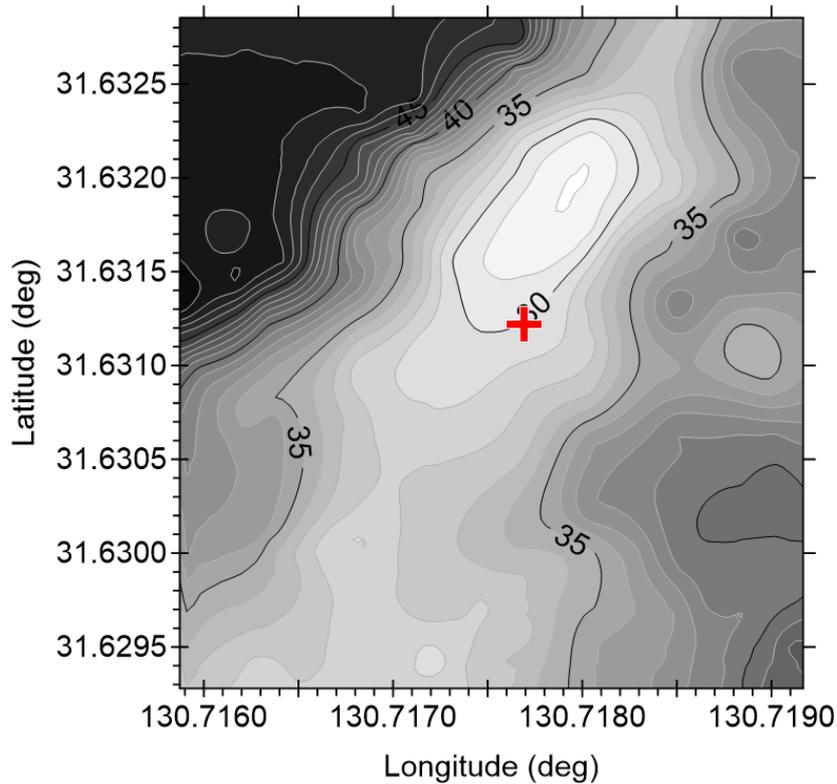


図5 設置場所周辺の海底地形（京都大学防災研究所, 2023）。最低潮位時の水深を単位 m で示す。コンターは 1m 間隔。赤印は海底地盤変動観測装置設置位置。

## (2) - 2 - 3. 海底地盤変動観測装置の運用と維持

### a. 海底地盤変動観測装置データ処理システムの構築

海底地盤変動観測装置は海底の仮想水準点を支点として自由に傾動する柱の頂上に測位用 GNSS アンテナが搭載された構造であるために、海底の仮想水準点の測位値は GNSS 受信機から出力される測位値に姿勢補正を施して得られる。姿勢補正は本観測装置の柱の頂上に設置された 3 つのアンテナの測位値から推定される（京都大学防災研究所, 2022）。

実験段階では短期間の試験運用を繰り返していたので実験ごとに姿勢補正を手動で行っていたが、実際の運用では長期にわたり連続して観測データが送り込まれてくることから、姿勢補正を連続して自動処理で行うことが必要になったため、海底地盤変動観測装置用自動処理システムを構築した。海底地盤変動観測装置用自動データ処理システムのハードウェア構成を下図に示す。

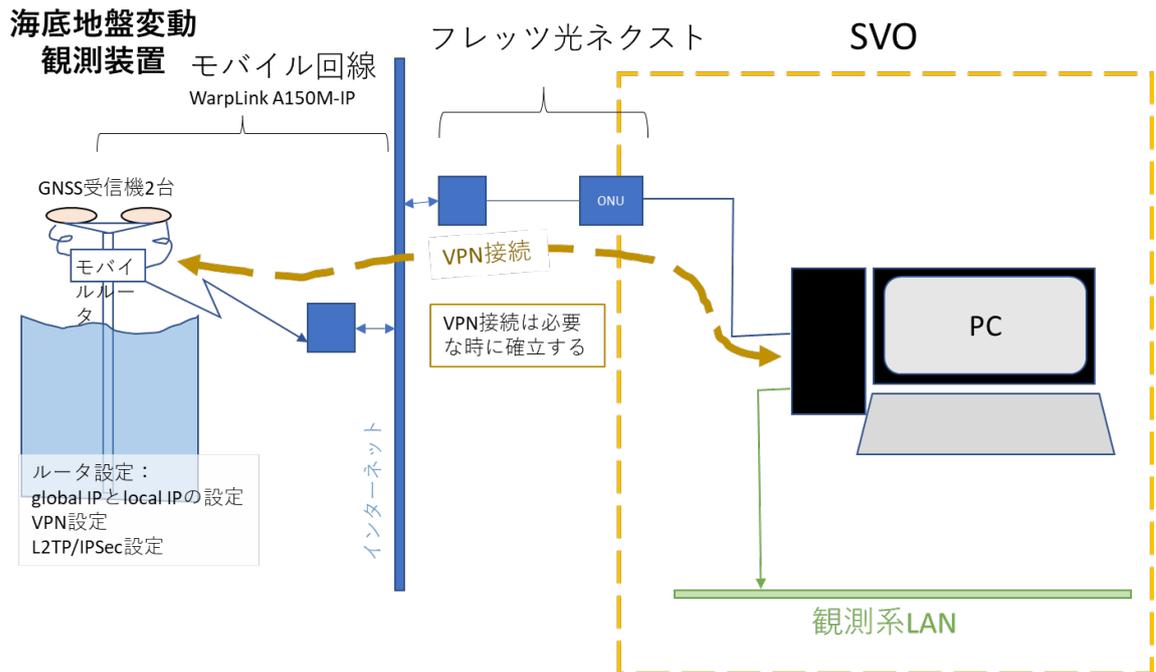


図6 海底地盤変動観測装置自動データ処理システムハードウェア構成

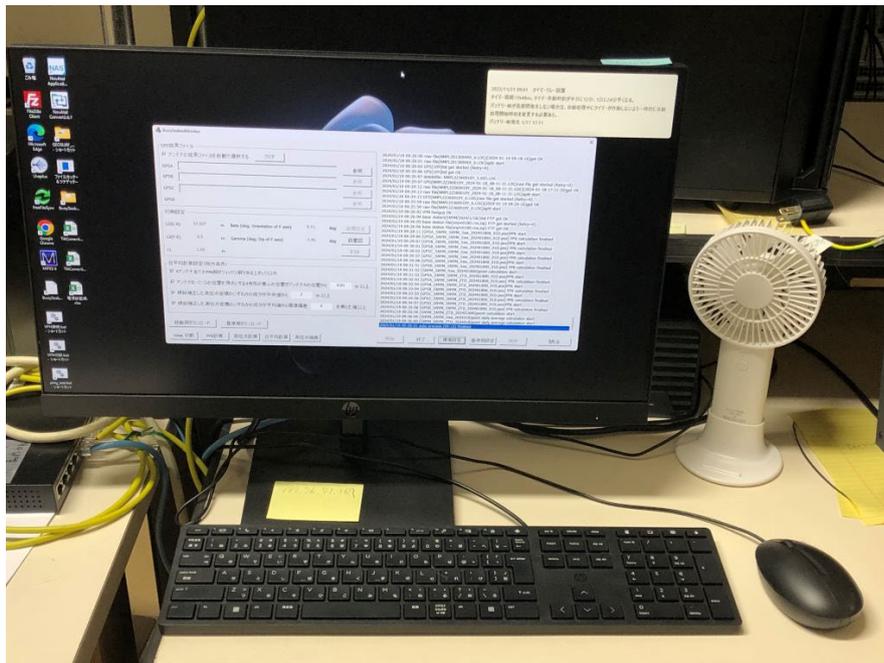


図7 海底地盤変動観測装置用自動データ処理装置 (SVO 内設置)

海底地盤変動観測装置用自動データ処理装置は Windows を基本ソフトウェアとして装備し、その上で自動データ処理アプリケーションを動作させる。

また、自動データ処理アプリケーションにおけるデータ処理の流れを下図に示す。

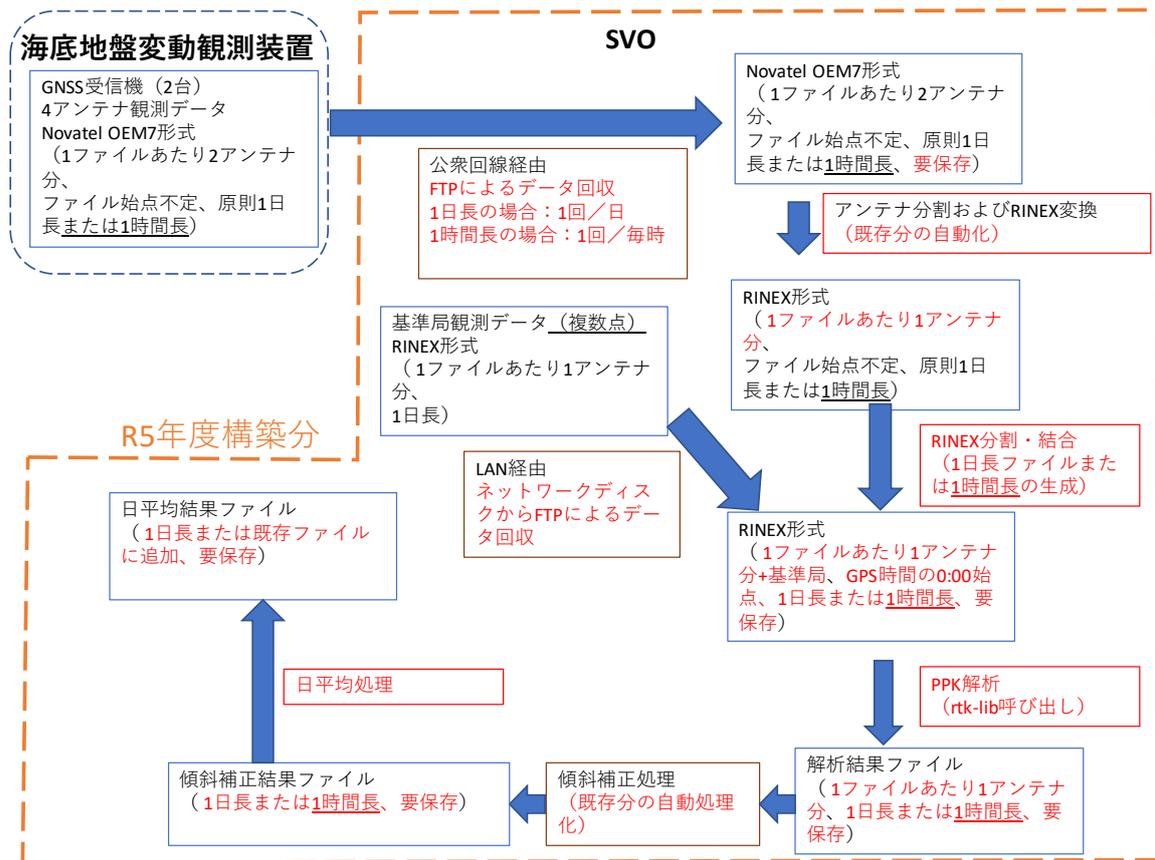


図8 データ自動処理の流れ

自動データ処理アプリケーションは SVO に設置されている処理用 PC にインストールされており、原則として 1 日に 1 回の頻度で海底地盤変動観測装置上の GNSS 受信機からデータを回収する。自動データ処理装置のアプリケーション作成は (株) ジオサーフが行った。自動データ処理アプリケーションの GNSS 測位結果処理部には RTK-LIB (Takasu, 2013) を利用した。

自動データ処理アプリケーションには測位結果生ファイルの管理機能、生ファイルの RINEX 型式変換機能と RINEX 型式 1 日長ファイル編集機能、測位結果解析アプリケーション RTK-LIB (RTKPOST) へのポータル機能、姿勢 (傾斜) 補正処理、および姿勢補正結果の日平均処理が組み込まれており、処理の各段階での手動処理も可能な造りにしてある。自動データ処理のアルゴリズムのうちの傾斜補正処理については GNSS アンテナアレイによる姿勢検出および補正アルゴリズム (筒井他, 2022) を採用し、副アンテナ B~D の姿勢情報を用いて主アンテナ A の測位値から海底のアンカーに固定されたユニバーサルジョイント最下軸の中央 F の位置 (測位点) を算出する (下図)。

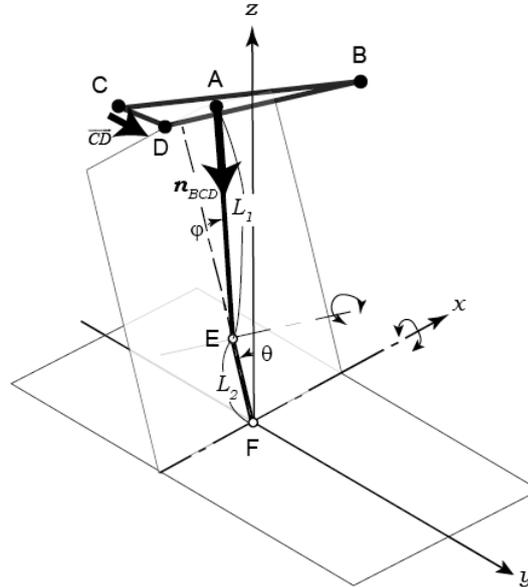


図9 姿勢補正の概念図 (筒井他, 2022)

筒井他 (2022) による測位点 F 座標  $\mathbf{X}_F$  の算出式を整理して下記に示す。

$$\mathbf{X}_F = \mathbf{X}_A + L_1 \mathbf{n}_{BCD} + L_2 \mathbf{E}_{EF}$$

ここに  $\mathbf{X}_A$  はアンテナ A の測位結果、 $\mathbf{n}_{BCD}$  は面 BCD の単位法線ベクトル、 $\mathbf{E}_{EF}$  を EF 方向の単位ベクトルとする。

また、姿勢補正前に以下の2つの基準による異常エポックの除外をすることに加えて、さらに姿勢補正後も2つの基準による異常エポックの排除を自動的に行っている。

- ・姿勢補正前にアンテナ A の PPK 解が fix しないエポックの除外
- ・姿勢補正前にアンテナアレイ  $\triangle BCD$  の重心とアンテナ A の距離が 1.0 cm 以上外れるエポックの除外
- ・姿勢補正後の FX、FY、FH のいずれかで中央値から 2m 以上外れるエポックの除外
- ・姿勢補正後の FX、FY、FH のいずれかで平均値から  $3\sigma$  以上外れるエポックの除外

つぎに設置後の海底地盤変動観測装置実機における姿勢補正後の測位結果について述べる。海底地盤変動観測装置設置直後は1エポック/sの高レート観測を実施した。設置後1週間目に低気圧の通過があり3/12深夜に雷雨を伴う寒冷前線の通過にひきつづき3/13早朝には寒気の吹き出しに伴う強風が発生していた。海底地盤変動観測装置の近隣の気象観測点 SZKM では3/12

22:40 に瞬間最大風速 14.4 m、3/13 05:40 に瞬間最大風速 12.8 m/s を記録している。このときの海底地盤変動観測装置の挙動を下図に示す。

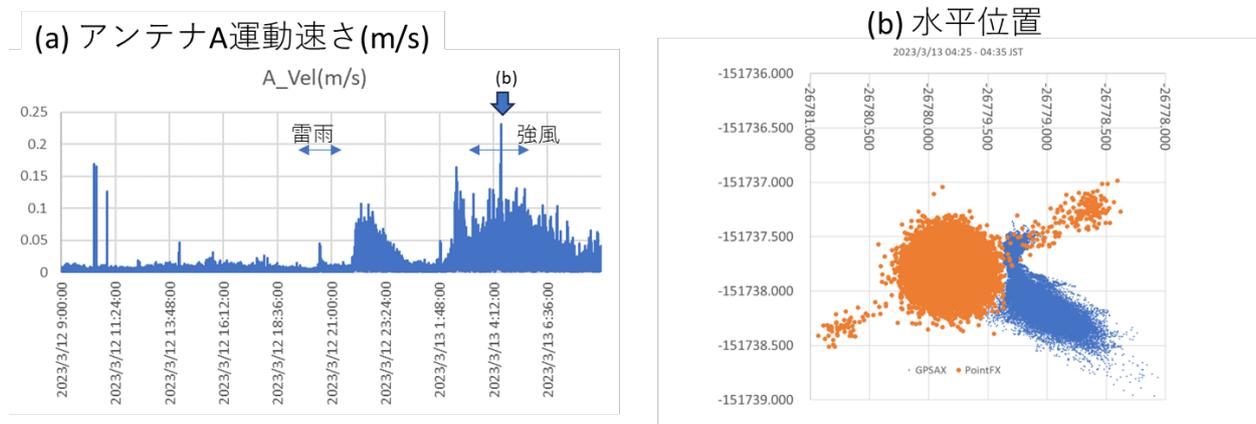


図 10 荒天時の海底地盤変動観測装置の挙動。(a)主アンテナ A の運動速度時系列、(b)アンテナ A 位置 (青) と測位点 F の測位結果 (橙)。

(a)によればアンテナ運動速度は最大で 0.23 m/s 程度であることが示されており、12~13m/s 程度の強風ではアンテナを含む作業台部の運動は 2 m/s には達していなかった。また(b)は水平座標推定値の分布を示すが、左上から右下に向かう細長い分布のアンテナ A 測位結果に対して、測位点 F の座標推定結果が概ね円形分布を示すことから、測位点 F の推定に用いる姿勢補正が正しく機能していることが示されている。

上図の期間の測位点 F の座標推定値の統計量を下表に示す。XF は X 座標、YF は Y 座標、HF はジオイド高を表し、それぞれ成分の中央値と標準偏差を示す。

表 4 測位点 F 座標推定値

	XF (m)	YF (m)	HF (m)
median	-151737.8210	-26779.8187	1.6335
Stdev.S	0.1213	0.1599	0.0174

それまでの高さ 1m の実験台による実験の標準偏差は、水平方向が 0.004 m 程度、垂直方向が 0.014 m 程度であった (京都大学防災研究所, 2023)。先述の姿勢補正式における誤差伝播を検討した筒井他(2022)では、高さ 40m の実機では高さ 1m の実験台の標準偏差が 50 倍に拡大されることが予想されていた。実機では水平方向の標準偏差が 0.2m であることから 1m 柱の実験台の 50 倍でほぼ予想通りの標準偏差であるといえる。一方、垂直方向の標準偏差が 0.017m であることから、柱が長くなった影響をあまり受けていないことが示されている。

下図に示されるように実際の推定結果の分布は単峰型を示しており収束はよい。

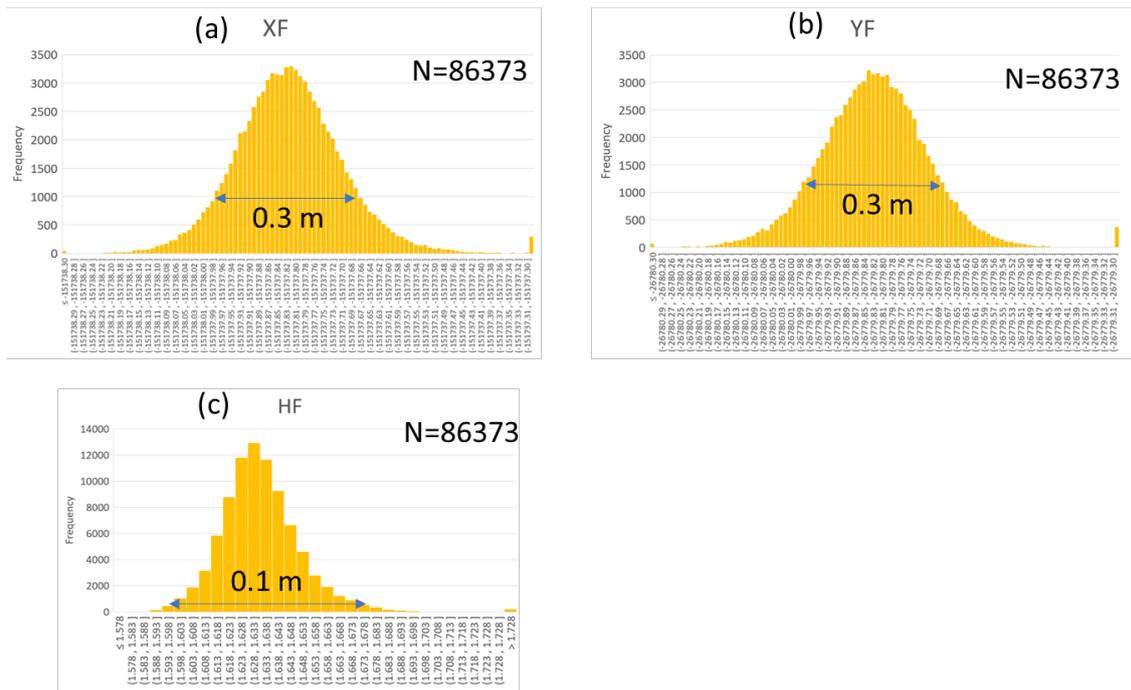


図 1.1 測定点 F の座標値分布 (a)X 座標、(b)Y 座標、(c)鉛直座標値。

以上のことから実機においても姿勢補正は正しく機能しているとみられる。

## b. 経過

本装置は令和 5 年 3 月 7 日に観測運用が開始された。運用開始後の主な経過を下表に示す。

表 5 運用開始後の経過

2023/3/14	チャージコントローラ 1 回目換装(旧設定 PWM 型→新設定 PWM 型)
2023/4/10	経過観察 (1 ヶ月後)
2023/6/01	GNSS エポック記録を 15 秒間隔に変更 (遠隔操作)
2023/6/07	チャージコントローラ 2 回目換装 (3 ヶ月後現地 3/14 装着 PWM 型→MPPT 型)
2023/7/24	アンカー周辺洗掘調査 (水中撮影)
2023/8/8-8/10	台風 6 号暴風圏通過
2023/8/24	午後鹿児島湾雷雨 (8/25 夕方までデータ通信途絶発生)
2023/8/26	雷雨後現地緊急点検
2023/10/23	水中部分点検・洗掘調査、ログ取得用 SD カード装着
2023/11/21	水上部分点検業務実施、ルータの電源回路にタイマー装着。

運用開始後から令和6年1月初旬にいたる9ヶ月間にわたり、GNSS受信では数分以上にわたる欠測は発生していない。

・軽微な問題点とその解消

運用にあたり顕在化した問題としては、搭載したリン酸鉄リチウムイオンバッテリーの省電力機能の発現による瞬断の頻発とモバイルルータの通信途絶（ハングアップ）である。バッテリーの自動電源断によるGNSS受信記録のエポック欠落（エポック飛び）は概ね1分程度であり観測の支障にはなっていない。

上表の記載のうち、通信系統および電源系統に関わる作業はすべて電池出力の瞬断対策を目的としたものである。京都大学防災研究所(2023)では陸上において試験運用をおこなって電源システムの検証を行っていたが、実際にシステムを設置した海上ではソーラーパネルの周囲の環境が異なるためにそれまでは顕在化しなかった電源瞬断が頻発したと考えられる。

電源瞬断は日没時刻前後に発生することが最も多く、蓄電池が充電から放電への切り替わりの状態遷移を起点として30分以上300mA以下の放電が続いたときに発生している。この現象は本装置で蓄電池として用いたリン酸鉄リチウムイオンバッテリーのバッテリーマネジメント回路(BMS)の仕様由来のものであった。一般にリン酸鉄リチウムイオン電池は内部で複数のセルを直列接続したものをパッケージしているため、セル間のバランスをとることを目的にBMSが必ず内蔵されている。このBMSそのものが一定の電力を消費することから、市販のリン酸鉄リチウムイオンバッテリーでは保管時のBMSの動作を止めるために手動の主回路スイッチを設けるか、自動停止機能をもったBMSを内蔵していることが多い。搭載したモデルのリチウムイオンバッテリーに内蔵されていたBMSでは0.3A以下の放電電流の状態が30分継続すると出力端子とセルの間の接続を一旦切断し、出力端子の負荷出力状態をスキャンする仕様であった。本装置に搭載したリン酸鉄リチウムイオン電池では自動停止条件の変更はユーザーの手では不可能であった。

電源瞬断は運用開始直後から最大で1日あたり5回発生し、観測記録には1分程度のエポック飛びとなって痕跡を残した。チャージコントローラ1回目換装では、エポック飛び低減の目的で設定パラメータを変更した同じモデルのチャージコントローラを装着した。

チャージコントローラの1回目換装によって1日3回以下に瞬断回数が減少しないことが確認されたので、陸上試験を行った上で6月にチャージコントローラ2回目換装を実施した。この換装ではパルス幅変調(Pulse Width Modulation: PWM)方式の旧チャージコントローラを、最大電力点追従制御(Maximum Power Point Tracking: MPPT)方式のチャージコントローラに換装した。MPPT方式のチャージコントローラは太陽電池からの電力を最適な電圧および電流として蓄電池に出力するもので、リン酸鉄リチウムイオンに最適化したチャージ電圧の制御パターンをもっている。この換装によって瞬断回数は概ね1日1回程度にまで減少した。

またモバイルルータへの通信途絶も複数回発生したが、いずれも電源瞬断によるリセットによって回復し2日以上通信途絶には至らなかった。また、通信途絶中も受信機にはGNSSデータが正常に記録されていた。この現象について、令和5年10月に通信途絶中のモバイルルータの状況を現地で確認した結果、電源瞬断後の電源電圧立上りが緩慢な場合に起きるモバイルルータの起動失敗が原因であることが判明した。冬季より夏季のほうがソーラーパネル上の照度が小

さい時間が長かったことから緩慢な電源電圧立上りによる起動失敗が発生しやすかったと考えられる。

以上の状況をふまえてモバイルルータの起動失敗対策を令和5年11月に施した。モバイルルータの電源回路にタイマーH3CR-F（OMRON社製）を挿入し、約12時間おきのモバイルルータの強制再立ち上げと、電源再投入時のルータ電源遅延投入（10秒遅延）を実装した。令和6年1月初旬現在、瞬断後の起動失敗による通信途絶は発生せず順調に観測を続けている。

- ・作業台定期点検

令和5年11月には水上の作業台部および標識灯の点検作業を行った。水上部の点検作業の内容を下表に示す。

表6 定期点検内容。(a)作業台部、(b)標識灯部  
(a)

### 点検チェックシート

観測装置・航路標識

点検日	令和 5年 11月21日		点検者	甲木雄介・瓜生勇斗	
点検種別	定期点検		氏名		
点検項目	点検内容		チェック	備考	
作業台・観測装置	外 観	破損・変形はないか	(前)	有	
		塗装の剥がれはないか	(前)	有	9ヶ月アップ実施
		汚れ・付着物はないか	(前)	有	清掃実施
	ボルトの締め付け	作業台取り付けボルトの緩みはないか	(前)	有	増締実施
		電源室フタの締め付けボルトの緩みはないか	(前)	有	増締実施
		GNSSフード、LTEフード取付ボルトに緩みはないか	(前)	有	増締実施
	太陽電池パネル	外観に異常はないか	(前)	有	
		太陽電池パネルに汚れはないか	(前)	有	清掃実施
	水 密 性	観測装置電源室内部に浸水はないか	(前)	有	
		観測装置電源室パッキンの変形・劣化はないか	(前)	有	交換実施
灯 ろ う	外 観	レンズ・カバーに汚れはないか	(前)	有	清掃実施
		カバー内に結露はないか	(前)	有	
		各部に破損はないか	(前)	有	
	ボルトの締め付け	灯ろう取付ボルトに緩みはないか	(前)	有	増締実施
	水 密 性	灯ろう内部に漏水はないか	(前)	有	
		日光弁によるON-OFF動作は良好か	(前)	否	
	配 線 材	端子・コネクタの破損や緩みはないか	(前)	有	
ケーブルに劣化はないか		(前)	有		
電 源	電圧測定	太陽電池電圧(17V以上)	(前)	否	21.20V
		蓄電池電圧(12V以上)	(前)	否	12.91V
		負荷時電圧(12V以上)	(前)	否	12.81V
	太陽電池パネル	外観に異常はないか	(前)	有	
		太陽電池パネルに汚れはないか	(前)	有	清掃実施
	水 密 性	電源室内部に浸水はないか	(前)	有	
		電源室パッキンの変形・劣化はないか	(前)	有	交換実施
	配 線 材	端子・コネクタの破損や緩みはないか	(前)	有	
		ケーブルに劣化はないか	(前)	有	
	<p><b>【特記事項】</b></p> <p>※各GNSSアンテナフード'架台の管理番号シール(海上仕様)の貼付けされることお勧め致します。                  ※LTEアンテナフード用Oリングを定期的に交換されることお勧め致します。</p> <p><b>【交換部材】</b></p> <p>GNSSアンテナ用架台用パッキン×4個、GNSSアンテナ用架台用スペーサ×4個                  電源室パッキンU-2085L(観測装置用)×1本、電源室パッキンU-1185L(航路標識用)×1本                  ヒューズ7A×1個</p>				

(b)

点検チェックシート

補助標識1

点検日		令和 5年 11月21日	点検者		甲木雄介・瓜生勇斗	
点検種類		定期点検	氏名			
点検項目		点検内容		チェック	備考	
標体	外観	破損・変形はないか		(前) 有		
		塗装の剥がれはないか		(前) 有	ケチアップ実施	
		汚れ・付着物はないか		(前) 有		
灯ろう	外観	レンズ・カバーに汚れはないか		(前) 有	清掃実施	
		カバー内に結露はないか		(前) 有		
		各部に破損はないか		(前) 有		
	ボルトの締め付け	灯ろう取付ボルトに緩みはないか		(前) 有	増締め実施	
	水密性	灯ろう内部に漏水はないか		(前) 有		
	点滅動作	日光弁によるON-OFF動作は良好か		(前) 否		
		4秒1閃光(明時間0.5秒)		(前) 否	約4秒	
配線材	端子・コネクターの破損や緩みはないか		(前) 有			
	ケーブルに劣化はないか		(前) 有			
電源	電圧測定	太陽電池電圧(12V以上)		(前) 否	12.51V	
		蓄電池電圧(12V以上)		(前) 否	12.30V	
		負荷時電圧(12V以上)		(前) 否	12.28V	
	太陽電池パネル	外観に異常はないか		(前) 有		
		太陽電池パネルに汚れはないか		(前) 有	清掃実施	
	水密性	電源室内部に浸水はないか		(前) 有		
	配線材	端子・コネクターの破損や緩みはないか		(前) 有		
ケーブルに劣化はないか		(前) 有				
【特記事項】						
【交換部材】						

今回の点検では観測計器収納容器、標識灯電源容器、各アンテナレドームの防水パッキン交換も併せて行われた。点検の結果、特段の異常は報告されなかった。令和5年度は海底地盤変動観測装置の稼働開始から1年目であることを考慮すれば妥当な状態であると考え。また海底地盤変動観測装置の稼働開始から1年目であることから、バッテリーの老朽化による現象は報告されていないが、設置後3年目にはいる時点でバッテリーの交換作業が必要になるものと思われる。

・アンカー周辺洗掘調査

令和5年7月と同年10月に水中撮影を行った。水中撮影の目的はアンカー周辺の洗掘調査とその他の異常の有無の確認の為である。7月の水中撮影はアンカー底部を中心に撮影を行い、10月の撮影はアンカー底部に加えて水中部全体を対象とした。これらの撮影の間には台風6号の暴風圏が本装置を含む地域を通過しており、台風に伴って発生する波浪や吹送流による洗掘を確認した。また生物の付着も時間の経過とともに増大する傾向があった。

令和5年10月末の台風シーズン後のアンカー底部の状況を下図に示す。

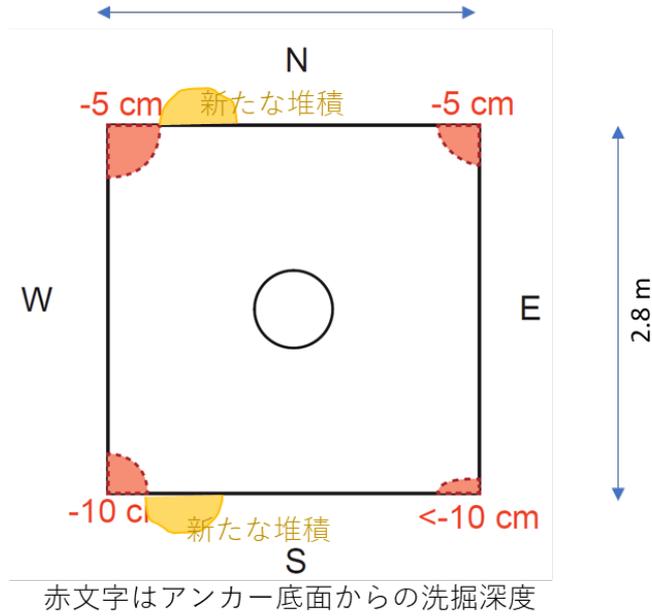


図 1 2 アンカー底部洗掘見取り図 洗掘箇所の奥行きは未確認。

令和 5 年 7 月の水中調査ではアンカー底部の洗掘や二次的な堆積物は認められなかったが、10 月に実施した水中調査ではアンカー底面の四隅において洗掘の進行と新たな堆積が認められた。洗掘の進行が顕著なのはアンカーの西側に位置する北西角と南西角であった。アンカー北面の調査写真とアンカー側面見取り図とを下に示す。



(a) アンカー北東角



(b) アンカー北西角

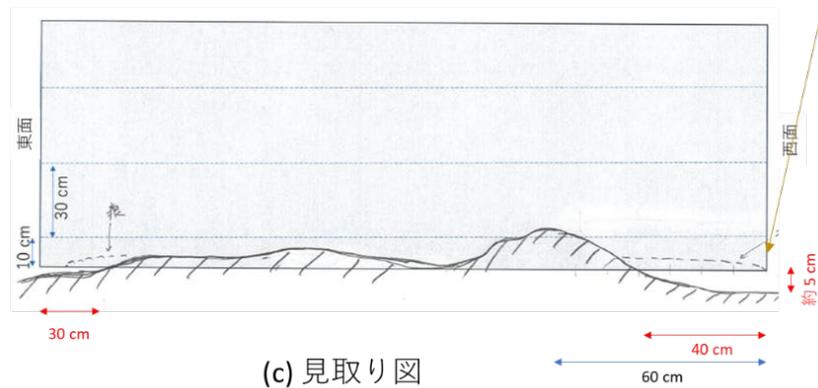


図13 アンカー北面の状況。(a)アンカー北面東部の水中写真、(b)アンカー北面西部の水中写真、(c)洗掘および土砂二次堆積状況の見取り図。

洗掘状況から洗掘に寄与した流れは西方向からのものであったと推測される。設置場所は南北に伸長する尾根地形の上であることから、荒天時の東に向かって尾根を乗り越す流れが洗掘を進行させたと考えられる。

10月の調査ではアンカー以外の水中部分の撮影も行った。潮間帯から水面直下までの本体表面にはクロフジツボをはじめとする生物の付着が認められた。生物の付着は7月の撮影より10月の撮影時のほうが増加していた印象であった。付着生物の増加に伴い、装置周辺の魚影が濃くなっていた。



図14 平均潮位より上位のクロフジツボ(*Tetracrita japonica*)の付着状況(2023/11)。



図 1 5 水中の本体表面(2023/10/23) 最低潮位線付近



図 1 6 水中の本体表面(2023/10) 浮力体上面付近



図 1 7 ユニバーサルジョイント付近(2023/10)



図18 アンカー上面(2023/10)

生物の付着は水深が増大するにつれてその密度を減らす傾向にあったが、特に平均潮位直下から浮力体に至る区間の付着が著しく、波浪潮流への応答性能を維持し本装置の直立性を維持するためには定期的に付着生物の除去をする必要がある。

・雷雨後現地緊急点検：

令和5年8月24日午後鹿児島湾地域で雷雨が発生した。雷雨発生後に通信途絶が発生していることが判明した。これを受けて25日朝、センター長、大学事務と規制庁担当者に報告し、渡船の手配および予備資材の整備を行った。通信途絶は25日夕方には回復したが、26日午前中に点検を実施した。

c. 関連観測点の運用

本項目に関連して2つの観測が行われている。本装置の南南東に気象観測点SZKMと、西南西に位置する二俣潮位観測点FUTTである(下図)。

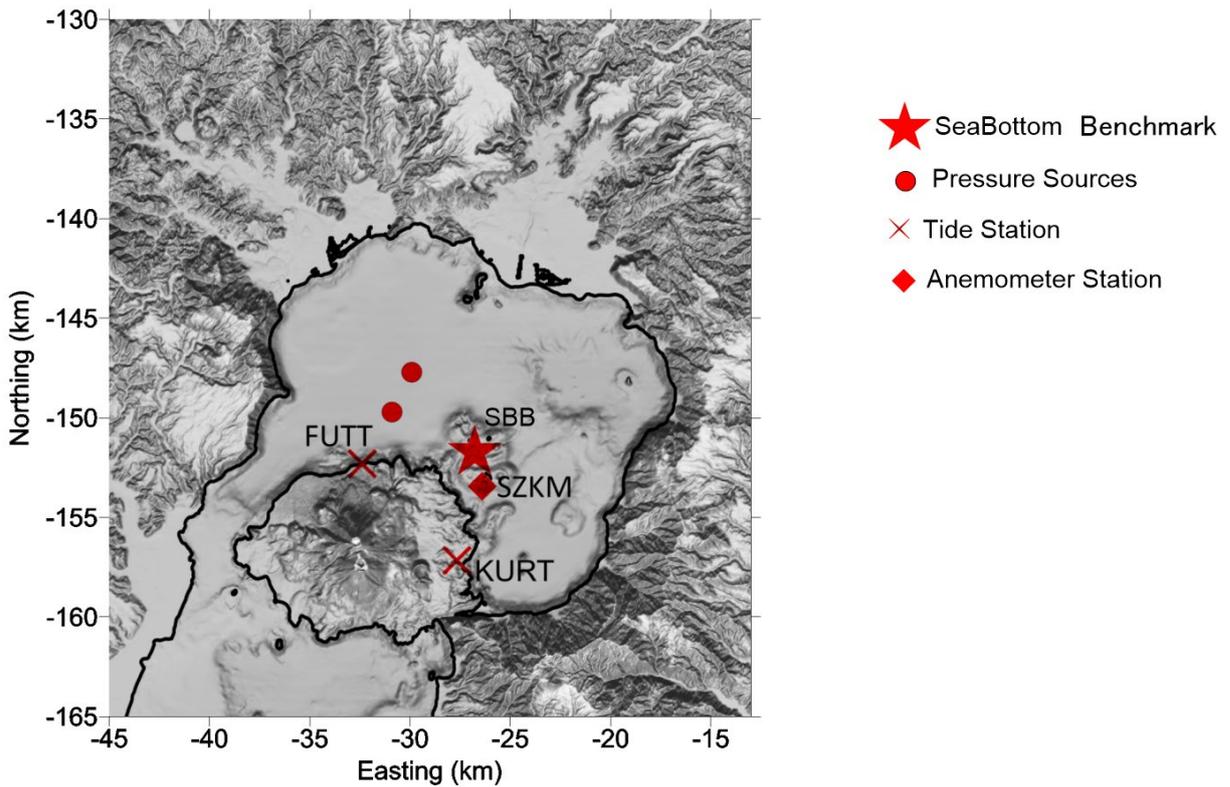


図19 関連観測点配置 潮位観測点(Tide Station)を×で、気象観測点(Anemometer Station)を◆で示す。

気象観測点 SZKM の詳細についてはすでに京都大学防災研究所(2022)が報告しており、潮位観測点 FUTT の詳細は京都大学防災研究所(2023)が報告しているので、ここでは設置後全期間の観測データの紹介と令和5年台風6号暴風圏通過時の海底地盤変動観測装置の挙動にかかるとのを述べる。

FUTT 1 日平均潮位

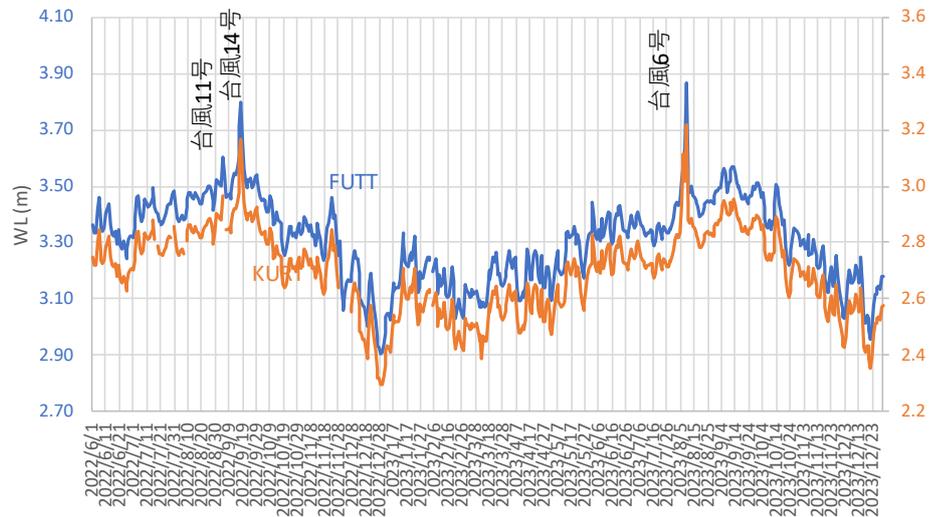


図 20 潮位観測データ(FUTT および KURT)

上図潮位観測点 FUTT における潮位観測では秋季に高い潮位、春季に低い潮位が年周変化として現れていることが示されている。FUTT の約 7 km 南南東に位置する既設の KURT 潮位観測点でも同様な傾向が認められることから、FUTT における潮位観測は正しい結果が得られていると考えられる。KURT を基準にした FUTT の相対潮位(FUTT-KURT)の 2023 年 3 月 7 日 (海底地盤変動観測装置設置日) 以降の経過を下図に示す。

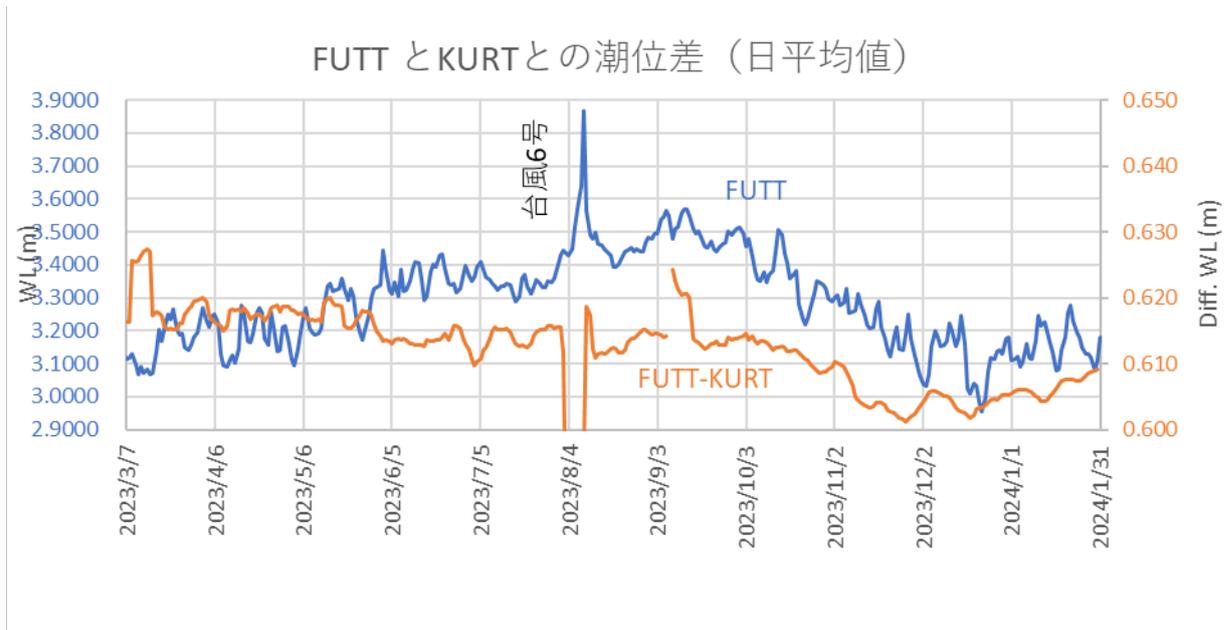


図 2 1 FUTT の相対潮位(FUTT-KURT)。2023 年 3 月 7 日以降の経過を示す。

上図によれば KURT に対して FUTT の潮位が概ね 0.2 cm/月の割合で緩やかに下降している傾向が見受けられる。この緩やかな変化に加えて 10～11 月にかけては 2.5 cm/月の急激な潮位下降が現れ 11 月下旬に最低値を示し、その後回復傾向であることが見受けられる。京都大学防災研究所(2023)では同時期に 1cm に達する潮位差低下は報告されていないことから、2023 年のこの時期だけの現象であると考えられる。FUTT の近傍の GNSS 観測点 FUTG を調べてみると同時期の上下変動は明瞭ではない一方、2023 年 10 月末に火山灰噴出をとまなう弱い活動期に対応して桜島北岸の FUTT が 1 cm 隆起したとすればこの潮位差変化の説明ができる可能性がある。

つぎに新島南端の気象観測点 SZKM における観測開始以降の風速観測値を下図に示す。

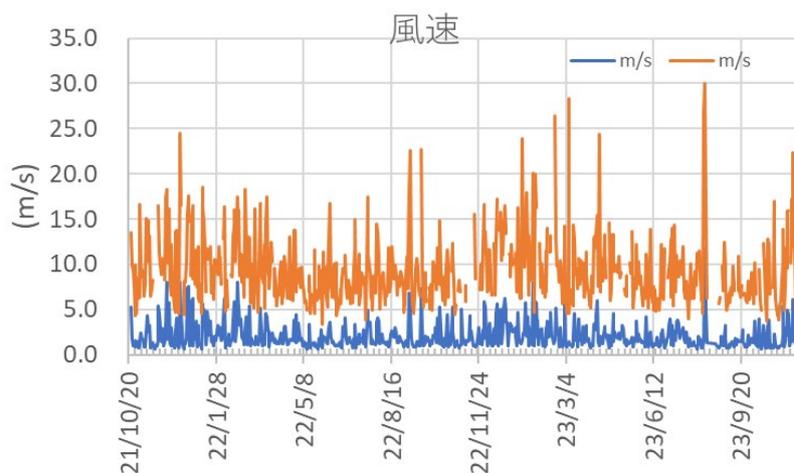


図 2 2 気象観測点 SZKM における風速観測結果。橙曲線：瞬間最大風速、青曲線：10 分平均風速。

気象観測点 SZKM の観測は概ね順調であるが、2023 年 8 月中旬に植生がソーラーパネルを覆い隠してしまったことで、8 月 14 日～8 月 22 日にかけての 10 日間電力不足による欠測が生じていた。8 月 16 日に欠測を認識したので草刈りを実施し、10 月 23 日にバッテリー交換を行った結果、再び観測は継続されている。

気象観測点 SZKM では 2023/8/9 の台風 6 号暴風圏通過に伴って 30 m/s におよぶ瞬間最大風速が記録されている。

以下ではこの台風 6 号暴風圏通過時の海底地盤変動観測装置のふるまいについて報告する。台風 6 号暴風圏通過時を含む 24 時間の風速観測値を下図(a)に、同じ時間帯の海底地盤変動観測装置の傾斜角を下図(b)に示す。下図(a)には気象庁発表の最大風速の時刻と、SZKM で観測された最大風速の時刻も示してある。気象庁発表の最大風速は 04:30 であったが、SZKM における最大瞬間風速はその約 7 時間後の 11:52 であった。暴風雨による停電のため海底地盤変動観測装置の測位結果は 0 時から 8 時台まで得られていなかったが、復電後の 08:52 に風速約 25m/s、平均風速 15 m/s の状況下において瞬間最大傾斜角は 6.9 度が記録されていた。この時間帯の傾斜角の中央値 3.85 度であった。同日は 07:32 に干潮を迎えており、低水位から上昇中の潮流速の大きい時間帯であった。京都大学防災研究所(2022)では最大干潮かつ風速 21.6m (10 年確率風速) 時の最大傾斜角は 11 度とされていたが、記録の残されている最大瞬間風速 25m/s 時の瞬間最大傾斜角は設計最大傾斜角を超さなかった。また同装置の作業台部着水傾斜角は 34.2 度とされているが、後日の点検では作業台部に漂流物の打ち上がりは認められなかったので作業台部着水傾斜角に達しなかったと推察される。

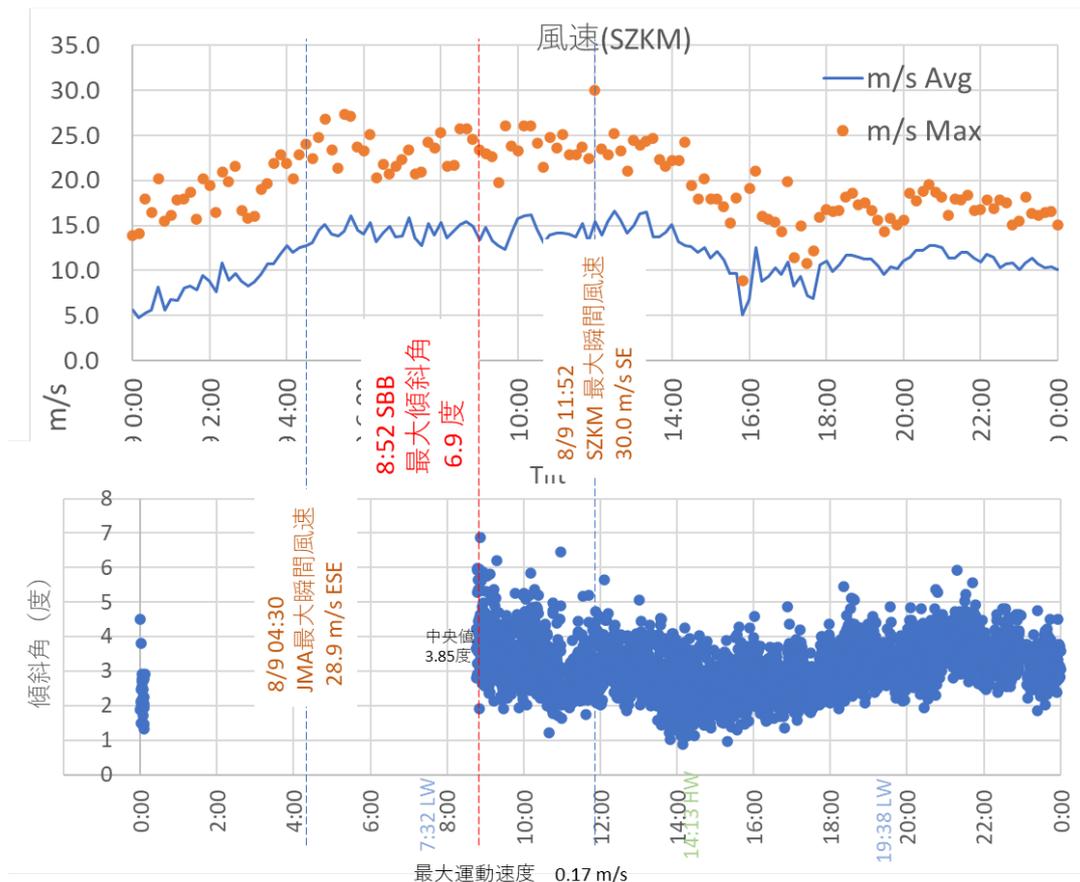


図 2-3 令和 5 年台風 6 号暴風圏通過時の本装置の傾斜角と風速

(2) - 2 - 4. 海底地盤変動観測装置観測値の妥当性の検討

以下では海底地盤変動観測装置で得られた傾斜補正後の測位点位置の妥当性について検討する。

海底地盤変動観測装置における GNSS 観測で得られた測位値には、対流圏でおきる伝播遅延（対流圏遅延）バイアスの他に、観測装置のアンカーの下で起きる圧密沈下量が本来の地盤変動量に上乗せされている。

対流圏遅延の影響は受信データの PPK 処理の際に補正されるが、補正の時に用いるモデルの扱いによって異なった大きさとなって現れる。海底地盤変動観測装置の PPK 解析では先述のようにパッケージ RTK-LIB の RTKPOST を用いており、RTKPOST では PPK 解析の際にオプション Saastamoinen とオプション ZTD を選択可能である。ここではその両者を比較することにした。オプション Saastamoinen はあらかじめ与えられた対流圏大気モデルを適用して対流圏補正值を決めるのに対して、オプション ZTD はアンテナごとに観測値をもとに対流圏補正值を決めている。両者を比較した結果を下図に示す。

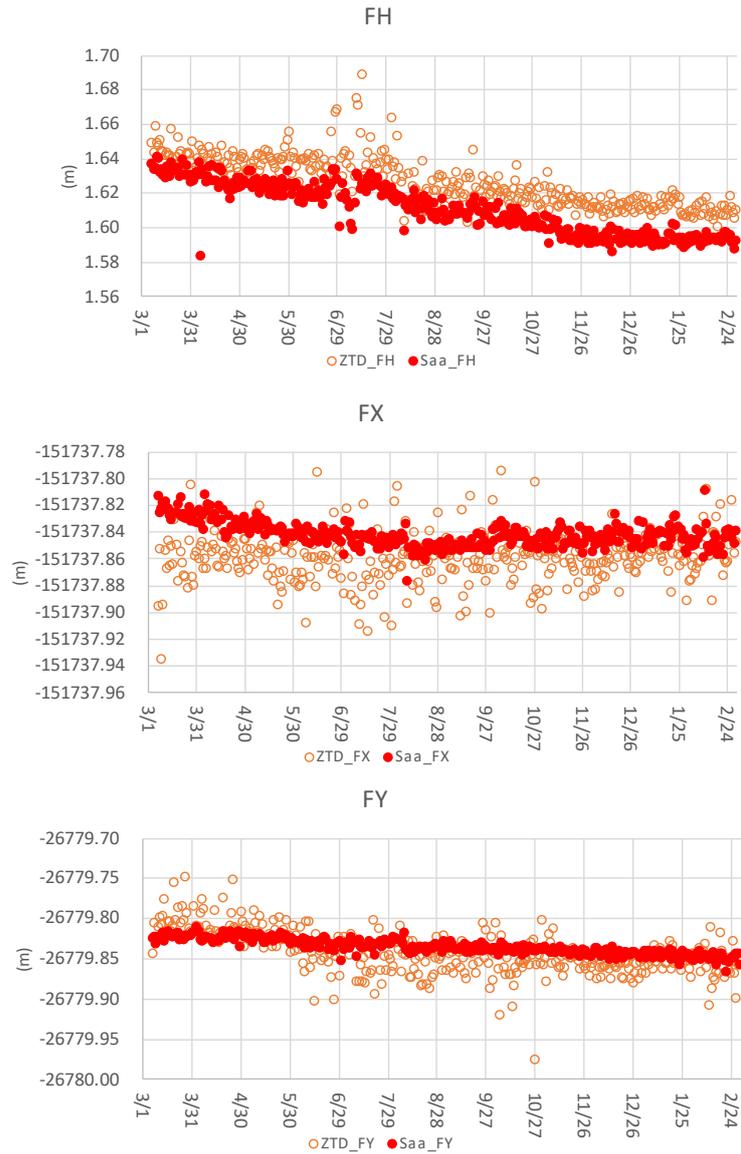


図 2 4 測位点 F の一日値における対流圏補正法の比較。白丸はオプション ZTD を用いた結果を、赤丸はオプション Saastamoinen を用いた結果を示す。

上図ではオプション Saastamoinen を用いた結果のほうが 1 日値のバラツキが少なくなることが示されている。2 つの対流圏補正オプションのそれぞれに対する 1 日分の標準偏差の平均値を下表に示す

表 7 対流圏補正オプションの統計量

RMSX	RMSY	RMSH
(m)	(m)	(m)

ZTD	0.157576	0.169899	0.027731
SAA	0.096703	0.097743	0.015437

海底地盤変動観測装置ではキネマティック解析の基準に 2.4 km 南西に離れた常設観測点 SNYM を使用しているうえ、本体頂上に設置されているアンテナの間隔は 1m 程度のスケールであることから、オプション Saastamoinen が良い結果を与えることは解析に用いる観測網のスケールが対流圏補正值の不均質の空間スケールより小さいことを示唆している。したがって本稿では特にことわらないかぎりオプション Saastamoinen を用いた結果を用いて議論を進めている。

次に設置以降の沈下量の評価と除去について述べる。海底地盤変動観測装置のアンカー直下の圧密による沈降は、観測装置周囲の GNSS 観測点の測位結果と比較することによって評価することができる。海底地盤変動観測装置とその周囲の GNSS 連続観測点の分布を下図に示す。海底地盤変動観測装置の近傍には 5 点の GNSS 連続観測点が陸上にあり、これらの測位値は全て桜島西部に位置する観測点 SVOG を基準としてスタティック法で基線解析が行われている。一方海底地盤変動観測装置は観測点 SNYM を基準点としたキネマティック法で観測値の解析が行われている。以降では海底地盤変動観測装置の設置が完了した 2023 年 3 月 7 日を起点とした上下変動に注目する



図 2 5 海底地盤変動観測装置とその周辺の GNSS 連続観測点

海底地盤変動観測装置 SBB の上下変動と、観測点 SNYM を基準とした周囲の陸上観測点の上下変動を 2023/3/7-2023/1/12 までの 311 日間にわたり比較したものを下図に示す

## 2023/3/7 – 1/12 (311 日間)

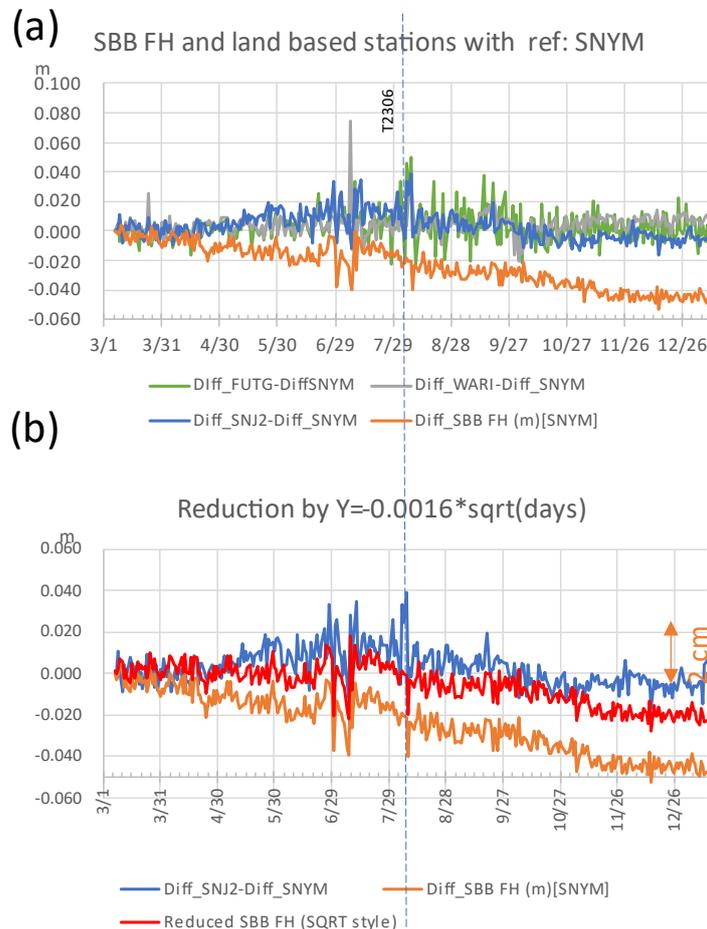


図 26 海底地盤変動観測装置 SBB とその周囲における上下変動の比較。令和 5 年 3 月 7 日を起点とした 311 日間の相対上下変位を示す。(a) FUTG, WARI, SNJ2 と海底地盤変動観測装置 SBB との比較、(b)トレンドを除去した海底地盤変動観測装置 SBB 上下変動と SNJ2 上下変動との比較。破線は令和 5 年台風 6 号の暴風圏通過時を示す。

上図(a)では 311 日間を通して陸上観測点における上下変動がほとんどフラットかわずかに右下がりであるのに対して、同じ期間の海底地盤変動観測装置 SBB のそれが顕著な右下がりである傾向が認められる。しかし両者の 2 ヶ月以短の短周期成分の動きは似ている。両者の動きが特に大きく異なるのは 3/7 から 8/26 までの設置後約 173 日間である。この 173 日間の海底地盤変動観測装置 SBB の測位値のトレンドに対してもっともよくフィットする平方根関数をきめて、トレンド除去を行った結果が(b)である。2023 年 3 月 7 日から 2024 年 1 月 12 日までの 311 日間のみかけ沈下量は約 4cm であるのに対して、平方根関数をトレンドとみなした場合の沈下量は約 3cm である。

上図(b)のトレンド除去でトレンドを表す関数として平方根関数を用いた理由を次に述べる。一般に砂質の海底に構造物を設置すると、構造物の下になった地層の圧密の進行により構造物が沈下を続けることが知られている。その際、土質力学の分野では沈下推移のトレンドは対数関数または平方根関数で近似されることが多い(安川他、2022)。海底地盤変動観測装置の測位値のトレンドに最もよくフィットする平方根関数と対数関数とを下図に示す。

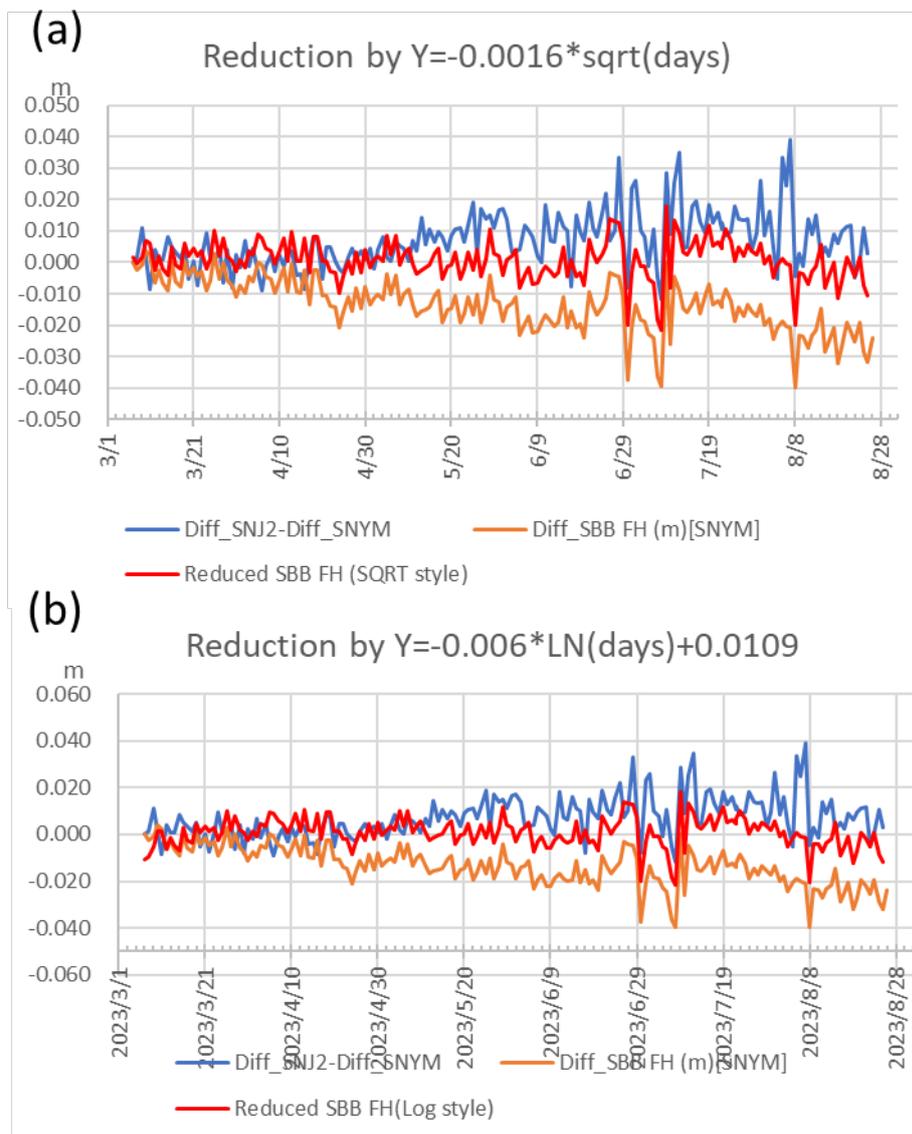


図 27 トrend除去の比較。青曲線は近傍のGNSS観測点SNJ2の測位結果、橙曲線は海底地盤変動観測装置SBBの測位結果、赤曲線はトレンド除去後の海底地盤変動観測装置SBBの測位結果を示す。(a)平方根関数 $y = 0.0016\sqrt{x}$ によるトレンド除去、(b)対数関数 $y = -0.006\ln x + 0.0109$ によるトレンド除去。

上図(a)は平方根関数  $y = 0.0016\sqrt{x}$  によるトレンド除去を、(b)は対数関数

$y = -0.006\ln x + 0.0109$  によるトレンド除去を示す。ここに  $x$  は 3/7 を 0 日とした経過日数,  $y$  はトレンド(m)とする。両者の設置後 1 ヶ月以内の SBB のトレンド除去後の様子を観察すると、(a)は SNJ2 と傾向が一致するのに対して、(b)は SNJ2 とは見かけ上異なる傾向を示す。この期間に桜島北東部で局所的な地盤変動がないと仮定すれば、海底地盤変動観測装置と SNJ2 とが同じ傾向を示す平方根関数(a)のほうが好ましいトレンド除去であるため、現段階では平方根関数(a)を暫定的なトレンドとして採用した。なお、1 ヶ月経過後は両者とも顕著な違いは見いだせない。

平方根関数によるトレンド除去が妥当なものであると仮定して図 2 6 b)を見ると、海底地盤変動観測装置で 2023 年 10 月末から 11 月中旬にかけての半月の間に 1 cm におよぶ急速な沈降が認められる。この現象は c. で述べた潮位差 FUTT-KURT (図 2 1) が 2.5 cm/月の速さで急速に減少したことと一致する時期に現れていることが注目される。

## (2) - 2 - 5. まとめ

### a. 令和 5 年度まとめ

令和 5 年度は海底地盤変動観測装置の観測運用環境の整備を行いつつ観測を継続した。今年度中には海底地盤変動観測装置では日平均値に影響を与えるような長期の欠測は発生していない。

さらに海底地盤変動観測装置から得られる測位データの自動回収処理システムを構築し、観測運用に供した。海底地盤変動観測装置は最大瞬間風速 30m/s の台風の暴風圏の通過を経験したが、場所の顕著な移動や観測計器の水没をはじめとする損傷はいずれも発生しなかった。

海底地盤変動観測装置の一年点検を実施し、所期の性能の維持されていることを確認した。通信途絶の原因を解明し対策を施して観測を継続している。

海底地盤変動観測装置そのものの沈下が進行中であり、設置直後に比べて沈下速度は時間の経過とともに小さくなっている。近傍の陸上観測データと比較すると海底地盤変動観測装置による観測データは設置後 5 ヶ月間で約 2 cm に達する沈下が観測されたが、想定された沈下量 (1m) よりは小さな値を示していた。台風期の後には沈下の速度が低下し、設置後 311 日目で設置当初からの沈下量は約 3cm に達した。令和 5 年度末において海底地盤変動観測装置における観測値は直ちに地盤変動を反映しているとは言い切れない。今後の観測の継続によって観測装置固有の沈下量、年周変化パターン等を明らかにすることによって、正味の地盤変動観測値が得られるようになることが期待される。

### b. 5 ヶ年まとめ

本プロジェクトでは令和元 (平成 3 1) 年度から令和 5 年度にかけて海底地盤変動観測装置の検討・設計・製作・設置を行い、最終年度には観測運用が実現した。

設置場所の検討では水路図等の資料から令和 2 年~4 年度にかけて 6 箇所の候補地を選び順次調査と交渉を実施した。地元漁業関係者の同意が得られかつ水深に関する条件が合う 1 箇所に候

補地を絞り込んだ。漁業関係者の同意が得られた候補地点周辺では潮流調査および底質調査を行った。潮流調査では冬季より夏季の方が潮流の強いことと夏季には上層と下層で潮流の向きが異なることが明らかにされた。底質調査では候補地点周辺は粘性土質砂で構成されていることが明らかにされ、その後の設計に反映された。また、令和4年度には水深の確認調査と水中写真の撮影も行った。これにより候補地点付近はなめらかな地形で水深30mであることが確認されたため、最終設置地点を決定して海底地盤変動観測装置の設置にのぞんだ。

設置環境に耐える観測装置の設計と製作では、水深30m以上に設置し年1センチメートル程度の上下変動の検出を目標に、鹿児島湾の自然環境に耐えるものとした。設計は令和元年度から令和3年度にかけて行われた。令和元年度に先行例であるイタリア国の業者に基本設計を提案させるとともに日本国内で基本設計を実施した。設計の傍らで姿勢検出および補正方式の検証実験を繰り返し行った。姿勢検出ではGNSSアンテナアレイによる方法が良い成績を示したので、これを採用することとし測位値の補正法の構築も行った。令和2年度は海底地盤変動観測装置の詳細設計を行ったが、先述の設計要件を満たすためにユニバーサルジョイントを採用し、姿勢検出にはGNSSアンテナアレイ方式を採用した構成とした。令和3年度には前年度の設計をさらに改良し、水深30mに対応した最終構成（全長約40m、アンカー重量19t、本体重量21t、浮力259.5kN、余剰浮力54.5kN）を決定した。令和4年度には前年度の改良設計に基づき海底地盤変動観測装置一式の建造を10ヶ月かけて行った。

先述の海底地盤変動観測装置を建造の後、令和4年度末に始良カルデラ内の海域（桜島北東岸から約2.2km）に設置した。船積みから設置完了まで2日間を要した。設置後半年間で1日以上にわたる欠測は発生せず順調に推移している。また先述の姿勢補正計算を組み込んだデータ処理システムの構築も行い、海底地盤変動装置からのデータ回収および集計処理が自動的に行われている。近傍の陸上観測データと比較すると海底地盤変動観測装置による観測データは設置後5ヶ月間で約2cmに達する沈下が観測されたが、想定された沈下量（1m）よりは小さな値を示していた。台風期の後には沈下の速度が低下し、設置後311日目で設置当初からの沈下量は約3cmに達した。観測装置は設置後1回の台風強風圏と1回の台風暴風圏を経験している。台風期の前後でアンカー底部の水中撮影を行ったが、台風期を経験した後にはアンカー隅部で幅0.3mほどの洗掘の発生が確認された。

今後の課題：

今後複数年にわたり観測データ取得を継続し陸上観測データとの比較を行い正味の地盤変動の検討を行う必要がある。具体的には季節変動要素の検討と補正方法の確立と、底質の圧密に伴う局所沈降量の補正值の確立である。

（付録）ユニバーサルジョイントの摩耗特性

本装置の最大の特徴は摩耗の少ないユニバーサルジョイントを開発してアンカーと本体との結合に採用したことである。波浪による摺動によるシャックルの摩耗は柱の有効長の変化として垂直方向の測位結果に直接影響する。外国における既往例(Iannacone et al., 2018; Martino et al.

2016)ではアンカーと柱の結合にシャックルによる結合が用いられているが、一般にこの方式は年1 cm程度の摩耗量があることが知られている。

建造に先だち測位精度に大きく影響するユニバーサルジョイントの軸受けの摩耗特性の調査が行われた。摩耗特性の調査は表8の摺動条件下で行われ、摺動面がなめらかになじんだ状態の60時間後および120時間後の内径値(図28に示す6ヶ所におけるX1-X2間およびY1-Y2間)から5年後(43800時間後)の値として0.368 mmを推定した(図29)。年間摩耗量推定値は0.0736 mmであり、年間1 cmの地盤変動の計測に十分な精度であることが確認されている。

表8 摺動試験条件

項目	内容
軸受の材質	樹脂
軸受の寸法	外径75 mm × 内径60 mm × 長さ50 mm
軸の材質	SM490A
軸の寸法	軸径φ60 mm × 長さ434 mm
試験時間	120 Hr
試験環境	人工海水中(20℃)
面圧	2.2 N/mm <sup>2</sup>

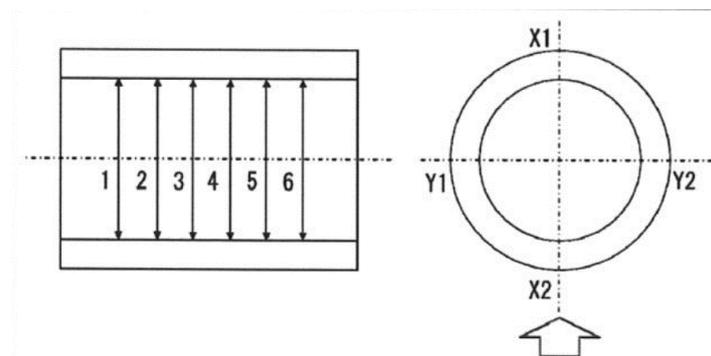


図28. 内径測定箇所

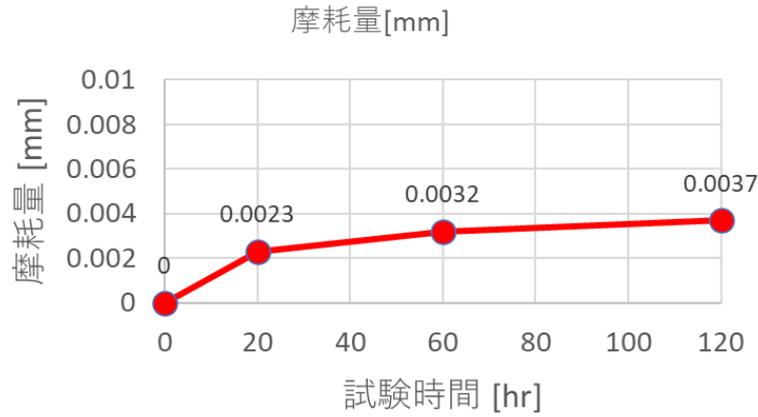


図 2 9. 摩耗量の推移

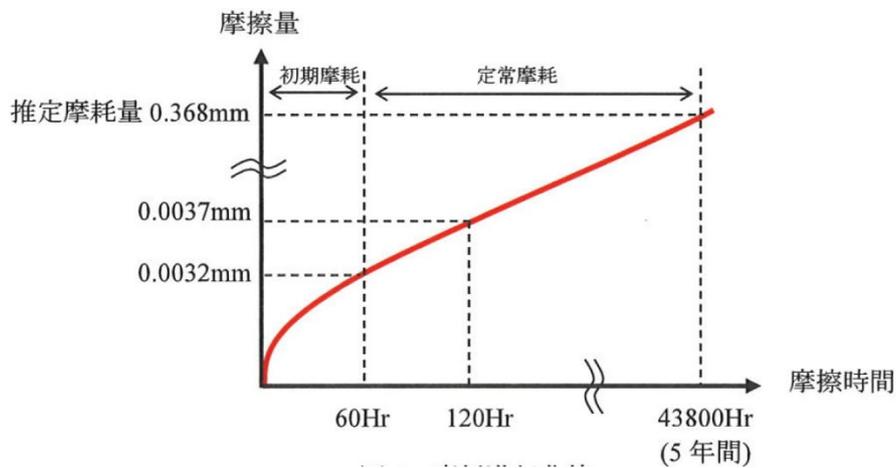


図 2 9. 推定摩耗進行曲線

参考文献

江頭庸夫・高山鐵朗・山本圭吾・Muhamad Hendrasto・味喜大介・園田忠臣・木股文昭・宮島力雄・松島健・内田和也・八木原寛・王彦賓・小林和典（1998a）桜島火山周辺における水準測量結果について—1991年12月～1996年10月—，第9回桜島火山の集中総合観測，15-29.

江頭庸夫・高山鐵朗・園田忠惟・山本圭吾（1998b）桜島火山周辺における光波測量結果—1992年1月～1996年12月—，第9回桜島火山の集中総合観測，31-37.

Fujita, M., Ishikawa, T., Mochizuki, M., Sato, M., Toyama, S., Katayama, M., Kawai, K., Matsumoto, Y., Yabuki, T., Asada, A., and Oscar L. Columbo (2006) GPS/Acoustic

- seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application, *Earth Planets Space*, 58, 265-275.
- 原子力規制庁 (2019) 平成30年度原子力規制庁請負成果報告書 海底地殻変動観測に係る施設  
の設計・施工検討業務, 677pp.
- Hotta, K., Iguchi, M., Ohkura, T. and Yamamoto, K. (2016) Multiple-pressure-source model for  
ground inflation during the period of high explosivity at Sakurajima volcano, Japan –  
Combination analysis of continuous GNSS, tilt and strain data –, *Jour. Volcanol.  
Geotherm. Res.*, 310, 12-25.
- Iannaccone, G., Guardato, S., Donnarumma, G. P., Martino, P., D., Dolce, M., Macedonio, G.,  
Chierici, F., and Beranzoli, L. (2018) Measurement of Seafloor Deformation in the  
Marine Sector of the Campi Flegrei Caldera (Italy), *Journal of Geophysical Research:  
Solid Earth*, 123, 66-83, <https://doi.org/10.1002/2017JB014852>.
- 京都大学防災研究所 (2023) 令和4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
- 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 (2021) 令和2年度原子力規制庁委託研究成果報告書 原子力施設等防災対  
策等委託費 (火山性地殻変動と地下構造及びマグマ活動に関する研究) 事業、京都大学  
防災研究所、令和3年3月。
- 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、京都大  
学防災研究所、令和2年3月。
- 国土地理院 (2000) 50m メッシュ数値地図 Digital Map 50m Grid (Elevation) NIPPON-III
- Martino, P. D., Guardato, S., Tammaro, U., Vassallo, M., and Iannaccone, G. (2014) A first  
GPS measurement of vertical seafloor displacement in the Campi Flegrei caldera  
(Italy), *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 276, 145-151.
- Mogi, K. (1958) Relation between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the  
ground surface around them, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, 38, 99-134.
- 財団法人日本水路協会 (2002) 海の基本図、財団法人日本水路協会 海洋情報研究センター
- Spieß, F., N. (1985) Suboceanic geodetic measurements, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*,  
23, 502-510.
- Takasu, T. (2013) RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning,  
<http://www.rtklib.com/>
- 筒井智樹・味喜大介・井口正人 (2022) ピラー直結形海底地盤変動観測装置に関する測位実験、  
京都大学防災研年報、第65号B, 48 - 66.

- Xie S, Law J, Russel R, Dixon TH, Lambre C, Malservisi R., Rodgers M., Iannaccone G, Guardato S, Naar DF, Calore D, Fratirelli N., Brizzolara J, Gray JW, Hommeyer M, and Chen J (2019) Seafloor Geodesy in Shallow Water with GPS on an Anchored Spar Buoy, *Journal of Geophysical Research Solid Earth* 124, 12116-12140.
- Yamamoto, K., Sonoda, T., Takayama, T., Ichikawa, N., Ohkura, T., Yoshikawa, S., Inoue, H., Matsushima, T., Uchida, K., Nakamoto, M. (2013) Vertical ground deformation associated with the volcanic activity of Sakurajima volcano, Japan during 1996 - 2010 as revealed by repeated precise leveling surveys, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, 58, 137-151.
- 安川郁夫・今西清志・立石義孝 (2022) 絵解き土質力学 改訂3版 栗津精蔵 監修 オーム社、243pp.

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

#### (3) - 1 はじめに

本委託研究事業においては、粘弾性地殻変動モデルを用いて、始良カルデラにおける大正噴火以降の測地データから、地下のマグマ活動を捉える科学的知見の整備をおこなってきた。本章においては、まず、これまでの研究概要について述べ、そのあとに、2023年度研究でおこなった粘弾性地表面解析ツール作成の動機について述べる。

#### a. 2019年度研究：噴火時の変動源瞬時収縮に対する粘弾性地殻の応答の振る舞い

扁球（短軸を回転軸とした回転楕円体）変動源の噴火時の瞬時収縮に対する粘弾性地殻の応答の振る舞いを検証した。その検証においては、噴火前後でマグマが一定の割合で連続的に変動源に供給されている、つまり変動源が一定の割合で膨張を続けていると仮定した。

マグマ排出による変動源収縮に対する粘弾性応答が、噴火後の地殻変動の重要な駆動力となることがわかった。また、その駆動力の程度は、噴火前のマグマ供給に対してどの程度の粘弾性緩和が生じるかや、噴火時の変動源収縮量に依存することもわかった。もし、噴火前に粘弾性地殻の応力が平衡状態にある場合（噴火前の変動源膨張に対する粘弾性緩和がすべて完了している場合）、噴火時に沈降した地表面は、噴火時の変動源収縮に対する粘弾性応答により、噴火直前の高さにまで回復することができる。しかし、噴火前の変動源膨張に対する粘弾性緩和がすべて完了していない場合、噴火時の変動源収縮に対する粘弾性応答だけで、地表面を噴火直前の高さに回復させることはできない。後者が実際のケースに相当するなら、噴火後に地表面が噴火直前の高さに回復するのは、変動源の体積が噴火直前の体積に回復するよりも常に遅れてくることになるが、これは、変動源膨張に対する粘弾性応答が隆起を減じさせるからである。

このような粘弾性応答の振る舞いを、始良カルデラにおける測地観測に適用した結果、次のことがわかった：(1) 扁球変動源の赤道面の深さは $\sim 11$  kmで、その赤道半径は $\sim 2$  km、(2) 扁球変動源へのマグマ供給が1914年噴火の約50年前から $\sim 0.009$  km<sup>3</sup>/年の割合でおこなわれていた、(3) 厚さ11 kmの弾性層の下の粘弾性地殻の有効粘性率は $\sim 5 \times 10^{18}$  Pa s、(4) 1914年噴火時に変動源が $\sim 0.4$  km<sup>3</sup>（噴出体積の $\sim 0.25$ 倍）収縮。しかし、1975年以降の測地データ、特に地表面沈降とその後の回復、をより良く説明するためには、変動源の膨張率の時間変化を導入する必要があることがわかった。

以上の研究成果は、査読付き国際誌論文（Yamasaki et al., 2020）により公表済である。

#### b. 2020年度研究：時間依存性を持つ変動源体積変化率に対する粘弾性地殻の応答の振る舞い

2019年度研究でその導入の必要性が明らかにされた、1914年噴火以降の始良カルデラ下の変動源体積変化率の時間変化に対する粘弾性地殻の応答の振る舞いを検証した。用いたモデルにおける変動源の深さやサイズは Yamasaki et al. (2020)において制約されたそれらの値を固定して用いた。

変動源の膨張に対して地表面は隆起するが、それに対する粘弾性緩和により、その隆起量は弾性モデルの場合よりも小さくなる。一定の速度で膨張する変動源に対しては、粘弾性緩和による隆起量の減少はあるにしても、地表面は隆起を続ける。しかし、ひとたび体積増加率が減少すると、変動源の膨張は継続するが、粘弾性緩和により地表面は沈降に転じる可能性がある。

このような粘弾性応答の特徴に沿って、1975–1997年の期間における始良カルデラの沈降を説明できるかを検証した。1975–1997年の地表面沈降を粘弾性緩和で説明するには、地殻の粘性率が $\sim 5 \times 10^{18} \text{Pa s}$ 程度である必要があるが、地表面沈降の空間的波長が観測量のそれと不調和となる。地殻の粘性率が $\sim 10^{19} \text{Pa s}$ 程度以上の場合、地表面沈降は変動源の収縮により説明することになるが、その説明により、地表面沈降の空間的波長も調和的になる。しかし、1914年噴火直後の変動からは、厚さ11 kmの弾性層の下の粘弾性地殻の粘性率が $\sim 5 \times 10^{18} \text{Pa s}$ 程度であると制約され、噴火後の変動の初期と後期で異なる粘性率が要請されることがわかった。

また、変動源の膨張・収縮速度と、観測された体積噴火速度 (Iguchi et al., 2019) を比較すると、1914年噴火以降の変動源の体積増加が $\sim 0.4 \text{ km}^3$ 以上の場合にのみ、顕著な噴火が起こることも明らかにされ、この研究成果により、マグマ供給量と噴火活動の観測結果と関係づけて噴火ダイナミクスを議論する機会を与えられた。

以上の研究成果は、査読付き国際誌論文 (Yamasaki et al., 2022) により公表済である。

#### c. 2021–2022年度研究：粘性率の空間不均一性を導入した粘弾性地殻変動モデルの振る舞い

地殻内粘性率の空間的不均一性は物理探査画像から推測することができるが、その不均一性により、始良カルデラで見出されたような複雑な挙動を示す火山性地殻変動の特徴がより良く説明されるかもしれない。最近の地震学的研究成果によって始良カルデラ下に低速度領域が見出されており (Tameguri et al., 2022)、それが低粘性領域 (LVZ) としての役割を果たしているかもしれないことが示唆されている。そこで、それに相当する LVZ を三次元粘弾性有限要素モデルに導入して、LVZ モデルの挙動を一様粘性 (UNV) モデルの挙動と比較して定量化すると、ある LVZ 構造に対して、変動源の瞬時収縮にตอบสนองする LVZ モデルの変位を最もよく再現する見かけの UNV モデルは、変動源の緩やかな膨張に対する LVZ モデルの変位を最もよく再現する見かけの UNV モデルより、低い粘性率を持つことがわかった。

このような LVZ モデルの挙動により、始良カルデラでの測地観測もうまく説明されることが示唆されるが、実際、地球物理学的にイメージングされた低速度異常 (Tameguri et al., 2022) と同程度の空間的広がりを持つ LVZ がある場合、1914年の噴火後のどの段階においても、測地データを非常に良く説明できることを確認することができた。この研究により、火山性地殻変動をよりよく理解するためには、測地データと地球物理学的データを統合する学際的研究が必要であることが強調され、また、マグマの存在を変動源としてだけでなく、低粘性領域として捉えていける可能性が示された。

以上の研究成果は、査読付き国際誌論文 (Yamasaki et al., 2023) により公表済である。

#### d. 2023年度研究：粘弾性地表面変位解析ツールの作成の動機

本規制庁委託研究事業、およびそれ以前の2015-2018年度の規制庁委託研究事業において、火山性地殻変動解析に粘弾性の効果を導入し、火山地域での測地データの解釈に新たな知見を吹き込んできた。地殻の粘弾性は、地震性や火山性に限らず、様々な時空間スケールでの地殻変動にモデルに導入され、それに沿って様々な地殻変動現象が理解されてきた(e.g. Savage and Prescott, 1978; Stephenson, 1984; Nakada and Lambeck, 1989; Mound and Mitrova, 1998; Jonson and Segall, 2004; Bürgmann and Dresen, 2008)。特に火山地域においては、マグマの存在により、地殻の粘性率は、局所的にも、有意に減じられていると考えられるので、地殻の粘弾性は火山性地殻変動に大きな影響を与えているはずである。これまでの規制庁委託研究事業等により、その粘弾性の基本的な効果を明らかにすることができた(Yamasaki et al., 2018; Yamasaki and Kobayashi, 2018; Yamasaki et al., 2020, 2021, 2022, 2023)。今後、多様な事例研究を積み重ねていくことで、粘弾性地殻変動モデルの改良をすすめ、予測モデルの精度を高めていかなければならない。

上述のように、火山下の粘弾性構造は非常に複雑で、その複雑性を反映した地表面変位も複雑で、その振る舞いから地下のマグマ活動を推論するのも難しい作業になると思われる。規制庁委託事業においては、地球物理学的研究成果等、多項目観測により描かれる地下構造に反映される、粘性構造の不均一性の効果を導入することで、測地データをより良く説明できるとの結論に至ったが、それはある特定のカルデラ火山における事例研究にすぎない。実際、地下構造はカルデラ火山毎で異なるだろうし、それを反映した地表面変動もそれぞれ異なった特徴を持つかもしれない。多岐にわたる地下構造を反映させた粘弾性地殻変動モデルを構築するのは難しい。しかし、簡単なモデル、例えば粘弾性地殻の粘性率が時空間的に一様であるようなモデル、を用いて測地観測を解析することで、その一様粘性率モデルの予測量と観測量の違いの特徴を明らかにすることで、マグマの存在に影響を受けた地下構造を推測できるかもしれない。その一つの指針をこれまでの委託研究事業で明らかにしてきたわけである。本年度研究で作成した粘弾性地表面変位ツールは、その使用の容易さゆえに、簡単なモデルを用いた検証をおこなう絶好の機会を与えるものである。

### (3) - 2 粘弾性地表面変位解析ツール

地殻内でのシル状変動源の膨張：収縮に対する線形マックスウェル粘弾性応答、特に地表面の水平・鉛直変位を計算する。その基本方針は、たくさんの計算結果を用意しておき、それらの線形補間により、求めたいモデルの振る舞いを得ることである（したがって、本計算ツールの正確さは、既存の計算結果からの線形補間により解を導出している以上のものではないことに留意する必要がある）。

#### (3) - 2 - 1 システム要件と計算の実行

LinuxOS であること、また、gfortran 等の FORTRAN のコンパイラ、そして作図用の Generic Mapping Tools (GMT; Wessel et al., 2013) のインストールが必要となる。本ツールを作成した OS である Ubuntu の

場合、GMT および gfortran のインストールコマンドはそれぞれ以下の通りである：

(GMT のインストール)

```
sudo apt-get install gmt gmt-dcw gmt-gshhg
```

(gfortran のインストール)

```
sudo apt install gfortran
```

他 OS での使用についての検証はおこなっていない。ソースコードにおいては GMT スクリプトの作成や実行をおこなう構成になっているので、他 OS での使用においてはソースコードの改良を要するかもしれない。しかし MacOS の場合、GMT のインストールをおこなえばそのまま使えるかもしれない。

提出したポータブル HDD (図 1) の vedef フォルダをその中身ごと PC のディスクにコピーする。コピーした vedef フォルダ内に移動して、jobvedef.csh を実行すると、src フォルダ内の計算実行ファイルがコピーされて、自動的に実行される。実行後直ちにインプットファイル名の入力求められる。インプットファイル名を入力すると、計算が始まり、結果の出力から作図まで全自動でおこなわれる。

なお vedef フォルダの総容量は 1.55TB であるので、コピー先のディスクには十分な空き容量が必要である。

(a)



(b)



図 1 粘弾性地表面変位解析ツール。a)納品物 (HDD)、b)納品物(下)を用いたハードウェアシステム構成の例

### (3) - 2 - 2 粘弾性モデルの説明

モデル領域は、 $z$  方向の鉛直深さ 100 km、水平幅は、 $x, y$  方向のともに 192 km の大きさを持つ (図 1)。座標原点はモデル上面の中心に置く。右手座標系に従い、 $z$  座標、つまり深さは下向きに増えるとし、それにより  $z$  方向の正・負の変位はそれぞれ沈降・隆起と記述されるが、本ツールでは、

便宜上、 $z$  方向に正の変位を隆起、負の変位を沈降とする。 $x$  方向は東向き、 $y$  方向は北向きの変位である。計算量を減らすために、 $x \geq 0$  kmのみを計算領域とし、 $x < 0$  kmにおける解は、 $x \geq 0$  kmでの解をコピーして得ることとする（ただし、 $x, y$  方向の変位は座標の象限毎で正負の適応を施す必要がある）。そのことの妥当性は、本ツールで仮定する、粘弾性構造、変動源構造が  $x = 0$  の  $y$ - $z$  面に対して対称であることで保証される。

力学的境界条件についてであるが、モデル上面( $z = 0$  km)のトラクションはどの方向にも 0 として、その他の境界面  $x = 0$  km、 $y = \pm 96$  km、 $z = 100$  kmには法線変位と接線トラクションを 0 とする滑り境界条件を与えている。重力の効果は無視している。

モデル最上部の厚さ  $h$  の層には、非常に大きな粘性率（粘弾性層の粘性率の  $10^{20}$  倍）を与え、弾性層として振る舞うようにしている。弾性層の下の粘弾性層は時空間的に一様な粘性率  $\eta$  を与える。弾性定数であるポアソン比  $\nu = 0.25$ 、剛性率は  $\mu$  で、ヤング率  $E$  は  $E = 2(1 + \nu)\mu = 2.5\mu$  とし、これらの値はモデル領域全体で一定とする。時間は緩和時間 ( $\eta/\mu$ ) でスケーリングされる。

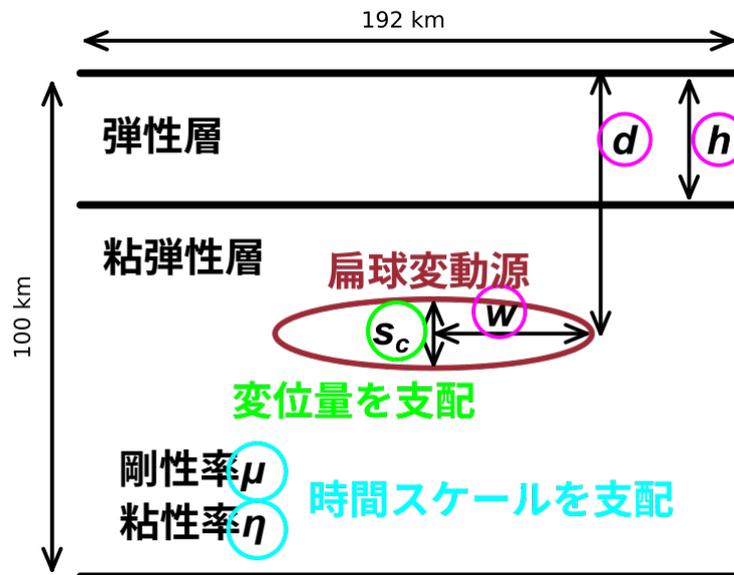


図2 粘弾性地表面解析ツールで用いた粘弾性モデルの2次元断面図。

シル状変動源の形状は赤道半径  $w$  が極半径  $s_c/2$  より長い回転楕円体（扁球）で近似する（図2）。その変動源の厚さは  $s_c [1 - (x^2 + y^2)/w^2]^{1/2}$  と書ける。地表面変位量はこの  $s_c$  でスケーリングされる。変動源の深さ  $d$  は赤道面の深さで定義する。変動源の膨張・収縮は Melosh and Raefsky (1981)により開発された Split Node 法を用いて与えが、その方法においては、必要となるシルの開口を得るのに必要とされる等価荷重を相当節点に与えることになる。本ツールでは初期体積は 0 としている。

### (3) - 2 - 3. 計算結果データベース

並列化された3次元有限要素コード、OREGANO\_VE (e.g., Yamasaki and Houseman, 2012ab; Yamasaki

et al., 2014; Yamasaki and Houseman, 2015; Yamasaki et al., 2018; Yamasaki and Kobayashi, 2018; Yamasaki et al., 2020; 2021; 2022; 2023)、を使って、計算結果データベースを作成した。本計算コードの妥当性は Yamasaki et al. (2018)において、Fukahata and Matsu'ura (2006)の解析解との比較により、確認済である。線形補間に用いる計算結果は、弾性層の厚さ  $h$  は 1 km から 20 km まで 1 km ずつ、変動源（その赤道面）の深さ  $d$  は 1 km から 20 km まで 1 km ずつ、変動源の赤道半径  $w$  は 1 km から 20 km まで 1 km ずつとして、これら 3 つのモデルパラメータの組み合わせ全数は  $20 \times 20 \times 20 = 8,000$  である。後述(3. 2. 5)の通り、それぞれのモデルで 2 つの異なる変動源の振る舞いに対する粘弾性応答を用意する必要があるので、計算結果データベースの全モデル数は 16,000 となる。計算結果データベースはバイナリーファイルとして FD.bin に格納されている。

### (3) - 2 - 4. 線形補間

データベースにある計算結果の場合は、それを用いるが、データベースにない計算結果は、計算結果データベースの結果を線形補間する。求めたいモデルの組み合わせ、 $h, d, w$  の結果は、それぞれのパラメータ値の前後の計算結果データベースにある値、 $h_1-h_2, d_1-d_2, w_1-w_2$ 、を用いて 3 次元線形補間により解を得る (図 3) :

$$u = \frac{A}{(h_2-h_1)(d_2-d_1)(w_2-w_1)} \quad (1)$$

ここで、

$$\begin{aligned} A = & (h_2 - h)(d_2 - d)(w_2 - w)u_{111} + (h_2 - h)(d - d_1)(w_2 - w)u_{121} \\ & + (h - h_1)(d - d_1)(w_2 - w)u_{221} + (h - h_1)(d_2 - d)(w_2 - w)u_{211} \\ & + (h - h_1)(d_2 - d)(w - w_1)u_{212} + (h - h_1)(d - d_1)(w - w_1)u_{222} \\ & + (h_2 - h)(d - d_1)(w - w_1)u_{122} + (h_2 - h)(d_2 - d)(w - w_1)u_{112} \end{aligned} \quad (2)$$

である。

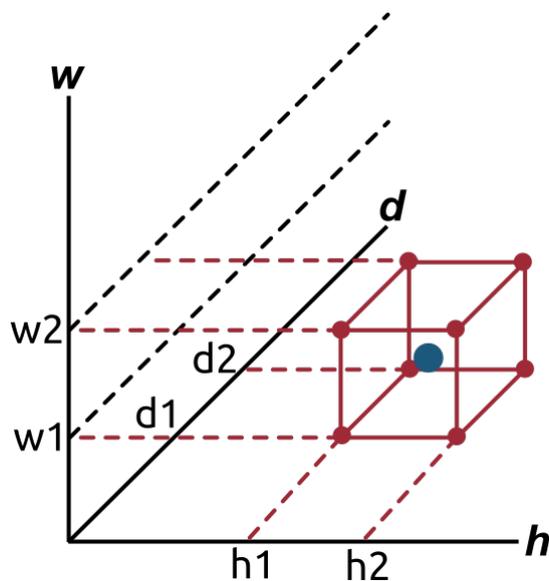


図3 粘弾性地表面解析ツールで用いた3次元線形補間の概念図

地形の効果は、Williams and Wadge (1998)の簡単な方法に従って導入した。その方法では、標高が  $\Delta h$  の地点の変位を得るためには、 $h = h + \Delta h$ ,  $d = d + \Delta d$  と設定し、それら前後の  $h_1-h_2$ ,  $d_1-d_2$  を用いて3次元線形補間をおこなうことになる。つまり、地形効果を考慮しない場合、 $h, d, h_1-h_2, d_1-d_2$  は、地表面地点によらず一定であるが、地形効果を考慮する場合、 $h, d, h_1-h_2, d_1-d_2$  は地点毎に異なる値になる。

(3) - 2 - 5. 重ね合わせ原理

火山性地殻変動、特にその粘弾性応答の振る舞いは複雑で、数多くの噴火や時間毎に異なるマグマ供給率に対する粘弾性応答の総和として記述されなければならない。しかし、複雑な応答も、本ツールで仮定しているような線形レオロジーのみを考える場合、次の3つの変動源の振る舞いに対する粘弾性応答の重ね合わせで記述することができる(Yamasaki et al., 2022) : (M1) 一定速度で膨張、(M2) 一定速度で収縮、(M3) 噴火時の瞬時収縮 (図4)。しかし、M1 に-1 をかけると M2 が得られるので、準備しなければならない振る舞いは実質的には M1 と M3 だけとなる。

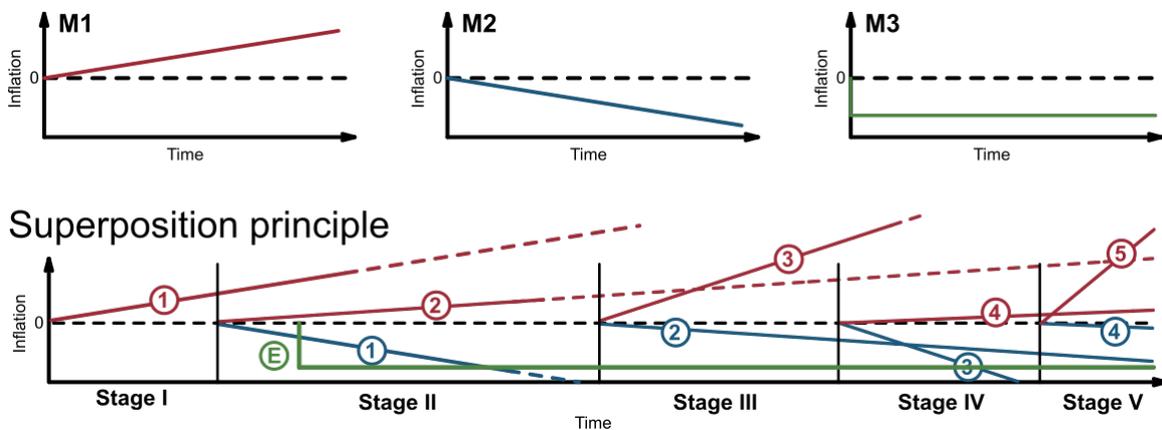


図4 3つの変動源の振る舞い；(M1)一定速度で膨張、(M2)一定速度で収縮、(M3)噴火時の瞬時収縮と、それらの重ね合わせ原理の概念図。

変動源の膨張速度が時間  $t = t_c$  で変化する場合、まずは、S1モードの変位量にS2モードの変位量を  $t = t_c$  以降の時間で足し合わせるが、そのS2モードの勾配はS1モードと同じ絶対量でなければならない。そして、 $t = t_c$  以降の時間において新たな勾配をもつS1モードの変位量を足し合わせればよい。最初のS2モードの変位量の足し合わせで、時間  $t = t_c$  以降は、変動源の膨張が止まっていることに対する粘弾性変位を得ることができる。同じ手続きを繰り返せば、いくつもの異なる速度での変動源の消長に対する粘弾性応答を計算することができる。

時間  $t = t_c$  で生じる噴火に対する粘弾性応答の足し合わせは、 $t = t_c$  以降の時間にS3モードに対する粘弾性変位を足し合わせてやれば良いだけである。正しい時間、変動源収縮量を与えてやれば、いくらでも噴火イベントに対する粘弾性変位を足し合わせても良い。

### (3) - 2 - 6. 入力ファイル (config.in) の説明

入力ファイル名は初期設定では”config.in”としている。しかしユーザーの好みに合わせて自由にファイル名を変更できる。計算実行の失敗のほとんどは入力ファイルの記載事項の失敗が原因である。注意深く入力ファイルを準備する必要がある。緯度・経度で入力される地点間の距離はヒュベニの公式を用いて計算している。

入力ファイルの内容の説明を以下におこなう。

#### a. ジョブ名

ジョブ名を適当に決めて入力する。例えば、”sakurajima”と入力すると、その名前のフォルダが自動的に作成されて、そのフォルダ内に計算結果や自動的に作成される図が格納される。入力情報は、(ジョブ名) .out という名前のファイルに記載されて保存される。

#### b. 変動源の中心座標

変動源の中心座標を以下の様式で入力する。

(緯度) (スペース) (経度)

例：

35.7888 137.8063

#### c. 弾性層の厚さ $h$

計算したいモデルの弾性層の厚さ  $h$  を入力する。単位は km。実数。

例：

10.0

d. 変動源の深さ  $d$

計算したいモデルの変動源の深さ  $d$  を入力する。単位は km。実数。

例：

10.0

e. 変動源の赤道半径  $w$

計算したいモデルの変動源の赤道半径  $w$  を入力する。単位は km。実数。

例：

5.0

f. 弾性定数：剛性率  $\mu$

計算したいモデルの剛性率  $\mu$  を入力する。単位は Pa。実数。

例：

3.0E10

ここで、"E10"は  $10^{10}$  を意味する。 $10^9$  の場合は"E09"と書けば良い。また、その"E"の前に書かれた実数をかけ合わせたのが剛性率となる。

g. 粘性率  $\eta$

計算したいモデルの粘弾性層の粘性率  $\eta$  を入力する。単位は Pa s。実数

例：

1.0E18

f. で入力した剛性率と合わせて緩和時間 ( $= \eta/\mu$ ) が計算される。

h. 計算したい地殻変動継続時間

計算したい地殻変動継続時間を入力する。単位は年。実数。

例：

100.0

出力の時間ステップはここに入力された継続時間の 1000 分の 1。

i. 地形効果の有無

地形効果を考慮したい場合は"yes", "YES", "Yes"のいずれかを入力。考慮しない場合は、"no", "NO", "No"のいずれかを入力。

j. 噴火（変動源の瞬時収縮）の情報

噴火（変動源の瞬時収縮）が生じる回数を入力。整数。その下にそれぞれの噴火の時間と収縮体積量を入力。それぞれの単位は、年、 $\text{km}^3$ 。ともに実数。噴火の回数はいくつでも良い。

例：

2

25.5 1.5

50.0 1.0

この場合、時間 25.5 年と 50.0 年のそれぞれで噴火が生じて、それぞれの噴火時の変動源の収縮体積量は  $1.5\text{km}^3$ ,  $1.0\text{km}^3$  となる。

#### k. 変動源の継続的膨張・収縮の情報

期間毎に一定と仮定した変動源の継続的膨張・収縮率を入力する。期間の数を入力。整数。その下に、それぞれの期間の始まりの時間と終わりの時間、体積変化量を入力。実数。単位は時間については年、体積量  $\text{km}^3$ 。入力する期間の数はいくつでも良い。

例：

3

0.0 10.0 3.0

20.0 50.0 2.0

70.0 90.0 -1.0

この場合、期間 0-10.0 年、20.0-50.0 年、70.0-90.0 年の 3 期間のそれぞれにおける変動源体積変化率が  $3.0/(10.0-0)$ ,  $2.0/(50.0-20.0)$ ,  $-1.0/(90.0-70.0)$   $\text{km}^3$  となる。欠落期間となる、10.0-20.0 年、50.0-70.0 年、90.0-100.0 年の期間は変動源の体積変化がないもの計算される；ここで 100.0 年は、3. 2. 6. 8 で入力する計算したい地殻変動継続時間に相当する。

#### m. 変位の時間変化を出力する地点の座標

変位の時間変化を出力する地点数を整数で入力する。その下にそれぞれの地点の緯度、経度を入力する。地点数はいくつでも良い。

例：

5

35.7888 137.8063

35.8388 137.8563

35.8388 137.7563

35.7388 137.7563

35.7388 137.8563

#### n. 全地表面変位を出力する時間

全地表面変位を出力する時間の数を整数で入力する。その下にそれぞれの時間を実数で入力、単位は年。入力数はいくつでも良い。

例：

3  
50.0  
75.5  
100.0

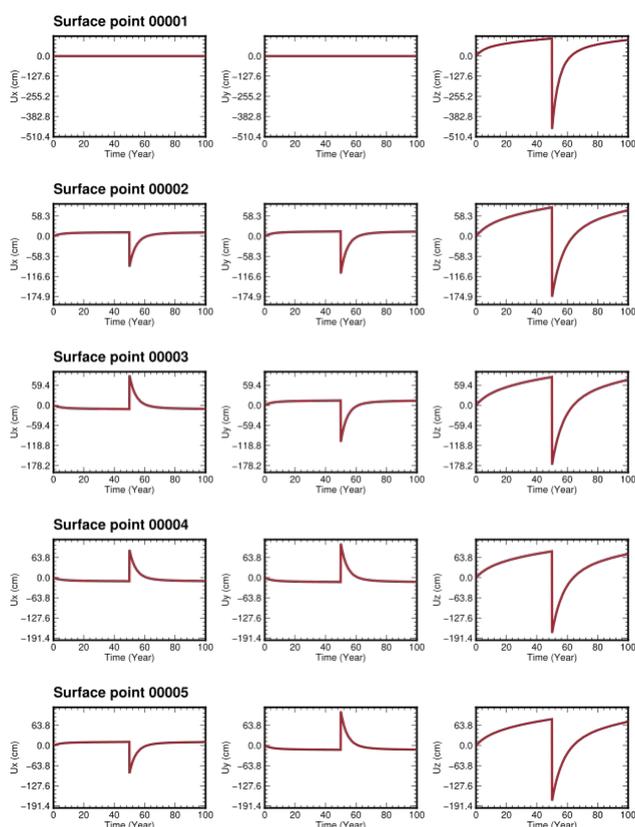


図5 各地点の時間変化を示す自動出力図の例。

### (3) - 2 - 7. 出力ファイルと作図

本ツールでの出力ファイルは、m. と n. の入力に沿ったものになる。

m. の入力に沿った出力ファイル名は、

tseries\_pxxxxx.out

となり、p 以下の xxxxx には、入力した地点座標の順番に従って番号がつけられる。そのファイルの内容は、左側から順番に、時間、x 方向の変位、y 方向の変位、z 方向の変位となる。上述のとおり、x 方向は東向き、y 方向は北向き、z 方向は上向きの変位である。変位の単位は cm。

n. の入力に沿った出力ファイル名は、

fullout\_txxxxx.out

となり、xxxxx には、入力した全出力時間の順番に従って番号がつけられる。そのファイルの内容は、左側から  $x$  座標、 $y$  座標、 $x$  方向の変位、 $y$  方向の変位、 $z$  方向の変位となっている。変位の単位は cm。

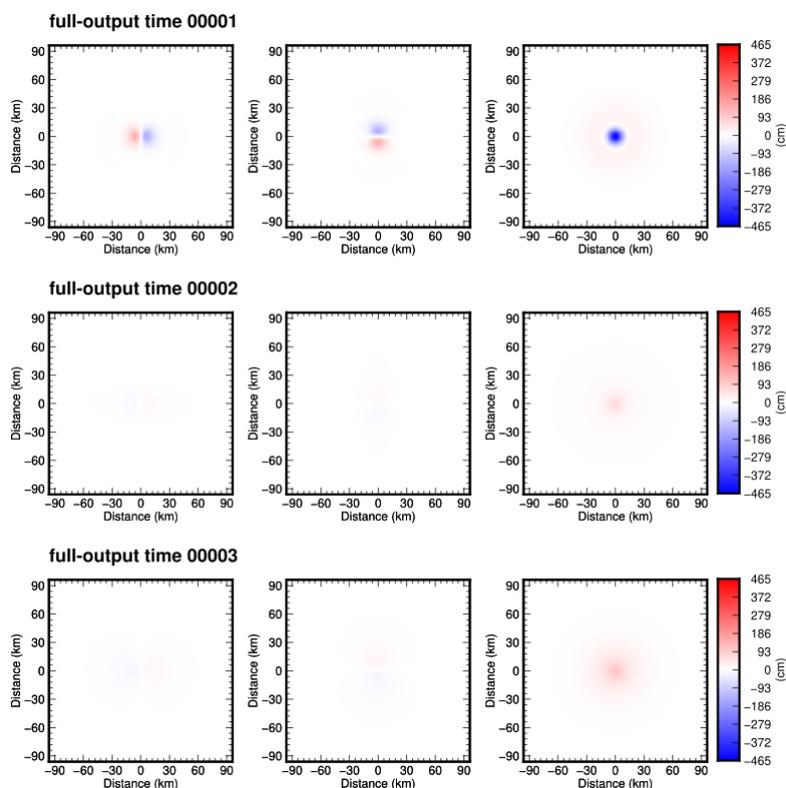


図 6：地表面変位の全体を示す自動出力図の例。

本ツールでは自動的に計算結果を図示する仕組みになっている（図 5、6）。もちろん使用者は上述の出力ファイルを用いて独自の方法で作図してもよろしい。しかし計算結果を一瞥するのに本ツールの自動出力図は便利であると思われるのでそのオプションを付加している。

各地点、各時間の変位図の変位量軸の最大値と最小値は、 $x$  方向の変位、 $y$  方向の変位、 $z$  方向の変位量の最大値と最小値を参考にして自動的に決定される。

図は 1 ページにつき、5 列の図が描かれる。1 列の構成は左から、 $x$  方向の変位、 $y$  方向の変位、 $z$  方向の変位となっている。各ページ最大 5 列までである。5 列以上になる場合は、1 ページ以上の図になる。また出力は 1 ページずつ異なるファイル名で生成される。

#### 引用文献

- Bürgmann, R., Dresen, G., 2008. Rheology of the lower crust and upper mantle: Evidence from rock mechanics, geodesy and field observations. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 36, 531-567.
- Fukahata, Y., Matsu'ura, M., 2006. Quasi-static internal deformation due to a dislocation source in a multilayered elastic/viscoelastic half-space and an equivalence theorem. *Geophys. J. Int.* 166, 418-434.
- Johnson, K. M., Segall, P., 2004. Viscoelastic earthquake cycle models with deep stress-driven creep along the San

- Andreas fault system. *J. Geophys. Res.* 109, 2156-2202.
- Melosh, H.J., Raefsky, A., 1981. A simple and efficient method for introducing faults into finite element computations. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 71, 1391-1400.
- Mound, J.E., Mitrovica, J.X., 1998. True polar wander as a mechanism for second-order sea-level variations. *Science* 279, 534-537.
- Nakada, M., Lambeck, K., 1989. Late Pleistocene and Holocene sea-level change in the Australian region and mantle rheology. *Geophys. J. Int.* 96, 497-517.
- Savage, J. C., Prescott, W.H., 1978. Asthenosphere readjustment and the earthquake cycle. *J. Geophys. Res.* 83, 3369-3376.
- Stephenson, R., 1984. Flexural models of continental lithosphere based on the long term decay of topography. *Geophys. J. R. astr. Soc.* 77, 385-413.
- Tameguri, T., Yakiwara, H., Tsutsui, T., Iguchi, M., 2022. High resolution three-dimensional seismic velocity imaging below Aira Caldera. *Bull. Volcanol. Soc. Japan* 67, 69-76 (in Japanese with English abstract).
- Wessel, P., Smith, W. H. F., Scharroo, R., Luis, J., Wobbe, F., 2013. Generic Mapping Tools: Improved Version Released. *EOS Trans. AGU* 94(45), 409-410.
- Yamasaki, T., Houseman, G.A., 2012a. The signature of depth-dependent viscosity structure in post-seismic deformation. *Geophys. J. Int.* 190, 769-784.
- Yamasaki, T., Houseman, G.A., 2012b. The crustal viscosity gradient measured from post-seismic deformation: A case study of the 1997 Manyi (Tibet) earthquake. *Earth Planet. Sci. Lett.* 351-352, 105-114.
- Yamasaki, T., Houseman, G.A., 2015. Analysis of the spatial viscosity variation in the crust beneath the western North Anatolian Fault. *J. Geodyn.* 88, 80-89.
- Yamasaki, T., Kobayashi, T., 2018. Imaging a low viscosity zone beneath the Kutcharo caldera, eastern Hokkaido, Japan, using geodetic data. *Earth Planet. Sci. Lett.* 504, 1-12.
- Yamasaki, T., Kobayashi, T., Wright, T.J., Fukahata, Y., 2018. Viscoelastic crustal deformation by magmatic intrusion: A case study in the Kutcharo caldera, eastern Hokkaido, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 349, 128-145.
- Yamasaki, T., Sigmundsson, F., Iguchi, M., 2020. Viscoelastic crustal response to magma supply and discharge in the upper crust: Implications for the uplift of the Aira caldera before and after the 1914 eruption of the Sakurajima volcano. *Earth Planet. Sci. Lett.* 531, 115981.
- Yamasaki, T., Sigmundsson, F., Iguchi, M., 2022. Variable inflation rate of a magmatic deformation source beneath Aira caldera after the 1914 eruption of Sakurajima volcano: Inferences from a linear Maxwell viscoelastic model constrained by geodetic data. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 421, 107446.
- Yamasaki, T., Sigmundsson, F., Tameguri, T., Iguchi, M., 2023. Influence of a low viscosity zone on the evolution of post-eruption deformation: A case study of the crustal deformation of Aira Caldera after the 1914 eruption of Sakurajima Volcano. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 441, 107871.

- Yamasaki, T., Takahashi, H., Ohzono, M., Wright, T.J., Kobayashi, T., 2021. The influence of elastic thickness non-uniformity on viscoelastic crustal response to magma emplacement: Application to the Kutcharo caldera, eastern Hokkaido, Japan. *Geophys. J. Int.* 224, 701-718.
- Yamasaki, T., Wright, T.J., Houseman, G.A., 2014. Weak ductile shear zone beneath a major strike-slip fault: Inferences from earthquake cycle model constrained by geodetic observations of the western North Anatolian Fault Zone. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 119, 3678-3699, doi:10.1002/2013JB010347.
- Williams, C.A., Wadg, G., 1998. The effects of topography on magma chamber deformation models: Application to Mt. Etna and radar interferometry. *Geophys. Res. Lett.* 25, 1549-155.

#### (4) 成果のまとめと今後の課題

本委託業務の目的は、原子力施設に影響を与える火山活動の可能性をより定量的に評価するための評価基準・指標及び火山活動モニタリング評価基準・指標の作成に資する最新の知見を地下構造探査、地殻変動観測等から得ることである。対象は始良カルデラであるので、その下に蓄積されつつあるマグマ溜まりの実態把握とその体積変化による地表における地殻変動等の観測量への応答を定式化した。また、反射法によるマグマ溜まりの変化および海底地殻変動観測装置による地表の変形のモニタリング手法の開発も行った。

地表における地殻変動は、圧力源、変形媒質、および観測点近傍のサイトの影響により決定される。火山性地殻変動の評価においても、強震動予測における破壊断層、地震波伝播、サイト効果の評価と同様のプロセスを踏む必要がある。本委託業務では観測点近傍のローカルな影響は当面無視することにして、圧力源とその応力を地殻変動として伝える媒質の特性について研究を行った。

そのために必要なのは、圧力源と変形媒質不均質性のイメージングであり、本委託業務では始良カルデラ周辺に展開した地震観測点の地震波到達時刻の異常性をトモグラフィ的に解析し、地震波伝播速度の不均質性としてイメージングした。その結果、始良カルデラ中央部の深さ 15km 付近に著しい S 波低速度領域を見出し、空間分布からその形状を決定するとともに、その領域がメルトを含む領域と考えてメルト量を推定した。得られた量は 20~30km<sup>3</sup> であり、巨大カルデラ噴火噴出物量のマグマ換算量よりは 1 桁小さいが、桜島での大規模噴火よりは 1 桁大きい。すなわち、巨大カルデラ噴火を発生させるにはメルトの量が依然として不足しているが、大規模噴火であればいつでも発生させうる。

火山活動に起因する地殻変動の圧力源として、従来、微小球状圧力源（いわゆる茂木モデル）が用いられてきたが、ここでは、弾性体内において有限の大きさを持つ回転楕円体や、地震波伝播低速度域の空間分布から決められる形状をもつ圧力源を用い、圧力源の体積変化量を推定した。一方、媒質については地殻を弾性体、マントルを粘弾性体とする 2 層構造とし、それぞれ地震波伝播速度のイメージングによる 3 次元構造を仮定し、シル状の回転楕円体の圧力変化に対する地表での変形応答の時間関数を定式化するとともに、圧力源直下の弾性および粘性に強い影響を受けることを見出した。本委託業務では圧力源の問題と媒質の問題を分離した課題として取り扱ったが、将来的にはマグマの貫入速度は、統合して任意の形状の圧力源における応力増加の粘弾性応答として解くべき問題である。

以下に各項目の成果をまとめる。

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

地下の火山活動に伴う応力変化を伝える媒質の特性と不均質の把握を目的として調査が実施された。

- ・ 始良カルデラ臨時地震観測点の維持運用

始良カルデラ周辺の 11 点において、3 成分短周期地震計（固有周期 1 秒）を使用した現地収録臨時地震観測点の観測継続と維持を行った。本計画では始良カルデラ北部において 3 成分短周期地震計（固有周期 1 秒）テレメータ観測点を 1 点、広帯域地震計現地収録観測点 2 点を追加して観測を強化した。始良カルデラとその周辺における地震活動の特徴について整理した。

- ・ トモグラフィによる始良カルデラ地下構造モデルの高精度化

前項の臨時地震観測点に加え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に、南九州一帯に設置されている防災科研の Hi-net 観測点や JDX-net で流通している大学・気象台の地震観測点の合計 47 点の地震波到達時を用いて 3 次元地震波トモグラフィ解析を行った。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 P 波、S 波とも 8 観測点以上で読み取り可能な 435 イベントと 2008 年に行った始良カルデラ人工地震探査発破を対象とし、波線重複を避けた自然地震 P 波 16,361、自然地震 S 波 11,903、人工地震 P 波 3,121 の読み取り値を解析に使用した。始良カルデラ内の 25 km 深までは水平および垂直方向とも約 5km 間隔のグリッド間隔で、25km 以深では 10 km 間隔のグリッドで速度を求めた。始良カルデラの中央部において 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 であったが、深さ 12-22 km に特に S 波速度が遅い領域 LS があることと桜島南西部の深さ 35 km に高  $V_p/V_s$  の領域が見出された。領域 LS の 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 1.1~2.0 km/s まで低下しており、S 波速度 2.45 km/s 以下を低速度領域とすると速度比で約 18~55 %低下していて、 $V_p/V_s$  は 3.8 と大きい。さらに低速度領域 LS の中央部を通過する地震波の S 波振幅は理論値の 1/5 程度に減衰し、低速度領域 LS の周囲 5km 付近を通過する波線でも 1/2 程度に減衰することが明らかになった。後述のレシーバ関数解析からも S 波低速度が存在していることは確実である。また桜島南西部の深さ 35 km の高  $V_p/V_s$  領域は、深さ 25 km~30 km 付近で多数発生する深部低周波地震の震源の直下に位置していることから深部から始良カルデラへのマグマ供給に関連しているのかもしれない。

- ・ 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

始良カルデラを含む地域の大局的な S 波速度構造イメージを得るために桜島島内の 15 観測点と島外で始良カルデラを取り囲む 25 観測点で記録された多数の遠地地震の P 波波形に対してレシーバ関数イメージングを行うことにより、これらの観測点の地下の S 波速度不連続面の深さ分布のパターンを推定した。深さ 20~25 km ではカルデラのほぼ全域にレシーバ関数の負のピークが見られ、この深さに低速度層の上面（S 波速度不連続面）が存在することが示唆された。次に深度方向の速度値を詳細に求めることを狙って島内の 7 観測点と島外で始良カルデラ周辺の 8 観測点に絞ってそれぞれの観測点におけるレシーバ関数インバージョンを行って到来方向ごとの 1 次元 S 波速度構造を推定し、それらをそれぞれの観測点でマッピングすることにより始良カルデラ周

辺域の S 波速度の 3 次元的分布を求めた。その結果、深さ 10 km から 35 km までの各深さの平均速度より 5%程度低速度の領域が始良カルデラを中心として広く分布していることがわかった。とくに深さ 15 km においては始良カルデラ中央部を中心として 10%に近い顕著な低速度異常域が見られた。これらの低速度異常の原因としてはマグマなどの流体の関与が示唆される。レーザ関数イメージングでは深さ 30 km においてもカルデラの中中部から南部にかけて低速度層上面を示すレーザ関数の負のピークがそれ以浅から連続して見られるが、深さ 35 km になるとレーザ関数の負のピークは顕著でなくなることから 35km 以深では低速度層が存在しないことが示された。このことは始良カルデラ中央部地下の S 波低速度領域の存在とその速度低下量の絶対値の傍証を与えるとともに、35km 以深には大きなマグマ溜まりが存在しないことを示した。

#### ・始良カルデラ下のメルト量の推定

始良カルデラ下にある S 波低速度異常領域 LS をマグマ溜りとみなし、メルト量の推定を行った。S 波速度 2.45 km/s 以下の領域の体積を求めると約 300 km<sup>3</sup> となり、P 波速度が-5 %以下となる領域の体積は約 380 km<sup>3</sup> となる。P 波および S 波速度低下の組み合わせからメルトインクルージョンのアスペクト比 10~100 を仮定するとメルトの含有率は最大で約 7 %と推定される。メルト量は P 波速度が-5 %以下となる領域で最大 26.6 km<sup>3</sup> (380 km<sup>3</sup>×7 %)、領域 LS で最大 21 km<sup>3</sup> (300 km<sup>3</sup>×7 %) が得られた。

#### ・始良カルデラ内の地震活動

2010 年以降に始良カルデラで発生したマグニチュード 1.0 以上の地震について震源決定を行った。地震は主に始良カルデラ北東部の若尊火山周辺の深さ 1-5 km 付近、桜島南西部の深さ 6-11 km 付近、桜島南東から東部の深さ 4-7 km 付近の 3 カ所で発生していた。総数 302 イベント (若尊:105 南西部 116 南東部:77) 他に国分地域 4 であった。このなかで 2021 年 3 月と 7 月に桜島南西部で発生したマグニチュード 3.1 の地震が最大のイベントである。震源メカニズムについては始良カルデラ北東部の地震は東西圧縮の横ずれ型、桜島南西部の地震は東西引張の正断層型であり、Hidayati et al. (2007) が 1998-2005 年に発生した地震について報告している発生機構と同様であると考えられる。トモグラフィ解析で見出されている始良カルデラ中央部の深さ 12-22 km の S 波低速度領域に隣接して地震が発生しているのは北東部の若尊火山周辺であるが、震源は浅い領域であり東西圧縮型の震源メカニズムであることから始良カルデラ地下のマグマ蓄積にともなう体積増加に直接影響された地震活動ではないと考えられる。2015 年 3 月に桜島南西部の地震活動が増加した。桜島南西部の地震は 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が、同年 8 月に発生した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。

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、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 波低速度領域の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。さらに始良カルデラ中央部の低速度領域の直上とごく近傍での地震活動が見られないことと、始良カルデラ北東部で発生する地震が引張型のメカニズムではなく圧縮型のメカニズムを示していたことから、現時点では始良カルデラのマグマ蓄積にともなうカルデラ全域のひずみの増加を直接反映している地震の発生はないと考える。

#### (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

長期連続反射法探査による始良カルデラ地下のマグマ活動にともなう地震反射波変化検出の有効性を検討することを目的に実施された。

成果：

##### ・長期連続反射法に必要な振源装置の検討と発振強度の検討

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。

##### ・振源装置の繰り返し発振にともなう振源波形および始良カルデラを通過した観測波形における再現性の確認

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を明らかにした。

##### ・長期連続反射法に必要な観測方法の検証

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を示した。これにより長期連続反射法の基本的な観測記録処理の流れを組み立てることができた。

・振源装置の継続運用に必要な設備の検討

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発振のために同一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うえに、継続的に使用許可を得ることが困難であった。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水槽（試験発振坑）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。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。

今後解決されなければならない課題は 1) 長期にわたり利用可能な振源設備の確保、2) 観測頻度の増大である。

(2)-1 始良カルデラの火山性地殻変動データの蓄積

始良カルデラの火山性地盤変動圧力源の検討、始良カルデラへのマグマ蓄積量と供給量の見積を目的として実施された。

成果：

・GNSS 観測網の強化・維持と火山性地殻変動の検出

「原子力施設等防災対策費等委託費（火山影響評価に係る技術的知見の整備）事業」において設置した GNSS 観測点 10 点を維持するとともに、平成 31 年度から令和 2 年度にかけて始良カルデラおよび周辺地域の 7 か所に GNSS 観測点を設置し GNSS 観測網を強化した。また 1 年に 1 回の頻度で中之島において GNSS キャンペーン観測を実施した。これらの観測点に、南九州地域に分布する京都大学および国土地理院の観測点を加えたおよそ 90 地点の GNSS 観測データを用いて各地点の水平変位を求め、広域変動の補正を施して始良カルデラ周辺の火山性地殻変動を抽出した。

・地盤変動圧力源解析と圧力源モデルの改良

上記で得られた GNSS 観測による水平変位と水準測量による上下変位の観測値を基に、

桜島南岳直下と始良カルデラ下に茂木圧力源を設けた圧力源解析を行った。その結果、始良カルデラ下の圧力源はカルデラ中央部の深さ約 11 km に推定され、体積変化量として、2017 年からの 3 年間に  $15.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、その後の 3 年間に  $15.7 \times 10^6 \text{ m}^3$  が得られた。さらに始良カルデラ中央部の地下に大きさをもった圧力源を設定した弾性モデルで同期間の地盤変動観測値の説明を試みた。始良カルデラ中央部の地下に、S 波反射面の存在が指摘されている 13.6km に上面の深さを固定した形状（上下半径／水平半径比）の異なる回転楕円体を置いたモデルと、3 次元地震波トモグラフィ解析から見出されたメルトの存在が示唆される領域（S 波低速度領域）の形状を模した多面体を始良カルデラ下の圧力源としたモデル（LS モデル）とによる地表変位理論値を有限要素法によって算出した。回転楕円体圧力源ではその形状が水平方向に扁平なほうが残差二乗和は小さくなる。回転楕円体の上下半径／水平半径比が 0.5 より小さい場合（中心の深さは 15 km 付近）で残差二乗和は 22-23  $\text{cm}^2$  で茂木モデルの約 26  $\text{cm}^2$  と同程度になり、観測された地表変位を茂木モデルと同程度に説明できることがわかった。このときの回転楕円体圧力源の体積変化量は約 12-14  $\times 10^6 \text{ m}^3$  と茂木モデルから予測される  $15.2 \times 10^6 \text{ m}^3$  よりやや小さい。LS モデルにおいて、2017 年からの 3 年間の地表変位の観測値とモデル計算値との残差二乗和が最小になるのは圧力源の体積変化量が  $18.4 \times 10^6 \text{ m}^3$  の場合で、茂木モデルから推定される  $15.2 \times 10^6 \text{ m}^3$  より約 20% 大きい。このときの観測値とモデル計算値の残差二乗和は約 25  $\text{cm}^2$  で、茂木モデルの約 26  $\text{cm}^2$  と同程度であった。S 波低速度領域を圧力源と見立てた LS モデルのほうが茂木モデルに比べてカルデラの東西両側の変位の残差が小さくなる傾向が見受けられ、残差の空間分布が改善されることが示された。

#### ・ マグマ蓄積量、始良カルデラへのマグマ供給量の見積

GNSS 観測点 MAKI-YOSI 間の水平距離の変化が始良カルデラ下の圧力源の体積変化に起因するとして、茂木モデルおよび LS モデルを仮定して圧力源の体積変化量を推定した。この体積変化量をマグマ蓄積量と考え、桜島から放出された火山灰重量をマグマの体積に換算して加えることで深部からのマグマ供給量を推定した。茂木モデルを仮定した場合の 2010 年から 2023 年までのマグマ蓄積量は  $85 \times 10^6 \text{ m}^3$  と推定され、平均すると  $85 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$  の蓄積速度である。ここで求められた値はこれまでに知られている値と同程度であり、始良カルデラの定常的なマグマ蓄積速度と見なすことができる。LS モデルを仮定した場合、同じ期間のマグマ蓄積量は  $115 \times 10^6 \text{ m}^3$  と推定された。2010 年から 2023 年までの期間に桜島から放出された火山灰重量は  $4.1 \times 10^{10} \text{ kg}$  と推定された。茂木モデルを仮定し火山灰量をマグマの体積に換算する密度（DRE 換算密度）を  $2500 \text{ kg/m}^3$  とした場合の始良カルデラ地下へのマグマ供給量は、 $101 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、 $1000 \text{ kg/m}^3$  とした場合  $124 \times 10^6 \text{ m}^3$  と推定された。LS モデルを仮定した場合のマグマ供給量は、DRE 換算密度を  $2500 \text{ kg/m}^3$  とした場合  $130 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、 $1000 \text{ kg/m}^3$  とした場合  $154 \times 10^6 \text{ m}^3$  と求められた。

## (2) - 2 始良カルデラにおける海底地盤変動観測の検討

我が国の設置環境に耐えうる海底地盤変動観測装置を開発し、始良カルデラの大部分を占める海域での安定した地盤変動観測の実現を目的として実施された。

内容：

### ・設置場所の検討

令和 2 年～4 年度にかけて水路図等の資料から 6 箇所の候補地を選び順次調査と交渉を実施した。地元漁業関係者の同意が得られかつ水深に関する条件が合う 1 箇所に候補地を絞り込んだ。漁業関係者の同意が得られた候補地点周辺では潮流調査および底質調査を行った。潮流調査では冬季より夏季の方が潮流の強いことと夏季には上層と下層で潮流の向きが異なることが明らかにされた。底質調査では候補地点周辺は粘性土質砂で構成されていることが明らかにされ、その後の設計に反映された。また、令和 4 年度には水深の確認調査と水中写真の撮影も行った。これにより候補地点付近はなめらかな地形で水深 30m であることが確認されたため、海底地盤変動観測装置の最終設置地点を決定した。

### ・設置環境に耐える観測装置の設計と製作

設置環境に耐える観測装置の設計と製作では、水深 30m 以上に設置し年 1 センチメートル程度の上下変動の検出を目標に、鹿児島湾の自然環境に耐えるものとした。設計は令和元年度から令和 3 年度にかけて行われた。令和元年度に先行例であるイタリア国の業者に基本設計を提案させるとともに日本国内で基本設計を実施した。設計の傍らで姿勢検出および補正方式の検証実験を繰り返し行った。姿勢検出では GNSS アンテナアレイによる方法が良い成績を示したので、これを採用することとし測位値の補正法の構築も行った。令和 2 年度は海底地盤変動観測装置の詳細設計を行ったが、先述の設計要件を満たすためにユニバーサルジョイントを採用し、姿勢検出には GNSS アンテナアレイ方式を採用した構成とした。令和 3 年度には前年度の設計をさらに改良し、水深 30m に対応した最終構成（全長約 40m、アンカー重量 19t、本体重量 21t、浮力 259.5 kN、余剰浮力 54.5 kN、ユニバーサルジョイント年間摩耗量推定値 0.0736 mm）を決定した。令和 4 年度には前年度の改良設計に基づき海底地盤変動観測装置一式の建造を 10 ヶ月かけて行った。

### ・観測装置の設置とその後の観測運用

令和 4 年度末に海底地盤変動観測装置を始良カルデラ内の海域（桜島北東岸から約 2.2 km）に設置した。船積みから設置完了まで 2 日間を要した。設置後半年間で 1 日以上にわたる欠測は発生せず順調に推移している。また先述の姿勢補正計算を組み込んだデータ処理システムの構築も行い、海底地盤変動装置からのデータ回収および集計処理が自動的に行われている。海底地盤変動観測装置による観測データと近傍の陸上観測データと比較して測定値のトレンドを決定した結果、沈下量は設置後 5 ヶ月間で

約 2 cm、11 ヶ月後には 3cm の沈下量に達していることが推定されたが、想定された沈下量 (1m) よりは小さな値を示していた。沈下速度は時間経過とともに低下している。観測装置は設置後 1 回の台風強風圏と 1 回の台風暴風圏を経験している。台風期の前後でアンカー底部の水中撮影を行ったが、台風期を経験した後にはアンカー隅部で幅 0.3m ほどの洗掘の発生が確認された。今後複数年にわたり引き続き必要な維持作業と経過観察を実施するとともにデータ取得を継続し、陸上観測データとの比較を行いつつ沈下補正項などを決定し正味の地盤変動の抽出を行う必要がある。

### (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

粘弾性地殻中の圧力の時間変化に対する地表での変形応答特性の調査を目的に実施された。

成果：

#### ・粘弾性モデルの導入 (2019 年度研究)

地殻上部に形成されたシル状変動源にマグマが連続的に供給されている (変動源が一定の割合で膨張を続けている) 状況下で、突然その変動源からマグマが排出される場合の地殻の粘弾性応答を調べた。その結果、マグマ排出時の変動源収縮に対する粘弾性応答が、噴火後の地殻変動の重要な駆動力となることがわかった。その駆動力の大きさは、噴火前のマグマ供給に対して生ずる粘弾性緩和の大きさや噴火時の変動源収縮量の大きさに依存する。また噴火後に地表面が噴火直前の高さに回復するのは、変動源の体積が噴火直前の体積に回復するよりも常に遅れてくる。これは、変動源膨張に対する粘弾性応答が隆起を減じさせるからである。この粘弾性モデルを始良カルデラにおける測地観測に適用した結果、次のことがわかった：(1)シル状変動源の深さは 11km でその赤道半径は $\sim 2$ km、(2)変動源へのマグマ供給が 1914 年噴火の約 50 年前から $\sim 0.009\text{km}^3/\text{年}$ の割合でおこなわれていた、(3)地殻の有効粘性が $\sim 5 \times 10^{18} \text{Pa s}$ 、(4)1914 年噴火時に変動源が $\sim 0.4\text{km}^3$  (噴出体積の $\sim 1/4$  倍) 収縮。しかし、1975 年以降の測地データをより高次に説明するためには、変動源の膨張率の時間変化を導入する必要があることもわかった(Yamasaki et al., 2020)。

#### ・1914 年以降のマグマの体積供給率の推定 (2020 年度研究)

2019 年度研究でその導入の必要性が明らかにされた、1914 年噴火以降の始良カルデラ下のマグマの体積供給率の時間変化を推定した。測地データ (水準測量と GNSS 変位場を含む) から、深さ 11km のシル状変動源が 6 つの異なる期間において以下の速度で膨張することがわかった：(I)  $\sim 6.9\text{--}9.4 \times 10^6 \text{m}^3/\text{年}$  (1914–1934 年)、(II)  $\sim 9.1\text{--}16.7 \times 10^6 \text{m}^3/\text{年}$  (1934–1960 年)、(III)  $\sim 1.6\text{--}3.8 \times 10^6 \text{m}^3/\text{年}$  (1960–1968 年)、(IV)  $\sim 8.1\text{--}11.0 \times 10^6 \text{m}^3/\text{年}$  (1968–1976 年)、(V)  $\sim 1.0\text{--}2.2 \times 10^6 \text{m}^3/\text{年}$  (1976–1997 年)、(VI)  $\sim 5.8\text{--}9.4 \times 10^6 \text{m}^3/\text{年}$  (1997–2007 年)。地殻の粘性率は $\sim 5 \times 10^{18} \text{Pa s}$  から $\sim 5 \times 10^{19} \text{Pa s}$  以上の範囲で制約されたが、最も低い粘性性と最も高い粘性は、それぞれ期間(I)と期間(V)

で要請される。また、期間 V に観測される地表沈降は、地殻の粘性率が $\sim 10^{19}$  Pa s より小さいか大きいかによって、変動源の膨張か収縮のどちらかで説明できることがわかった。変動源の膨張・収縮速度と観測された体積噴火速度を比較すると、1914 年噴火以降の変動源の体積増加が $\sim 0.4 \text{ km}^3$  以上の場合にのみ顕著な噴火が起こることもわかった。本研究で推定された時間膨張率は、マグマ供給量と噴火活動の観測結果と関係づけて噴火ダイナミクスを議論する機会を与える (Yamasaki et al., 2022)。

・不均質粘性領域の導入による地盤変動応答の説明 (2021-2022 年度研究)

地殻内の粘性率の空間的不均一性は物理探査画像から推測することができるが、その不均一性により、始良カルデラで見出されたような複雑な挙動を示す火山性地殻変動の特徴 (つまり噴火後の変動が進むにしたがってより高い粘性率で変動が支配されてくる) が説明されるかもしれない。最近の地震探査によって始良カルデラ下に低速度領域が見出されており、それが低粘性領域 (LVZ) としての役割を果たしているかもしれないことが示唆されている。そこで、それに相当する LVZ を三次元粘弾性有限要素モデルに導入して、LVZ モデルの挙動を一様粘性 (UNV) モデルの挙動と比較して定量化すると、ある LVZ 構造に対して、変動源の瞬間的な収縮に応答する LVZ モデルの変位を最もよく再現する見かけの UNV モデルは、変動源の緩やかな膨張に対する LVZ モデルの変位を最もよく再現する見かけの UNV モデルより、低い粘性率を持つことがわかった。このような LVZ モデルの挙動により、始良カルデラでの測地観測もうまく説明されることが示唆されるが、実際、地球物理学的にイメージングされた低速度異常と同程度の空間的広がりを持つ LVZ がある場合、1914 年の噴火後のどの段階においても、測地データを非常に良く説明できることを確認した。この研究により、火山性地殻変動をよりよく理解するためには、測地データと地球物理学的データを統合する学際的研究が必要であることが強調され、また、マグマの存在を変動源としてだけでなく、低粘性領域として捉えていける可能性が示された (Yamasaki et al., 2023)。

・粘弾性地表面変位計算ツールの作成 (2023 年度研究)

シル状変動源の膨張・収縮に対する粘弾性地表面変位の計算ツールを作成した。複雑な膨張・収縮の時間変化に対する線形粘弾性応答 (線形弾性、線形マックスウェル粘弾性) を計算することができる。

d. 今後の課題

今後、火山噴火、特に巨大噴火を見据えて重要な研究課題は、深部マグマの貫入 $\rightarrow$ 溜まりへの蓄積 $\rightarrow$ 浅部への貫入過程の解明である。そのためには、マグマ溜まりの実態とその動きの解明が必要である。これまでの地殻変動における圧力源は、微小球状圧力源を基本とし、その拡張として、有限の大きさを持つ球、回転楕円体、水平方向の広がりのみを考慮するシルがモデルとして採用されてきた。マグマの貫入を考えるのであれば、最も少ないエネルギーで貫入可能なのは、開口割れ目であり、開口割れ目の開口量の増加及び割れ目の進展はマ

マグマの貫入そのものである。互いに直交する3つの微小で同等な開口割れ目は、微小球状圧力源と等価であり、開口量と開口面の大きさの違いは回転楕円体として近似できる。さらに、水平方向に開口面をもつものがシルであり、鉛直方向の面の開口がダイクである。すなわち、開口割れ目を基本モデルとしてその組み合わせを考慮することにより、すべての地盤変動モデルを構築でき、さらにマグマの貫入・上昇方向を推定することが可能となる。構造解析によって得られた低速度領域は、繰り返されるマグマの供給によって形成された開口割れ目の集合体と考えればよい。地震波の反射は、互いに直交する3つの開口割れ目のうち、水平方向に開口面をもつ割れ目によって引き起こされたものと解釈すればよい。離れた場所での観測は圧力源を微小化するので、微小球状圧力源か3つの等価開口割れ目かの判断はできないが、圧力源に近づく海底地殻変動観測装置はその分離を可能とする。3つの開口割れ目モデルは海底地殻変動観測装置によって得られるかもしれない非等方的な地殻変動にもその解釈を与えることが可能となる。海底地殻変動観測装置の導入によって始良カルデラ下の圧力源を根本的に見直すことになるかもしれない。

本委託業務では観測点近傍の局所的な影響は考慮していない。局所的な地殻変動にはドリフトや変動方向の偏向性、周辺の地下水の影響などが含まれるが、火山体そのものが持つ粘弾性的ふるまいも考慮されなければならない。固体の火山噴出物で構成される火山体でさえ疑似粘弾性的な変動を示すことがあり、特に通常の粘弾性体と同様に応力変化が速いときに疑似粘性の効果が顕著である。2015年8月の桜島の群発地震活動を伴ったマグマ貫入により引き起こされた地盤変動はその代表例である。巨大カルデラ噴火に前駆する応力増加は極めて高速なはずであり、粘性の効果はマントルだけでなく、火山体についても考える必要がある。

#### 参考文献

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.

Yamasaki, T., Sigmundsson, F., Iguchi, M., 2020. Viscoelastic crustal response to magma supply and discharge in the upper crust: Implications for the uplift of the Aira caldera before and after the 1914 eruption of the Sakurajima volcano, Earth and Planetary Science Letters, vol. 531, 115981

Yamasaki, T., Sigmundsson, F., Iguchi, M., 2022. Variable inflation rate of a magmatic deformation source beneath Aira caldera after the 1914 eruption of Sakurajima volcano: Inferences from a linear Maxwell viscoelastic model constrained by geodetic data. Journal of Volcanology and Geothermal Research, vol. 421, 107446

Yamasaki, T., Sigmundsson, F., Tameguri, T., Iguchi, M., 2023. Influence of a low viscosity zone on the evolution of post-eruption deformation: A case study of the

crustal deformation of Aira Caldera after the 1914 eruption of Sakurajima Volcano.  
Journal of Volcanology and Geothermal Research, vol. 441, 107871

## (5) 委員会等の開催

令和5年度は外部評価委員会を2回開催した。開催日時と会場を以下に示す。

### 第1回外部評価委員会

令和5年5月15日(月) 13時20分～16時

場所：京都大学東京オフィス

### 第2回外部評価委員会

令和5年11月30日(木) 13時28分～16時30分

場所：京都大学東京オフィス

令和5年度外部評価委員は以下の3氏に委嘱した。

防災科学技術研究所 火山研究推進センター長	清水 洋
東北大学大学院理学研究科・教授	三浦 哲
防災科学技術研究所 火山防災研究部門長	藤田英輔

### 第1回外部評価委員会の内容の要点

第1回外部評価委員会では令和5年度の研究計画の全般の内容と個別の研究計画について提案があった。委員からは本研究に関連するこれまでの個々の研究成果に対する質問と今後の展望に関する質問がなされた。

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

研究担当者から始良カルデラ下の上部マントル付近まで地下構造モデルを高精度化し、S波低速領域の広がりやメルト量の推定、地震波伝播の詳細、始良カルデラにおける地震活動の特徴について検討を加えてとりまとめを行うとの提案があった。

委員からはメルト量推定の根拠、同水底の対象深さ、減衰構造の解析方法に関する質疑が出された。

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

研究担当者からはデータを追加してカルデラ内部のレシーバ関数イメージング、波形インバージョンによるS波速度イメージングを行うとの提案があった。

委員からは前項の内容との関係、記録に見られる極性反転、手法の適用性に関する質疑がなされた。

#### (1-2) 始良カルデラにおける長期連続反射法の有効性の検討

研究担当者からエアガン発振点に関する調査、試験発振孔の作成と発振、観測の有効性の検討と取りまとめの提案があった。

委員からは前年度実験の波形の特徴と構造変化との関連性に関する質問、新たに建造する試験発振坑のサイズと構造に関する質疑が行われた。

#### (2-1) 始良カルデラの火山性地殻変動データの蓄積

研究担当者からは地盤変動観測の維持、地震学的特徴を導入した有限要素法を用いた地盤変動圧力源モデルの改良、高観測点密度の GNSS データの使用、圧力源体積変化量の推定を行うなどの提案が行われた。

委員からは観測量に対するモデルの整合性とモデル特徴に関する質疑と、異なる解析期間における変化の有無に関する確認があった。

#### (2-2) 始良カルデラにおける海底地盤変動観測の検討

研究担当者が海底地盤変動観測装置の設置報告と今後は観測データの蓄積を行うことを提案した。

委員からは設置方法、設置点の海底面傾斜、ユニバーサルジョイントの設計寸法、INGV で用いられているデータ処理方法との比較について質疑が行われた。

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

研究担当者が資料に基づき粘弾性地殻変動計算ツールの作成を提案した。

委員からはシミュレーションツールの動作条件、可能なモデルパラメータの範囲などに関する質疑が行われた。

### 第 2 回外部評価委員会の内容の要点

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

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

研究担当者からは始良カルデラ下の上部マントル付近まで地下構造モデルを高精度化し、S 波低速度領域の広がりやメルト量の推定、地震波伝播の詳細、始良カルデラの地震活動の特徴について検討を加えたとりまとめが報告された。

委員からは地震波振幅減衰の取り扱いと地震波速度異常の閾値の取り扱い、レーザ関数解析結果とトモグラフィ解析の結果の相違点、レーザ関数のクォリティの目安に関する質疑があった。

#### (1-2) 始良カルデラにおける長期連続反射法の有効性の検討

研究担当者からは当時進行中の令和 5 年度基礎実験の進捗に関する報告があった。

委員からはコンクリート強度確保に関する確認、プール形状が異なる場合のデコンボリューション波形の取り扱い、試験発振坑の構造と強度に関する質疑があった。

#### (2-1) 始良カルデラの火山性地殻変動データの蓄積

研究担当者から、地盤変動観測の維持、地震学的特徴を導入した有限要素法を用いた地盤変動圧力源モデルの改良、高観測点密度の GNSS データの使用、圧力源体積変化量の推定を行うが報告された。

委員からは有限体積地盤変動圧力源の形状のメリット、観測網の再検討等に関する質疑があった。

#### (2-2) 始良カルデラにおける海底地盤変動観測の検討

研究担当者から海底地盤変動観測装置の半年間の運用状況、測位結果の妥当性の検討結果の報告があった。

委員からは観測データに表れている変動量の現時点での解釈についての質疑と、データ補正についてコメントがなされた。

(3) 活動的カルデラのシミュレーションモデルによる火山性地殻変動の検討

研究担当者からは粘弾性地殻変動計算ツールの完成が報告された。こ

委員からは成果物ツールの詳細に関する質疑の他に、同ツールに関するコメントが出された。

(4) まとめ

外部評価委員からは全体として順調な進捗であるとの講評を得ることができた。

一方、実施責任者からはあらためて本委託研究のアウトプット内容の確認の必要性が指摘された。