

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

京都大学防災研究所

令和5年3月

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

本報告書に関する問い合わせは、原子力規制庁までお願いします。

# 目次

1. 令和4年度事業の委託研究の内容と成果の概要	1
(1) 活動的カルデラ火山の地下構造調査	1
(1) 1. 始良カルデラにおける地震観測による地殻構造調査	1
(1) 2. 始良カルデラにおける長期連続反射法の有効性の検討	4
(2) 活動的カルデラ火山の火山性地殻変動とマグマ活動に関する調査	6
(2) 1. 始良カルデラの火山性地殻変動データの蓄積	6
(2) 2. 始良カルデラにおける海底地盤変動観測の検討	8
(3) 活動的カルデラのシミュレーションモデルによる火山性地殻変動の検討	9
2. 研究報告	13
(1) 活動的カルデラ火山の地下構造調査	13
(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	13
(1) 2. 始良カルデラにおける長期連続反射法探査の有効性の検討	54
(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	100
(2) 1. 始良カルデラの火山性地殻変動データの蓄積	100
(2) 2. 始良カルデラにおける海底地盤変動観測の検討	134
(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	178
(3) 1. 始良カルデラ下の地震学的地殻構造を反映させた粘弾性地殻変動モデルの検証	179
(3) 2. 粘弾性水平変位の一般的な振る舞い	204
(3) 3. 粘弾性地殻変動解析ツールの基本的方針の検討	211
(4) 成果のまとめと今後の課題	224
(5) 委員会等の開催	226
(5) 1. 第1回外部評価委員会の内容の要点	226
(5) 2. 第2回外部評価委員会の内容の要点	227

## 図表目次

図 1-1.	本項目を構成する小項目とその適用範囲	1
図 1-2.	トモグラフィ解析ロードマップ	3
図 1-3.	レシーバ関数解析ロードマップ	4
図 1-4.	長期連続反射法の検討ロードマップ	5
図 1-5.	始良カルデラの火山性地殻変動の検討ロードマップ	7
図 1-6.	始良カルデラにおける海底地盤変動観測の検討ロードマップ	8
図 1-7.	シミュレーションモデルによる火山性地殻変動の検討ロードマップ	10
図 1-1-1.	臨時地震観測点分布	13
表 1-1-1.	臨時地震観測のデータ回収およびバッテリー交換実施日	14
図 1-1-2-1.	地震波トモグラフィ解析に使用した地震観測点	16
図 1-1-2-2.	2008 年人工地震探査の発破点 (黄色) と地震観測点 (白○と青○) の分布	17
図 1-1-2-3.	解析に使用した 424 イベントの震源分布図	18
図 1-1-2-4.	3 次元トモグラフィ解析の流れ	19
表 1-1-2-1.	初期構造となる 1 次元速度構造 (Ono et al., 1978 を参考)	20
図 1-1-2-5.	深さ 5 km、10 km、15 km、20 km、25 km におけるチェッカーボードテスト結果	21
図 1-1-2-6.	深さ 1 km、5 km、10 km、15 km、20 km、25 km における P 波、S 波速度およびその比	23
図 1-1-2-7.	深さ 35 km、45 km における P 波、S 波速度およびその比	24
図 1-1-2-8.	始良カルデラの特徴的な地震波速度構造。(a) 深さ 15 km における S 波速度分布、(b) 始良カルデラ中心付近を通る東西断面における P 波速度および S 波速度分布、(c) 南北断面における P 波速度および S 波速度分布。(b) 中の赤太線は筒井・他 (2021) の S 波反射面を示す。	26
図 1-1-2-9.	P 波速度が平均速度より -5 % 以下となる領域 ( $V_p$ の赤の領域)	28
図 1-1-2-10.	振幅減衰解析のための地震イベント候補	30
表 1-1-2-2.	サイト特性を得るために使用したやや近地地震のリスト	31
表 1-1-2-3.	サイト特性の振幅値 (SK01 を 1.00 とした場合)	32
図 1-1-2-11.	始良カルデラを通過する地震波の振幅減衰	33
表 1-1-2-4.	3 次元速度構造解析に用いた地震のイベントリスト	35
図 1-1-3-1.	始良カルデラ周辺の地震観測点の分布 (+)。今回のレシーバ関数解析で用いた点を赤色で示す。	42
図 1-1-3-2.	観測点 FUK におけるレシーバ関数の R 成分の波形。(左図) 到来方向に並べた個々の波形。(右図) 到来方向の $10^\circ$ ごとに $\pm 10^\circ$ の範囲に入るレシーバ関数を重ねた波形。	43

図 1-1-3-3.	観測点 BEN におけるレシーバ関数の R 成分の波形。(左図) 到来方向に並べた個々の波形。(右図) 到来方向の $10^\circ$ ごとに $\pm 10^\circ$ の範囲に入るレシーバ関数を重合した波形。.....	44
表 1-1-3-1	遺伝アルゴリズムにおけるモデルパラメータの探索範囲.....	45
図 1-1-3-4.	FUK でのレシーバ関数インバージョンの結果。(a)、(b)、(c) はそれぞれ到来方向 $140^\circ$ 、 $190^\circ$ 、 $290^\circ$ に対する S 波速度構造である。最適モデルを赤線で、許容モデルの範囲をその個数に応じて緑から黄色で、平均モデルを青線で示す。(d)、(e)、(f) は到来方向 $140^\circ$ 、 $190^\circ$ 、 $290^\circ$ に対するレシーバ関数の波形である。観測レシーバ関数の重合波形を青線で、その $\pm 1$ 標準偏差の範囲を黒線で、最適モデルに対する理論波形を赤線で、許容モデルに対する理論波形の範囲を緑から黄色で示す。.....	46
図 1-1-3-5.	BEN でのレシーバ関数インバージョンの結果。(a)、(b)、(c) はそれぞれ到来方向 $140^\circ$ 、 $190^\circ$ 、 $290^\circ$ に対する S 波速度構造であり、(d)、(e)、(f) はそれらに対応するレシーバ関数の波形である。その他の説明は図 1-1-3-4 のキャプションを参照のこと。.....	47
図 1-1-3-6.	S 波速度構造のマッピングの結果。深さ 10 km から 35 km まで 5 km ごとに示す。+ は解析に用いた観測点である。黒丸は通常の地震、白丸は低周波地震を示す。これらは各深さ断面の $\pm 0.5$ km の範囲に入るものをプロットした。.....	48
図 1-1-3-7.	図 1-1-3-6 の結果を補間して得られた 10 km から 35 km まで 5 km ごとの深さにおける S 波速度の不均質分布。その他の説明は図 6 のキャプションを参照のこと。	49
図 1-1-3-8.	10 km から 35 km まで 5 km ごとの深さにおける S 波速度の平均値からの偏差の不均質分布。なお、各深さでの S 波速度の平均値は、3.01、3.07、3.22、3.46、3.64、3.73 km/s である。その他の説明は図 6 のキャプションを参照のこと。.....	50
図 1-2-1.	長期連続反射法探査の検討のロードマップ.....	54
図 1-2-2.	(a) 基礎実験の全体配置と始良カルデラ。(b) 高免アレイ KOMA 観測点展開、(c) 住吉池 発振点と近傍観測点 SUM1, SUMK1, SUM6。(c) の等高線は 10m 間隔である。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。.....	55
表 1-2-1.	エアガンポンツーン中心位置.....	56
図 1-2-3.	ポンツーン中心位置と湖底地形.....	56
表 1-2-2.	観測点位置.....	57
図 1-2-4.	Teledyne BOLT 1500LL 350 cui チャンバ付き 3 連構成トリガン。吊り下げ状態を示す。最上部のプレートの反対側側面上部にニアフィールドハイドロフォン(NFH) が取り付けられている。京都大学防災研究所(2022)より。.....	58
表 1-2-3.	使用したエアガンシステムの諸元.....	58
図 1-2-5.	エアガンポンツーン(右上)とコンプレッサ船(左下)。コンプレッサ船上には高圧コンプレッサとマニホールドを搭載した。.....	59
図 1-2-6.	エアガン制御系統および住吉池近傍観測点.....	60
図 1-2-7.	高免アレイ.....	61

図 1-2-8. 高免アレイ観測点の例 (BKOM6 地点 6)。青色ボックスにロガーおよびバッテリーを収容する。青色ボックスの左側の灰色のパイプが地震計孔口。孔中地震計は地表から 10m の孔底に設置された。(京都大学防災研究所, 2021) .....	62
図 1-2-9. 地表観測点機材。白色機材はバッテリー、黄色機材は記録装置 GSR-3LF、濃緑色の円筒形機材は地表用 3 成分地震計 GS-1LF。(京都大学防災研究所, 2021) .....	62
表 1-2-4. エアガン発振作業内容。 .....	63
図 1-2-10. エアガン発振状況 .....	64
図 1-2-11. 観測点 BKOM6 における全観測波形。(a) 上下動成分、(b) 南北成分、(c) 東西成分を発振の順に左から右に並べて示す。 .....	65
図 1-2-12. BKOM5 上下動成分におけるバックグラウンドノイズレベルの時間変化。(a) BAA2022、(b) BAC2022、(c) BAA2020。 .....	66
表 1-2-6. 令和 4 年観測チャンネル割り当て .....	67
図 1-2-13. 発振パラメータセット BAA2022 における 1 回分の発振(12/17)に対する全観測点の全成分を示す。最上部から 27 本が SKOM1~9 の 3 成分記録を順に並べ、引き続く 21 本が BKOM1~7 の 3 成分記録、最下部 6 本が住吉池近傍の観測点 SUM1 3 成分、SUM6 3 成分の記録を示す。 .....	68
図 1-2-14. 発振波形の推移。SUM6 観測点上下動成分におけるパラメータセット毎の全数スタック結果に対する個々の発振記録の相関係数(橙)と RMS 振幅(青)とを示す。(a) BAA2022、(b) BAC2022。時間窓はいずれも 0.1 - 3.0 秒の区間。 .....	69
図 1-2-15. 主要な発振パラメータセットで得られた全数スタック後の全観測波形。(a) 発振パラメータセット BAA2022、スタック数 575 回。(b) 発振パラメータセット BAC2022、スタック数 317 回に対する全観測点の全成分を示す。観測点との対応は前図と同じである。 .....	70
図 1-2-16. 主要な発振パラメータセットで得られた全数スタック後の全観測波形。(a) 発振パラメータセット BAA2022、(b) 発振パラメータセット BAC2022 に対する全観測点の全成分を示す。いずれも 3 - 10 Hz BPF 処理済みである。 .....	71
表 1-2-7. 垂直重合効果 .....	72
図 1-2-17. S/N 比と垂直重合 .....	72
図 1-2-18. BAA2022 と BAA2020 の比較。(a) SUM1 上下動(102m 地点)、(b) SUM6 上下動(1115m 地点)、(c) BKOM5 上下動(19.6 km 地点)。いずれも太い曲線は今回の実験(2022)による波形を示し、細い曲線は令和 2 年実験(2020)による波形を示す。(c) に示す区間は Air wave が未到達である。 .....	73
図 1-2-19. エアガン近傍ハイドロフォン波形の比較。太線: BAA2022, 細線: BAA2020。衝撃相を Rel. で表す。プリカーサパルスは BAA2020 で顕著であるが、BAA2022 では目立たない。また BAA2022 ではバブル相に高周波パルスが混じる傾向がある。 .....	74
図 1-2-20. 発振パラメータセット BAC2022 による発振の観測波形。令和 2 年実験のパラメータセット BAA2020 と重ねて示す。(a) 観測点 SUM1 上下動成分、(b) 観測点 SUM6 上下動成分、(c) 観測点 BKOM5 上下動成分を示す。 .....	76

図 1-2-21.	近傍観測点 SUM1 における波形比較。(a) BAC2022 (太線) と BAA2020 (細線)。(b) BAC2022 (太線) と BAA2022 (細線)。	77
図 1-2-22.	NFH 波形の差異。(a)BAC2022 と BAA2022 との比較。1 回目のバブルサイクルでは高周波パルスが 1ms 程度早く出現し、2 回目のバブルでは高周波パルスが 8 ms ほど遅く出る。(b)BAC2022 と BAA2020 との比較。BAA2020 では最初の衝撃相(Re1.)の振幅に対するバックシュートおよびバブル相の振幅が小さい。	78
図 1-2-23.	SUM1-V における各発振パラメータセットにおける周波数成分	79
図 1-2-24.	デコンボリューション処理(京都大学防災研究所, 2022)	80
図 1-2-25.	BKOM5-V における SUM1-V を用いたデコンボリューション結果。太線は BAA2022 を、細線は BAA2020 を示す。	80
図 1-2-26.	エアガン近傍ハイドロフォン波形の比較(再掲)。太線: BAA2022, 細線: BAA2020。	81
表 1-2-8.	等価振源波形の切り出しに用いた時間窓	82
図 1-2-27.	NFH デコンボリューション結果 BAA2020 (太線) と AAA2020 (細線) を示す。両者は 5s 以降でよく一致している。Xcor max は 4.5~10 秒の区間における相互相関の最大値と最大値をとるラグ時間を示す。	82
図 1-2-28.	NFH 波形を用いた BAC2022 デコンボリューション結果と AAA2020 デコンボリューション結果。Xcor max は 4.5~10 秒の区間における相互相関の最大値と Tmax は最大値をとるラグ時間を示す。(a)最初のバブル相までを用いた結果、(b)1 番目のバブル相までを用いた結果、(c)3 番目のバブル相までを用いた結果、(d)バブル相の振幅が収束するところまでを用いた結果をそれぞれ示す。	83
図 1-2-29.	NFH 波形を用いた BAA2022 デコンボリューション結果と AAA2020 デコンボリューション結果。Xcor max は 4.5~10 秒の区間における相互相関の最大値を、Tmax は最大値をとるラグ時間を示す。(a)最初のバブル相までを用いた結果、(b)2 番目のバブル相までを用いた結果、(c)3 番目のバブル相までを用いた結果、(d)バブル相の振幅が収束するところまでを用いた結果をそれぞれ示す。	84
図 1-2-30	BAA2022(a)と BAC2022(b)のハイドロフォン配置の模式図。緑矢印は水中の圧力波の伝播を示し、図下方の青矢印は地下構造に入射する地震波を示す。	85
図 1-2-31.	水底ハイドロフォン波形(a)と(b)それを用いたパラメータセット BAA2022 のデコンボリューション結果とパラメータセット BAC2022 のデコンボリューション結果。(c)通常型ハイドロフォンによるデコンボリューション結果。	86
図 1-2-32.	参照波形図。a)BAC2022、b)BAA2020、c)AAA2020。いずれも上下動成分を示す。各波形記録を貫く垂線は後続の表 1-2-9 に整理されている後続相の到来時刻を示す。	88
表 1-2-9.	明瞭な位相群	88
図 1-2-33.	参照記録(上下動成分)。BAA2020 デコンボリューション結果+AAA2020 デコンボリューション結果+BAC2022 デコンボリューション結果によって制作した。	89
図 1-2-34.	専用水槽構想図	91

図 1-2-A1. 住吉池湖底地形断面図。(a)は図 1-2-2(c)の A-A' 断面、(b)は同図の B-B' 断面を示す。 .....	92
図 1-2-A2. 令和 4 年における住吉池の水位変化。水位標 0 m は標高 36.2 m に対応する。令和 4 年では満水期と灌漑終了期との水位差は約 5 m に達する。 .....	93
図 1-2-A3. 令和 4 年 12 月 18 日における水温測定結果。エアガンポンツーンの東方 10m 付近における水中ドローン(Chasing m2)組み込み水温計による測定。 .....	94
図 1-2-A4. 近傍観測センサー配置図 左：平面図、右：側面図 (Spare NFH 側より) ..	95
図 1-2-A5. 近傍観測波形。ch. 1 はタイムブレイク (エアガン制御信号)、ch. 3 - ch. 5 は SUM1 速度記録(V, NS, EW の順)、ch. 15 - ch. 17 は SUMK1 加速度記録(V, NS, EW の順)を示す。 .....	96
図 1-2-A6. 近傍観測波形クローズアップ。 .....	96
図 1-2-A7. 水中衝撃測定波形 (a) エアガン中心起点オフセット距離 5 m 地点、(b)エアガン中心起点オフセット距離 10 m 地点。 .....	97
図 1-2-A8. SUMK1 における加速度記録。 .....	98
図 2-1-1-1. 始良カルデラ西縁の BM2474 の BM2469 (鹿児島市) に対する相対上下変動および桜島の噴火による噴出物量の時間変化。 .....	100
図 2-1-1-2. GNSS 観測点の位置。 .....	102
図 2-1-1-3. SVOG を基準点として求めた SNJ2、BNTJ、OSKB、WARI、KGFP、KIHR および SRHM 観測点の日毎の位置。 .....	103
図 2-1-1-4. 機器再設置後の TKE0 観測点 (TKE0)。 .....	104
図 2-1-1-5. 再設置後の MAKI 観測点 (MAKI)。 .....	105
図 2-1-1-6. 中ノ島 (NAKN) における GNSS キャンペーン観測の機器設置状況。 .....	105
図 2-1-1-7. 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。 .....	106
図 2-1-1-8. 2017 年-2022 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。 .....	107
図 2-1-1-9. GNSS 基線解析による 2019 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。見やすさのため桜島内の観測点の一部を省略した (以降の図も同様)。 .....	110
図 2-1-1-10. GNSS 基線解析による 2019 年 11 月-2022 年 11 月の GNSS 観測点の水平変位 左図：テクトニックな変動を補正する前の変位 (黒矢印、図 2-1-1-9 に示したものと同じ) 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 .....	111
表 2-1-2-1 GNSS キャンペーン観測の実施期間と連続観測点をあわせた観測点数 .....	112
表 2-1-2-2 GNSS キャンペーン観測による圧力源の位置と体積変化 .....	113



図 2-1-2-1	水準測量による上下変位 (2019 年 1 月-2021 年 11 月)	114
図 2-1-2-2	GNSS 観測による水平変位と水準測量による上下変位を統合した圧力源解析結果。黒矢印：変位の観測値、赤矢印：モデルから予測される変位、A：始良カルデラ下の圧力源の位置、S：桜島南岳直下の圧力源の位置。灰色の楕円内の観測値を圧力源解析に使用した。	115
表 2-1-2-3	圧力源解析で得られた圧力源位置と体積増加量	116
図 2-1-2-3	MAKI-YOSI 間の水平距離 (m)	117
表 2.1-2-4	有限要素法モデルで使用した剛性率	118
図 2-1-2-4	回転楕円体圧力源の形状・位置と節点分布の例。左図の破線の断面。A、S はそれぞれ始良カルデラ下、桜島南岳直下の圧力源の水平位置を示す。	118
図 2-1-2-5	回転楕円体圧力源による地表変位のモデル計算結果。距離は圧力源中心から北方に取った水平距離、V/H は圧力源の縦横比を示す。	119
図 2-1-2-6	有限要素法モデルおよび茂木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。●●●は回転楕円体圧力源を用いた有限要素法モデル、○は茂木モデルによる計算値、・は観測値。	120
図 2-1-2-7	圧力源の縦横比と計算値と観測値の残差二乗和の関係。破線は茂木モデルによる値。	121
図 2-1-2-8	圧力源の縦横比と体積変化量の関係。破線は茂木モデルによる値。	121
図 2-1-2-9	為栗・他 (2022) の S 波低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。	122
図 2-1-2-10	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。	123
図 2-1-2-11	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。	123
表 2-1-2-5	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。	123
図 2-1-3-1	鹿児島県による降灰観測点の分布 (鹿児島県、2022 を改変)。	125
表 2-1-3-1	鹿児島県による降灰量調査結果。	126
図 2-1-3-2	鹿児島県の降灰観測点における月別降灰量と南岳からの距離の関係 (2022 年 8 月)。	127
図 2-1-3-3	桜島から放出された月別推定総降灰量とその累積値 (1978 年 6 月以降)。	127
図 2-1-3-4	GNSS 観測点 MAKI と YOSI の間の水平距離の時間変化 (m)。右下に MAKI、YOSI および体積変化量の算出に用いた圧力源の位置 (A、LS) を示す。	128
図 2-1-3-5	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 $2500\text{kg}/\text{m}^3$ および $1000\text{kg}/\text{m}^3$ とした場合のマグマ供給量について示す。圧力源における体積変化および月別火山灰放出量 (縦棒) も合わせて示した。	129
図 2-1-3-6	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 $2500\text{kg}/\text{m}^3$ および $1000\text{kg}/\text{m}^3$ とした場合のマグ	

マ供給量について示す。圧力源における体積変化および月別火山灰放出量（縦棒）も合わせて示した。 . . . . .	130
図 2-2-1. 本項目のロードマップ . . . . .	135
図 2-2-2. 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。 . . . . .	136
図 2-2-3. 海底地盤変動観測装置 . . . . .	137
表 2-2-1. 水深調査使用機材 . . . . .	138
表 2-2-2. 調査経過 . . . . .	139
図 2-2-4. a1 地点、a2 地点 今回の測深は a1 地点、a2 地点を含む領域を連続して実施した。(海上保安庁提供図に加筆) . . . . .	141
図 2-2-5. 当初予定調査測線図 . . . . .	142
図 2-2-6. 魚探センサー取り付け金具（パイプ長 1m） HONDEX GPS つきプロッタ魚探 HDX-9S 本体 2 kg . . . . .	142
図 2-2-7. 計測機器構成図 . . . . .	143
図 2-2-8. 実際のセンサー取り付け (a) ステー張り作業（目標②にて）、(b) センサー基台と GNSS アンテナの位置関係（センサー上げ状態） . . . . .	143
図 2-2-9. 水中ドローン Chasing m2 このほかにコントローラを使用して操縦する。 . . . .	144
図 2-2-10. 測定結果処理の概念 結果として得られる水深推定値は LWL（朔望平均干潮水位）を基準とした値。 . . . . .	144
図 2-2-11. 水深測定結果 コンターは LWL を基準とした水深(m)。赤十字の場所が候補地点。当初計画地点の約 200m 北北東。青丸は当初計画地点。 . . . . .	145
図 2-2-12. 水中ドローンによる海底撮影画像。水深 34m 図 2-2-11 中の緑破線内の地点と思われる。目標⑩でドローンを投入したが潮に流され、目標⑩より西側で着底した。 . . . . .	146
図 2-2-13. 2 軸実験台 IIA。 . . . . .	148
図 2-2-14. 実験機器結線 . . . . .	149
図 2-2-15. データ処理の流れ . . . . .	150
図 2-2-16. 測位実験稼働状況 . . . . .	151
図 2-2-17. 測位点 F 傾斜補正済み測位値日平均時系列 . . . . .	152
表 2-2-3. 日平均時系列の統計 . . . . .	152
表 2-2-4. 定常点間の測位結果の統計（京都大学防災研究所，2022 による） . . . . .	152
図 2-2-18. 日平均値分布。傾斜角補正後の測位点 F 測位値分布。15 秒データ全数（N=169707 エポック）の分布を示す。(a) 上下座標、(b) 南北座標、(c) 東西座標。 . . . . .	154
図 2-2-19. 台風 14 号(T2214) 上陸直前の測位結果時系列。アンテナ A 変位量を青曲線で、測位点推定結果のずれを橙曲線で表す。 . . . . .	154

図 2-2-20.	台風 14 号(T2214)上陸直前の主アンテナ測位結果と傾斜補正結果の平面分布。 青点はアンテナ A の測位結果、橙点は傾斜補正後の F 点推定値を示す。 . . . . .	155
図 2-2-21.	台風 14 号(T2214)上陸直前の傾斜補正後の F 点測位値の分布。(a)上下座標、 (b)南北座標、(c)東西座標。 . . . . .	156
図 2-2-22.	気象観測点 SZKM(京都大学防災研究所, 2022) . . . . .	157
図 2-2-23.	SZKM における気象観測。2021/10/15 - 2022/9/23 の期間の 1 日値を示す。(a) 平均風速 (橙) および最大風速 (青)、(b)最高気温 (橙) および平均気温 (青)、最低 気温 (灰)、(c)最大湿度 (橙) および平均湿度 (青)、最低湿度 (灰)、(d)バッテリー電 圧 (青) と機器温度 (橙)。 . . . . .	158
図 2-2-24.	SZKM における台風 14 号通過時の風速変化 (a) 10 分平均値。青曲線は 10 分平 均風速を示し、橙点は平均風向を示す。(b)瞬間最大風速。青曲線は瞬間最大風速を、 橙曲線は風速測定時の測定エラー回数を示す。 . . . . .	159
図 2-2-25.	二俣潮位観測点見取り図 (a) 桜島島内位置図、(b)二俣避難港建物配置 . . .	160
図 2-2-26.	二俣潮位観測点。中央の鉄蓋が潮位観測井。 . . . . .	161
図 2-2-27.	二俣潮位観測点観測井内。中央上の塩ビパイプ内にセンサーを装着している。 . . . . .	161
図 2-2-28.	二俣潮位観測点構造 . . . . .	162
図 2-2-29.	潮位観測値例。 . . . . .	163
図 2-2-30.	日平均潮位の推移。青曲線は FUTT の日平均潮位を示し、橙色曲線は黒神潮位 観測所 (KURT) の日平均潮位との差を示している。 . . . . .	164
表 2-2-6.	海底地盤変動観測装置設計用環境 . . . . .	165
図 2-2-31.	海底地盤変動観測装置全体組立図。図中寸法の単位は mm。 . . . . .	166
表 2-2-7.	海底地盤変動観測装置建造の進捗 . . . . .	167
図 2-2-32.	海底地盤変動観測装置 GNSS アンテナ台 (倒立状態) . . . . .	169
図 2-2-33.	海底地盤変動装置作業台デッキ (東面を下にした状態) . . . . .	169
図 2-2-34.	海底地盤変動観測装置上部鋼管最上部 . . . . .	169
図 2-2-35.	海底地盤変動観測装置浮力体 (気密検査中) . . . . .	170
図 2-2-36.	海底地盤変動観測装置ユニバーサルジョイント。上下端四隅に仮止め材をつけ た状態を示す。仮止め材は納品時に撤去された。 . . . . .	170
図 2-2-37.	海底地盤変動観測装置アンカー (日立造船提供) . . . . .	171
図 2-2-38.	組み上がり後全景。2022 年 2 月 28 日撮影。 . . . . .	171
図 2-2-39.	全体の姿 . . . . .	172
図 2-2-40.	設置完了 (北東側から撮影) . . . . .	173
表 2-2-8.	設置パラメータ . . . . .	173
表 2-2-9.	搭載機器 . . . . .	174
表 2-2-10.	海底地盤変動観測装置想定点検項目案 . . . . .	175
図 3-1.	(a, b) 調査地の位置図。 . . . . .	180
図 3-2.	本研究で用いたモデルにおける弱体化係数 $f$ の空間分布(式(2)参照)。 . . . .	187

図 3-3. M1(a, c, e, g)とM2(b, d, f, h)の変動源モードに対する粘弾性応答における $f_e = \eta_0 / \eta_a$ のコンターを $\Phi$ と $\Theta$ のパラメータ空間で示した図。 . . . . .	193
図 3-4. $\Phi$ と $\Theta$ の組み合わせで、BM2469 に対する BM 2 4 7 4 における相対隆起量に関して、変動源モード M1 に対する粘弾性応答が $\Delta t = 0.2 \tau_0$ の期間で $f_e = \sim 20$ となるような、LVZ モデルの弱化係数 $f$ の空間分布。(図 3 の赤丸参照)。 . . . .	194
図 3-5. $z_c = 15$ km の LVZ モデルの予測。(赤) $\Phi = 0.63$ km、 $\Theta = 2.2$ km、(青) $\Phi = 1$ km、 $\Theta = 1.1$ km、(緑) $\Phi = 2.5$ km、 $\Theta = 0.63$ km (図 3c、d の赤丸参照) と弾性モデルの (灰色) の場合。 . . . . .	195
図 3-6. $z_c =$ (a, d, g) 13、(b, e, h) 17、(c, f, i) 19 km の LVZ モデルと (灰色の線) 弾性モデルの予測量。(a, b, c) $\Omega$ 、(d, e, f) $\Delta V$ 、(g, h, i) Omori (1916)、Eto et al. (1997)、Yamamoto et al. (2013) が報告した観測 (丸) と比較した BM2469 に対する BM2474 での相対的隆起予測。 . . . .	197
図 3-7. (赤) $\Phi = 0.63$ km、 $\Theta = 2.2$ km、(青) $\Phi = 1$ km、 $\Theta = 1.1$ km、(緑) $\Phi = 2.5$ km、 $\Theta = 0.63$ km の LVZ モデルと (灰色) 弾性モデルにおける BM2469 に対する BM 2 4 7 4 の地表面隆起量の予測量を、Omori (1916)、Eto et al. (1997)、Yamamoto et al. (2013) が報告した観測値 (丸) と比較した図。 . . . . .	198
図 3-8. (赤) $\Phi = 0.63$ km、 $\Theta = 2.2$ km、(青) $\Phi = 1$ km、 $\Theta = 1.1$ km、(緑) $\Phi = 2.5$ km、 $\Theta = 0.63$ km の LVZ モデルと (灰色) 弾性モデルにおける BM2469 に対する BM 2 4 7 4 の地表面隆起量の予測量を、Omori (1916)、Eto et al. (1997)、Yamamoto et al. (2013) が報告した観測値 (丸) と比較した図。 . . . . .	199
図 3-10. 地表面における $t' = t/\tau =$ (a) 0+ (瞬間的膨張直後)、(b) 5、(c) 10、(d) 100 での水平面変位 $U_x' (= U_x/s_{co})$ のコンター図。 . . . . .	207
図 3-11. 地表面における $t' =$ (a) 0+ (瞬間的膨張直後)、(b) 5、(c) 10、(d) 100 での水平面変位 $U_y' (= U_y/s_{co})$ のコンター図。 . . . . .	208
図 3-12. 粘弾性地表面変位の時間変化の予測量。 . . . . .	209
図 3-13. 粘弾性地表面変位の時間変化の予測量。 . . . . .	210
図 3-14. 粘弾性地表面変位の時間変化の予測量の変動源の中心からの距離関数プロファイル。 . . . . .	211
図 3-15. シル状変動源の 3 つの膨張・収縮パターンに対する粘弾性変位の時間変化。 . . . .	213
図 3-16. 図 3-15 に示した変動源の 3 つの基本挙動の組み合わせによって得られた $t' = 5$ での噴火に対する粘弾性挙動。 . . . . .	214
図 3-17. 変動源の膨張率の変化に対する粘弾性挙動。 . . . . .	215

# 1. 令和4年度事業の委託研究の内容と成果の概要

## (1) 活動的カルデラ火山の地下構造調査

本項目は本プロジェクトにおける研究の骨格である。本項目を構成する小項目とその適用範囲を図1-1に示す。自然地震観測による地殻構造調査と人工地震観測による地下構造変化の検討が含まれている。自然地震観測による地殻構造調査は地下を通過する地震波の属性から地下物性の空間的分布の把握が可能な特性があり、始良カルデラの地下構造を構成する物性の空間分布に関する観測量を提供する。また人工地震観測を用いた活動的カルデラ火山の地下におけるマグマ活動による物性の時間変化の検出手法についても、始良カルデラをテストフィールドとして検討を加える。

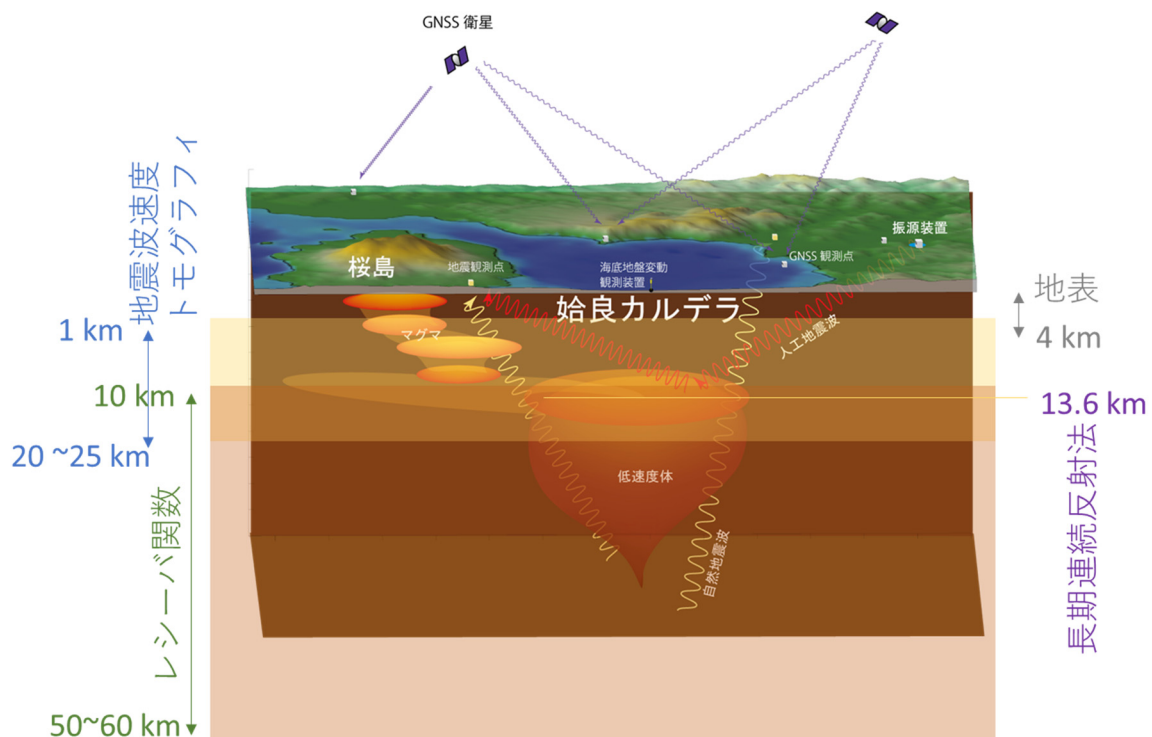


図1-1. 本項目を構成する小項目とその適用範囲

### (1) 1. 始良カルデラにおける地震観測による地殻構造調査

本項目では地震波走時トモグラフィ（以下、地震波トモグラフィ）とレシーバ関数を組み合わせて用いて始良カルデラの地震波速度構造を解明することによって、現時点での始良カルデラの地下のマグマだまりの広がりやを把握し大規模噴火ポテンシャルの評価の基礎データを得ることを狙っている。令和4年度は始良カルデラの深部の地下構造モデルを高精度化し、始良カルデラ下のS波低速度領域の広がりとその内部の地震波伝播の詳細について検討を加えることになっている。

地震波トモグラフィは近地地震波のP波初動到来時刻およびS波初動到来時刻の観測値から、これらの初動が伝播してきた経路上の地震波速度分布を得る手法であり、データとして用いた波長より大きなスケールの地震波速度分布を与える。また、レシーバ関数は地表で得られた遠地地震波記録に含まれるPs変換波の走時と振幅との観測値から、地震波が伝播してきた経路上の地

震波速度境界面の分布と境界面のコントラストの強さとを得る手法であり、その分解能はおおよそ用いる地震波波長の1/4程度である。

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

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

本項目ではトモグラフィ解析とレーシーバ関数解析を並列に実施しているが、これは次のような意味を持つ。トモグラフィ解析では観測された地震波走時を説明するために波線追跡法による走時計算をもとに構造モデリングを行うが、実際に用いる波線追跡法は速度勾配が小さいことを前提に構成されたものであるため、大きな速度勾配のある領域では波線追跡が収束せず走時計算が破綻しやすい傾向がある。一方、レーシーバ関数解析では速度コントラストのある境界をP波が通過する際に発生するPs変換波を解析の対象としているために、大きな速度コントラストでも走時計算の破綻が起こらない。そのためにトモグラフィ解析の結果に表れた顕著な速度異常領域に対して、これにレーシーバ関数解析を併用することで始良カルデラの地下構造の地震波速度の大きさに裏付けを加えることができる。

令和4年度はこれまでに展開された観測点を維持し地震観測を継続してデータ取得を行った。成果としてデータ蓄積は利用可能なレベルに達しており、これらに加えて令和2年度に増設した始良カルデラ北部および西部の広帯域地震観測点が順調に稼働することによって始良カルデラ内部を通過する地震波線に対する観測が強化された。

地震波トモグラフィ解析のロードマップを図1-2に示す。令和4年度の地震波トモグラフィでは解析の対象深度を45 kmまで拡張し、これまでに明らかにされたS波低速度異常領域の下限を制約するとともに、始良カルデラ南部桜島南西部の深さ35 kmに $V_p/V_s$ 比が大きい領域を見いだした。トモグラフィに使用した自然地震の読み取り値はP波が16,110、S波が11,838であり、このほかに人工地震による読み取り値を加えて解析が行われた。

また、S波低速度異常領域の範囲を制約するための補足的情報として、近地地震波の振幅減衰の調査を行った。地震波の振幅減衰を定量的に扱う前段階として必要な2つの整理事項、観測点から見た多方位データの抽出と、観測点直下のサイト特性の評価とを実施した。その結果、始良カルデラ下を通過してくる波線にはサイト特性の効果を大幅に超える振幅減衰がみられることが明らかになった。

令和4年度のトモグラフィの成果によってS波低速度領域の下限が制約され、当該領域でP波速度が平均速度より-5%以下となる領域の体積は約380 km<sup>3</sup>に更新された。P波速度の-5%をメ

ルト存在領域とするとメルトは深さ 15 km より浅い領域で最大 26.6 km<sup>3</sup> (380 km<sup>3</sup>×7 %) となり、深さ 12 km-22 km の S 波速度 2.45 km/s 以下をメルト存在領域とすると最大 21 km<sup>3</sup> (300 km<sup>3</sup>×7 %) となる。

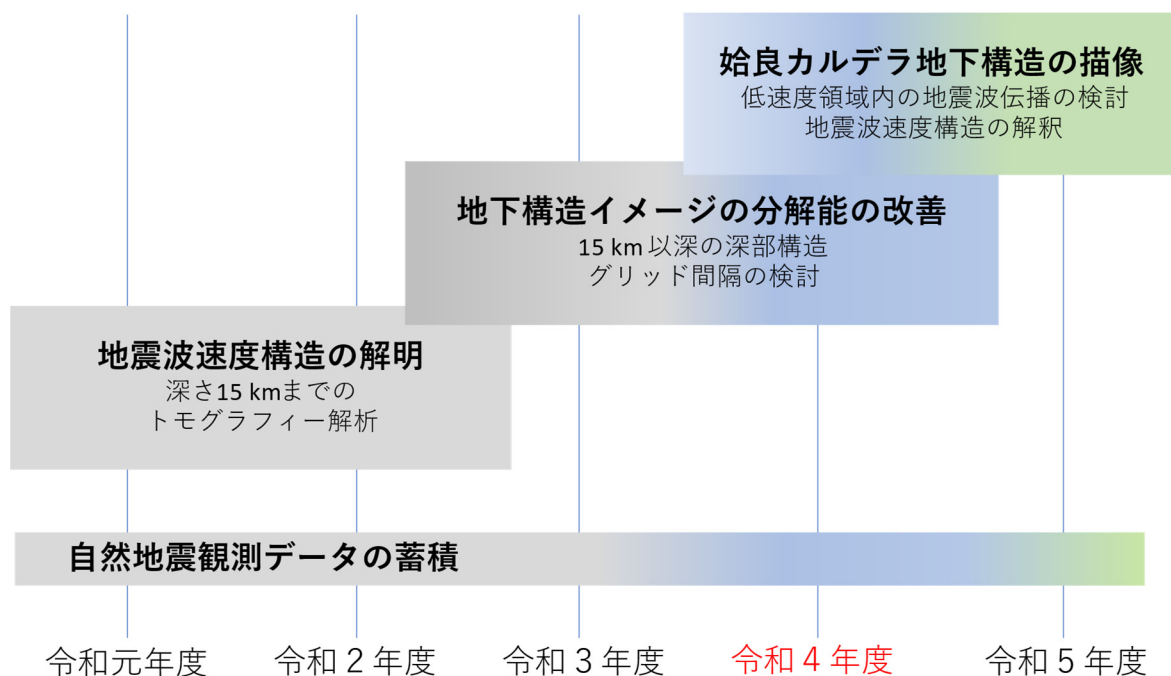


図 1-2. トモグラフィ解析ロードマップ

レーバ関数解析のロードマップを図 1-3 に示す。令和 4 年度のレーバ関数解析ではレーバ関数インバージョンによる S 波速度構造の推定、始良カルデラの S 波速度構造のマッピングを実施した。レーバ関数解析では本委託研究によって得られた令和元年度の記録を 200 本、令和 2 年度の記録を 123 本使用した。

レーバ関数インバージョンは、観測記録に対応するそれぞれの波線に対するレーバ関数に含まれる全ての後続相をよりよく説明できる S 波速度構造を遺伝的アルゴリズムを用いて求めるもので、ここでは得られた S 波速度値をさらに空間的にマッピングして始良カルデラの S 波速度構造を表現した。この手法は Janiszewski et al. (2020) が単にモホ面における PS 変換波の走時残差だけを考慮してフォワードモデリングでクリーブランド火山の S 波速度構造を議論したのに比べて、より詳細な構造の議論ができる方法である。

レーバ関数インバージョンの結果、始良カルデラとその周辺では全般的に標準的な速度構造（例えば気象庁が震源決定に用いる JMA2001 (上野・他, 2002)) より S 波速度が遅い傾向が明らかになった。また、始良カルデラの内部では深さ 40 km でも S 波速度が 3.3 km/s と非常に遅いことが明らかにされた。

さらに始良カルデラの S 波速度構造のマッピングの結果、深さ 10 km から 35 km まで、始良カルデラを中心として広範囲に低速度異常域が分布しており、とくに深さ 15 km において低速度異

常が顕著である。これは、湾奥北部の観測点 BEN の S 波速度構造において、深さ 13 km～20 km に低速度層が見られることと対応している。20 km 以深にも桜島～湾奥部を中心に低速度異常域が続いている。このことは先述のトモグラフィの速度構造に裏付けを与えるものである。

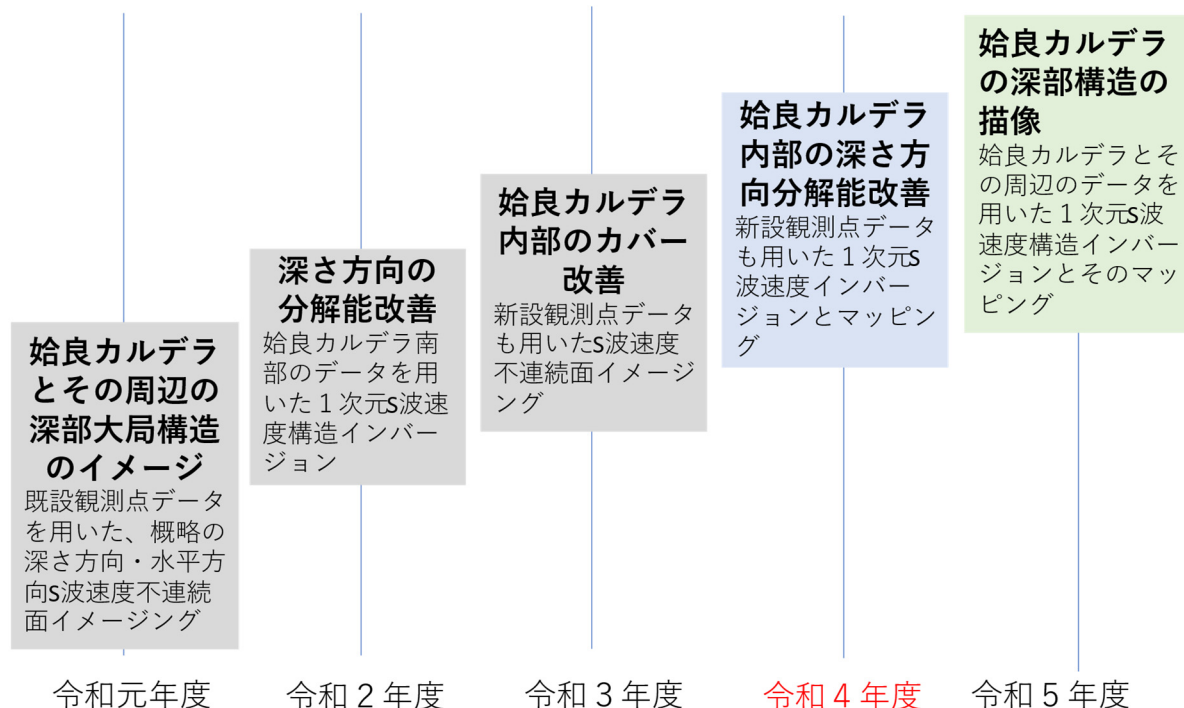


図 1-3. レシーバ関数解析ロードマップ

後年度では始良カルデラの深部の地下構造モデルの高精度化を図る。そして両解析の比較を行い、始良カルデラの地下構造について既往研究と合わせて全体像をまとめる。具体的には、レシーバ関数および地震波減衰領域のための波線を増やして低速度領域の構造をより詳細にしていく。また、始良カルデラで発生する構造性地震の震源およびメカニズム解などの情報を加えて地下構造モデルを検討する。

#### (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

本項目では活動的カルデラの地下における火山活動を検出することを目的として、制御振源を用いた能動的な手法である長期連続反射法地震探査の有効性を検討する。長期連続反射法では人工地震波を用いて、始良カルデラの地下深部のマグマだまりなどで発生する反射地震波/変換反射地震波を観測する。長期連続反射法では自然地震より短い波長の地震波を用い、波長の 1/4 程度の分解能がある。このことは始良カルデラの地下構造における S 波低速度体の形状、特にその広がりの上限を先述の自然地震波解析結果よりも高い分解能で制約することが期待される。さらに、長期にわたり継続して繰り返し人工地震観測を実施し、始良カルデラの火山活動に伴う地下構造変化を地震反射波の変化として検出する構想である。令和 4 年度は令和 3 年度までにまとめ



られた基礎実験の成果をふまえて、人工地震波を発振する基礎実験観測を繰り返し行い、振源波形の安定性を検証した。

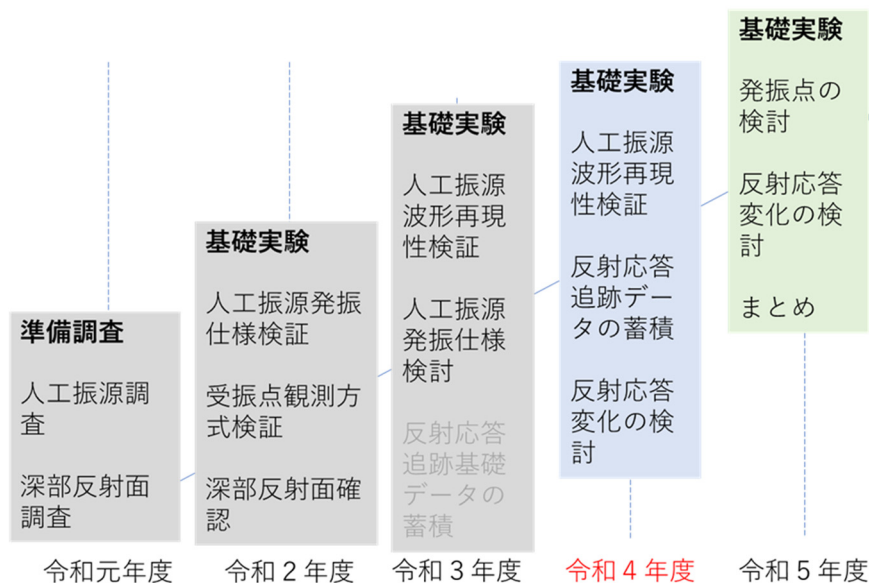


図 1-4. 長期連続反射法の検討ロードマップ

図 1-4 に長期連続反射法の検討のロードマップを示す。令和 4 年度は振源波形および観測波形の再現性について検証を行うことを目的に基礎実験を行った。

基礎実験では令和 2 年度基礎実験の結果を検証して最適とされたエアガンサイズのエアガンを、最適空気圧で作動させて発振を行った。エアガンは令和 3 年度に調達したものを使用し、発振点は令和 2 年度と同様に始良市住吉池を利用して、令和 2 年度と同じ位置に設置された。令和 4 年度実験では住吉池の水位が令和 2 年度に比べて約 0.5 m 高くなっていた。既往の同様な研究では Liu et al. (2021) が発振点として用いた貯水池水位が変化することによる振源特性の変化を報告したことを考慮して、令和 4 年度と令和 2 年度との水位差を考慮して 2 つの条件による実験を実施した。すなわち、令和 2 年度と同じエアガン水深 10 m における発振と、令和 2 年度と同じ水底クリアランス距離（エアガン水深 10.5 m）における発振とである。また、観測点は発振点周辺と始良カルデラ対岸側に令和 2 年度実験と同じ機材で同じ展開を行った。

実験結果は次のようなものであった。始良カルデラ対岸で得られた観測記録では水底クリアランス距離を令和 2 年度実験と同じにした場合にもっとも良い波形の一致が認められた。一方、近傍ハイドロフォン波形の相違が認められたほか、発振点周辺における後続相部分のピーク到来時刻の繰り上がり、空振振幅の減少が認められた。また始良カルデラ対岸における波形記録においてもエアガン深度の差による初動部分の相違、一部の後続相ピーク到来時刻の繰り上がりが認められた。

また、振源効果除去の手法の検証では、令和 4 年度の実験で得られた新しいデータセットを追加して検証を行った。また、振源効果の除去では 2 通りの等価振源波形について検討を行った。令和 3 年度に提唱された最近接陸上観測点の速度記録を等価振源波形として用いる場合と、今回

あらたにエアガン直上のハイドロフォン記録を等価振源波形として用いる場合とを比較した。前者の効果は令和3年度で報告された通りの結果を得たが、後者はそれよりも良い結果を与えた。しかし、令和4年度実験におけるエアガン水深10mの発振記録の初動部分はどちらの方法を用いても振源効果の除去ができなかった。これは発振点として用いた住吉池の水塊構造が影響している可能性がある。

このように他の目的で運用されている既存の貯水池を発振点として利用することは、水位をはじめとする発振波形を安定に得るための条件の管理が難しいことが判明した。次年度では管理不可能な条件を考慮する必要のない試験用の水槽を建造した上でエアガン発振実験を行い、今後の本格的な長期連続観測に必要な十分な水槽の建造に資する情報の取得が求められる。

## (2) 活動的カルデラ火山の火山性地殻変動とマグマ活動に関する調査

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

### (2) 1. 始良カルデラの火山性地殻変動データの蓄積

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

図1-5に始良カルデラの火山性地殻変動とマグマ活動に関する調査のロードマップを示す。令和4年度は令和3年度までに得られた始良カルデラの地下構造に関する知見を導入して地盤変動圧力源モデルによるマグマ供給量の推移を再検討する。

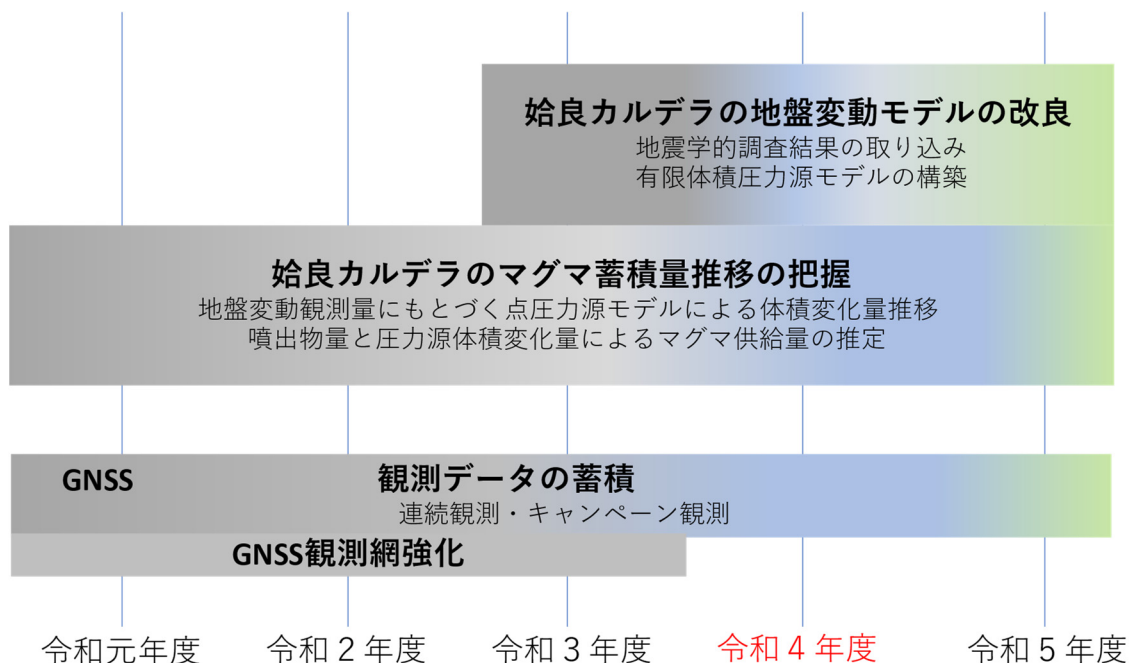


図 1-5. 始良カルデラの火山性地殻変動の検討ロードマップ

令和 4 年度は下記の内容を実施した。

- ・GNSS 観測の維持継続
- ・キャンペーン観測の実施
- ・始良カルデラへのマグマ供給量の推定
- ・有限体積圧力源を含む弾性変形モデルによる地盤変動の説明

GNSS 観測点の維持では既存の観測点（常設点および先行事業によってすでに展開された臨時点）と、本事業によって始良カルデラ内部に展開された観測点の維持観測を継続し、データの蓄積を行った。

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、2018 年 11 月－2021 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はほぼ一致する。

地盤変動から推定された地下の体積変化に、桜島から放出された噴出物量を加えて始良カルデラへのマグマ供給量を見積もった。茂木モデルによる体積変化を基に見積もった 2011 年以降 2022 年までの平均的なマグマ供給速度は  $8\sim 10 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$  であり、これまで知られている値と同等であった。2021 年 4 月以降はマグマ供給速度が  $8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$  で推移している。

マグマ供給量の推定精度向上のために圧力源モデルを改良する試みとして、為栗・他（2022）が示した始良カルデラ下の低 S 波速度領域を模した形状の多面体圧力源を有する有限要素法モデルを用いて楕円体圧力源による地表の変位を求め、圧力源の形状の違いによる差異を検討した。

検討の対象とした形状の異なる圧力源モデルのそれぞれでフォワードモデリングを実施したが、いずれも地表観測点の変位を説明できるパラメータセットを得られることが明らかにされ、

カルデラ縁辺部の陸上を中心とした観測網の結果だけでは最適な圧力源モデルの決定が困難である。本研究で計画されている海底地盤変動観測装置は、このような問題の解決に寄与すると期待される。さらに多面体圧力源を有する有限要素法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。また、媒質の物性にも最近の地震学的な知見、特に弾性定数の不均質な空間分布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。

## (2) 2. 始良カルデラにおける海底地盤変動観測の検討

本項目では、始良カルデラ内の海底における地盤変動観測デバイスの開発に取り組む。図 1-6 に本項目のロードマップを示す。

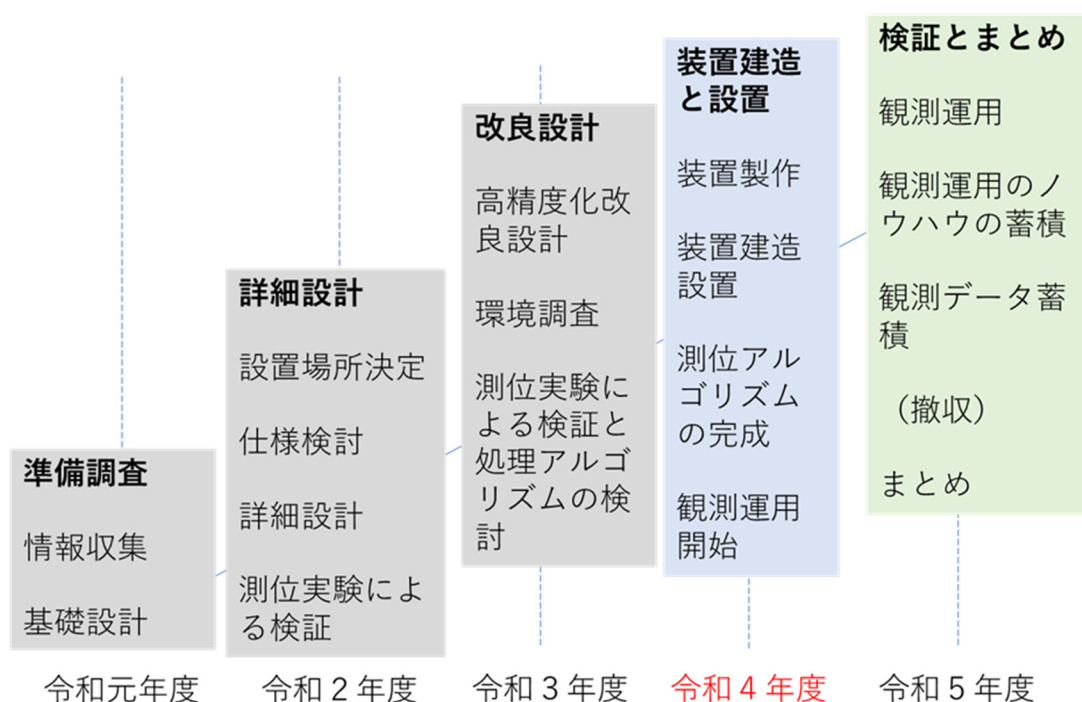


図 1-6. 始良カルデラにおける海底地盤変動観測の検討ロードマップ

令和4年度に実施した項目を下に列挙する。

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

令和4年度は令和3年度までに行われた改良設計から作成された仕様をもとに、海底地盤変動観測装置の構造部分（作業台部、ピラーおよび浮体部、ユニバーサルジョイント、アンカー部）の建造を行い、令和5年3月中には本装置の始良カルデラの海底への設置が実施された。

さらに海底地盤変動観測装置の海底への設置に先立ち、設置地点およびその周辺の環境調査を行った。われたほか、

設置予定点の水深調査は複数の設置候補地点を含む領域で年度前半に行われ、水深 30 m の候補地点を選定した。設置予定地点付近の気象調査を前年度にひきつづき継続した。

また、搭載機器とデータ処理方法の検証を目的とした測位実験を行った。搭載予定の観測システムハードウェアプロトタイプとともに 1 ヶ月あまりの運転試験を行うとともに、運転試験で得られたデータを用いて GNSS 測位結果補正方法について検証を行った。運転期間中に 1 回の台風接近と 1 回の台風直撃を経験したが、台風の強風下における揺動においても傾斜補正が機能することが確かめられた。また期間中は外的要因（火山灰堆積による欠測および停電による基準観測点欠測）による欠測が発生した以外は順調な作動が確かめられた。

次年度以降は令和 4 年度に設置された装置をもとに観測システムを構築して運用を行い、得られた変動データを周辺観測点の変動結果と比較検討することで観測の妥当性を検証する。

### (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

本項目では粘弾性を考慮した地殻構造モデルを用いて、地表面における測地学的観測データから始良カルデラの地下の体積変化を制約してマグマだまりへのマグマ供給速度を理解することを狙って研究を行っている。また、最終目標として粘弾性地殻構造モデルによる地盤変動評価ツールを構築することを狙っている（図 1-7）。

令和 4 年度は水準測量や GNSS により捉えられた地表面変位の上下・水平両成分から静的及び動的なマグマ蓄積状態を把握していくための科学的知見の整備として、3 次元有限要素モデルを用いてシミュレートした上部地殻でのマグマ給排出に対する粘弾性応答を精査し、地下のマグマ活動に対する粘弾性挙動の計算ツールの構築に取り組むとともに、始良カルデラ下の新たな地球物理学的研究成果を考慮した粘弾性地殻構造モデルのアップデートを進めて地下の物性構造を更新した。また、地下のマグマ活動に対して地表面に現れる水平変位における粘弾性の効果について定量的に記述し、GNSS 観測への適用性を検討した。GNSS を用いた火山モニタリングにおいては、変位の鉛直成分の誤差は、水平変位のそれに比して一般的に大きいため、粘弾性水平変位の特徴を把握しておくことは、GNSS で求められる水平変位から地下のマグマ活動を探ることに有用な知見である。

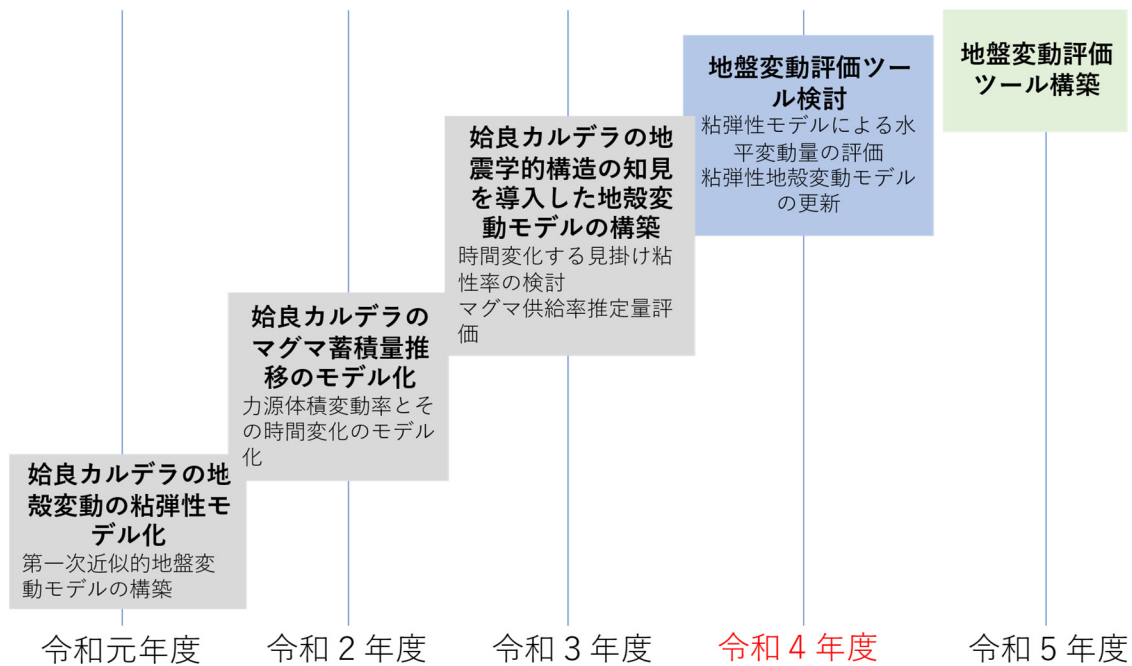


図 1-7. シミュレーションモデルによる火山性地殻変動の検討ロードマップ

昨年度研究に引き続き、令和4年度もマグマ変動源に対する線形 Maxwell 粘弾性応答に地殻粘性率空間変化が与える影響について、特にモデルパラメータの検証範囲をさらにひろげて3次元有限要素モデルを用いて継続して検討をおこなった。地球物理学的に推定された低粘性領域 (LVZ) が、噴火後の異なる段階における異なる有効均一粘性を予測し、1914年噴火後のどの段階においても始良カルデラおよびその周辺における測地データをうまく説明できるかどうかを評価した。

粘弾性地殻変動モデルの最新版への更新の結果、最新 LVZ モデルは、単純な一様粘性モデルよりも測地データをより良く説明することが明らかになった。1914年の噴火後、始良カルデラの火山性地殻変動が進むにつれて、変動速度を制御する粘性率が LVZ の内側のものから外側のものへと変化していくことがわかった。

また、粘弾性水平変位の特徴に関する整理の結果重要なことが判明した。シル状マグマ貫入に対する地表面の粘弾性水平変位について水平変位成分は、鉛直変位成分に比べて、より速やかに変位量が減じられていくことである。また、水平変位成分の向きが変わる変動中心からの距離は、鉛直変位成分のそれに比べて、遠方になることもわかった。この結果は地表における GNSS 観測結果として得られる水平変位を評価する際に重要な情報である。粘弾性の効果が発現する深さの変動源に対するこのような振る舞いが、これまでの測地観測で捉えられているかも含め、今後さらに検証すべき一つのポイントになりうる。

後年度はひきつづき、3次元有限要素モデルを用いてシミュレートした上部地殻でのマグマ排出に対する粘弾性応答を精査し、水準や GNSS により捉えられた地表面変位の上下・水平両成分から、静的及び動的なマグマ蓄積状態を把握していくための技術的知見の整備をおこない、上

層を弾性体、下層を粘弾性体とする二層媒質モデルを用いて、地下のシル状マグマ貫入とその後の消長に対する地表面変位応答の空間分布の計算ツールを構築する。

#### 参考文献

- Geshi, N., Yamada, I., Matsumoto, K., Nishihara, A., Miyagi, I. (2020) Accumulation of Rhyolite magma and triggers for a caldera-forming eruption of the Aira Caldera, Japan. *Bulletin of Volcanology*, 82: 44, <https://doi.org/10.1007/s00445-020-01384-6>.
- Liu, C., Yang, H., Wang, B., Yang, J. (2021) Impacts of Reservoir Water Level Fluctuation on Measuring Seasonal Seismic Travel Time Changes in the Binchuan Basin, Yunnan, China, *Remote Sensing* 13 2421.
- Janiszewski, H. A., Wagner, L. S., Roman, D. C., 2020, Aseismic mid-crustal magma reservoir at Cleveland Volcano imaged through novel receiver function analyses, *Scientific Reports, nature research*, 10:1780 | <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58589-0>.
- 為栗 健・八木原 寛・筒井智樹・井口正人(2022)始良カルデラ下の3次元地震波速度構造の高分解能化の試み、*火山*、67巻1号、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*、66巻2号、71-81.
- Yamasaki, T, Sigmundsson, F., Iguchi, M., 2022, Variable inflation of a magmatic deformation source beneath Aira caldera after the 1914 eruption of Sakurajima volcano: Inference from a linear Maxwell viscoelastic model constrained by geodetic data, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 421, 107446, <https://doi.org/10.1016/j.volgeores.2021.107446>.





## 2 研究報告

### (1) 活動的カルデラ火山の地下構造調査

#### (1) 1. 始良カルデラにおける地震観測による地殻構造調査

##### (1) 1.1. 始良カルデラ臨時地震観測点の維持運用

2022年度は地震観測点の増設を行っていない。始良カルデラ周辺に設置している16点の地震観測点において、今年度も地震観測を継続している(図1-1-1)。図1-1-1の黄○の観測点では、地震計はサイスマテック株式会社製SSV-003(3成分、固有周期1秒)とMark Products L4型(3成分、固有周期1秒)を使用、データロガーは白山工業株式会社製LS-8800を使用して現地収録を行っている。図1-1-1の赤○においては、1 Hz地震計SSV-003とモバイルによるテレメータ装置(白山工業株式会社製LT-7700)、図1-1-1の赤□においては、Nanometrics社製Trillium120Qの広帯域地震計とデータロガーは白山工業株式会社製LS-7000XTを使用し、京都大学防災研究所火山活動研究センターの定常観測点用のNTT回線を使用してテレメータしている。図1-1-1の黒□においては、Nanometrics社製Trillium120QおよびLT-7700を用いて現地収録で観測を継続している。

業務委託により現地収録の観測点において2ヶ月に1度のデータ回収とバッテリー交換を実施しており、2022年度の実施日を表1-1-1に示す。特に異常は発生していない。臨時地震観測および業務委託によるデータ回収とバッテリー交換は来年度も継続して実施する。

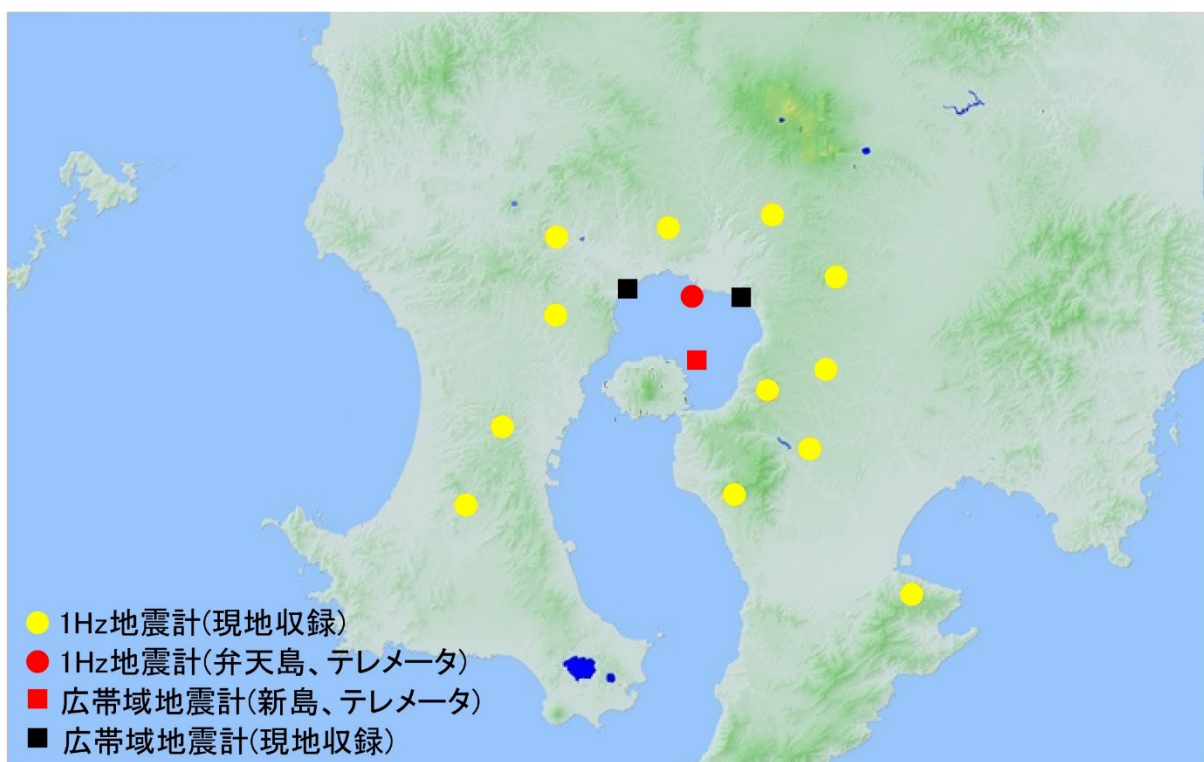


図1-1-1. 臨時地震観測点分布

表 1-1-1. 臨時地震観測のデータ回収およびバッテリー交換実施日

	実施日（多点のため作業は複数日）	異常報告
第 1 回	2022 年 4 月 12 日、15 日、18 日、19 日、20 日	なし
第 2 回	2022 年 6 月 10 日、15 日、17 日、24 日、29 日	なし
第 3 回	2022 年 8 月 10 日、12 日、17 日、22 日、24 日	なし
第 4 回	2022 年 10 月 11 日、12 日、19 日、21 日	なし
第 5 回	2022 年 12 月 9 日、16 日、26 日、28 日	なし
第 6 回	2023 年 2 月 3 日、7 日、8 日、10 日、14 日	なし

(1) 1.2. 3次元地震波伝播速度トモグラフィによる始良カルデラ地下構造モデル  
の高精度化

a) 深さ 45km までの始良カルデラ地下構造の推定

1) 目的

始良カルデラ周辺に設置した地震計により観測された地震波の P 波および S 波の到達時刻をデータとして、地震波トモグラフィ法により、始良カルデラ下の 3 次元的な P 波および S 波の地震波伝播速度構造を求める。地震波伝播速度が周辺より異常である場所を検出することによりマグマ溜りの位置やサイズを特定することを目的とする。本章では深さ 45 km 以浅（地殻内）に見出された地震波速度異常領域についての考察を行なう。

2) データ

昨年度（京都大学防災研究所，2022）に引き続き、本プロジェクトで始良カルデラ周辺に設置している臨時地震観測点（図 1-1-2-1 の黄色○）および京都大学防災研究所火山活動研究センターが設置している定常地震観測点（図 1-1-2-1 の赤○）に、南九州一帯に設置されている防災科研の Hi-net 観測点や JDX-net で流通している大学・気象台の地震観測点（図 1-1-2-1 の青○）を使用した。2008 年～2018 年に観測を行なった宮崎県の 5 点（図 1-1-2-1 の黒○）も使用した。臨時観測点ではデータロガーは近計システム社製 EDR-X7000、白山工業社製 LS8800 を使用し、100Hz～250Hz サンプルングで収録している。地震計は 2Hz3 成分型（近計システム社製 KVS-300）を 12 台、1Hz3 成分型（Mark Products L4）を 5 台設置し、観測を行ってきた。また、図 1-1-2-1 の黒□において Nanometrics 社製 Trillium120Q およびデータロガー LT-7700 にて 200Hz サンプルングで現地収録を行なっている観測点データも用い、計 47 点の観測点で得られた P 波、S 波到達時を用いた。

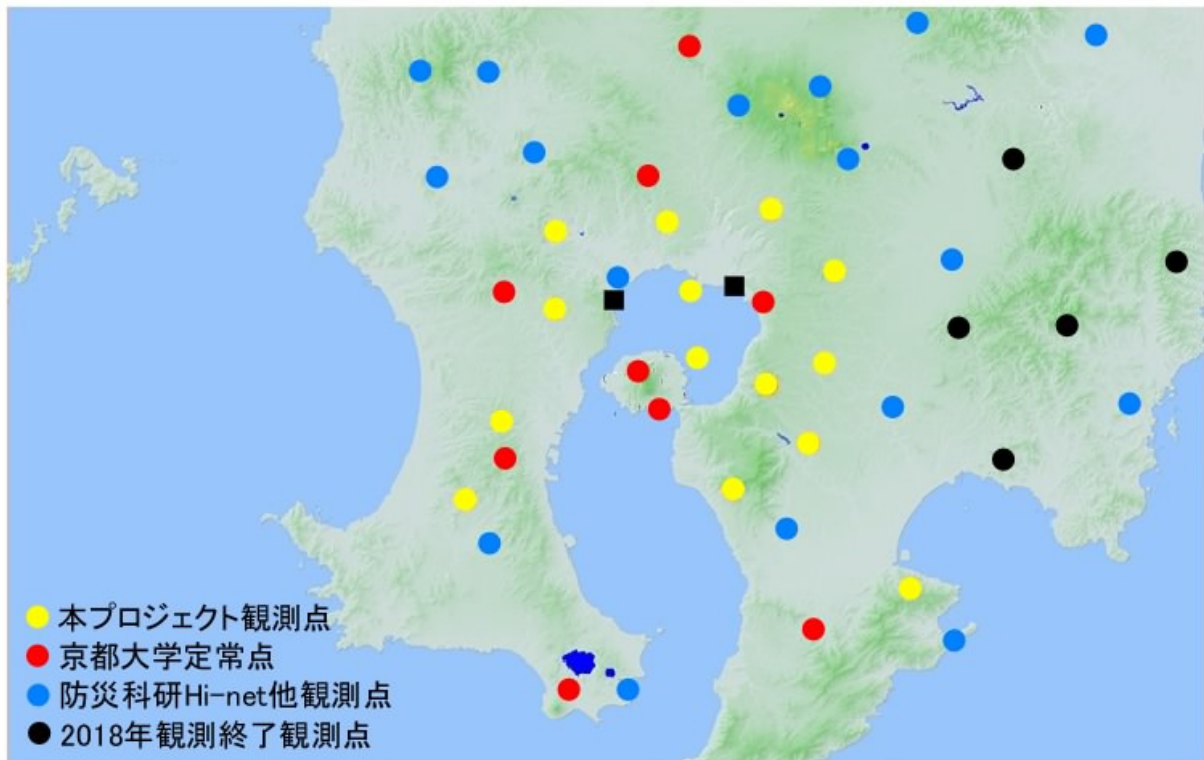


図 1-1-2-1. 地震波トモグラフィ解析に使用した地震観測点

地震波トモグラフィを行う上で、表層のより詳細な速度構造を得られれば、深部の解析結果の信頼性が向上すると考えられるため、解析に使用する到達時には京都大学防災研究所（2022）と同様に人工地震探査によるP波初動到達時を加えている。2008年に始良カルデラと桜島内を対象として実施されたダイナマイトを用いた人工地震探査（図 1-1-2-2）のデータを地震波トモグラフィ解析に使用することで浅部の地震波速度構造の精度を向上させている。この人工地震探査では直達P波を用いた3次元地震波速度構造の探査深度は約4 kmであり浅い領域の構造しか分からない。ダイナマイトを用いた人工地震ではS波は励起されないため、本解析に使用する人工地震データはP波初動の到達時のみである。

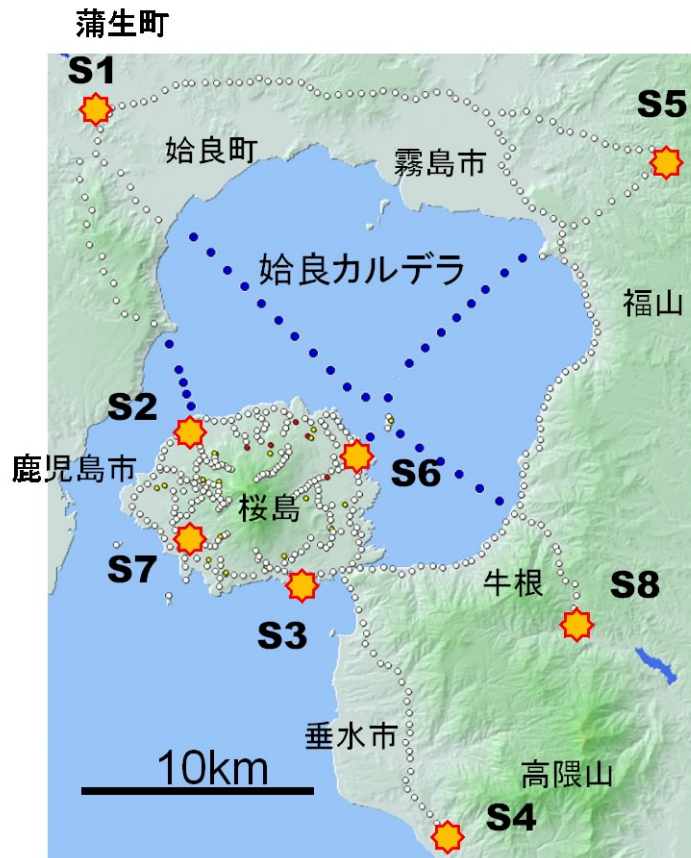


図 1-1-2-2. 2008 年人工地震探査の発破点（黄色）と地震観測点（白○と青○）の分布

上述の 47 点における自然地震の P 波、S 波到達時および人工地震データの直達 P 波を用いて 3 次元地震波速度構造解析を行った。2010 年以降に南九州一帯で発生した主にマグニチュード 2.0 以上の地震を対象として近傍で発生した地震については波線重複を避けながら、各観測点における P 波、S 波到達時の読み取り値をデータとして用いた。また、始良カルデラを通過する地震波線を多くするため、始良カルデラ周辺で発生した M1.5 程度の地震の P 波、S 波到達時も解析に使用した。M1.5 程度の微小地震では 1 イベントの初動読み取り数は少ないが、読み取り対象とするイベント数が増加するため解析領域を高分解能化できる。P 波、S 波とも 8 観測点以上で読み取り可能なイベントのみを解析に使用し、そのイベント数は 424 であった。図 1-1-2-3 に使用した地震の震源分布および表 1-1-2-1（本項末尾）にイベントリストを示す。地殻内と沈み込みの地震はほぼ同数を使用した。また、2008 年に行った始良カルデラを通過する人工地震探査の P 波初動読み取り値（井口・他，2009）を解析に追加することで、表層のより詳細な速度構造を得られれば、深部の解析結果の信頼性が向上すると考えられる。そのため、為栗・他（2022）と同様に解析に使用する到達時には人工地震探査による P 波初動到達時（井口・他，2009）を加えている。解析に使用した読み取り値は、自然地震 P 波が 16,110、自然地震 S 波が 11,838、人工地震 P 波が 3,121 である。

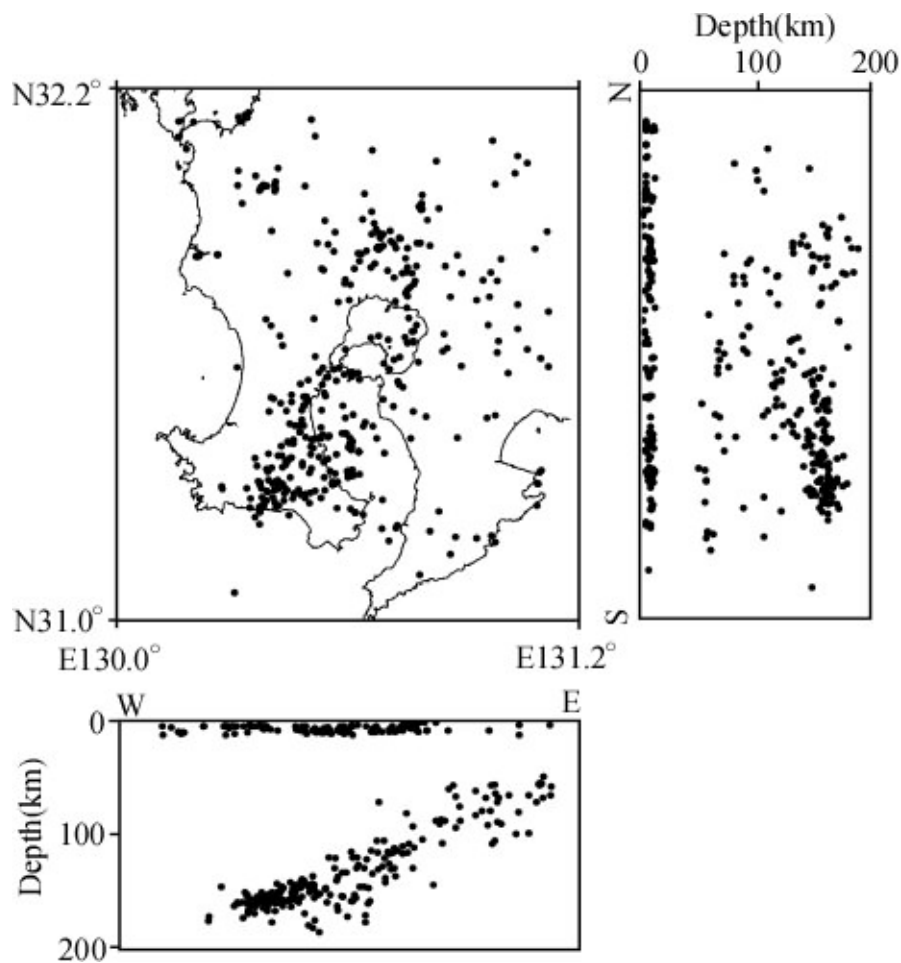


図 1-1-2-3. 解析に使用した 424 イベントの震源分布図

### 3) 解析方法

解析は京都大学防災研究所（2022）と同様の方法を使用している。地震波トモグラフィインバージョンは八木原・他（2010）の方法、グリッド空間は Thurber（1983）の配置を使用している。1次元および3次元速度モデル解析において、波線追跡は Pseudo-Bending 法（Um and Thurber, 1987）を用いている。3次元トモグラフィ解析の流れを図 1-1-2-4 に示す。解析精度の評価では用いた地震と観測点のデータセットと同じ組み合わせの疑似データを作成し、チェッカーボードテストを行い、結果として得られたパターンの戻りと、Resolution matrix の対角要素値（RDE）とで評価を行った。

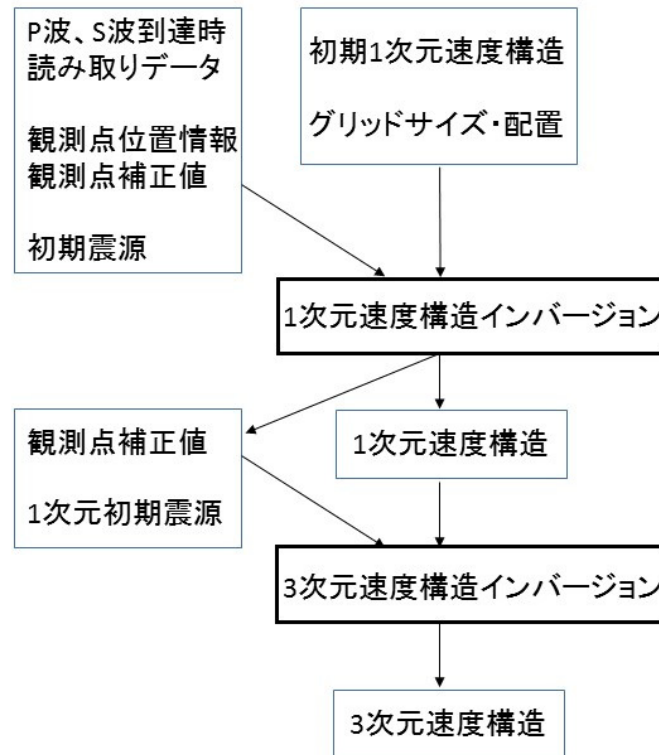


図 1-1-2-4. 3次元トモグラフィ解析の流れ

データの読み取り値の精度によりランク分けを行い、読み取り誤差 $\pm 0.01$ 秒は1、 $\pm 0.03$ 秒は0.33、 $\pm 0.10$ 秒は0.1でそれぞれデータに重み掛けを行っている。3次元速度構造インバージョンの初期データとなる1次元速度構造モデルはOno et al. (1978)を参考としている(表1-1-2-2)。解析範囲は始良カルデラが含まれる北緯31.4度~31.9度、東経130.4度~131.0度、深さ0~200 kmである。グリッド間隔は水平方向、深さ方向とも0.1度(約10 km)としたが、カルデラ内については、現在のデータセットで十分な精度が得られる最小の間隔として水平方向を0.05度(約5 km)とし、深さ方向は25kmまで5km間隔、25km以深を10km間隔とした。カルデラ内においては、水平方向、深さ方向ともに5 kmの基準グリッドを構築した後、緯度方向(北方向)に0~5 kmの範囲で1 km毎、経度方向(西方向)に0~5 kmの範囲で1 km毎、合計25モデルで解析を行い、個々のモデルから得られた速度の平均値をとることで平滑化した。解析精度については、用いた地震と観測点のデータセットと同じ組み合わせの疑似データを作成し、チェッカーボードテストを行い、結果として得られたパターンの戻りとResolution matrixの対角要素値(RDE)を精度評価の参考とした。初期モデルの走時残差は0.389秒で、得られた解モデルの走時残差は0.233秒となった。図1-1-2-5にチェッカーボードテストにおけるパターンの戻りを示す。RDEが0.6以上の領域は速度の高低のパターンが再現され解の信頼性が高いとみなす。深さ25 km以深では5 kmグリッドでは解像度が悪いため、深さ方向のグリ

ッドを 10 km とした。本解析領域の範囲では深さ 45 km 以深は深発地震の波線のみとなるため、深さ 45 km までの結果について示す。

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

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



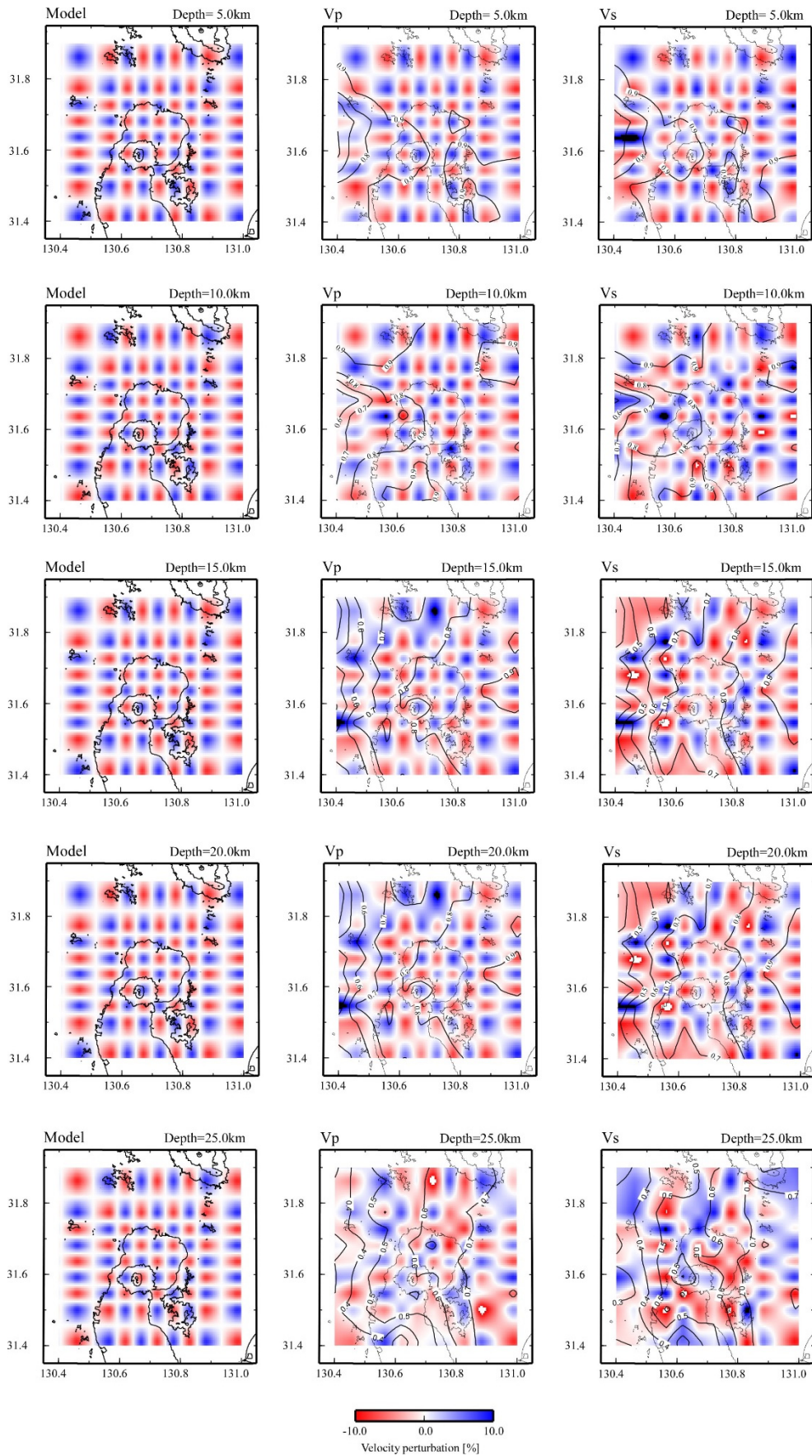


図 1-1-2-5. 深さ 5 km、10 km、15 km、20 km、25 km におけるチェッカーボードテスト結果

#### 4) 解析結果

深さ 1 km, 5 km, 10 km, 15 km, 20 km, 25 km における P 波及び S 波の地震波速度分布を図 1-1-2-6 に示す。

深さ 15km までの速度構造解析結果については、昨年度報告とほぼ相違は見られず、以下のよう結果が得られた。深さ 1 km では始良カルデラ北東部の若尊カルデラ下 (図 1-1-2-6 の Wa) において、S 波速度が遅く、一方でカルデラ北縁では P 波の高速部分が見られる。深さ 5 km ではカルデラ内の P 波速度および S 波速度はそれぞれ、4.5 km/s~5.8 km/s、2.6 km/s~3.7 km/s にあり、顕著な速度異常は見られない。深さ 10 km でもカルデラ内の P 波速度および S 波速度はそれぞれ、5.2 km/s~6.1 km/s、3.4 km/s~3.8 km/s にあり、P 波、S 波速度ともに顕著な不均質は見られない。深さ 15 km においてはカルデラ内の P 波速度および S 波速度はそれぞれ、5.4 km/s~6.8 km/s、1.1 km/s~4.4 km/s にあり、始良カルデラ中央部には特に S 波速度が遅い領域がある (図 1-1-2-6 の LS)。P 波速度の低下は周辺に対して 5~10 %程度であるが、S 波速度は 1.1 km/s~2.0 km/s まで低下しており、S 波速度 2.45 km/s 以下を領域 LS とすると速度比で約 18 %~55 %低下している。P 波速度には LS の外側の領域に対して 5~10 %程度の低下しかないため、 $V_p/V_s$  は 3.9 と大きい。

深さ 20 km において、P 波速度は始良カルデラ南部から東部にかけて高速度で、中央部北寄り P 波速度 5 km/s とやや低速度が見られる。S 波速度については始良カルデラ中央部に 2 km/s と低速度の領域が見られ、 $V_p/V_s$  比においても S 波速度が低速のため高  $V_p/V_s$  が見られる (図 1-1-2-6 の Depth=20 km 内の○)。深さ 25 km における解像度の高い領域は始良カルデラ内の中央部付近から大隅半島のみであるが、P 波は深さ 20 km と同様に中央部北寄りやや低速度である。S 波速度は始良カルデラ内では 3 km/s 前後で、東側の大隅半島下と比較すると低速度に見られる。為栗・他 (2022) が示している S 波低速度異常 LS の領域は、深さ 20 km 付近では S 波速度 2 km/s 程度の低速度が見られるが、速度低下は少なく、位置はやや東寄りとなっている。また、速度 2 km/s 以下の領域は東西南北で約 2 km と小さくなっている。

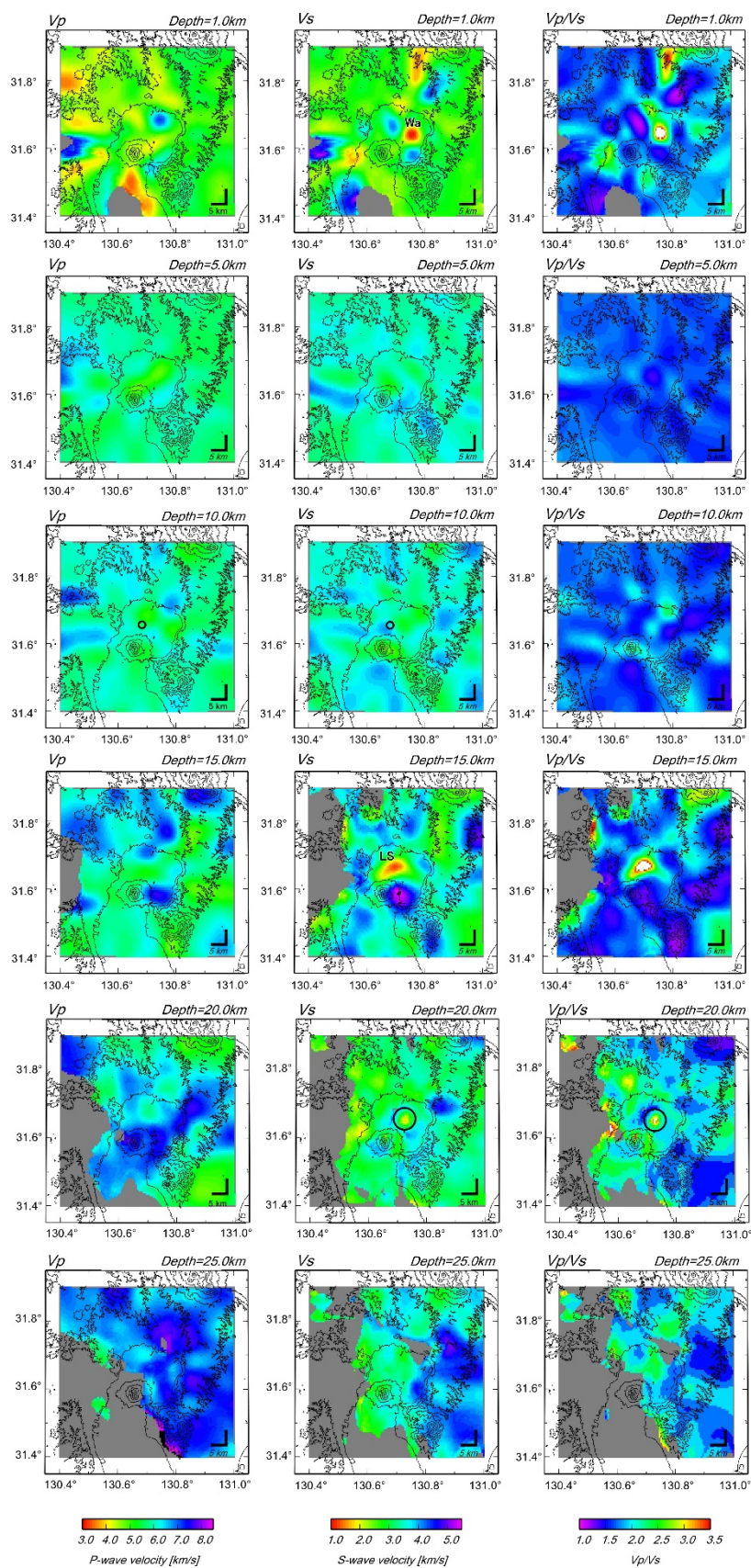


図 1-1-2-6. 深さ 1 km、5 km、10 km、15 km、20 km、25 km における P 波、S 波速度およびその比

図 1-1-2-7 に深さ 35 km および 45 km の 10 km グリッドにおける P 波及び S 波の速度分布を示す。深さ 35 km においては、P 波速度には顕著な異常は見られないが、始良カルデラ周辺部は比較的速度が早い。また、S 波速度については桜島南西部において速度が遅い領域があり、その領域における  $V_p/V_s$  比が 3.2 と高くなっている（図 1-1-2-7 の  $V_p/V_s$  中の○）。深さ 45 km においては薩摩半島側の解像度が悪いいため明確には言えないが、始良カルデラ下に速度異常は見られない。

今年度の解析結果において、桜島南西部の深さ 35 km に高  $V_p/V_s$  の領域が見出された。桜島南西部においては深さ 25 km~30 km 付近で多数の深部低周波地震が発生しており（例えば、気象庁火山活動解説資料桜島）、高  $V_p/V_s$  領域はその震源の直下に位置している。火山下の深部低周波地震の発生メカニズムは流体移動が関連しており（例えば、Nakamichi et al., 2003）、この深さ 35 km の高  $V_p/V_s$  領域は流体の存在を示唆している可能性が考えられる。本解析ではこの深さはグリッドサイズが 10 km でしか計算できておらず、高  $V_p/V_s$  領域は 1 ノードのみにあらわれるのみである。また、深さ 45 km においては解像度の関係でこの領域が見えていない。今後は、深部低周波地震と高  $V_p/V_s$  領域の関係を明らかにするためにこの深さの解像度を向上させる必要がある。

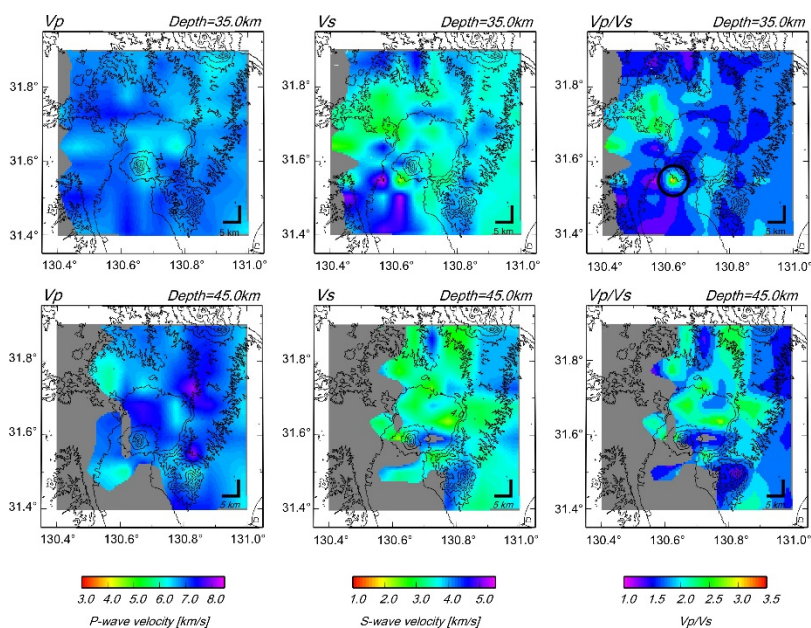


図 1-1-2-7. 深さ 35 km、45 km における P 波、S 波速度およびその比

図 1-1-2-8 に始良カルデラ中央部の東西と南北鉛直断面図を示す。深さ 1 km の S 波低速度（図 1-1-2-6 の Wa）が見られる領域は始良カルデラ内の副カルデラである若尊カルデラに近接する。若尊カルデラは非常に活発な熱水活動を続けており（例えば、Ishibashi et al., 2008）、浅部における S 波低速度領域は熱水層に対応するものかもしれない。深さ 15 km において見出された S 波速度が 2 km/s 以下（周辺より約-30%）の低速度領域の最上部は深さ 11~12

km に達している（図 1-1-2-7 の LS）。地盤変動観測から見出されている微小球状圧力源は、始良カルデラ中央部深さ 10~12 km に求められるが（Iguchi, 2013 ; Hotta et al., 2016）、深さ 10~12 km には顕著な速度異常は見られない。既往の地盤変動の説明に用いられている微小球状圧力源は、等価な地盤変動を引き起こす等方的応力の集中点と考えるべきである。そのように考えると速度コントラストの強い S 波低速度領域の上端部付近では応力が集中しており、応力はその下にある S 波低速度領域からの移動する物質の集積が駆動していると解釈される。S 波低速度領域の上端における速度コントラストの強さは、地震波形後続相に現れる始良カルデラ北西部の深さ 13.6 km からの PS 変換反射波（図 1-1-2-8）により示されているが（筒井・他, 2021）、この強いコントラストは物質の集積の傍証になるかもしれない。

為栗・他（2022）で指摘している深さ 15 km を中心とする S 波低速度異常 LS の領域について、深さ 20 km 付近では、S 波速度 2 km/s 程度の低速度領域が見られるが、速度低下は少なく、位置はやや東寄りとなっている。また、速度 2 km/s 以下の領域は東西南北で約 2 km と小さくなっている。図中の黒円内が深さ 15 km, 20 km で見られる S 波低速度異常を示す。東西断面（図 1-1-2-8 の (b)）では LS の領域は深さ 12 km から 22 km 付近で見られる。南北断面（図 1-1-2-8 の (bc)）でも同様に LS の領域は深さ 12 km から 22 km 付近に見られ、南北方向の広がり狭く見える。以上のことから LS の領域は始良カルデラ中央部から深部にかけてやや東寄りになり、深さ 12 km から 22 km 付近の範囲にあると言える。

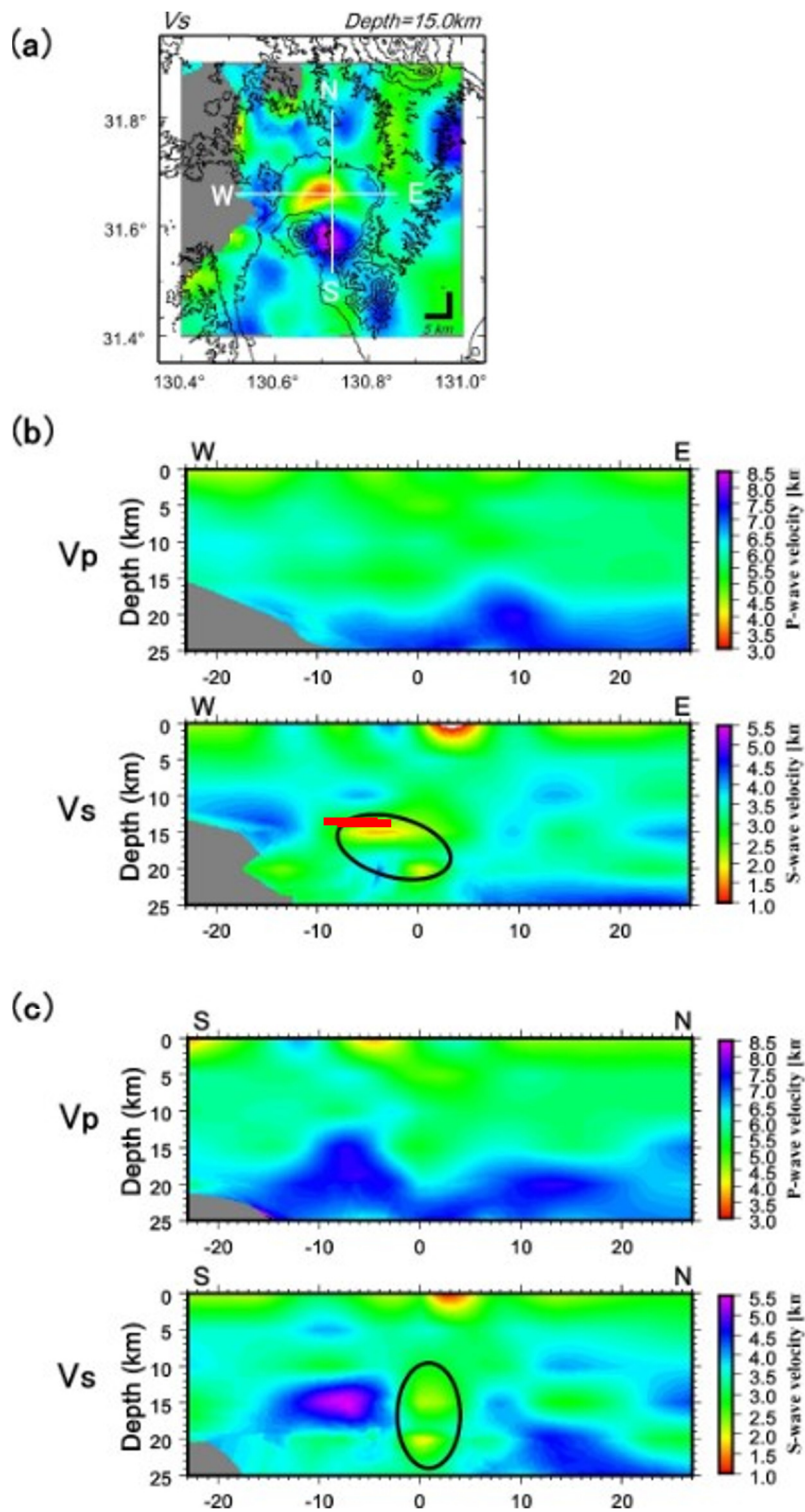


図 1-1-2-8. 始良カルデラの特徴的な地震波速度構造。(a)深さ 15 km における S 波速度分布、(b)始良カルデラ中心付近を通る東西断面における P 波速度および S 波速度分布、(c)南北断面における P 波速度および S 波速度分布。(b)中の赤太線は筒井・他(2021)の S 波反射面を示す。

## b) 始良カルデラ下のメルト量の推定

これまで、深さ 15 km 付近に顕著な S 波の低速度異常が見出されたことから、その S 波低速度異常領域を始良カルデラ下にあるマグマ溜りと考え、メルト量の推定を行ってきた。今回、より深部の地震波速度構造について解析結果が得られたため、改めて始良カルデラ下のマグマ溜りのメルト量の推定を行なった。昨年度同様に S 波速度が 2.45 km/s 以下の領域を LS として体積を求めると深さ 20 km 以深の体積 20 km<sup>3</sup> が加算されて約 300 km<sup>3</sup> となる。

一方、メルト量推定の方法として P 波の速度低下を基準として、P 波速度の低下は空隙率によって表現され、そこに流体が包有されていると考える手法がある（例えば、Han and Batzle, 2004）。本報告でもその考えでメルト量推定を行なってみた。まず地震波速度構造解析で得られた各グリッドの P 波速度を用いて、解析領域内で各深さの平均 P 波速度を求める。深さ 5 km では平均速度 5.4 km/s、深さ 10 km では 5.8 km/s、深さ 15 km では 6.3 km/s、深さ 20 km では 6.9 km/s であった。これらの平均速度は日本の地震波速度構造をトモグラフィ解析で得た Matsubara et al. (2017) の南九州付近の速度構造と同程度の値であった。各グリッドの P 波速度と平均速度の差が -5 %以下の領域を低速度異常と見なす。なお、深さ 5 km より浅部については特に桜島周辺において P 波速度が遅い領域があり、堆積物による速度低下や若尊カルデラ下の熱水活動などが考えられメルトそのものを反映しているのか検証が必要なため、メルト量計算については深さ 5 km 以深について行い、深さ 5 km-25 km の範囲とした。図 1-1-2-9 に低速度異常と見なした領域を示す。深さ 20 km 以深では P 波速度は領域内で平均的な速度を持ち、-5 %の P 波速度の領域は見られなかった。P 波速度が平均速度より -5 %以下となる領域の体積は約 380 km<sup>3</sup> となる。

Taylor and Singh (2002) はマグマ領域が結晶の集合体の中に微小な扁平なメルトインクルージョンを多数含む場合、メルトインクルージョンの厚み方向に通過する S 波速度の低下率が同じ方向に通過する P 波のそれよりも著しく大きくなり、マグマ領域に含まれるメルトインクルージョンのアスペクト比が大きいほど厚み方向に伝わる S 波速度の低下率が大きくなることを指摘している。さらに S 波および P 波速度低下の組み合わせはメルト含有量と関連するので、Taylor and Singh (2002) の Figure 3 を用いて P 波および S 波速度低下の組み合わせからメルト含有量の推定を行なった。V<sub>p</sub>/V<sub>s</sub> 比が最大になるのは深さ 15 km の LS の S 波低速度領域であった。深さ 12-22 km 付近に見られる S 波低速度領域周辺部の P 波平均速度は 5.6 km/s であり、周辺平均 P 波速度 6.1 km/s に対して 8.2 %の低下である。球状のメルトインクルージョンの存在によって P 波速度は 27 %、S 波速度は 44 %低下するが、メルトインクルージョンを扁平にすることで、同じ S 波速度の低下率に対するより小さな P 波速度低下率が説明できる。例えば、S 波速度の 44 %低下に対しては、メルトインクルージョンのアスペクト比 10 では P 波速度低下は 14 %、アスペクト比 100 の場合には約 4 %にとどまる。始良カルデラ下の場合、S 波速度の 44 %低下はアスペクト比 10~100 の間の形状のメルトインクルージョンに対応し、P 波速度の低下率からメルトの含有率は最大で約 7 %と推定される。P 波速度の -5 %をメルト量計算の基準とするとメルトは深さ 15 km より浅い領域で最大 26.6 km<sup>3</sup> (380 km<sup>3</sup> × 7 %) となり、深さ 12 km-22 km の S 波速度 2.45 km/s 以下を基準とすると最大 21 km<sup>3</sup> (300 km<sup>3</sup> × 7 %) となる。

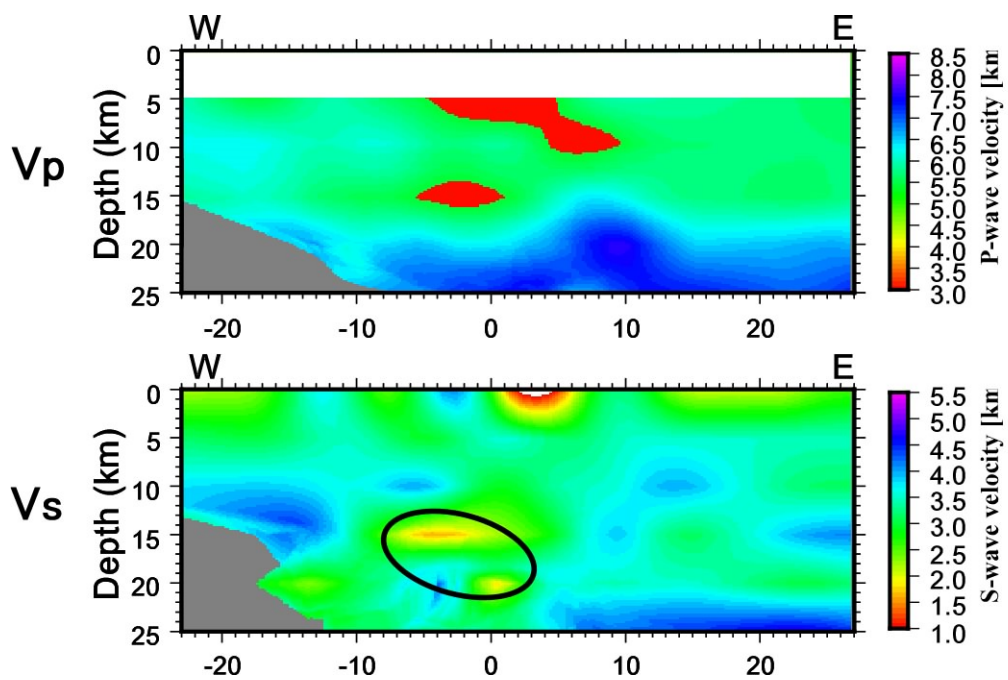


図 1-1-2-9. P 波速度が平均速度より-5 %以下となる領域 ( $V_p$  の赤の領域)



## 地震波の振幅減衰から見たマグマ溜りの位置推定についての検討

本パートでは、始良カルデラ下の深さ 12-22 km 付近に見いだされた S 波低速度領域と始良カルデラ下を通過する地震波の減衰がどのような関係にあるか調査を行う。S 波の低速度領域ではメルトを 7%程度含有している可能性がある。

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

地震波の振幅を取り扱う際には以下の注意や補正が必要となる。

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

今年度は観測点直下の振幅増幅効果の補正のための評価を行った。図 1-1-2-10 に振幅減衰の解析のための地震イベント分布を示す。多方位データを収集するために始良カルデラ近傍の観測点においては 16 方位の震源を選択している。対象としている S 波低速度領域の大きさを約 10 km×10 km とすると、地震波の減衰を見るためには波長がそれ以下の物を使用する必要があり、より周波数が高いものほど減衰の影響を受けると考えられ、近地地震を振幅減衰の解析対象としている。また、S 波低速度領域の深さ方向の振幅減衰を見るため深さ 20 km までの浅部の地震（図 1-1-2-10 の赤○）、やや深発地震（図 1-1-2-10 の橙と黄色○）と深発地震（図 1-1-2-10 の緑と青色○）を解析候補のデータに含んでいる。

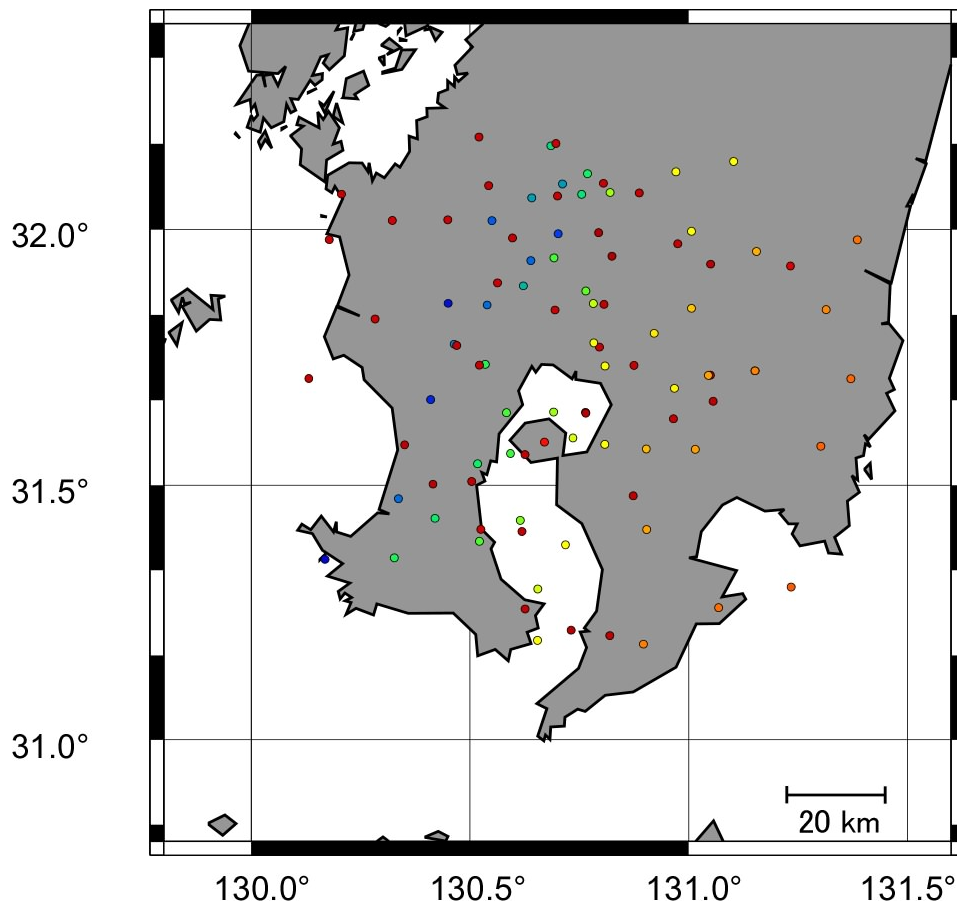


図 1-1-2-10. 振幅減衰解析のための地震イベント候補

観測点直下の振幅増幅効果（サイト特性）を得るために、やや近地地震の初動振幅の読み取り値を用いて補正を行なった。サイト特性の補正値を得るために通常は十分に観測点から離れた遠地地震を用いることで震源メカニズムによる放射特性を無視するが、サイト特性には周波数依存性があるため遠地地震の周波数では周期が長すぎて対象としている近地地震の周波数と合わない。本来は解析に用いる近地地震と同様の周波数を使用して補正値を算出するべきであるが、補正に用いるイベント自体が減衰の影響を受けてしまうため、今回は震央距離が 100 km 程度でほぼ全ての観測点で振幅が読める M3.5~4.9 のやや近地地震の振幅を使用してサイト特性の補正を行なった。補正に使用したイベントの卓越周波数は 2~5 Hz で、多方位および震源の深さが異なる 15 イベント（表 1-1-2-3 参照）を選びそれぞれの観測点で平均化することで震源メカニズムによる放射特性も平均化されると見なした。

得られたサイト特性を表 1-1-2-4 に示す。臨時観測点 1 の補正値を 1 とした場合で示している。臨時観測点 1-17 では地震計は地表設置であり、地盤の影響を受けて観測点間で値が大きく異なる。また、代表的に防災科研 Hi-net の AIRA を示しているが、地表と地中では理論的には振幅値が 2 倍異なるが、地表の地盤の状況によっては約 5 倍もの振幅値の違いが出ている。振幅減衰の評価にはサイト特性の補正が必要である。

表 1-1-2-2. サイト特性を得るために使用したやや近地地震のリスト

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

表 1-1-2-3. サイト特性の振幅値(SK01 を 1.00 とした場合)

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

図 1-1-2-11 に震源距離の振幅値補正 ( $1/r$ ) とサイト特性の振幅値補正を行なった波形を示す。震源は図 1-1-2-11 の星印で錦江湾南部の喜入沖である。図の 4 と 5 の観測点では地震波は始良カルデラを通過して到達しており、著しい振幅の減衰が見られ、始良カルデラを通過していない波線の約 1/10 に減衰している。また観測点 4 と 5 の震源寄りとなる桜島島内の S1-S3 の波形を見ると全体の振幅は若干減衰しているように見えるが、P 波と S 波の位相は比較的明瞭である。来年度は図 1-1-2-11 の解析候補から始良カルデラを通過する地震波を抽出し、減衰領域を明らかにしていく。

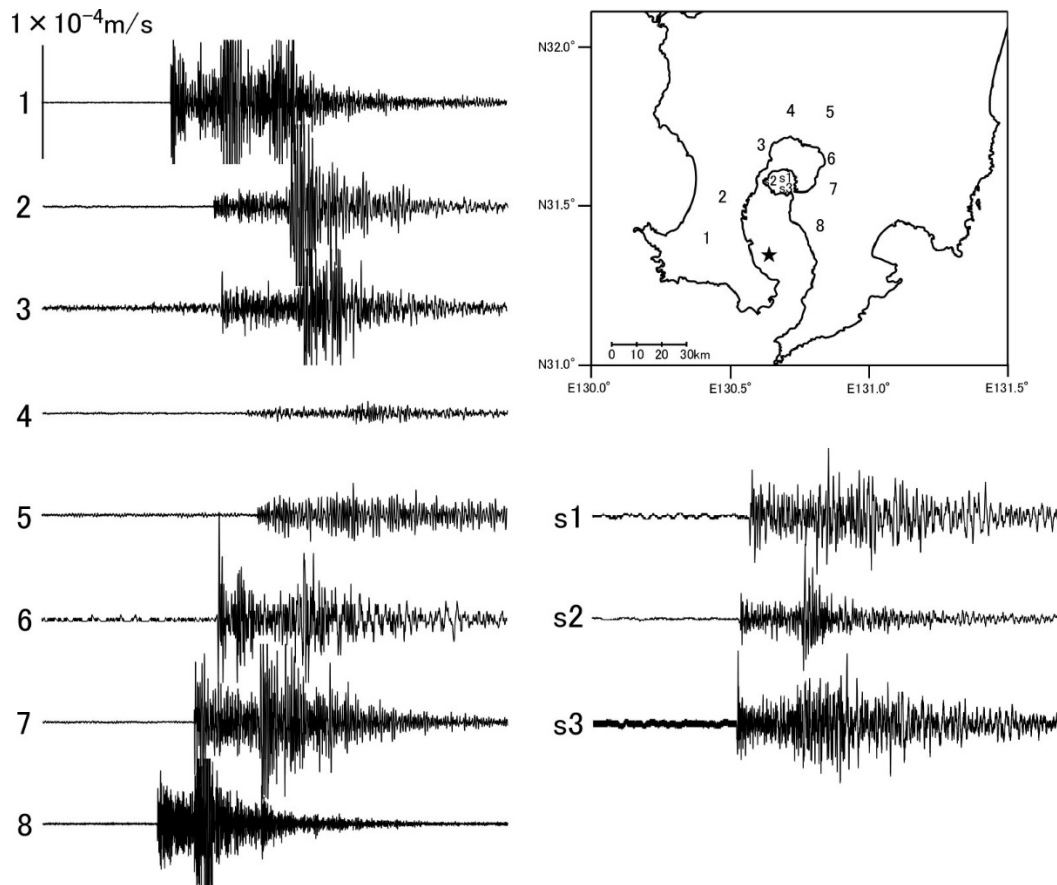


図 1-1-2-11. 始良カルデラを通過する地震波の振幅減衰

#### 参考文献

- Han, D. and Batzle, M. (2004) Gassmann's equation and fluid - saturation effects on seismic velocities, *Geophysics*, 69, 398-405.
- Hotta, K., Iguchi, M., Yamamoto, K. and Ohkura, T. (2016) Multiple-pressure-source model for ground inflation during the period of high explosivity at Sakurajima volcano, Japan - Combination analysis of continuous GNSS, tilt and strain data -, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 310, 12-25.  
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.11.017>
- 井口正人・他 82 名 (2009) : 2008 年桜島人工地震探査の目的と実施, *京都大学防災研究所年報*, 52B, pp. 293-307.
- Iguchi, M. (2013) Magma movement from the deep to shallow Sakurajima volcano as revealed by geophysical observations, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, 58, 1-18.  
[https://doi.org/10.18940/kazan.58.1\\_1](https://doi.org/10.18940/kazan.58.1_1)
- Ishibashi, J., Nakaseama, M., Seguchi, M., Yamashita, T., Doi, S., Sakamoto, T., Shimada, N., Noguchi, T., Oomori, T., Kusakabe, M, and Yamanaka, T. (2008) Marine shallow-water hydrothermal activity and mineralization at the Wakamiko crater in

- Kagoshima bay, south Kyushu, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 173, 84-98.  
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.12.041>
- 加茂幸介・西 潔・高山鉄朗・植木貞人 (1980) : 桜島南方の地震活動と地震波異常伝搬域, 第 3 回桜島火山の集中総合観測, pp. 11-15.
- Matsubara, M., Obara, K. and Kasahara, K. (2008) Three-dimensional P- and S-wave velocity structures beneath the Japan Islands obtained by high-density seismic stations by seismic tomography, *Tectonophysics*, 454, 86-103.
- Nakamichi, H., Hamaguchi, H., Tanaka, S., Ueki, S., Nishimura, T. and Hasegawa, A. (2003) Source mechanisms of deep and intermediate-depth low-frequency earthquakes beneath Iwate volcano, northeastern Japan. *Geophysical Journal International*, Vol. 154(3), pp. 811- 828.
- Ono, K., Ito, K., Hasegawa, I., Ichikawa, K., Iizuka, S., Kakuta, T. and Suzuki, H. (1978) Explosion seismic studies in south Kyushu especially around the Sakurajima volcano, *J. Phys. Earth*, 26, Supplement, S309-S319.  
[https://doi.org/10.4294/jpe1952.26.Supplement\\_S309](https://doi.org/10.4294/jpe1952.26.Supplement_S309)
- 為栗 健・八木原 寛・筒井智樹・井口正人 (2022) 高分解能な 3 次元地震波速度構造解析による始良カルデラ下のイメージング. *火山*, 67, 69-76.
- Taylor, M. A. J. and Shingh, C. (2002) Composition and microstructure of magma bodies from effective medium theory, *Geophysical Journal*, 149, 15-21.  
<https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01577.x>
- Thurber, C.H. (1983) Earthquake locations and three-dimensional crustal structure in the Coyote Lake area, central California. *J. Geophys Res.*, 88, B10, 8226-8236.  
<https://doi.org/10.1029/JB088iB10p08226>
- 筒井智樹・為栗 健・井口正人 (2021) 人工地震記録による始良カルデラ西部の地殻内 S 波地震反射面の推定. *火山*, 66, 71-81. [https://doi.org/10.18940/kazan.66.2\\_71](https://doi.org/10.18940/kazan.66.2_71)
- Um, J. and Thurber, C. (1987) A fast algorithm for two-point seismic ray tracing. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 77, 972-986.
- 八木原 寛・井口正人・為栗 健・筒井智樹・及川 純・大倉敬宏・宮町宏樹 (2010) 諏訪之瀬島の火山体浅部 3 次元 P 波速度構造と爆発発生場, *火山*, 55, 75-87.  
[https://doi.org/10.18940/kazan.55.2\\_75](https://doi.org/10.18940/kazan.55.2_75)

表 1-1-2-4. 3次元速度構造解析に用いた地震のイベントリスト

(発震時, 緯度, 経度, 深さ, マグニチュード)

2010/01/04 16:33:49	31.6552	130.7881	3	2.0	2010/11/13 22:06:20	31.6844	130.7734	1	1.5
2010/01/04 22:24:48	31.3124	130.5867	8	2.1	2010/11/21 15:25:05	31.2946	130.4180	169	4.0
2010/01/08 14:10:00	31.5729	130.3200	4	2.5	2010/12/02 07:18:43	31.3092	131.1156	57	3.0
2010/01/15 17:53:18	32.1484	130.3510	4	2.7	2010/12/04 03:48:27	31.5960	130.7506	9	1.5
2010/02/05 23:35:08	31.3661	130.5598	8	2.4	2010/12/07 05:37:22	31.6783	130.9967	67	1.6
2010/02/06 01:20:47	31.3099	130.4336	157	3.8	2010/12/11 12:48:13	31.1790	130.7221	108	4.2
2010/02/14 21:45:48	31.8067	130.6967	10	1.2	2010/12/27 13:47:10	32.1421	130.3403	4	3.0
2010/03/26 00:56:24	31.2329	130.3668	164	4.4	2011/01/05 16:27:37	31.2758	130.3555	165	4.4
2010/03/27 07:38:58	31.7467	130.7667	7	1.5	2011/01/14 18:54:41	32.1394	130.3438	4	2.8
2010/04/02 02:34:15	32.0048	130.3695	4	2.5	2011/02/05 03:01:16	31.4880	130.4974	161	3.5
2010/04/06 20:35:40	31.8187	130.7656	6	1.7	2011/03/13 11:35:48	31.3310	130.6429	12	2.4
2010/04/27 18:09:29	31.7874	130.9899	81	2.9	2011/03/26 03:03:00	31.7687	130.7909	6	2.7
2010/05/01 14:31:27	31.2687	130.3910	162	4.9	2011/04/09 07:40:42	31.9617	130.8093	9	2.6
2010/05/12 06:28:49	31.7408	130.7658	6	1.8	2011/04/10 21:55:54	32.1296	130.3321	4	2.5
2010/06/06 03:34:50	31.9429	130.3330	6	2.0	2011/04/15 11:39:13	31.3685	130.4644	161	4.2
2010/06/10 16:27:54	31.3379	130.5661	10	3.0	2011/04/16 01:55:12	31.4370	130.5418	8	1.8
2010/06/19 07:10:27	31.4587	130.9796	69	3.3	2011/08/01 19:10:00	31.4100	130.5226	8	2.5
2010/07/11 12:00:57	31.2454	130.3808	174	4.6	2011/08/03 02:06:32	31.4733	130.7853	111	4.0
2010/07/13 02:37:19	31.7078	130.7689	3	1.4	2011/08/17 04:36:30	31.7918	130.7176	9	2.0
2010/07/13 22:14:48	31.7536	130.7780	3	2.0	2011/09/22 16:25:34	31.3234	130.5511	10	2.6
2010/07/15 21:16:40	31.5618	130.6165	7	1.9	2011/10/26 06:58:02	31.9851	130.3898	4	4.6
2010/07/19 21:03:13	31.5598	130.6400	118	2.4	2011/11/18 03:47:01	31.2137	130.7439	4	2.7
2010/08/25 00:06:27	31.7985	130.7702	6	1.7	2011/11/24 08:16:19	31.6692	130.9842	94	4.5
2010/08/29 04:55:57	31.6693	130.7949	95	2.3	2012/03/10 19:08:29	31.6142	131.0866	67	4.4
2010/09/11 03:11:22	31.4649	130.6268	137	2.5	2012/03/28 08:29:09	31.6543	130.7816	3	1.9
2010/09/14 15:42:07	31.7888	130.7696	120	4.2	2012/04/21 10:33:02	31.6325	131.0113	69	2.3
2010/09/24 05:59:24	31.1763	131.0019	57	3.0	2012/04/28 20:38:08	31.9307	130.8100	1	2.5
2010/09/30 02:55:22	31.2956	130.4823	162	3.7	2012/05/12 09:38:36	32.0220	130.4281	4	2.2
2010/09/30 21:16:15	31.4300	130.5217	6	1.5	2012/05/22 11:12:30	31.7252	130.9527	85	2.7
2010/10/01 20:33:49	31.7609	130.7880	6	1.8	2012/06/26 17:27:09	32.0945	130.5258	4	3.3
2010/10/29 05:42:32	31.3106	131.1132	57	3.4	2012/08/16 19:38:39	31.6298	130.7851	3	3.0
2010/10/31 18:09:58	31.9843	130.3223	4	2.6	2012/08/25 04:44:34	31.3315	130.5790	6	2.9
2010/11/02 14:56:23	31.7852	130.7567	8	1.7	2012/08/28 02:17:53	31.6168	130.8757	90	2.9
2010/11/06 20:02:32	31.7321	130.9873	8	2.2	2012/09/20 15:06:00	31.2971	130.4280	168	3.9
2010/11/13 16:44:24	31.9825	130.3992	4	3.7	2012/09/29 17:12:52	32.1271	130.2041	9	3.0

2012/10/18 16:50:31	31.8415	130.7713	7	2.9	2015/02/26 00:30:43	32.0940	130.1650	4	3.2
2012/11/30 13:21:17	32.1385	130.3228	4	2.9	2015/03/09 18:41:35	31.2946	130.5515	8	2.0
2012/12/01 22:56:19	32.1278	130.3268	4	2.3	2015/03/23 08:58:18	31.3756	130.5146	150	4.0
2012/12/04 07:31:07	31.5596	131.0367	67	2.9	2015/03/29 12:23:22	31.4139	130.6173	137	4.4
2013/01/11 16:12:01	31.9645	130.6566	3	2.6	2015/03/30 04:43:20	31.9922	130.4224	4	2.4
2013/04/20 06:35:16	31.2766	130.5424	149	3.9	2015/03/31 05:45:24	31.5537	130.6232	7	2.0
2013/04/20 15:22:29	31.9791	130.3861	4	2.9	2015/03/31 07:27:45	31.5508	130.6217	7	2.9
2013/04/24 14:42:07	31.9826	130.4996	4	2.5	2015/04/04 23:41:35	31.8734	130.6756	182	2.6
2013/05/29 11:02:57	31.9821	130.3909	4	3.4	2015/04/23 05:51:14	31.4643	131.0028	65	3.9
2013/08/31 04:06:44	31.5935	131.1229	69	3.1	2015/05/24 09:09:38	31.2460	130.3785	157	4.3
2013/09/09 07:42:23	31.7859	130.4540	8	2.7	2015/07/26 16:30:48	31.8780	130.5789	164	2.8
2013/09/17 05:09:40	31.1852	130.9534	63	3.6	2015/07/27 01:51:20	31.9702	130.4195	4	3.0
2013/10/15 17:46:42	31.2380	130.4566	159	4.6	2015/08/06 04:33:13	31.5852	130.7987	114	3.0
2013/10/26 01:55:03	31.2176	130.3796	164	3.6	2015/08/15 10:47:30	31.5683	130.6633	1	2.3
2013/11/02 00:18:34	31.2582	130.3910	167	4.3	2015/08/19 04:32:32	31.3934	130.5148	149	3.7
2013/11/30 19:04.19	31.3574	130.4927	158	4.2	2015/09/15 23:11:10	31.8577	130.7262	146	3.1
2013/12/05 18:58:25	32.1274	130.1654	12	2.8	2015/09/22 04:51:43	31.2760	130.4666	150	4.0
2014/01/11 22:01:00	32.0635	130.6771	4	2.3	2015/09/30 16:39:14	31.7602	130.6197	159	2.6
2014/02/16 17:13:58	31.7322	130.8833	8	2.6	2015/10/01 14:05:34	31.4754	130.4903	155	2.5
2014/03/01 17:07:03	32.1373	130.3468	11	2.6	2015/10/03 04:09:57	32.0666	130.1868	5	3.9
2014/03/22 16:24:51	31.2714	130.4444	163	4.0	2015/11/02 08:08:37	31.9052	130.8236	1	2.5
2014/03/22 23:38:50	31.2655	130.5121	8	3.0	2015/11/04 22:45:17	31.4416	130.4720	163	2.6
2014/04/21 13:08:55	31.5047	130.4101	3	2.1	2015/12/17 18:11:18	31.6596	131.0622	3	2.8
2014/05/16 03:59:42	31.5747	131.1422	67	2.9	2016/01/01 11:14:34	31.1916	130.9918	58	3.0
2014/05/23 10:06:02	31.3755	130.5817	5	2.3	2016/01/03 09:07:20	31.7862	130.9144	90	2.6
2014/07/12 20:20:03	31.2926	130.3971	165	4.3	2016/01/19 15:45:59	31.4756	130.5438	140	2.7
2014/08/01 07:38:43	31.8279	130.2691	4	2.1	2016/02/12 04:41:10	31.8283	130.2676	4	2.3
2014/09/10 05:27:14	31.9286	130.8065	1	2.6	2016/02/17 16:50:30	31.5100	130.4633	154	2.5
2014/09/11 22:42:10	31.2067	130.7031	4	3.3	2016/02/27 12:11:02	32.1330	130.5165	4	2.7
2014/10/15 15:39:33	31.3386	131.1236	50	2.8	2016/03/05 10:46:10	31.8072	130.6839	151	2.6
2014/11/02 00:03:59	31.3616	130.4482	172	3.8	2016/03/20 09:11:52	31.2537	130.5840	10	2.6
2014/11/15 05:56:41	31.3698	130.5362	155	3.7	2016/04/14 03:36:14	31.3062	130.3816	172	3.6
2014/12/20 04:01:29	31.2997	130.4447	163	4.0	2016/05/05 02:45:24	31.4865	130.4968	159	2.6
2014/12/26 04:27:25	31.3345	131.1200	56	3.2	2016/05/25 02:22:43	31.7953	130.6302	177	2.8
2014/12/28 22:03:21	31.8530	130.7346	7	2.2	2016/06/04 05:14:03	31.8401	131.1066	73	2.8
2015/02/04 07:29:14	31.2771	130.4994	154	4.4	2016/07/03 01:33:29	31.9763	130.4212	7	2.4
2015/02/09 00:22:03	31.5431	130.5832	123	2.2	2016/07/04 00:17:53	31.4962	130.5060	161	3.4
2015/02/14 05:55:42	31.9037	130.5519	8	2.8	2016/07/05 07:49:34	31.3170	130.4022	165	2.7



2016/07/13 17:07:45	31.5505	130.5608	156	3.1	2017/06/12 15:53:19	31.6088	130.8631	93	4.1
2016/07/13 20:36:04	31.2784	130.3862	167	3.4	2017/07/02 06:49:31	31.5753	130.9130	77	3.5
2016/07/16 19:01:30	31.5436	130.5075	150	2.9	2017/07/04 15:55:45	31.5816	130.7082	134	3.2
2016/07/19 21:17:19	31.4414	130.4842	162	3.5	2017/07/12 05:13:10	31.4050	130.6242	10	2.0
2016/08/05 21:31:14	31.5575	130.6025	144	3.1	2017/07/18 05:05:21	31.6059	131.0078	73	3.9
2016/08/08 05:10:11	31.6323	130.7860	3	2.1	2017/08/08 17:46:32	31.4859	130.6002	124	3.4
2016/08/17 06:39:02	31.9788	130.3832	3	2.8	2018/01/03 11:39:19	31.3334	130.5116	151	2.7
2016/09/01 01:30:16	31.8290	130.6488	157	2.8	2018/01/09 06:58:26	31.3813	130.6417	4	2.5
2016/10/04 08:23:40	31.7926	130.5479	180	3.4	2018/01/13 11:05:15	31.3812	130.6416	4	2.7
2016/10/16 05:54:02	31.7209	130.5877	157	2.5	2018/01/15 05:05:45	31.3814	130.6416	3	2.5
2016/11/08 18:20:39	31.2516	130.6199	9	2.3	2018/01/17 17:03:00	31.2846	130.4872	162	3.0
2016/11/11 15:11:20	31.8510	130.5604	191	3.0	2018/01/19 12:03:00	31.2561	130.3799	172	3.1
2016/11/18 12:07:34	31.2008	130.8302	8	2.7	2018/01/26 07:12:04	31.3166	130.4269	164	3.1
2016/11/26 07:44:05	31.6434	130.6941	138	4.2	2018/01/27 01:56:16	31.3774	130.4035	159	2.6
2016/12/01 13:28:39	31.7624	130.6053	167	3.4	2018/01/29 04:49:58	31.4615	130.8198	107	3.6
2016/12/12 22:50:00	31.3791	130.7093	73	2.7	2018/01/29 12:11:53	31.4004	130.6179	8	2.7
2016/12/17 12:20:13	32.0109	131.0552	102	4.3	2018/02/03 06:51:40	31.4264	130.4859	161	3.0
2016/12/21 19:02:32	31.7223	130.7376	120	3.9	2018/02/05 11:52:24	32.0165	130.3234	12	3.3
2016/12/25 01:49:22	31.4896	131.2130	53	3.4	2018/02/14 15:04:29	31.2778	130.4141	162	3.4
2017/01/02 12:13:58	31.8126	130.6440	163	2.8	2018/02/15 14:53:52	31.3232	130.4602	164	4.1
2017/01/03 22:49:35	31.8811	130.4111	206	2.7	2018/02/28 04:39:11	31.3270	130.6214	10	2.4
2017/01/07 02:31:09	31.3962	130.6175	8	2.7	2018/02/28 07:50:18	31.2854	130.4996	148	2.9
2017/01/10 00:28:03	31.3155	130.4284	172	2.5	2018/03/15 20:59:44	32.0845	130.9954	111	2.9
2017/01/12 13:39:16	31.1485	130.8846	61	3.2	2018/03/21 12:45:25	31.4050	130.4717	158	2.0
2017/01/18 07:23:21	31.8417	131.2583	63	3.4	2018/03/24 01:36:48	31.4083	130.5160	159	3.1
2017/01/22 11:06:41	31.8535	130.5320	185	3.5	2018/03/25 03:38:53	31.3284	130.6233	6	2.2
2017/01/31 16:28:53	31.3920	130.6214	8	2.5	2018/03/26 20:14:00	31.3125	130.4194	164	2.5
2017/02/10 19:02:48	31.3909	130.6145	6	2.5	2018/04/02 23:54:10	31.3672	130.3669	178	3.1
2017/02/11 10:02:07	32.0342	131.0868	101	4.4	2018/04/05 04:14:42	31.3962	130.6206	7	2.3
2017/02/23 06:47:51	31.9856	130.4201	4	3.1	2018/04/07 02:00:10	31.4146	130.5020	162	3.1
2017/03/07 01:05:23	31.6815	130.3961	174	2.5	2018/04/08 13:54:27	31.3261	130.6145	8	2.7
2017/03/07 05:36:04	31.7858	130.7824	119	3.3	2018/04/11 10:00:30	31.2867	130.4453	159	2.6
2017/03/11 21:10:25	31.3861	130.6221	11	4.1	2018/04/24 20:33:59	32.0382	130.8474	148	2.9
2017/03/12 05:03:48	31.7690	131.0077	91	3.4	2018/04/26 01:02:31	31.7145	131.0621	12	2.3
2017/03/19 21:56:58	31.2597	131.1122	56	3.0	2018/05/03 08:10:49	31.8542	130.7951	133	3.3
2017/03/22 19:44:08	31.5910	130.7350	129	3.8	2018/05/04 21:57:17	32.0133	131.4350	17	2.6
2017/05/02 20:37:53	31.5509	130.5567	157	3.1	2018/05/06 02:21:17	31.8860	130.6872	163	2.7
2017/05/19 15:55:48	31.8020	130.7940	6	3.1	2018/05/07 21:40:20	32.1500	130.1417	12	2.0

2018/05/24 18:59:32	31.6438	130.4335	200	3.0	2019/01/17 04:06:11	31.4133	130.5350	151	1.6
2018/05/24 20:41:46	31.9862	131.0019	108	2.8	2019/01/17 20:00:52	31.6133	130.6066	141	1.8
2018/05/25 17:43:11	32.0502	131.0612	82	2.9	2019/01/27 15:54:17	31.7250	130.6166	158	1.8
2018/05/26 19:21:03	31.4033	130.4233	153	2.0	2019/02/14 02:40:19	31.4050	130.4533	147	1.6
2018/06/03 14:12:18	31.3937	130.6234	9	2.4	2019/02/25 18:12:38	31.8483	130.8300	8	1.8
2018/06/22 20:45:38	31.2923	130.5267	148	3.0	2019/02/26 21:21:39	31.8016	130.8700	110	1.8
2018/06/27 20:47:47	31.9242	130.6758	176	4.2	2019/03/01 14:19:24	31.8816	130.7250	142	1.9
2018/06/30 17:11:08	31.3283	130.6275	9	2.4	2019/03/05 07:52:54	31.4266	130.4866	146	1.6
2018/07/09 21:17:20	31.8794	131.1402	3	2.2	2019/03/10 03:06:25	31.6400	130.6733	133	1.9
2018/07/16 04:43:31	31.4051	130.6223	4	2.2	2019/03/10 15:43:06	31.8416	130.6900	9	2.8
2018/07/26 13:22:01	31.3996	130.4691	163	3.0	2019/03/13 00:53:02	31.7983	130.6733	150	1.6
2018/07/31 23:42:58	31.2948	130.4525	162	2.8	2019/03/18 03:29:23	31.5066	130.4966	151	1.7
2018/08/26 21:58:19	31.4838	130.7324	118	2.8	2019/03/20 20:10:15	31.7483	130.7700	113	1.7
2018/09/03 04:13:02	31.3080	130.4283	168	2.9	2019/03/22 07:43:05	31.8416	130.6933	9	2.2
2018/09/03 08:18:23	31.2517	130.3950	155	2.3	2019/03/23 08:18:33	31.5333	130.7483	115	1.9
2018/09/05 04:53:04	31.4481	130.6586	130	3.5	2019/03/24 04:55:55	31.4733	130.4050	165	1.9
2018/09/07 23:25:01	31.9316	130.8535	1	2.4	2019/04/02 13:17:58	31.8400	130.6950	9	1.7
2018/09/18 05:07:12	31.9359	130.8003	1	2.4	2019/04/06 02:01:14	31.5083	130.5533	9	2.1
2018/09/22 10:40:54	31.2564	130.3824	165	3.5	2019/04/23 09:46:53	31.8633	130.7516	140	1.8
2018/09/23 15:46:19	31.3724	130.4284	157	2.8	2019/05/07 15:07:47	31.8433	130.7000	9	1.9
2018/09/25 01:05:17	31.9783	131.3850	55	2.8	2019/05/08 13:08:50	31.5616	130.5366	148	1.6
2018/09/25 21:29:32	31.6150	130.5450	164	2.1	2019/05/20 23:13:47	31.6216	130.4400	182	1.9
2018/09/25 23:37:51	31.4454	130.4584	160	2.7	2019/05/24 12:47:27	31.4416	130.4966	155	2.7
2018/10/02 09:04:46	31.9384	130.8064	2	2.5	2019/06/14 09:52:28	31.8650	130.7000	8	2.4
2018/10/12 14:49:31	31.3116	130.3806	166	2.6	2019/06/15 16:26:56	31.4983	130.5083	164	2.0
2018/10/25 14:36:39	31.2715	130.3980	168	3.6	2019/06/20 19:22:33	31.6666	130.4100	200	2.6
2018/10/26 17:45:34	31.2391	130.6541	123	4.6	2019/06/25 22:25:27	31.8683	130.6983	8	2.0
2018/10/30 18:10:45	31.8173	131.0169	93	2.9	2019/07/14 16:53:18	31.5283	130.7583	117	1.5
2018/11/19 04:42:43	31.4233	130.5983	133	1.5	2019/07/30 03:44:49	31.4400	130.6783	125	1.9
2018/11/20 23:09:01	31.5000	130.7066	119	2.3	2019/08/04 05:13:19	31.5683	130.5750	152	1.5
2018/12/07 06:59:07	31.5416	130.7450	119	1.5	2019/08/06 00:43:16	31.8300	130.6400	163	2.1
2018/12/08 08:44:18	31.5066	130.5033	7	2.0	2019/08/10 16:56:29	31.7700	130.9700	81	1.5
2018/12/15 06:24:39	31.7966	130.5433	187	1.7	2019/08/14 11:18:20	31.8266	130.9033	96	2.1
2018/12/27 03:25:38	31.4950	130.4633	152	1.5	2019/08/17 20:21:00	31.8533	130.8050	8	2.0
2018/12/27 20:23:24	31.6350	130.7200	131	1.7	2019/08/19 12:35:50	31.6833	130.5233	174	2.3
2018/12/30 09:03:14	31.6283	130.7700	6	2.3	2019/09/05 23:09:21	31.8350	130.5750	151	2.1
2019/01/01 12:22:15	31.5983	130.5266	11	1.9	2019/09/07 17:49:08	31.8416	130.7400	134	1.5
2019/01/11 03:49:25	31.7333	130.7700	8	1.7	2019/09/15 00:26:37	31.8650	130.7483	133	2.1

2019/09/24 11:26:34	31.8366	130.6616	150	2.0	2020/03/08 06:44:54	31.3100	130.5750	7	2.1
2019/09/26 20:38:58	31.4533	130.4916	160	1.5	2020/03/09 12:08:08	31.3417	130.3983	164	2.1
2019/10/16 21:13:31	31.4233	130.6083	8	2.2	2020/03/10 04:14:07	31.3067	130.5717	10	1.5
2019/10/18 03:58:31	31.4233	130.6066	7	1.5	2020/03/12 03:27:15	31.4200	130.5467	148	2.2
2019/10/26 05:27:52	31.5683	130.7233	124	2.7	2020/03/12 19:36:33	31.3117	130.5717	6	1.5
2019/11/05 18:53:49	31.5450	130.6433	123	2.0	2020/03/19 22:40:42	31.3383	130.6200	6	1.5
2019/11/18 15:19:28	31.5333	130.5450	151	1.7	2020/03/22 12:25:28	31.5600	130.6250	7	2.0
2019/11/19 22:10:24	31.4016	130.4566	164	2.3	2020/03/22 13:42:05	31.3033	130.2800	181	2.7
2019/11/26 06:11:43	31.5716	130.5466	160	1.8	2020/03/24 22:37:18	31.2550	130.3533	164	2.1
2019/12/02 16:00:24	31.4400	130.6533	133	1.7	2020/03/25 02:50:21	31.3500	130.4933	151	3.1
2019/12/08 15:58:07	31.4916	130.4350	164	2.0	2020/03/26 03:03:38	31.5617	130.6233	6	1.6
2019/12/12 02:31:22	31.7716	130.6066	171	1.8	2020/03/27 20:14:57	31.2967	130.2817	177	2.3
2019/12/19 17:41:26	31.5016	130.4166	6	1.6	2020/03/28 07:35:32	31.8250	130.2150	10	2.0
2019/12/22 12:07:48	31.4133	130.9033	68	2.1	2020/04/06 21:40:41	31.3583	130.5483	6	1.6
2019/12/22 15:19:26	31.8450	130.6933	7	1.5	2020/04/14 12:52:19	31.3083	130.4400	155	2.3
2019/12/23 02:12:03	31.8450	130.7000	9	2.1	2020/04/14 20:04:32	31.0617	130.3133	150	2.2
2020/01/02 03:13:31	31.4117	130.6900	117	2.4	2020/04/18 10:13:37	31.3383	130.6117	7	1.5
2020/01/07 17:25:55	31.4117	130.5417	147	2.6	2020/04/30 10:59:30	31.2600	130.4300	160	3.0
2020/01/16 09:10:32	31.7750	130.7350	9	1.9	2020/05/05 16:15:32	31.2900	130.4017	160	2.1
2020/01/16 18:50:15	31.3500	130.3733	155	2.1	2020/05/05 17:50:00	31.3083	130.4150	155	2.1
2020/01/17 18:44:56	31.2983	130.3850	161	2.6	2020/05/16 18:17:52	31.3400	130.6250	7	1.6
2020/01/19 14:33:11	31.4083	130.4683	167	2.1	2020/05/27 14:00:43	31.3433	130.5167	143	2.3
2020/01/23 04:50:42	31.5350	130.4883	168	2.2	2020/06/05 14:09:25	31.2567	130.4233	159	2.1
2020/01/25 07:07:53	31.4583	130.6067	8	1.5	2020/06/12 12:43:17	31.4117	130.7783	83	1.6
2020/01/26 02:19:34	31.2467	130.8533	90	1.5	2020/06/16 13:39:55	31.3733	130.4383	158	2.6
2020/01/28 02:58:13	31.8767	130.6950	6	1.5	2020/06/16 13:48:34	31.3667	130.4600	161	2.2
2020/01/29 06:12:25	31.6417	130.7633	5	2.1	2020/06/27 09:03:43	31.3467	130.4400	159	2.5
2020/02/10 14:03:46	31.9433	130.8083	1	2.3	2020/06/27 19:32:06	31.2433	130.6317	9	1.8
2020/02/14 02:00:58	31.8733	130.7067	8	1.6	2020/07/04 06:50:36	31.4183	130.5633	10	1.5
2020/02/14 02:51:22	31.5717	130.5900	11	1.5	2020/07/10 21:42:50	31.3900	130.5217	144	2.1
2020/02/17 08:55:00	31.8233	130.2117	11	2.0	2020/07/23 01:45:42	31.3317	130.6150	7	1.7
2020/02/22 00:22:22	31.3117	130.5750	9	3.3	2020/07/24 05:07:10	31.3617	130.4533	155	2.1
2020/02/22 16:14:26	31.3100	130.5733	7	1.6	2020/07/24 09:49:33	31.2883	130.5133	145	2.4
2020/02/22 17:44:01	31.3067	130.5717	10	1.6	2020/07/28 00:11:08	31.3950	130.4367	7	1.9
2020/02/24 15:00:12	31.3100	130.5767	7	2.2	2020/08/07 02:49:14	31.4750	130.4500	162	2.3
2020/03/04 04:48:47	31.6983	131.1433	59	1.7	2020/08/13 05:44:11	31.6483	130.8667	89	1.6
2020/03/04 17:30:37	31.9067	130.6517	160	2.8	2020/08/13 18:40:04	31.3517	130.4483	165	2.6
2020/03/05 02:08:37	31.3450	130.4117	163	2.7	2020/08/15 05:31:32	31.2667	130.4200	159	2.1

2020/08/19 13:37:42	31.2867	130.4700	151	2.6	2021/01/24 06:16:06	31.8333	130.7983	5	1.9
2020/08/22 04:57:23	31.4150	130.5600	9	1.5	2021/01/28 02:47:01	31.5483	130.0650	6	2.0
2020/08/22 18:28:58	31.2983	130.3450	167	3.3	2021/02/06 02:44:15	31.1900	131.2767	44	1.5
2020/09/06 12:57:53	31.1883	130.8967	58	2.0	2021/02/12 12:23:06	31.9766	131.0200	102	2.5
2020/09/11 17:27:25	31.8250	130.2183	10	1.8	2021/02/15 10:29:42	31.4550	130.6933	92	1.6
2020/09/15 15:15:23	31.3367	130.4017	165	2.4	2021/02/21 23:27:55	31.9950	130.2616	10	2.7
2020/09/23 20:06:22	31.8483	130.7067	7	2.0	2021/03/01 22:32:52	31.3250	130.6183	8	2.4
2020/09/28 19:19:35	31.3317	130.6150	9	1.8	2021/03/03 11:37:13	31.3300	130.6183	9	2.5
2020/09/29 05:04:02	31.5150	130.5500	154	2.5	2021/03/10 09:07:26	31.6600	130.7683	4	3.1
2020/10/01 11:22:08	31.3333	130.6200	8	2.3	2021/03/11 05:14:42	31.6067	130.0700	8	2.0
2020/10/02 05:46:04	31.2717	130.7050	108	1.8	2021/03/12 20:22:09	31.8467	130.7150	9	1.9
2020/10/05 01:49:14	31.8983	130.6817	165	3.3	2021/03/15 19:31:24	31.3300	130.6200	6	2.8
2020/10/06 10:55:40	31.3150	130.3767	158	2.1	2021/03/27 19:24:08	31.4133	130.5633	9	1.9
2020/10/08 00:23:55	31.1017	130.8033	6	2.0	2021/04/02 06:38:28	31.7350	130.5216	8	2.8
2020/10/24 01:54:39	31.6667	130.7350	7	1.9	2021/04/05 13:39:49	31.8250	130.2150	10	1.5
2020/10/24 10:23:45	31.5417	130.0633	6	2.2	2021/04/05 21:35:57	31.6700	130.1400	10	1.5
2020/10/24 11:04:20	31.5617	130.6317	30	1.5	2021/04/19 03:36:19	31.5050	130.6083	11	1.6
2020/10/25 15:43:42	31.3900	130.6200	10	2.3	2021/04/27 05:27:59	31.3250	131.2817	47	1.8
2020/10/30 05:10:56	31.3283	130.6166	6	2.9	2021/04/28 18:49:57	31.2650	130.5933	5	1.7
2020/10/31 22:36:44	31.5733	130.3300	8	2.9	2021/04/29 04:55:10	31.2800	130.4300	154	2.5
2020/11/05 08:15:03	31.5700	130.3383	9	1.6	2021/05/29 05:14:12	31.6983	130.5017	164	2.2
2020/11/06 21:06:25	31.3117	130.5517	7	1.6	2021/06/06 01:40:58	31.7150	131.0450	67	2.0
2020/11/14 10:19:55	31.9283	131.1350	70	2.5	2021/06/16 21:46:52	31.8833	131.1883	66	2.5
2020/11/26 09:15:51	31.5167	130.0733	3	2.3	2021/07/09 06:04:58	31.5867	130.0867	9	2.1
2020/11/27 09:33:23	31.3066	130.4683	154	2.5	2021/07/12 10:40:24	31.3917	131.2950	46	1.6
2020/11/29 13:26:22	31.5383	130.0617	5	2.1	2021/07/19 22:32:21	31.5000	130.4167	5	1.7
2020/12/01 09:09:24	31.3033	130.5833	9	1.5	2021/07/27 08:32:12	31.2900	130.7200	111	3.1
2020/12/10 12:47:12	31.4083	131.2883	46	2.6	2021/07/29 18:31:24	31.3600	130.5483	7	1.5
2020/12/19 05:09:59	31.4000	130.6083	9	2.2	2021/07/29 22:31:39	31.7133	131.1517	59	1.6
2020/12/25 23:21:57	31.4983	130.5700	5	2.6	2021/08/08 08:49:01	31.2450	130.6150	8	3.5
2020/12/31 15:31:13	31.4317	130.6167	8	1.7	2021/08/08 18:59:55	31.6900	130.1667	7	1.5
2021/01/01 07:35:07	31.7417	131.1117	6	1.6	2021/08/12 04:17:24	31.1917	130.1867	7	2.0
2021/01/08 06:03:39	31.5700	130.6150	6	1.6	2021/08/12 09:53:44	31.5633	130.5800	9	1.7
2021/01/09 06:57:10	31.8617	131.0233	75	1.7	2021/08/12 19:26:41	31.2866	130.3650	158	2.5
2021/01/14 22:06:23	31.3983	130.6083	7	2.4	2021/08/13 14:59:12	31.2617	130.6350	7	2.1
2021/01/15 04:04:01	31.8283	131.0817	9	1.5	2021/08/18 22:11:40	31.8267	130.8933	95	1.6
2021/01/17 09:16:15	31.3183	131.1650	52	1.8	2021/08/26 14:21:04	31.6883	131.0550	67	1.5
2021/01/20 03:09:23	31.4983	130.4183	5	1.7	2021/08/30 03:55:34	31.6517	131.0633	63	1.6

2021/08/31 09:50:46	31.8433	130.9933	76	2.8	2022/01/31 18:05:40	31.8533	130.8267	1	1.5
2021/09/06 02:21:28	31.2600	131.0683	53	2.0	2022/02/14 04:03:33	31.6300	130.9650	7	3.4
2021/09/08 23:50:53	31.3967	130.6267	7	1.5	2022/02/18 10:28:13	31.3400	130.5550	10	2.2
2021/09/09 03:56:52	31.7600	131.0383	76	1.6	2022/02/26 01:15:08	31.6817	130.9767	71	1.6
2021/09/10 01:26:18	31.4683	130.5700	5	2.9	2022/03/12 04:44:09	31.7783	130.7917	9	1.5
2021/09/11 12:04:01	31.3117	130.5750	9	1.9	2022/03/20 12:59:23	31.7700	130.7900	7	1.6
2021/09/17 02:54:13	31.2700	130.3800	161	3.3	2022/03/29 07:01:47	31.5700	131.0400	67	1.6
2021/09/25 05:17:37	31.6383	130.9667	88	1.9	2022/03/29 08:09:54	31.9900	130.9933	104	1.7
2021/09/28 05:25:35	31.8233	130.9217	99	1.9	2022/03/31 21:43:31	31.5500	130.7133	119	1.9
2021/09/30 05:58:17	31.3150	130.4466	157	2.8	2022/04/16 18:31:28	31.9050	130.9733	13	1.7
2021/10/19 20:52:58	31.8617	131.0383	10	1.6	2022/04/30 11:16:37	31.9750	130.9267	6	2.6
2021/10/30 19:18:47	31.3300	130.4283	152	2.7	2022/05/18 11:07:29	31.7367	130.9383	88	2.3
2021/11/03 23:13:18	31.7683	130.7883	9	2.0	2022/05/23 01:54:04	31.3983	130.6267	9	1.8
2021/11/09 21:10:29	31.3266	130.4250	164	2.7	2022/06/07 09:37:21	31.2167	130.6333	113	2.0
2021/11/20 06:42:14	31.2283	130.6800	11	1.6	2022/06/08 11:09:36	31.9750	130.5150	8	2.1
2021/11/21 16:07:15	31.8933	129.2700	5	1.8	2022/06/15 14:30:39	31.3383	130.7833	4	1.8
2021/11/22 02:19:12	31.4183	130.9100	87	1.5	2022/06/18 22:55:16	31.9333	131.0267	6	1.5
2021/11/26 17:04:23	31.6083	130.7750	4	1.5	2022/06/29 18:27:45	31.3283	130.9400	68	3.0
2021/11/27 06:01:17	31.6267	130.7767	4	3.2	2022/07/05 09:49:36	31.9283	130.8900	1	1.6
2021/11/29 07:13:54	31.9400	130.8116	1	3.3	2022/07/10 22:29:07	31.5983	130.7583	3	2.0
2021/12/07 14:57:12	31.3783	130.5900	2	2.2	2022/07/19 20:55:54	31.2033	130.8150	7	2.0
2021/12/09 14:59:47	31.3350	130.5000	154	2.9	2022/08/15 02:12:38	31.4717	130.5667	6	1.8
2021/12/18 22:56:39	31.8583	130.9433	94	1.6	2022/09/17 06:30:50	31.3983	130.6200	119	1.6
2021/12/18 23:45:48	31.9700	130.4800	9	2.8	2022/09/22 06:19:52	31.9250	131.0133	9	1.8
2021/12/29 15:36:24	31.4767	130.5883	7	1.5	2022/09/26 08:17:27	31.8017	130.9150	83	1.6
2022/01/17 11:13:50	31.3833	130.7183	110	3.0	2022/10/12 17:39:24	31.8033	131.0367	73	1.8
2022/01/18 01:28:33	31.3100	130.6083	9	1.6	2022/10/30 23:41:00	31.0583	130.7433	69	2.0
2022/01/29 12:37:18	31.1850	130.6033	115	2.7	2022/11/15 06:15:49	31.8033	131.0867	68	1.6

(1) 1.3. レシーバ関数による始良カルデラ地下構造モデルの高精度化

a) レシーバ関数インバージョンによる S 波速度構造の推定

レシーバ関数とは、遠地地震の P 波部分において水平動から上下動をデコンボリューションして、観測点下の地震波速度不連続面で生成される PS 変換波を抽出した波形である（澁谷・他，2009）。レシーバ関数には、入射 P 波が地震波速度不連続面で P 波のまま透過する Pp 相に加え、後続波として、入射 P 波が不連続面で S 波に変換して透過する Ps 相、入射 P 波が地表面で PP 反射し、不連続面で PS 反射する PpPs 相、入射 P 波が地表面で PS 反射し、不連続面で SS 反射する PpSs 相が含まれる。

レシーバ関数解析では、地下深部の構造を良い分解能で解像できるのが利点である。Abe et al. (2013) は、九州地域における定常観測点の地震波形データを用いたレシーバ関数解析を行い、フィリピン海プレートの沈み込みにより「水」が深さ 70~90 km まで運び込まれていることを示した。澁谷・他 (2019) は、宮崎-阿久根測線と宮崎-桜島測線において、臨時観測点を追加することにより、観測点間隔が約 5 km のリニアアレイ観測を行い、詳細なレシーバ関数解析を行った。

本研究プロジェクトの令和 2 年度には、桜島島内の観測点で得られたレシーバ関数波形をインバージョンして求めた 1 次元 S 波速度構造をマッピングすることにより、S 波速度構造の 3 次元分布を推定した。その結果、深さ 20 km では桜島とその周辺域が全体的に低速度であること、深さ 30 km でも桜島南部から北側の錦江湾下を経て東側の錦江湾下までの領域（始良カルデラの南部）は低速度であることが分かった。

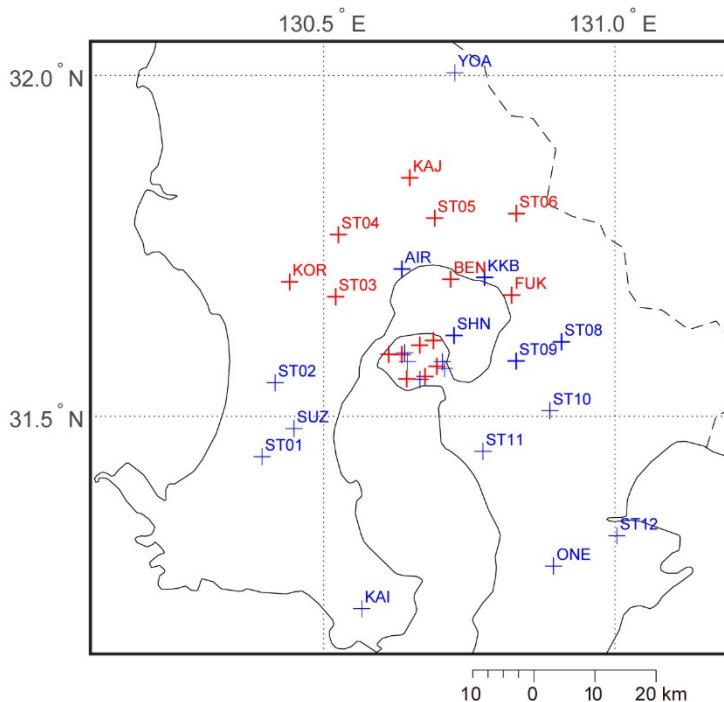


図 1-1-3-1. 始良カルデラ周辺の地震観測点の分布 (+)。今回のレシーバ関数解析で用いた点を赤色で示す。

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

今回の解析に用いた観測点を図1-1-3-1に赤い+で示す。湾奥部の海岸線付近の観測点はとくに重要である。湾奥北東部のFUKと湾奥北部のBENのレシーバ関数のR成分(radial成分)の波形を図1-1-3-2と図1-1-3-3にそれぞれ示す。レシーバ関数を求める際のデコンボリューションには時間拡張マルチテーパ法(Shibutani et al., 2008)を用いた。なお、湾奥南部のSHN、湾奥北西部のAIR、湾奥北東部のKKB、湾奥東部のST08とST09も重要な観測点であるが、良いレシーバ関数が十分蓄積されていないので、今回の解析には用いていない。

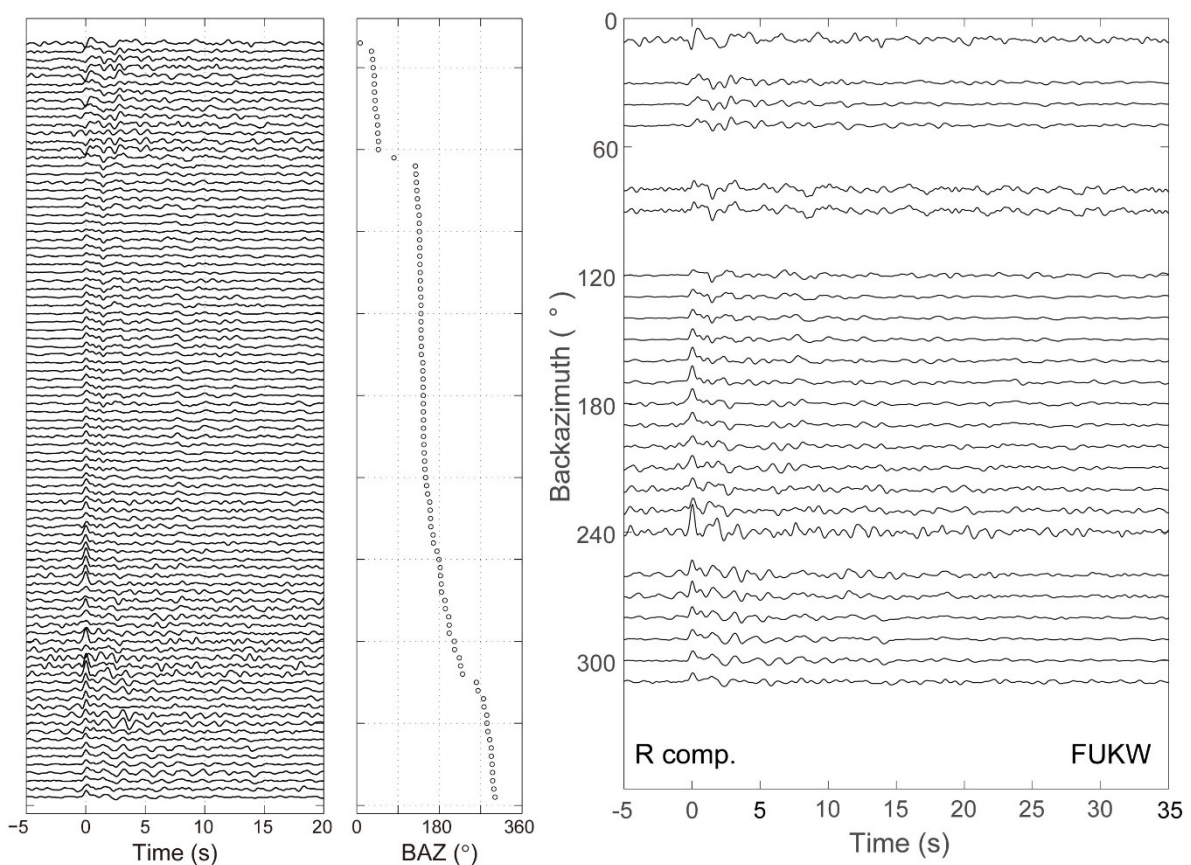


図1-1-3-2. 観測点FUKにおけるレシーバ関数のR成分の波形。(左図)到来方向に並べた個々の波形。(右図)到来方向の $10^\circ$ ごとに $\pm 10^\circ$ の範囲に入るレシーバ関数を重ねた波形。

図1-1-3-2の左図は、FUKで得られたレシーバ関数のR成分の波形を到来方向(BAZ)順に並べたものである。到来方向の近い波形は似た特徴を示す。右図は、到来方向の $10^\circ$ ごとに $\pm 10^\circ$ の範囲に入るレシーバ関数を重ねたものである。これによりノイズや小規模な不均質構造からの散乱波を抑え、S/N比を向上させることができる。到来方向とともにレシーバ関数の波形

が連続的に変化すること、および到来方向が  $60^\circ$  以上違うとレシーバ関数の波形もかなり違ってくることが見て取れる。

図 1-1-3-3 は、BEN で得られたレシーバ関数の R 成分の波形である。FUK より複雑な波形をしている。レシーバ関数の到来方向による違いが顕著である。このような特徴は、観測点下の構造が水平方向にも鉛直方向にも不均質であることを示唆している。

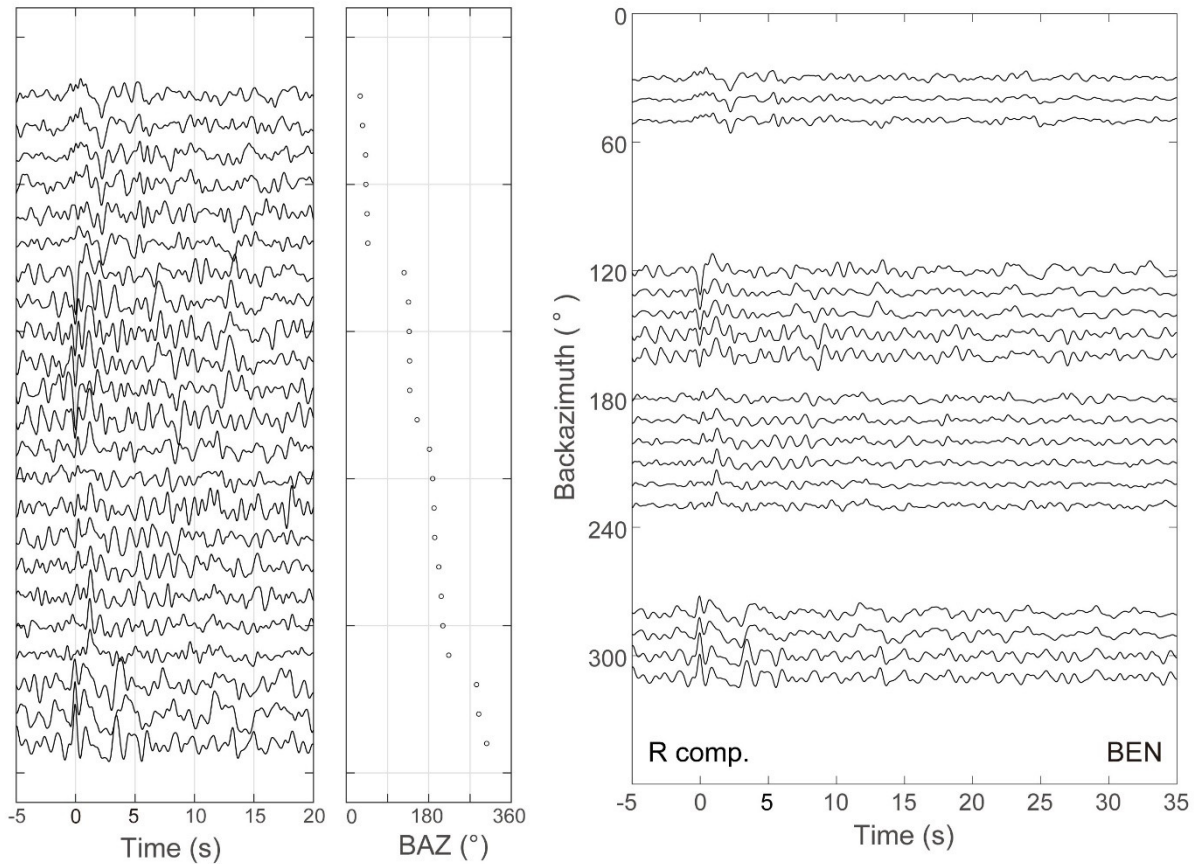


図 1-1-3-3. 観測点 BEN におけるレシーバ関数の R 成分の波形。(左図) 到来方向に並べた個々の波形。(右図) 到来方向の  $10^\circ$  ごとに  $\pm 10^\circ$  の範囲に入るレシーバ関数を重ねた波形。

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

波形インバージョンには遺伝アルゴリズム (GA) を用いた (Shibutani et al., 1996)。GA はグリッドサーチの一種であるが、生物の進化の過程 (淘汰、交配、変異) を模し、探索の効率化を図るものである。速度構造モデルのモデルパラメータの探索範囲の例を表 1-1-3-1 に示す。レシーバ関数の理論波形の計算には、Thomson-Haskell 法 (Haskell, 1962) を用いた。観測波形から得られたレシーバ関数と理論波形とのミスフィット値は、サンプリング点ごとのそれぞれの振幅の差の平方和で定義した。ミスフィット値が最小のモデルを最適モデル、小さい方から



1000 番目までのモデルを許容モデル、それらの重み付き平均を取ったものを平均モデルと呼ぶ。

表 1-1-3-1 遺伝アルゴリズムにおけるモデルパラメータの探索範囲

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

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

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

図 1-1-3-5 に BEN のインバージョンの結果を示す。FUK の場合と同様、(a)、(b)、(c) はそれぞれ到来方向 140°、190°、290° に対する S 波速度構造である。これら 3 方向の S 波速度構造に共通する特徴は、2~4 km 程度の厚さをもつ遅い (2.0 km/s) 表層と、FUK より速い (3.0 km/s) 上部地殻 (深さ約 13 km まで) と、その直下の低速度層 (S 波速度が 2.6 km/s 程度、厚さ 7~10 km) である。(d) ~ (f) に示すレシーバ関数は、図 1-1-3-3 でも述べたように、FUK

より複雑な波形をしているが、観測波形の特徴は理論波形においてもかなりよく再現されている。290° の到来方向の S 波速度構造も 11~21 km の深さに低速度層をもつことから、このあたりまではカルデラ内部をサンプリングしているものと考えられる。

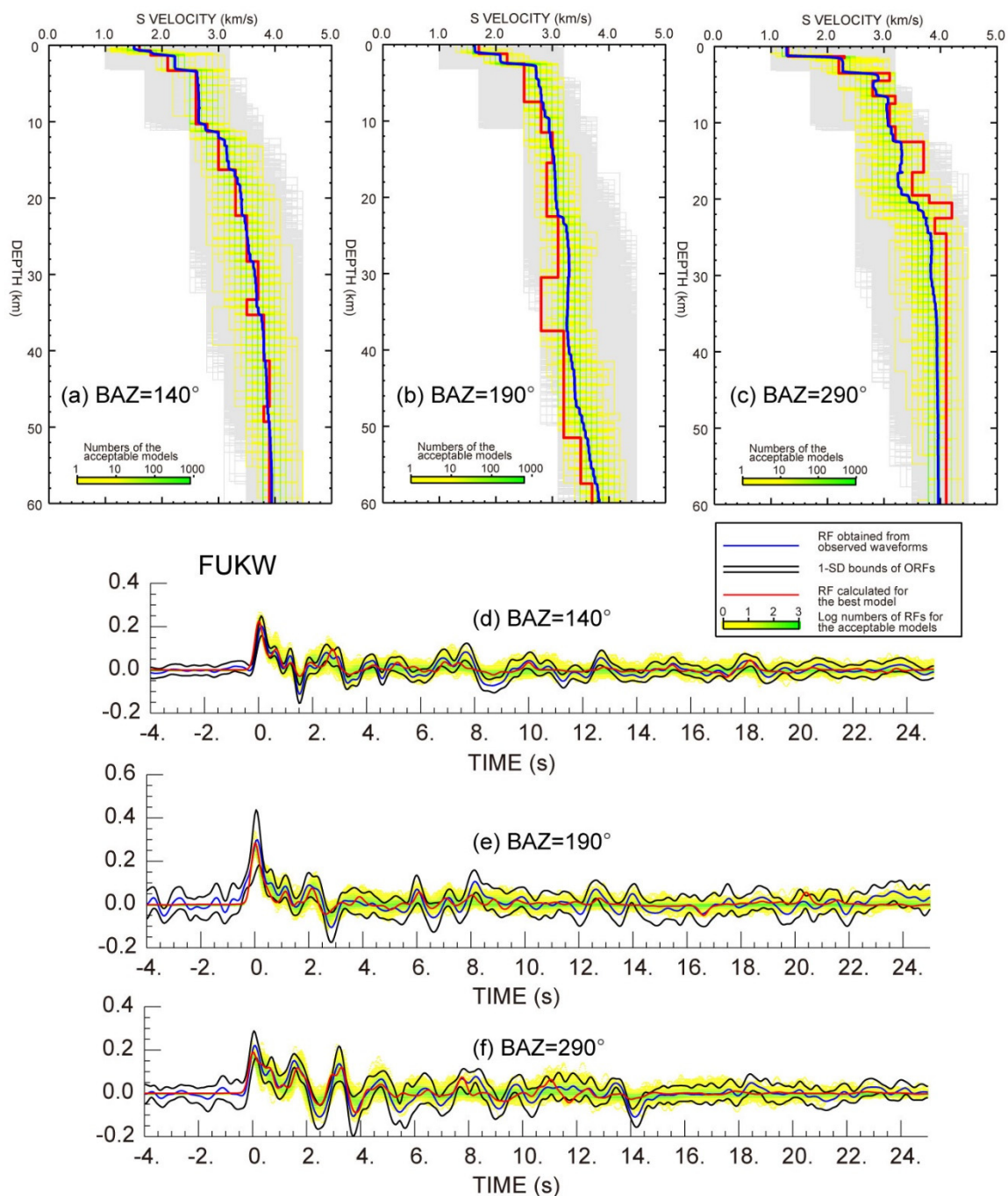


図 1-1-3-4. FUK でのレーシーバ関数インバージョンの結果。(a)、(b)、(c) はそれぞれ到来方向 140°、190°、290° に対する S 波速度構造である。最適モデルを赤線で、許容モデルの範囲をその個数に応じて緑から黄色で、平均モデルを青線で示す。(d)、(e)、(f) は到来方向 140°、190°、290° に対するレーシーバ関数の波形である。観測レーシーバ関数の重合波形を青線で、その ±1 標準偏差の範囲を黒線で、最適モデルに対する理論波形を赤線で、許容モデルに対する理論波形の範囲を緑から黄色で示す。

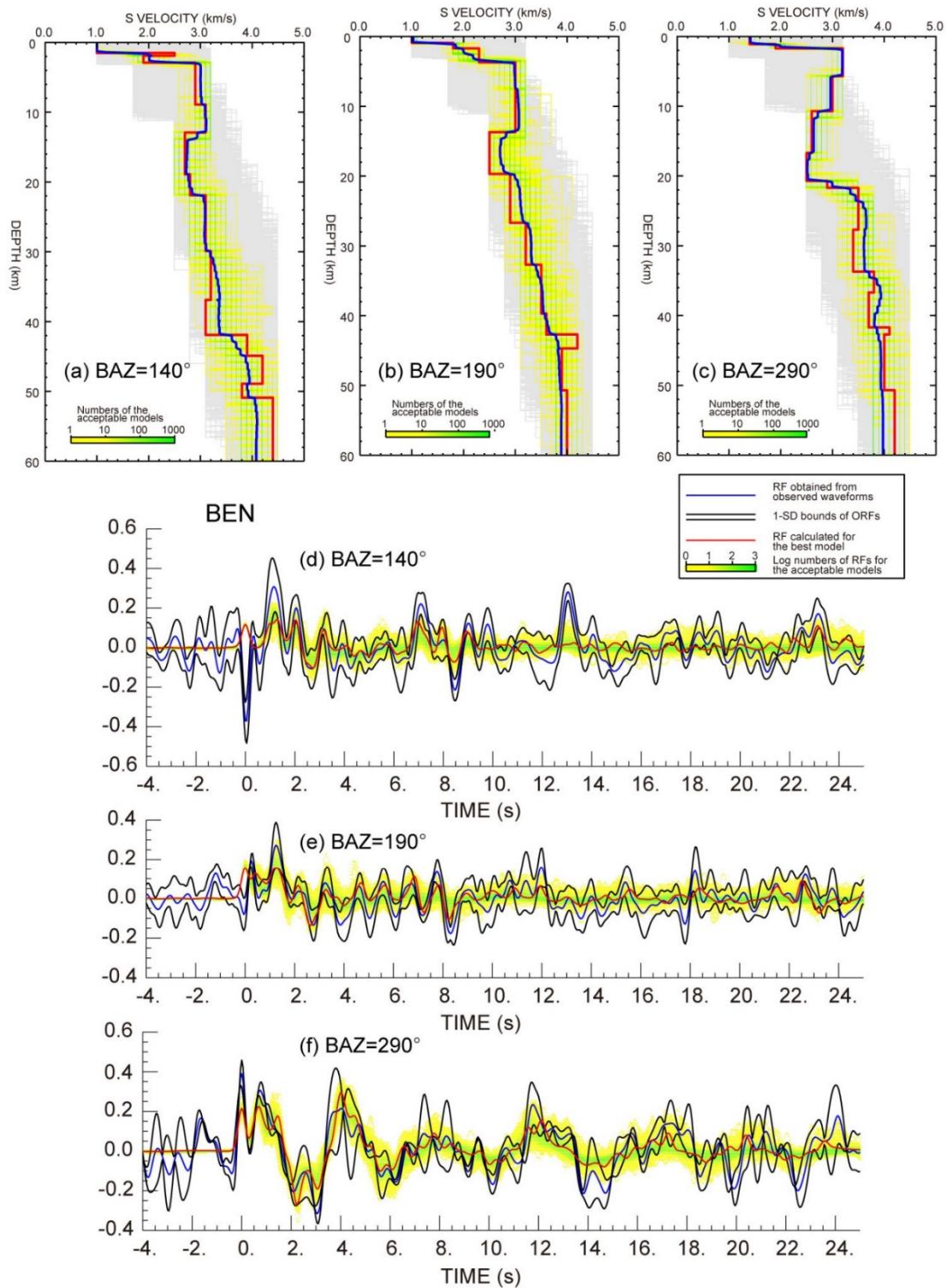


図 1-1-3-5. BEN でのレイシーバ関数インバージョンの結果。(a)、(b)、(c) はそれぞれ到来方向 140°、190°、290° に対する S 波速度構造であり、(d)、(e)、(f) はそれらに対応するレイシーバ関数の波形である。その他の説明は図 1-1-3-4 のキャプションを参照のこと。

b) 始良カルデラの S 波速度構造のマッピング

ある一つのレシーバ関数（到来方向 $\phi_1$ 、波線パラメータ $p_1$ ）から波形インバージョンにより推定された S 波速度構造の深さ $z_1$ における S 波速度を $\beta_1$ とする。まず、その観測点から到来方向 $\phi_1$ の断面において、S 波速度構造と波線パラメータ $p_1$ を用いて波線追跡を行う。その波線において、深さ $z_1$ での観測点からの水平距離 $r_1$ を求め、深さ $z_1$ における到来方向 $\phi_1$ かつ水平距離 $r_1$ のピクセル（1km×1km×1km）に S 波速度 $\beta_1$ をマッピングする。この手順をすべての観測点のすべての到来方向に対して推定された S 波速度構造について行う。ピクセル内に複数の S 波速度がマッピングされた場合はそれらの平均をとる。結果を図 1-1-3-6 に示す。

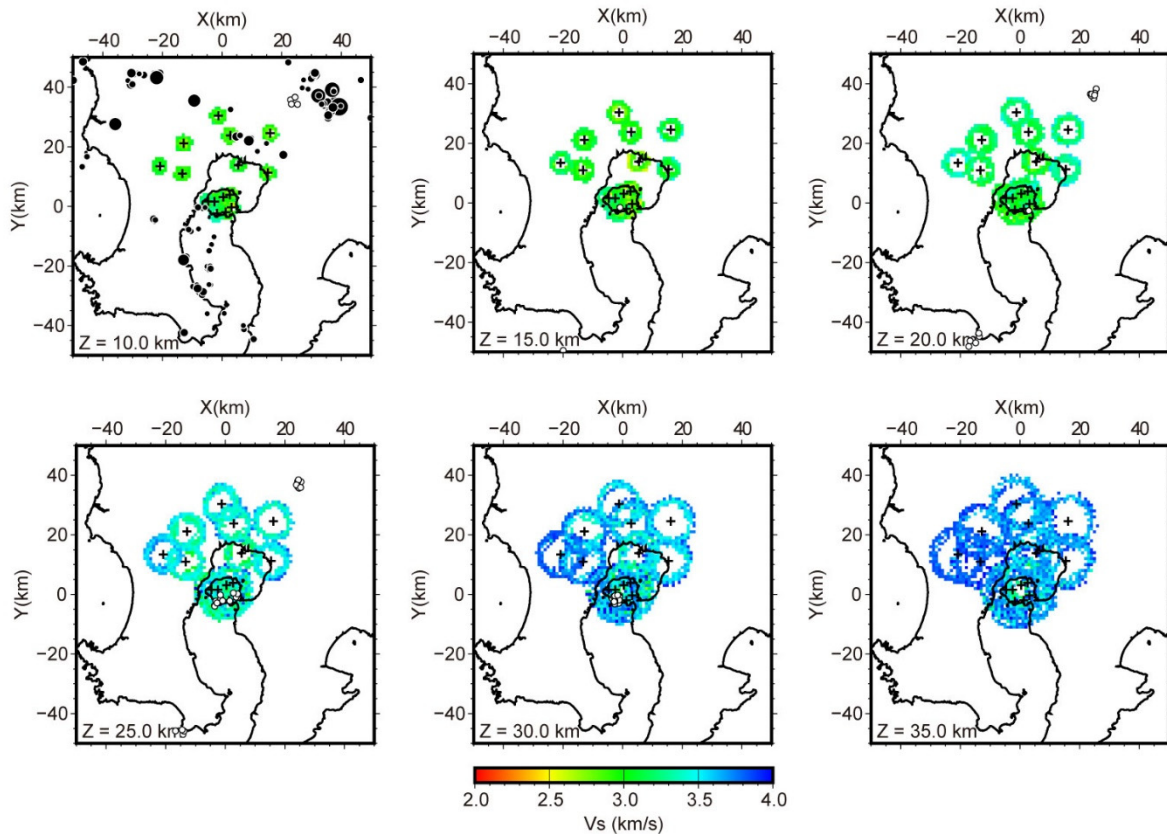


図 1-1-3-6. S 波速度構造のマッピングの結果。深さ 10 km から 35 km まで 5 km ごとに示す。+ は解析に用いた観測点である。黒丸は通常地震、白丸は低周波地震を示す。これらは各深さ断面の $\pm 0.5$  km の範囲に入るものをプロットした。

次に各深さの 2 次元断面において、GMT (Generic Mapping Tool, Wessel et al., 2019) の blockmean を用いて、4 km×4 km の格子で S 波速度を平均し、surface の tension factor を 0.25 に設定して補間し、1 km×1 km の格子点での S 波速度を求め、図示した。その結果を図 1-1-3-7 に示す。次に深さ断面ごとに S 波速度 ( $V_s$ ) の平均値 $\bar{V}_s$ を求め、 $dV_s = (V_s - \bar{V}_s) / \bar{V}_s \times 100$ により S 波速度の偏差を求め、図示した。その結果を図 1-1-3-8 に示す。

図 1-1-3-8 を見ると、深さ 10 km から 35 km まで、始良カルデラを中心として広範囲に低層度異常域が分布していることがわかる。とくに深さ 15 km において低速度異常が顕著である。これは、図 1-1-3-5 に示した湾奥北部の観測点 BEN の S 波速度構造において、深さ 13 km~20 km に

低速度層が見られることと対応している。20 km 以深にも桜島～湾奥部を中心に低速度異常域が続いている。深さ 15 km～30 km に見られる低周波地震もこれらの低速度異常域内で発生している。低速度異常の原因としてマグマなどの流体の関与が示唆される。

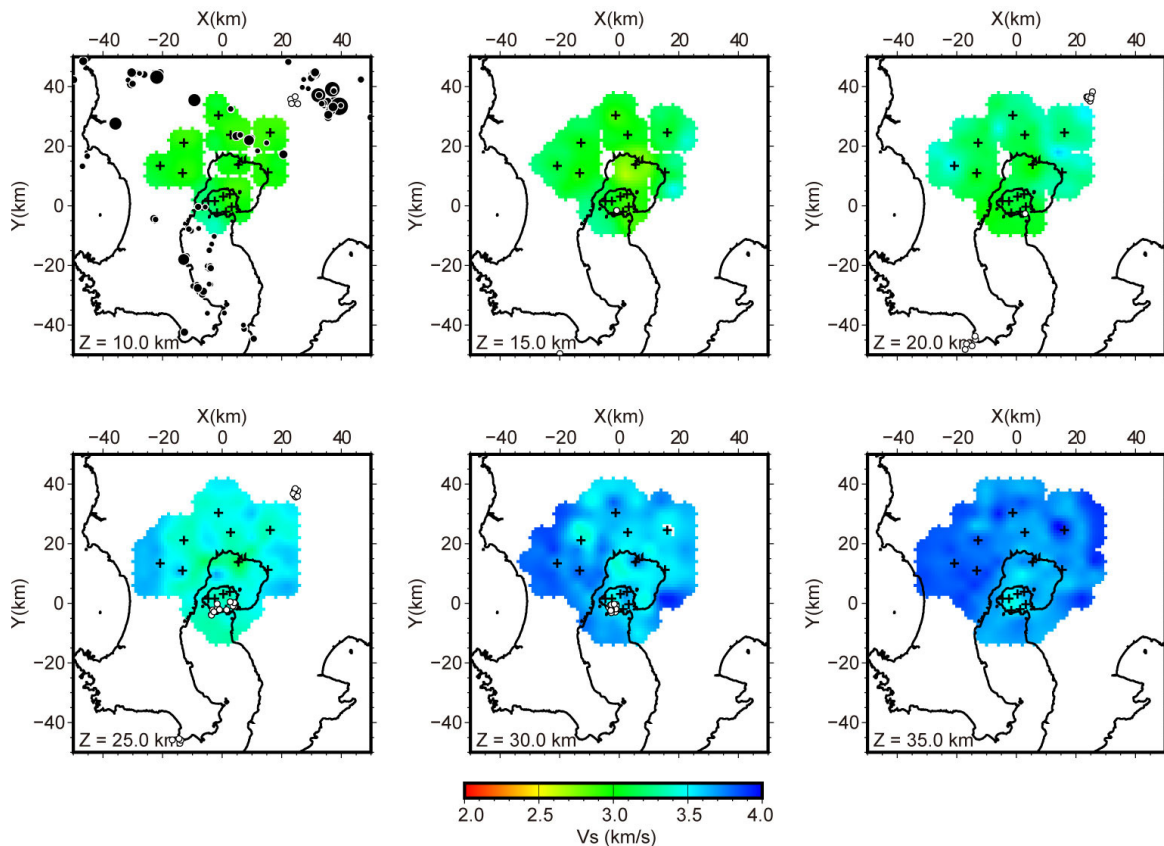


図 1-1-3-7. 図 1-1-3-6 の結果を補間して得られた 10 km から 35 km まで 5 km ごとの深さにおける S 波速度の不均質分布。その他の説明は図 6 のキャプションを参照のこと。

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

ただし、今回の解析では、マッピングされた S 波速度の補間に負うところが大きく、低速度異常域の大きさを正しく求められているかについてはさらなる検討が必要である。湾奥南部の SHN、湾奥北西部の AIR、湾奥北東部の KKB、湾奥東部の ST08 と ST09 などの観測点は、十分なレーザ関数が蓄積されていないため、今回の解析では使用できなかったが、これらの観測点を使うと、低速度異常域の大きさをより正確に推定できるようになると考えられる。加えて、湾奥北部に位置する BEN は低速度異常域の推定に重要な観測点であるが、2019 年に設置された臨時観測点であるため、今回使用したレーザ関数の数がまだ少ない。今後、未解析期間のレーザ関数を追加し、波形重合によるレーザ関数の SN 比の向上を図る必要がある。

今回の解析では、本委託研究によって得られた令和元年度の記録を 200 本、令和 2 年度の記録を 123 本使用した。BEN や ST03 などの臨時観測点については、その後の期間に取得された地震波形データを解析して、レシーバ関数を追加する必要がある。

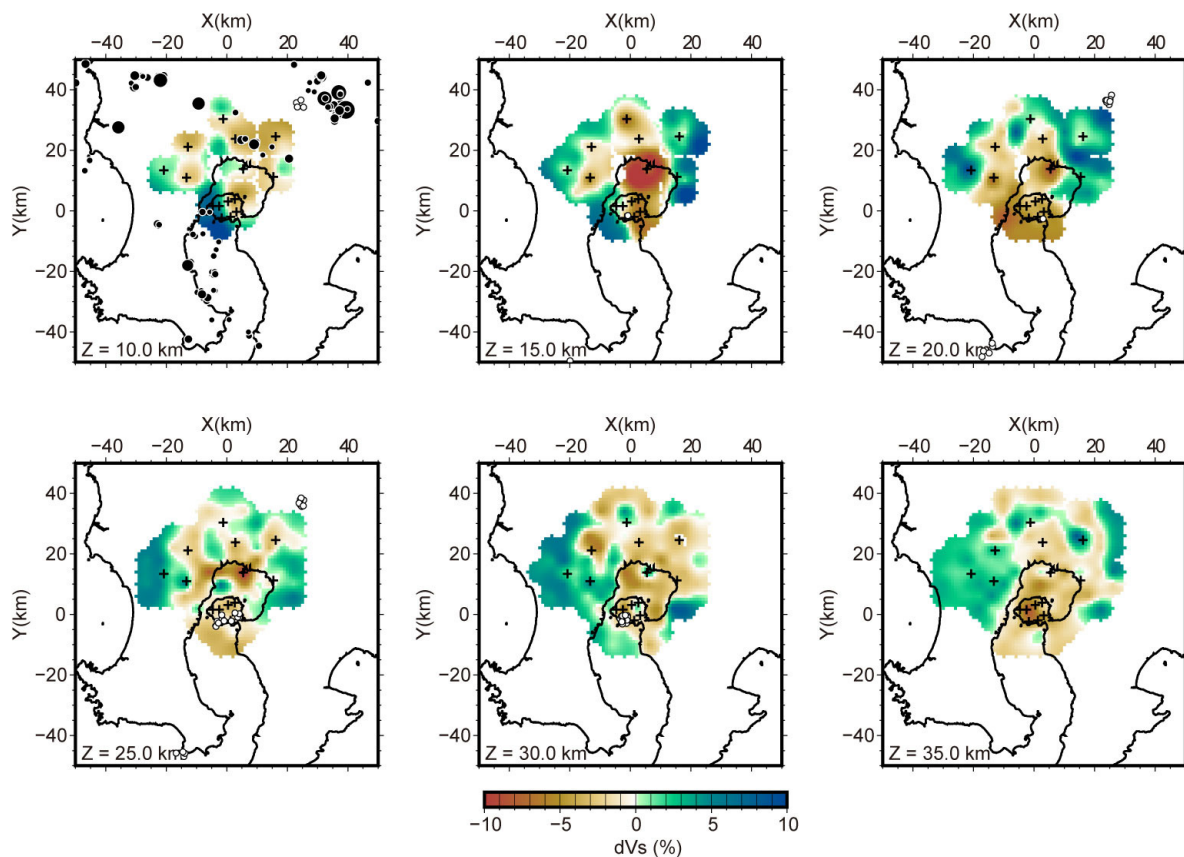


図 1-1-3-8. 10 km から 35 km まで 5 km ごとの深さにおける S 波速度の平均値からの偏差の不均質分布。なお、各深さでの S 波速度の平均値は、3.01、3.07、3.22、3.46、3.64、3.73 km/s である。その他の説明は図 6 のキャプションを参照のこと。

#### 参考文献

- Abe, Y., T. Ohkura, K. Hirahara, T. Shibutani, Along-arc variation in water distribution in the uppermost mantle beneath Kyushu, Japan, as derived from receiver function analyses, *J. Geophys. Res.*, 118, 3540-3556, doi:10.1002/jgrb.50257, 2013
- Haskell, N. A., Crustal reflection of plane P and SV waves, *J. geophys. Res.*, 67, 4751-4767, 1962
- Kurita, T., Regional variations in the structure of the crust in the central United States from P-wave spectra, *Bull. seism. Soc. Am.*, 63, 1663-1687, 1973
- 澁谷拓郎・平原和朗・上野友岳, レシーバ関数解析による地震波速度不連続構造, *地震*, 61, S199-S207, 2009

- Shibutani, T., M. Sambridge, and B. Kennett, Genetic algorithm inversion for receiver functions with application to crust and uppermost mantle structure beneath Eastern Australia, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 1829-1823, 1996
- 澁谷拓郎・寺石眞弘・小松信太郎・山崎健一・山下裕亮・大倉敬宏・吉川 慎・井口正人・為栗健・園田忠臣, 地震学的手法による南九州下のフィリピン海スラブとその周辺域の構造の推定, *京都大学防災研究所年報*, 62B, 279-287, 2019
- Shibutani, T., T. Ueno, K. Hirahara, Improvement in the extended-time multitaper receiver function estimation technique, *Bull. Seismo. Soc. Am.*, 98, 812-816, 2008, doi: 10.1785/0120070226
- 上野 寛・畠山信一・明田川 保・舟崎 淳・浜田信生, 気象庁の震源決定方法の改善－浅部速度構造と重み関数の改良－, *験震時報*, 65, 1507-1520, 2002
- Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F., Tian, D., The Generic Mapping Tools version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20, 5556-5564, 2019, <https://doi.org/10.1029/2019GC008515>

#### (1) 1.4. 始良カルデラにおける地震観測による地殻構造調査のまとめ

桜島を含む始良カルデラ地域における臨時地震観測点の維持管理およびデータ回収を継続的に  
行い、得られた地震観測記録を用いて3次元地震波トモグラフィとレシーバ関数解析から地殻  
構造調査を行った。トモグラフィ解析では解析に用いる地震イベントについて臨時観測の継続に  
より着実にデータが集まり、始良カルデラ内の地震イベントに関してはM1.5以上を、その外側  
の南九州一円で発生した地震に関してはM2.0以上の地震を使うことでデータセットを充実させ  
た。また2008年の人工地震探査における観測記録を用いて浅部構造の精度が改善されている。  
その結果として、トモグラフィ解析の深度は45 kmまで進み、S波低速度異常領域は深さ12 km  
~22 kmの範囲にあることが分かった。また、桜島の南西部における深さ35 kmに高 $V_p/V_s$ が見  
出された。この領域は深さ25-30 kmの深部低周波地震の発生領域の直下にあたり、深部低周波  
地震の発生源とされる深部流体との関連が注目される。

トモグラフィ解析の結果を用いてメルト量の推定を行った。P波速度が平均速度より-5%以下  
となる領域の体積は約380 km<sup>3</sup>になった。S波低速度異常領域をマグマ溜りとしてP波とS波を  
組み合わせて推定を行なった結果、メルトインクルージョン率を7%とすると、始良カルデラ下  
の5 ~ 25 kmの深さにあるメルト量は最大26.6 km<sup>3</sup>と見積もられた。

また、S波低速度異常領域の範囲を制約する補足の情報として、近地地震波の振幅減衰の調査  
を開始した。地震波の振幅減衰を定量的に扱う上で必要な観測点から見た多方位データの抽出、  
観測点直下のサイト特性の評価を行なった。震源メカニズム効果による振幅補正の必要がある  
が、始良カルデラ下を通過してくる波線は震源メカニズム効果を大幅に超える減衰が見られる。

レシーバ関数インバージョン解析で始良カルデラ下のS波速度構造の推定が行なわれた。表層  
の速度を考慮して1次元S波速度構造のマッピングを行ない、各観測点の結果を統合することで  
始良カルデラ下のS波速度構造の3次元分布の推定を行なった。その結果、深さ15 kmでは桜  
島とその周辺域が全体的に低速度であり、特に始良カルデラ内が周辺と比較して10%以上低速  
度であること、深さ20 km - 35 kmでも桜島南部から始良カルデラ南部にかけて低速度であるこ  
とが分かった。

レシーバ関数解析と地震波速度トモグラフィ解析からはともに始良カルデラ中央部にS波低速  
度異常が存在している結果が得られた。このことから始良カルデラ中央部の深さ15 kmを中心と  
する低速度領域の存在は確実である。しかし、低速度領域内のS波速度については両者に差があ  
る。トモグラフィでは周辺速度と比較して最大44%の速度低下に対してレシーバ関数の解析結  
果では10%程度の速度低下である。両者の推定結果が異なる理由は次のように考えられる。ト  
モグラフィ解析で観測された地震波走時を説明するために用いる波線追跡法は速度勾配が小さい  
ことを前提に構成されたものであるため、大きな速度勾配のある領域ではその前提が成り立たず  
走時モデリングがうまくいかない傾向がある。一方、レシーバ関数解析では速度コントラストの  
ある境界をP波が通過する際に発生するPs変換波を解析の対象としているために、大きな速度  
コントラストでも前提条件の破綻が起こらない。さらにレシーバ関数はトモグラフィ解析より長  
波長の記録を用いるため、トモグラフィ解析より平均的な速度異常を検知していると考えられ  
る。



双方の解析結果から始良カルデラ下の地殻から上部マントルにかけての地下構造がほぼ明らかになってきた。来年度は、レシーバ関数および地震波減衰領域のための波線を増やして低速度領域の構造をより詳細にしていく。また、始良カルデラで発生する構造性地震の震源およびメカニズム解などの情報を加えて地下構造モデルを検討する。

(1) 2. 始良カルデラにおける長期連続反射法探査の有効性の検討

始良カルデラの地下深部における地下構造変化の検出手法を検討することを目的として、令和4年度は長期連続反射法探査の基礎実験を実施した。長期連続反射法探査は人工地震波を地下に放射することによって始良カルデラの地下深部で生ずる地震反射波をとらえ、その地震反射波の振幅・走時等の変化を継続的に長期間追跡することによって始良カルデラの火山活動に伴うマグマの変化を知ることを狙っている。火山活動に伴う地震反射波の変化に関する先行研究例としては、Tsutsui et al. (2016)が桜島の火山活動に伴う地震反射強度の変化を検出するとともにその変化が地下のマグマの状態変化で説明できることをすでに報告している。

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

令和4年度は令和2年度に実施された発振条件のうち、最適と判断された発振条件を採用して同一地点で発振を行い観測波形の再現性を検証した。

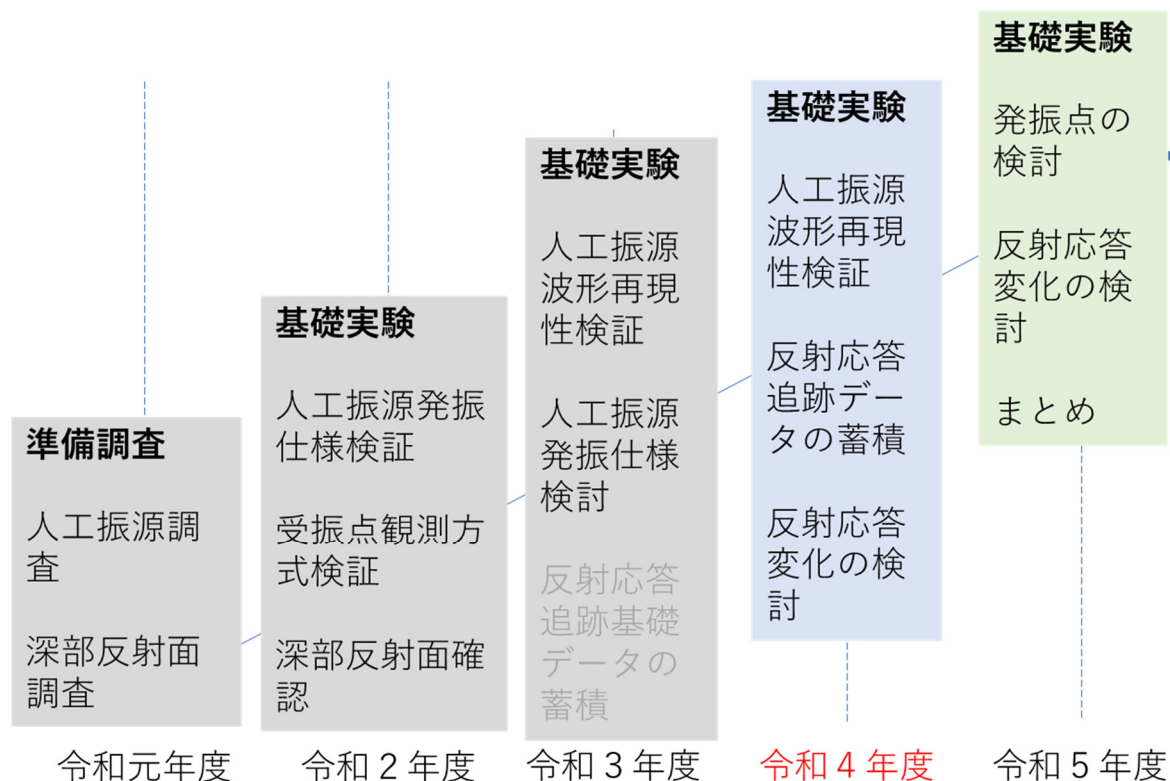


図1-2-1. 長期連続反射法探査の検討のロードマップ

(1) 2.1. 令和4年度基礎実験の目的

- ・ 振源波形の安定性の確認
- ・ 繰り返し発振の重合効果の確認
- ・ 制御不能な要素が振源波形に及ぼす影響の確認

(1) 2.2. 観測展開

令和4年度の基礎実験の基本的な観測点配置は令和2年度基礎実験（京都大学防災研究所，2021）と同一である（図1-2-2a）。始良カルデラの北西側に位置する始良市住吉池に発振点を設けて人工的に地震波を発生し、始良カルデラ西部の地下を通過してきた地震波を桜島に設けた地震観測点で捉えることにする。

発振点と地震観測点の間の始良カルデラの地下にはS波低速度領域（為栗他，2022）と反射面（筒井他，2021）の存在が明らかにされており、下図の測線配置によってこれらの地震学的な特徴の火山活動に伴う変化を検出することが期待される。

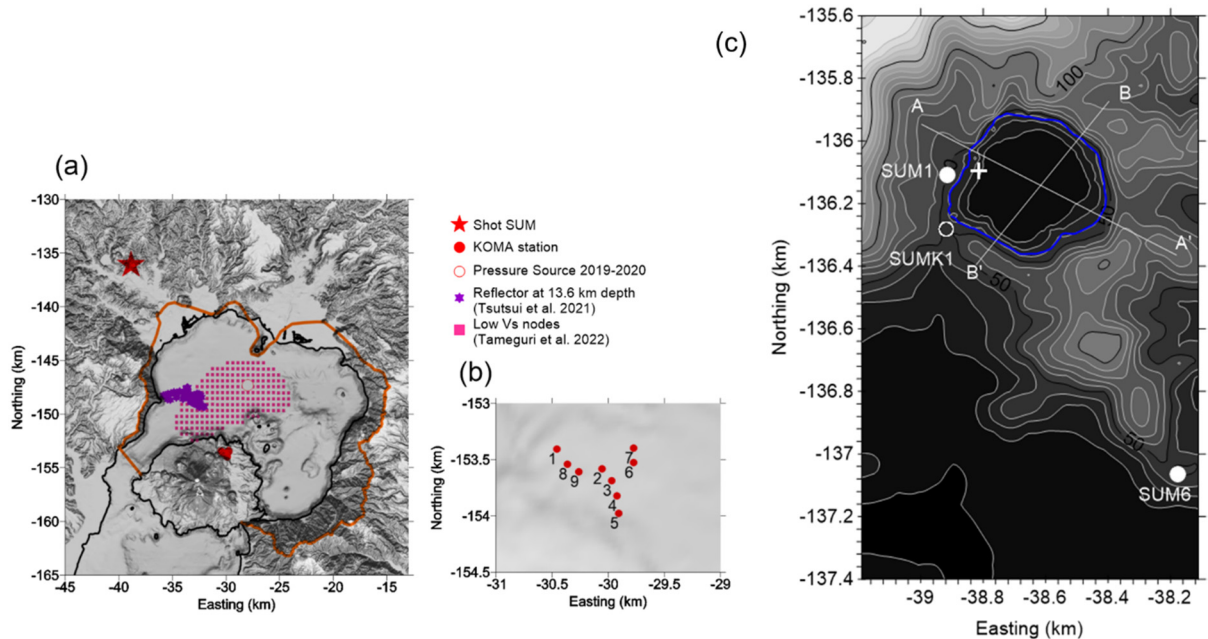


図1-2-2. (a) 基礎実験の全体配置と始良カルデラ。(b) 高免アレイ KOMA 観測点展開、(c) 住吉池 発振点と近傍観測点 SUM1, SUMK1, SUM6。(c)の等高線は10m 間隔である。陸上標高データは国土地理院(2000)を、海域水深データは日本水路協会(2002)によるものを用いた。

人工地震によって地下構造の変化を検出するためには、地震波の発生から記録の取得に至るまでの条件を極力制御下におくとともに、条件変化の影響を取り除く手段を持つことが必要である。特に地震記録の質を左右する振源波形は観測の時期に依らず常に一定のものであることが強く要請される。今回の基礎実験では振源波形の再現性の検証に焦点をあてた実験を行った。

エアガンを懸架するポンツーン的位置を図1-2-3に示す。今回の実験(2022)のポンツーン中央位置座標を表1-2-1に示す。平面上に投影したエアガン配置の中心位置をここではポンツーン中

心位置と称することにする。ポンツーン中央の測位値はKAMOを基準とするPPK解析で求めたものの観測期間中の平均を示している。今回の実験では令和2年度実験のポンツーン中央位置を目標に、それから2m以内の精度での設置を目指した。表1-2-1では今回の令和4年度実験のポンツーン中心位置を令和2年度実験（京都大学防災研究所，2021）とともに示すが、令和4年実験におけるポンツーン中心位置は令和2年実験のそれにくらべて南方約0.9mの位置であった。両実験におけるポンツーン位置は1m以内に位置が一致しており、水平位置では同一地点での発振が実現されていると見なせる。

表 1-2-1. エアガンポンツーン中心位置

	緯度 (度)	経度 (度)	X (M)	Y (M)	Z (M)
2022	31.771956885	130.590209518	-136095.424	-38814.190	73.758
2020	31.771948903	130.590209180	-136096.308	-38814.225	73.324
[2022]-[2020]	0.000007982	0.000000338	0.885	0.035	0.433

図 1-2-3 には実験当時のポンツーンの周囲の水深も示す。ポンツーンとその周辺の湖底地形はほぼ東に向かって下る傾斜を示している。また表 1-2-1 に示される GNSS による測定では、令和4年実験では令和2年実験時に比べて水位が平均 0.4m 高かった。なお、ポンツーンの周囲の水深はエアガン発振作業中にデプスマッピング機能付き魚群探知機（HDX-9S：本多電子株式会社製）を用いて計測した。

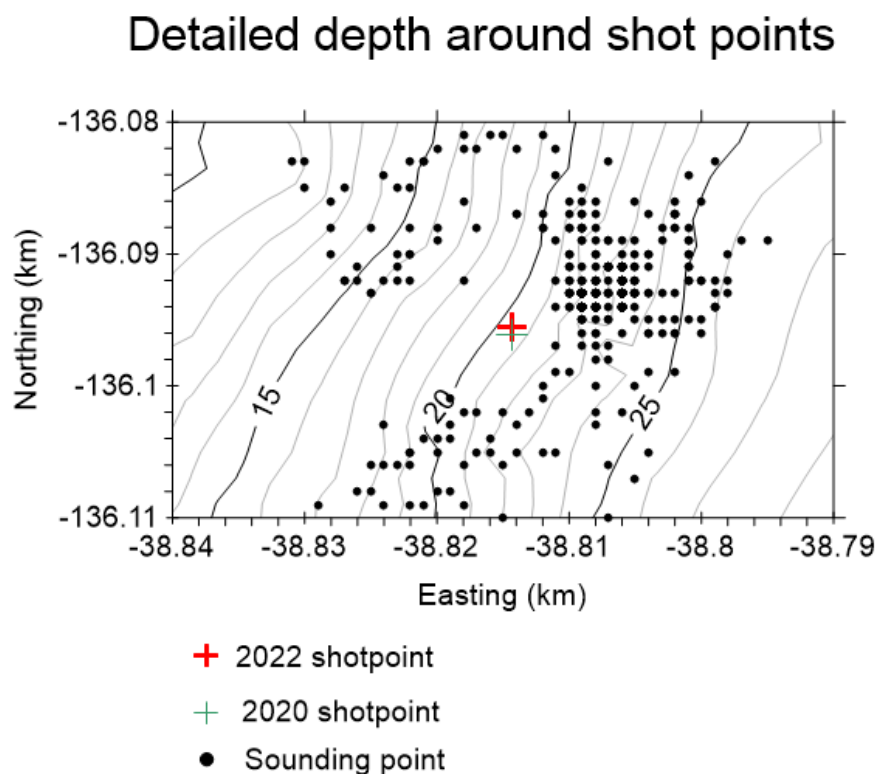


図 1-2-3. ポンツーン中心位置と湖底地形

陸上観測点は住吉池近傍地区（図 1-2-2c）と始良カルデラを挟んだ桜島地区（図 1-2-2b）との 2 つのグループに分かれている。住吉池地区の観測点は振源波形の把握のために展開され、桜島地区の観測点は始良カルデラ地下からの反射地震波を取得するために展開された。住吉池近傍地区の観測点は記号 SUM を冠した名称で表し、桜島地区の観測点は高免アレイ (KOM) と総称され各観測点は地表／孔中の別を S / B の頭文字 + KOM を冠した名称で表す。下表 1-2-2 に各観測点の座標を示す。

表 1-2-2. 観測点位置

Station	Latitude	Longitude	X <sup>*</sup>	Y <sup>*</sup>	Elevation
SKOM1	31.61611	130.67893	-30461.6642	-153402.5706	150.9
SKOM2	31.61453	130.68318	-30058.94939	-153578.9215	139.5
SKOM3	31.61358	130.68409	-29972.91529	-153684.4977	135.5
SKOM4	31.61237	130.6846	-29924.91438	-153818.7898	126.6
SKOM5	31.61095	130.68477	-29909.23885	-153976.2713	112.2
SKOM6	31.61502	130.68614	-29777.95602	-153525.4056	127.3
SKOM7	31.61619	130.68615	-29776.63476	-153395.6907	123.1
SKOM8	31.61488	130.67994	-30366.23887	-153539.2215	158.6
SKOM9	31.61428	130.68101	-30264.91446	-153606.0401	160.7
BKOM1	31.61611	130.67893	-30461.6642	-153402.5706	140.9
BKOM2	31.61453	130.68318	-30058.94939	-153578.9215	129.5
BKOM3	31.61358	130.68409	-29972.91529	-153684.4977	125.5
BKOM4	31.61237	130.6846	-29924.91438	-153818.7898	116.6
BKOM5	31.61095	130.68477	-29909.23885	-153976.2713	102.2
BKOM6	31.61502	130.68614	-29777.95602	-153525.4056	117.3
BKOM7	31.61619	130.68615	-29776.63476	-153395.6907	113.1
SUM1	31.771861	130.589167	-38912.97476	-136105.6821	51.1
SUM6	31.763308	130.596931	-38181.09672	-137056.7282	38.4

a) 発振点

発振点は図 1-2-4 に示す 3 連構成のエアガン（トリガン）を用いて発振作業を行った。エアガンシステムを構成する主要機器の諸元を表 1-2-3 に示す。

今回用いたトリガンは令和 2 年実験で発振システムの一部として用いたトリガンと同じモデルであるが、令和 3 年度にあらたに調達された個体である。京大防災研(2021)はトリガン 1 基で充分に目的を達成できることを報告している。

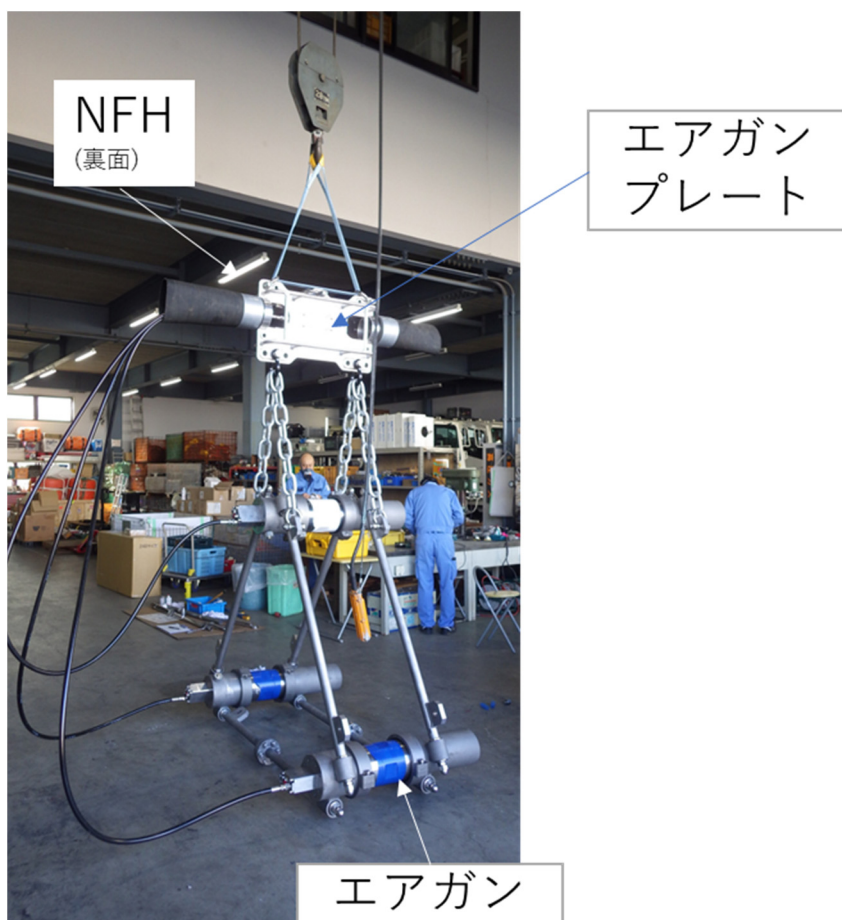


図 1-2-4. Teledyne BOLT 1500LL 350 cui チャンバ付き 3 連構成トリガン。吊り下げ状態を示す。最上部のプレートの反対側側面上部にニアフィールドハイドロフォン(NFH) が取り付けられている。京都大学防災研究所(2022)より。

表 1-2-3. 使用したエアガンシステムの諸元

構成品	項目	値
エアガン	型式	1500LL (Teledyne BOLT 社製) 3 連構成
	チャンバ容積	350 cui (5.5 Litter) × 3 = 1050 cui
	動作空気圧	2000 psi (13.8 MPa)
	総重量	560 kg
	トリガー方式	電気信号による電磁弁作動
	制御装置	HotShot
高圧コンプレッサ	型式	4S50A-15M (三和鉄工所製)
	圧縮能力	120 m <sup>3</sup> /h
	最大圧力	15 MPa
マニホールド	容量	1000 Litter

エアガンは水面に浮かべたポンツーン足場から水中に懸架して発振作業に用いた。ポンツーン足場は京都大学防災研究所(2021)で整備された6m×6mの広さをもつ組み立て式のものをほぼそのまま用いた。令和4年実験では水中に懸架するエアガンは1種類のみとしたので懸架用のやぐらは1基のみを足場の中央に立てて用いた。

発振点展開に先立ち令和2年度実験と同一地点を探しマーカブイを投入した。ポンツーン足場はその場所までエンジン付きボートで曳航したのちに、アンカーを投入して固定した。発振作業期間中は固定場所にポンツーン足場を浮かべたままとした(図1-2-5)。

ポンツーンの測位にはGNSS受信機NovAtel PwrPak7Dを用いた。ポンツーンの対向する二辺の中央にそれぞれ1基ずつのGNSSアンテナGNSS-802を装着し、発振を行った全期間を通して連続記録を取得した。取得されたデータは住吉池近傍の蒲生高校(KAMO)観測点を基準としたキネマティック解析を行い、ポンツーン位置を決定した。

なお、令和4年実験では騒音改善およびホース長の短縮を狙いコンプレッサおよびマニホールドを水面に浮かべた小型船舶(コンプレッサ船)の上に搭載して使用した(図1-2-5)。住吉池の水が農業用水として使われていることを考慮して、コンプレッサ船ではコンプレッサ系統の作動に伴って生ずる廃液の漏洩対策を施した。

基礎実験終了後ポンツーン足場は現地で解体し、京都大学火山活動研究センターの敷地内に収容した。



図1-2-5. エアガンポンツーン(上右)とコンプレッサ船(左下)。コンプレッサ船上には高圧コンプレッサとマニホールドを搭載した。

住吉池における発振システムおよび観測システムの構成を図1-2-6に示す。

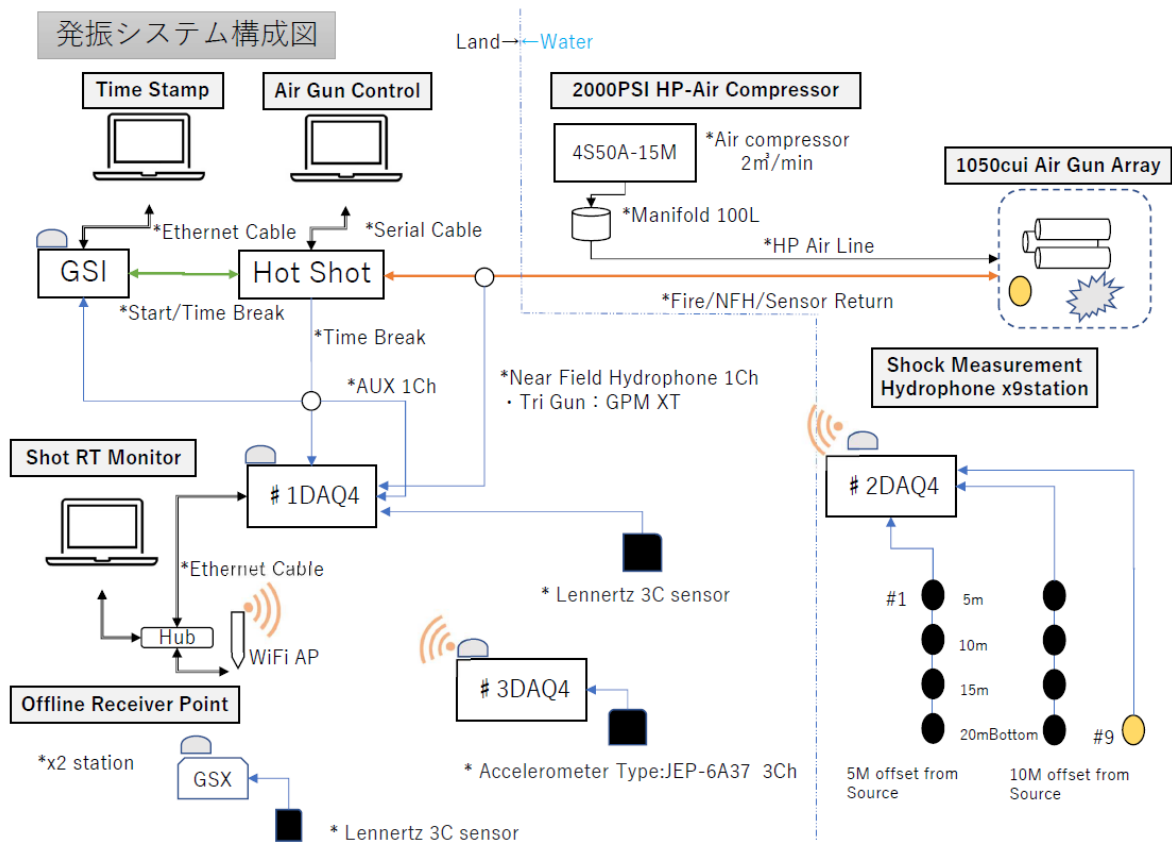


図 1-2-6. エアガン制御系統および住吉池近傍観測点

エアガン発振は Air gun コントロールで設定された HotShot 装置が発する信号を水中のエアガンの電磁弁に送ることによって行われる。エアガン発振時刻は Hot Shot の Time Break 信号に接続された記録装置 GSI によって記録され、全体の観測記録編集に用いられる。

#### b) 観測点

観測点は図 1-2-2 に示されるように住吉池地区と桜島地区にわかれて設置された。

図 1-2-6 に住吉池地区の近傍観測点の構成を示す。住吉池地区の 2 つの速度計観測点 (SUM1, SUM6) は GPS による時刻管理がなされた独立型記録装置 GSX に Lennertz 社製 1 Hz 3 成分地震計を接続して記録を取得した。速度計観測点 SUM1 は、加速度計観測点 SUMK1 と水中ハイドロフォン群とともに記録計 DAQ4 に接続され、振源近傍の記録を取得する。加速度計観測点と水中ハイドロフォン群はケーブルによる直結に困難を伴うことから無線 LAN を応用したデータ伝送を採用した。

加速度計観測点 SUMK1 では JEP-6A3 過減衰型動コイル加速度計+記録装置 DAQ-link4 を採用した。

水中ハイドロフォン観測については本項後述の付録に記述した。



## アレイ観測点設置図

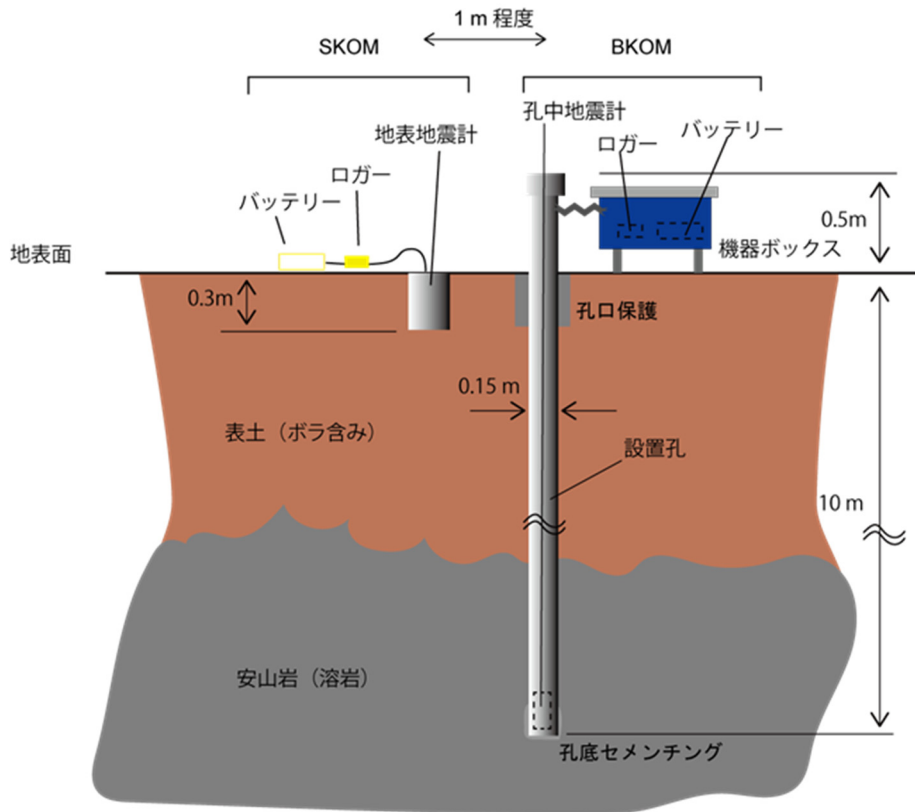


図 1-2-7. 高免アレイ

桜島地区の高免アレイ観測点の構成を図 1-2-7 に示す。高免アレイ KOMA は桜島北東部の高免地区に展開され、直径約 600m の群列（アレイ）配置を全 16 点の観測点で構成してある。そのうち 7 点は 3 成分孔中地震計で、9 点の地表設置 3 成分地震計から構成される。KOMA から SUM を見た方角は  $N26.2^{\circ}W$  である。以降では 7 点の孔中地震計観測点を BKOM で始まるコード名で、地表地震計観測点を SKOM で始まるコード名で呼ぶことにする。7 点の BKOM 観測点は令和 2 年に設置された準定常点で京都大学防災研究所(2021)と同一である。のこり 9 点の地表観測点 SKOM はいずれも臨時観測点として設置され、7 点の地表地震計観測点は図 1-2-8 のように 3 成分地震計を孔中地震計の孔口に近接して併設し、のこりの 2 点は孔中地震計の配置を補う位置に単独で設置された。



図 1-2-8. 高免アレイ観測点の例 (BKOM6 地点 6)。青色ボックスにロガーおよびバッテリーを収容する。青色ボックスの左側の灰色のパイプが地震計孔口。孔中地震計は地表から 10m の孔底に設置された。(京都大学防災研究所, 2021)

地表観測点 SKOM の観測機材の写真を図 1-2-9 に示す。地表観測点 SKOM では固有周波数 1 Hz の三成分地震計 (Geospace 社製 GS-1LF) に GSR-3LF レコーダー (Geospace 社製) を接続し、孔中観測点 BKOM では固有周波数 1Hz の 3 成分地震計 (サイヌモテック社製 SMN0100-4) に GSR-3LF レコーダー (Geospace 社製) を接続し、いずれも現地収録を行った。



図 1-2-9. 地表観測点機材。白色機材はバッテリー、黄色機材は記録装置 GSR-3LF、濃緑色の円筒形機材は地表用 3 成分地震計 GS-1LF。(京都大学防災研究所, 2021)

### (1) 2.3. 観測内容

#### a) 発振作業

今回の実験ではエアガン発振を表 1-2-4 に示される 2 種類の発振パラメータの組み合わせで実施した。以降では各発振パラメータセットを、京都大学防災研究所(2021)にならい以下の 3 文字の簡略なコードで区別することにする。

アルファベット1文字目=エアガン容積：A = 2550 cui, B = 1050 cui、  
 アルファベット2文字目=動作圧：A=2000 psi (136 気圧), B=1000 psi (68 気圧)、  
 アルファベット3文字目=エアガン水深：A=10 m, B= 6m, C= 10.5 m

したがって、パラメータセット BAA はエアガン容積 1050cui、動作圧 2000 psi、エアガン水深 10 m での発振を表す。また、実際の実験に際して制御不能な条件の影響も加味されることを考慮して、本稿では発振パラメータセットの略号の後ろに西暦年を表す4桁の数字をつけて区別することにする。

発振パラメータセット BAA は令和2年度実験でもっとも高い発振効率を示したうえ単峰形の包絡線形状の振源波形を発生するものであり、本項目の目的に適合するものであった。今回の実験ではこのパラメータセットによる発振を重点的に行った。今回の実験におけるパラメータセットを BAA2022 と称することにし、令和2年実験の同じパラメータセットを BAA2020 と称することにする。

発振パラメータセット BAC は先述のパラメータセット BAA の派生版である。先述のように令和4年実験は令和2年実験当時に比べて0.5 m 水位が高い条件下で行われた。それにともなってパラメータセット BAA2022 ではエアガンから水底までの距離が BAA2020 に比べて0.5m 大きくなる。そこで令和4年実験ではエアガンから水底までの距離（クリアランス距離）を BAA2020 に合わせることにして、エアガン水深を 10.5 m に設定した発振を行った。以降ではこのパラメータセットを BAC2022 と称する。

表 1-2-4. エアガン発振作業内容。

月日	天候	発振内容	時間帯
12/16,	曇り	発振 BAA (1050 cui, 2000 psi, 10 m 深)	9 時 00 分～17 時 00 分 1 分 30 秒間隔 合計 307 回発振
12/17	曇り一時み ぞれ	発振 BAA (1050 cui, 2000 psi, 10 m 深)	9 時 00 分～15 時 50 分 1 分 30 秒間隔 合計 268 回発振
12/18	曇り一時雪	発振 BAC (1050 cui, 2000 psi, 10.5 m 深)	9 時 00 分～17 時 1 分 30 秒間隔 合計 317 回発振

図 1-2-10 はエアガン発振から数秒後のエアが気泡となって現れたところを撮影したものである。エアガン発振と同時にエアガン直上の水面が素早く上下し、それが収まった後にエアガンから放出されたエアが気泡となって水面に現れる。ポンツーン周辺の水面で水の流れがもっとも速くなるのは気泡が水面に達した時であった。

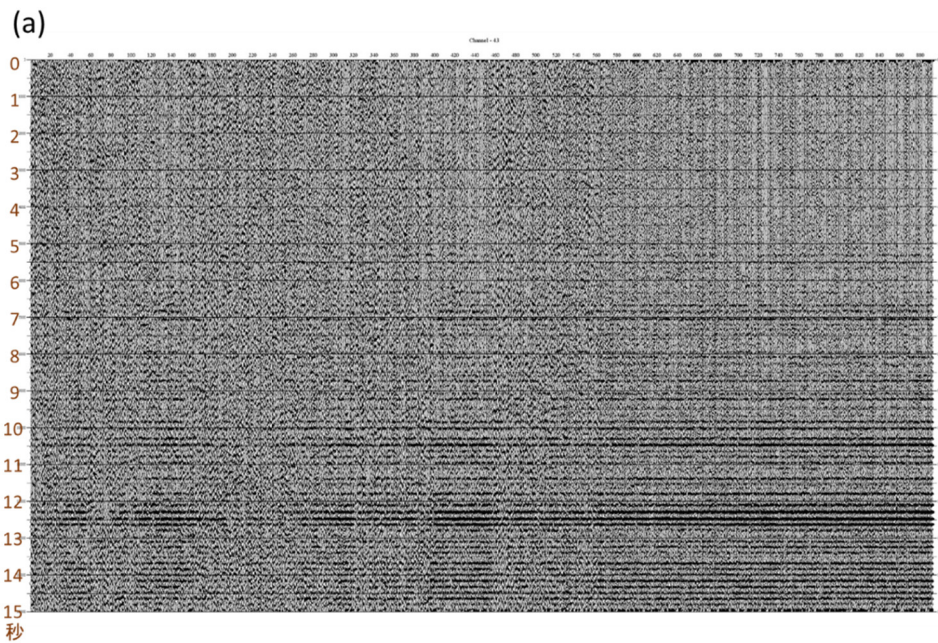


図 1-2-10. エアガン発振状況

b) データ解析

観測波形の推移

図 1-2-11 は孔中観測点 BK0M6 における全期間のすべての発振の観測記録である。3-10 Hz のバンドパスフィルターを施している。人工地震波の到来は図上で水平な縞になって表示される。



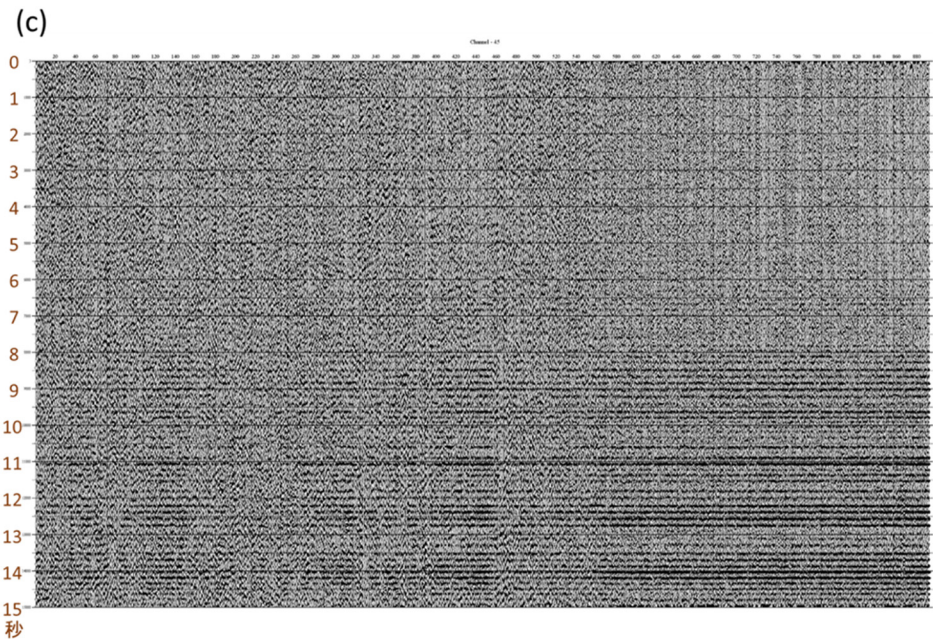
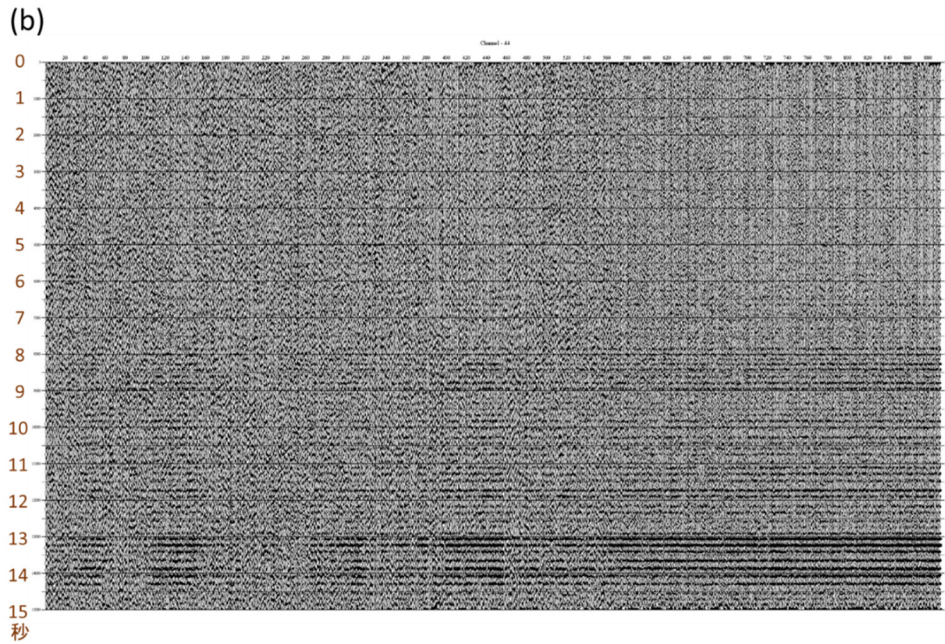


図 1-2-11. 観測点 BKOM6 における全観測波形。(a) 上下動成分、(b) 南北成分、(c) 東西成分を発振の順に左から右に並べて示す。

当該発振が実施された 12/17 は大陸からの寒気団の張り出しがあったため、後述のように脈動および背景微動の振幅が増大しつつあったことから、実験期間中は一貫してバックグラウンドのノイズレベルが令和 2 年実験時より高い傾向にあった。表 1-2-5 は BKOM5 観測点上下動成分において各発振による人工地震波が到来する前の 4.5 秒間の RMS 振幅を整理したものである。(a) 表を見るとフィルター処理をしない状態では BAA2022 と BAA2020 との間にそれほど大きな差は見られないが、本研究にとって一番大切な帯域である 3-10 Hz の帯域では BAA2022 のほうが BAA2020 にくらべて 5 倍大きな RMS 振幅が見られることが分かる。

表 1-2-5. BKOM5 上下動成分におけるバックグラウンドノイズレベル。(a) BAA2022、(b) BAC2022, (c) BAA2020。

(a)

BAA 2022 N=575	Average RMS RAW ( $10^{-3}$ cm/s)	Average RMS 3- 10HzBPF ( $10^{-3}$ cm/s)	Ratio BPF/Raw
Singles	0.873	0.522	0.598
Stacked	0.037	0.024	0.657
Ratio Stacked/ Singles	0.042	0.046	

(b)

BAC 2022 N=321	Average RMS RAW ( $10^{-3}$ cm/s)	Average RMS 3-10 HzBPF ( $10^{-3}$ cm/s)	Ratio BPF/RAW
Singles	1.307	0.145	0.111
Stacked	0.055	0.010	0.189
Ratio Stacked/ Singles	0.042	0.072	

(c)

BAA 2020 N=49	Average RMS RAW ( $10^{-3}$ cm/s)	Average RMS 3- 10Hz BPF ( $10^{-3}$ cm/s)	Ratio BPF/RA W
Singles	0.775	0.109	0.141
Stacked	0.101	0.016	0.156
Ratio stacked/ singles	0.131	0.145	

また、バックグラウンドノイズレベルは時間とともに変化していた。図 1-2-12 はバックグラウンドノイズ振幅の変化を示す。図 1-2-12 (a) は 12/16 作業分と 12/17 作業分をともに示す。橙色の曲線は 3-10 Hz 帯域のバックグラウンドノイズレベルを示す。

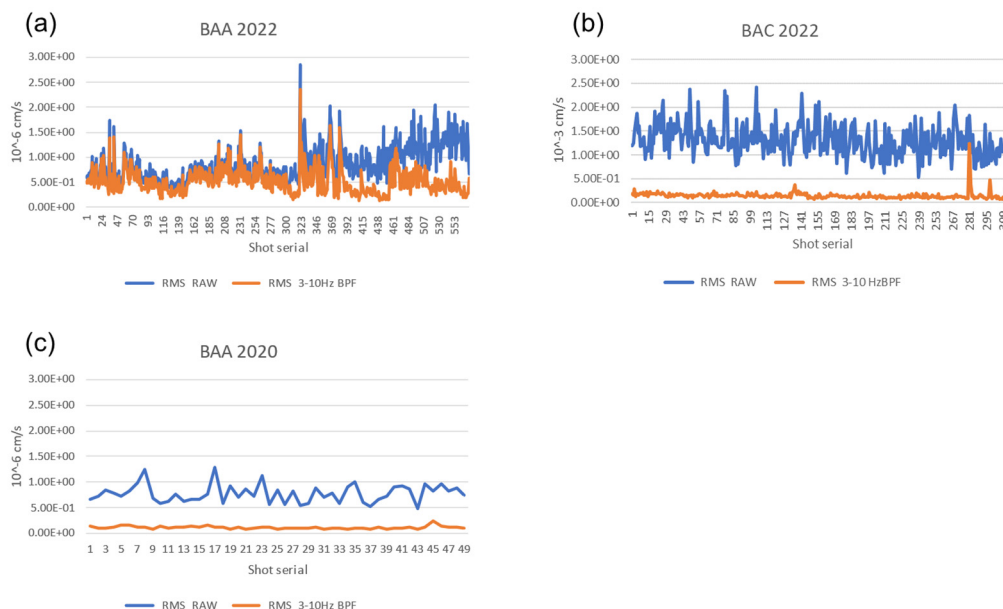


図 1-2-12. BKOM5 上下動成分におけるバックグラウンドノイズレベルの時間変化。(a) BAA2022、(b) BAC2022, (c) BAA2020。

図 1-2-12 (a)と(b)とから 12/17 は時間とともに通過帯域 (3-10Hz) 外のノイズレベルが上昇し、12/16 と 12/18 とではノイズの周波数帯域の構成が異なることが見てとれる。また、図 1-2-12 (a)と(c)との比較は BAA2022 観測時と BAA2020 観測時のノイズレベルの差を示しているが、BAA2022 は BAA2020 の 5 倍のノイズレベルの中で観測を行ったことになる。

以降の全チャンネル波形表示におけるチャンネルと各観測点の成分割り当てを表 1-2-6 に示す。

表 1-2-6. 令和 4 年観測チャンネル割り当て

チャンネル	観測点	成分	チャンネル	観測点	成分
1	SKOM1	V	28	BKOM1	V
2	〃	NS	29	〃	NS
3	〃	EW	30	〃	EW
4	SKOM2	V	31	BKOM2	V
5	〃	NS	32	〃	NS
6	〃	EW	33	〃	EW
7	SKOM3	V	34	BKOM3	V
8	〃	NS	35	〃	NS
9	〃	EW	36	〃	EW
10	SKOM4	V	37	BKOM4	V
11	〃	NS	38	〃	NS
12	〃	EW	39	〃	EW
13	SKOM5	V	40	BKOM5	V
14	〃	NS	41	〃	NS
15	〃	EW	42	〃	EW
16	SKOM6	V	43	BKOM6	V
17	〃	NS	44	〃	NS
18	〃	EW	45	〃	EW
19	SKOM7	V	46	BKOM7	V
20	〃	NS	47	〃	NS
21	〃	EW	48	〃	EW
22	SKOM8	V	49	SUM1	V
23	〃	NS	50	〃	NS
24	〃	EW	51	〃	EW
25	SKOM9	V	52	SUM6	V
26	〃	NS	53	〃	NS
27	〃	EW	54	〃	EW

SKOM:高免アレイ地表設置地震計、BKOM:高免アレイ孔中設置地震計、SUM:住吉池地区地表地震計。

図 1-2-13 はパラメータセット BAA2022 の一回分の発振の観測記録である。先述のように観測当日は寒気団の張り出しにより風が強かったためにノイズレベルが高く、単一の発振だけでは始良カルデラを横断する地震波を桜島側の観測点で明瞭に確認するには至らなかった。

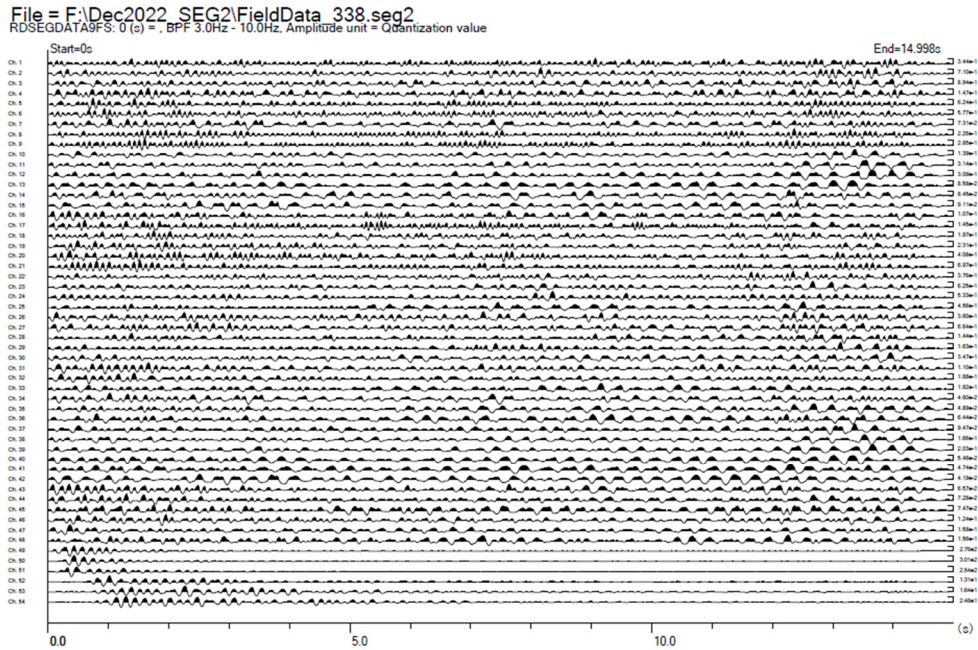


図 1-2-13. 発振パラメータセット BAA2022 における 1 回分の発振 (12/17) に対する全観測点の全成分を示す。最上部から 27 本が SKOM1~9 の 3 成分記録を順に並べ、引き続き 21 本が BKOM1~7 の 3 成分記録、最下部 6 本が住吉池近傍の観測点 SUM1 3 成分、SUM6 3 成分の記録を示す。

#### 重合効果

令和 4 年実験の発振作業では、パラメータセット BAA で 12/16 307 回および 12/17 268 回、パラメータセット BAC で 12/18 317 回の発振が行われており、各発振回の記録の垂直重合が可能である。先述のように桜島地区の単一の発振に対する観測記録では発振波形の確認が困難なものが多かったので、確実に波形が観測できる SUM6 観測点の上下動成分における各発振の波形の相関係数の推移をパラメータセット毎に図 1-2-14 に示す。



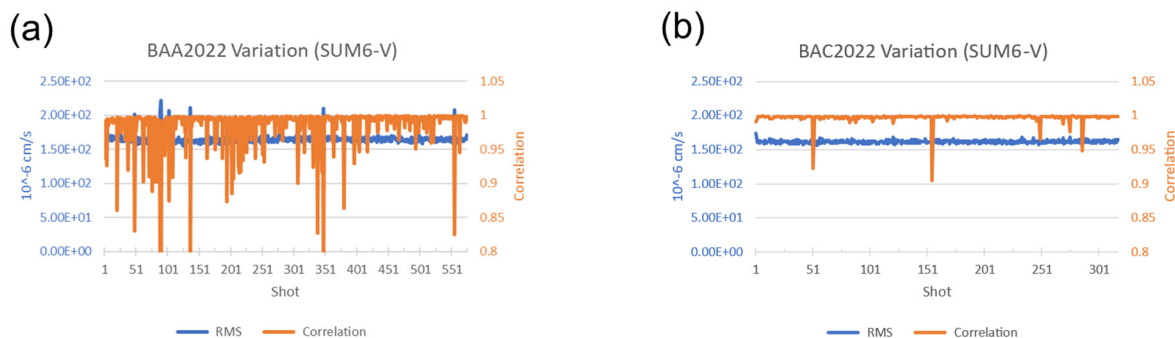


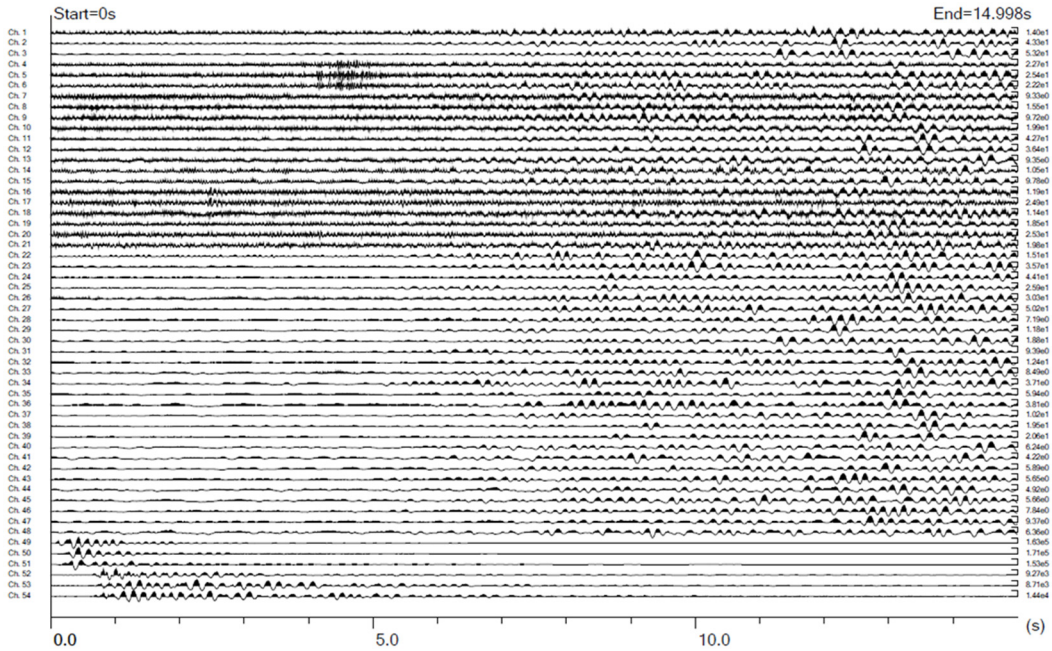
図 1-2-14. 発振波形の推移。SUM6 観測点上下動成分におけるパラメータセット毎の全数スタック結果に対する個々の発振記録の相関係数（橙）と RMS 振幅（青）とを示す。(a)BAA2022、(b) BAC2022。時間窓はいずれも 0.1 - 3.0 秒の区間。

図 1-2-14 (a) の BAA2022 は発振開始初期の 50 回は最初に約 0.94 の相関係数を示した後に相関係数が徐々に 1 に近づく振る舞いをしており、発振開始当初（最初のコールドスタート）は波形が安定しなかったことを示している。BAA2022 ではコールドスタートを 308 回目（2 日目）以降にも経験しているが、2 日目ではそのような傾向が見られなかった。BAA2020 の平均相関係数は 0.986、標準偏差は 0.031 であった。

図 1-2-14(b) の BAC2022 では BAA2022 で述べたような不安定は認められず、極めて安定した波形を生成していた。BAC2022 の平均相関係数は 0.997、標準偏差は 0.008 であった。なお、SUM6 上下動成分の同じ時間窓における全数スタック後の BAA2020 と BAA2022 との相関係数は 0.834、BAC2022 と BAA2020 との相関係数は 0.828 であった。

同じパラメータセットの全数を垂直重合した結果を図 1-2-15 に示す。図 1-2-15(a) はパラメータセット BAA の結果を示し、図 1-2-15 (b) はパラメータセット BAC の結果を示す。両者とも地表観測点でノイズの混入が顕著であるほか、図 1-2-15 (b) では相対的に長周期のノイズの混入が顕著で孔中点でも長周期ノイズが顕著に認められる。これらのノイズは観測当時の気象と海象を反映した脈動であると考えられる。

(a)



(b)

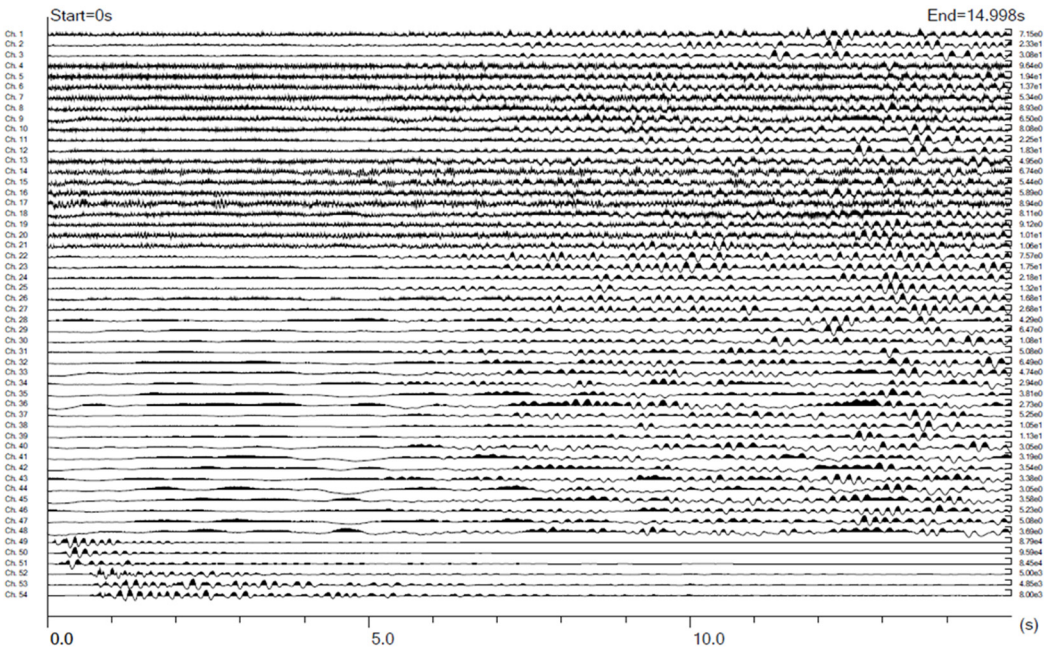
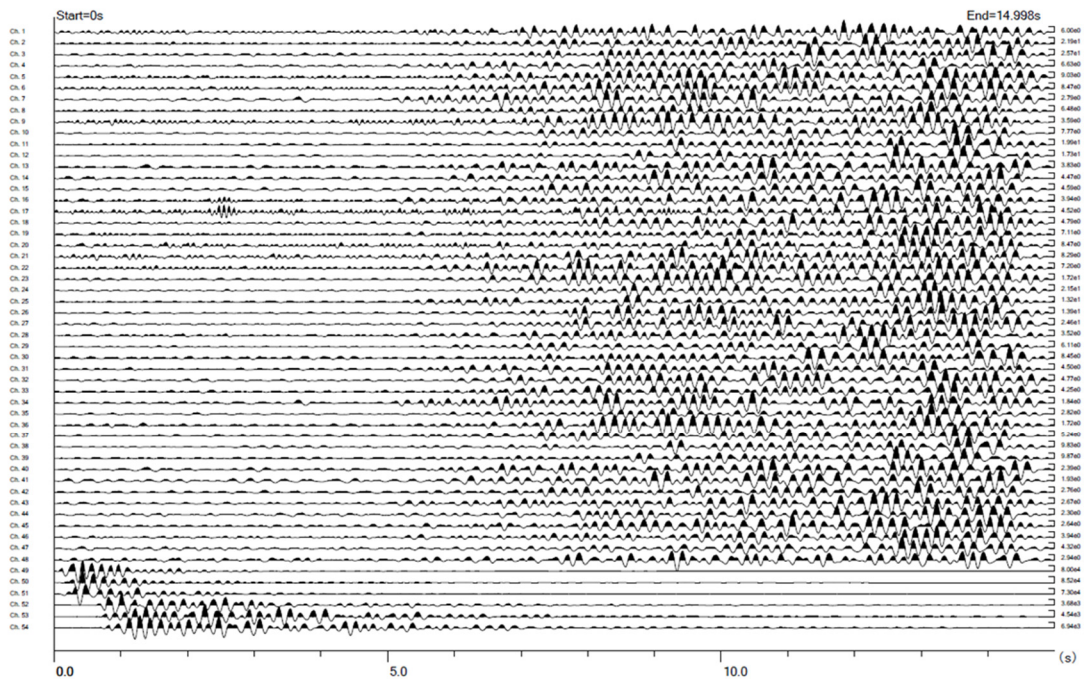


図 1-2-15. 主要な発振パラメータセットで得られた全数スタック後の全観測波形。(a)発振パラメータセット BAA2022、スタック数 575 回。(b)発振パラメータセット BAC2022、スタック数 317 回に対する全観測点の全成分を示す。観測点との対応は前図と同じである。

また先述したノイズの傾向を考慮して、3-10Hz のバンドパスフィルターをかけた結果を図 1-2-16 に示す。図 1-2-16 (a)も (b)もともに S/N の良い記録が得られている。

(a)



(b)

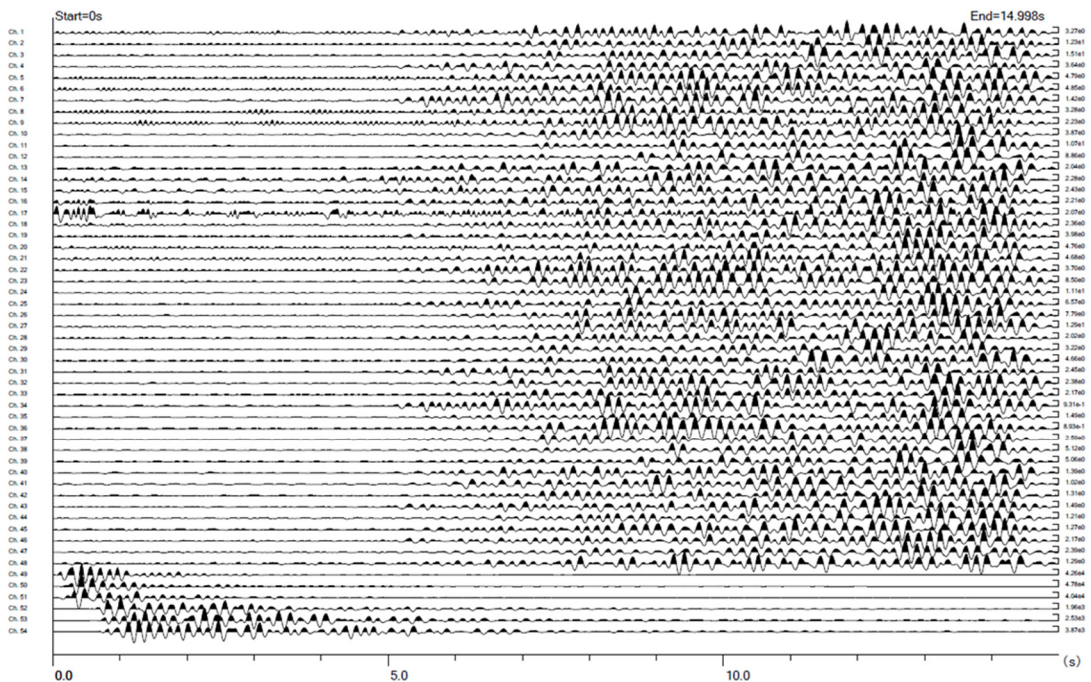


図 1-2-16. 主要な発振パラメータセットで得られた全数スタック後の全観測波形。(a)発振パラメータセット BAA2022、(b)発振パラメータセット BAC2022 に対する全観測点の全成分を示す。いずれも 3 - 10 Hz BPF 処理済みである。

S/N 比からみた垂直重合の効果を表 1-2-7 と図 1-2-17 に示す。

表 1-2-7. 垂直重合効果

	2022					2020
	10 stacks	50 stacks	100 stacks	575 stacks	892 stacks	2020 40 stacks
Noise	5.13386E-04	2.48816E-05	1.14555E-05	6.96209E-07	3.32446E-07	1.51720E-04
First Break	6.54306E-04	4.02992E-05	1.68073E-05	1.74831E-06	1.11543E-06	4.91811E-04
S/N of FB	1.27	1.62	1.47	2.51	3.36	3.24
True S/N of FB	0.79	1.27	1.07	2.30	3.20	3.08
Later Phase	9.79099E-04	1.16133E-04	5.30399E-05	8.62281E-06	5.52039E-06	2.17738E-03
S/N of LP	1.91	4.67	4.63	12.39	16.61	14.35
True S/N of LP	1.62	4.56	4.52	12.34	16.58	14.32

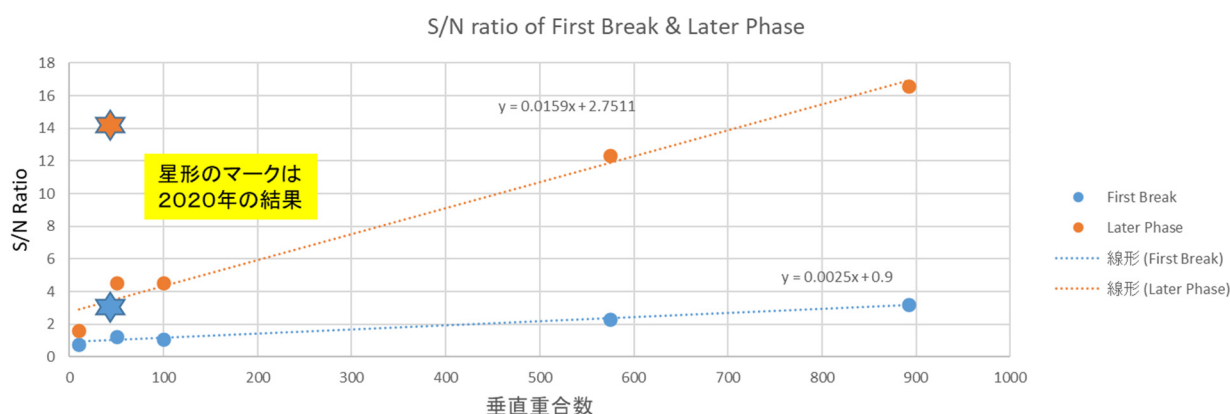


図 1-2-17. S/N 比と垂直重合

表 1-2-7 および図 1-2-17 に示されるように令和 2 年実験のパラメータセット BAA (BAA2020) では 49 回重合で十分な S/N 比を得ていた。この実績をもとに令和 4 年の実験では同じパラメータセット BAA を採用して実験を行ったが、悪天候であったため、令和 2 年の S/N 比レベルに達するために約 700 回の重合を要した。

2020 年との比較 – 令和 2 年観測と同じエアガン水深（発振深度 10m）における比較–

エアガンでは発振パラメータ（容積、圧力、水深）のいずれが変化しても、放射される地震波の周波数成分の構成が変化することが令和 2 年度の実験で明らかにされている。エアガンによる人工地震観測が令和 4 年度は容積と圧力を令和 2 年度 BAA 発振と同じものとしたうえで、水面からエアガンまでの深度を令和 2 年度と同じ 10.0 m に設定した場合（BAA）と、エアガンから湖底までの深度を令和 2 年と同じにした場合との 2 種類の条件の発振を行った。

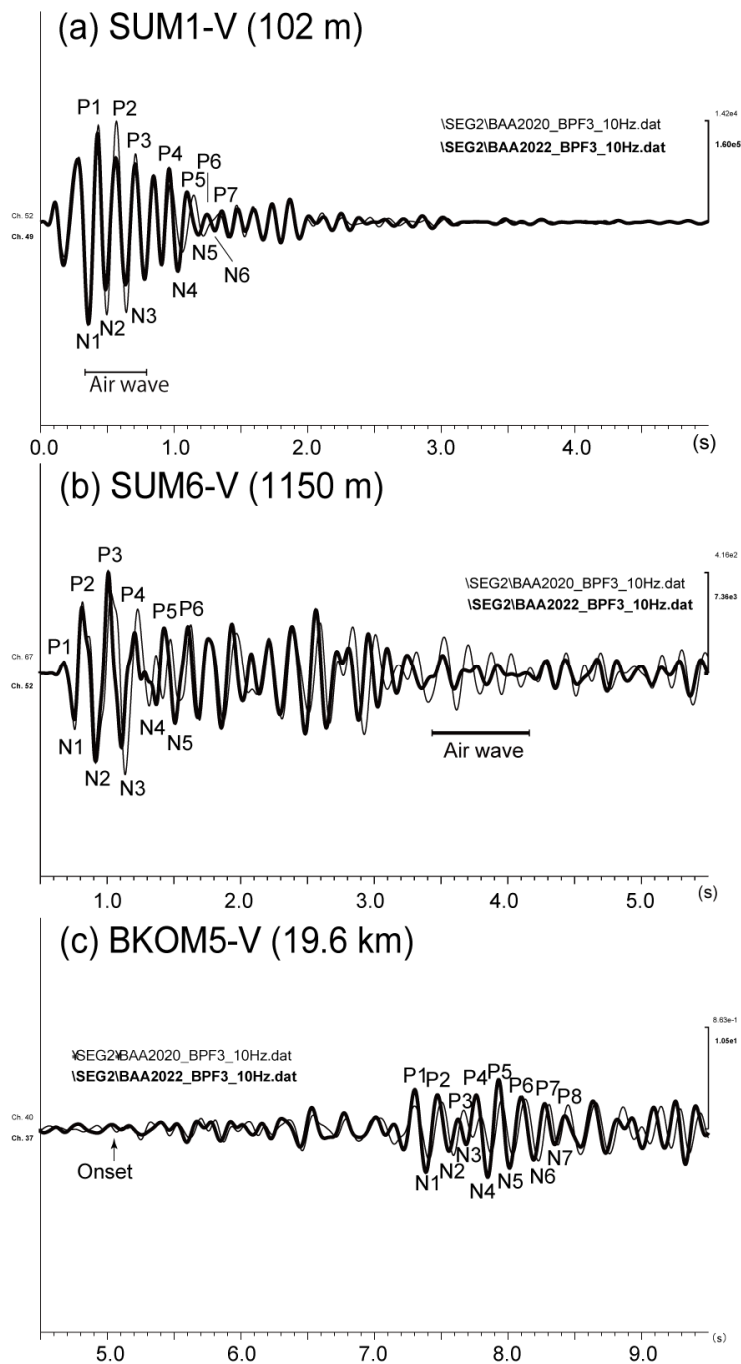


図 1-2-18. BAA2022 と BAA2020 の比較。(a) SUM1 上下動 (102m地点)、(b) SUM6 上下動 (1115m 地点)、(c) BKOM5 上下動 (19.6 km 地点)。いずれも太い曲線は今回の実験 (2022) による波形を示し、細い曲線は令和 2 年実験 (2020) による波形を示す。(c) に示す区間は Air wave が未到達である。

図 1-2-18(a) では BAA2022 と BAA2020 とを比較すると初動部分の波形は一致しない。一方包絡線に注目すると BAA2022 のほうが BAA2020 に比べて 1 周期分早い場所にピークが現れる。この傾向は (b) でも認めることができる。しかしながら後続相の個々のピークに注目すると振幅または到来時刻に差が認められるものがある。これらを以下に整理する。

まずピーク振幅に見られる差異について述べる。Air wave の振幅は 2022 のほうが小さい。図 1-2-18(a) では包絡線のピークに寄与する Air wave に相当する部分(ピーク N2-P2-N3)の振幅に差のあることが示され、この部分は 2020 のほうが大きな振幅になっている。さらに遠い地点で地震の初動と同様に図 1-2-18(b) でも 2020 のほうが Air wave 部分の振幅が大きい。なお図 1-2-18(c) では Air wave の到来は表示区間外である。

次にピーク到来時刻に見られる差異について述べる。発振点近傍の図 1-2-18(a) では初動から約 1 秒後のピーク N4-P5-N6 でピークの到来時刻に差異が見られ、2022 のほうが約 20 ms 早い到来時刻を示している。さらに発振点より離れた図 1-2-18(b) の記録では初動から 0.6 秒後の P3-N3-P4-N4-P5 で 2020 より早い到来を示しているほか、2.0 秒付近や 2.5 秒以降で 2022 のほうが 2020 より早い到来時刻を示している。発振点から 19.6 km 離れた図 1-2-18(c) の記録では初動の 0.5 秒あとから 2022 のピークの方が早い到来時刻を示している。

また、図 1-2-18 (c) に示されるように BAA2022 と BAA2020 とでは遠方記録の初動部分の波形に相違がある。

下にエアガンの制御用に組み込まれた NFH(near Field Hydrophone)の波形を BAA2022 と BAA2020 とで比較する。NFH はエアガン発振の監視を目的として、トリガンを構成する最上位のエアガンのさらに上位のプレートに組み付けられているセンサーであり、今回の観測ではエアガンに一番近い場所に位置している。BAA2022 と BAA2020 とでは使用したエアガンの個体が異なるが、NFH の最上位エアガンに対する相対的な取り付け位置は同一である。

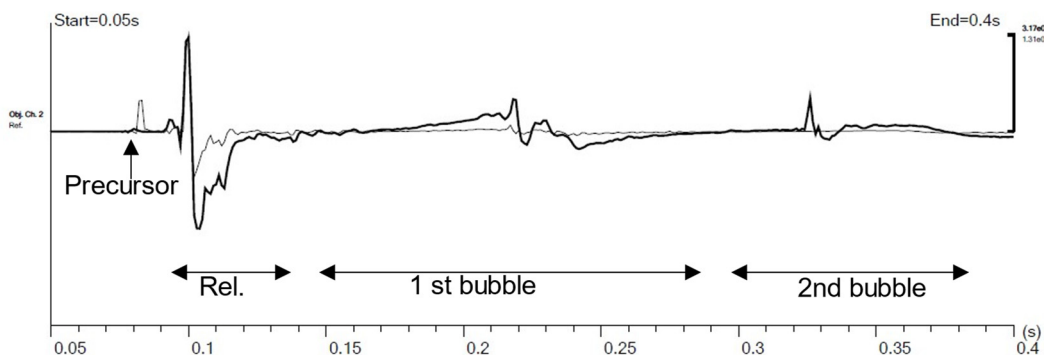


図 1-2-19. エアガン近傍ハイドロフォン波形の比較。太線：BAA2022，細線：BAA2020。衝撃相を Rel. で表す。プリカーサパルスは BAA2020 で顕著であるが、BAA2022 では目立たない。また BAA2022 ではバブル相に高周波パルスが混じる傾向がある。

図 1-2-19 に示されるエアガン近傍記録には発振時に発生する鋭いインパルス状の波形とそれに引き続く周期的な波形が認められる。エアガンの発振等で気体が水中で急激に膨張するとき、近傍で観測した圧力記録には一般的に 2 種類の相が認められることが知られている (Urick,

1967; Staples et al., 1999; Krail, 2010; Watson et al., 2019)。エアガンを発振するためにエアガン本体の電磁弁を開くと、最初にエアガンチャンバ内の圧力が外部に伝わり衝撃波となった信号が表れ、引き続いてポートから吐出された圧縮空気がエアガン周囲の水を押しつけて泡となり膨張しながら振動する信号が表れる。ここでは前者を衝撃相、後者をバブル相と称することにする。また、状況によっては衝撃相の前に電磁弁の作動するノイズが記録されることがありこれをプリカーサーと呼ぶことにする。

BAA2020 ではエアの解放前のプリカーサーが顕著である。これに対して BAA2022 ではプリカーサーはそれほど顕著ではないかわりに、衝撃相のアンダーシュートと後続のバブル相が顕著である。バブル相のピークの直前に高周波パルスが重畳するのも BAA2022 の特徴である。

BAA2022 のバブル相に含まれる高周波パルスは令和 4 年実験に用いたエアガンの個体に固有の特徴なのかもしれない。

2020 年との比較 – 令和 2 年観測と同一クリアランス距離（発振深度 10.5 m）における比較–

パラメータセット BAC2022 は先述のように BAA2020 と同じクリアランス距離における発振を実施したものである。また既往の研究でも Liu et al. (2021) が発振点に用いた貯水池の水位変化に伴う振源波形の変化について報告しており、エアガン深度あるいはエアガンから水底までのクリアランス距離の変化による波形の変化が予見される。パラメータセット BAC2022 の発振に対する代表的な観測点の上下動成分における BAA2020 との比較を図 1-2-20 に示す。

図 1-2-20(a) に示される波形の初動到来時刻は BAC2022 と BAA2020 との間に大きな差異は認められない。一方、包絡線に注目すると BAC2022 のほうが BAA2020 に比べて 1 周期分早い場所にピークが現れる。この傾向は図 1-2-20(b) でも認めることができる。図 1-2-20(b) では先述の BAA2022 と BAA2020 との比較で見受けられたのと同様に後続相の個々のピークの振幅または到来時刻に差が認められるものがある。特に図 1-2-20(b) の SUM6-V に見られる空振部分の際は顕著である。

また、図 1-2-20(c) に示されるように BAC2022 と BAA2020 とは初動部分の波形がよく一致している。

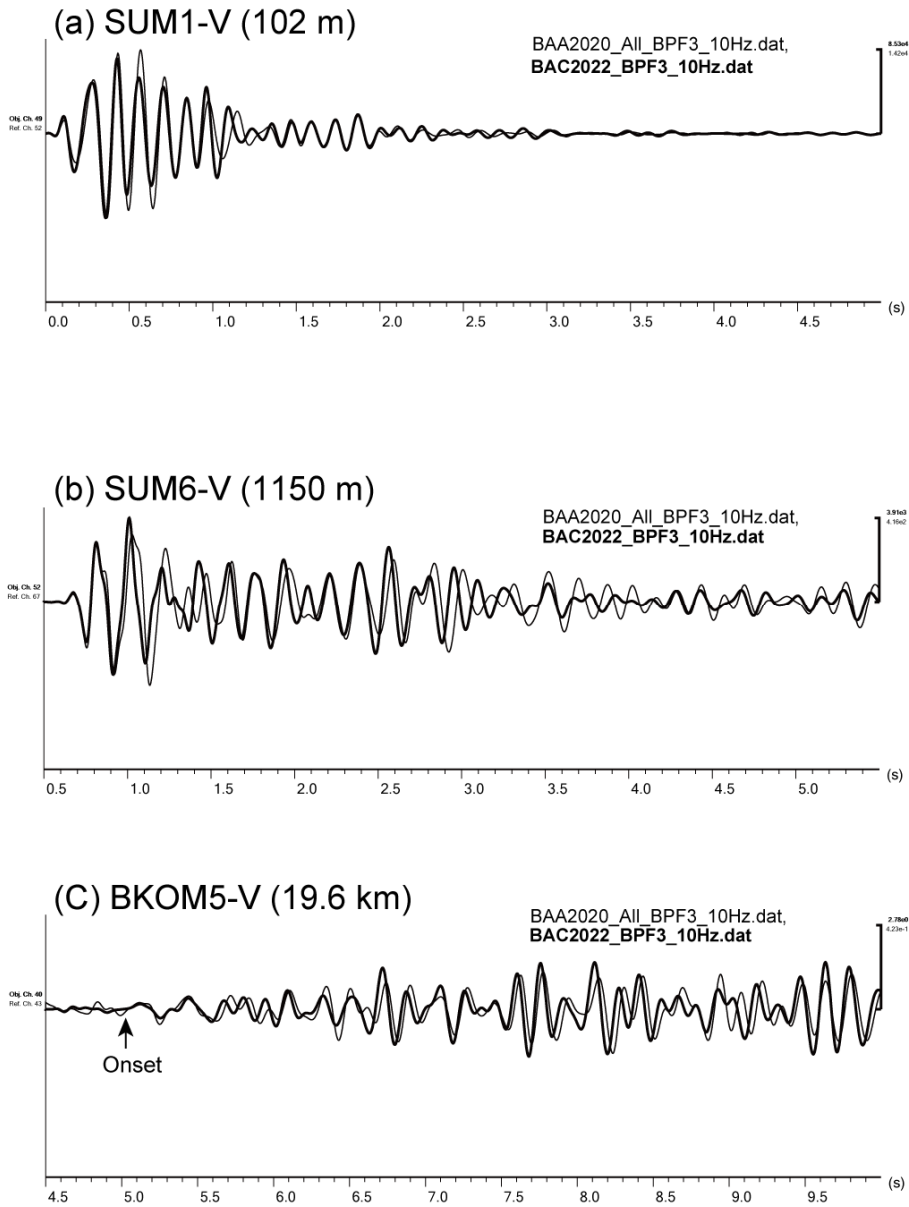


図 1-2-20. 発振パラメータセット BAC2022 による発振の観測波形。令和 2 年実験のパラメータセット BAA2020 と重ねて示す。(a) 観測点 SUM1 上下動成分、(b) 観測点 SUM6 上下動成分、(c) 観測点 BKOM5 上下動成分を示す。

BAC2022 による近傍観測点 SUM1 の上下動成分観測記録を BAA2020 および BAA2022 のそれと比較して図 1-2-21 に示す。



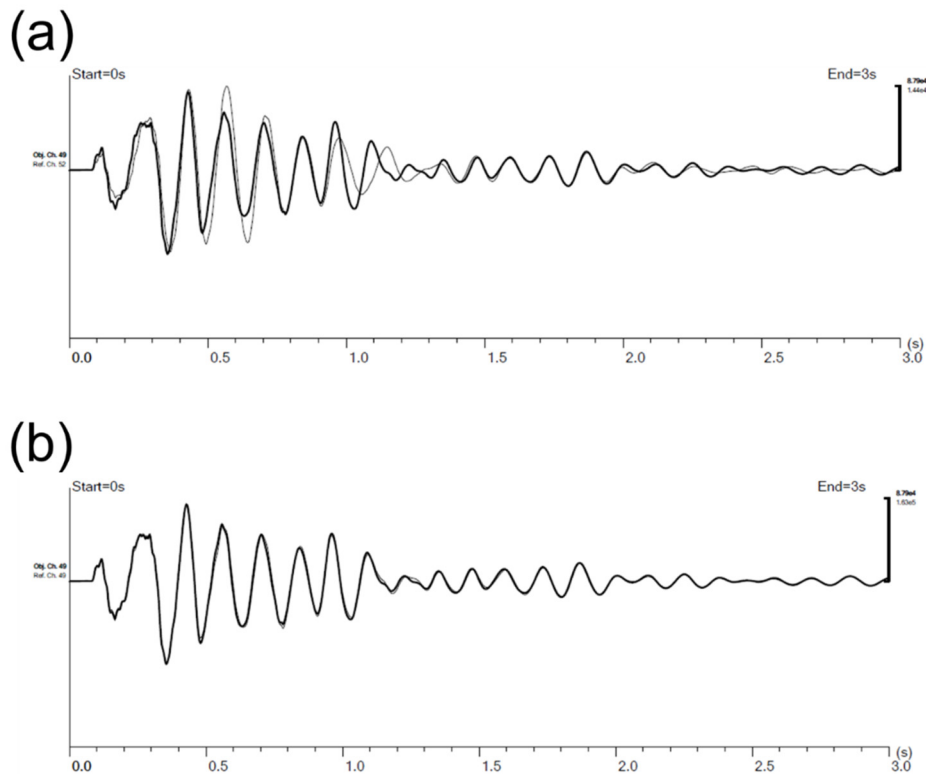


図 1-2-21. 近傍観測点 SUM1 における波形比較。(a) BAC2022 (太線) と BAA2020 (細線)。(b) BAC2022 (太線) と BAA2022 (細線)。

図 1-2-21(a)によれば BAC2022 による発振波形は先述の BAA2022 と同様に包絡線の形状は単峰的であるが、包絡線振幅が最大になる時刻が BAA2020 のそれに比べて 1 周期分早い等、先述の BAA2022 と BAA2020 との差と同様な傾向が認められる。(b)に BAC2022 と BAA2020 とを比較するが、両者は 1.1~1.25 秒付近にごくわずかな差が見られる以外はほぼ一致している。このことから実験時期の同じ観測では 0.5m 程度のクリアランスの差やそれにもなうエアガン深度の差では近傍観測波形のみかけにはほとんど差が出ないといえる。

一方、エアガンに最も近い位置にあるニアフィールド hidroフォン(NFH)の波形では、次に述べるような微妙な差異を認めることができた。パラメータセット BAC2022 による発振の NFH 波形を、BAA2022, BAA2020 のそれらと比較したものを図 1-2-22 に示す。

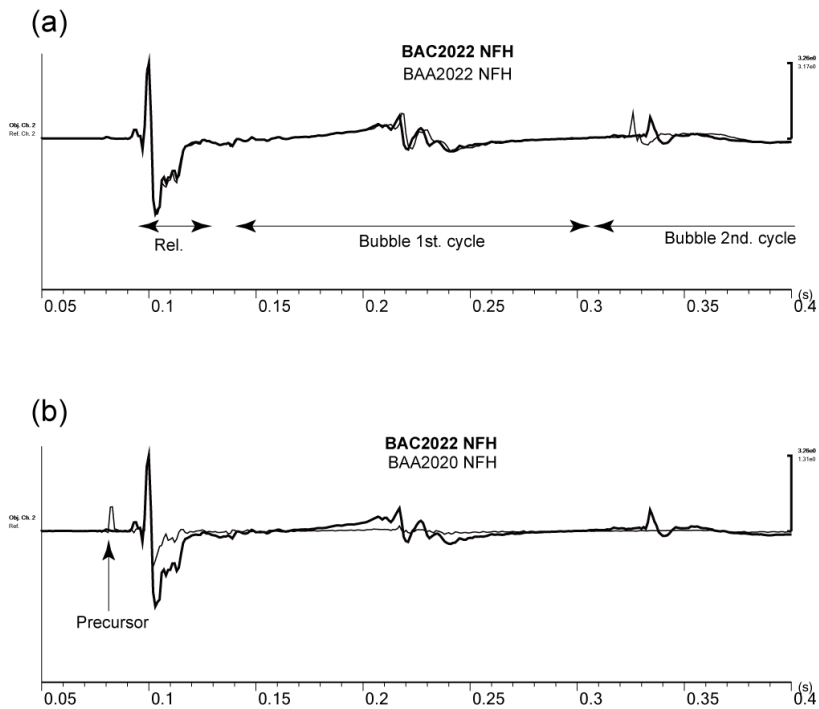


図 1-2-22. NFH 波形の差異。(a)BAC2022 と BAA2022 との比較。1 回目のバブルサイクルでは高周波パルスが 1ms 程度早く出現し、2 回目のバブルでは高周波パルスが 8 ms ほど遅く出る。(b)BAC2022 と BAA2020 との比較。BAA2020 では最初の衝撃相 (Rel.) の振幅に対するバックシュートおよびバブル相の振幅が小さい。

図 1-2-22(a)では BAC2022 と BAA2022 との比較を示す。BAC2022 ではバブル相に重畳する高周波パルスの位置に明瞭な違いが認められる。1 回目のバブルサイクルでは BAC2022 のほうが BAA2022 に比較して 1 ms ほど早く出現することと、2 回目のバブルサイクルでは 8 ms ほど遅く高周波パルスが出現している。図 1-2-22(b)では BAC2022 と BAA2020 との比較を示す。BAC2022 では BAA2020 で顕著なプリカーサーが認められないことと、最初の衝撃相振幅に対する後続のバブル相の振幅が大きいことが特徴として認められる。

一方、チャンバ容量およびエアガン深度、動作圧、位置が同一であっても実験時期によって近傍観測波形が変異し、特に空振部分の振幅には明瞭に差異が認められることが示された。SUM1 上下動記録における周波数成分の比較を図 1-2-23 に示す。

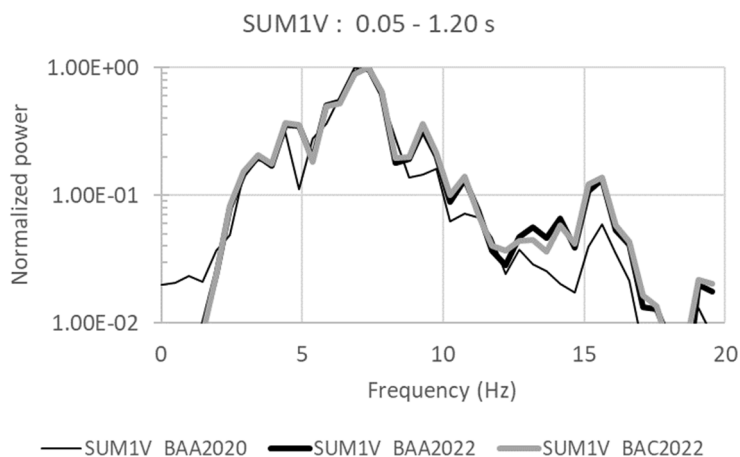


図 1-2-23. SUM1-V における各発振パラメータセットにおける周波数成分

周波数成分の点では令和 2 年実験のパラメータセット BAA2020 より、令和 4 年度実験の 2 つのパラメータセットの方が 12 Hz 以上の高周波数成分を約 2 倍豊富に持っている傾向がうかがわれる。令和 4 年度実験で大きく表れる高周波成分が後続相位相のピーク到来時刻の 20 ms ほどの繰り上がりに寄与している可能性がある。エアガン振源波形の周波数成分の変化に伴うみかけの走時変化は Liu et al. (2021) が指摘している。

この高周波成分の差はエアガンの個体差による可能性も考えられる。令和 2 年実験では使用経歴のあるエアガン個体を他の機関から借り入れて実験に供したが、令和 4 年実験では令和 3 年度に京都大学が調達したエアガンを初めて使用したという使用経歴の違いがある。もしこれが使用経歴に由来する差なのであれば、今回使用に供した京都大学が保有するエアガンは、使用が進むにつれて発振波形の周波数成分が徐々に変化する可能性がある。

#### 2020 年との比較 デコンボリユーション結果における比較

人工地震観測記録のみかけのちがいは観測に用いた振源波形の違いを反映する。ここまで述べてきたように発振点では発振条件を人間が制御しても、それ以外の制御しきれない条件によって振源波形の変化は避けられない。京都大学防災研究所(2022)では振源波形の変化の影響を取り除くことを目的としたデコンボリユーションをデータ解析の手順として用いることを提唱し、そのデコンボリユーションに用いる等価振源波形に関する最適な波形の選択について報告した。

図 1-2-24 に振源波形の影響を取り除くデコンボリユーションの解析の流れを示す。デコンボリユーションで重要なことは振源波形をどのように与えるかである。京都大学防災研究所(2022)では、住吉池を振源点として用いる一連の実験で振源波形に等価なものとして振源距離 102 m 地点の上下動観測記録を用いる方法を提案していた。

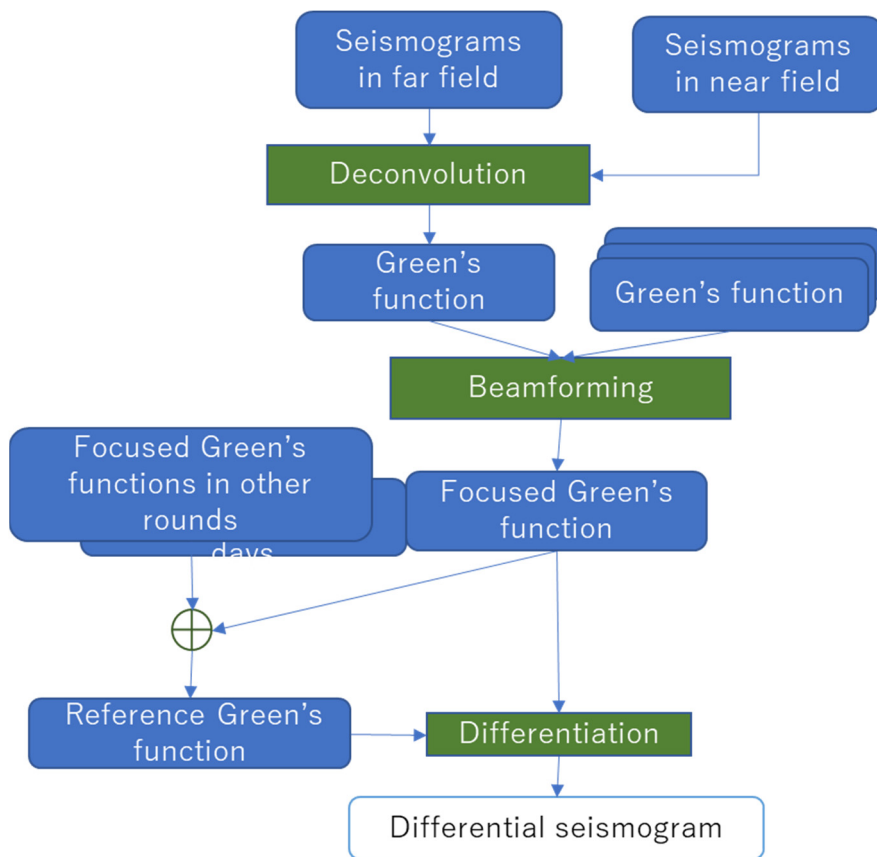


図 1-2-24. デコンボリユーション処理 (京都大学防災研究所, 2022)

京都大学防災研究所(2022)の提唱したデコンボリユーション方法を検証する。等価振源波形を近傍観測点 SUM1 の上下動成分から取り出してデコンボリユーションを実施したものを図 1-2-25 に示す。等価振源波形は BAA2022 および BAA2020 はともに SUM1 観測点の上下動成分の 0.071-2.778 秒の区間を切り出したもので、京都大学防災研究所(2022)では良い結果を与えたとされる区間である。

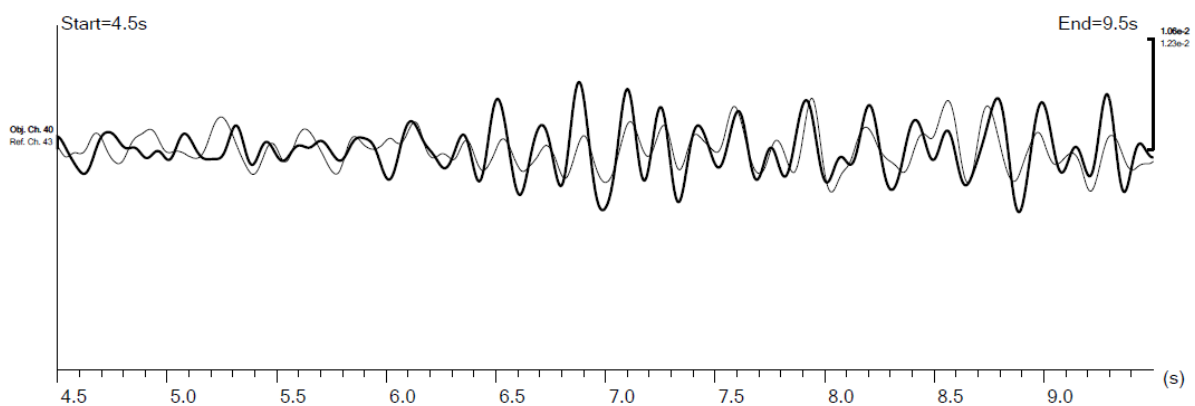


図 1-2-25. BKOM5-V における SUM1-V を用いたデコンボリユーション結果。太線は BAA2022 を、細線は BAA2020 を示す。

図 1-2-25 に示されるように両者は初動付近がまったく異なる他、包絡線の形状も一致しないため、デコンボリューションによって振源波形の影響を取り除くことができたとはいえない。今回用いた SUM1V の時間窓は、地動と空振が重畳している時間帯でもあることから、空振によって地動の特徴が覆い隠されることがデコンボリューション失敗の原因として考えられた。ここに京都大学防災研究所(2022)の提唱する近傍の速度記録を等価振源波形として用いる方法の弱点が露呈された。

そこで原点にもどり、エアガンに最接近して配置されている NFH の波形（圧力波形）を等価振源波形として用いるデコンボリューションを検証した。付録に示すように今回の実験ではエアガンの近傍に NFH とエアガン振源の周囲の水中に hidroフォンの観測網を展開していた。NFH はエアガンの発振確認を目的として、トリガン最上部エアガンのさらに約 1.4 m 上方（トリガン中心から 2.1 m 上方）に配置されている hidroフォンである。

図 1-2-26 に示されるようにエアガンの発振時に NFH で記録される主要な波形の起源は 2 種類ある。一つはエアガンのポートが開くことによって生ずる圧力の急激な変化に伴う衝撃相 (Rel.)、二つ目は衝撃部分に引き続いてエアガンのポートから排出されるエアによって生ずるバブル成長とバブルの振動部分からなるバブル相 (1st bubble, 2nd bubble etc.) である。これらの起源のうち衝撃相は生成した地動の数十ヘルツ以上の高周波成分への寄与が大きく、バブル相は生成した地動の 10 Hz 以下の低周波成分への寄与が大きいことが NFH 波形からうかがわれる。

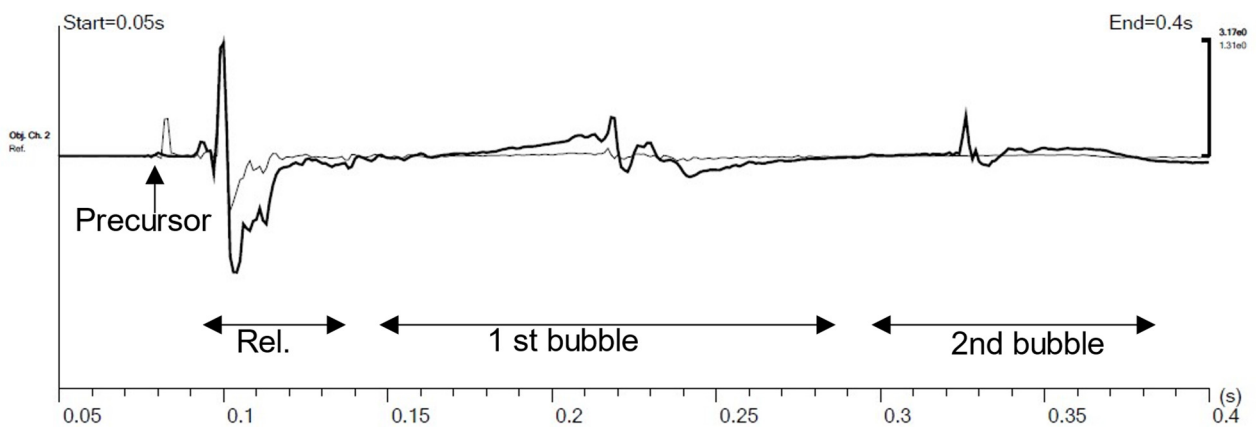


図 1-2-26. エアガン近傍 hidroフォン波形の比較（再掲）。太線：BAA2022，細線：BAA2020。

既往の構造研究（京都大学防災研究所, 2020; 2021、筒井他, 2021、筒井他, 2020）では 10 Hz 以下の周波数帯域が始良カルデラ深部からの反射波を抽出するために使われてきたことを考慮すると、観測波形のデコンボリューションを成功させるためには 10 Hz 以下の成分への寄与が大きいバブル相の取り扱いが重要であると考えられる。

そこで表 1-2-8 のようにバブル相のゼロクロス時間に注目して等価振源波形の切り出しを行い、デコンボリューションを検討した。

表 1-2-8. 等価振源波形の切り出しに用いた時間窓

	初動 (S)	(A) 1 周期目 終わり (S)	(B) 2 周期目 終わり (S)	(C) 3 周期目 終わり (S)	(D) バブル振 動収束 (S)
BAA2022	0.08	0.3	0.441	0.569	1.5
BAC2022	0.08	0.3	0.428	0.550	1.5
AAA2020	0.08	0.374	0.560	0.733	1.7
BAA2020	0.08	0.3	0.441	0.552	1.5

最初に NFH を用いたデコンボリューションの有効性を示すために、NFH のバブル相 3 周期目までを用いた BAA2020 のデコンボリューション結果と AAA2020 のデコンボリューション結果を重ねて図 1-2-27 に示す。

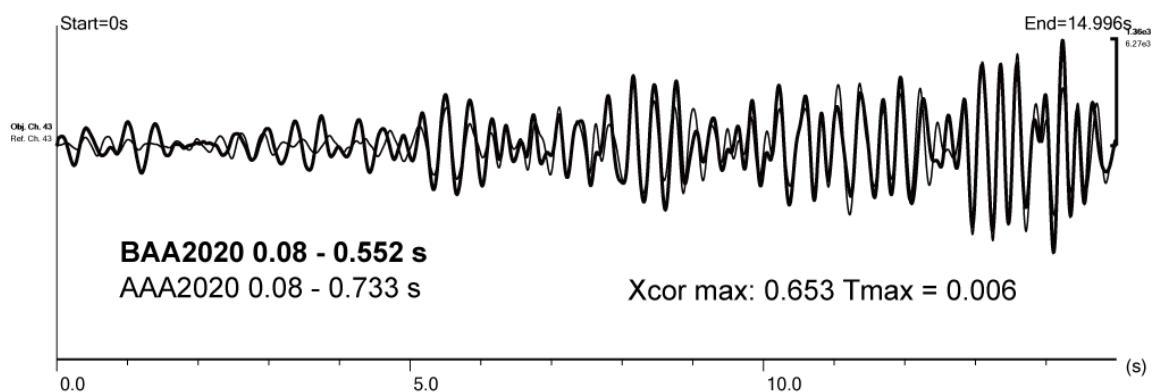


図 1-2-27. NFH デコンボリューション結果 BAA2020 (太線) と AAA2020 (細線) を示す。両者は 5s 以降でよく一致している。Xcor max は 4.5~10 秒の区間における相互相関の最大値と最大値をとるラグ時間を示す。

京都大学防災研究所(2021)によればデコンボリューション前の BAA2020 と AAA2020 との間には周波数成分および継続時間の差があったにもかかわらず、NFH を用いたデコンボリューション結果は両者ともよく一致していることが示されている。このことから NFH を用いたデコンボリューションは有効であることが期待される。

つぎに BAC2022 のデコンボリューション結果を AAA2020 のデコンボリューション結果と比較して図 1-2-28 に示す。

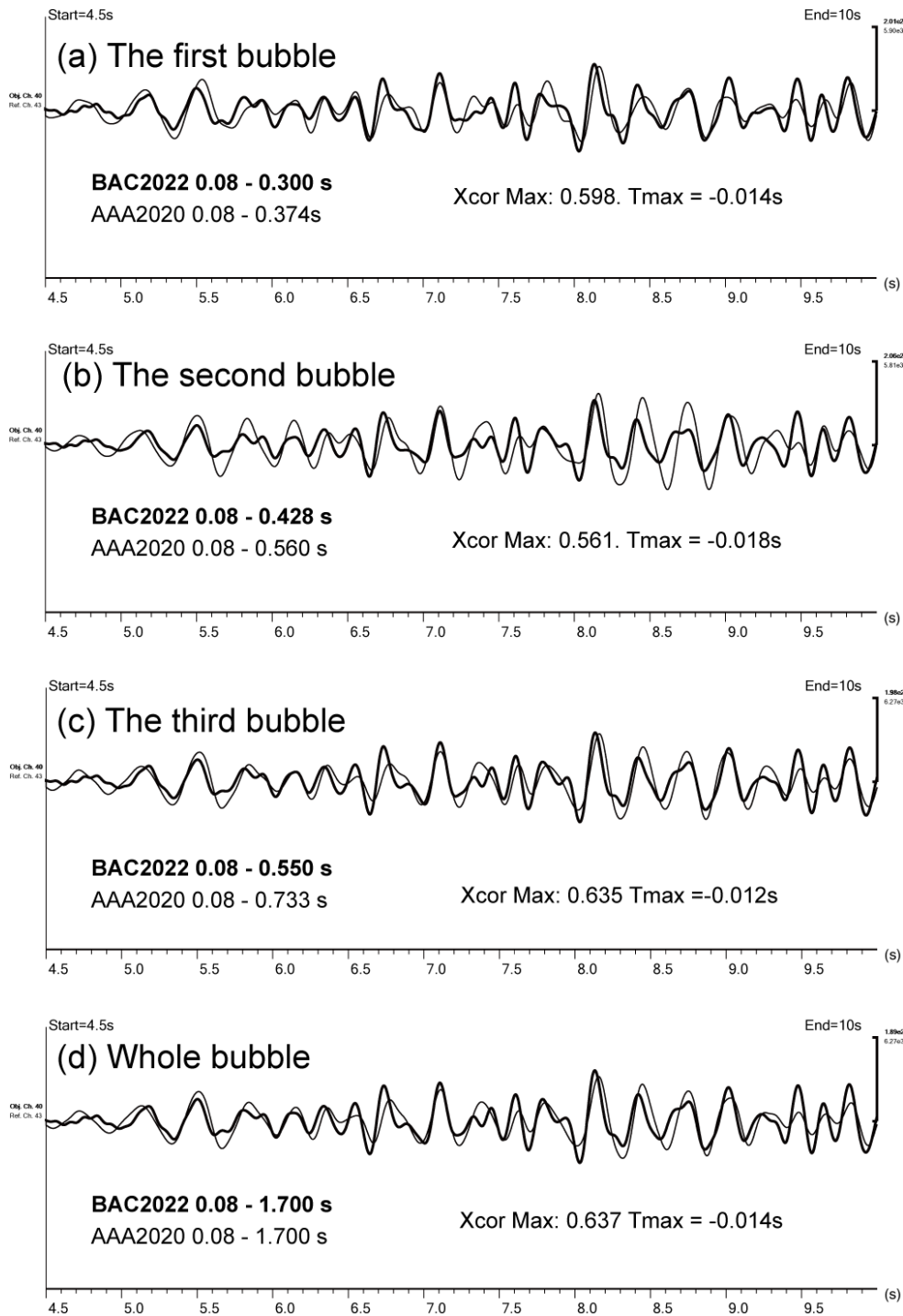


図 1-2-28. NFH 波形を用いた BAC2022 デコンボリューション結果と AAA2020 デコンボリューション結果。Xcor max は 4.5～10 秒の区間における相互相関の最大値と Tmax は最大値をとるラグ時間を示す。(a)最初のバブル相までを用いた結果、(b)1 番目のバブル相まで用いた結果、(c)3 番目のバブル相までを用いた結果、(d)バブル相の振幅が収束するところまで用いた結果をそれぞれ示す。

図 1-2-28 (a) のバブル相 1 周期目までを用いた結果は初動部を含めて比較的良い一致を示すが、バブル相 2 周期目までを用いた結果は AAA2020 で若干不安定な結果がもたらされる傾向があり相関係数が低下している。図 1-2-28 (c) と (d) はほぼ同じ結果を与えている。

次に BAA2020 と AAA2020 とのデコンボリューション結果の比較を図 1-2-29 に示す。

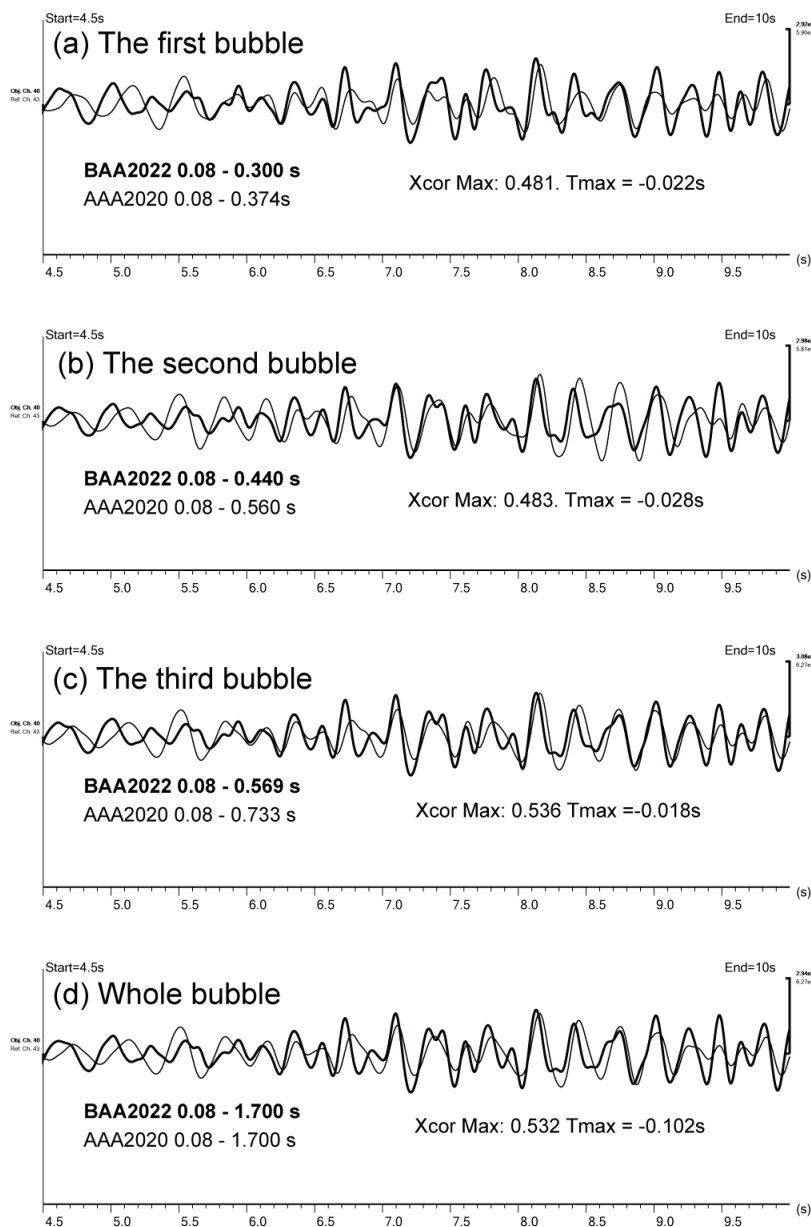


図 1-2-29. NFH 波形を用いた BAA2022 デコンボリューション結果と AAA2020 デコンボリューション結果。Xcor max は 4.5～10 秒の区間における相互相関の最大値を、Tmax は最大値をとるラグ時間を示す。(a) 最初のバブル相までを用いた結果、(b) 2 番目のバブル相までを用いた結果、(c) 3 番目のバブル相までを用いた結果、(d) バブル相の振幅が収束するところまでを用いた結果をそれぞれ示す。



図 1-2-29 では全体を通して 5.0 - 5.7 s までの区間で BAA2022 と AAA2020 との位相が一致せず、むしろ逆位相の関係になっているように見える。初動付近の波形の相違はデコンボリューション前の BAA2022 と BAA2020 のそれぞれの原波形でも観察されているので、当然の結果と考えられる。一方、5.7 秒以降に注目すればバブル相を 3 周期目まで使った結果では両者がよく一致している。

図 1-2-28 の BAC2020 のデコンボリューション結果はエアガンチャンバ容量が異なる AAA2020 のデコンボリューション結果と初動部も含めてよく一致していることと、さらに BAA2020 のデコンボリューション結果とも初動を含めてよく一致することとあわせて考えると、BAA2022 のデコンボリューション結果と BAA2020 および AAA2020 のデコンボリューション結果の初動部分の不一致は、両者のエアガンから水底までの距離の差があることに由来する可能性が高いと考えられる。

BAA2020 と BAC2022 との実験条件の差異を図 1-2-30 に示す。

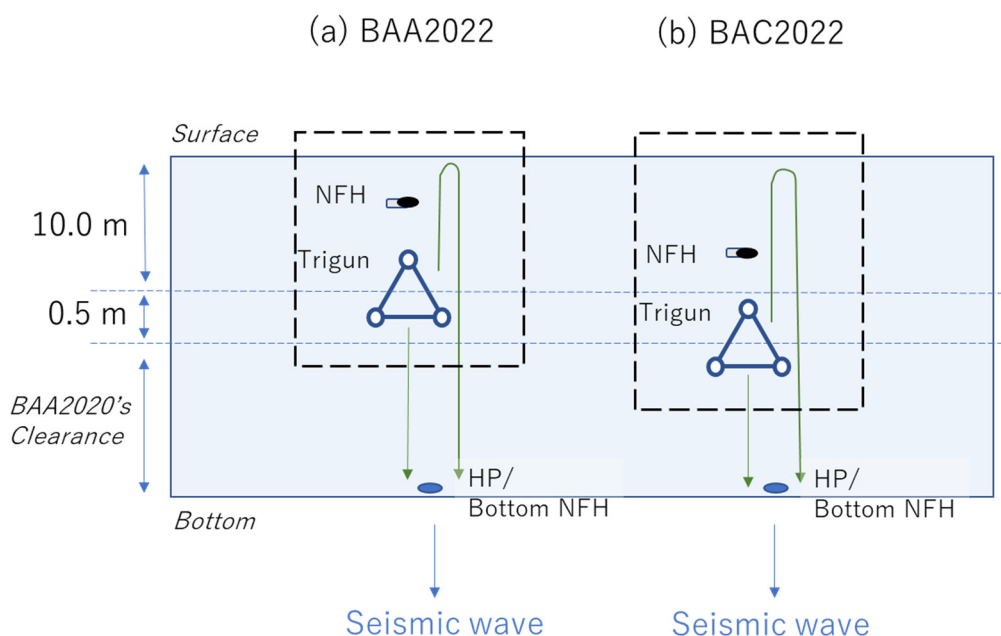


図 1-2-30 BAA2022 (a) と BAC2022 (b) のハイドロフォン配置の模式図。緑矢印は水中の圧力波の伝播を示し、図下方の青矢印は地下構造に入射する地震波を示す。

ここまで述べてきた NFH を等価振源波形として用いたデコンボリューションは図 1-2-30 の破線枠内全体を水中の振源（等価振源）であるとみなしたことに相当する。始良カルデラの地下へ入射する地震波はさらに水中から水底を経由して地下構造に照射される。したがってここまで述べたデコンボリューション結果は始良カルデラの地下構造の応答そのものではなく、いまだ地下構造の応答に等価振源－水底間の影響が重畳したものであると考えられる。

水底における観測波形を振源波形と等価なものとして扱うと、始良カルデラの地下の地震学的応答により近いものが得られると考えられる。令和 4 年実験では水中から地中へ弾性波が入射する地点である水底においたハイドロフォンを用いた観測が成功し、処理に使える波形記録を得て

いる。水底におけるハイドロフォン(NFH用ハイドロフォン 20 m 水深および通常型ハイドロフォン 20m 水深)の波形と、その波形を用いたデコンボリューション結果を図 1-2-31 に紹介する。

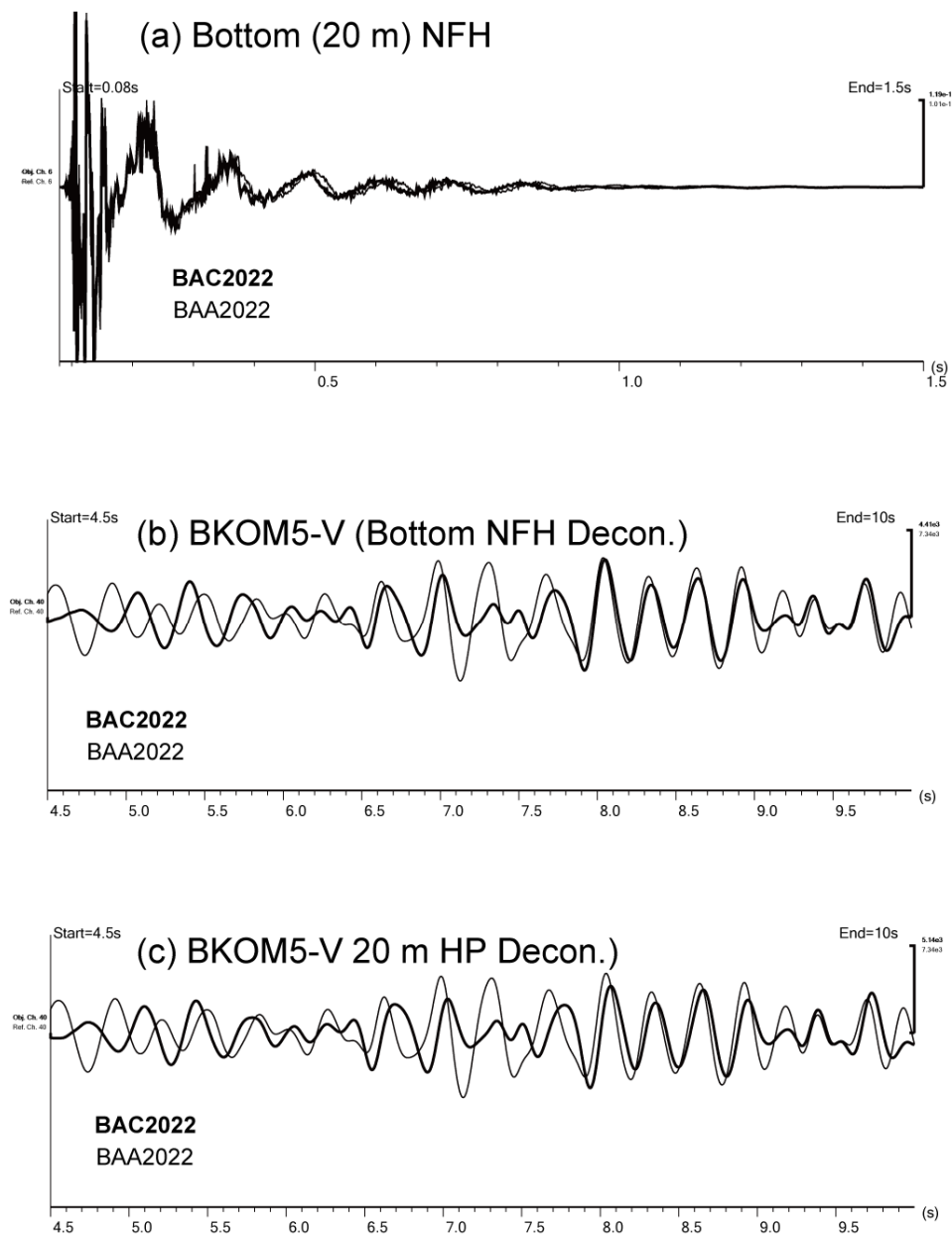


図 1-2-31. 水底ハイドロフォン波形(a)と(b)それを用いたパラメータセット BAA2022 のデコンボリューション結果とパラメータセット BAC2022 のデコンボリューション結果。(c)通常型ハイドロフォンによるデコンボリューション結果。

図 1-2-31(a)に示される水底ハイドロフォン波形は後続部分の確認がしやすいように大きめの倍率で表現している。BAC2022 と BAA2022 との差異は BAC2022 の後続部分の第 4 ピーク以降のピーク時刻が 26 ms 早い点のみである。この波形を用いたデコンボリューション結果が図 1-2-31(b)であるが、BAC2022 と BAA2022 とでは明らかに結果が一致しない。同様な深度に設置されたハイドロフォンの記録を用いたデコンボリューションでも両者は一致しない。

エアガン直上のNFHを用いたデコンボリューションが安定した結果を与える理由はいくつか考えられる。1つ目の候補はエアガン本体に対する相対的なセンサーの位置が安定していることである。2つ目の候補はNFHがセンサーとしてエアガンの直近に常に位置しているためにエアガンが発生する振動そのものを直接捉えることができる点である。京都大学防災研究所(2022)は遠方における加速度記録を用いたデコンボリューションが安定した結果を与えないことを報告していた。このことと水底NFHによるデコンボリューションが安定した結果を与えないことを考慮すると、遠方で得られた波形は複数の経路および複数のモードから構成される波が含まれていることでデコンボリューションの結果を不安定にしている可能性が指摘される。

以上のことをまとめると、デコンボリューションに用いる振源波形として最適なものは可能な限り振源に近い場所で得られた圧力波形記録であり、振源がエアガンの場合にはNFH記録のバブル相の第3周期までを用いるとよいことが示された。また、再現性の良い振源波形を得るためにはエアガンと水底の距離を一定に保つ必要があることも明らかになった。

### c) 参照波形構築

ここまでの検討から、パラメータセットBAC2022にデコンボリューション処理を施したものが令和2年観測(BAA2020, AAA2020)のデコンボリューション処理を施したものと良い一致を示すことが明らかになった。ここでは高免アレイが平面的に群列配置された地震計から構成されていることを利用して、下の式による2次元スローネスフィルタを行う。

$$R(t) = \sum_{j=1}^N r_j(t + \mathbf{x}_j \cdot \mathbf{s})$$

ここに  $R(t)$  を2次元スローネスフィルタ出力の地震記象、 $r_j(t)$  をアレイのj番目の観測点で

得られた地震記象、 $\mathbf{x}_j$  をj番目の観測点のアレイ中心に対する位置ベクトル、 $\mathbf{s}$  を到来方向を示すスローネスベクトルとする。すなわちここでいう2次元スローネスフィルタとは、2次元的に展開された群列地震計においてその位置と与えられたスローネスベクトルとの内積から求められる時間差分だけずらせた観測記象を足し合わせることで実現されるもので、ビームフォーミングとも表現される。

高免アレイ KOMA におけるデコンボリューション処理済み記録を用いて、住吉池方向からの入射を強調する2次元スローネスフィルタ処理を行った波形を図1-2-32に示す。住吉池方向からの入射を強調するスローネスベクトルを  $(s_x, s_y) = (-0.06, 0.125)$  (s/km) で与えた。これは入射角-26度(真北から東周りを正值)、見かけ速度7 km/s を中心とするスローネス成分を強調する設定である。

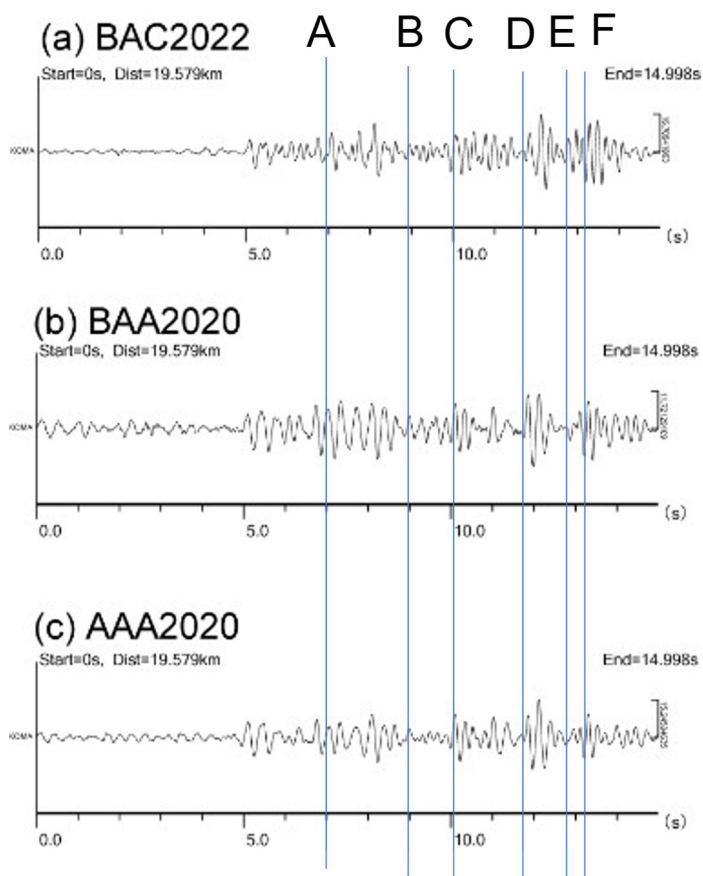


図 1-2-32. 参照波形図。 a)BAC2022、b)BAA2020、c)AAA2020。いずれも上下動成分を示す。各波形記録を貫く垂線は後続の表 1-2-9 に整理されている後続相の到来時刻を示す。

表 1-2-9. 明瞭な位相群

Code	Arrival (s)	Vapp. (m/s)	Interpretation
A	7.0	7.9	PP 15 km
B	9.0	3.83	Expected PS 13.6 km
C	10.1	7.9	PP 17 km
D	11.8	6.87	PP 33 km?
E	12.7	7.2	PS 24 km
F	13.3	3.9	Surface wave?

図 1-2-32a)~c) は包絡線の形状が一致しているうえ各位相の到来時刻と極性も一致しているので、これらを重合することによって、始良カルデラの地下構造変化にともなう地震波反射応答変化の参照記録を形成することができる。BAA2020 の 2 次元スローネスフィルタ結果は上記の波形群と異なる結果を与えたので、参照記録作成の対象にはしなかった。

図 1-2-33 に BAA2020 および AAA2020、BAC2022 の 2 次元スローネスフィルタ処理後波形をスタックして作成した参照記録を示す。

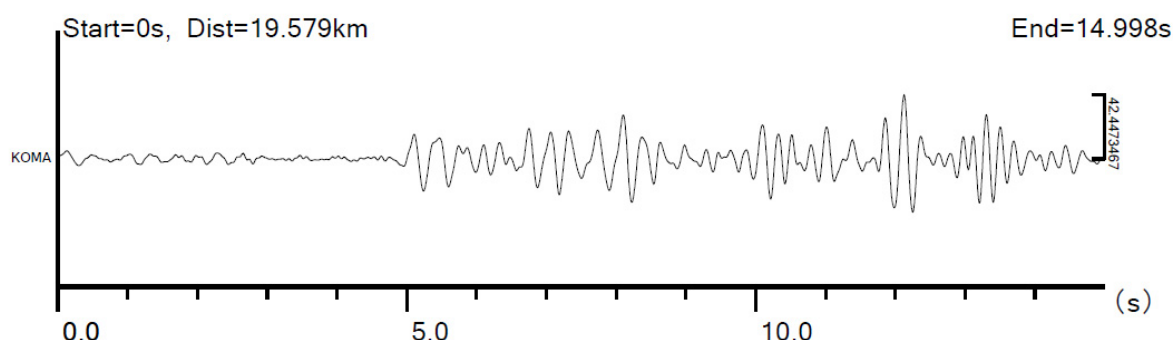


図 1-2-33. 参照記録（上下動成分）。BAA2020 デコンボリューション結果+AAA2020 デコンボリューション結果+BAC2022 デコンボリューション結果によって制作した。

#### (1) 2.4. まとめ

令和 4 年度は振源波形の安定性の検証を目的として、同一地点かつ同一方式による発振による基礎実験を行った。振源位置は令和 2 年のそれから 1 m 以内に設置することができた。発振点として用いた貯水池の水位が令和 2 年実験時と比較して約 0.5 m 上昇しており、エアガンと水面間を令和 2 年実験のそれと同一とする発振と、エアガンと水底間の距離を令和 2 年実験と同一とする発振とを行い、発振点近傍および始良カルデラを挟んで発振点の反対側にある桜島で波形観測を行った。

令和 2 年実験と異なる気象条件下での実験となったために、背景雑音レベルは令和 2 年実験の 5 倍に達したが、重合回数を多くとることで令和 2 年実験と同等の S/N 比の観測波形を得ることができた。

令和 4 年実験で明らかになった重要なことは 3 点あった。1 つ目は今回の実験で得られた人工地震波の初動到来時刻は令和 2 年実験のそれと一致したが、後続相では到来時刻が約 20 ms ほど早くなっているものが複数見受けられた。2 つ目はエアガンと水底間のクリアランス距離を令和 2 年と同じにとった場合に初動部分を含めた波形全体がよく一致した。3 つ目は波形デコンボリューションに用いる等価振源波形として NFH 観測波形のエア開放とそれに引き続くバブル膨張の 3 周期目までを用いると安定した結果が得られることが示されたことである。

#### 運用にあたっての問題点と今後の見通し

ここまでの実験では住吉池を利用して発振を行ってきた。しかしながら住吉池は従前から農業用貯水池として運用されており、貯水池の機能に支障をきたさないようにすることが求められる。以降も住吉池でエアガン発振を継続実施する場合、付録で述べたウォーターフェーズに依る水門の鳴りによる水門の作動への影響や空振の伝播による騒音問題を対策する必要がある。さらに農業用貯水池であるが故に大幅な水位の季節変化は避けがたいというえに、農業用灌漑目的以

外の目的による一定水位の維持は難しい。そのために今後実験時期を追加するなど内容を発展させた実験を住吉池で継続して行うことは困難であることが明らかになった。

また住吉池では特殊な水温構造が存在し、わずかな発振水深の差における観測波形の著しい相違をもたらしている可能性も指摘された。

今後長期連続反射法の確立を検討してゆく上では、専用水槽の設置が強く要請される。専用水槽を用意して完全に発振条件を制御すれば、時期に依らない安定した振源波形の発生が期待される。

しかしながら専用水槽の建造にあたりその費用を可能な限り抑制する必要がある。専用水槽の建造費用は建設の際の排土量に比例しかつ実験実施の際の維持費用は水槽の貯水量に比例することから、排土量がなるべく少なくなる縦断面形状を選定する必要がある。理想的な発振条件を構成するためにはエアガンの周囲に水で満たされた広い空間をなるべく大きく取る必要があるが、実現するためには掘削土量をなるべく少なくする必要がある。

上記のような条件を満たすものとして図 1-2-34 のような漏斗型の縦断面形状が考えられる。縦断面形状は倒立円錐台形の上部断面と円筒形の下部断面を組み合わせた漏斗型である。漏斗型にすることによって下部の掘削量を小さくすることができるうえ、発振効率の高い Tow depth を実現することができる。

また、専用水槽はその中に貯水をする必要があるうえ、エアガンの発する衝撃に耐える必要があるため、内周に鉄筋入りコンクリートを巻く必要がある。エアガンの衝撃に耐えうる壁厚については検討の余地がある。付録に記述したが、エアガンによる衝撃は今回の実験でも計測されており、350 cui エアガン単体の場合、 $3 \text{ bar} \cdot \text{m}$  ( $0.3 \text{ MPa} \cdot \text{m}$ )、350 cui  $\times 3$  基の同時発振では  $8.5 \text{ bar} \cdot \text{m}$  ( $0.85 \text{ MPa} \cdot \text{m}$ ) であるため、この数値が設計の際の目安になるであろう。

さらにエアガンの吐き出す空気の量は発振時の水の噴き上がりを決定する。350 cui エアガンは  $0.0055 \text{ m}^3$  に相当する。350 cui のチャンバに込められた  $13.6 \text{ MPa}$  の空気は、 $0.1 \text{ MPa}$  の大気圧下で  $0.748 \text{ m}^3$  である。これが直径  $2.5 \text{ m}$  のシャフトで出た場合には  $0.152 \text{ m}$  の水位上昇をともなうことになる。最上部の水面は直径  $10 \text{ m}$  なので  $0.01 \text{ m}$  の水位上昇で収まる計算になる。3連でエアガンを使う場合には単純に3倍すればよく、水面では  $0.03 \text{ m}$  の水位上昇で収まることになり噴き上がりを専用水槽内部で吸収することが可能であると考えられる。

このような条件でのエアガン発振の例は少ないため、専用水槽の設計に関して参考とすべきものを見いだせていないが、試験坑を建造してエアガン発振を行うことで具体的に検証を行う必要がある。

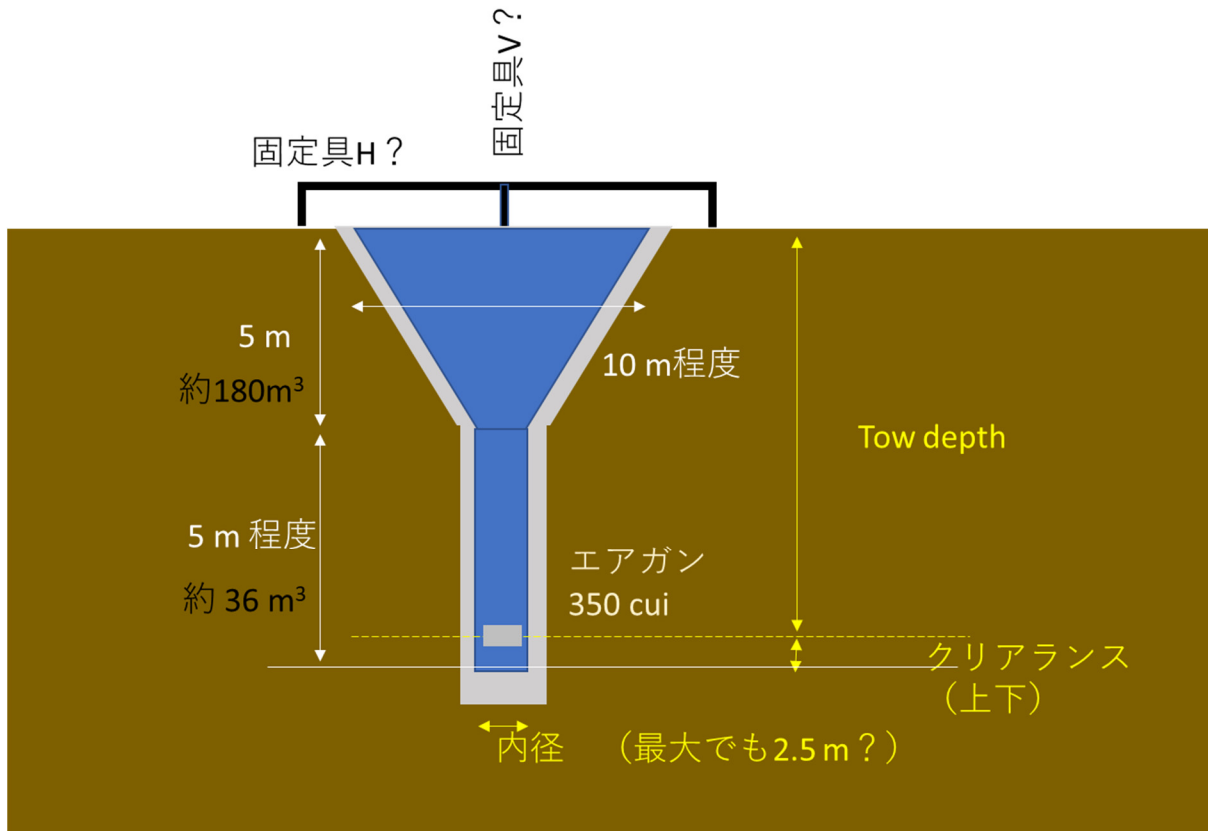


図 1-2-34. 専用水槽構想図

#### 謝辞

本項目を実施するにあたり、下記の関係機関・地元住民の皆様のご高配を賜った。住吉池の属する県立藺牟田池自然公園特別地区における発振行為に関して鹿児島県環境林務部自然保護課自然公園係から許可をいただいた。住吉池キャンプ村の利用に関して始良市企画部観光商工課観光係には許可をいただきました。始良市農林水産部耕地課耕地管理係には住吉池とその近隣に関するお世話をいただきました。住吉池の水面利用に関しては始良市三叉土地改良区にはご厚情とご承諾をいただきました。住吉地区自治会には予備観測および本観測の実施に関してご理解とご協力を賜りました。また観測機器の設置に関して高免町自治会および同住民の皆様には多大なるご協力を賜った。また、国交省大隅河川工事事務所には古河良川砂防指定地内の通行、観測行為、一部の観測点の占有に関してご理解とご承諾をいただいた。ここに記して感謝します。

## 付録

### 付録1 住吉池の湖底地形

住吉池は直径約 500m の円形を呈しており、約 7500 年前に発生したマグマ水蒸気爆発で形成された爆裂火口に湛水したマールであるとされている(森脇他, 1986; Okuno et al, 1997)。そのため、天然の湛水条件を備えており、人工の堰堤は最小限である。住吉池キャンプ場および住吉池水面は県立蘭牟田池自然公園第二種特別地域に指定されている。

湖岸付近は急傾斜地形を伴い、平均水深約 30m のなべ底状の湖底地形を呈することが京都大学防災研究所(2021)で確認された。ここではその後のさらに詳細な調査によって明らかになった住吉池の湖底地形についてまとめる。

住吉池の湖底地形を図 1-2-2(c)中の A-A'、B-B' 断面の地形を図 1-2-A1 に示す。湖岸から 100m 以内の湖底は急傾斜になっているが、それより中心寄りではほぼ平坦な地形になっている。中央やや南寄りの地点には湖底から高さ 1m ほどの出っ張りがある。このような条件を備えた住吉池は鹿児島湾沿岸の陸上においてエアガン発振のできる条件をほぼ備えた水域であると考えられた。

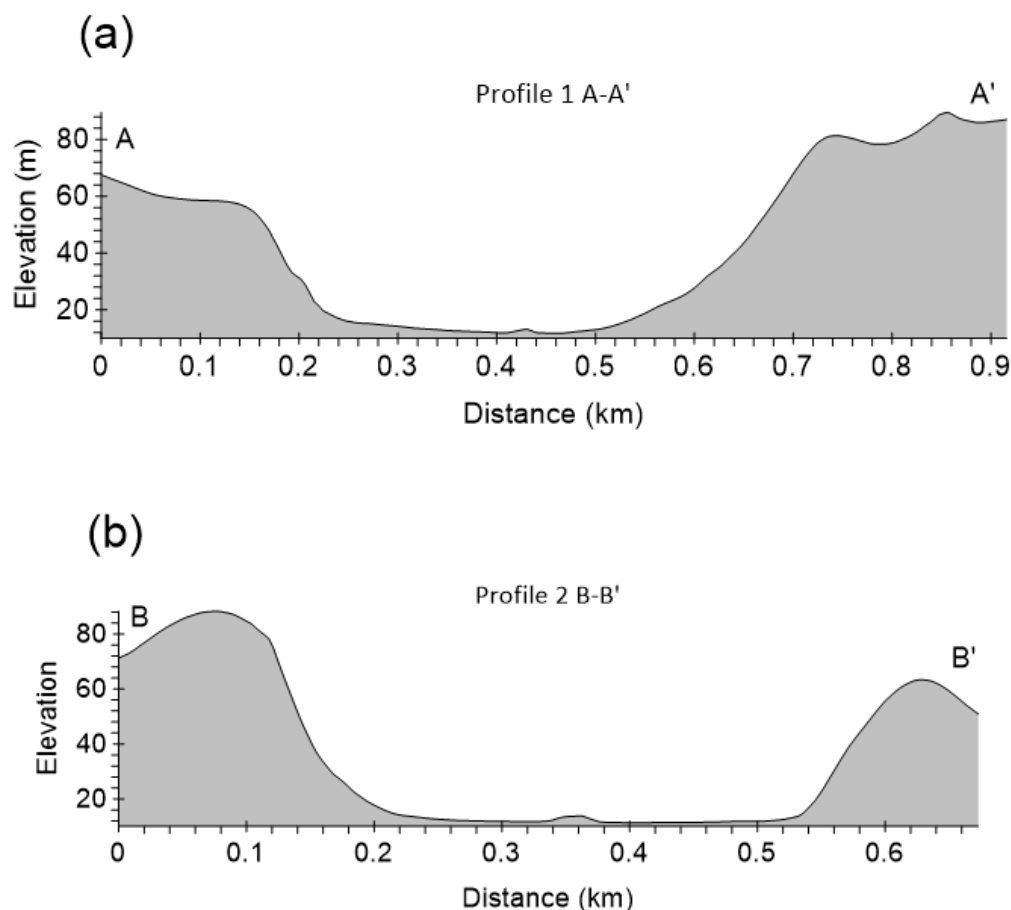


図 1-2-A1. 住吉池湖底地形断面図。(a)は図 1-2-2(c)の A-A' 断面、(b)は同図の B-B' 断面を示す。

### 付録2. 住吉池の水位変化と水塊構造



住吉池は始良市住吉地区に位置し、古くから周辺地区の灌漑用水源として利用されてきた（鹿児島県蒲生町，1969）。住吉池の水質は淡水で清澄な状態である。住吉池では水位の維持の為に、東方の寺師川から延長 2 km を超える長さの暗渠を介して水を導入している。湛水速度は平均 2 cm/日程度である。住吉池は農業用ため池として三叉土地改良区および地元住民が管理している。

図 1-2-A2 に令和 4 年度中の住吉池の水位変化を示す。水位は標高 36.2 m を基準とする水位標の値で表現している。図 1-2-A2 の例は令和 3 年 9 月に水門点検保守の為に水位を最低（水位標読み 2.9 m）にまで下げていたため、例年に比べて変動幅が大きい場合であると考えられる。

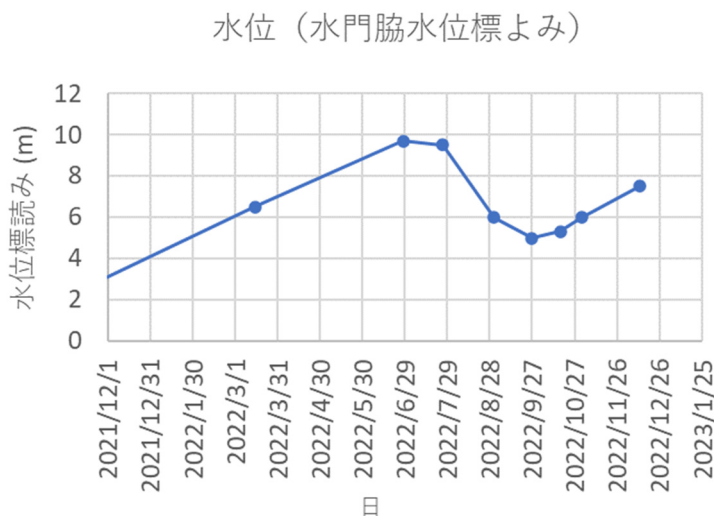


図 1-2-A2. 令和 4 年における住吉池の水位変化。水位標 0 m は標高 36.2 m に対応する。令和 4 年では満水期と灌漑終了期との水位差は約 5 m に達する。

また、エアガンポンツーンの約 10 m 東側の地点における水温測定結果を図 1-2-A3 に示す。水面を含む表層では 14℃、水底を含む底層では 10℃を示し、水深 12 m に両者の明瞭な境界がある。この測定では水中ドローン chasing m2 に組み込まれた水温計を用いた測定である。水温計は水中ドローン下面の小孔から水を導入する仕組みになっていたため、急速な温度変化への追従に時間を要する構造であった。そのために、ドローン上昇時と下降時とでは水温分布のみかけが異なる。下降時温度の変化が始まる水深は 11.63 m、上昇時は 12.46m で温度変化が始まったので、両者の垂直移動速度が同じであると仮定して平均 12 m を速度不連続面水深とした。観測当時の貯水池水位 7.7 m（水位標読み）で、標高 43.9 m に相当することから、水温不連続面は標高 31.9 m、水位標換算 -4.3 m であると推定される。灌漑用水を取り出す水門のうち、最下位の水門は水位標 0 m に相当することから考えると、温度不連続面の『標高』は灌漑用水運用に伴う水位変動の影響を受けにくいことが推察される。

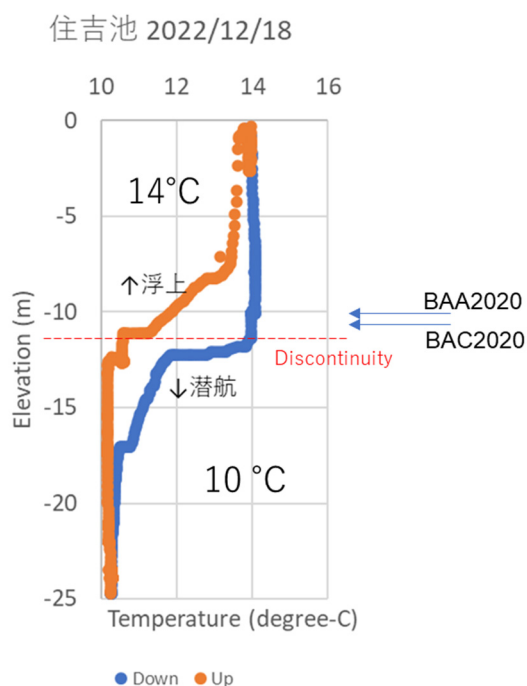
住吉池が季節によって温度が変動する表層水と常に低温の底層水の 2 層で構成されていることはすでに吉村 (1930a, 1930b) でも報告されており、今回もこの水温構造が維持されつづけていることが示された。

Mackenzie(1981)の式によれば上層 14°Cの表層水中の音速は 1461.8 m/s, 下層 10°Cの底層水中の音速は 1446.7 m/s と推定され、両者で 1 %の速度差が生ずる。この場合下層から上層に波が入射する場合の臨界角は 81.8 度である。

また、用いたトリガンはエアガンクラスタを構成するそれぞれの単体エアガンが 1.23 m の距離で組み付けられている。実験でエアガン深度としている値は単体エアガンが構成している三角形の重心であることから、エアガン深度 10.5 m における実験では最下部の 2 つの単体エアガンは中心がさらに 0.46 m 下方の深度 10.9 m 付近に位置し、これらは上層水と下層水の境界面にあった可能性が高い。発振の際にそれぞれのエアガンチャンバから吐き出される 0.055 m<sup>3</sup>(13.6 MPa) ずつの気泡の広がりを加えると、エアガン深度 10.5 m の場合の振源領域は下層水領域にもより大きく広がることになる。

このことから令和 4 年実験の BAC2022 発振ばかりでなく令和 2 年実験のエアガン水深 10 m 発振 (AAA2020, BAA2020) も表層水と低層水との境界付近でエアガン発振を実施していたと推察される。この推察が正しいのであれば初動付近における BAA2022 と BAC2022 との波形の差の理由と、水底ハイドロフォンによるデコンボリューションが一致しない理由とが 2 層水塊モデルで説明できる可能性がある。

次に住吉池を利用した発振でエアガン水深 10m を維持して、同じチャンバ容量かつ同じ動作圧で発振をしても、水位が異なればデコンボリューションで取り除けない著しい波形変化が起きる可能性がある。特に水位が低下する秋季において観測波形の変異が顕著になるかもしれない。



15

図 1-2-A3. 令和 4 年 12 月 18 日における水温測定結果。エアガンポンツーンの東方 10m 付近における水中ドローン (Chasing m2) 組み込み水温計による測定。

付録 3. エアガン近傍における圧力観測結果

本実験ではエアガンピットの構成に関する資料を得るためにエアガン近傍における圧力観測を行った。圧力観測は表 1-2-A1 に示す 2 種類のハイドロフォンを図 1-2-A4 に示す配置とした。

表 1-2-A1 エアガン近傍観測に用いたハイドロフォン

位置 (名称)	使用モデル	特性	垂直位置	チャンネル割当
NFH	GPM XT	10V/Bar, 1 Hz-5 kHz	エアガン中心直上 1.5 m	ch. 2
Spare NFH	GPM XT	10V/Bar, 1 Hz-5 kHz	20m 深 (着底)	ch. 6
オフセット 5m	P-44A	14V/Bar, 10 Hz-1kHz	5m 深・10m 深・15m 深・20m 深	ch. 11, ch. 12, ch. 13, ch. 14
オフセット 10m	P-44A	14V/Bar, 10 Hz-1kHz	5m 深・10m 深・15m 深・20m 深	ch. 7, ch. 8, ch. 9, ch. 10

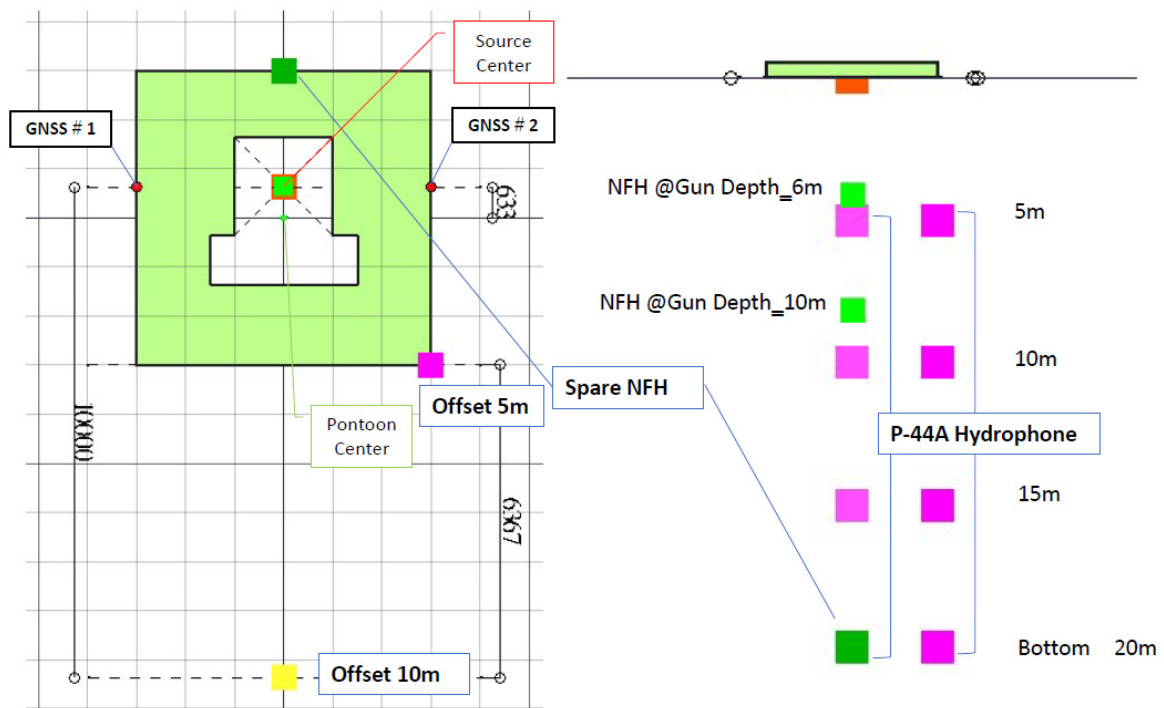


図 1-2-A4. 近傍観測センサー配置図 左：平面図、右：側面図 (Spare NFH 側より)。

近傍観測で得られた波形記録例の全長を図 1-2-A5 に、0-0.5 秒の区間のクローズアップを図 1-2-A6 に示す。いずれのチャンネルも飽和することなく記録が得られている。

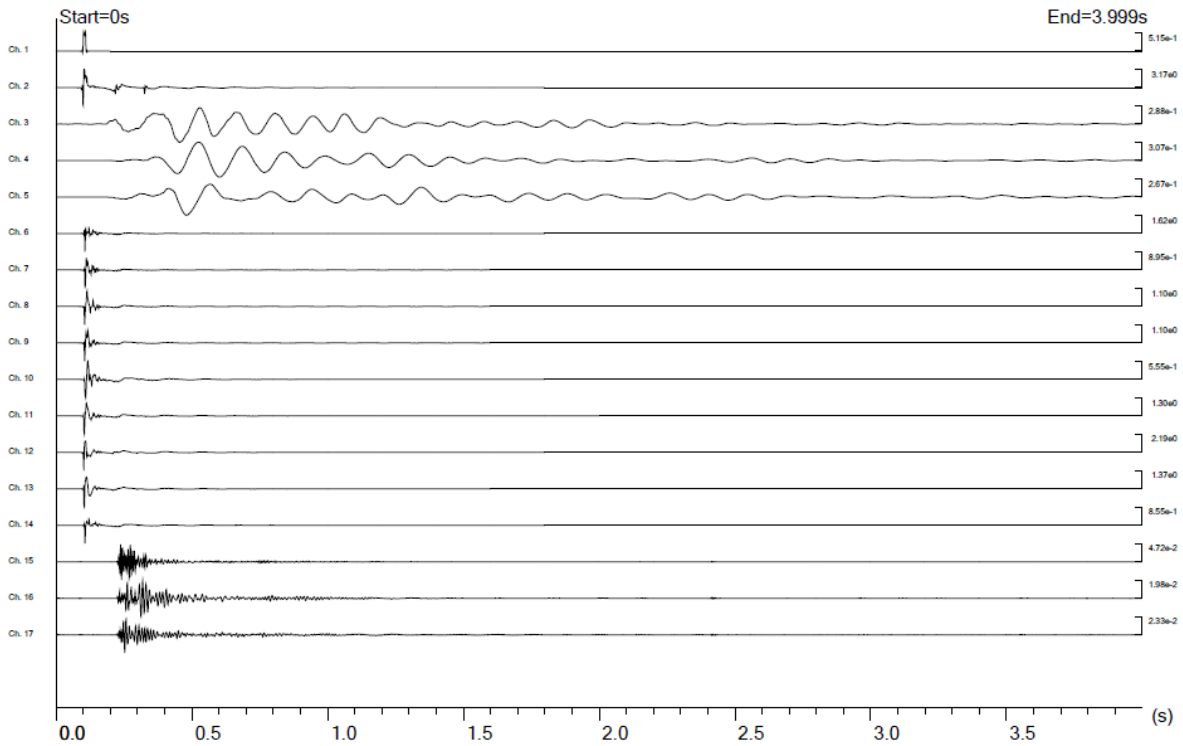


図 1-2-A5. 近傍観測波形。ch. 1 はタイムブレイク (エアガン制御信号)、ch. 3 - ch. 5 は SUM1 速度記録 (V, NS, EW の順)、ch. 15 - ch. 17 は SUMK1 加速度記録 (V, NS, EW の順) を示す。

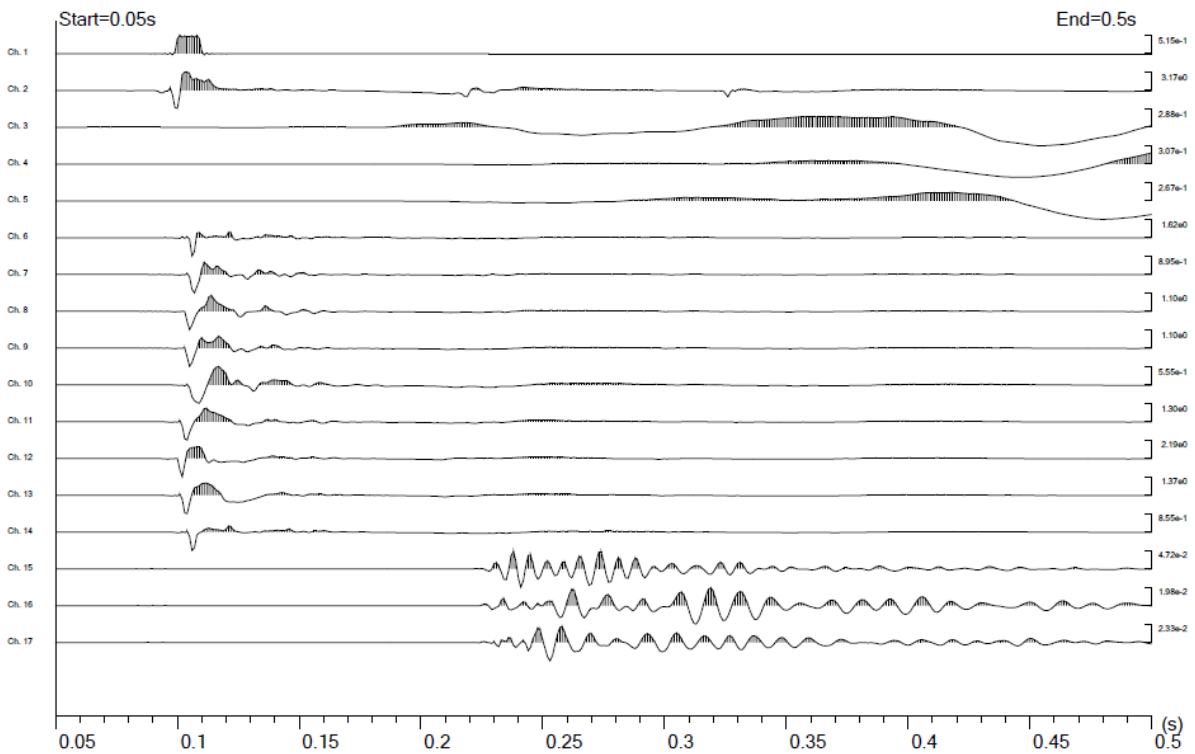


図 1-2-A6. 近傍観測波形クローズアップ。  
上図の 0-0.5 秒の区間を拡大したもの。チャンネル割り当ては上図に同じ。

付録 4. 最大衝撃圧、最大加速度

3連エアガンの全てを用いて発振を行った際のハイドロフォン記録を図 1-2-A7 に示す。

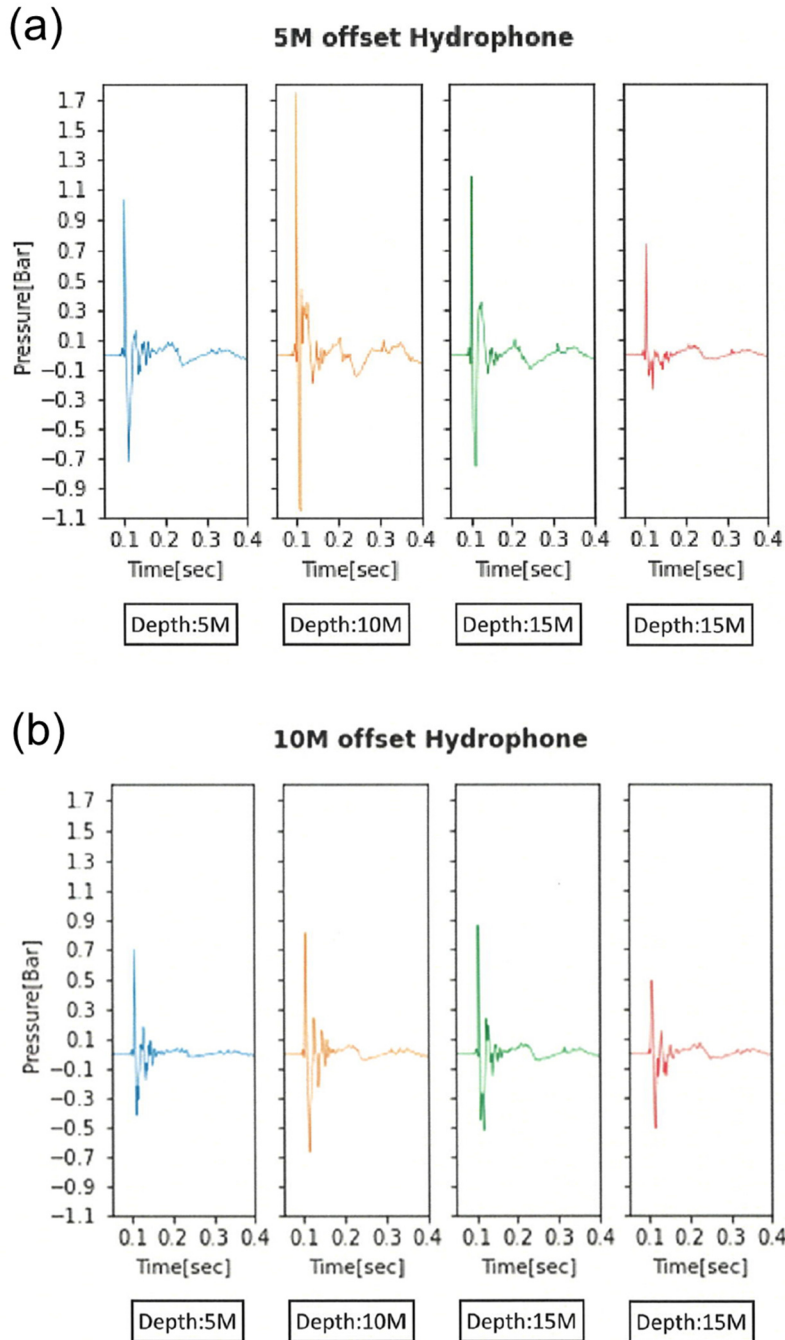


図 1-2-A7. 水中衝撃測定波形 (a) エアガン中心起点オフセット距離 5 m 地点、(b) エアガン中心起点オフセット距離 10 m 地点。

最大衝撃圧力を記録したのはオフセット 5 m 列の深さ 10 m に設置されたハイドロフォンで、1.7 bar(0.17 Mpa)を記録している。また、オフセット 10 m 列の深さ 10 m に設置されたハイドロフォンでは 0.8 bar(0.08 MPa)を記録している。このことから最大衝撃圧力はエアガンからの

距離に反比例していることが確認できる。また、したがって、エアガンから 1.25 m の場所（自由空間）では  $1.7 \text{ bar} \times 5 \text{ m} / 1.25 \text{ m} = 6.8 \text{ bar}$  が予想される。エアガン深度を 10.5 m にした場合でも最大衝撃圧に大きな違いは見られなかった。また 3 連構成のうち一つのエアガンだけ作動させた場合には最大衝撃圧はオフセット 5 m 列の 10 m 深で 0.6 bar が記録され、3 連の場合のおおよそ 1/3 の大きさであった。

また、令和 4 年度実験でも発振点から約 170 m 離れた堰堤上には加速度計観測点 SUMK1 を設置して加速度記録を取得した。加速度記録とそのスペクトルを図 1-2-A8 に示す。

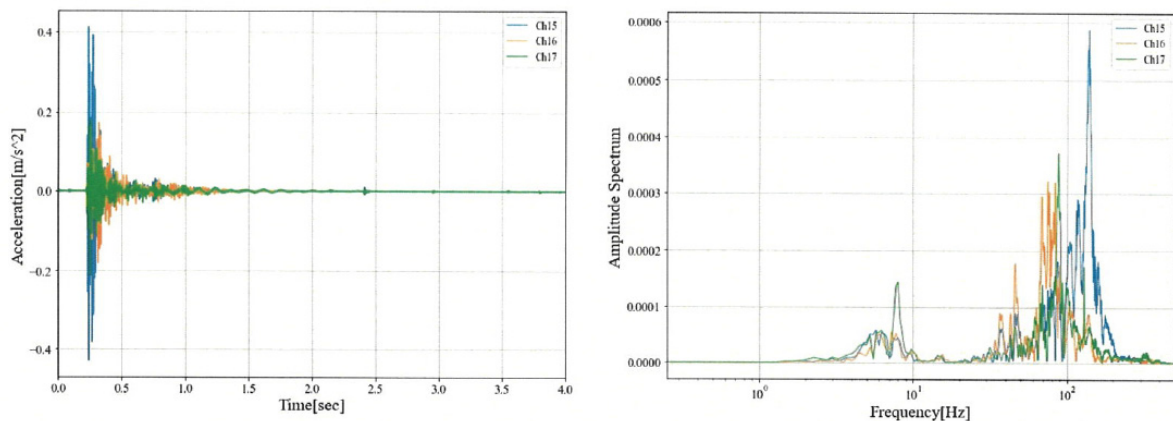


図 1-2-A8. SUMK1 における加速度記録。

堰堤上の SUMK1 観測点における発振による最大加速度は上下動成分で p-p 0.8 cm/s<sup>2</sup> であり、重力加速度の 1/1200 程度にとどまった。この値は京都大学防災研究所 (2021) で計測された値と同じであった。加速度記録の周波数成分は 10 Hz 以下と 20 Hz 以上とにそれぞれピークをもつバイモーダルなスペクトル形状を示していた。最大ピークは高周波に表れ、最も大きかったのが 200 Hz 付近であった。また、京都大学防災研究所 (2022) では高周波数成分がウォーターフェーズとなって水中を効率よく伝わり、SUMK1 では卓越する高周波数成分となって観測されていた。SUMK1 が設置された堰堤では可聴域の周波数成分が卓越したウォーターフェーズの到来によって、エアガン発振にともなって「水門が鳴る」という現象を引き起こしていたと考えられる。

#### 参考文献

鹿児島県蒲生町 (1969) 蒲生郷土誌, 鹿児島県蒲生町, 530pp.

国土地理院 (2000) 50m メッシュ 数値地図 Digital Map 50m Grid (Elevation) NIPPON-III

Krail, P. M., (2010) AIRGUNS: Theory and operation of the marine source, Course notes for GEO-391, Principles of seismic data acquisition, University of Texas at Austin. 44 pp.

京都大学防災研究所 (2020) 平成 31 年度原子力規制庁委託研究成果報告書 原子力施設等防災対策等委託費 (火山性地殻変動と地下構造及びマグマ活動に関する研究) 事業 令和 2 年 3 月

- 京都大学防災研究所(2021)令和2年度原子力規制庁委託研究成果報告書 原子力施設等防災対策等委託費(火山性地殻変動と地下構造及びマグマ活動に関する研究)事業 令和3年3月
- 京都大学防災研究所(2022)令和3年度原子力規制庁委託研究成果報告書 原子力施設等防災対策等委託費(火山性地殻変動と地下構造及びマグマ活動に関する研究)事業 令和4年3月
- Liu, C., Yang, H., Wang, B., Yang, J. (2021) Impacts of Reservoir Water Level Fluctuation on Measuring Seasonal Seismic Travel Time Changes in the Binchuan Basin, Yunnan, China, *Remote Sensing* 13 2421.
- Mackenzie, K. V. (1981) Nine-term equation for the sound speed in the oceans, *J. Acoust. Soc. Am.* 70(3), pp 807-812.
- 森脇広・町田洋・初見裕一・松島義章(1986)鹿児島湾北岸におけるマグマ水蒸気噴火とこれに影響を与えた縄文海進. *地学雑誌*, 95, 94-113.
- 奥野充(2002)南九州に分布する最近約3万年間のテフラの年代学的研究、*第四紀研究*、41, (4), 225-236.
- Staples, R. K., Hobbs, R. W., and White, R. S., 1999, A comparison between airguns and explosives as wide-angle seismic sources, *Geophysical Prospecting*, 47, 313-339.
- 為栗 健・八木原 寛・筒井智樹・井口正人(2022)、「始良カルデラ下の3次元地震波速度構造の高分解能化の試み」、*火山*、第67巻1号, 69 - 76,  
<https://doi.org/10.18940/kazan.67.1.69>.
- 筒井智樹、為栗 健、井口正人(2021)、人工地震記録による始良カルデラ西部の地殻内S波地震反射面の推定、*火山*、66巻2号, 71-81, [https://doi.org.10.18940/kazan66.2\\_71](https://doi.org.10.18940/kazan66.2_71).
- 筒井智樹・為栗 健・井口正人(2020)始良カルデラにおける地震波反射面の検出、*京都大学防災研究所年報*, 63B, 119-135,.
- 筒井智樹・為栗 健・味喜大介・井口正人・篠原雅尚(2021)始良カルデラにおける長期連続反射法基礎実験、*京都大学防災研年報*64号B, 86-100.
- TSUTSUI, T., Iguchi, M., Tameguri, T., Nakamichi, H. (2016) "Structural evolution beneath Sakurajima Volcano, Japan, revealed through rounds of controlled seismic experiments.", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 315, 1-14, DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2016.02.008, 2016.
- Urick, R. J., 1967, *Principles of underwater sound*, McGraw-hill Inc., 414pp.
- Watson, L. M., Werpers, J., and Dunham, E. M., 2019, What controls the initial peak of an air-gun source signature? *GEOPHYSICS*, 84, P27-P45.
- 吉村信吉(1930a):九州南部火山湖の理化学的及生物學的豫察研究, *地学雑誌*, 42, 381-387.
- 吉村信吉(1930b):九州南部火山湖の理化学的及生物學的豫察研究(其三), *地学雑誌*, 42, 450-461.
- 財団法人日本水路橋会 海洋情報研究センター (2002) 海の基本図