

令和2年度原子力規制庁委託研究成果報告書

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

京都大学防災研究所

令和3年3月

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2年度事業の委託研究の内容と成果の概要.....	1-1
2.	研究報告	2(1)-1-1
	(1) 活動的カルデラ火山の地下構造調査.....	2(1)-1-1
	(1)-1. 始良カルデラにおける地震観測による地殻構造調査.....	2(1)-1-1
	(1)-2. 長期連続反射法地震探査の検討.....	2(1)-2-1
	(2) 活動的カルデラ火山の火山性地殻変動とマグマ活動に関する調査.....	2(2)-1-1
	(2)-1. 始良カルデラの火山性地殻変動データの蓄積.....	2(2)-1-1
	(2)-2 始良カルデラにおける海底地盤変動観測の検討.....	2(2)-2-1
	(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....	2(3)-1
	(4) 委員会等の開催.....	2(4)-1

図表一覧

(1)-1-1. 始良カルデラ臨時地震観測点の拡充と維持

図 1-1-1-1. 臨時地震観測点分布	2(1)-1-1
表 1-1-1. 臨時地震観測 12 点のデータ回収およびバッテリー交換実施日	2(1)-1-2
写真 1-1-1-1. JA 鹿児島中央会研修センター跡地に設置した広帯域地震計	2(1)-1-3
写真 1-1-1-2. 霧島市国分キャンプ海水浴場内の設置予定場所	2(1)-1-4
図 1-1-1-2. JA 鹿児島県中央会研修センター跡地で記録された地震記録	2(1)-1-4
(1)-1-2. 3次元地震波速度トモグラフィーによる始良カルデラ地下構造モデルの高精度化	
図 1-1-2-1. 地震波トモグラフィー解析に使用した地震観測点	2(1)-1-5
図 1-1-2-2. 2008 年人工地震探査の発破点と地震観測点の分布	2(1)-1-6
図 1-1-2-3. 解析に使用した 383 イベントの震源分布図	2(1)-1-7
図 1-1-2-4. 深さ 1km、5km、10km、15km、20km におけるチェッカーボードテスト結果	2(1)-1-9
図 1-1-2-5. 深さ 1km、5km、10km、15km における P 波、S 波速度およびその比	2(1)-1-10
図 1-1-2-6. 始良カルデラ中心付近を通る東西（左）、南北（右）断面の P 波、S 波およびその比	2(1)-1-11
表 1-1-2-1. 3次元速度構造解析に用いた地震のイベントリスト	2(1)-1-12
(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	
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	2(1)-1-24
図 1-1-3-1 桜島島内の地震観測点の分布	2(1)-1-25
図 1-1-3-2 観測点 SKRD におけるレシーバ関数のスタッキング波形	2(1)-1-26
図 1-1-3-3 観測点 SKRD における到来方向 150° のレシーバ関数の波形インバージョンの結果	2(1)-1-28
図 1-1-3-4 観測点 SKRD における到来方向 290° のレシーバ関数の波形インバージョンの結果	2(1)-1-29
図 1-1-3-5 S 波速度の深さ断面での不均質分布	2(1)-1-30
図 1-1-3-6 S 波速度の東西断面での不均質分布	2(1)-1-30
図 1-1-3-7 S 波速度の南北断面での不均質分布	2(1)-1-31
(1)-2. 長期連続反射法地震探査の検討	
図 1-2-1. 基礎実験展開図	2(1)-2-2
図 1-2-2. 住吉池における発振点	2(1)-2-3
表 1-2-1. 発振点位置	2(1)-2-3
図 1-2-3. エアガンクラスタの配置図	2(1)-2-4
図 1-2-4. エアガン本体	2(1)-2-4
図 1-2-5. ポンツーン足場基部図面	2(1)-2-6
図 1-2-6. ポンツーン足場	2(1)-2-6
図 1-2-7. エアガン関連接続図	2(1)-2-7

図 1-2-8. 高圧コンプレッサとマニホールド	2(1)-2-8
図 1-2-9. 発振点および発振点近傍観測結線	2(1)-2-8
図 1-2-10. 水中観測点展開	2(1)-2-10
図 1-2-11. 発振点近傍観測	2(1)-2-10
表 1-2-2. 人工地震観測点	2(1)-2-11
図 1-2-12. 住吉池測線の展開	2(1)-2-12
図 1-2-13. 高免アレイ観測点配置図	2(1)-2-13
図 1-2-14. 高免アレイ観測点の例 (BKOM6 地点 6)	2(1)-2-14
図 1-2-15. 孔中地震計と設置作業	2(1)-2-14
図 1-2-16. 高免アレイ KOMA 観測点 (BKOM および SKOM) 設置構成	2(1)-2-15
図 1-2-17. 地表観測点機材	2(1)-2-15
図 1-2-18. 常設点 KOM 分岐観測結線	2(1)-2-16
表 1-2-3. エアガン発振作業内容	2(1)-2-17
図 1-2-19. エアガン発振作業の全容 (12 月 12 日)	2(1)-2-18
図 1-2-20. 観測点 KOM における全観測波形	2(1)-2-20
図 1-2-21. 主要な発振パラメータセットで得られた 40 回スタック後の全観測波形	2(1)-2-21
表 1-2-4. 発振パラメータセット AAA による最大速度振幅値	2(1)-2-22
表 1-2-5. 発振パラメータセット BAA による最大速度振幅値	2(1)-2-23
図 1-2-22. SUM 測線における初動走時曲線 (a) と求められた概略 P 波速度構造	2(1)-2-24
表 1-2-6. エアガン発振作業内容	2(1)-2-25
図 1-2-23. 全発振パラメータセットのトリガン NFH 波形の比較	2(1)-2-25
図 1-2-24. 異なるエアガン構成によるトリガン NFH 波形の比較	2(1)-2-26
図 1-2-25. 異なるエアガン水深におけるトリガン NFH 波形の比較	2(1)-2-27
図 1-2-26. SUM1 観測点における上下動成分観測記録	2(1)-2-27
図 1-2-27. 発振パラメータセットごとの波形包絡線と振幅積算の推移	2(1)-2-28
図 1-2-28. 発振パラメータセットの違いによるスペクトルの比較	2(1)-2-29
図 1-2-29. 発振パラメータセットによるスペクトルの比較	2(1)-2-30
図 1-2-30. シミュレーションによる各発振パラメータの振源波形スペクトルの比較	2(1)-2-31
図 1-2-31. 発震パラメータセット AAA のスペクトル変異	2(1)-2-32
図 1-2-32. 発震パラメータセット BAA のスペクトル変異	2(1)-2-33
図 1-2-33. 発振パラメータセット AAB のスペクトル変異	2(1)-2-33
図 1-2-34. SUM における波形相関の推移	2(1)-2-34
図 1-2-35. BKOM における波形相関の推移	2(1)-2-35
図 1-2-36. 発振パラメータセット AAA による観測波形 (BKOM5 観測点上下動) の推移	2(1)-2-36

図 1-2-37. 発震パラメータセット BAA に対する波形相関の推移	2(1)-2-36
図 1-2-38. 発振パラメータセット AAB に対する波形相関の推移	2(1)-2-37
図 1-2-39. 水中衝撃圧測定点の配置	2(1)-2-38
図 1-2-40. 全パラメータセットの 1500LL NFH で得られた波形の比較	2(1)-2-38
図 1-2-41. 全パラメータセットのトリガン NFH で得られた波形の比較	2(1)-2-39
表 1-2-7. エアガン周囲の最大衝撃圧値	2(1)-2-39
図 1-2-42. 住吉池南西端堤体上(SUMK1)における最大加速度	2(1)-2-40
表 1-2-8. 住吉池南西端堤体上(SUMK1)における最大加速度値	2(1)-2-41
表 1-2-9. 濁度の推移	2(1)-2-41
図 1-2-43. スタックによる S/N 比の推移	2(1)-2-44
表 1-2-10. 発振パラメータセットと単位時間当たりのエネルギー放射率	2(1)-2-45
図 1-2-44. 孔中地震計アレイ BKOM と地表地震計アレイ SKOM の空間応答特性	2(1)-2-45
図 1-2-45. 発振パラメータセット AAA による初動付近の到来方向解析結果 (5.0~8.0 秒)	2(1)-2-46
図 1-2-46. 発振パラメータセット BAA による初動付近の到来方向解析結果 (5.0~8.0 秒)	2(1)-2-47
図 1-2-47. 規格化二乗振幅の推移	2(1)-2-48
図 1-2-48. 震源距離 19.7km における異なる反射面深さに対する (a)理論走時と (b)理論見掛け速度	2(1)-2-49
図 1-2-49. 発振パラメータセット AAA に対する上下成分の到来方向解析結果 (8.3~10.1 秒)	2(1)-2-49
図 1-2-50. 発振パラメータセット BAA に対する上下成分の到来方向解析結果 (8.3~10.1 秒)。	2(1)-2-50
図 1-2-51. 発振パラメータセット AAA に対する南北成分の到来方向解析結果 (8.3~10.1 秒)	2(1)-2-50
図 1-2-52. 発振パラメータセット BAA に対する南北成分の到来方向解析結果 (8.3~10.1 秒)。	2(1)-2-51
図 1-2-53. BKOM3 観測点における上下成分規格化観測記録	2(1)-2-52
図 1-2-54. BKOM3 観測点における南北成分規格化観測記録	2(1)-2-52
図 1-2-55. 地表観測点記録と孔中観測点記録	2(1)-2-53

(2) 活動的カルデラ火山の火山性地殻変動とマグマ活動に関する調査

(2)-1. 始良カルデラの火山性地殻変動データの蓄積

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	2(2)-1-1
図 2-1-1-2. GNSS 観測点の位置	2(2)-1-3

図 2-1-1-3.	SV0G を基準点として求めた SNJ2 (上段) および BNTJ 観測点 (下段) の日毎の水平位置 (左列、座標系は 2 系) および楕円体高 (右列)	2 (2)-1-4
図 2-1-1-4	SNJ2 観測点に対する BNTJ 観測点の位置の時間変化の南北、東西、上下成分	2 (2)-1-5
図 2-1-1-5	YUDA 観測点に対する BNTJ 観測点の位置の時間変化の南北、東西、上下成分	2 (2)-1-5
図 2-1-1-6	OSKB 観測点の機器設置状況	2 (2)-1-6
図 2-1-1-7	SV0G を基準点として求めた OSKB 観測点の日毎の水平位置および楕円体高	2 (2)-1-6
図 2-1-1-8	MOCK 観測点の GNSS 機器設置状況	2 (2)-1-7
図 2-1-1-9	SV0G を基準点として求めた MOCK 観測点の日毎の水平位置および楕円体高	2 (2)-1-7
図 2-1-1-10	OKOG 観測点の機器設置状況	2 (2)-1-8
図 2-1-1-11	SV0G を基準点として求めた OKOG 観測点の日毎の水平位置および楕円体高	2 (2)-1-9
図 2-1-1-12	中之島 (NAKN) における GNSS キャンペーン観測の機器設置状況	2 (2)-1-9
図 2-1-1-13	キャンペーン観測による NAKN の上下変動	2 (2)-1-10
図 2-1-1-14	対流圏モデルを Hopfield および computed として求めた TAKT 観測点の日毎の位置の比較	2 (2)-1-11
図 2-1-1-15	2017 年-2019 年の GNSS 観測点の位置の時間変化	2 (2)-1-12
図 2-1-1-16	GNSS 基線解析による 2017 年-2019 年の GNSS 観測点の水平変位および上下変位	2 (2)-1-14
図 2-1-1-17	GNSS 基線解析による 2017 年-2019 年の GNSS 観測点の水平変位および三次多項式近似による水平変位	2 (2)-1-15
図 2-1-1-18	テクトニックな広域地殻変動の影響を除去した 2017 年-2019 年の GNSS 観測点の水平変位	2 (2)-1-16
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	2 (2)-1-17
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	2 (2)-1-17
図 2-1-2-1	霧島火山の影響による観測点の水平変位 (赤矢印)	2 (2)-1-18
図 2-1-2-2	霧島火山の影響を補正した観測点の水平変位	2 (2)-1-19
図 2-1-2-3	水準測量による上下変位	2 (2)-1-19
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	2 (2)-1-20
図 2-1-2-4	GNSS 観測による水平変位と水準測量による上下変位を統合した圧力源解析結果	2 (2)-1-21
図 2-1-2-5	MAKI-YOSI 間の水平距離 (m) および始良カルデラ下の増圧源の体積変化率	2 (2)-1-22

図 2-1-3-1	鹿児島県による降灰観測点の分布	2 (2)-1-23
表 2-1-3-1	鹿児島県による降灰量調査結果	2 (2)-1-24
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 (2020 年 2 月)	2 (2)-1-25
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	2 (2)-1-25
図 2-1-3-4	GNSS 観測点 MAKI と YOSI の間の水平距離の時間変化	2 (2)-1-26
図 2-1-3-5	始良カルデラの中央部の圧力源へのマグマ供給量の時間変化	2 (2)-1-27

(2)-2 始良カルデラにおける海底地盤変動観測の検討

(2)-2-1 海底地盤変動観測装置の設置場所の選定

図 2-2-1	海底地盤変動装置設置予定場所	2 (2)-2-2
---------	----------------	-----------

(2)-2-2. 海底地盤変動観測装置の詳細設計

表 2.1.1-1	シンカーの設計に用いる外力条件	2 (2)-2-3
図 2-2-2.1.1-1	採泥調査の調査地点図	2 (2)-2-4
表 2-2-2.1.1-1	室内土質試験結果の概要	2 (2)-2-5
図 2-2-2.1.1-2	各地点の粒径加積曲線	2 (2)-2-5
表 2-2-1.2-1	シンカーの外部安定性の照査結果	2 (2)-2-10
図 2-2-2.9-1	観測システム構成図	2 (2)-2-39

(2)-2-3. 海底地盤変動観測装置の製作設置計画の提案

図 2-2-3.1-1	海底地盤変動観測装置の概略図	2 (2)-3-1
表 2-2-3.1-1	海底地盤変動観測装置の製作に関する全体工程表(案)	2 (2)-3-2
表 2-2-3.2.1	設置方法比較検討表	2 (2)-3-5
図 2-2-3.2.1	CASE-2 施工ステップ図 (その 1)	2 (2)-3-6
図 2-2-3.2.2	CASE-2 施工ステップ図 (その 2)	2 (2)-3-7
図 2-2-3.2.3	CASE-2 施工ステップ図 (その 3)	2 (2)-3-8
図 2-2-3.2.4	CASE-2 施工ステップ図 (その 4)	2 (2)-3-9
図 2-2-3.2.5	CASE-2 施工ステップ図 (その 5)	2 (2)-3-10
図 2-2-3.2.6	CASE-2 施工ステップ図 (その 6)	2 (2)-3-11
表 2-2-3.2.2	CASE-2 設置作業タイムスケジュール	2 (2)-3-12
図 2-2-3.2.7	観測装置設置フロー	2 (2)-3-13
図 2-2-3.2.8	組立ヤード候補地	2 (2)-3-14
表 2-2-3.2.3	調達計画の起重機船	2 (2)-3-15
表 2-2-3.2.4	計画工程表	2 (2)-3-16
図 2-2-3.2.9	観測装置撤去フロー	2 (2)-3-17

(2)-2-4. 海底地殻変動観測装置 GNSS 測位実験

図 2-2-4-1. 海底地盤変動観測装置概略図	2 (2)-4-1
図 2-2-4-2. 測位実験用実験台	2 (2)-4-2
図 2-2-4-3. 測定装置結線図	2 (2)-4-3
図 2-2-4-4. 実験全景	2 (2)-4-4
図 2-2-4-5. 実験台主要部	2 (2)-4-4
図 2-2-4-6. 実験 1 アンテナ取り付け法と測位点	2 (2)-4-5
図 2-2-4-7. 実験 1 見取り図	2 (2)-4-6
図 2-2-4-8. 実験 2 以降のアンテナ取り付け部。	2 (2)-4-7
図 2-2-4-9. 実験 2 以降の実験台	2 (2)-4-7
表 2-2-4-1. 実験 2	2 (2)-4-8
図 2-2-4-10. 傾斜角計出力と傾斜角	2 (2)-4-10
表 2-2-4-2. 実験 2 計測結果	2 (2)-4-10
表 2-2-4-3. アンテナペア (G1G2) で求めた傾斜角	2 (2)-4-12
表 2-2-4-4. 傾斜角測定結果の統計量	2 (2)-4-12
図 2-2-4-11. アンテナペア傾斜測定結果と実傾斜角	2 (2)-4-13
表 2-2-4-5. 解析に用いたデータと実験状況	2 (2)-4-14
図 2-2-4-12. 実験 3 8W_20Hz_1 画像解析時マーカー設定	2 (2)-4-15
図 2-2-4-13. 実験 3 10W_20Hz_1 画像解析時マーカー設定	2 (2)-4-15
図 2-2-4-14. 実験 3 10W+_20Hz_1 画像解析時マーカー設定	2 (2)-4-16
図 2-2-4-15. GNSS 測位による変位量と画像解析による変位量	2 (2)-4-17
図 2-2-4-16. 画像解析による変位測定結果	2 (2)-4-19
図 2-2-4-17. 傾斜角計測結果の比較	2 (2)-4-20
図 2-2-4-18. 傾斜角計推定値による変位量と GNSS による変位量	2 (2)-4-21
表 2-2-4-6. GNSS 対傾斜角計測定結果	2 (2)-4-22
図 2-2-4-19. 単一アンテナ (G1) vs アンテナペア測定 (G1G2)	2 (2)-4-23
図 2-2-4-20. 傾斜角計による測定、単一アンテナ測定、アンテナペア測定 (G1G2) による傾斜角測定結果の差	2 (2)-4-24
図 2-2-4-21. 異なる傾斜角測定法による測位点水平座標推定結果	2 (2)-4-26
表 2-2-4-7. 振幅推定値	2 (2)-4-27
表 2-2-4-8. 測位点水平座標推定平均値	2 (2)-4-27
図 2-2-4-22. 異なる傾斜角測定法による測位点垂直座標推定結果	2 (2)-4-28
表 2-2-4-8. 測位点垂直座標推定値振幅	2 (2)-4-29
表 2-2-4-9. 測位点垂直座標推定平均値	2 (2)-4-29
図 2-2-4-23. GNSS アンテナ配置の改良案	2 (2)-4-31

(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

図 3-1 : 調査地域の位置図	2 (3)-2
図 3-2 : 本研究で使用したモデルの概略図	2 (3)-3
図 3-3 : (a) ケース 1、(b) ケース 2、および (c) ケース 3 のそれぞれにおける平均誤差 ε_a を η_c の関数として表示	2 (3)-7
図 3-4 : ケース 1 において予測された鉛直変位プロファイル	2 (3)-8
図 3-5 : ケース 1 において予測された変位ベクトルの空間分布	2 (3)-9
図 3-6 : ケース 1 における地点 2469 に対する BM2474 での鉛直表面変位の時間変化	2 (3)-11
図 3-7 : (a) 測地データから推定された各期間におけるシル状のマグマティック変動源のインフレーション率 Ω 。(b) 1914 年の大正噴火以降のマグマティック変動源の体積変化	2 (3)-12
図 3-A1 : ケース 2 における予測モデルの振る舞い	2 (3)-17
図 3-B1 : 図 3-A1 と同じ図、ただしケースの 3 の場合。 $\Gamma_{14} = 1$ が適用されている	2 (3)-19
図 3-B2 : 図 3-B1 と同じ図、ただし $\Gamma_{14} = 5$ が適用されている。	2 (3)-19

1. 令和2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

(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

本項目は本プロジェクトにおける研究の骨格を与える項目である。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。

本項目では下記の内容を令和2年度に実施した。

- ・地震観測の維持
- ・始良カルデラ北部・西部の広帯域地震計観測点の新設
- ・地震波トモグラフィーによって得られた始良カルデラの3次元地震波速度構造の分解能の改良
- ・レシーバ関数のインバージョンによる始良カルデラ南縁部のS波地震波速度構造の推定

地震観測の維持の成果としてデータ蓄積は利用可能なレベルに達している。令和2年度は構造解析における分解能向上を目的に始良カルデラ北部および西部に広帯域地震観測点を増設し、始良カルデラ内部を通過する地震波線に対する観測を強化した。

地震波トモグラフィーは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、レシーバ関数はデータとして利用する波長の数分の1スケールの地震波速度境界面を与える。トモグラフィー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波速度構造はインバージョン結果を検証し補強する情報を与え、S波速度不連続面は地震波速度異常体の境界とその強度を与える。この2つの手法を組み合わせることで地震波速度異常体を検出し、その輪郭を明らかにすることが期待される。

地震波トモグラフィーでは自然地震観測データの蓄積と観測データの吟味による地震波線数の追加を行うことで、得られた速度構造の信頼性が向上した。さらに垂直断面による検討を実施した。その結果、これまでに地盤変動圧力減が推定されてきた深さ10km付近には顕著な速度異常は認められなかった。また、深さ15km付近に存在する顕著なS波低速度領域の広がり、インバージョンに用いたグリッドサイズより大きいこと、また、垂直断面では南に向かって低速度領域が浅くなる傾向があることが指摘された。地下構造を明らかにするという点では成果が得られており分解能は一定のレベルに達している。今後は地震波の他の観測量の解析を通して、地震波速度の他の物性の空間分布の把握に進むことが望まれる。

レシーバ関数解析では到来方向毎の波形インバージョンで得られた各観測点の1次元S波速度構造をそれぞれの波線に沿って、3次元的にマッピングし始良カルデラ南縁の桜島を中心とするS波地震波速度構造を得た。これまでレシーバ関数の適用はイメージングのみであったのが、波形インバージョンを実施することにより速度構造の解像度が向上した。桜島を中心とする始良カルデラ南縁地域の上部地殻は北西側で標準的なS波速度を示すが、南東側は標準より低速度を示すことが報告された。これは始良カルデラ南縁におけるカルデラの内外の構造の差を示すものである。一方、いずれの側でも中部地殻は標準的な値に比べて低速度であることが指摘された。レシーバ関数解析（イメージングおよびインバージョン）のカバーする範囲は観測点配置および入射

波線分布に強く支配される。始良カルデラ地域において中部地殻の S 波速度構造の特徴を明らかにするために、今後は本プロジェクトで蓄積された自然地震観測データを追加することにより始良カルデラ全域にレシーバ関数インバージョンの展開が望まれる。

始良カルデラに関する研究では、令和 2 年度に鹿児島大学が深さ 10km までの詳細な地震波速度構造の解析結果を学会講演で発表しており、本プロジェクトで得られた構造研究の成果と整合する結果が得られている。今後、本項目全体の成果を火山性地盤変動の背景モデルに反映し、地盤変動力源位置とマグマだまりジオメトリとの関係の検討を行い、地球物理学的な始良カルデラの姿の理解を深める。

(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。

令和 2 年度は前年度の予備調査の結果をもとに適切な能力をもった振源装置の仕様の検証を目的に、実際に始良カルデラ北西岸地区でエアガン発振を実施して対岸の桜島地区に設置した群列配置地震計で人工地震波の観測を行った。

エアガン発振は令和元年度の予備調査の成果を考慮した発振容量のエアガン装置を用意し、同じく予備調査の結果十分な水深が確認された農業用ため池（始良市住吉池）を利用して発振を行った。エアガン発振は総容量 2550 cui のクラスタエアガンを用いて、複数のエアガン装置構成および複数のエアガン水深、複数のエアガン動作圧を組み合わせた 4 通りの発振パラメータで実施された。

発振点对岸の桜島では振源距離 19.7 km を中心に直径 0.6km、平均観測点間隔約 100m の群列配置による観測を実施し、深さ 10m に設置した孔中地震計 7 点で構成した群列配置と、地表に設置した地震計 9 点で構成した群列配置を同時に運用した。この他、発振点近傍における観測も実施し、振源から放射される地震波形および水中衝撃圧の確認も行った。

その結果、令和元年度に提案された最大仕様(4500 cui)を用いなくとも、基礎実験で用意したクラスタエアガンの一部である 1050cui のエアガンシステムで桜島まで届く人工地震波を発生することが可能であることが示された。また群列観測データの解析により観測記録には始良カルデラ深部(13.6 km)からの地震反射波が検出され、エアガン装置を用いて始良カルデラ深部からの地震反射波をとらえることが可能であることが示された。さらにデータを検討することによって、13.6 km 深ばかりではなくそのほかの深度の地震反射面に関する後続相の存在が指摘できる可能性がある。今回得られたデータに含まれる変換反射波／反射波の振幅と走時を継続的に追跡することによって、これらの到来波をもたらす反射波の振幅や到来走時の変化を知り、反射面を天井

とする始良カルデラ深部のマグマだまりの物性変化や深度変化を検出できると考える。今後は1050 cui トリガンを用いて地震反射波変化検討のための参照データ蓄積とともに発振点運用ノウハウの蓄積を継続する。

(2) 活動的カルデラ火山の火山性地殻変動とマグマ活動に関する調査

(2)-1. 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。

令和2年度は下記の内容を実施した。

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

GNSS 観測点の維持では既存の常設観測点および先行事業によってすでに展開された観測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。令和2年度の大崎ヶ鼻観測点新設は始良カルデラ中央部を囲む基線網の強化と水準測量結果の検証を狙って実施された。また GNSS 観測の安定化を狙い観測機器の老朽化が著しい既設観測点2点の機器更新も実施された。令和元年度にひきつづき令和2年度も始良カルデラ中央部に近接した中ノ島においてキャンペーン観測を実施し、令和元年度に対して3mmの隆起を検出した。また、キャンペーン観測から得られた地殻変動圧力源の位置と深さは始良カルデラの中央部の深さ11kmでこれまでの推定位置とほぼ一致していた。

GNSS 連続観測では基線解析方法の変更とテクニクな広域地殻変動の補正によって、これまでより広い範囲で始良カルデラの火山性地殻変動の水平成分を抽出することができた。気象補正を導入して気象要素による年周変化の除去を行い、地盤変動圧力源解析の入力として用いるGNSSデータの品質を改良した。また、圧力源解析においてはGNSS観測による水平変位量に加えて、水準測量による上下変位量を導入して統合解析を行い、平成29(2017)–令和元(2019)年の期間について先行研究およびキャンペーン観測で得られた結果と整合した結果を得た。

令和2年度の研究対象とした期間では始良カルデラ直下と桜島南岳直下にそれぞれ圧力源を仮定することで、対象となる期間の地殻変動量を矛盾なく説明することができた。始良カルデラへのマグマ供給量の推定も令和元年度に続き実施した。始良カルデラ南縁に位置する桜島からの火山灰噴出量を始良カルデラからのマグマ流出量とみなし、地盤変動から推定される体積変化量に加える。算出されたマグマ供給量はこれまでに知られている量とほぼ同等であった。令和2年度は全体として降灰が少なかったが、細かく見てゆくと7月頃まで $9\sim 11\times 10^6$ m³/年の割合でマグマが供給され、その後供給速度がやや鈍っているように見える。したがって令和2年は始良カル

デラのマグマだまりに大きな変化はなかったといえるであろう。

しかしながら桜島北部に推定される圧力源における体積変化は、その膨張期における始良カルデラへのマグマ供給量見積もりへの影響が依然として大きいことから、今後桜島北部における連続観測を強化する必要性がある。桜島の活動が活発化した際には桜島北部の地盤変動量の取り扱いを慎重に検討する必要がある。

また、令和2年度に始良カルデラの深さ10kmまでの詳細な地震波速度構造の解析結果を鹿児島大学が学会講演で発表しており、提唱された地下構造モデルは本研究の構造研究の成果と整合するものの、これまでに推定された地盤変動圧力源位置との関連性については議論の余地を残している。同じ変動量を説明する有限体積の力源モデルの中心は点力源モデルのそれよりも深くなることが知られているうえ、また異なった形態の有限体積圧力源は異なる体積変化量を与えることも知られている。これまで始良カルデラでは地盤変動圧力源モデルとして点力源モデル（いわゆる茂木モデル）を仮定して位置と深さの推定を行ってきたが、有限体積力源モデルを適用すればその中心がこれまでの推定より深い場所に決まると考えられる。本研究で集積されつつある地下構造に対する知見を反映し、水平変動量と上下変動量とともに整合的に説明できる有限体積圧力源の位置と形状を検討して、始良カルデラの地下深部におけるマグマ蓄積の姿を検討することが望まれる。

(2)-2. 始良カルデラにおける海底地盤変動観測の検討

本項目で令和2年に実施した項目を下に列挙する。

- ・海底地盤変動装置の設置場所決定
- ・海底地盤変動装置の詳細設計
- ・海底地盤変動観測装置の測位実験

情報収集と基本設計を実施した令和元年度にひきつづき、令和2年度は海底地盤変動観測装置の詳細設計を重点的に実施した。令和2年度前半は関係機関との協議調整のうえ海底地盤変動観測装置の設置場所を始良カルデラ南東部の新島北西沖に定め、さらに海底地盤変動観測装置の基台設計を具体化することを目的として定めた設置予定地点の海底採泥調査を実施した。関係機関との協議結果および設置場所の海底地盤状況を反映し、令和元年度の基礎設計をもとにした海底地盤変動観測装置の詳細設計を実施し令和2年度後半に同装置の製作用図面一式を得た。令和2年度の詳細設計では地盤変動観測に必要な上下方向変動検出精度を確保するために、基台と上部構造との連結部分に摩耗量の小さい構造を組み込む構成とし、観測装置頂上部のGNSSアンテナによる測定結果を傾斜角計の測定値で補正して観測装置基台の位置を決定する方式を前提とした構造とした。さらに海底地盤変動観測装置の設置方式に関しても複数の方法について検討を施し、起重機船2隻相吊りによる機器一体一括設置方式を採用する方針を定めた。

海底地盤変動観測装置を模した支点を軸として運動する実験台に搭載したGNSSアンテナによる測位結果と傾斜角計の測定結果から、運動軸位置を推定する手法の検証を目的とする測位実験を1月下旬に実施し手法の検討を行った。測位実験では固有周期が可変で自由振動が可能な振り子式の実験台を製作し、支点から1mのピラーを伸ばした先にGNSSアンテナ台として長さ2mのビームを取り付けた。ピラーの直上には傾斜角計と主GNSSアンテナを置き、ビームの先には副

GNSS アンテナを取り付けた。測位実験の結果、実験台の静的な傾斜に対して傾斜角計は正しい傾斜測定値を与えるが、実験台が運動している場合には周期が短いほど傾斜角計が過大な傾斜角測定値を与えることがわかった。これに対して GNSS 主アンテナと副アンテナによる傾斜角推定はよい結果を与えたことから、海底地盤変動観測装置の傾斜角測定にはこの方式を採用することが望ましいと考えられる。このことから後年度では令和 2 年度に行った設計における傾斜角測定方式を変更し、ひきつづき改良設計を実施することによって海底地盤変動観測装置の観測精度を高める必要がある。また、GNSS 測位結果解析方法についてもひきつづき検討と実験あるいは観測を通じた実証が必要である。

(3) 活動的カルデラのシミュレーションモデルによる火山性地殻変動の検討

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。令和 2 年度は時間方向すなわち過渡的な応答特性の検証に焦点をあてて、噴火イベントに対する 3 種類の基本粘弾性応答の重ね合わせで地盤変動パターンを説明し、1914 年以降の力源体積変化速度（インフレーション率）と地殻の粘性率とを求めた。力源体積変化率は時期によって有意に異なることが明らかにされた。力源体積変化速度の推定は粘性率に依存し、高粘性率ほど増加速度は小さい。粘性率は時期によって異なることを明らかにした。力源における体積収縮量対地表への噴出量比が時期によって異なり、かつ今回求められた粘性率も時期によって異なることから、1914 年噴火の場合とそれ以降の活動とは異なる力源またはマグマ排出源が活動している可能性が指摘された。1975-1997 年の地表収縮は粘弾性緩和の効果が含まれている可能性がある。このことから表面へのマグマ噴出活動の有無は比較的短い時間スケールにおけるマグマ供給率の増大の有無に依存しており、蓄積量の大小に依存しないことが明らかになった。

後年度ではひきつづき水準や 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科学的知見の整備を行うとともに、始良カルデラ下における地球物理学的研究成果を反映させた粘弾性地殻変動モデルを構築し、変動源の深さや粘性構造など、主要なモデルパラメータへの依存性を詳しく検証することにより、同カルデラ内及びその周辺で観測される地殻変動のメカニズムを明らかにする必要がある。

2. 研究報告

(1) 活動的カルデラ火山の地下構造調査

(1)-1. 始良カルデラにおける地震観測による地殻構造調査

(1)-1-1. 始良カルデラ臨時地震観測点の拡充と継続

a) 臨時地震観測

始良カルデラ周辺に設置している 12 点の臨時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 の黄色○）。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）を使用している。データロガーは白山工業株式会社製 LS-8800 を使用して収録を行っている。業務委託により 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、2020 年度の実施日を表 1 に示す。特に異常は発生しておらず安定したデータ取得が継続されている。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。

2019 年度に設置した弁天島の 1Hz 地震計とテレメータ装置（図 1-1-1-1 の赤○）および新島の広帯域地震計（図 1-1-1-1 の赤□）による観測を継続している。両点のデータはリアルタイムでテレメータしており、安定してデータ取得が行なわれている。

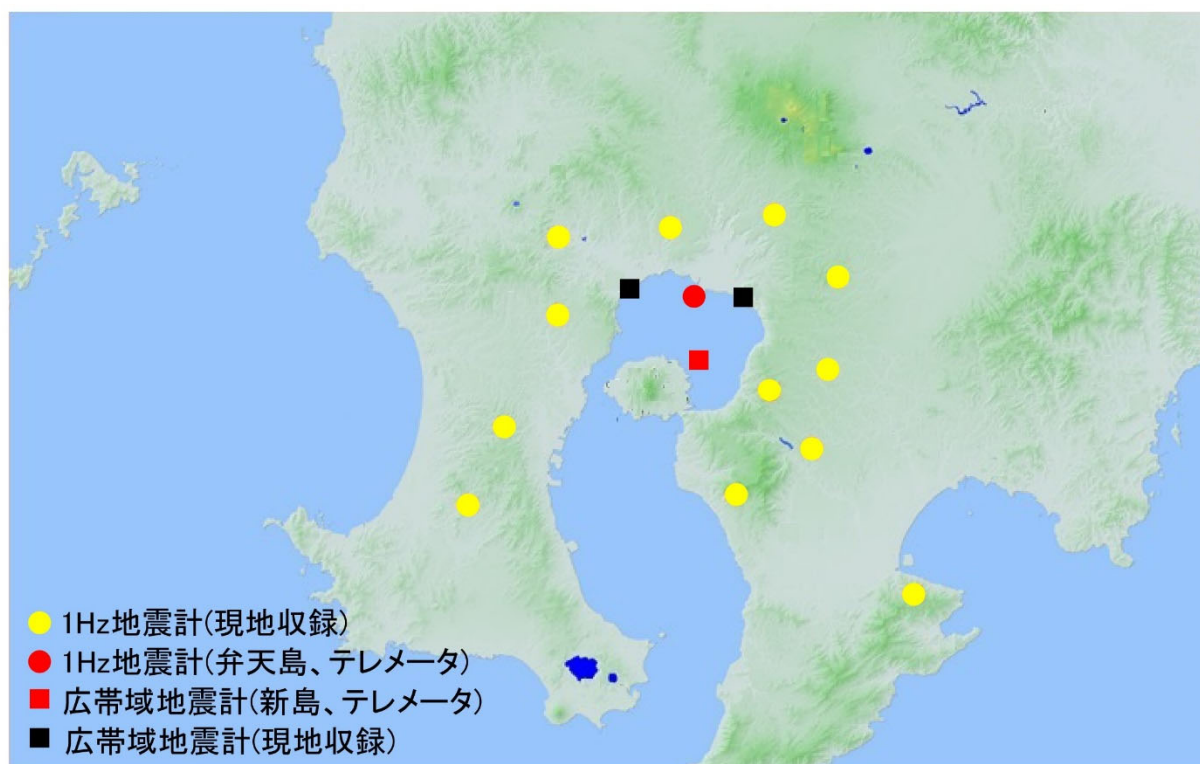


図 1-1-1-1. 臨時地震観測点分布

	実施日（多点のため作業は複数日）	異常報告
第1回	2020年4月16日、17日、21日、22日	なし
第2回	2020年6月16日、24日、7月2日、8月3日	なし
第3回	2020年8月14日、20日、24日、9月17日	なし
第4回	2020年10月13日、19日、21日、23日	なし
第5回	2020年12月11日、18日、28日、29日	なし
第6回	2021年2月11日、12日、16日、19日	なし

表 1-1-1. 臨時地震観測 12 点のデータ回収およびバッテリー交換実施日

b) 始良カルデラ北部における広帯域地震計の設置

レシーバ関数解析では遠地地震を使用するため観測点において地震波はほぼ垂直下方から到達する。始良カルデラ直下のレシーバ関数解析を行う上では始良カルデラ周縁の極力海岸に近い部分に観測点があれば良い。また、比較的低周波数帯をデータ解析に用いるため 1Hz 地震計ではなく広帯域地震計で得られた地震波形を使用することが望ましい。そのため始良カルデラ北部に 2 点の広帯域地震計による観測点を増設した（図 1-1-1-1 の黒□）。始良カルデラに極力近い場所を選定する必要があるため海岸に近い場所での地震観測となった。波浪によるノイズが想定されるがフィルター処理などで必要な周波数帯を絞ることで解析に使用できる。この観測により始良カルデラ直下を通過して到達する遠地地震波、始良カルデラ内で発生する微小地震、やや深部で発生する深部低周波地震などの観測精度が向上すると考えられる。

1 点は始良市東餅田の JA 鹿児島県中央会の研修センター跡地を借用して 2020 年 11 月 21 日から現地収録方式での観測を開始した。設置状況を写真 1-1-1-1 に示す。広帯域地震計は京都大学防災研究所附属火山活動研究センター所有の Nanometrics 社製 Trillium120Q で、データロガーは白山工業株式会社製 LS-8800 を使用した。サンプリング周波数 200Hz、分解能 24bit で現地収録を行なっている。また、同型の機材を使用して霧島市国分の国分キャンプ海水浴場の一角（写真 1-1-1-2）を借用して令和 2 年度中に観測を開始する予定である。

図 1-1-1-2 に始良市東餅田観測点の広帯域地震計で記録された 2020 年 12 月 4 日 00:18 に薩摩半島東岸の吹上浜付近で発生した地震の震動記録を示す。広帯域地震計による記録のため長周期の脈動が見られるが、M1 程度の微小地震でも地震動を確認できる。本プロジェクト期間は観測を継続し始良カルデラ下のレシーバ関数および速度構造解析のための地震データ収集を行う。

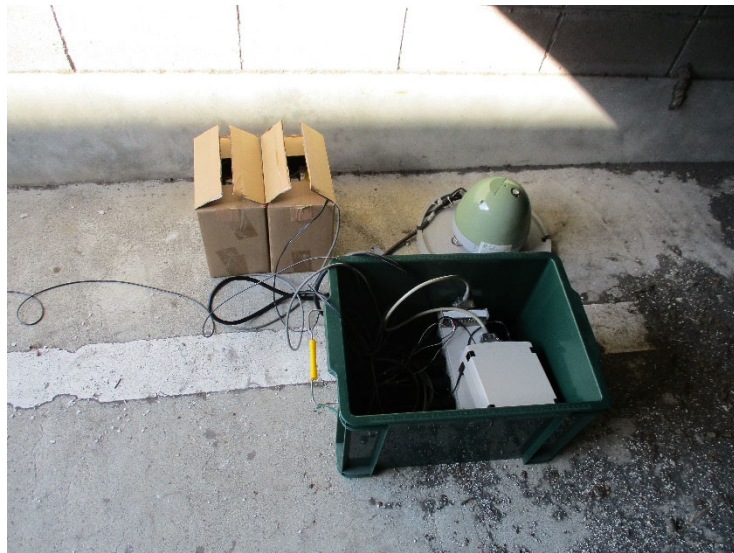


写真 1-1-1-1. JA 鹿児島中央会研修センター跡地に設置した広帯域地震計





写真 1-1-1-2. 霧島市国分キャンプ海水浴場内の設置予定場所

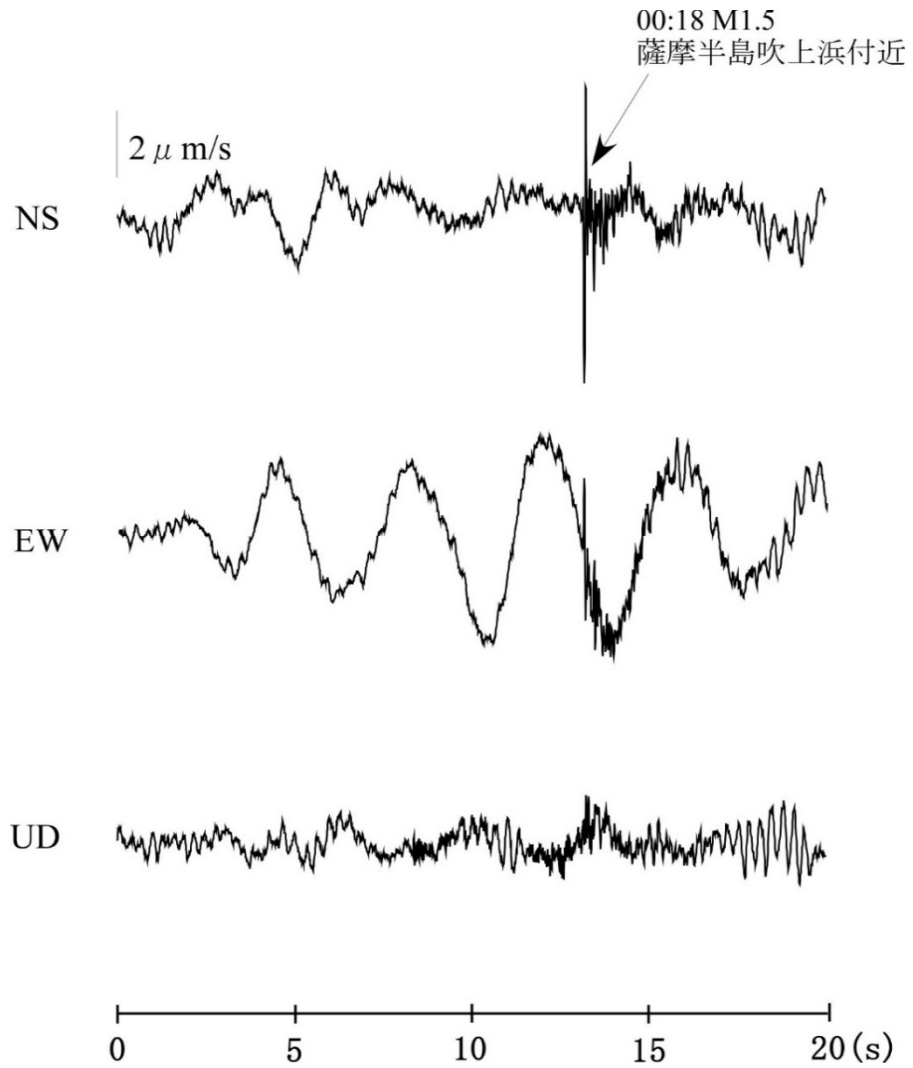


図 1-1-1-2. JA 鹿児島県中央会研修センター跡地で記録された地震記録

(1)-1-2. 3次元地震波速度トモグラフィーによる始良カルデラ地下構造モデルの高精度化

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ー法により、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。

2) データ

本プロジェクトで始良カルデラ周辺に設置している臨時地震観測点（図1-1-2-1の黄色○）および京都大学防災研究所火山活動研究センターが設置している定常地震観測点（図1-1-2-1の赤○）に、南九州一帯に設置されている防災科研のHi-net観測点やJDX-netで流通している大学・気象台の地震観測点（図1-1-2-1の青○）を示す。また、2018年に観測を終了しているが、宮崎県の5点（図1-1-2-1の黒○）も使用し、計50点の観測点で得られたP波、S波到達時を用いて3次元地震波速度構造解析を行う。

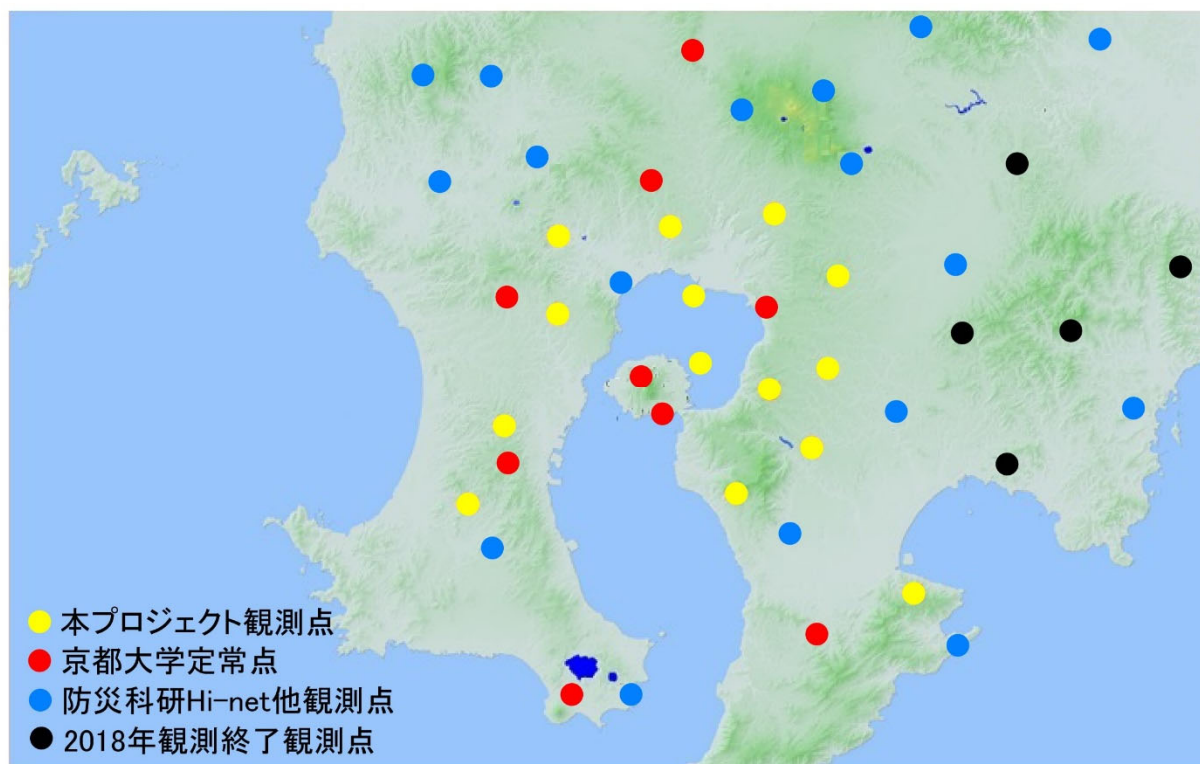


図1-1-2-1. 地震波トモグラフィー解析に使用した地震観測点

地震波トモグラフィーを行う上で、表層のより詳細な速度構造を得られれば、深部の解析結果の信頼性が向上すると考えられるため、解析に使用する到達時には昨年度同様に人工地震探査によるP波初動到達時を加えている。2008年に始良カルデラと桜島内を対象として実施されたダイナマイトを用いた人工地震探査（図1-1-2-2）のデータを地震波トモグラフィー解析に使用す

ることによって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4kmであり浅い領域の構造しか分からない。ダイナマイトを用いた人工地震ではS波は励起されないため、本解析に使用する人工地震データはP波初動の到達時のみである。

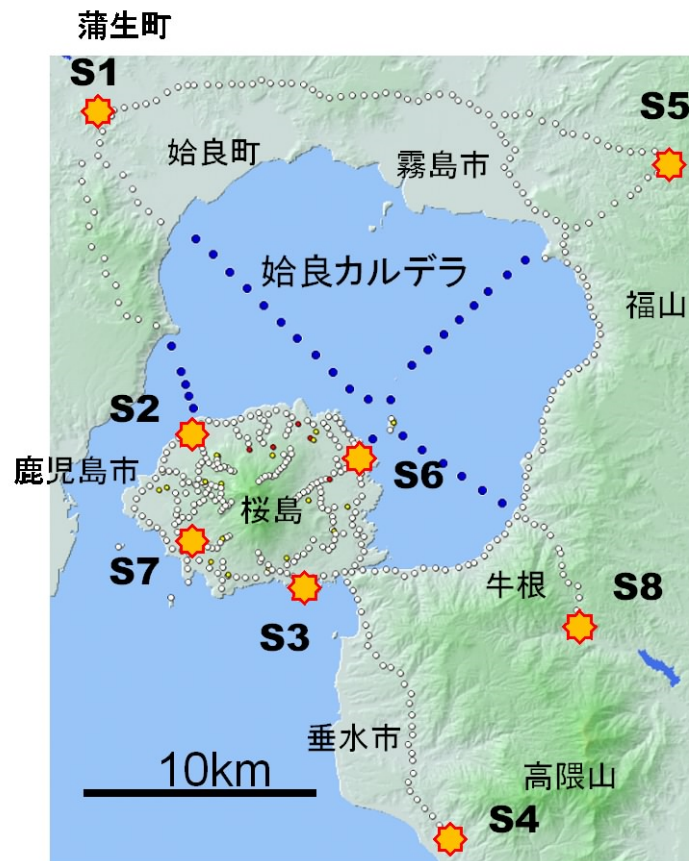


図 1-1-2-2. 2008 年人工地震探査の発破点（黄色）と地震観測点（白○と青○）の分布

本解析では南九州一帯で発生した主にマグニチュード2.0以上の地震について各観測点におけるP波、S波到達時の読み取り値をデータとしている。また、始良カルデラを通過する地震波線を多くするため、始良カルデラ周辺で発生した地震についてはM1.5程度のイベントのP波、S波到達時の読み取り値も解析に使用した。P波、S波とも8観測点以上で読み取り可能なイベントのみを解析に使用し、そのイベント数は383であった。図1-1-2-3に使用した地震の震源分布および震源リストを示す（報告書末尾、表1-1-2-1）。解析に使用した読み取り値は、自然地震P波が18,340、自然地震S波が11,412、人工地震P波が3,121であった。

3) 解析方法

解析は昨年度と同様の方法を使用している。地震波トモグラフィー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。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、RDE

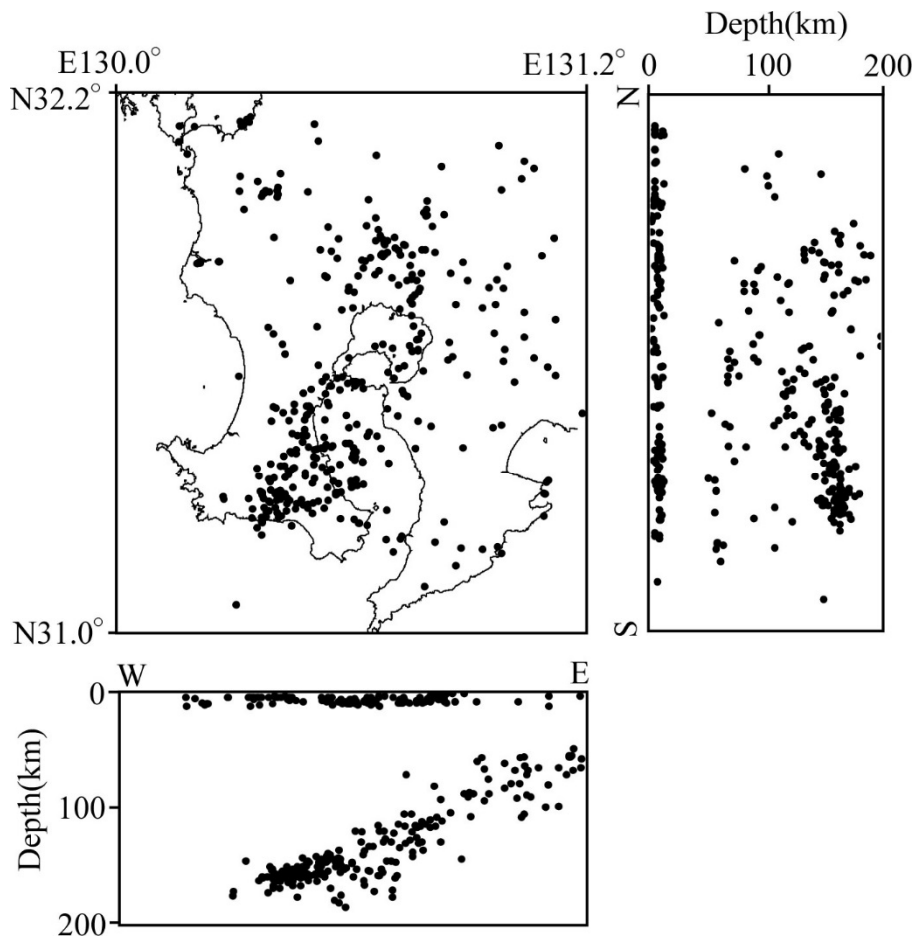


図 1-1-2-3. 解析に使用した 383 イベントの震源分布図

(Resolution matrix の対角要素値) を精度評価の参考とした。データの読み取り値の精度によりランク分けを行い、A (± 0.01 秒)、B (± 0.03 秒)、C (± 0.10 秒) でそれぞれデータに重み掛けを行っている。初期データとなる 1 次元速度構造モデルは Ono et al. (1978) を参考にしている。

グリッド間隔は現在のデータセットで十分な精度が得られる最小のサイズとして水平方向、深さ方向ともに 4km とした。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 0～40km である。

解析範囲の中央部における水平方向のグリッドノード間隔が 4 km であるため、基準グリッドを構築した後、緯度方向 (北方向) に 0～4 km の範囲で 1km 毎、経度方向 (西方向) に 0～4 km の範囲で 1 km 毎、合計 16 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。

4) 解析結果

初期モデルの走時残差 WRMS は 0.363 秒で、得られた解モデルの走時残差 WRMS は 0.221 秒となった。図 1-1-2-4 にチェッカーボードテストにおけるパターンの戻りと RDE の分布を示す。RDE が概ね 0.6 以上の領域は速度の高低のパターンが再現されるとみられ、さらに RDE が概ね 0.8 以上の領域は解の信頼性が高いとみなす。実データから得られた速度分布に対する RDE は、深さ 15 km までは RDE はほぼ 0.6 を超えている。始良カルデラ周辺の浅部で発生した地震を追加しているため、深さ 1km の S 波速度構造の精度も向上している。深さ 20 km では RDE が 0.6 を超える領域が限定されるため、深さ 20km 以上の速度構造結果についての評価は行わない。

深さ 1km、5km、10km、15km における P 波及び S 波の速度分布を図 1-1-2-5 に示す。深さ 1km では始良カルデラ北東部の P 波速度が速く、S 波速度が遅い。この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相当する。若尊カルデラは非常に活発な熱水活動を続けており、浅部では S 波が低速度になっていることが考えられる。深さ 5km では P 波速度に関しては始良カルデラの中央部から若尊火山下において低速度領域が見られるが、S 波速度の低速度異常は見られない。深さ 10km では始良カルデラ中央部と東側に P 波速度がやや遅い領域が見られるが、S 波速度ともに顕著な不均質は見られない。地盤変動観測から見出されている始良カルデラ中央部深さ 10km における地盤変動源（例えば、Iguchi, 2013）に相当する顕著な速度異常は見られない。このことは、仮に地盤変動がマグマ溜りに起因するとしても、そのマグマ溜りの大きさは速度構造解析のグリッドサイズ（4km×4km×4km）以下である可能性が高い。

深さ 15km においては始良カルデラ中央部において S 波速度が顕著に遅い領域があり、速度は 2km/s 以下となっている。S 波低速度異常の領域はグリッドサイズ 4km 以上の大きさを持っている。同領域において P 波速度は特に低速ではなく、S 波速度が低速であることから固体ではなく流体に近いものが存在している可能性が考えられる。

図 1-1-2-6 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 15km 付近に見られる S 波速度が顕著に低速度な領域（図 1-1-2-5 の黒枠内）は東西で約 10km と南北に約 5km の広がりを持っている。この低速度領域は地盤変動解析から得られている深さ 10km の圧力源の直下に位置し、深さ 15km からやや浅部に向かって伸びているように見える。

昨年度に表層付近の解像度を上げるために人工地震データの追加を行なった。今年度は深さ 20km 以浅の自然地震データについて M1.5 程度の微小地震を増加させたことにより深さ 20km 以浅の解析結果の信頼性が向上したと考えている。しかしながら、依然、20km 以深の解像度は悪い。深発地震のデータを追加することは可能であるが、全体の震源位置の分布を考慮すると深発地震が多くなりすぎる。そのため、現在は解析領域を始良カルデラ周辺にしているが、解析領域を南九州全体に広げて広範の自然地震を使用することで始良カルデラ直下を通る波線を増やす。ただし、カルデラ周辺のグリッドサイズは 4km より大きくすることで解の信頼性が下がらないように注意する予定である。これにより深さ 15km 付近にある S 波速度が非常に低速である領域について、特に深さ方向（20km 以深）の解を求めることでより詳細な大きさを求める。地盤変動解析から得られている深さ 10km の圧力源については、本解析から顕著な速度異常は見られなかった。この領域を通過する地震波の振幅減衰を用いて（例えば、Ono et al., 1978）、地盤変動源のサイズや形状について地震学的手法から明らかにする予定である。

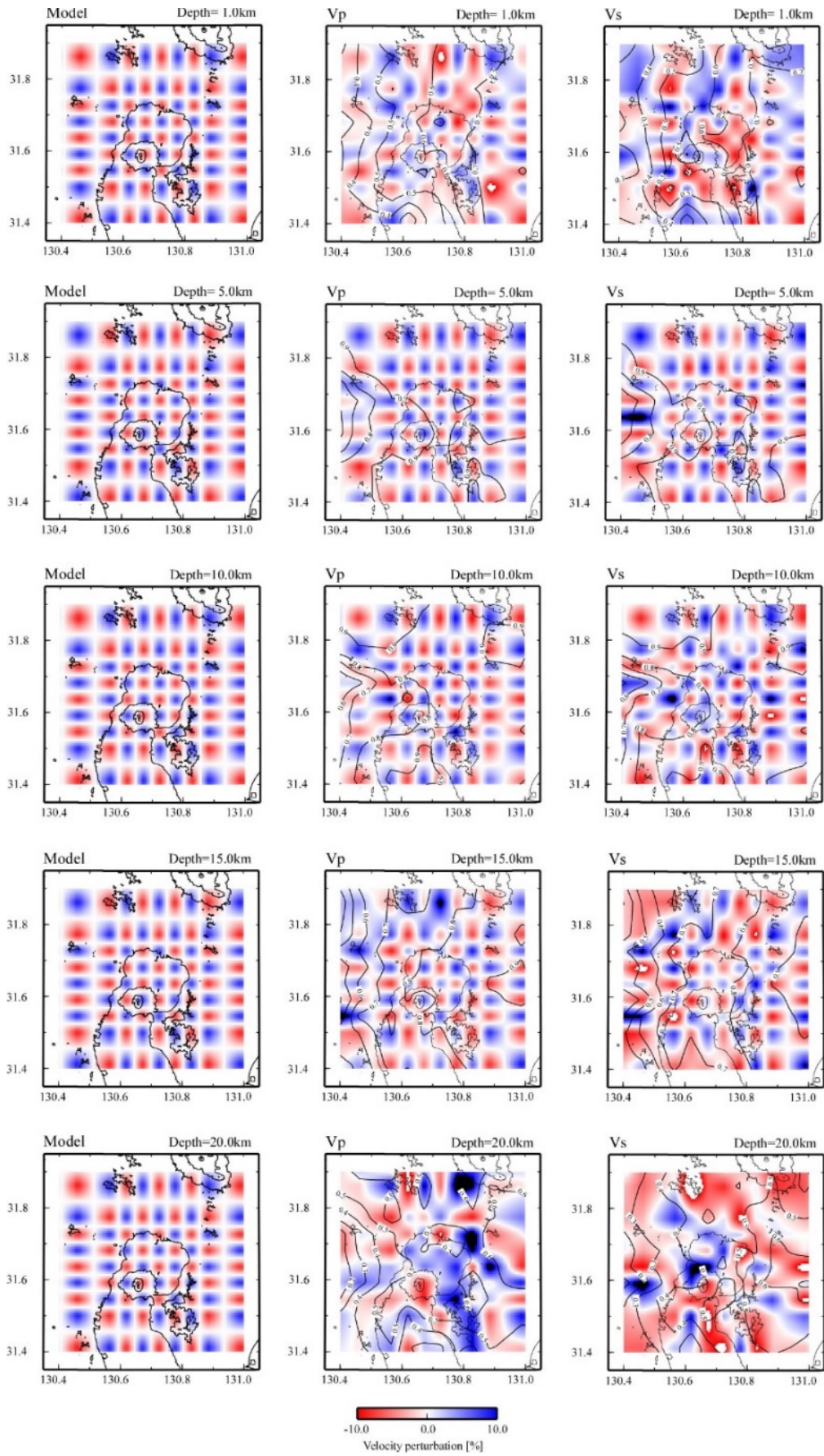


図 1-1-2-4. 深さ 1km、5km、10km、15km、20km におけるチェッカーボードテスト結果

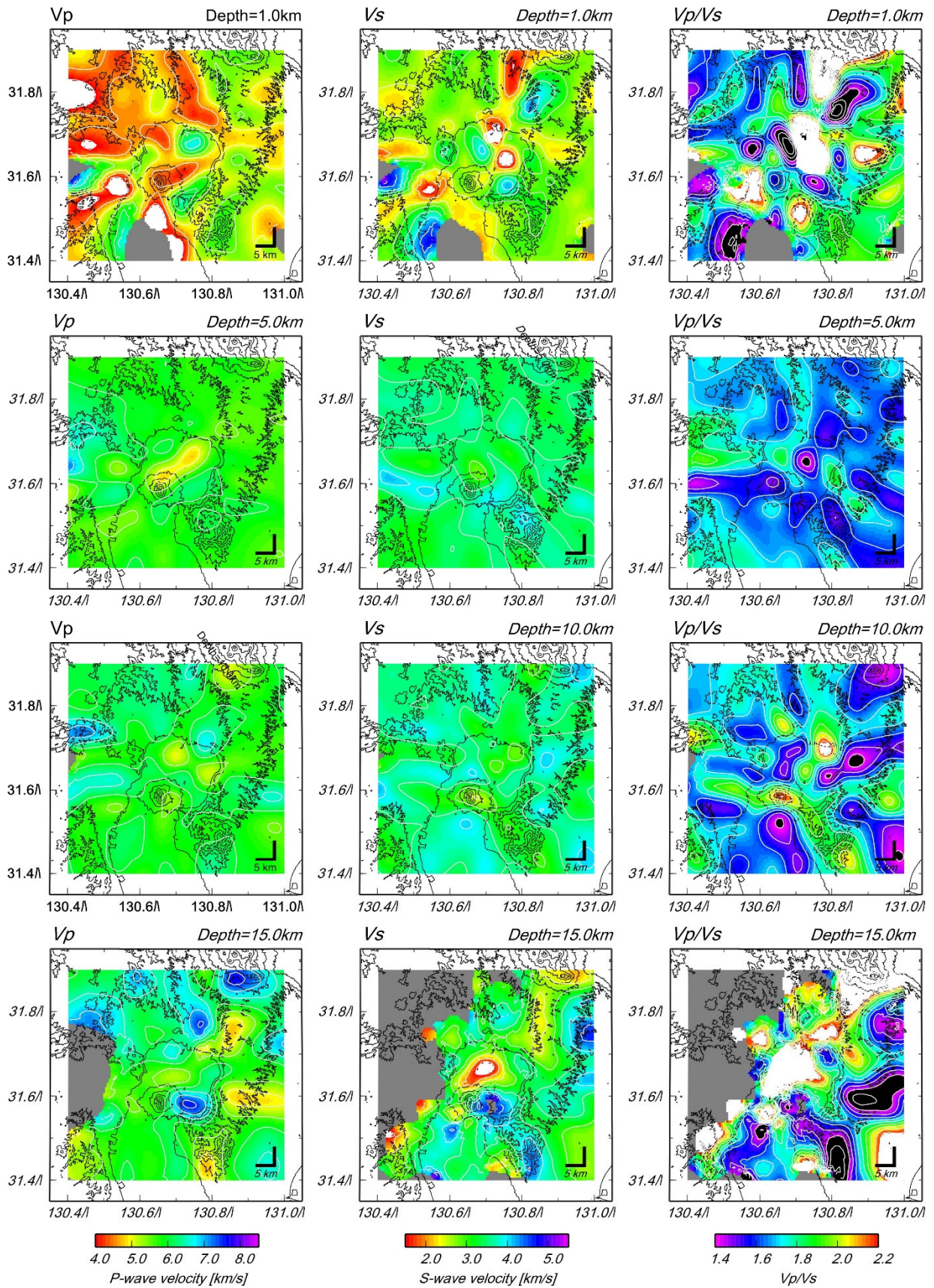


図 1-1-2-5. 深さ 1km、5km、10km、15km における P 波、S 波速度およびその比

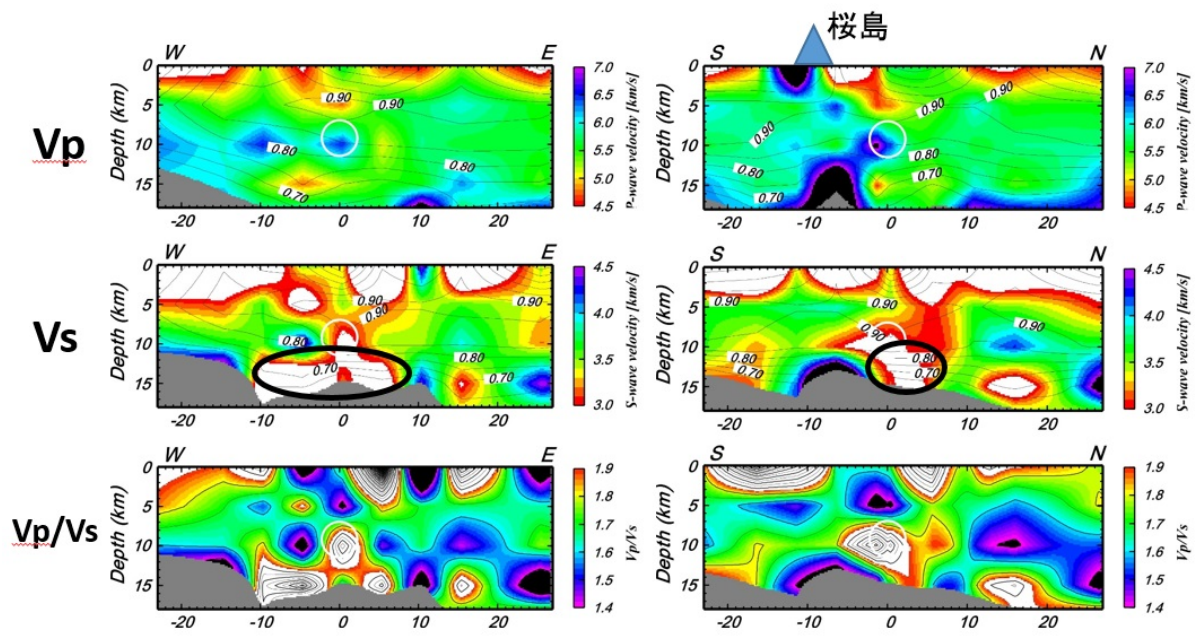


図 1-1-2-6. 始良カルデラ中心付近を通る東西（左）、南北（右）断面の P 波、S 波およびその比

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

2010/01/04 16:33:49	31.6552	130.7881	3	2.0
2010/01/04 22:24:48	31.3124	130.5867	8	2.1
2010/01/08 14:10:00	31.5729	130.3200	4	2.5
2010/01/15 17:53:18	32.1484	130.3510	4	2.7
2010/02/05 23:35:08	31.3661	130.5598	8	2.4
2010/02/06 01:20:47	31.3099	130.4336	157	3.8
2010/03/26 00:56:24	31.2329	130.3668	164	4.4
2010/04/02 02:34:15	32.0048	130.3695	4	2.5
2010/04/06 20:35:40	31.8187	130.7656	6	1.7
2010/04/17 17:11:59	31.9719	130.3795	10	2.0
2010/04/27 18:09:29	31.7874	130.9899	81	2.9
2010/05/01 14:31:27	31.2687	130.3910	162	4.9
2010/05/12 06:28:49	31.7408	130.7658	6	1.8
2010/06/06 03:34:50	31.9429	130.3330	6	2.0
2010/06/10 16:27:54	31.3379	130.5661	10	3.0
2010/06/19 07:10:27	31.4587	130.9796	69	3.3
2010/07/11 12:00:57	31.2454	130.3808	174	4.6
2010/07/13 02:37:19	31.7078	130.7689	3	1.4
2010/07/13 22:14:48	31.7536	130.7780	3	2.0
2010/07/15 21:16:40	31.5618	130.6165	7	1.9
2010/07/19 21:03:13	31.5598	130.6400	118	2.4
2010/08/25 00:06:27	31.7985	130.7702	6	1.7
2010/08/29 04:55:57	31.6693	130.7949	95	2.3
2010/09/11 03:11:22	31.4649	130.6268	137	2.5
2010/09/14 15:42:07	31.7888	130.7696	120	4.2
2010/09/24 05:59:24	31.1763	131.0019	57	3.0
2010/09/30 02:55:22	31.2956	130.4823	162	3.7
2010/10/01 20:33:49	31.7609	130.7880	6	1.8
2010/10/29 05:42:32	31.3106	131.1132	57	3.4
2010/10/31 18:09:58	31.9843	130.3223	4	2.6
2010/11/02 14:56:23	31.7852	130.7567	8	1.7
2010/11/06 20:02:32	31.7321	130.9873	8	2.2
2010/11/13 16:44:24	31.9825	130.3992	4	3.7
2010/11/13 22:06:20	31.6844	130.7734	1	1.5
2010/11/21 15:25:05	31.2946	130.4180	169	4.0

2010/12/02 07:18:43	31.3092	131.1156	57	3.0
2010/12/04 03:48:27	31.5960	130.7506	9	1.5
2010/12/11 12:48:13	31.1790	130.7221	108	4.2
2010/12/27 13:47:10	32.1421	130.3403	4	3.0
2011/01/05 16:27:37	31.2758	130.3555	165	4.4
2011/01/14 18:54:41	32.1394	130.3438	4	2.8
2011/02/05 03:01:16	31.4880	130.4974	161	3.5
2011/03/13 11:35:48	31.3310	130.6429	12	2.4
2011/03/26 03:03:00	31.7687	130.7909	6	2.7
2011/04/09 07:40:42	31.9617	130.8093	9	2.6
2011/04/10 21:55:54	32.1296	130.3321	4	2.5
2011/04/15 11:39:13	31.3685	130.4644	161	4.2
2011/04/16 01:55:12	31.4370	130.5418	8	1.8
2011/08/01 19:10:00	31.4100	130.5226	8	2.5
2011/08/03 02:06:32	31.4733	130.7853	111	4.0
2011/08/17 04:36:30	31.7918	130.7176	9	2.0
2011/09/22 16:25:34	31.3234	130.5511	10	2.6
2011/10/26 06:58:02	31.9851	130.3898	4	4.6
2011/11/08 13:11:20	31.2083	130.7397	8	2.8
2011/11/18 03:47:01	31.2137	130.7439	4	2.7
2011/11/24 08:16:19	31.6692	130.9842	94	4.5
2012/03/10 19:08:29	31.6142	131.0866	67	4.4
2012/03/28 08:29:09	31.6543	130.7816	3	1.9
2012/04/21 10:33:02	31.6325	131.0113	69	2.3
2012/04/28 20:38:08	31.9307	130.8100	1	2.5
2012/05/12 09:38:36	32.0220	130.4281	4	2.2
2012/05/22 11:12:30	31.7252	130.9527	85	2.7
2012/06/26 17:27:09	32.0945	130.5258	4	3.3
2012/08/16 19:38:39	31.6298	130.7851	3	3.0
2012/08/25 04:44:34	31.3315	130.5790	6	2.9
2012/08/28 02:17:53	31.6168	130.8757	90	2.9
2012/09/20 15:06:00	31.2971	130.4280	168	3.9
2012/09/29 17:12:52	32.1271	130.2041	9	3.0
2012/10/18 16:50:31	31.8415	130.7713	7	2.9
2012/11/30 13:21:17	32.1385	130.3228	4	2.9
2012/12/01 22:56:19	32.1278	130.3268	4	2.3
2012/12/04 07:31:07	31.5596	131.0367	67	2.9
2013/01/11 16:12:01	31.9645	130.6566	3	2.6

2013/04/20 06:35:16	31.2766	130.5424	149	3.9
2013/04/20 15:22:29	31.9791	130.3861	4	2.9
2013/04/24 14:42:07	31.9826	130.4996	4	2.5
2013/05/29 11:02:57	31.9821	130.3909	4	3.4
2013/08/31 04:06:44	31.5935	131.1229	69	3.1
2013/09/09 07:42:23	31.7859	130.4540	8	2.7
2013/09/17 05:09:40	31.1852	130.9534	63	3.6
2013/10/15 17:46:42	31.2380	130.4566	159	4.6
2013/10/26 01:55:03	31.2176	130.3796	164	3.6
2013/11/02 00:18:34	31.2582	130.3910	167	4.3
2013/11/30 19:04.19	31.3574	130.4927	158	4.2
2013/12/05 18:58:25	32.1274	130.1654	12	2.8
2014/01/11 22:01:00	32.0635	130.6771	4	2.3
2014/02/16 17:13:58	31.7322	130.8833	8	2.6
2014/03/01 17:07:03	32.1373	130.3468	11	2.6
2014/03/22 16:24:51	31.2714	130.4444	163	4.0
2014/03/22 23:38:50	31.2655	130.5121	8	3.0
2014/04/21 13:08:55	31.5047	130.4101	3	2.1
2014/05/16 03:59:42	31.5747	131.1422	67	2.9
2014/05/23 10:06:02	31.3755	130.5817	5	2.3
2014/07/12 20:20:03	31.2926	130.3971	165	4.3
2014/08/01 07:38:43	31.8279	130.2691	4	2.1
2014/09/10 05:27:14	31.9286	130.8065	1	2.6
2014/09/11 22:42:10	31.2067	130.7031	4	3.3
2014/10/15 15:39:33	31.3386	131.1236	50	2.8
2014/11/02 00:03:59	31.3616	130.4482	172	3.8
2014/11/15 05:56:41	31.3698	130.5362	155	3.7
2014/12/20 04:01:29	31.2997	130.4447	163	4.0
2014/12/26 04:27:25	31.3345	131.1200	56	3.2
2014/12/28 22:03:21	31.8530	130.7346	7	2.2
2015/02/04 07:29:14	31.2771	130.4994	154	4.4
2015/02/09 00:22:03	31.5431	130.5832	123	2.2
2015/02/14 05:55:42	31.9037	130.5519	8	2.8
2015/02/26 00:30:43	32.0940	130.1650	4	3.2
2015/03/09 18:41:35	31.2946	130.5515	8	2.0
2015/03/23 08:58:18	31.3756	130.5146	150	4.0
2015/03/29 12:23:22	31.4139	130.6173	137	4.4
2015/03/30 04:43:20	31.9922	130.4224	4	2.4

2015/03/31 05:45:24	31.5537	130.6232	7	2.0
2015/03/31 07:27:45	31.5508	130.6217	7	2.9
2015/04/04 23:41:35	31.8734	130.6756	182	2.6
2015/04/23 05:51:14	31.4643	131.0028	65	3.9
2015/05/24 09:09:38	31.2460	130.3785	157	4.3
2015/07/26 16:30:48	31.8780	130.5789	164	2.8
2015/07/27 01:51:20	31.9702	130.4195	4	3.0
2015/08/06 04:33:13	31.5852	130.7987	114	3.0
2015/08/19 04:32:32	31.3934	130.5148	149	3.7
2015/09/15 23:11:10	31.8577	130.7262	146	3.1
2015/09/22 04:51:43	31.2760	130.4666	150	4.0
2015/09/30 16:39:14	31.7602	130.6197	159	2.6
2015/10/01 14:05:34	31.4754	130.4903	155	2.5
2015/10/03 04:09:57	32.0666	130.1868	5	3.9
2015/11/02 08:08:37	31.9052	130.8236	1	2.5
2015/11/04 22:45:17	31.4416	130.4720	163	2.6
2015/12/17 18:11:18	31.6596	131.0622	3	2.8
2016/01/01 11:14:34	31.1916	130.9918	58	3.0
2016/01/03 09:07:20	31.7862	130.9144	90	2.6
2016/01/19 15:45:59	31.4756	130.5438	140	2.7
2016/02/12 04:41:10	31.8283	130.2676	4	2.3
2016/02/17 16:50:30	31.5100	130.4633	154	2.5
2016/02/27 12:11:02	32.1330	130.5165	4	2.7
2016/03/05 10:46:10	31.8072	130.6839	151	2.6
2016/03/20 09:11:52	31.2537	130.5840	10	2.6
2016/04/14 03:36:14	31.3062	130.3816	172	3.6
2016/05/05 02:45:24	31.4865	130.4968	159	2.6
2016/05/25 02:22:43	31.7953	130.6302	177	2.8
2016/06/04 05:14:03	31.8401	131.1066	73	2.8
2016/07/03 01:33:29	31.9763	130.4212	7	2.4
2016/07/04 00:17:53	31.4962	130.5060	161	3.4
2016/07/05 07:49:34	31.3170	130.4022	165	2.7
2016/07/13 17:07:45	31.5505	130.5608	156	3.1
2016/07/13 20:36:04	31.2784	130.3862	167	3.4
2016/07/16 19:01:30	31.5436	130.5075	150	2.9
2016/07/19 21:17:19	31.4414	130.4842	162	3.5
2016/08/05 21:31:14	31.5575	130.6025	144	3.1
2016/08/08 05:10:11	31.6323	130.7860	3	2.1

2016/08/17 06:39:02	31.9788	130.3832	3	2.8
2016/09/01 01:30:16	31.8290	130.6488	157	2.8
2016/10/04 08:23:40	31.7926	130.5479	180	3.4
2016/10/16 05:54:02	31.7209	130.5877	157	2.5
2016/11/08 18:20:39	31.2516	130.6199	9	2.3
2016/11/11 15:11:20	31.8510	130.5604	191	3.0
2016/11/18 12:07:34	31.2008	130.8302	8	2.7
2016/11/26 07:44:05	31.6434	130.6941	138	4.2
2016/12/01 13:28:39	31.7624	130.6053	167	3.4
2016/12/12 22:50:00	31.3791	130.7093	73	2.7
2016/12/17 12:20:13	32.0109	131.0552	102	4.3
2016/12/21 19:02:32	31.7223	130.7376	120	3.9
2016/12/25 01:49:22	31.4896	131.2130	53	3.4
2017/01/02 12:13:58	31.8126	130.6440	163	2.8
2017/01/03 22:49:35	31.8811	130.4111	206	2.7
2017/01/07 02:31:09	31.3962	130.6175	8	2.7
2017/01/10 00:28:03	31.3155	130.4284	172	2.5
2017/01/12 13:39:16	31.1485	130.8846	61	3.2
2017/01/22 11:06:41	31.8535	130.5320	185	3.5
2017/01/31 16:28:53	31.3920	130.6214	8	2.5
2017/02/10 19:02:48	31.3909	130.6145	6	2.5
2017/02/11 10:02:07	32.0342	131.0868	101	4.4
2017/02/23 06:47:51	31.9856	130.4201	4	3.1
2017/03/07 01:05:23	31.6815	130.3961	174	2.5
2017/03/07 05:36:04	31.7858	130.7824	119	3.3
2017/03/11 21:10:25	31.3861	130.6221	11	4.1
2017/03/12 05:03:48	31.7690	131.0077	91	3.4
2017/03/19 21:56:58	31.2597	131.1122	56	3.0
2017/03/22 19:44:08	31.5910	130.7350	129	3.8
2017/05/02 20:37:53	31.5509	130.5567	157	3.1
2017/05/19 15:55:48	31.8020	130.7940	6	3.1
2017/06/12 15:53:19	31.6088	130.8631	93	4.1
2017/07/02 06:49:31	31.5753	130.9130	77	3.5
2017/07/04 15:55:45	31.5816	130.7082	134	3.2
2017/07/12 05:13:10	31.4050	130.6242	10	2.0
2017/07/18 05:05:21	31.6059	131.0078	73	3.9
2017/08/08 17:46:32	31.4859	130.6002	124	3.4
2018/01/03 11:39:19	31.3334	130.5116	151	2.7

2018/01/09 06:58:26	31.3813	130.6417	4	2.5
2018/01/13 11:05:15	31.3812	130.6416	4	2.7
2018/01/15 05:05:45	31.3814	130.6416	3	2.5
2018/01/17 17:03:00	31.2846	130.4872	162	3.0
2018/01/19 12:03:00	31.2561	130.3799	172	3.1
2018/01/26 07:12:04	31.3166	130.4269	164	3.1
2018/01/27 01:56:16	31.3774	130.4035	159	2.6
2018/01/29 04:49:58	31.4615	130.8198	107	3.6
2018/01/29 12:11:53	31.4004	130.6179	8	2.7
2018/02/03 06:51:40	31.4264	130.4859	161	3.0
2018/02/05 11:52:24	32.0165	130.3234	12	3.3
2018/02/14 15:04:29	31.2778	130.4141	162	3.4
2018/02/15 14:53:52	31.3232	130.4602	164	4.1
2018/02/28 04:39:11	31.3270	130.6214	10	2.4
2018/02/28 07:50:18	31.2854	130.4996	148	2.9
2018/03/15 20:59:44	32.0845	130.9954	111	2.9
2018/03/24 01:36:48	31.4083	130.5160	159	3.1
2018/03/25 03:38:53	31.3284	130.6233	6	2.2
2018/03/26 20:14:00	31.3125	130.4194	164	2.5
2018/04/02 23:54:10	31.3672	130.3669	178	3.1
2018/04/05 04:14:42	31.3962	130.6206	7	2.3
2018/04/07 02:00:10	31.4146	130.5020	162	3.1
2018/04/08 13:54:27	31.3261	130.6145	8	2.7
2018/04/11 10:00:30	31.2867	130.4453	159	2.6
2018/04/24 20:33:59	32.0382	130.8474	148	2.9
2018/04/26 01:02:31	31.7145	131.0621	12	2.3
2018/05/03 08:10:49	31.8542	130.7951	133	3.3
2018/05/06 02:21:17	31.8860	130.6872	163	2.7
2018/05/24 18:59:32	31.6438	130.4335	200	3.0
2018/05/24 20:41:46	31.9862	131.0019	108	2.8
2018/05/25 17:43:11	32.0502	131.0612	82	2.9
2018/06/03 14:12:18	31.3937	130.6234	9	2.4
2018/06/22 20:45:38	31.2923	130.5267	148	3.0
2018/06/27 20:47:47	31.9242	130.6758	176	4.2
2018/06/30 17:11:08	31.3283	130.6275	9	2.4
2018/07/09 21:17:20	31.8794	131.1402	3	2.2
2018/07/16 04:43:31	31.4051	130.6223	4	2.2
2018/07/26 13:22:01	31.3996	130.4691	163	3.0

2018/07/31 23:42:58	31.2948	130.4525	162	2.8
2018/08/26 21:58:19	31.4838	130.7324	118	2.8
2018/09/03 04:13:02	31.3080	130.4283	168	2.9
2018/09/05 04:53:04	31.4481	130.6586	130	3.5
2018/09/07 23:25:01	31.9316	130.8535	1	2.4
2018/09/18 05:07:12	31.9359	130.8003	1	2.4
2018/09/22 10:40:54	31.2564	130.3824	165	3.5
2018/09/23 15:46:19	31.3724	130.4284	157	2.8
2018/09/25 23:37:51	31.4454	130.4584	160	2.7
2018/10/02 09:04:46	31.9384	130.8064	2	2.5
2018/10/12 14:49:31	31.3116	130.3806	166	2.6
2018/10/25 14:36:39	31.2715	130.3980	168	3.6
2018/10/26 17:45:34	31.2391	130.6541	123	4.6
2018/10/30 18:10:45	31.8173	131.0169	93	2.9
2018/11/19 04:42:43	31.4233	130.5983	133	1.5
2018/11/20 23:09:01	31.5000	130.7066	119	2.3
2018/11/23 21:30:50	31.5066	130.5016	7	1.5
2018/12/07 06:59:07	31.5416	130.7450	119	1.5
2018/12/08 08:44:18	31.5066	130.5033	7	2.0
2018/12/15 06:24:39	31.7966	130.5433	187	1.7
2018/12/27 03:25:38	31.4950	130.4633	152	1.5
2018/12/27 20:23:24	31.6350	130.7200	131	1.7
2018/12/30 09:03:14	31.6283	130.7700	6	2.3
2018/12/30 14:33:37	31.6300	130.7700	5	1.6
2019/01/01 12:22:15	31.5983	130.5266	11	1.9
2019/01/11 03:49:25	31.7333	130.7700	8	1.7
2019/01/17 04:06:11	31.4133	130.5350	151	1.6
2019/01/17 20:00:52	31.6133	130.6066	141	1.8
2019/01/27 15:54:17	31.7250	130.6166	158	1.8
2019/02/14 02:40:19	31.4050	130.4533	147	1.6
2019/02/25 18:12:38	31.8483	130.8300	8	1.8
2019/02/26 21:21:39	31.8016	130.8700	110	1.8
2019/03/01 14:19:24	31.8816	130.7250	142	1.9
2019/03/05 07:52:54	31.4266	130.4866	146	1.6
2019/03/10 03:06:25	31.6400	130.6733	133	1.9
2019/03/10 15:43:06	31.8416	130.6900	9	2.8
2019/03/13 00:53:02	31.7983	130.6733	150	1.6
2019/03/18 03:29:23	31.5066	130.4966	151	1.7

2019/03/20	20:10:15	31.7483	130.7700	113	1.7
2019/03/22	07:43:05	31.8416	130.6933	9	2.2
2019/03/23	08:18:33	31.5333	130.7483	115	1.9
2019/03/24	04:55:55	31.4733	130.4050	165	1.9
2019/04/02	13:17:58	31.8400	130.6950	9	1.7
2019/04/06	02:01:14	31.5083	130.5533	9	2.1
2019/04/23	09:46:53	31.8633	130.7516	140	1.8
2019/05/07	15:07:47	31.8433	130.7000	9	1.9
2019/05/08	13:08:50	31.5616	130.5366	148	1.6
2019/05/20	23:13:47	31.6216	130.4400	182	1.9
2019/05/24	12:47:27	31.4416	130.4966	155	2.7
2019/06/14	09:52:28	31.8650	130.7000	8	2.4
2019/06/15	16:26:56	31.4983	130.5083	164	2.0
2019/06/20	19:22:33	31.6666	130.4100	200	2.6
2019/06/25	22:25:27	31.8683	130.6983	8	2.0
2019/07/14	16:53:18	31.5283	130.7583	117	1.5
2019/07/30	03:44:49	31.4400	130.6783	125	1.9
2019/08/04	05:13:19	31.5683	130.5750	152	1.5
2019/08/06	00:43:16	31.8300	130.6400	163	2.1
2019/08/10	16:56:29	31.7700	130.9700	81	1.5
2019/08/14	11:18:20	31.8266	130.9033	96	2.1
2019/08/17	20:21:00	31.8533	130.8050	8	2.0
2019/08/19	12:35:50	31.6833	130.5233	174	2.3
2019/09/05	23:09:21	31.8350	130.5750	151	2.1
2019/09/07	17:49:08	31.8416	130.7400	134	1.5
2019/09/15	00:26:37	31.8650	130.7483	133	2.1
2019/09/24	11:26:34	31.8366	130.6616	150	2.0
2019/09/26	20:38:58	31.4533	130.4916	160	1.5
2019/10/16	21:13:31	31.4233	130.6083	8	2.2
2019/10/18	03:58:31	31.4233	130.6066	7	1.5
2019/10/26	05:27:52	31.5683	130.7233	124	2.7
2019/11/05	18:53:49	31.5450	130.6433	123	2.0
2019/11/18	15:19:28	31.5333	130.5450	151	1.7
2019/11/19	22:10:24	31.4016	130.4566	164	2.3
2019/11/26	06:11:43	31.5716	130.5466	160	1.8
2019/12/02	16:00:24	31.4400	130.6533	133	1.7
2019/12/08	15:58:07	31.4916	130.4350	164	2.0
2019/12/12	02:31:22	31.7716	130.6066	171	1.8

2019/12/19 17:41:26	31.5016	130.4166	6	1.6
2019/12/22 15:19:26	31.8450	130.6933	7	1.5
2019/12/22 12:07:48	31.4133	130.9033	68	2.1
2019/12/23 02:12:03	31.8450	130.7000	9	2.1
2020/01/02 03:13:31	31.4117	130.6900	117	2.4
2020/01/07 17:25:55	31.4117	130.5417	147	2.6
2020/01/16 09:10:32	31.7750	130.7350	9	1.9
2020/01/16 18:50:15	31.3500	130.3733	155	2.1
2020/01/17 18:44:56	31.2983	130.3850	161	2.6
2020/01/19 14:33:11	31.4083	130.4683	167	2.1
2020/01/23 04:50:42	31.5350	130.4883	168	2.2
2020/01/25 07:07:53	31.4583	130.6067	8	1.5
2020/01/26 02:19:34	31.2467	130.8533	90	1.5
2020/01/28 02:58:13	31.8767	130.6950	6	1.5
2020/01/29 06:12:25	31.6417	130.7633	5	2.1
2020/02/10 14:03:46	31.9433	130.8083	1	2.3
2020/02/14 02:00:58	31.8733	130.7067	8	1.6
2020/02/14 02:51:22	31.5717	130.5900	11	1.5
2020/02/17 08:55:00	31.8233	130.2117	11	2.0
2020/02/22 00:22:22	31.3117	130.5750	9	3.3
2020/02/22 16:14:26	31.3100	130.5733	7	1.6
2020/02/22 17:44:01	31.3067	130.5717	10	1.6
2020/02/24 15:00:12	31.3100	130.5767	7	2.2
2020/03/04 04:48:47	31.6983	131.1433	59	1.7
2020/03/04 17:30:37	31.9067	130.6517	160	2.8
2020/03/05 02:08:37	31.3450	130.4117	163	2.7
2020/03/07 03:55:08	31.3117	130.5717	8	1.8
2020/03/08 06:44:54	31.3100	130.5750	7	2.1
2020/03/08 09:49:30	31.3083	130.5733	8	2.1
2020/03/09 12:08:08	31.3417	130.3983	164	2.1
2020/03/10 04:14:07	31.3067	130.5717	10	1.5
2020/03/12 03:27:15	31.4200	130.5467	148	2.2
2020/03/12 19:36:33	31.3117	130.5717	6	1.5
2020/03/19 22:40:42	31.3383	130.6200	6	1.5
2020/03/22 12:25:28	31.5600	130.6250	7	2.0
2020/03/22 13:42:05	31.3033	130.2800	181	2.7
2020/03/24 22:37:18	31.2550	130.3533	164	2.1
2020/03/25 02:50:21	31.3500	130.4933	151	3.1

2020/03/26	03:03:38	31.5617	130.6233	6	1.6
2020/03/27	20:14:57	31.2967	130.2817	177	2.3
2020/03/28	07:35:32	31.8250	130.2150	10	2.0
2020/04/06	21:40:41	31.3583	130.5483	6	1.6
2020/04/14	12:52:19	31.3083	130.4400	155	2.3
2020/04/14	20:04:32	31.0617	130.3133	150	2.2
2020/04/18	10:13:37	31.3383	130.6117	7	1.5
2020/04/30	10:59:30	31.2600	130.4300	160	3.0
2020/05/05	16:15:32	31.2900	130.4017	160	2.1
2020/05/05	17:50:00	31.3083	130.4150	155	2.1
2020/05/16	18:17:52	31.3400	130.6250	7	1.6
2020/05/27	14:00:43	31.3433	130.5167	143	2.3
2020/06/05	14:09:25	31.2567	130.4233	159	2.1
2020/06/12	12:43:17	31.4117	130.7783	83	1.6
2020/06/16	13:39:55	31.3733	130.4383	158	2.6
2020/06/16	13:48:34	31.3667	130.4600	161	2.2
2020/06/27	09:03:43	31.3467	130.4400	159	2.5
2020/06/27	19:32:06	31.2433	130.6317	9	1.8
2020/06/28	00:36:04	31.2433	130.6333	8	1.5
2020/07/04	06:50:36	31.4183	130.5633	10	1.5
2020/07/10	21:42:50	31.3900	130.5217	144	2.1
2020/07/23	01:45:42	31.3317	130.6150	7	1.7
2020/07/24	05:07:10	31.3617	130.4533	155	2.1
2020/07/24	09:49:33	31.2883	130.5133	145	2.4
2020/07/28	00:11:08	31.3950	130.4367	7	1.9
2020/08/07	02:49:14	31.4750	130.4500	162	2.3
2020/08/07	18:24:34	31.5600	130.6283	7	1.8
2020/08/13	05:44:11	31.6483	130.8667	89	1.6
2020/08/13	18:40:04	31.3517	130.4483	165	2.6
2020/08/15	05:31:32	31.2667	130.4200	159	2.1
2020/08/17	11:29:56	31.3233	130.6133	5	1.6
2020/08/19	13:37:42	31.2867	130.4700	151	2.6
2020/08/22	04:57:23	31.4150	130.5600	9	1.5
2020/08/22	18:28:58	31.2983	130.3450	167	3.3
2020/09/06	12:57:53	31.1883	130.8967	58	2.0
2020/09/11	15:06:18	31.8250	130.2200	10	1.5
2020/09/11	17:27:25	31.8250	130.2183	10	1.8
2020/09/15	15:15:23	31.3367	130.4017	165	2.4

2020/09/23	20:06:22	31.8483	130.7067	7	2.0
2020/09/28	19:19:35	31.3317	130.6150	9	1.8
2020/09/29	05:04:02	31.5150	130.5500	154	2.5
2020/09/30	05:59:13	31.3333	130.6183	9	1.8
2020/10/01	11:22:08	31.3333	130.6200	8	2.3
2020/10/02	05:46:04	31.2717	130.7050	108	1.8
2020/10/04	19:26:54	31.3317	130.6150	6	1.9
2020/10/05	01:49:14	31.8983	130.6817	165	3.3
2020/10/06	10:55:40	31.3150	130.3767	158	2.1
2020/10/07	11:15:15	31.3317	130.6133	4	1.6
2020/10/08	00:23:55	31.1017	130.8033	6	2.0

(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

1) はじめに

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

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

レシーバ関数の時間軸は、直達 P 波と PS 変換波の走時差なので、地震波の速度構造を仮定すれば、PS 変換波の変換点を求めることができる。さらに、レシーバ関数を PS 変換波の共通変換点でスタッキングすることにより、S 波速度不連続面を推定することができる。澁谷・他

(2019) や本事業の昨年度の研究では、速度構造として JMA2001 モデル (上野・他, 2002) を用いた。しかしながら、桜島火山下の速度構造は、水平方向にも鉛直方向にも不均質であることが予想され、JMA2001 モデルを用いて計算された PS 変換点にはバイアスがかかる恐れがある。そこで、今年度の研究では、到来方向ごとに、レシーバ関数の波形インバージョンを行って、1 次元 S 波速度構造を推定し、それらを波線に沿ってマッピングすることにより、S 波速度構造の 3 次元分布を求めた。

2) レシーバ関数解析

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

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

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

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/Vs 1	Vp/Vs 2	Δ Vp/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。

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 1-1-3-1)。ただし、第 1 層～第 3 層においては V_p/V_s もモデルパラメータとした。密度 (ρ) は、P 波速度 (V_p) の関数として、 $\rho = 0.036(V_p - 3.0)^2 + 2.35$ (Kurita, 1973) で与える。

波形インバージョンには遺伝アルゴリズム (GA) を用いた (shibutani et al., 1996)。GA はグリッドサーチの一種であるが、生物の進化の過程 (淘汰、交配、変異) を模し、探索の効率化を図るものである。速度構造モデルのモデルパラメータの探索範囲の例を表 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。

つぎに、S 波速度構造のマッピングについて説明する。ある一つのレシーバ関数（到来方向 ϕ_1 、波線パラメータ p_1 ）から波形インバージョンにより推定された S 波速度構造の深さ z_1 における S 波速度 β_1 とする。まず、その観測点から到来方向 ϕ_1 の断面において、S 波速度構造と波線パラメータ p_1 を用いて波線追跡を行う。その波線において、深さ z_1 での観測点からの水平距離 r_1 を求め、深さ z_1 における到来方向 ϕ_1 かつ水平距離 r_1 のピクセル ($1\text{km} \times 1\text{km} \times 1\text{km}$) に S 波速度 β_1 をマッピングする。この手順をすべての観測点のすべての到来方向に対して推定された S 波速度構造について行う。ピクセル内に複数の S 波速度がマッピングされた場合はそれらの平均をとる。

3) 結果

今回は、図 1-1-3-1 に赤字で示す桜島島内の 7 観測点について解析を行い、桜島下の S 波速度の 3 次元分布を推定した。

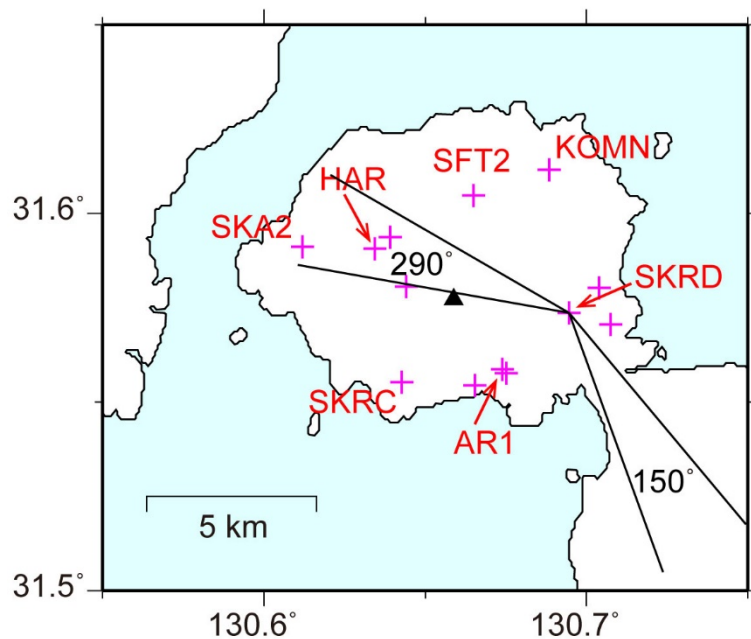


図 1-1-3-1 桜島島内の地震観測点の分布 (+)。赤字で観測点コードを付した 7 観測点について解析を行った。SKRD の到来方向が 150° と 290° のレシーバ関数がサンプリングする領域を示す。黒三角は桜島南岳の位置を示す。

a. レシーバ関数のスタッキング

到来方向の 10° ごとに $\pm 10^\circ$ の範囲に入るレシーバ関数をスタッキングし、ノイズや小規模な不均質構造からの散乱波を抑え、S/N 比の向上を図った。観測点 SKRD におけるスタッキング後のレシーバ関数を図 1-1-3-2 に示す。レシーバ関数の到来方向による違いが顕著である。ある一つのレシーバ関数を見ても、その波形が複雑である。たとえば、0 秒に来る直達 P 波よりも直

後の後続波（2～3 山）の振幅が大きい。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。

b. 波形インバージョンによる 1 次元 S 波速度構造の推定

桜島内の 7 観測点において、 10° から 20° ごとに 310° までの到来方向のレーシーバ関数に対して、遺伝アルゴリズムによる波形インバージョンを行い、1 次元の S 波速度構造を推定した。

観測点 SKRD の到来方向 150° のレーシーバ関数から波形インバージョンによって推定された S 波速度構造を図 3a に、レーシーバ関数の観測波形と理論波形の比較を図 1-1-3-3b に示す。波形のフィッティングはおおむね良好である。とくに、0.5～4 秒（Ps 変換波の変換点の深さは 30 km）のフィッティングは良好である。S 波速度構造の特徴としては、まず、表層（第 1 層）の速度が非常に小さい（1.2 km/s）ことが挙げられる。上部地殻（深さ 14 km まで）も低速度（2.6 km/s）である。さらに、中部地殻（深さ 21 km まで）も低速度（3.1 km/s）である。なお、乱数系列を変えた GA も行い、同様の S 波速度構造が得られることを確認した。

同じ観測点 SKRD の到来方向 290° に対する結果を図 1-1-3-4a と 4b に示す。表層（第 1 層と第 2 層）の速度が非常に小さい（0.8 km/s と 1.6 km/s）ことと、中部地殻（深さ 13～23 km）が低速度（3.0～3.2 km/s）であることは、到来方向 150° の結果と同様である。しかし、上部地殻（2～13 km）が平均的な速度（3.2～3.4 km/s）をもつことは到来方向 150° の結果とは異なる。

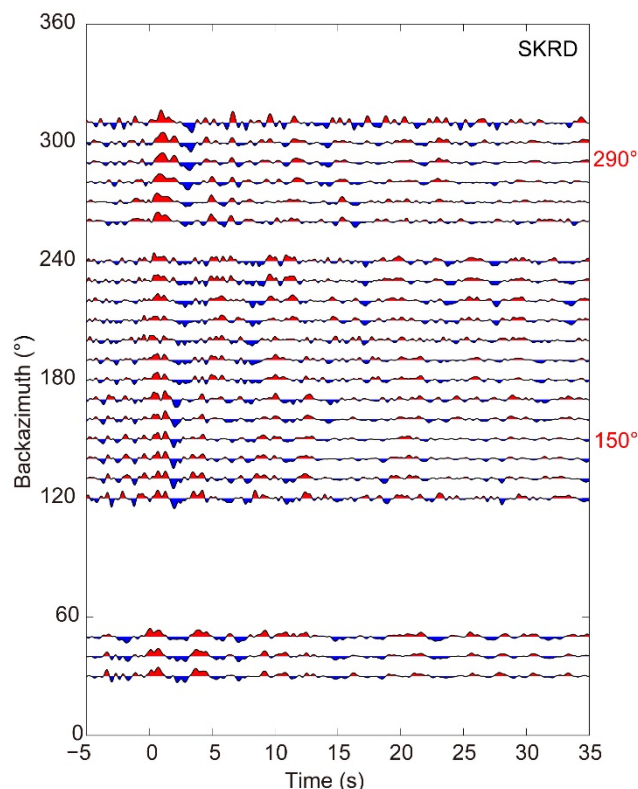


図 1-1-3-2 観測点 SKRD におけるレーシーバ関数のスタッキング波形。到来方向の 10° ごとに $\pm 10^\circ$ の範囲に入るレーシーバ関数をスタッキングした。

c. 桜島下の S 波速度の 3 次元的分布

桜島島内の 7 観測点の 11~13 の方位に対して推定された S 波速度構造をマッピングして、桜島下の S 波速度の 3 次元的分布を推定した。

深さ 10 km、20 km、30 km での S 波速度の分布を図 1-1-3-5 に示す。深さ 10 km では、桜島の西部は上部地殻の平均的な速度 (3.2~3.5 km/s) となっているが、その他の領域では低速度 (~3.0 km/s) である。とくに南東部において顕著な低速度 (~2.5 km/s) が見られる。深さ 20 km では、桜島とその周辺域が全体的に低速度 (~3.0 km/s) である。深さ 30 km では、下部地殻から最上部マントルに相当する S 波速度 (3.7~4.0 km/s) が全体的に分布している。その一方で、深部低周波地震 (白丸) が見られる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) に低速度域 (~3.0 km/s) が分布している。

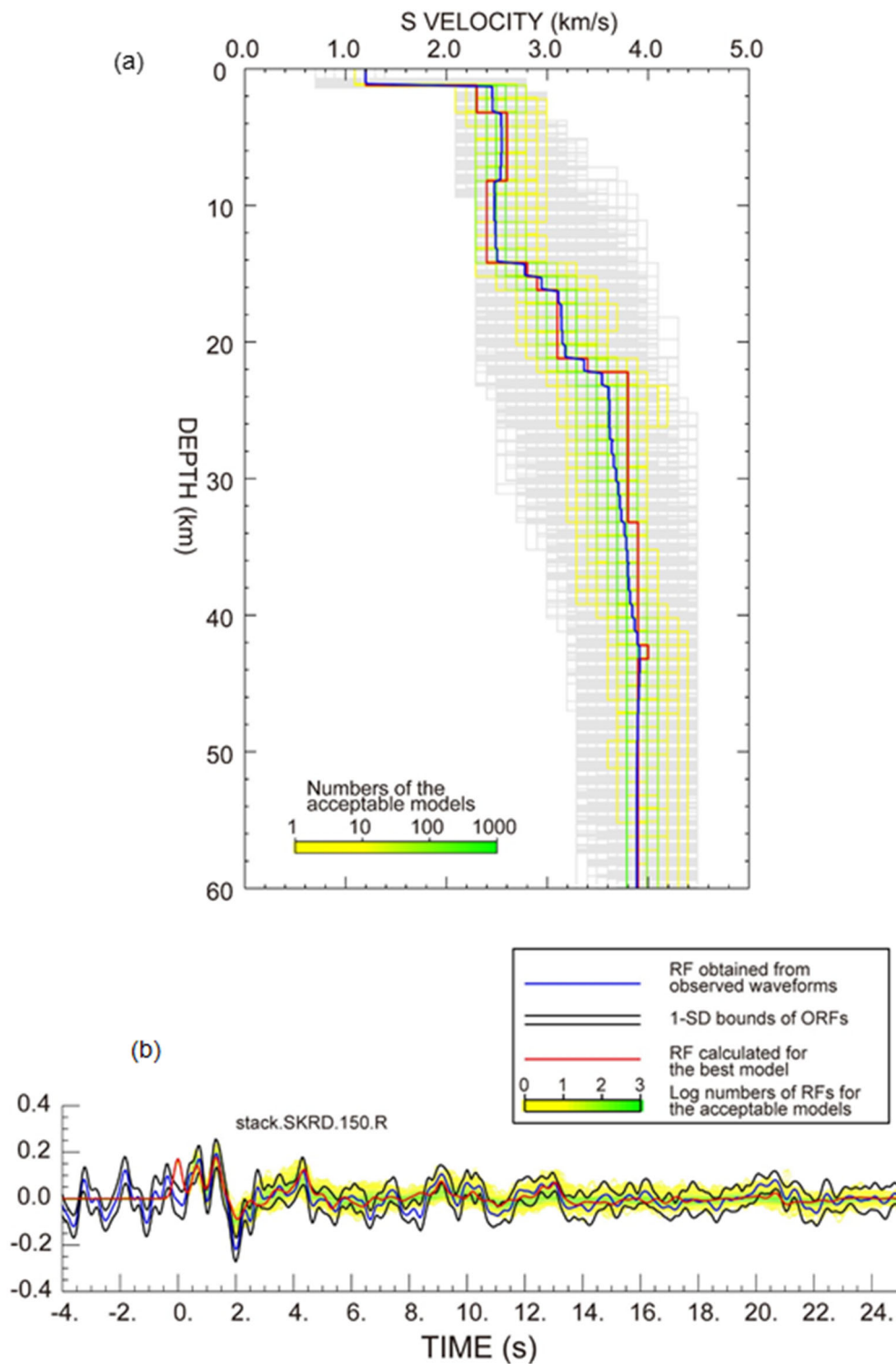


図 1-1-3-3 観測点 SKRD における到来方向 150° のレシーバ関数の波形インバージョンの結果。(a) 推定された S 波速度構造。赤線で最適モデルを、青線で平均モデルを示す。緑～黄色は許容モデルの範囲を示す。(b) レシーバ関数の観測波形（青線）と最適モデルに対する理論波形（赤線）のフィッティングの様子を示す。黒線は観測波形の標準偏差の範囲を示す。緑～黄色は許容モデルに対する理論波形の範囲を示す。

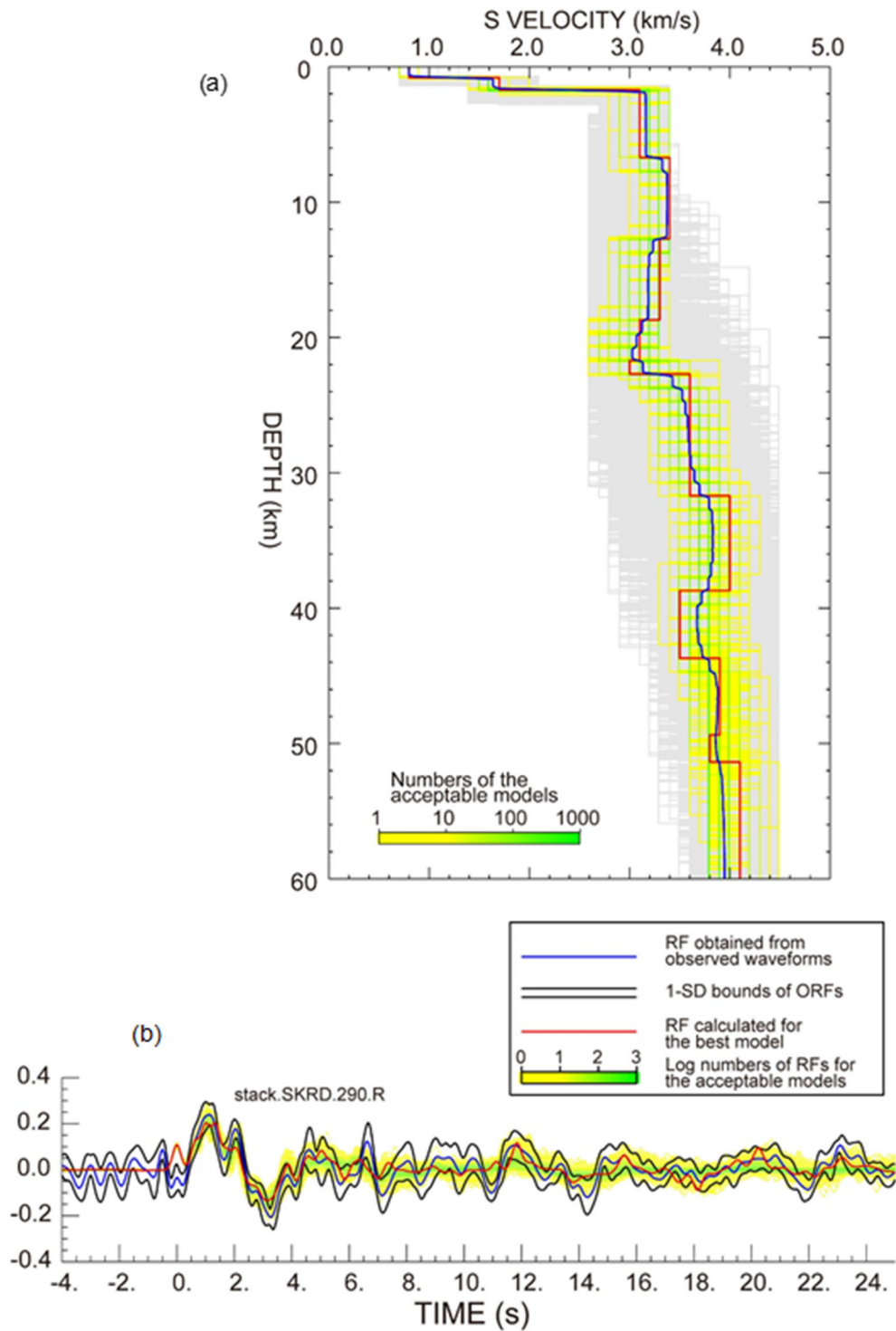


図 1-1-3-4 観測点 SKRD における到来方向 290° のレシーバ関数の波形インバージョンの結果。(a) 推定された S 波速度構造。赤線で最適モデルを、青線で平均モデルを示す。緑～黄色は許容モデルの範囲を示す。(b) レシーバ関数の観測波形（青線）と最適モデルに対する理論波形（赤線）のフィッティングの様子を示す。黒線は観測波形の標準偏差の範囲を示す。緑～黄色は許容モデルに対する理論波形の範囲を示す。

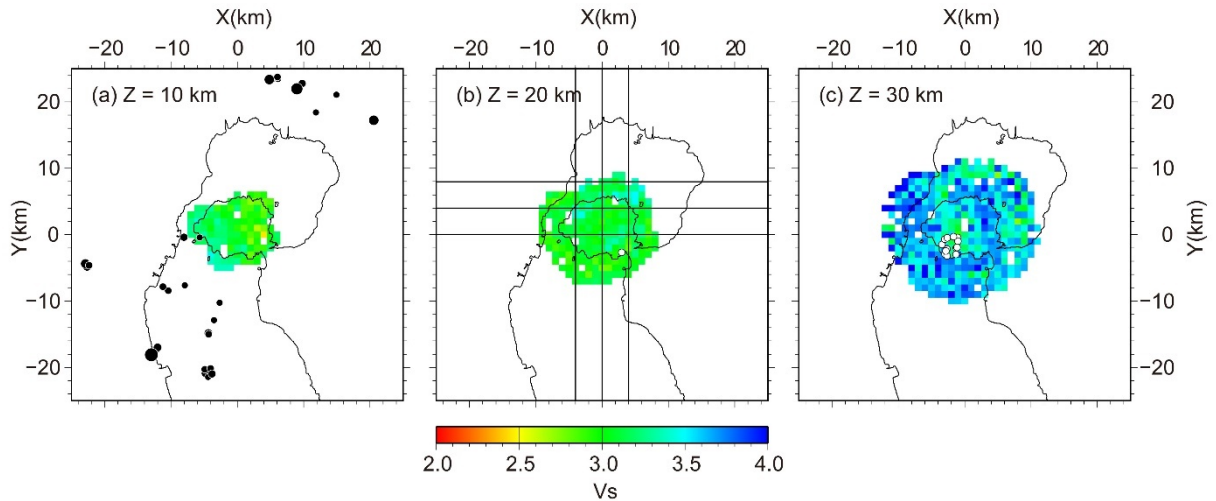


図 1-1-3-5 S 波速度の深さ断面での不均質分布。(a) 深さ 10 km、(b) 深さ 20 km、(c) 深さ 30 km。白丸は低周波地震を示す。(b) の図中の 3 本の横線は、東西断面 (図 6) における鉛直断面の位置を、3 本の縦線は南北断面 (図 7) における鉛直断面の位置を示す。

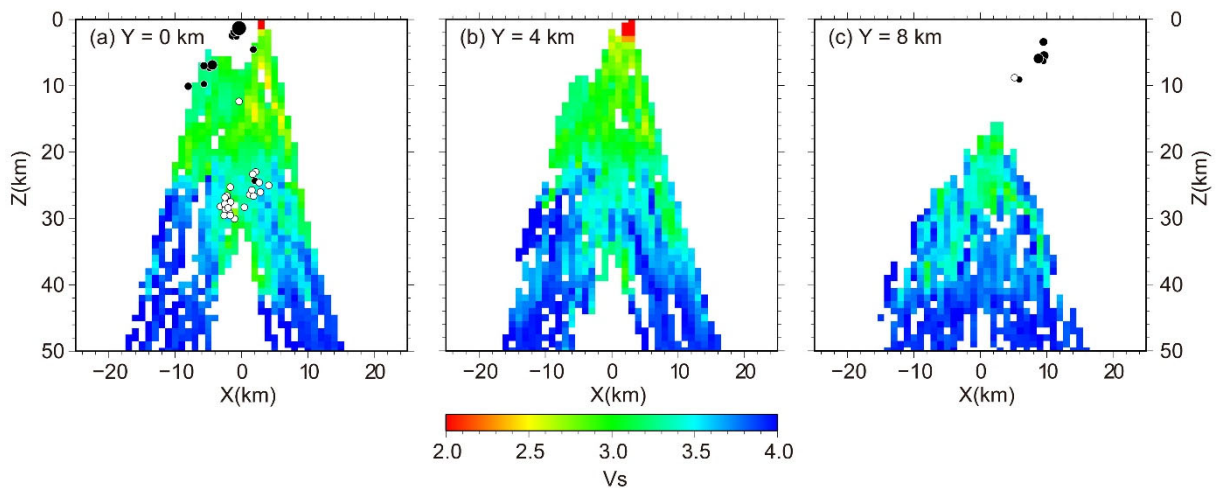


図 1-1-3-6 S 波速度の東西断面での不均質分布。(a) $Y = 0$ km、(b) $Y = 4$ km、(c) $Y = 8$ km、断面の位置は図 5b を参照のこと。白丸は低周波地震を示す。

つぎに、東西断面を図 1-1-3-6 に示す。南岳を通る断面 ($Y = 0$ km) とその北側に 4 km と 8 km 離れた断面である。 $Y = 0$ km と 4 km の断面では、深さ 20 km 辺りまでは全体的に低速度であることがわかる。ただし、深さ 10 km 辺りでは、西側 ($X = 6$ km 付近) が上部地殻の平均的な S 波速度 (3.2~3.5 km/s) を示し、通常地震も見られるのに対し、東側 ($X = 3$ km 付近) では低速度 (2.5~3.0 km/s) であり、低周波地震が発生している。20 km より深い領域では、桜島直下や東側に低速度域が深さ 40 km 辺りまで続いている、深さ 30 km 付近には深部低周波地震も見られる。始良カルデラの中央部に当たる $Y = 8$ km の断面では、20 km 以深の領域において、桜島直下から西側にかけて低速度域が深さ 40 km 辺りまで続いている。

最後に、南北断面を図 1-1-3-7 に示す。南岳を通る断面 ($X = 0$ km) とその両側に 4 km 離れた断面である。東西断面と同様、深さ 20 km 辺りまでは全体的に低速度である。 $X = -4$ km の断面の深さ 10 km 付近は上部地殻の平均的な速度を示し、通常地震が見られる。これに対し、 $X = 0$ km と 4 km の断面では、深さ 10 km 付近に低速度域 (2.5~3.0 km/s) が見られ、低周波地震も発生している。20 km より深い領域でも桜島直下やその周辺部にかけて、低速度域が深さ 40 km 辺りまで続いている。

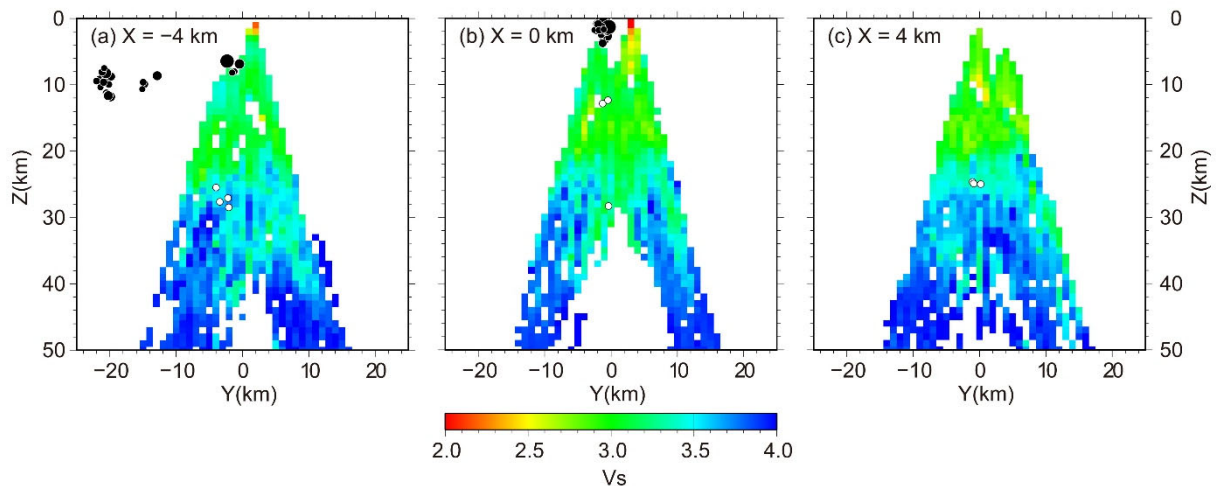


図 1-1-3-7 S 波速度の南北断面での不均質分布。(a) $X = -4$ km、(b) $X = 0$ km、(c) $X = 4$ km、断面の位置は図 5b を参照のこと。白丸は低周波地震を示す。

4) まとめと今後の方針

始良カルデラ南縁の桜島島内の 7 観測点において、 20° ごとの到来方向のレーバ関数から波形インバージョンにより 1 次元 S 波速度構造を推定した。レーバ関数の波形は複雑で、水平方向には鉛直方向にも不均質な構造が示唆された。推定された S 波速度構造は以下のような特徴を示した。①表層は非常に低速度 (~ 1 km/s) である。②深さ 13~15 km までの上部地殻では、桜島の北西側 (始良カルデラ内側) は上部地殻の標準的な速度 (3.2~3.5 km/s) を示すのに対し、南東側 (始良カルデラ外側) は標準より低速度 (2.5~3.0 km/s) である。③深さ 21~24 km までの中部地殻は全体的に低速度 (3.0~3.2 km/s) である。

桜島島内の 7 観測点の 11~13 の方位に対して推定された S 波速度構造をマッピングして、桜島下の S 波速度の 3 次元的分布を推定した。地殻は全体的に低速度を示し、深さ 20 km 付近までの S 波速度は 3.2 km/s 以下である。さらに、10 km 以深にも 2.5 km/s という顕著な低速度を示す領域もある。桜島直下やその周辺域には、30 km 以深にも 3 km/s 程度の低速度を示す領域が存在する。

今年度の研究を通して、レーバ関数の波形インバージョンでの遺伝アルゴリズムにおけるモデルの設定方法、および効率的な実行方法を習得できたので、今後は、島外の観測点にも適用し、桜島だけでなく、より広範囲の 3 次元的な S 波速度構造の推定を行いたい。

(1)-1-4. まとめ

桜島を含む始良カルデラ地域における地震観測を継続し地殻構造調査を行った。従来から継続している臨時地震観測点の維持管理データ回収を継続的に行った。また本研究の構造調査の分解能向上を目的に、始良カルデラ北西部と北部に広帯域地震計を用いた臨時観測点を増設した（北部は3月設置予定）。また、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ーとレシーバ関数解析が行われた。トモグラフィー解析では解析深度を20kmまでとし、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、昨年同様に解像度は4km×4km×4kmであるが、引き続き始良カルデラ中央部の深さ15kmのS波低速度異常が見出された。始良カルデラ北東部の若尊火山に対応する場所では1km深のS波速度が低く、5km深ではP波速度が低くS波速度に異常は見られない。始良カルデラ中央部の深さ10km付近は地盤変動観測から桜島へのマグマ供給源となっている圧力源が存在しているが（例えば、Iguchi, 2013）、トモグラフィーによる速度構造解析では速度異常は検出されなかった。これは圧力源位置に速度変化をもたらす異常があったとしても解像度以下のサイズであることが考えられる。一方、始良カルデラ中央部では深さ15kmに4km以上の広がりをもつS波速度が2km/s以下の低速度領域が引き続き検出されており、この低速度領域は流体に近いものの存在を反映していると考えられる。この低速度領域は深さ15kmから数kmは浅部に向かって伸びており、地盤変動観測で見出されている深さ10km付近の圧力源と関連している可能性がある。今後は反射法探査やレシーバ関数解析などから圧力源付近の詳細な構造を見出す研究が必要である。

今年度のレシーバ関数解析では主に桜島島内の地震観測点における遠地地震データを用いて桜島とその周辺部の解析を行なった。波形インバージョンによる1次元地震波速度モデルは水平多層モデルを仮定し、計算には遺伝アルゴリズムを用いた。桜島下のS波速度の3次元的分布では表層は非常に低速度（約1km/s）であり、深さ10km以深に2.5km/sという顕著な低速度、深さ20km付近でもS波速度は3.2km/s以下と低速度を示している。トモグラフィーによる地震波速度構造解析で始良カルデラの深さ15km付近に顕著なS波低速度異常が検出されていることと調和的である。今年度に設置する始良カルデラ北部と北西部に広帯域地震計および昨年度設置の弁天島の地震計によるデータを合わせて、始良カルデラ下全体の構造解明を進める予定である。

参考文献

(1)-1-2.

Iguchi, M. Magma movement from the deep to shallow Sakurajima volcano as revealed by geophysical observation, Bull. Volcanol. Soc. Japan, 58, 1-18, 2013.

- Ono, K., Ito, K., Hasegawa, I., Ichikawa, K., Iizuka, S., Kakuta, T. and Suzuki H.,
Explosion seismic studies in south Kyushu especially around the Sakurajima volcano,
J. Phys. Earth, 26, S309-S319, 1978.
- Thurber, C.H. Earthquake locations and three dimensional crustal structure in the
Coyote Lake area, central California, J. Geophys. Res., 88, B10, 8226-8236, 1983.
- Um, J. and Thurber, C., A fast algorithm for two-point seismic ray tracing, Bull.
Seismol. Soc. Am., 77, 972-986, 1987.
- 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, 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, 2010.
- (1)-1-3.
- Abe, Y., T. Ohkura, K. Hirahara, T. Shibutani, Along-arc variation in water
distribution in the uppermost mantle beneath Kyushu, Japan, as derived from
receiver function analyses, J. Geophys. Res., 118, 3540-3556,
doi:10.1002/jgrb.50257, 2013
- Haskell, N. A., Crustal reflection of plane P and SV waves, J. geophys. Res., 67,
4751-4767, 1962
- 井口正人, 地球物理学的観測より明らかになった桜島火山の構造とその構造探査の意義, 物理探
査, 60, 145-154, 2007
- Kurita, T., Regional variations in the structure of the crust in the central United
States from P-wave spectra, Bull. seism. Soc. Am., 63, 1663-1687, 1973
- 澁谷拓郎・平原和朗・上野友岳, レシーバ関数解析による地震波速度不連続構造, 地震, 61,
S199-S207, 2009
- Shibutani, T., M. Sambridge, and B. Kennett, Genetic algorithm inversion for receiver
functions with application to crust and uppermost mantle structure beneath Eastern
Australia, Geophys. Res. Lett., 23, 1829-1823, 1996
- 澁谷拓郎・寺石眞弘・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
- Tatsumi, Y., Migration of fluid phases and genesis of basalt magmas in subduction
zones, J. Geophys. Res., 94, 4697-4707, 1989
- 上野 寛・畠山信一・明田川 保・舟崎 淳・浜田信生, 気象庁の震源決定方法の改善—浅部速度
構造と重み関数の改良—, 験震時報, 65, 1507-1520, 2002

(1)-1-4.

Iguchi, M. Magma movement from the deep to shallow Sakurajima volcano as revealed by geophysical observation, Bull. Volcanol. Soc. Japan, 58, 1-18, 2013.

(1)-2. 長期連続反射法地震探査の検討

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2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が狙っている。火山活動に伴う地震反射波の変化に関する先行研究例としては、Tsutsui et al. (2016)が桜島の火山活動に伴う地震反射強度の変化を検出するとともにその変化が地下のマグマの状態変化で説明できることをすでに報告している。

長期連続反射法探査の検討の項目では令和元年度に予備調査を実施した（京都大学防災研究所，2020）。予備調査では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。令和2年度は前年度の結果として推奨された仕様の振源を用いて、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う。さらには長期連続反射法の実装に向けた基礎資料の収集も実施する。令和3年度以降は令和2年度の調査結果によって後年度で必要最小限な振源の能力への絞り込みを実現するとともに、始良カルデラ深部の地震波反射面の時間変化検出のための基礎データを蓄積し、地震反射波の時間変化を検討する。可能であればさらに長期連続反射法の継続的な実施に向けての検討も行う。

(1)-2-1. 令和2年度基礎実験

令和2年度は長期連続反射法の検討のための基礎実験を実施した。この基礎実験では前年度調査研究に基づいたパラメータでエアガンの発振を実施し、重合を行った後に桜島側で十分なS/N比をもったデータが得られることを確認するとともに、より実現性の高い観測仕様の検討を実施することが盛り込まれた。さらに長期的な視野にもとづき、陸上ピット設計に関する基礎データを得ること、陸上発振の運用方法に関する基礎データとオペレーションのノウハウを得ることも意識して実験を実施した。

基礎実験では鹿児島湾北側陸域におけるエアガン発振を実施し、桜島側に展開した地震計群列配置でエアガン発振波形を取得した。以下にその詳細を記述する。

実施時期：令和2年12月7日～18日。（資材搬入期間および予備日含む）

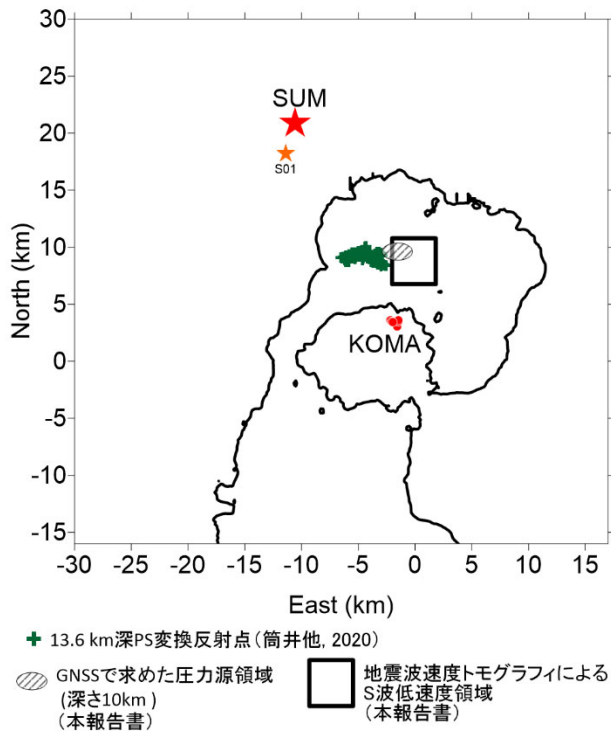


図 1-2-1. 基礎実験展開図 SUM:エアガン発振点 (住吉池)、KOMA:地震計アレイ展開場所。震源距離約 19 km。海岸線と本プロジェクトにおける観測研究成果の PS 変換反射点および地震波トモグラフィによる S 波低速度領域、地盤変動圧力源位置もともに示す。

a. 発振点

基礎実験で設定した発振点は始良市住吉池の水中である (図 1-2-1 SUM)。発振点は 2008 年探査 S01 (井口・他, 2009) の北北西 2.5 km の地点でもあり、桜島側で筒井・他 (2020) が報告した始良カルデラ西部の地震波反射面からの地震波の検出が期待される位置でもある。住吉池は約 8000 年前にマグマ水蒸気爆発で形成された直径約 500m のマールである (森脇・他, 1986)。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令和元年度の予備調査 (京都大学防災研究所, 2020) で確認されており、10m 以上の水深が必要なエアガンによる発振には好適である。

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。農業用水の利用に伴い住吉池の水位は変動する。地元での聞き込みによれば毎年 5 月の田植え期直前に最高水位をとった後秋季の収穫期に最低水位となり、年間の水位変化幅は約 10m と言われている。令和 2 年度の基礎実験を行った 12 月は最低水位期のあとの水位回復期に相当し、暗渠をとおした寺師川からの水導入 (鹿児島県蒲生町, 1969) により 1 日あたり 2cm の水位増加があった。なお、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。発振点位置およびその座標を図 1-2-2 および表 1-2-1 に示す。

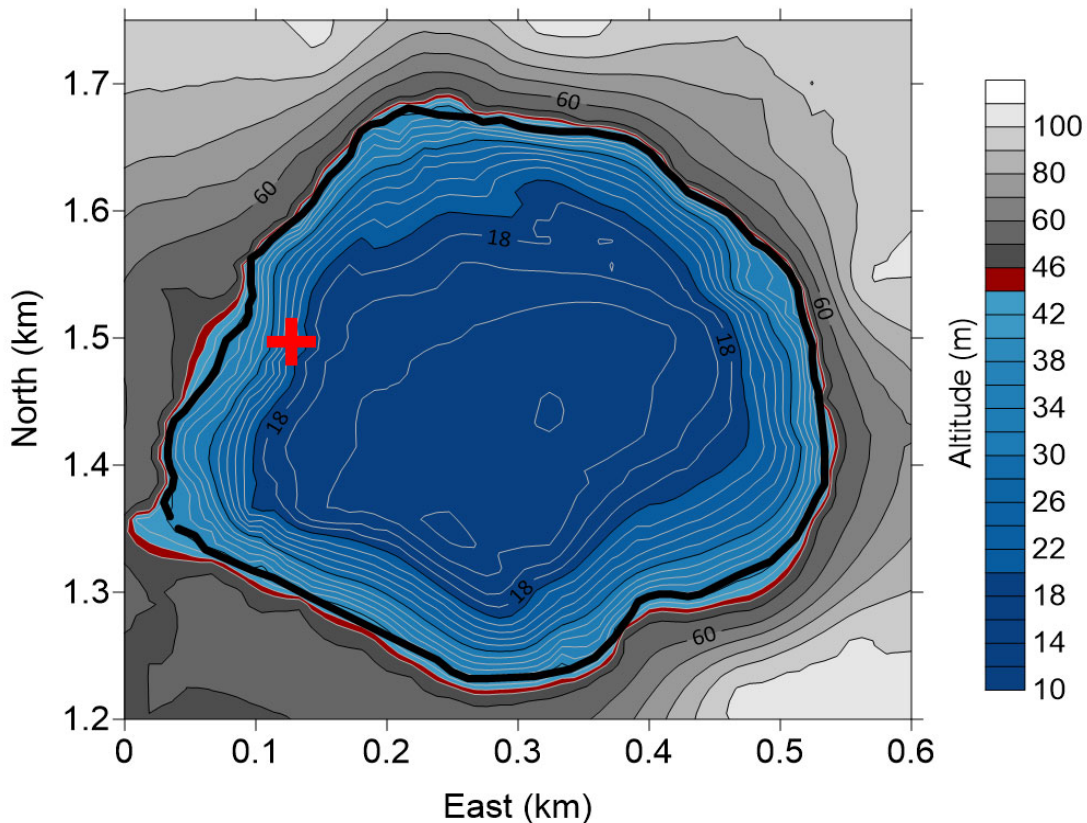


図 1-2-2. 住吉池における発振点 (赤十字 : 北緯 31. 77195434 度 東経 130. 5902111 度)。水深分布は予備調査 (京都大学防災研究所、2020) による。本図の局所座標原点は GNSS 常設点 KAMO (北緯 31. 758457094 度 東経 130. 588869732 度) である。

表 1-2-1. 発振点位置

	latitude(deg)	longitude(deg)	height(m)
GNSS データ	31. 771954335	130. 590211148	72. 029
ガン深度(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)
0	-136095. 7067	-38814. 0363	44. 715
6	-136095. 7067	-38814. 0363	38. 715
10	-136095. 7067	-38814. 0363	34. 715

b. 発振装置

発振装置には前年度の検討の結果 (京都大学防災研究所、2020) を反映して、海洋地震探査で安定した振源動作の実績があるエアガンでエアガンクラスタを構成した。クラスタを構成するエアガンの配置を図 1-2-3 に示す。エアガンクラスタは 350cui (BOLT1500LL 型) × 3 (トリガン構成) および 1500cui

(BOLT1500LL 型シングル) で構成された。なお cui は立方インチを表す。トリガンは (株) 地球科学総合研究所所有の機材を使用し、シングルエアガンは東京大学地震研究所所有の機材を借用して使用した。また圧縮空気を製造する高圧コンプレッサと圧縮空気を一時貯蔵するマニホールドも借用して今回の実験に利用した。

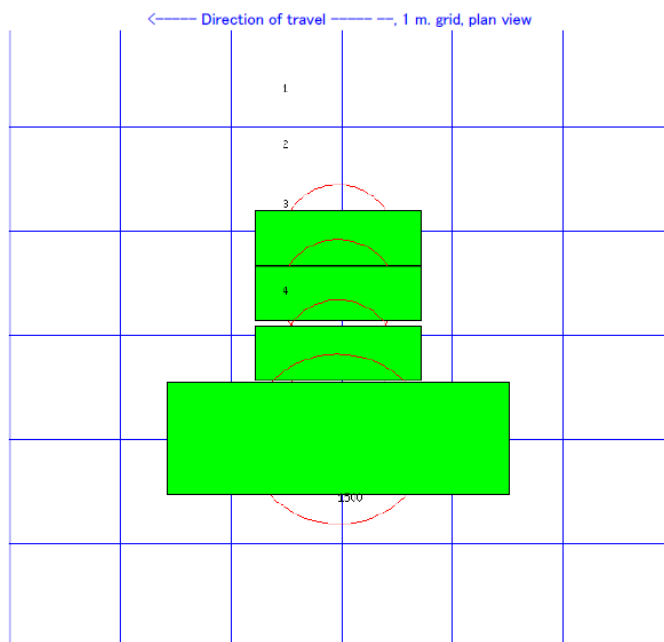


図 1-2-3. エアガンクラスタの配置図。グリッドは 1m 間隔で記載。1.5m 間隔でトリガンとシングルエアガンとを配置。トリガンは 1500LL 型に 350cui のチャンバーを組み合わせたエアガン本体を辺長約 1.2 m の正三角形の頂点に配置したものである。シングルエアガンは 1500LL 型に 1500cui のチャンバーを組み合わせたエアガン本体で構成されている。

エアガンクラスタを構成するそれぞれのエアガン本体の写真を図 1-2-4 に示す。図 1-2-4a は 1500 cui のチャンバーを装着した Teledyne BOLT 社製エアガン Model 1500LL である。以降ではこのエアガンを 1500LL 型もしくはシングルエアガンと称することにする。

(a)



(b)



図 1-2-4. (a) シングルエアガン本体(1500LL 型 1500cui チャンバー)。予備機(手前)と本務機(奥)を示す。本務機の重量は約 200kg である。(b) 1050 cui トリガン(1500LL 型 350cui チャンバーエアガン本体×3)。本務機(中央)と予備エレメント(右)を示す。本務機の空中重量 565kg である。スケール比較のために左側に脚立(高さ 1.5m)を示す。

次に 1050 cui トリガンを図 1-2-4b に示す。トリガンはチャンバーサイズ 350 cui のエアガン本体 3 台を長さ約 1.2 m の鋼製のフレームで連結し、それぞれが正三角形の各頂点に配置されるようにしたものである。

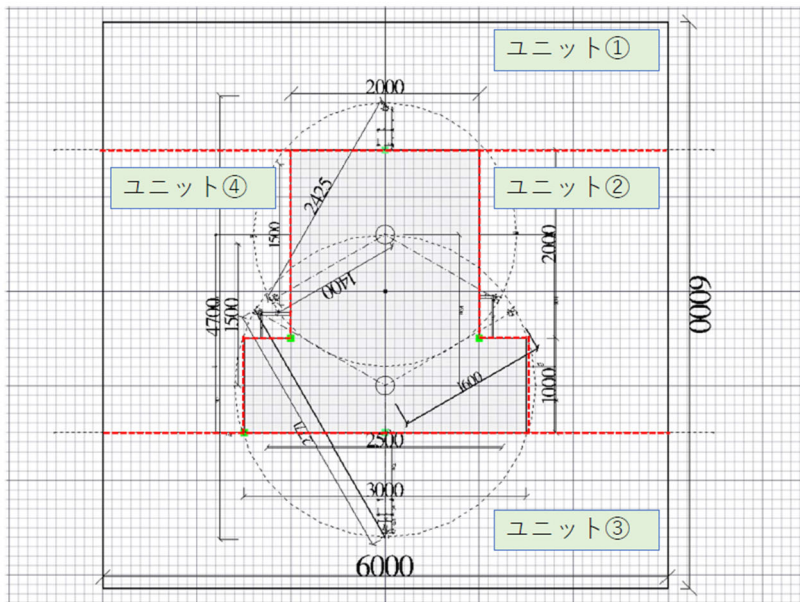
今回の実験ではこれらのエアガンを、水面に浮かべたポンツーン足場から水中に懸架したクラスタエアガンとして発振作業に用いた。ポンツーン足場は令和 2 年度の基礎実験準備業務の一環として整備された。調整には 5 か月を要した。ポンツーン足場は組み立て式で 6m×6m の広さをもちエアガン懸架用のやぐらを 2 基備えるとともに、その中央部には水面に直接アクセスできる幅 2m 程度の開口部を備えている(図 1-2-5, 1-2-6)。ポンツーンのデッキ下に装備された浮力材によりエアガンクラスタおよび 6 名程度の人員を搭載しても水面上にデッキ上面が位置する浮力を確保していた。

発振点展開に先立ち魚群探知機で 20m の水深が確保できる地点を探し、その場所までエンジン付きボートでポンツーン足場を曳航したのちに、アンカーを投入してポンツーン足場の場所を固定した。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 1-2-2)。

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。

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。

エアガン曳航/懸架足場諸元図



空中重量 ユニット①, ③=300Kg, ユニット②, ④=200Kg 総重量≒1t

図 1-2-5. ポンツーン足場基部図面



図 1-2-6. ポンツーン足場

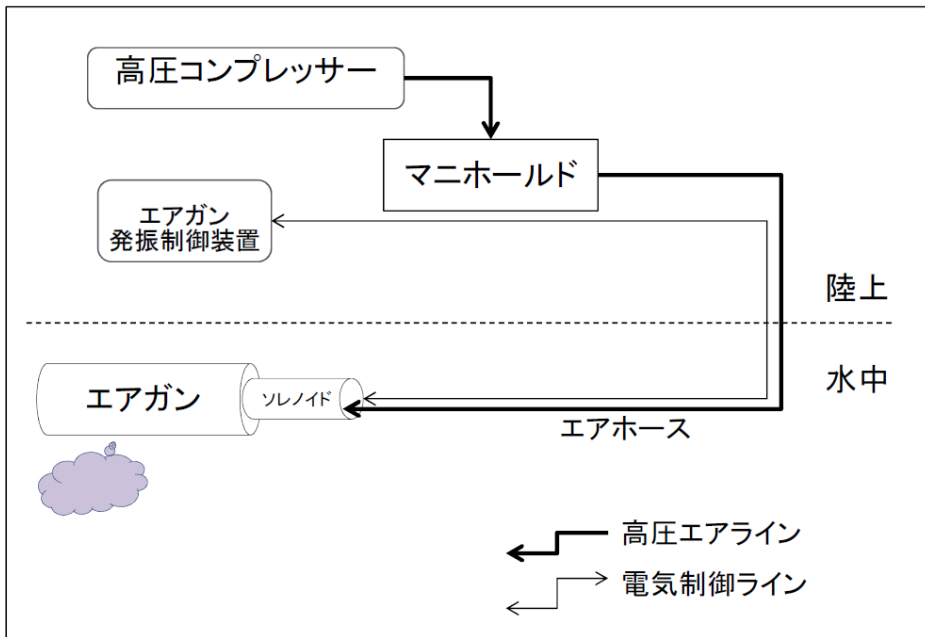


図 1-2-7. エアガン関連接続図

高圧コンプレッサからマニホールドを介してエアガンに至る圧縮空気系統とエアガンの制御系統の概念を図 1-2-7 に示す。高圧コンプレッサで製造された圧縮空気は一旦マニホールドで蓄えられた後、バルブを介して個々のエアガンに供給される。エアガンでは圧縮された空気を内蔵されたチャンバーに蓄えて発振を待つ。エアガンの発振は、エアガン発振制御装置からの電気信号でエアガン本体に取り付けられたソレノイドバルブを動かし、エアガン内部の弁を動かしてチャンバーの圧縮空気を放出する。圧縮空気が急激に水中に放出される際の圧力変動が弾性波（音波）として水中を伝わったのち湖底に達し、地下に向かって進行する人工地震波を生ずる。

基礎実験で使用した高圧コンプレッサ（三和鉄工所製 4S50A-15M 120m³/h, 15 MPa）では 2550 cui のエアガンに対して 2000 psi（ポンド毎平方インチ；約 13.8 MPa）で約 3 分間隔の発振が可能であった。本実験で使用した高圧コンプレッサを図 1-2-8 に示す。エアガンの発振能力は内蔵チャンバーの容積と圧縮空気圧の大きさに支配される。一般に内蔵チャンバーの容積が大きいほど放出される弾性波エネルギーは大きくなる。また、発振の間隔は高圧コンプレッサの能力と使用するエアガンのチャンバー容量に大きく依存する。高圧コンプレッサの運転時には騒音が伴うので、実際の発振作業時には防音シートで周囲を囲み騒音防止対策を施した。



図 1-2-8. 高圧コンプレッサとマニホールド。右高圧コンプレッサ（三和鉄工所製 4S50A-15M 120m³/h, 15 MPa）、左マニホールド（100L）。

次にエアガン制御系統と住吉池地区における観測系統とを合わせて図 1-2-9 に示す。

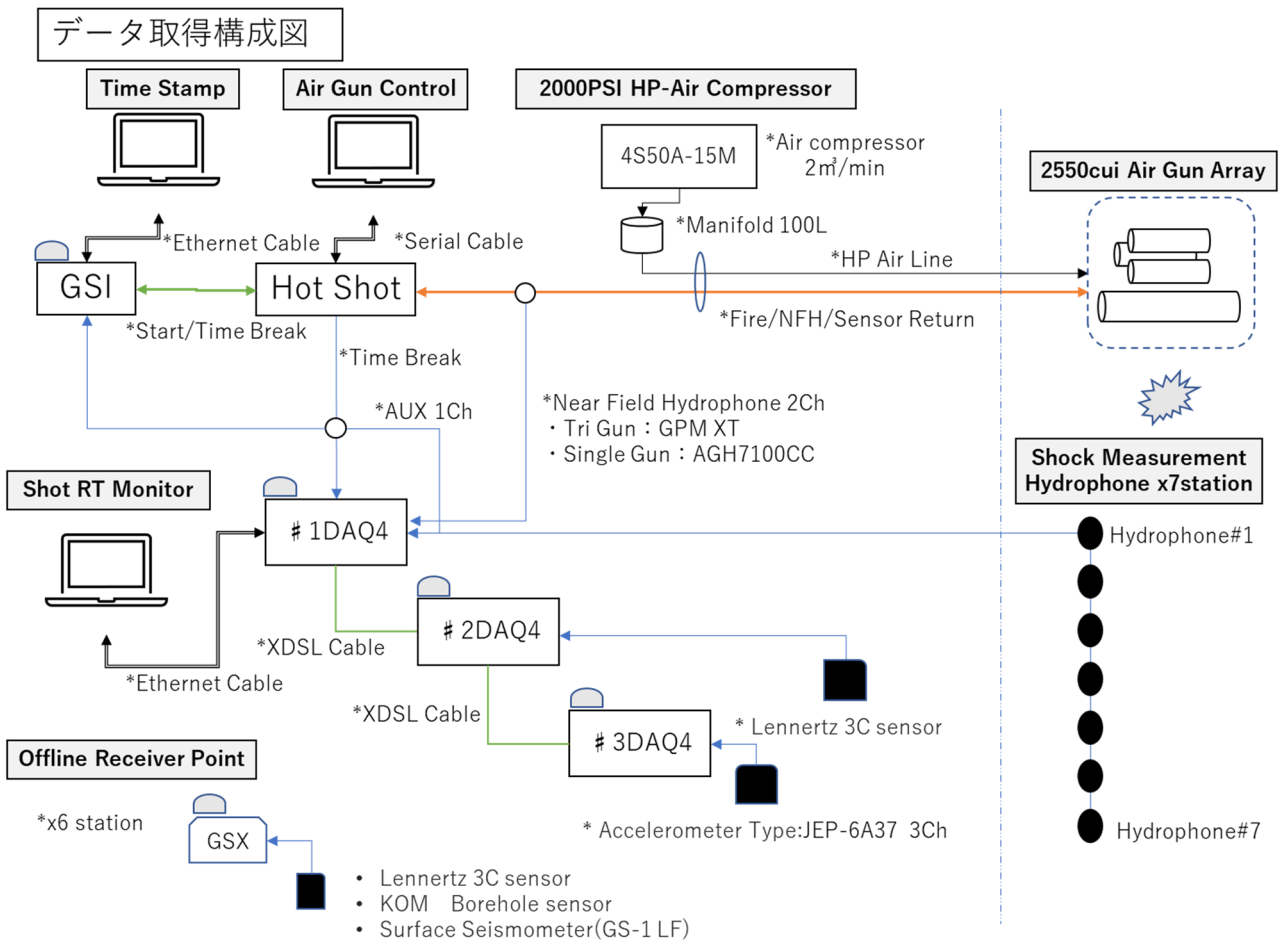


図 1-2-9. 発振点および発振点近傍観測結線

エアガンの発振制御は端末 Air Gun Control からエアガン発振制御装置 Hot Shot を介して行われる。発振タイミングの GPS 同期は GSI(Geospace Source interface)を介して行われた。Hot Shot はエアガンクラスタを構成する個々のエアガンの発振状況をモニターして発振タイミングを指定するとともに、エアガンクラスタ全体の発振タイミングパルス(CTB; Clocked Time Break)を GSI に出力する。GSI は内

部に GPS 時計を持っており Hot Shot からの出力信号 CTB にタイムスタンプを付けた記録を保存する。以降で扱われる観測記録のショット時刻は GSI からの出力をもとにしている。個々のエアガンの発振タイミングの調整（チューニング）には複数の発振の繰り返しによるその場での調整が必要である。今回の基礎実験ではチューニング完了までに 44 回の発振で 2 時間ほどを要していた。

c. 観測

本実験では振源の近傍における水中観測と陸上における観測とを実施した。

水中観測では、エアガン振源波形の取得とエアガン近傍における圧力を知ることを目的として図 1-2-10 のようにエアガン直近に 2 つのハイドロフォン (NFH) とエアガン中心から約 10m 以内に 7 ヶ所のハイドロフォン (#1~#7) を設置して振源の近傍における観測を実施した。以下ではこれらを水中観測と称する。水中観測点の展開はすべて船上からの作業で行い、潜水作業を伴わなかった。

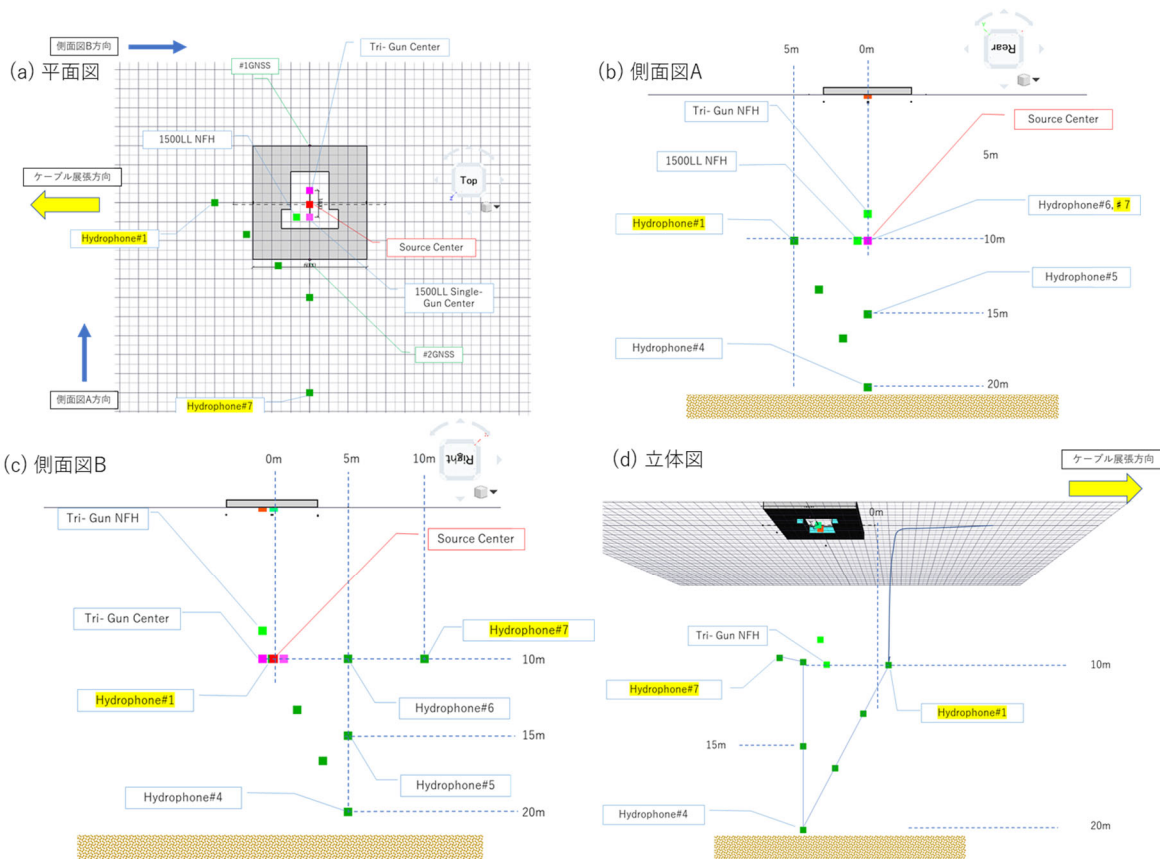
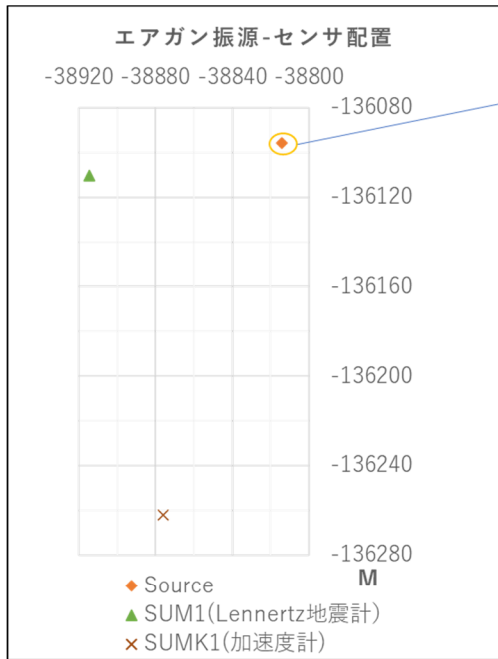


図 1-2-10. 水中観測点展開

1500NFH にはハイドロフォン AGH-7100-C (7 V/Bar)、トリガン NFH にはハイドロフォン GPM XT (感度 10 V/Bar)、Hydrophone #1 から #7 にはハイドロフォン SQ54 (感度 0.84 V/Bar) を記録装置 DAQ-link4 に接続して使用した。

水中観測点の位置を、隣接する陸上観測点 SUM 1 と SUMK1 とともに図 1-2-11 に示す。



振源直近のセンサ配置

Station	X	Y	Z	振源距離 (ガン深度6m)	振源距離 (ガン深度10m)
Hydrophone 1	-5	0	-10	6.40	5.00
Hydrophone 2	-3.3	-1.7	-13.3	8.23	5.00
Hydrophone 3	-1.7	-3.3	-16.7	11.30	7.64
Hydrophone 4	0	-5	-20	14.87	11.18
Hydrophone 5	0	-5	-15	10.30	7.07
Hydrophone 6	0	-5	-10	6.40	5.00
Hydrophone 7	0	-10	-10	10.77	10.00
トリガン NFH	0	0.642	-4.15	1.96	
	0	0.642	-8.15		
1500LL NFH	-0.7	-0.757	-6	1.03	
	-0.7	-0.757	-10		

* 表中XYZは振源周囲のローカル座標を示す。振源位置XYと水面Zを原点とする。

Station	X	Y	Z	振源距離(ガン深度6m)	振源距離(ガン深度10m)
SUM1(Lennertz地震計)	-136110	-38914.6	50.7	102.312	102.858
SUMK1(加速度計)	-136262	-38876.2	44	177.665	177.829

* 表中XYZは平面直角座標Ⅱ系

図 1-2-11. 発振点近傍観測 (ハイドロフォンおよび最近接陸上点)

陸上観測ではエアガン発振によって生じた人工地震波を振源の近傍の観測点群と桜島島内にもうけられた観測点群の2つの観測点群で観測した。

振源近傍の観測点群では、エアガン周囲の測定に加えて発振点(住吉池湖面)を起点として桜島方向(南南東方向)に約1.2 kmにわたって観測点を展開した。以降ではこの観測点群を住吉池測線(SUM)と称することにする。

もう一つの観測点群は住吉池から見て始良カルデラの向こう側に位置する桜島北東部の高免地区に展開された。これを高免アレイ(KOMA)と称することにする。KOMAはさしわたし600mの範囲内に孔中観測点(BKOM)と地表設置観測点(SKOM)で構成された。観測点座標はハンディナビGPSでセンサ位置を3回計測した結果の平均値をもちい、標高は左記センサ位置の平均値の標高を地理院地図で読み取ったものを使用した。すべての陸上観測点位置を表1-2-2に示す。

表 1-2-2. 人工地震観測点（陸上）

Station	X	Y	Z	振源距離(ガン深度6m)	振源距離(ガン深度10m)
KOM	-153523.4087	-29701.0993	41.0	19666.480	19666.481
SKOM1	-153402.5707	-30461.6642	150.9	19217.238	19217.262
SKOM2	-153578.9216	-30058.9494	139.5	19553.120	19553.141
SKOM3	-153684.4978	-29972.9153	135.5	19686.045	19686.065
SKOM4	-153818.7899	-29924.9144	126.6	19827.554	19827.572
SKOM5	-153976.2714	-29909.2388	112.2	19975.370	19975.385
SKOM6	-153525.4057	-29777.956	127.3	19632.957	19632.975
SKOM7	-153395.6907	-29776.6348	123.1	19518.483	19518.501
SKOM8	-153539.2216	-30366.2389	158.6	19381.844	19381.869
SKOM9	-153606.0402	-30264.9145	160.7	19486.255	19486.281
BKOM1	-153402.5707	-30461.6642	140.9	19217.182	19217.204
BKOM2	-153578.9216	-30058.9494	129.5	19553.071	19553.090
BKOM3	-153684.4978	-29972.9153	125.5	19685.998	19686.016
BKOM4	-153818.7899	-29924.9144	116.6	19827.512	19827.528
BKOM5	-153976.2714	-29909.2388	102.2	19975.336	19975.349
BKOM6	-153525.4057	-29777.956	117.3	19632.914	19632.931
BKOM7	-153395.6907	-29776.6348	113.1	19518.443	19518.458
SUM1	-136110.2219	-38914.6021	50.7	102.312	102.858
SUM2	-136392.9624	-38911.8808	36.8	312.951	312.952
SUM3	-136429.4111	-38654.3737	70.2	371.271	371.631
SUM4	-136419.0325	-38464.8905	100.8	479.893	480.426
SUM5	-136903.2215	-38553.8457	20.3	848.598	848.521
SUM6	-137065.3971	-38175.5399	38.7	1161.024	1161.031
SUMK1(加速度計)	-136262.058	-38876.199	44.0	177.665	177.829

* 表中XYZは平面直角座標Ⅱ系

住吉池測線は発振点周辺における発振振幅の観測、発振による堰堤への影響調査、近隣居住地における振動評価を目的として発振点を起点として1.2 kmの区間内に6点の速度計と1点の加速度計を展開した。住吉池測線を構成する観測点の座標を後述の桜島側観測点群と合わせて表 1-2-2 に示す。

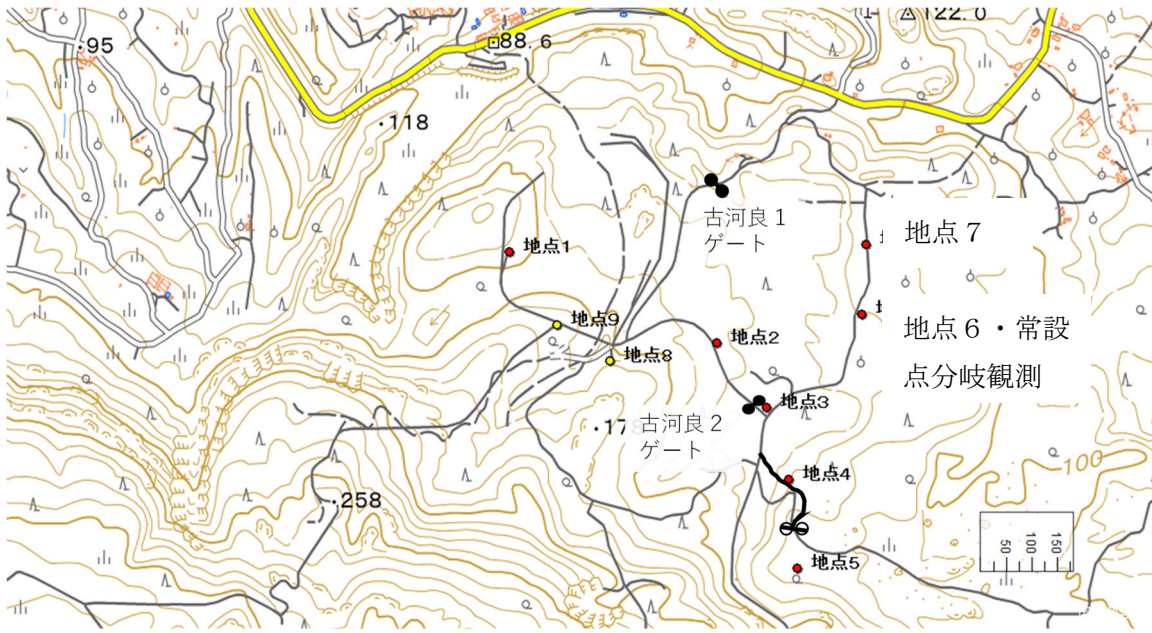
住吉池測線観測点 SUM1～6 は Lennarz 1 Hz 三成分速度型地震計+記録装置 DAQ-link4 または記録装置 GSR を、加速度計観測点 SUMK1 では JEP-6A3 過減衰型動コイル加速度計+記録装置 DAQ-link4 を採用した。

住吉池測線の観測点位置を図 1-2-12 に示す。住吉池測線では、振源から一番近い住居は発振点から約 300m の地点（SUM2 近傍）にあり、その地点から遠方には連続して住居が点在している。



図 1-2-12. 住吉池測線の展開。速度計 1～6 観測点はそれぞれ観測点 SUM1～6 に対応し、加速度計観測点は SUMK1 に対応する。

高免アレイ (KOMA) は始良カルデラを横断してきた人工地震波の観測を目的として、合計 16 点の臨時観測点と 1 点の常設観測点で構成された (図 1-2-13)。KOMA から SUM を見た方位は $N26.2^{\circ} W$ である。KOMA を構成する合計 17 点の観測網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) 配置を構成している。17 点の臨時観測点のうち 7 点は孔中地震計で 9 点は地表地震計を使用した。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。SKOM の 9 点のうち 7 点は孔中地震計の孔口に設置され、のこり 2 点の地表地震計観



国交省ゲート（鍵あり）

 京大ゲート（鍵あり）

図 1-2-13. 高免アレイ観測点配置図。地点 1～7 はそれぞれ BKOM1～7、SKOM1～7 に対応する。地点 8 および 9 は SKOM8 および 9 にそれぞれ対応する。

観測点は孔中地震計観測点 BKOM1 と BKOM2 の間を埋めるように設置された。1 地点の常設観測点は京都大学火山活動研究センターの KOM（高免）観測点の 3 成分孔中地震計信号を分岐して、常設観測点のテレメトリーシステムとは別系統として GSR3LF で記録を取得した（以降、常設点分岐観測と呼ぶ）。観測点 BKOM では固有周波数 1Hz の三成分地震計（サイスマテック社製 SMN0100-4）に GSR-3LF レコーダー（Geospace 社製）を接続し、SKOM では固有周波数 1 Hz の三成分地震計（Geospace 社製 GS-11F）に GSR-3LF レコーダー（Geospace 社製）を接続して現地収録を行った。BKOM/SKOM 観測点の例として BKOM6 観測点の写真を図 1-2-14 に示す。また、BKOM6 への孔中地震計の設置作業を図 1-2-15 に示す。



図 1-2-14. 高免アレイ観測点の例 (BK0M6 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。



図 1-2-15. 孔中地震計と設置作業。中央の筒状の物体が孔中地震計 (SMN0100-4) 本体である。

各地点における BKOM1～7, SKOM1～7 の模式的な設置状況を図 1-2-16 に示す。

アレイ観測点設置図

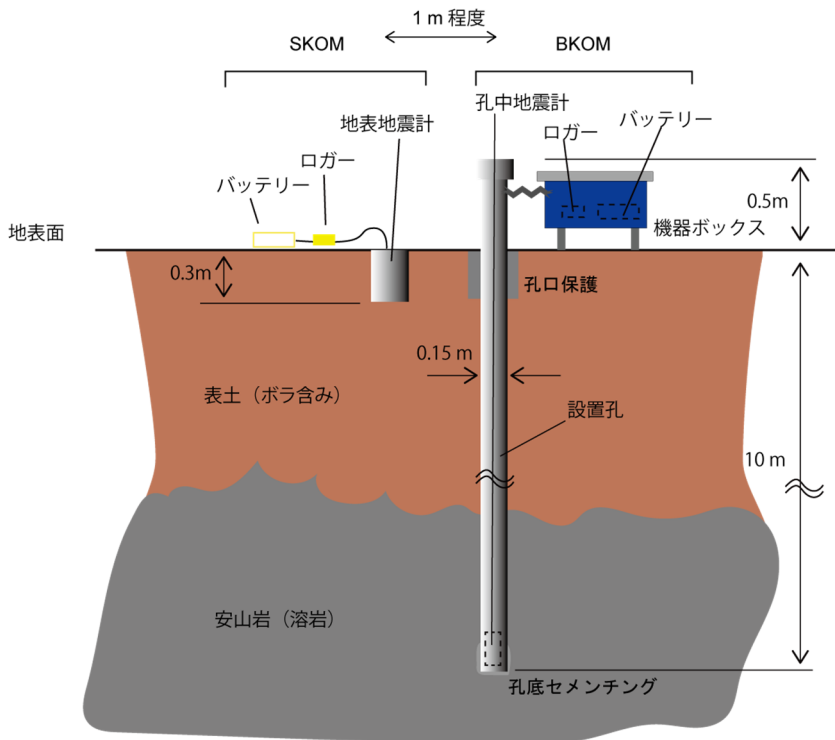


図 1-2-16. 高免アレイ KOMA 観測点 (BKOM および SKOM) 設置構成

観測点 BKOM1～7 はいずれも孔底に安山岩 (主に安永溶岩) が確認されており、珪砂の充てんによって孔中地震計を設置した。観測点 SKOM1～7 は安山岩の上の表土に掘られた約 30cm 深の穴の中に設置された。観測点 SKOM1～9 は図 1-2-17 に示すセットで観測を行った。



図 1-2-17. 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。

また、観測期間中の重合結果作成用データの取得を目的として、KOMA の中に常設されている京都大学防災研究所高免地震観測点 KOM の地震計信号を分岐の上記録を別途取得した。以降ではこれを分岐観測（観測点名 KOM）と称することにする。

分岐観測の結線を図 1-2-18 に示す。KOM は地表から 80m の深さに設置された三成分孔中地震計（明石製作所製 JTS-23）からの信号を分岐し、記録計 GSR-3LF に接続して現地収録を行った。

常設観測点分岐観測

2020/10/31

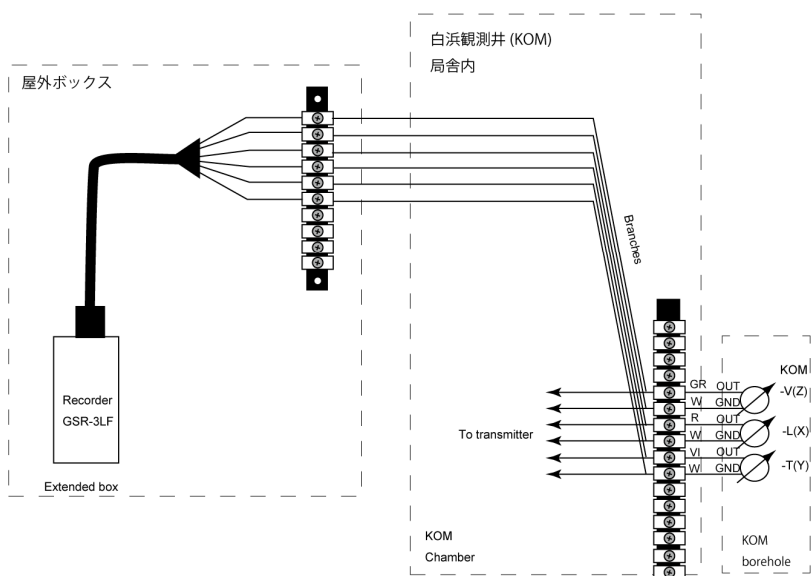


図 1-2-18. 常設点 KOM 分岐観測結線。

d. 発振内容

表 1-2-3 に実施されたエアガン発振の内容を示す。

表 1-2-3. エアガン発振作業内容。

月日	発振内容	時間帯
12/11	発振 AAA (2550 cui, 2000 psi, 10m 深)	AAA: 15 時 31 分～19 時 30 分 3 分間隔 77 回発振、 19 時 30 分～20 時 20 分 10 分間隔 6 回発振
12/12	発振 AAA 続き (2550 psi, 2000 psi, 10m 深)、 発振 BAA (1050 cui, 2000 psi, 10m 深)	AAA: 11 時～18 時 3 分間隔 141 回発振。 BAA: 18 時 15 分～19 時 15 分 1 分 15 秒間隔 49 回発振
12/13	発振 AAB (2550 cui, 2000 psi, 6m 深)、 発振 ABB (2550 cui, 1000 psi, 6m 深)	AAB: 11 時～18 時 25 分 3 分間隔 152 回発振 ABB: 18 時 37 分～19 時 1 分 30 秒間隔 12 回発振

表 1-2-3 に示されるようにエアガン発振は複数の発振パラメータの組み合わせで実施したので、以降はこれらを区別するために以下の 3 文字の簡略なコードで各発振パラメータセットを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

したがって、パラメータセット ABB はエアガン容積 2550cui、動作圧 1000 psi、エアガン水深 6m での発振を表す。

上記エアガン発振に先立つ振源展開作業に 4 日間を要するとともに、振源撤収に 3 日間を要した。当初、エアガン発振作業は 15 時から 23 時までの 8 時間にわたる実施を予定していた。

また後述するような方法で京都大学防災研究所の常設観測点で得られた記録を用いて、繰り返し発振で得られる記録を重合し、その効果も確認しながら作業を進めた。

エアガンの発振状況の写真を図 1-2-19 に示す。



図 1-2-19. エアガン発振作業の全容（12月12日）。中央にクラスタエアガンを懸架したポンツーン、左奥の岸に高圧コンプレッサと現場本部が位置している。ポンツーン右側は作業船。

第1日目にエアガンクラスタのフルボリューム発振（発振パラメータセット AAA）を実施したところ、この人工地震波は桜島島内観測点で容易に直接確認できる振幅をもって到来することが確認できた。発振パラメータセット AAA 発振時は湖畔周辺でもその振動を体感できるレベルであった。発振と同時にポンツーンが振動し、約7秒後に水面にバブル（気泡）が達した。懸念されていたポンツーンへの影響はさほど大きくなく、発振後のバブルで毎回ポンツーンが向かって左側方向にゆっくりと流され最大変位に達したのち徐々に元の位置に戻る動きをしていた。バブルによるポンツーンの水平変位は約3m、垂直変位は約10cm、回転角は約3度であった。しかし、日没後に近隣住居から空振と振動の申し立てがあり、発振間隔を長めにとることで対処を行った。このことから第1日終了時に第2日目以降の発振時間帯の4時間繰り上げを決定した。

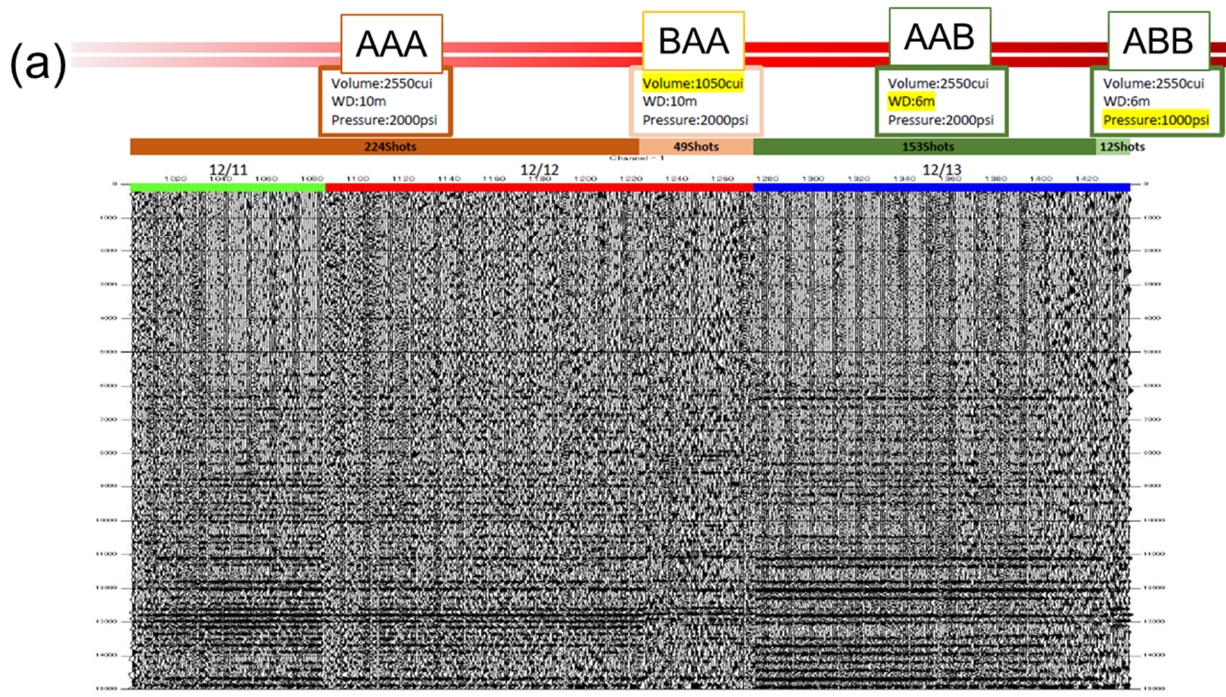
第2日目は発振スケジュール全体を4時間繰り上げて実施された。変更後の第2日目の発振項目はフルボリューム発振（発振パラメータセット AAA）を引き続き行い、このパターンにおけるエアガン近傍の衝撃圧測定を完結した。発振パラメータセット AAA の発振が必要回数に達したのち、トリガン単体による発振（発振パラメータセット BAA）の実施を追加した。発振パラメータセット BAA は本来のエアガンクラスタを構成するエアガンのうちトリガンだけを作動させるものである。これは空振と体感振動の軽減をはかり近隣に与えるストレスを軽減しながらも桜島における最小限振幅の人工地震波の到来を確認することが目的である。長期連続反射法における継続可能な発振仕様を探ることであり、本実験の主旨に合致した仕様変更である。

また引き続き第3日目の発振は将来のピット建造を想定して、当初第2日目に実施する予定であった6m深のフルボリューム発振（発振パラメータセット AAB）を実施するとともに、同深度フルボリュームの減圧発振（発振パラメータセット ABB）を実施することにした。減圧発振の実施は借用機材の破損を防ぐために最小限とした。発振パラメータセット ABB 発振時は遠方からの目視でポンツーン上に明瞭な振動が観察された。バブルは発振後約3秒で水面に達してポンツーン開口部から上昇しポンツーンデッキ面を洗うほどの水柱を立て崩壊していた。発振後のポンツーンの動きは少なくほぼ位置は移動していない。エアガン発振によるポンツーンの振動が著しかったが、ポンツーンフレームの歪み・損傷等は無かった。

(1)-2-2. 結果

a. 観測データ

3日間にわたるエアガン発振の観測で総容量 208G バイトの波形データおよび画像データを取得した。常設点分岐観測 KOM における各成分の波形を発振の順に並べたものを図 1-2-20 に示す。



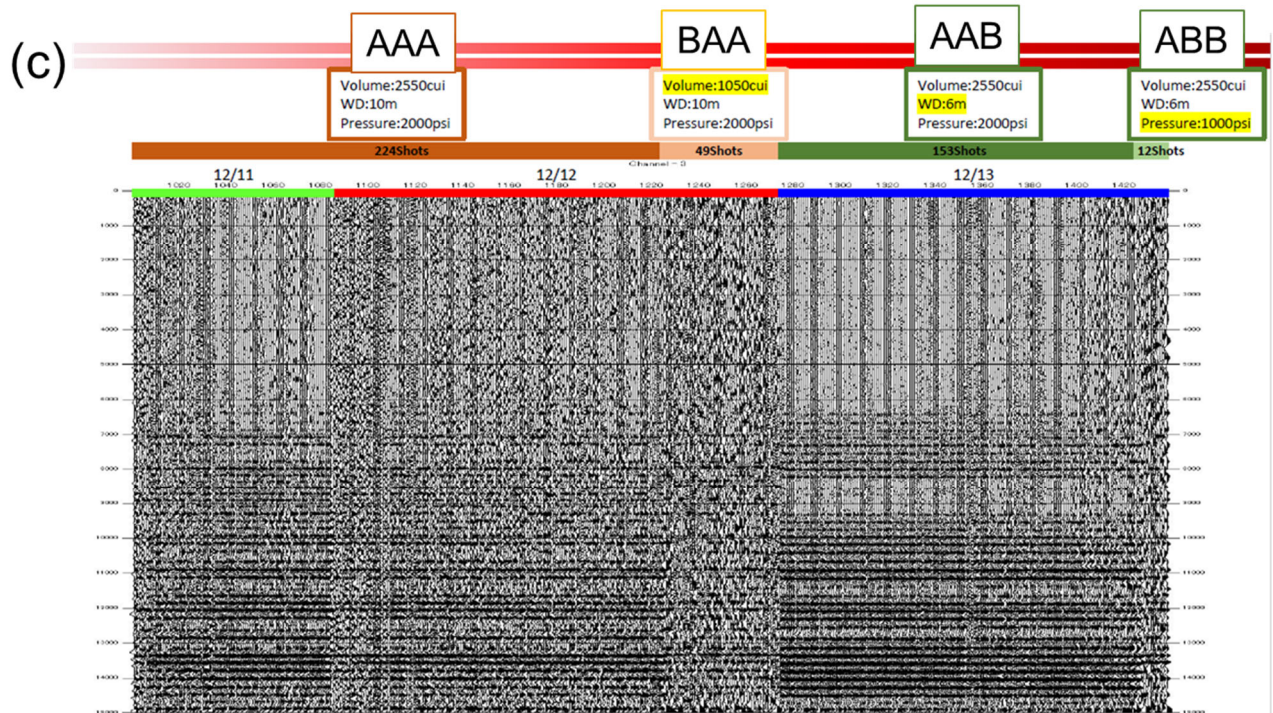
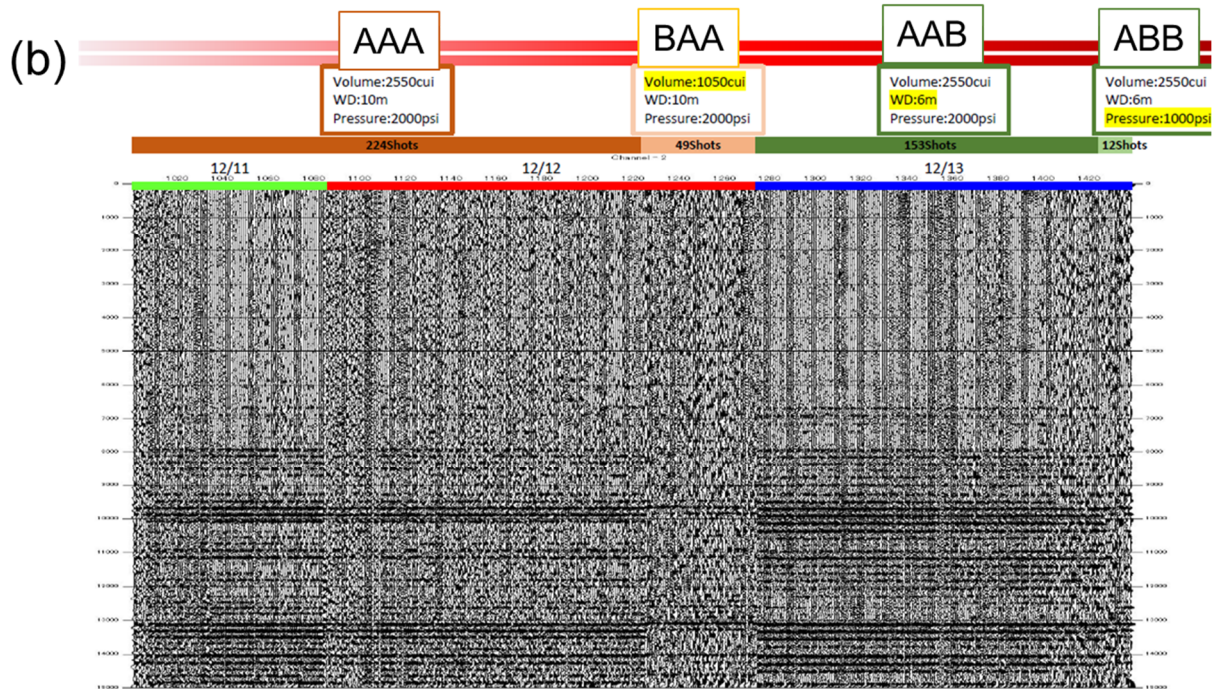
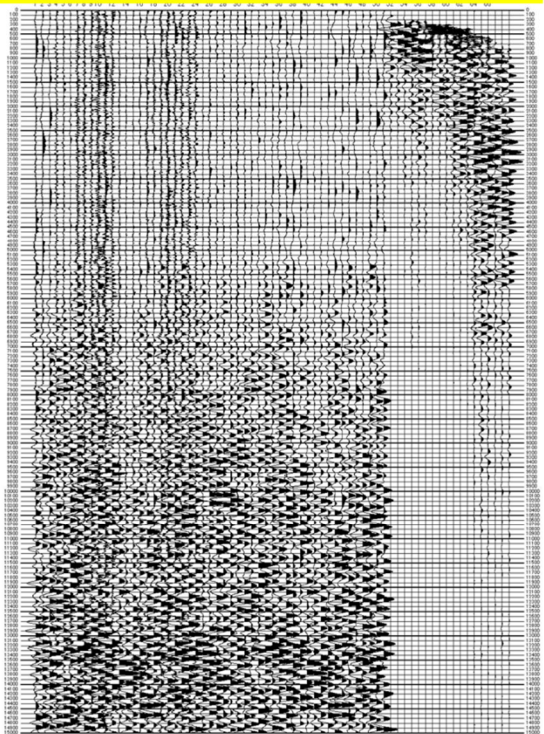


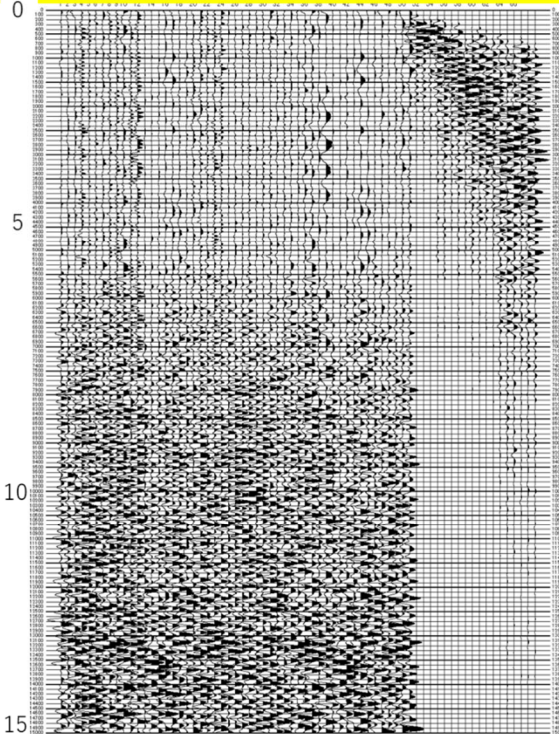
図 1-2-20. 観測点 KOM における全観測波形。(a) 上下動成分、(b) 南北成分、(c) 東西成分を発振の順に並べて示す。

次に主要な 3 つの発振パラメータセット (AAA, BAA, AAB) のもとで観測されたデータの例を図 1-2-21 に示す。いずれも 40 回スタックの結果を示す。

(a) AAA [Volume:2550cui, Pressure:2000psi, Depth:10m]



(b) BAA [Volume:1050cui, Pressure:2000psi, Depth:10m]



(c) AAB [Volume:2550cui, Pressure:2000psi, Depth:6m]

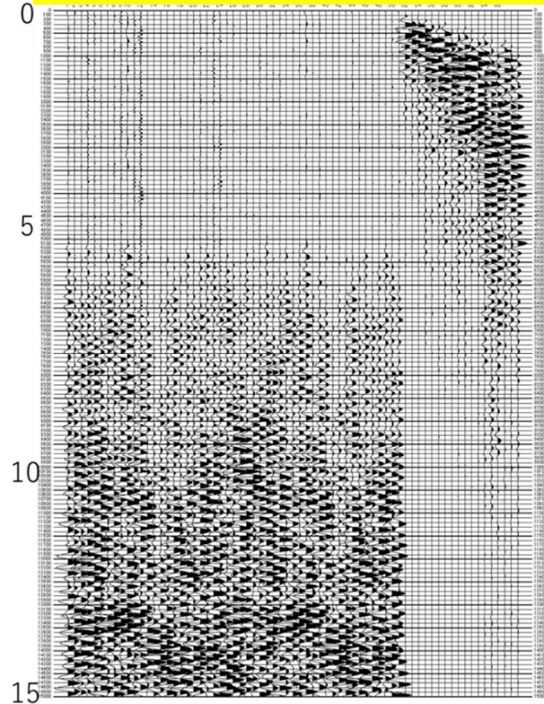


図 1-2-21. 主要な発振パラメータセットで得られた 40 回スタック後の全観測波形。(a)発振パラメータセット AAA、(b)発振パラメータセット BAA、(c)発振パラメータセット AAB に対する全観測点の全成分を示す。

以上のように3つの発振パラメータセットのいずれでも十分なS/N比をもったデータを得ることができた。

次に最も重要な2つの発振パラメータセットAAAとBAAについて、各観測点で得られた記録の振幅を以下のように整理した。

振源パラメータAAAとBAAの40重合後のエアガン発震記録に基づき、初動の最大振幅(mV)を読み取った。この値にセンサの感度係数を適用してkine値(振幅の絶対値)に換算し、オフセット距離(振源距離)(km)と共に整理した。

最初に発振パラメータセットAAAの場合を表1-2-4に示す。KOMAにおける地表点SKOMと孔中点BKOMとを比較すると、SKOMのほうが大きな振幅を示す傾向がある。また、振源に最も近い住居に隣接したSUM2観測点(振源距離313m)では 2.6×10^{-3} cm/s、振源に最も近い県道に面したSUM5観測点(振源距離849m)では 6.1×10^{-4} cm/sの地動速度が得られている。Muramatu(1966)が提唱した最大速度振幅と震度階の関係式を適用すると、いずれも震度階では1以下の値となり器物の破損が生ずるレベルではない。

表1-2-4. 発振パラメータセットAAAによる最大速度振幅値

AAA

	CH	Arrival (sec)	Amplitude (mV)	Max velocity (cm/s)	Distance (km)
KOM	1	5.158	-0.002687	1.18E-06	19.67
SKOM1	4	5.176	-0.00466	3.94915E-06	19.22
SKOM2	7	5.224	-0.003233	2.73983E-06	19.55
SKOM3	10	5.248	-0.003745	3.17373E-06	19.69
SKOM4	13	5.272	-0.003274	2.77458E-06	19.83
SKOM5	16	5.298	-0.002356	1.99661E-06	19.98
SKOM6	19	5.216	-0.002799	2.37203E-06	19.63
SKOM7	22	5.198	-0.003129	2.65169E-06	19.52
SKOM8	25	5.18	-0.00711	6.02542E-06	19.38
SKOM9	28	5.162	-0.003794	3.21525E-06	19.49
				Max velocity (cm/s)	
			平均値	3.21E-06	
			標準偏差	1.12E-06	
BKOM1	31	5.168	-0.002332	2.33200E-06	19.22
BKOM2	34	5.228	-0.00246	2.46000E-06	19.55
BKOM3	37	5.244	-0.002126	2.12600E-06	19.69
BKOM4	40	5.28	-0.002421	2.42100E-06	19.83
BKOM5	43	5.294	-0.001959	1.95900E-06	19.98
BKOM6	46	5.22	-0.00192	1.92000E-06	19.63
BKOM7	49	5.254	-0.001494	1.49400E-06	19.52
				Max velocity (cm/s)	
			平均値	2.10E-06	
			標準偏差	3.18E-07	
SUM1	52	0.216	-89.74511	2.24363E-02	0.1
SUM2	55	0.324	-10.577502	2.64438E-03	0.31
SUM3	58	0.382	-9.402565	2.35064E-03	0.37
SUM4	61	0.492	-5.96231	1.49058E-03	0.48
SUM5	64	0.58	-2.449776	6.12444E-04	0.85
SUM6	67	0.77	-4.536633	1.13416E-03	1.16
				Max velocity (cm/s)	
			平均値	5.11E-03	
			標準偏差	7.78E-03	

次に発振パラメータセット BAA の場合を表 1-2-5 に示す。

表 1-2-5. 発振パラメータセット BAA による最大速度振幅値

BAA	CH	Arrival (sec)	Amplitude (mV)	Max velocity (cm/s)	Distance (km)
KOM	1	5.158	-0.00048	2.11E-07	19.67
SKOM1	4	5.176	0.002084	1.7661E-06	19.22
SKOM2	7	5.224	0.000121	1.02542E-07	19.55
SKOM3	10	5.248	-0.000171	1.44915E-07	19.69
SKOM4	13	5.272	-0.000853	7.22881E-07	19.83
SKOM5	16	5.298	-0.000287	2.4322E-07	19.98
SKOM6	19	5.216	-0.001277	1.0822E-06	19.63
SKOM7	22	5.198	-0.00158	1.33898E-06	19.52
SKOM8	25	5.18	-0.001277	1.0822E-06	19.38
SKOM9	28	5.162	-0.001695	1.43644E-06	19.49
				Max velocity (cm/s)	
			平均値	8.80E-07	
			標準偏差	5.74E-07	
BKOM1	31	5.168	0.000178	1.78000E-07	19.22
BKOM2	34	5.228	-0.000123	1.23000E-07	19.55
BKOM3	37	5.244	-0.000494	4.94000E-07	19.69
BKOM4	40	5.28	-0.000567	5.67000E-07	19.83
BKOM5	43	5.294	-0.00029	2.90000E-07	19.98
BKOM6	46	5.22	-0.000931	9.31000E-07	19.63
BKOM7	49	5.254	0.00031	3.10000E-07	19.52
				Max velocity (cm/s)	
			平均値	4.13E-07	
			標準偏差	2.57E-07	
SUM1	52	0.216	-17.428617	4.35715E-03	0.1
SUM2	55	0.324	-2.544102	6.36026E-04	0.31
SUM3	58	0.382	-3.819966	9.54992E-04	0.37
SUM4	61	0.492	-0.708073	1.77018E-04	0.48
SUM5	64	0.58	-1.719309	4.29827E-04	0.85
SUM6	67	0.77	-1.821152	4.55288E-04	1.16
				Max velocity (cm/s)	
			平均値	1.17E-03	
			標準偏差	1.45E-03	

KOMA における地表観測点 SKOM と孔中観測点 BKOM とを比較すると、SKOM のほうが大きな振幅を示す傾向があるのは AAA の場合と同様である。また、振源に最も近い住居に隣接した SUM2 観測点（振源距離 313 m）では 6.2×10^{-4} cm/s、振源距離 849 m 地点に位置する SUM5 観測点では 4.3×10^{-4} cm/s の地動速度が得られている。SUM2 観測点の最大振幅では発振パラメータセット AAA の約 1/4 になっている。この例でも Muramatu (1966) が提唱した最大速度振幅と震度階の関係式を適用すると、いずれも震度階では 1 以下であり器物の破損が生ずるレベルではない。

発振パラメータセット BAA のピーク振幅は発震パラメータセット AAA のそれに比べて、SKOM で 0.27 倍、BKOM で 0.15 倍、SUM で 0.22 倍であった。全観測点を単純に平均すると BAA で得られるピーク振幅は AAA の 0.21 倍であった。

b. 初動走時

SUM において上下動成分の初動を読み取った結果を走時曲線として下図 1-2-22(a) に示す。

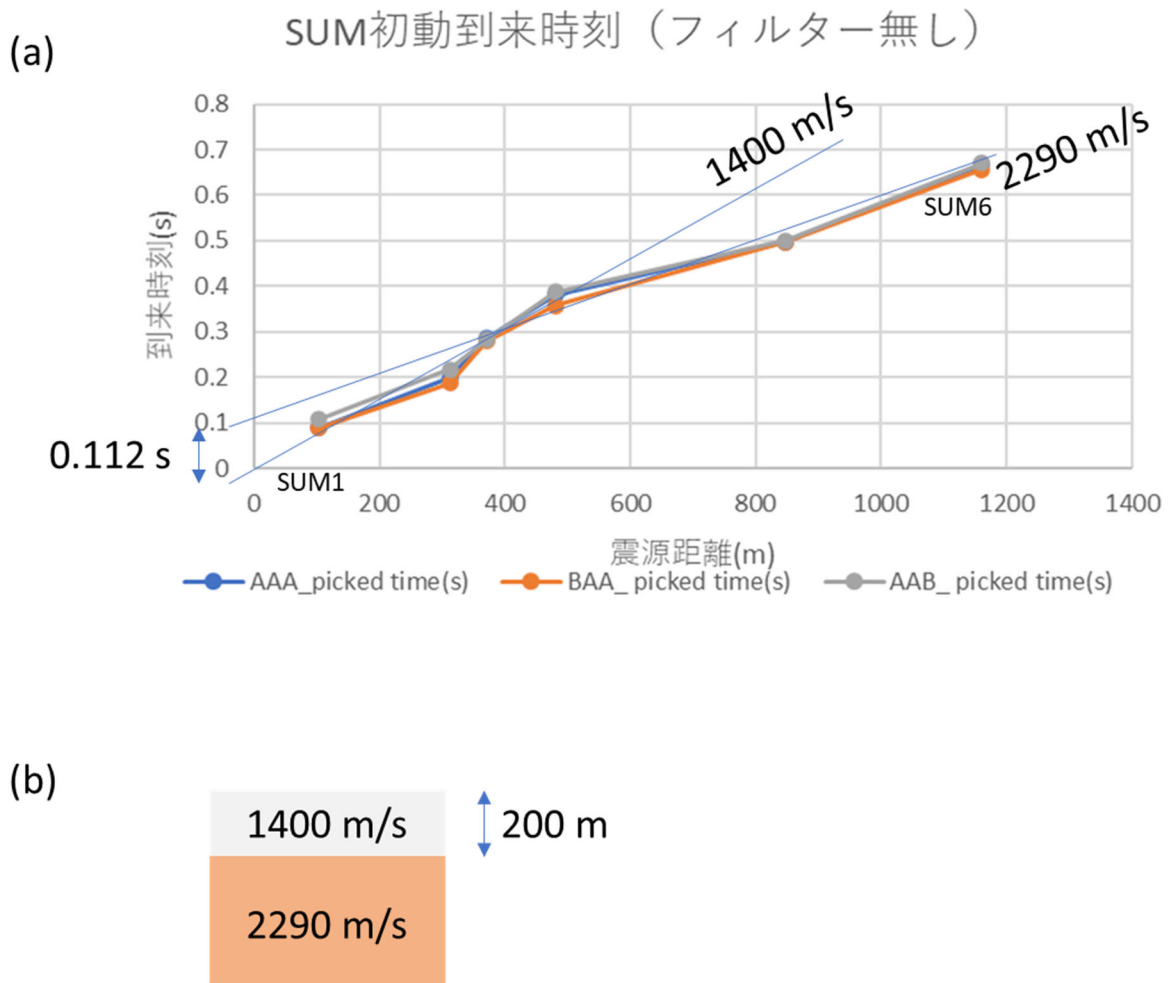


図 1-2-22. SUM 測線における初動走時曲線 (a) と求められた概略 P 波速度構造。

水平成層の仮定のもとで図 1-2-22 (b) の走時曲線を解釈すると、振源から 500m 以内の地点では 1400 m/s を、それ以遠では 2290 m/s のみかけ速度を示し、エアガン水深補正後の原点走時 (インターセプトタイム) は 0.112 s である。以上のことから水平成層構造における屈折法解析を施すと、(b) のような構造が住吉池周辺の概略の P 波速度構造として推定される。

c. 発振条件ごとの振源波形の差異

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。本実験で実施した 4 つのパラメータ組み合わせパターンのスペクトルの差異について、振源近傍の住吉池測線と遠方の桜島測線におけるスペクトルを示して報告する。

最初に今回の実験で実施された発振について表 1-2-6 として示す。

表 1-2-6. エアガン発振作業内容

パターン名	エアガン総容量 (cui)	動作圧 (psi)	エアガン中心深度 (m)	1回あたり放出エネルギー (J)	実施時間	ショット回数
AAA	2550	2000	10	70324.6	2020/12/11 15:31-19:24, 19:30-21:00, 2020/12/12 10:57-17:58	77回 (3分間隔), 6回 (10分間隔), 141回 (3分間隔)
BAA	1050	2000	10	36272.8	2020/12/12 18:15-19:15	49回 (1分15秒間隔)
AAB	2550	2000	6	49291.7	2010/12/13 10:58-18:25	152回 (3分間隔)
ABB	2550	1000	6	11988.1	2020/12/13 18:37-19:00	11回 (1分30秒間隔)

上表の1回あたり放出エネルギーはエアガンシミュレーションソフトウェア GUNDALF (Hatton and Haartsen, 1990)によって計算した理論値を示す。

水中観測のトリガンに近接したハイドロフォン(以下 NFH)で取得されたすべての発振パラメータセットの振源波形を下図に示す。

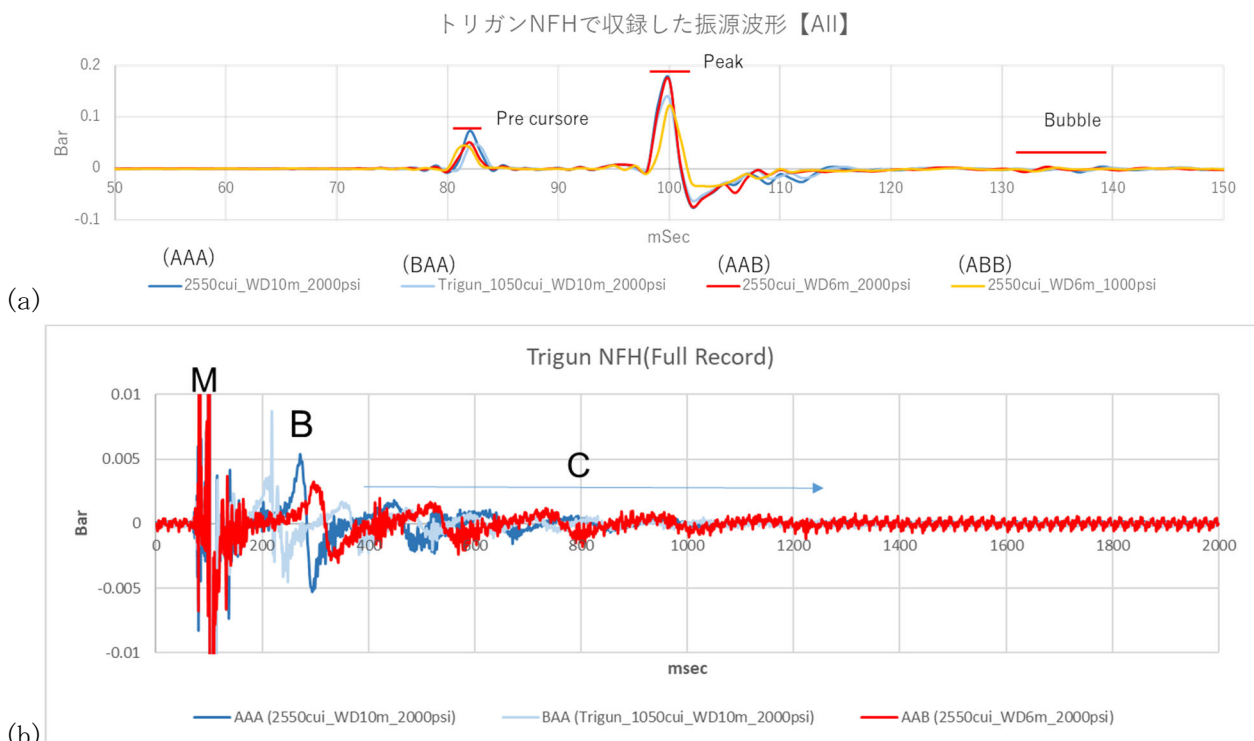


図 1-2-23. 全発振パラメータセットのトリガン NFH 波形の比較。(a)発振時付近拡大、(b) NFH 記録全長をそれぞれ示す。

図 1-2-23a はトリガン上方に取り付けられたトリガン NFH の波形である。主要動はエアガンからの圧縮空気の放出に伴う主要動で、その 20ms 直前のプリカーサはエアガンのソレノイドバルブの作動にともなう信号である。また主要動放出後の Bubble はエアガンから放出された圧縮空気の泡にともなう信号である。

図 1-2-23b は さらにトリガン NFH 記録全長 (2 秒) にわたる近傍波形を拡大して示したものである。主要動 M に引き続くバブル相 B、そして B に引き続くコーダ部 C の特徴を明瞭に認めることができる。同じ水深でエアガン構成が異なる AAA と BAA に対しての主要部分の差異は先にも記述しているが、BAA のほうが M と B の時間差の小さいことが認められる。同じエアガン構成で水深が異なる AAA と AAB とでは AAB のほうが M と B との時間差が大きいことが認められる。短周期成分を取り除いたバブル相 B の振幅は AAA が最大で BAA と AAB はほぼ同じである。コーダ相 C では単調減少する包絡線をとともなう振動が見受けられる。AAA では 184 ms、BAA は 138 ms、AAB は 221 ms の振動周期が卓越する。周波数にするとそれぞれ、5.4 Hz, 7.2 Hz, 4.5 Hz である。

つぎに図 1-2-24 に示すのはエアガンの組み合わせが異なるパラメータセット AAA と BAA の発振時刻付近の NFH 波形の比較である。主要動ではパラメータセット BAA は AAA の 0.79 倍の振幅を示していることと、bubble 部分の振幅が AAA より小さいことがうかがわれる。

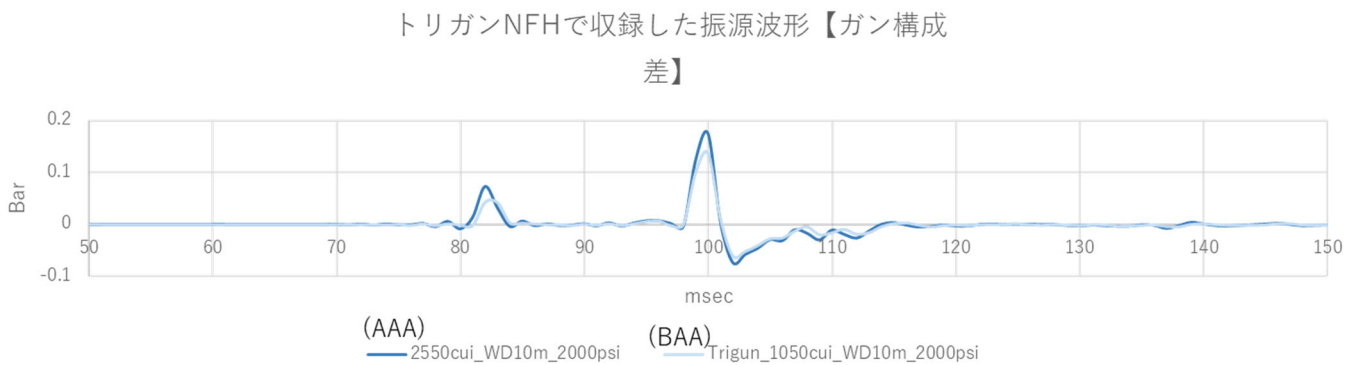


図 1-2-24. 異なるエアガン構成によるトリガン NFH 波形の比較

一方、同じエアガンの組み合わせでエアガン水深を変えた場合のパラメータセット AAA と AAB の発振時刻付近の比較を図 1-2-25 に示す。エアガンの組み合わせが同一であるので、主要動に最大振幅の差はない。一方、主要動から約 5ms 以降の AAA と AAB との差は明瞭である。AAA に比べて AAB のほうが主要動に続くローブが速く 0 に収束する傾向が見受けられることと、AAA のほうがバブル相 B の継続時間が長い傾向が見受けられることである。

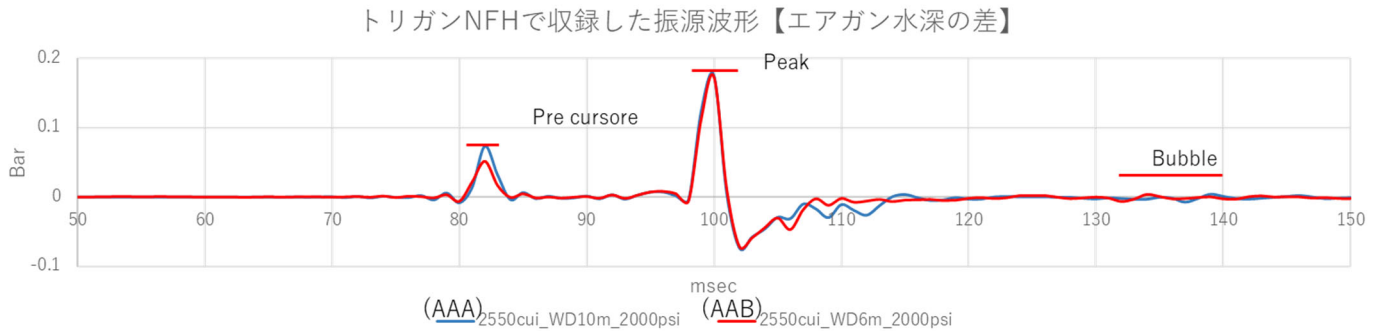


図 1-2-25. 異なるエアガン水深におけるトリガン NFH 波形の比較。

d. 振源近傍の地表観測点における波形の比較

先述の NFH (エアガン近傍の最近接ハイドロフォン) 波形の主要動では発振パラメータセットの違いによる差は明瞭ではなかったが、相対的に遠方に位置する地震計記録では発振パラメータセットによって顕著な差異が認められる。

異なる発振パラメータセットによる発振波形の差を振源にもっとも近い地表観測点 SUM1 (振源距離 102m) における上下動観測波形を図 1-2-26 に示す。

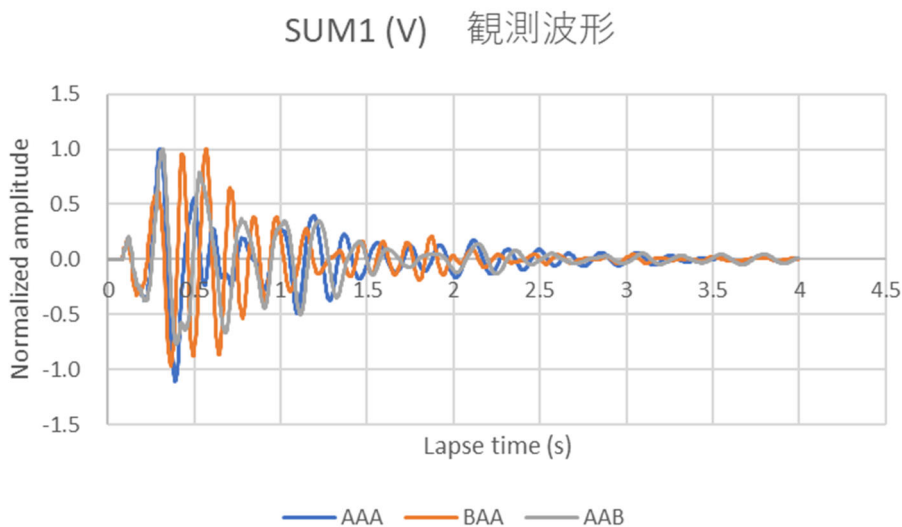


図 1-2-26. SUM1 観測点における上下動成分観測記録。最大値による規格化をほどこしたものの。

図 1-2-26 では発振パラメータセット AAA および AAB はともに主要動 2 サイクル目で最大振幅をとること、1.1 秒後および 2.0 秒後に遅れて明瞭な波群が現れる特徴があることが示されている。これに対して発震パラメータセット BAA は初動 1 サイクル目のピークが早く表れるが最大振幅は 3 サイクル目に現れる。AAA および AAB で見られる 1.1 秒後および 2.1 秒後の波群は見られず、2 秒を過ぎると急速に振幅が収れんすることが BAA の振源波形では注目されることである。

SUM1 観測点における振幅の絶対値と積算振幅を図 1-2-27 に示す。

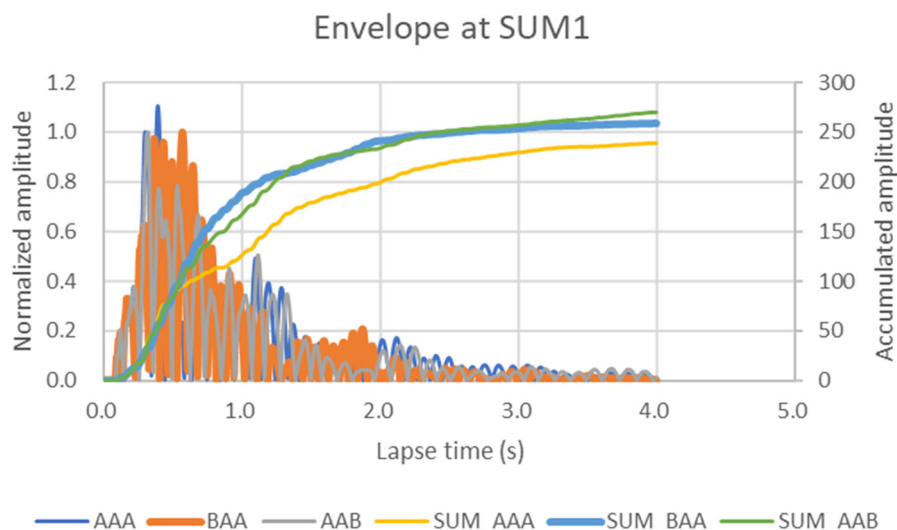


図 1-2-27. 発振パラメータセットごとの波形包絡線と振幅積算の推移（振源距離 102 m, SUM1 観測点上下動成分）。

発振パラメータセット AAA と AAB はほぼ同様なエンベロープの特徴を示す一方で、発振パラメータセット AAA と BAA ではエンベロープの時系列に大きな差のあることが示されている。すなわち発振パラメータセット AAA と AAB では発振時から約 0.3 秒のところと 1.1 秒、2.1 秒のところにエンベロープのピークがあるのに対して、発振パラメータセット BAA では発振時から 0.3 秒付近と 0.6 秒付近にエンベロープのピークが隣接して全体として幅 0.4 秒のピークを形成している。振源パラメータ AAA および AAB の場合のほうがエンベロープは長く続き、波形継続時間が長い。

発振パラメータセット BAA と AAA のグループおよび AAB のグループとのエンベロープの差は先述の振源近傍 NFH 波形（図 1-2-24）では認められなかった現象である。したがって両者のエンベロープの差は振源装置から直接発生したものではなく、振源装置から SUM1 に至る経路上で発生した可能性が高い。

e. 発振条件ごとのスペクトルの比較

次に震源近傍の住吉池測線 SUM1 観測点（振源距離 102m）で観測された波形のスペクトルを図 1-2-28 に示す。

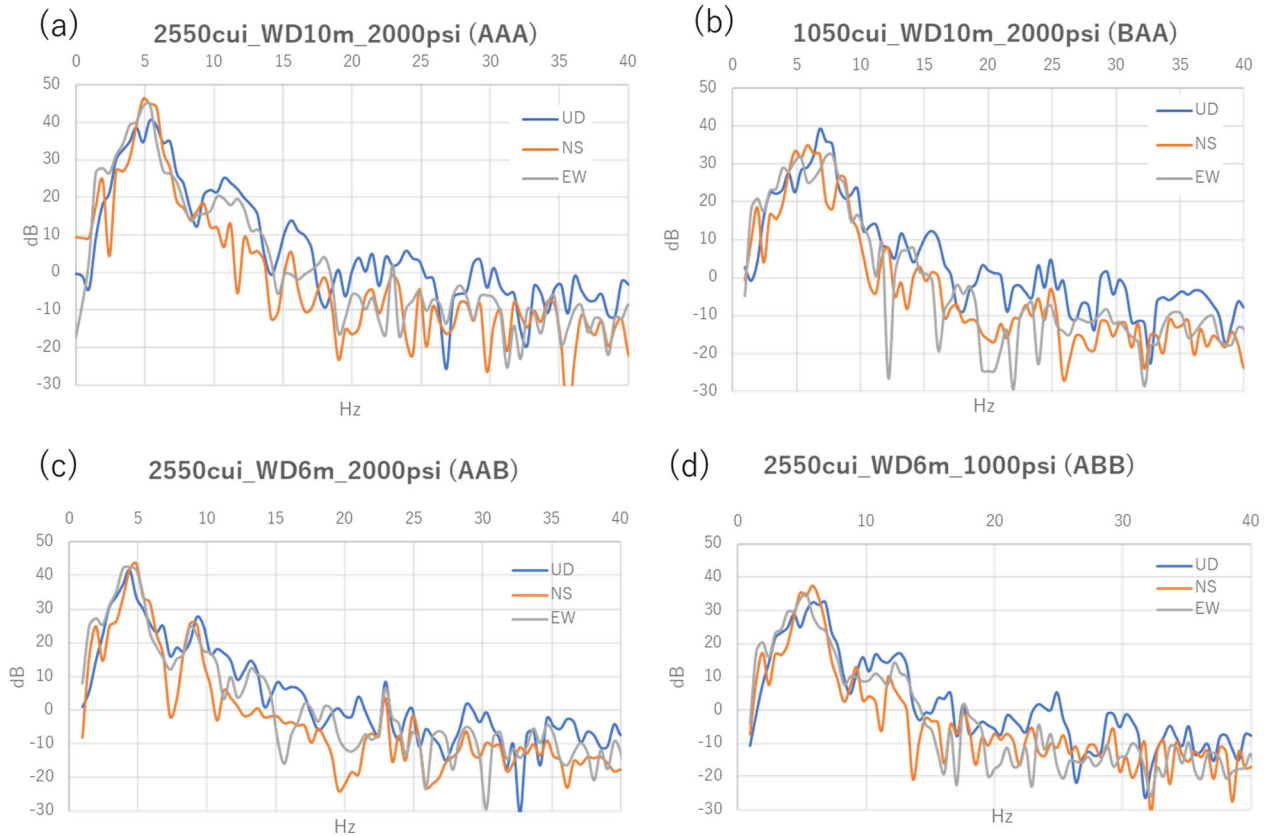


図 1-2-28. 発振パラメータセットの違いによるスペクトルの比較（振源距離 102m SUM1 観測点 全成分）。

いずれの発振パラメータセットの場合でも全ての成分の 2~10Hz の帯域にスペクトルの最大ピークが現れており、本実験で選択した発振パラメータセットは深部の地震波反射の観測に適切な周波数成分を放射していることが示された。発振パラメータセット AAA に対して、エアガン容積の小さいパラメータセット BAA は最大ピークの幅が大きい傾向を示している。また水深の小さいパラメータセット AAB は最大ピーク幅が小さくなる傾向を示している。このことはパラメータセット BAA のケースのほうが AAA のケースより広い周波数帯域でパワーをもつインパルスに近い波形が放射されていることを意味しており、BAA の振源近傍波形の継続時間の短いことと整合する。

発振パラメータの差によるピークスペクトル形状の差は遠方の KOMA（振源距離 19.7 km）でも観察される。次の図 1-2-29 は KOM 観測点上下動成分における各発振パラメータセットのスペクトルを示す。

KOM V成分における発振パラメータによるスペクトルの比較

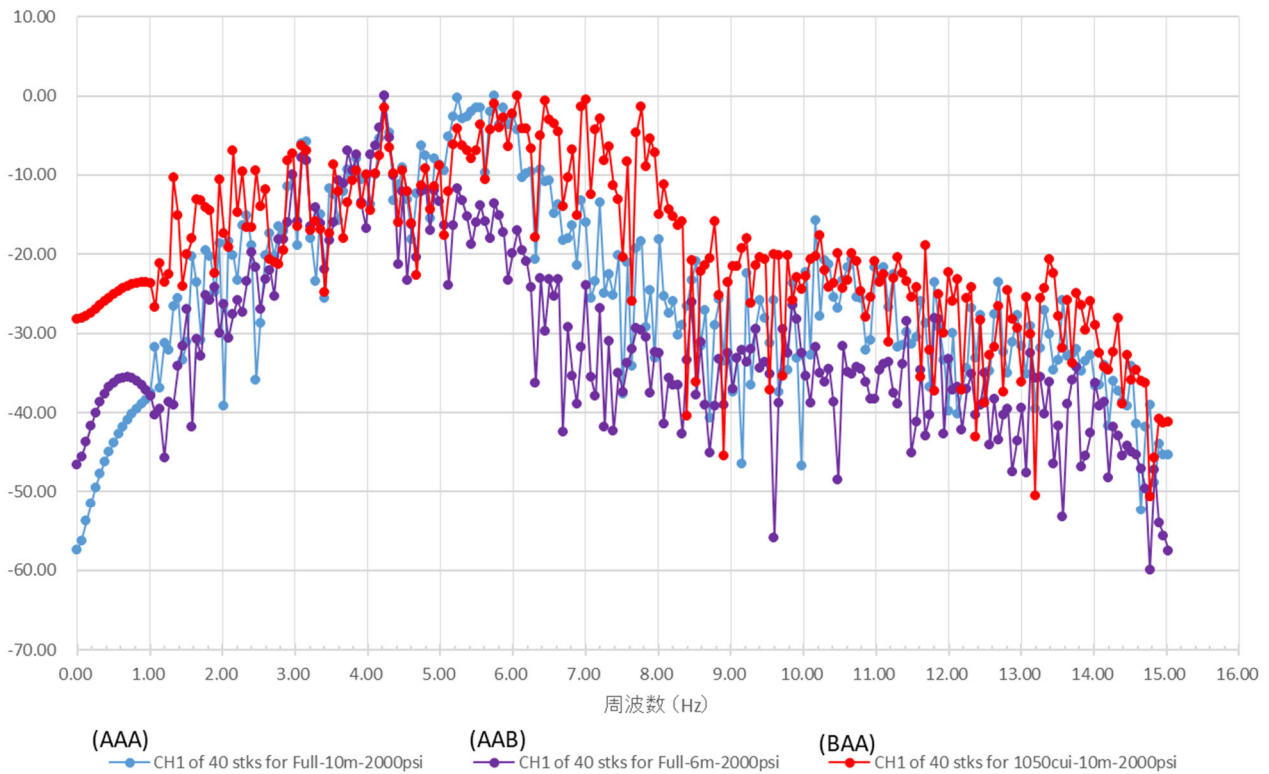


図 1-2-29. 発振パラメータセットによるスペクトルの比較（震源距離 19.7 km KOM 観測点上下動成分）

KOMA においても SUM と同様な傾向が表れており、発振パラメータ AAA よりも BAA のほうがよりフラットな周波数特性の人工地震波を発生することが示されている。

発振パラメータセット BAA(トリガン単体 1050cui)のエネルギーは発振パラメータセット AAA の半分ぐらいであるが、第一ピークが 4.2 Hz 付近でピークの高さは AAA の場合の 7.5Hz ピークの半分になることがわかった。

今回の 3 つのパラメータセットに対してシミュレーションソフトウェア GUNDALF (Hatton and Haartsen, 1990) が与える振源波形の周波数成分を図 1-2-30 に示す。

各発振パラメーターにおける振源波形スペクトル比較

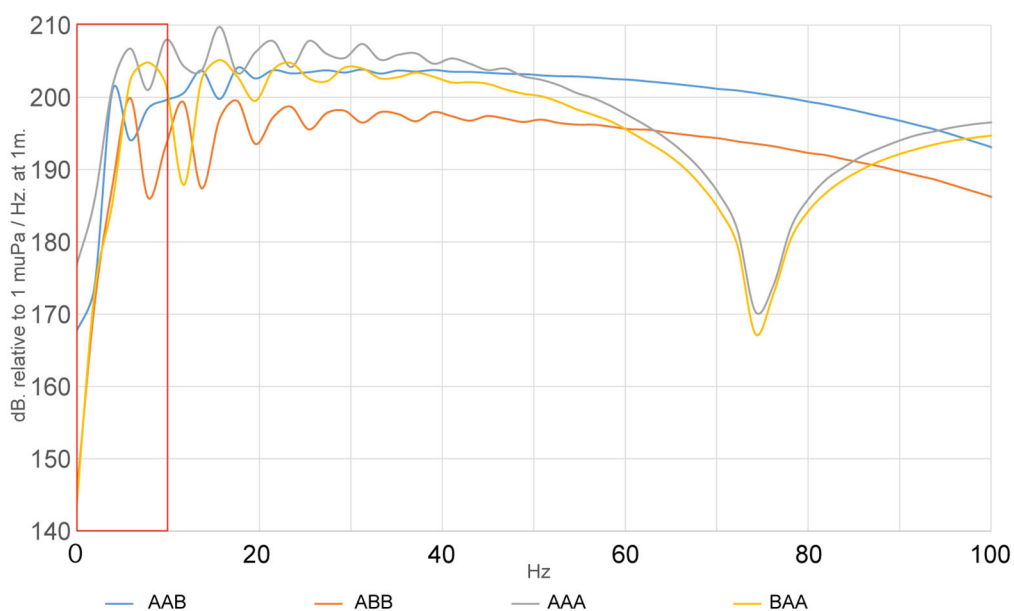


図 1-2-30. シミュレーションによる各発振パラメータの振源波形スペクトルの比較。

図 1-2-30 の赤枠内が基礎実験で特に注目した周波数帯 (0-10 Hz) を示す。図 1-2-30 では赤枠内のパラメータセット AAA と AAB はそれぞれ 5 Hz と 6 Hz 付近にピークが現れているのに対して、パラメータセット BAA ではそれより高周波の 7 Hz にピークが現れている。また、パラメータセット BAA のピークはピーク付近ではピーク付近の幅が、AAA および AAB のそれにくらべて広い傾向を示している。

今回の実験結果ではパラメータセット AAA および AAB のピーク周波数は前者が 5 Hz 付近、後者が 7 Hz 付近に観測され、シミュレーションが示すピーク周波数の差と同じ傾向がある。一方、パラメータセット BAA のピークが 7 Hz 付近に観測されることと、ピークが他のパラメータセットに比べて幅広い傾向もシミュレーション結果が示す傾向とよく一致しており、シミュレーションと観測結果とはよく整合しているといえる。

始良カルデラプロジェクトで重要なのはカルデラの地下深部まで達して戻ってくる反射波が卓越する 2~10Hz の周波数帯でどのぐらいのエネルギーが出るかということである。先述の発振パラメータセット AAA (2550cui_10m_2000psi) と BAA (1050cui_10m_2000psi) とでは 10Hz 以下のピークがそれぞれ 4.2 Hz と 7.5 Hz であったが、これらのピークの高さは 3 割も変わらない。そのために BAA (トリガン 1 組) でも十分な振幅の記録が得られたのではないかと考える。

またピークの半値幅に注目すると 1050cui のトリガン単独のパラメータセット BAA の 7.5 Hz ピークのほうの半値幅にくらべて、2550cui のパラメータセット AAA および AAB のほうはピークの半値幅がそれよりも狭い。このことは 2550cui のクラスタエアガンを用いた場合には時間領域波形の継続時間が長くなることを意味しており、波形記録の「キレ」が悪くなる方向に向かっていることがわかった。実際に同じクラスタで深さを変えた場合の観測記録を見てもそのような傾向がある。

f. 発振の進行にともなうスペクトルの再現性

個々の発振パラメータセットにおける発振の進行に伴うスペクトルの変化を次の図 1-2-31 に示す。いずれの図もピーク周波数で規格化したスペクトルを示している。

最初に発振パラメータセット AAA の発振ごとのスペクトルの推移を示す。

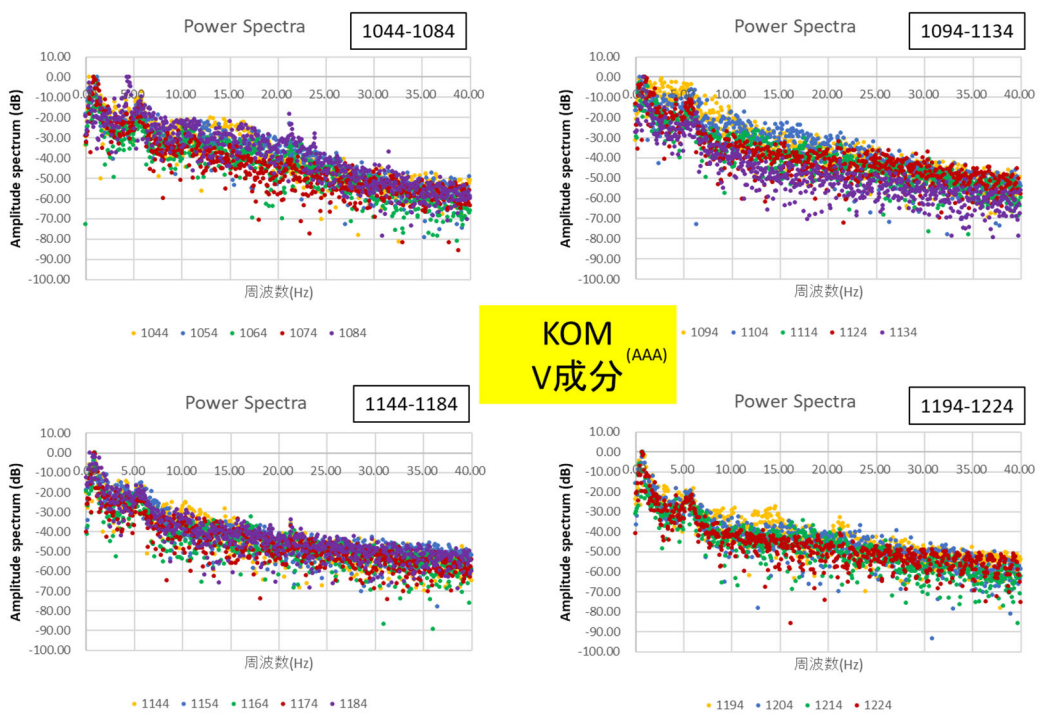


図 1-2-31. 発震パラメータセット AAA のスペクトル変異 (KOM 観測点上下動成分)。

図 1-2-31 をみると、AAA は常に 10Hz のスペクトルの大きさに 25~30dB の幅があるが、発振の進行に伴う系統的变化は見当たらない。

次に BAA について調べたものを図 1-2-32 に示す。AAB では常に 10Hz のスペクトルの大きさに 20~25dB の幅があるが、やはり発振の進行に伴う系統的变化は認められない。

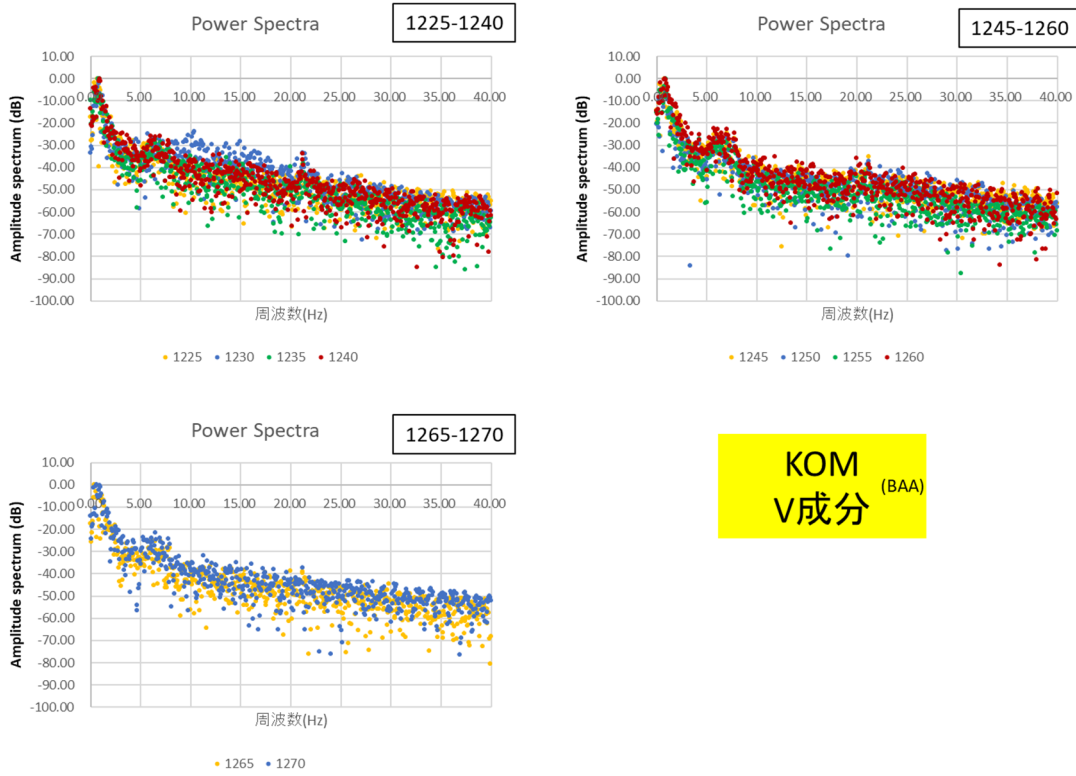


図 1-2-32. 発震パラメータセット BAA のスペクトル変異 (KOM 観測点上下動成分)。

最後にエアガン深度が AAA よりも浅い発振パラメータセット AAB について調べたものを図 1-2-33 に示す。

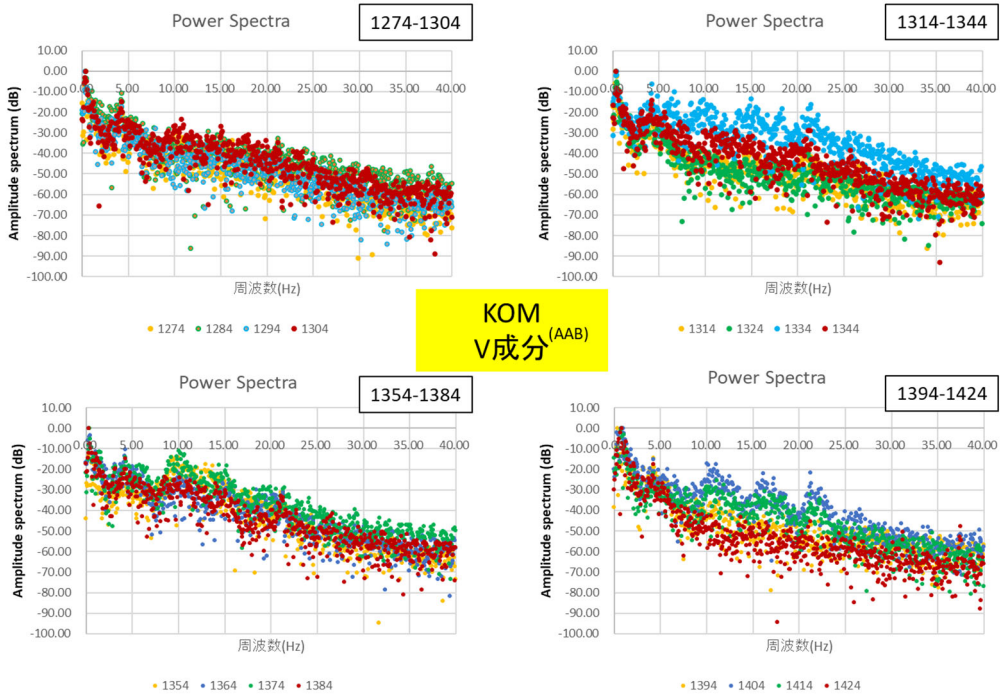


図 1-2-33. 発振パラメータセット AAB のスペクトル変異 (KOM 観測点上下動成分)。

AABは常に10Hzのスペクトルの大きさに30~40dBの幅があるが、こちらも発振の進行に伴う系統的变化は認められない。しかし、先の2例に比べて10Hz以上の帯域の変化が著しい傾向がある。

以上のことから10 Hz付近のスペクトルの安定度はBAA>AAA>AABであることが示された。

g. 相関係数の推移

繰り返し発振による波形の変化を最終スタック波形に対する相関係数で評価する。図1-2-34は振源パラメータAAAの各発振に対するSUM(震源近傍の住吉池測線)内での波形相関係数の推移を示す。波形相関の時間窓は0.1~3.1秒までの3秒間である。SUM6観測点の相関係数に注目すると、発振タイミングの同期チューニング中の期間は相関係数の値の変化が大きいが、チューニングが進むと相関係数は1に向かって収束してゆく様子が見られる。チューニングが済み完全に発振タイミングの同期がとれると(同期済みの期間)、チューニング期間中よりばらつきが少なくなる傾向が認められる。同期済みの期間内での発振の進行に伴う系統的变化は認められなかった。したがって、同期調整後の百数十回の繰り返し発振では振源波形の変化は認められず、振源波形の再現性は高いことを示している。

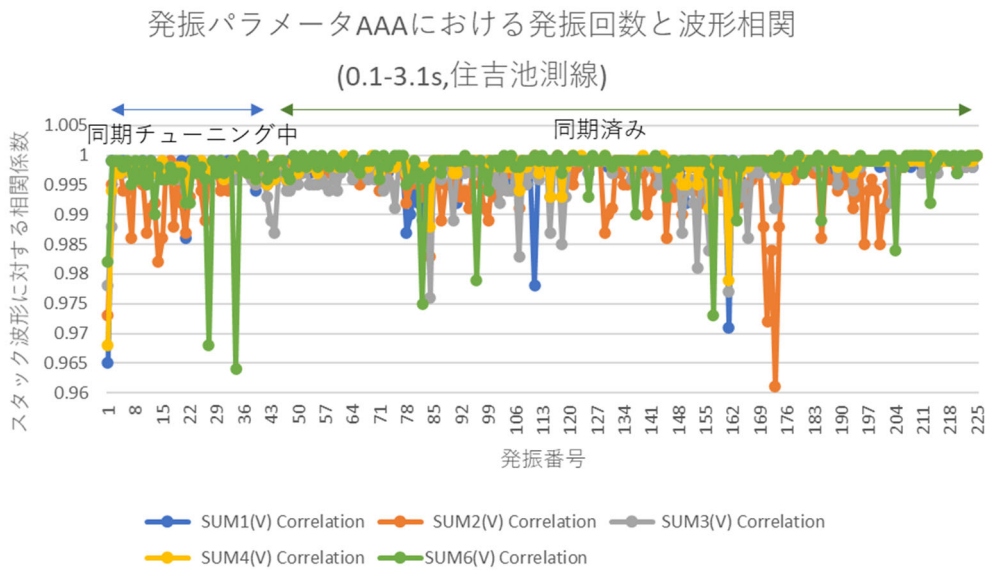


図1-2-34. SUMにおける波形相関の推移(発振パラメータセットAAA, 12月11~12日の全データセット)。

発振パラメータAAAにおけるスタック波形に対するチューニング後の平均相関係数は0.991、標本分散は0.00245であった。一方、チューニング中の平均相関係数は0.988、標本分散は0.00303であった。

次に桜島側における観測波形の相関係数の推移を整理した図1-2-35を次に示す。桜島側では高免孔中アレイBKOMで観測された波形の走時5~10秒までの波形で相関係数を計算した。走時5~10秒の間は13.6km深におけるP-SV変換反射波等の始良カルデラ深部からの反射波が期待される区間である。

発振パラメータAAAにおける発振回数と波形相関
(5.0-10.0s,高免孔中アレイ)

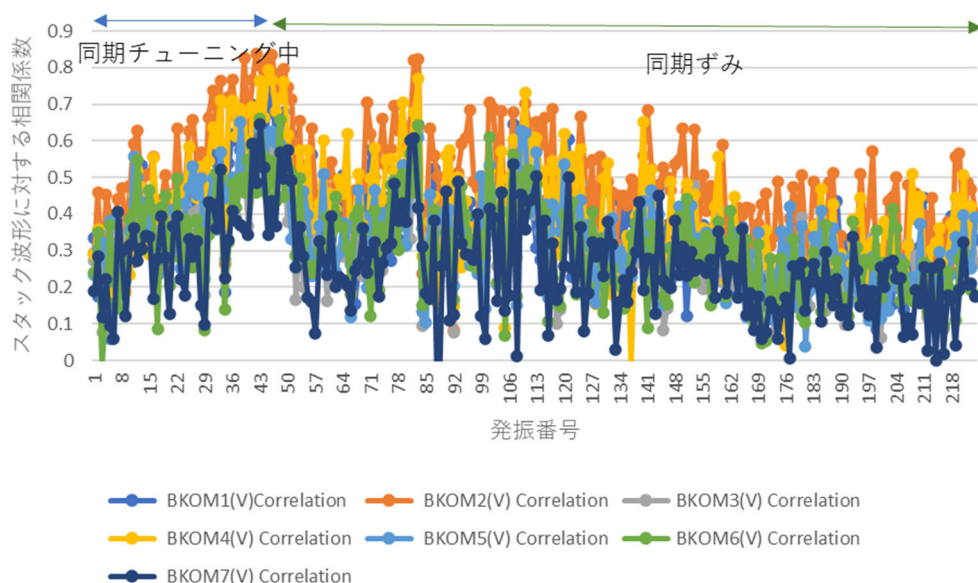


図 1-2-35. BKOM における波形相関の推移（発振パラメータセット AAA, 12 月 11～12 日の全データセット）。

桜島側の相関係数のふるまいは振源側の相関係数のふるまいと異なっている。桜島側でも振源近傍のそれと同様に、発振タイミングのチューニング期間中は発振の進行とともに相関係数が高くなる傾向が認められる。しかし、チューニング完了後は相関係数がいったん低くなった後に 84 番目の発振に向かって再び相関が高くなる傾向が認められる。85 番目以降では発振の進行に伴って相関係数が 0.4 付近に収束する傾向が見受けられる。振源側では 85 番目以降の相関の推移に特に目立った傾向が認められなかったことを考慮すると、図 1-2-36 に示されるように桜島側の相関係数のふるまいは背景ノイズに大きく支配されていることを示している。

つぎに発振パラメータセット BAA についても発振の進行にともなう相関係数の推移を調べた。相関係数の推移を図 1-2-37 に示す。発振パラメータセット BAA ではスタック波形に対する相関係数の平均値が 0.995 で、標本分散が 0.00068 であった。発振開始後 7 回目（経過時間約 10 分）までは相関係数が順を追って大きくなり、その後は 0.997 以上で安定する傾向が認められる。発振開始直後の相関係数の立ち上がりはすべての観測点で認められることから、振源そのものの振る舞いを反映していると考えられるが、相関係数安定化後の相関係数の乱れは振源距離の大きな観測点 SUM6 で顕著であることから、自動車の通行などによる外来ノイズの影響と考えられる。

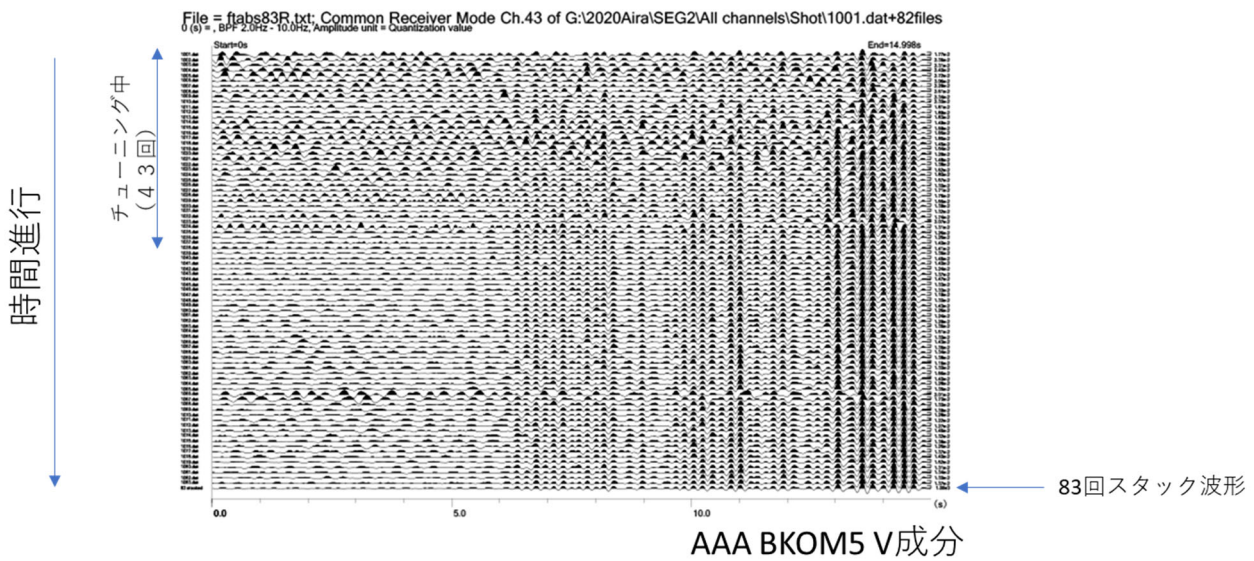


図 1-2-36. 発振パラメータセット AAA による観測波形(BKOM5 観測点上下動)の推移。12 月 11 日分。

発振パラメータBAAにおける発振回数と波形相関
(0.1-3.1s住吉池測線)

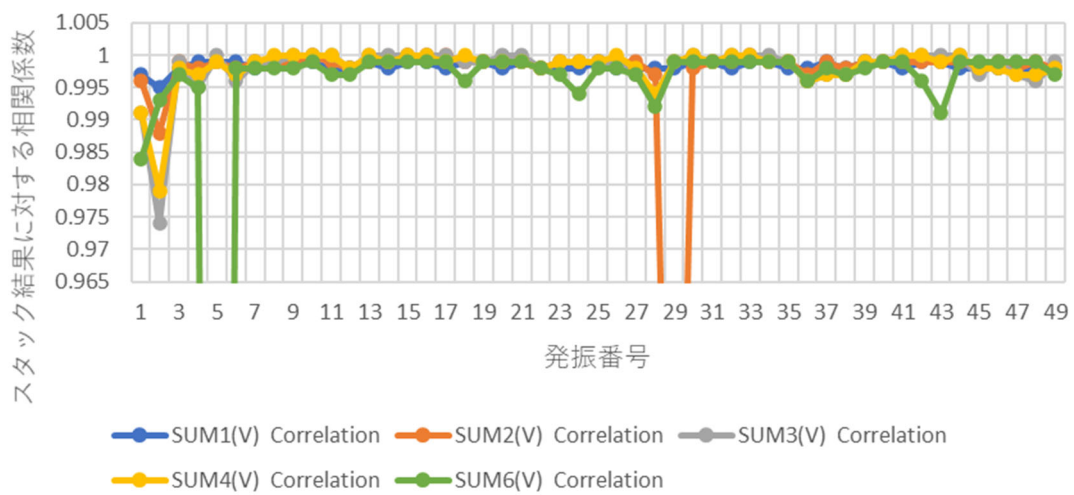


図 1-2-37. 発振パラメータセット BAA に対する波形相関の推移。

。

発振パラメータAABに対する発振回数と波形相関
(0.1-3.1s,住吉池測線)

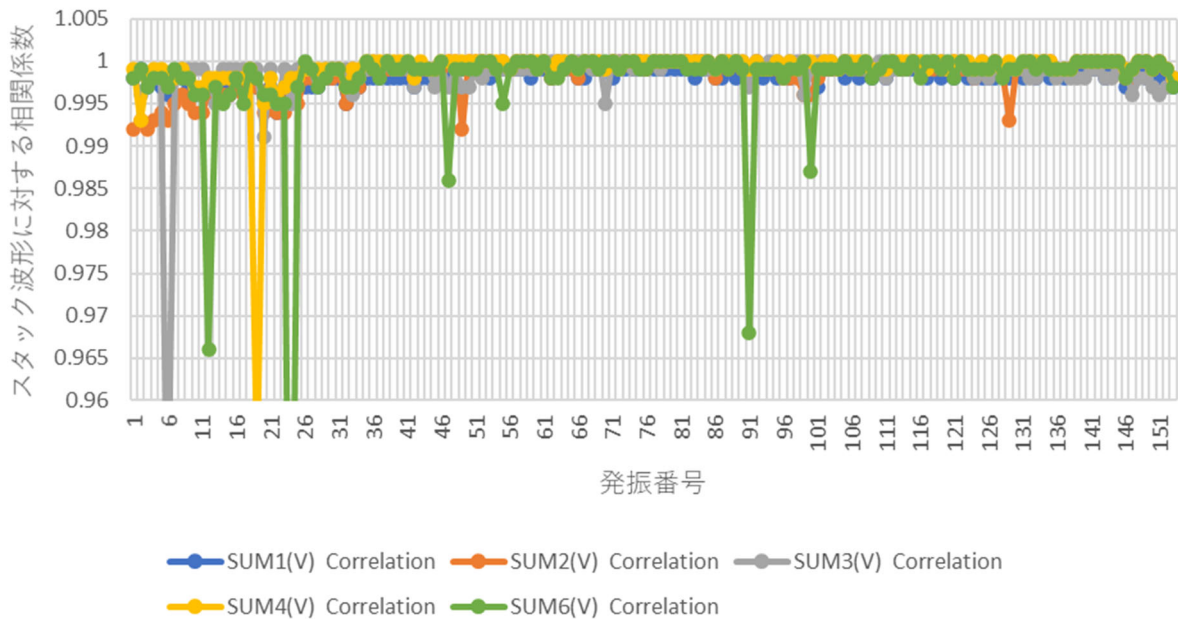


図 1-2-38. 発振パラメータセット AAB に対する波形相関の推移。

発振パラメータセット AAB に対する相関係数の推移を図 1-2-38 に示す。発振パラメータセット AAB ではスタック波形に対する相関係数の平均が 0.992、標本分散が 0.00165 であった。発振開始後に相関係数の値が立ち上がるのはほかの 2 例と同じであるが、相関係数が立ち上がって安定期に入っても相関係数の揺らぎは他の発振パラメータセットに比較して大きい傾向があり、振源距離が小さい観測点でも相関係数の揺らぎが大きいことが認められる。発振パラメータセット AAB はエアガン深度がほかの 2 つに比べて浅い。

いずれのケースでも発振開始後 10 回目までは発振が進むにつれて相関係数の値が大きくなる傾向がうかがわれる。AAA では 84 回目以降相関係数が一時的に低下する特徴が見受けられる。これはエアガン本体の温度変化の進行と関連している可能性がある。BAA, AAB はいずれも発振開始後は定常的に等間隔で発振を実施している。また、AAA は初日の 75 回目の発振以降は発振間隔を約 3 倍にとって 84 回目まで発振を行っており、85 回目以降は翌日の発振となり定常的に 3 分間隔で発振を行っている。相関係数の低下は、定常発振の初期段階あるいは発振間隔の変更直後に発生している傾向がある。BAA では 10 回目の発振以降安定した相関係数を示しており、発振の進行中の波形の再現性が高いことが注目される。また BAA の平均相関係数は 3 つの発振パラメータの中では最も高い数値を示すことから、BAA は全般的に波形の安定性が高いといえる。

h. エアガンの近傍における水中衝撃圧の測定結果

将来の長期連続反射法地震探査の実装では、専用のピットを用意してその中でエアガン発振を実施することが望ましい。専用ピットを建造するためにはエアガン近傍における圧力を知る必要がある。

エアガン近傍における圧力を知ることを目的として本実験では図 1-2-39 のようにエアガン直近に 2 つのハイドロフォン(NFH)とエアガン中心から約 10m 以内に 7ヶ所のハイドロフォン (#1~#7) を設置して衝撃圧観測を実施した。1500L1 NFH で得られた波形を図 1-2-40 に示す。

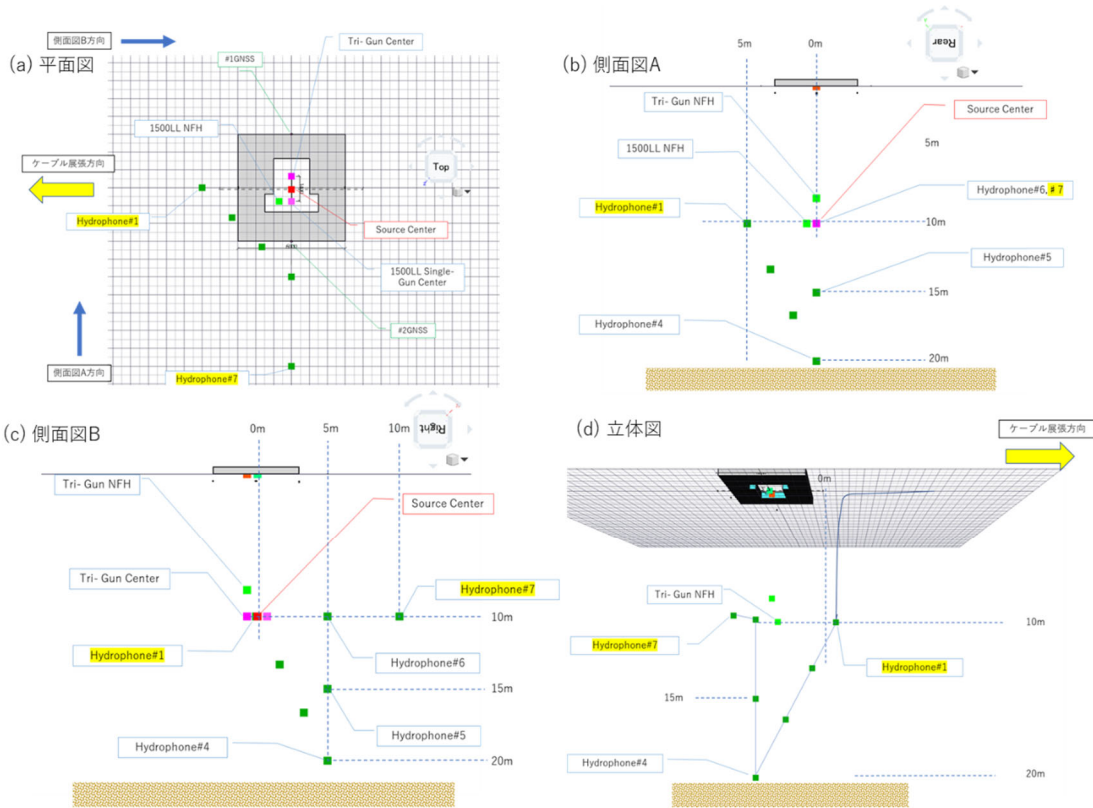


図 1-2-39. 水中衝撃圧測定点の配置。

1500NFHで収録した震源波形

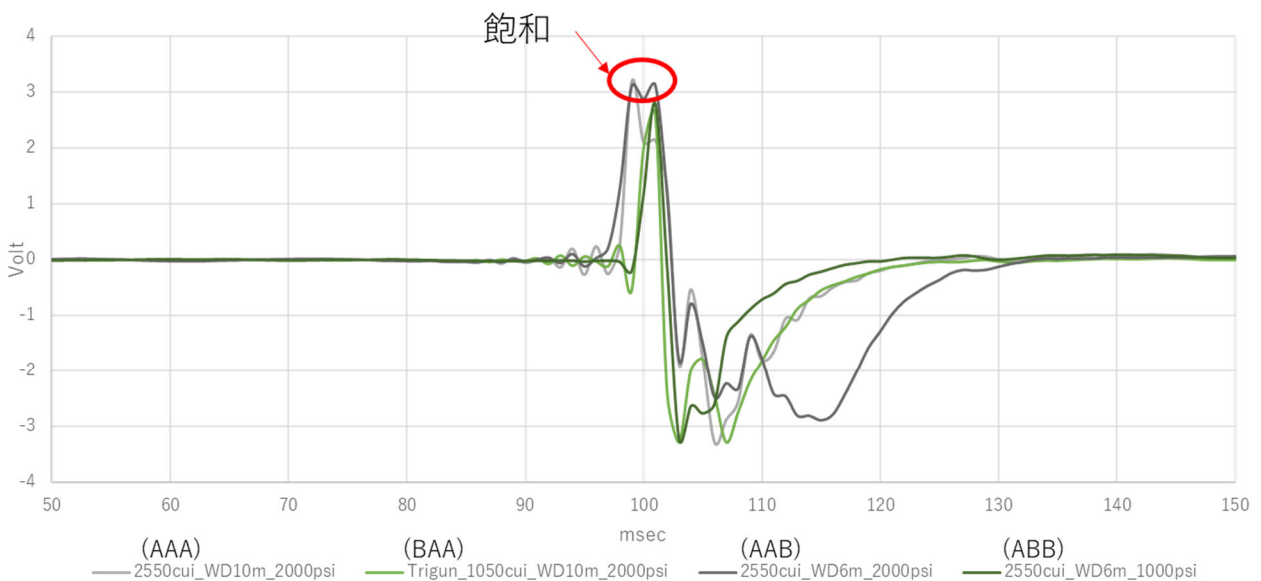


図 1-2-40. 全パラメータセットの 1500LL NFH で得られた波形の比較。

トリガンNFHで収録した震源波形【All】

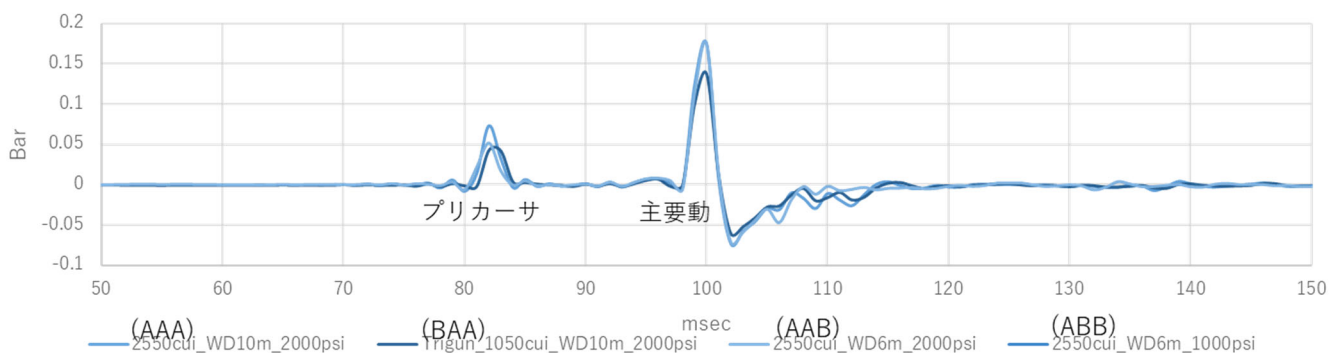


図 1-2-41. 全パラメータセットのトリガン NFH で得られた波形の比較。

図 1-2-40 に示す 1500LLNFH (エアガンクラスタ中心から 1.03 m) による観測では、パターン AAA (2550cui, 2000psi, 水深 10m) における発振時に主要動部分で飽和が発生している。これに対して図 1-2-41 に示すトリガン NFH (エアガンクラスタ中心から 1.96 m) による観測ではパターン AAA を含むすべての発振において飽和しない記録が得られたので、以降はトリガン NFH による観測結果で振源波形の議論を進める。

表 1-2-7 は発震パラメータセット AAA と BAA について整理したエアガン周囲の最大衝撃圧を示す。最大衝撃圧測定には測定で直接得られた値の他、外挿値も記載されている (表中の赤字部分)。エアガンが放出する圧力の著しく大きいことが想定されたので、当初から衝撃圧測定において多連ハイドロフォンの出力を 1/100 の減衰抵抗回路により絞った。しかしハイドロフォン#1, #2, #6 ではエアガン発振の圧力が過大で、アンプ電源電圧と推測される電圧レベルで出力がクリップしており、最大衝撃圧を直接測定できなかった。これらのハイドロフォン#1, #2, #6 では次のような計算を行い、トリガン NFH 記録のピーク値から最大衝撃圧を推定した。まず、比較的圧力強度の低い 350cui 単基エアガンの発振による隣接チャンネルのピーク値から内挿・外挿し、同一発振のトリガン NFH 記録ピーク値との比 (Ratio/Trigon NFH@350cui) を求めた。このトリガン NFH 比とそれぞれの発震パラメータセットにおけるトリガン NFH 記録のピーク値との積をとり、さらに Distance ratio を乗ずることによりそれぞれハイドロフォン#1, #2, #6 におけるピーク圧力値 (推定値) を得た。

表 1-2-7. エアガン周囲の最大衝撃圧値

トリガンNFHを基準とした各ピーク圧力

	Trigon NFH	Hydrophone 7	Hydrophone 6	Hydrophone 5	Hydrophone 4	Hydrophone 3	Hydrophone 2	Hydrophone 1
350cui 発震 圧力ピーク値	0.05625	0.14239	0.14102	0.13966	0.12867	0.14025	0.14064	0.14102
Ratio(/Trigon NFH@350cui)	1.00000	2.53112	2.50694	2.48276	2.28738	2.49324	2.50009	2.50694
Distance Ratio (6m/10m)	1.00000	1.07703	1.28062	1.45602	1.32966	1.47938	1.64520	1.28062
AAA (2550cui_WD10m_2000psi)	0.17487	0.47671	0.56141	0.63215	0.53186	0.64500	0.71926	0.56141
BAA (1050cui_WD10m_2000psi)	0.13768	0.37532	0.44200	0.49769	0.41873	0.50781	0.56628	0.44200

*赤字は隣接ハイドロフォンからの内挿/外挿値

単位：10⁵ Pa

表 1-2-7 の結果によれば衝撃圧は発振パラメータセット AAA では 0.64×10^5 Pa が計測された最大値、 0.72×10^5 Pa が推定された値も含めた最大値であり、発振パラメータセット BAA では 0.51×10^5 Pa が計測された最大値、 0.57×10^5 Pa が推定値も含めた最大値である。このほかパラメータセット AAB では 0.44×10^5 Pa、ABB では 0.31×10^5 Pa が推定値も含めた最大衝撃圧であった。壁面における圧力は自由空間における圧力の 2 倍になることから、直径 10m のエアガンピットの壁面を想定した場合には最大 1.14×10^5 Pa が衝撃圧として加わると考えられる。

したがって安全率を 2 倍にとった場合、ピット壁面は静水圧に加えて 2×10^5 Pa 程度の衝撃圧に耐える必要があるものとする。

i. エアガン発振による環境影響

エアガン発振による環境への影響を調べるために、本実験では発振点から南西方向 178m の場所にある住吉池南西隅の堰堤堤体上加速度観測点 SUMK1 における発振時の加速度測定と、エアガン発振点における発振前後における貯留水の濁度測定を行った。

1) 南西隅堰堤堤体上の加速度

まず堤体加速度の測定結果について述べる。SUMK1 は堰堤上の水門管体のコンクリートに石膏を用いて設置された。SUMK1 における加速度の二乗平均値と最大値を図 1-2-42 と表 1-2-8 に示す。

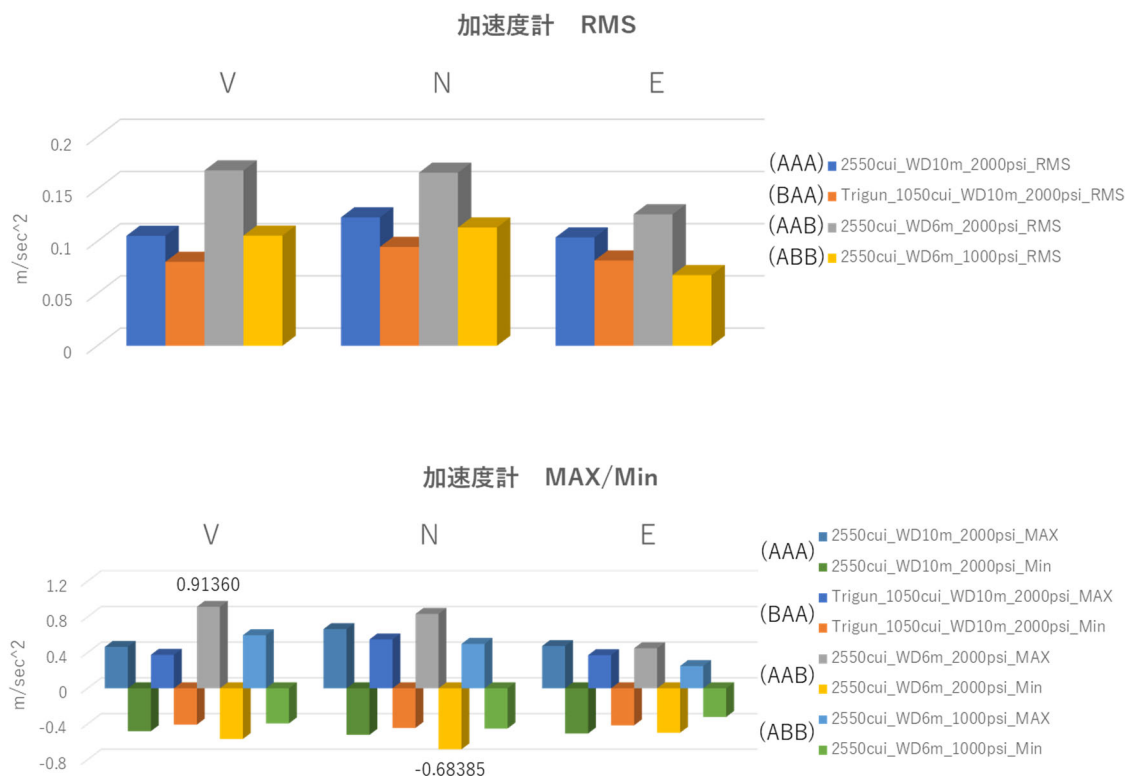


図 1-2-42. 住吉池南西端堤体上(SUMK1)における最大加速度

表 1-2-8. 住吉池南西端堤体上(SUMK1)における最大加速度値

	(AAA)			(BAA)			(AAB)			(ABB)		
	2550cui_WD10m_2000psi_RMS			1050cui_WD10m_2000psi_RMS			2550cui_WD6m_2000psi_RMS			2550cui_WD6m_1000psi_RMS		
	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW
電圧値(V)	1.16E-02	1.35E-02	1.14E-02	8.85E-03	1.04E-02	8.98E-03	1.85E-02	1.82E-02	1.39E-02	1.16E-02	1.25E-02	7.45E-03
加速度(m/s ²)	1.05E-01	1.23E-01	1.04E-01	8.05E-02	9.47E-02	8.17E-02	1.68E-01	1.66E-01	1.26E-01	1.06E-01	1.13E-01	6.78E-02
	2550cui_WD10m_2000psi_MAX			Trigun_1050cui_WD10m_2000psi_MA			2550cui_WD6m_2000psi_MAX			2550cui_WD6m_1000psi_MAX		
電圧値(V)	5.11E-02	7.30E-02	5.21E-02	4.13E-02	6.03E-02	4.09E-02	1.00E-01	9.17E-02	4.94E-02	6.55E-02	5.48E-02	2.75E-02
加速度(m/s ²)	4.64E-01	6.63E-01	4.74E-01	3.75E-01	5.48E-01	3.71E-01	9.14E-01	8.34E-01	4.49E-01	5.95E-01	4.98E-01	2.50E-01
	2550cui_WD10m_2000psi_Min			Trigun_1050cui_WD10m_2000psi_Mi			2550cui_WD6m_2000psi_Min			2550cui_WD6m_1000psi_Min		
電圧値(V)	-5.29E-02	-5.74E-02	-5.57E-02	-4.48E-02	-4.88E-02	-4.56E-02	-6.25E-02	-7.52E-02	-5.47E-02	-4.33E-02	-4.96E-02	-3.54E-02
加速度(m/s ²)	-4.81E-01	-5.22E-01	-5.06E-01	-4.07E-01	-4.44E-01	-4.15E-01	-5.68E-01	-6.84E-01	-4.98E-01	-3.94E-01	-4.51E-01	-3.21E-01

堤体における加速度は発振パターン AAB(2550cui, 2000psi, 6m)時の上下動加速度で最大約 0.1G(0.91m/s²)が観測された。同じエアガン容量でも水深の浅いほうの加速度が大きくなる傾向が読み取れる。また、AAA と BAA とを比べると同じ水深では容量の小さいエアガン(BAA)のほうが小さい加速度である。エアガン発振時には目視による堤体監視も行ったが、漏水発生などの特段の異常は報告されなかった。

2) 濁度変化

先述のように住吉池は農業用水源として利用されているために、エアガン発振による水質悪化の有無を検証する必要がある。エアガン発振に伴う大量の気泡の発生と上昇によって住吉池の貯留水と湖底の堆積物とが攪拌されることによる濁度変化が懸念された。そのために濁度計 TB-25A (東亜ディーケーケー社製) を用いて、ポンツーン地点の水深 8m で毎日のエアガン発振作業開始前と終了後の濁度測定も行った。発振作業前と発振作業終了後の住吉池貯留水の濁度変化を次の表 1-2-9 に示す。

表 1-2-9. 濁度の推移

番号	日時	観測場所	濁度 (NTU)	濁度 (mg/l)	水温 (°C)	
1	2020/12/11 12:23	ポンツーン	1	1	14	エアガン発振前
2	2020/12/11 12:24	〃	1	1	13.9	〃
3	2020/12/11 21:19	〃	1	1	13.9	発振終了後
4	2020/12/11 21:20	〃	1	1	13.9	〃
5	2020/12/12 09:03	〃	1	1	13.8	エアガン発振前
6	2020/12/12 09:05	〃	1	1	13.8	〃
7	2020/12/12 19:27	〃	1	1	13.8	発振終了後
8	2020/12/12 19:28	〃	1	1	13.8	〃
9	2020/12/13 10:09	〃	1	1	13.7	エアガン発振前
10	2020/12/13 10:10	〃	1	1	13.7	〃
11	2020/12/13 19:24	〃	1	1	13.6	発振終了後
12	2020/12/13 19:25	〃	1	1	13.6	〃

全期間を通じて濁度には明瞭な値の変化がなかったことから、エアガン発振による濁度の上昇は認められなかった。エアガン発振に伴う湖底土砂の攪拌は発生しなかったと考えられる。

j. 運用に関する問題点

1) 空振と体感振動

12月12日19時頃に地元協力者から住吉池周辺の住居で振動や音が聞こえる等の情報提供があった。この情報提供を受けて該当住居に作業員を向かわせた。現地で状況を体感した作業員の話を経合し以下に記す。

- ・住吉池から一番近い民家では騒音と振動は感知できなかった。
- ・同じ集落でも振動を感知できる家と感知できない家がある。
- ・住吉池から等距離に位置する集落で音だけ聞こえる/聞こえない場合と振動のみ感知する/感知できない場合の様々なパターンがある。

騒音と振動発生状況を把握することは難しいが、最終的に今回の発振において苦情等は1件も受けなかったため、発振時間帯を調整する等の柔軟な運用をする必要があると考えられる。

2) 発振条件の調整の制約

令和2年度の基礎実験ではエアガンをすべて借り入れで賄って実験を実施したため、発振による機材の損傷を避ける必要から実験条件の制約が生じた。

今回の実験では1500LL単体エアガンと1050cuiトリガン本体同士がフレーム等で固定されていなかったために、双方を水中に置いたままで片方を発振するとエアガン同士の衝突による機材の損傷が発生する可能性があった。2日目の最後に行ったトリガン単独発振（発振パラメータセットBAA）では、近傍波形記録とエアガン本体およびホースの痕跡から発振時には作動させていない1500LL(1500cui)本体との衝突が発生していることが判明した。今回準備された実験機材および設置状況で6m深でトリガン単独発振（パターンBABに相当）を行なったばあいには高圧エアホース破損の発生が予見されたので、パターンBABは安全確保の観点から見送ることにした。

トリガン単独の減圧発振（発振パラメータセットABB, BBB）も減圧発振によるエアガン本体損傷の可能性が予見された。発振パラメータセットABBは3日目の最後に実施したが、エアガン本体損傷の危険性を緩和するために大幅に発振回数の削減をせざるを得なかった。さらに発振パラメータセットBBBはエアガンクラスタの片方だけの発振になることもありABBのケース以上に損傷の可能性が高かったため、実施を見送った。

個々のエアガンエレメントの発振時を同期するためには、個々のエアガンの発振タイミングも模索しながらのチューニングが必要で、今回は発振作業開始後2時間余り（44ショット）を要していた。また、動作圧を変えた場合には発振の同期をとるためのチューニング期間が再度必要であった。

3) 許認可の制約

本実験では高圧ガス取り扱いに関する法令の適用が問題となった。通常のエアガンの発振運用は船舶に高圧コンプレッサをはじめとする高圧圧縮空気供給設備を搭載し、当該船舶でエアガンを曳航しながら発振を実施する。本実験の発振運用では陸上に高圧コンプレッサをはじめとする高圧圧縮空気供給設

備を定置し、水上に浮かべたポンツーン足場から水中に下ろしたエアガンで発振を行う発振システムの構成をとった。そのため、本実験の構成は陸上の高圧ガス製造および取り扱いに関する法の適用をうけることとなった。

本実験では最大 2000 psi (13.8 MPa)に達する高圧の圧縮空気を使用した。京都大学防災研究所(2020)によれば、本実験を実施するにあたり高圧コンプレッサからエアガン装置に至る発振システム全体が高圧ガス保安法第2条の適用の対象となることが判明していた。

高圧ガス保安法第2条第一項によれば、「常用の温度において圧力（ゲージ圧力をいう。以下同じ。）が一メガパスカル以上となる圧縮ガスであつて現にその圧力が一メガパスカル以上であるもの又は温度三十五度において圧力が一メガパスカル以上となる圧縮ガス（圧縮アセチレンガスを除く。）」を高圧ガスと呼び、35℃において圧力が 1MPa 以上となる圧縮ガスを利用する装置が同法の適用をうける。

当初、高圧ガス保安協会に照会を行い、許認可およびその届け出窓口は各都道府県が掌握していることを把握し、鹿児島県では鹿児島県危機管理防災局消防保安課保安係（以下、鹿児島県当局）が該当することがわかっていた。

実験に先立つ令和元年 11 月に鹿児島県当局に実験内容を説明し、基礎実験を実施する際の発振設備の許認可に関して「第2種 可搬式設備」が適用される見通しであることを確認した。また今後想定される常設設備は「第2種可搬式製造設備」が適用されるとの回答を得た。

実験の準備の進捗に伴い、令和2年 1 1 月に鹿児島県当局に「第2種 可搬式設備」の申請を行ったのち、届の記載内容についての質疑応答と追加資料の提出を行った。その結果、鹿児島県当局から「高圧ガス製造所許可申請」に該当する旨の回答を得た。

県当局からの回答を得たのち、あらためて県当局に実験内容を説明の上「高圧ガス製造許可申請」の手続きを確認のうえ手続きを行い、発振実施 2 日前に申請の認可、発振実施前日に高圧ガス製造所完成検査に合格し、以降は第一種可搬式製造設備として適法な発振作業の実施に至った。

今回の実験で用いた発振システムに対する法規上の扱いは、都市ガス製造者等の固定式製造設備に適用されるものと同じの扱いであり、本来ならば製造設備を保有する機関の所在地の自治体当局からの許認可を受けるべきものである。さらに製造設備として継続的に運用するのであれば高圧コンプレッサおよび高圧タンクの定期検査など必要な管理を製造所が実施し、第一種可搬式製造設備の認可を保持しなければならない。今回の実験にあたり鹿児島県当局から認可を受けることができたのは、当局の理解をいただいたうえでの一回限りの特例措置であった。

(1)-2-3. 考察

a. スタック数と S/N の関係

エアガン発振は一つの発振パラメータセットのもとでの発振を繰り返すことが可能である。繰り返し実施された発振によって得られた記録を発振時刻に合わせて切り出したものをスタック（足し算）することにより、観測記録の S/N 比を改良することができる。記録の背景ノイズがランダムであるならば、その S/N 比の改良の度合いはスタックで重ね合わせる記録の本数の平方根に比例する。ここでは十分な S/N 比を得るためのスタック数の探索を目的として、実際に得られたデータを用いてスタックによる S/N 比の改良効果について検証する。

4つの異なる発振パラメータセットごとに得られた記録をスタックした結果のS/N比の変化を図1-2-43に示す。

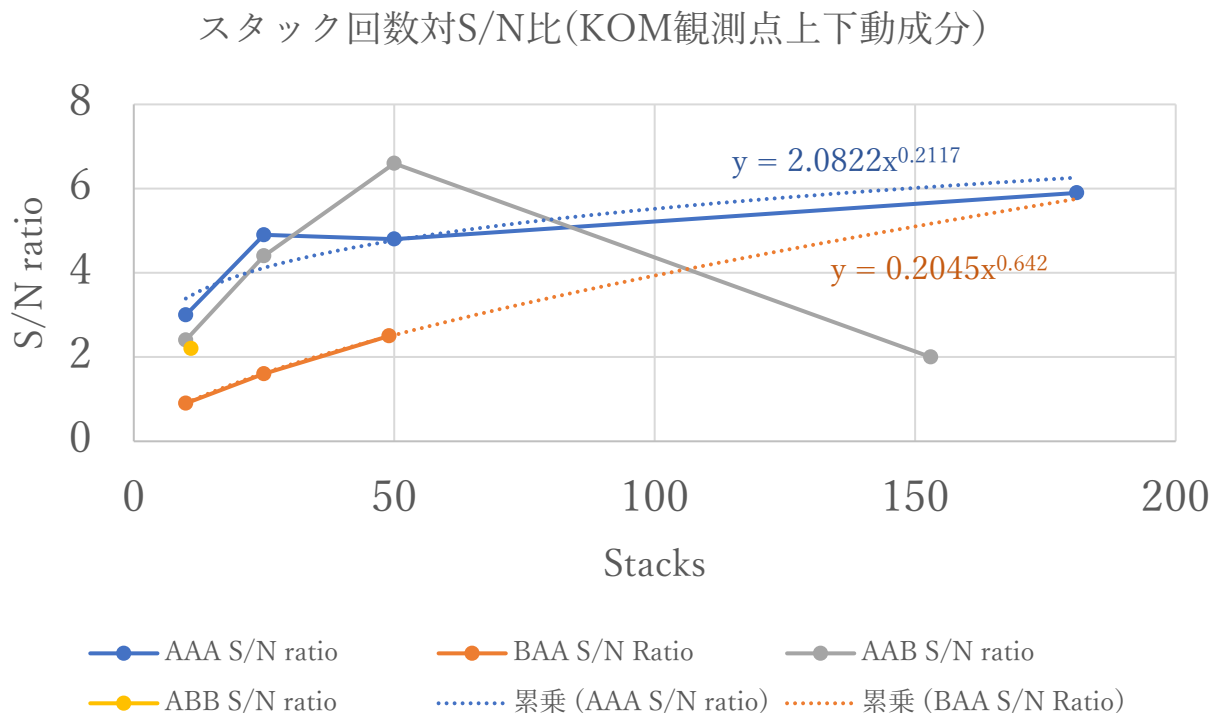


図1-2-43. スタックによるS/N比の推移

スタックの回数と同じであれば、エアガン容積が大きいパラメータセットのほうがS/N比が稼げる傾向がうかがわれる。しかしながら、単調にS/N比が増大するのはスタック数が50までで、それ以降はかえってS/N比が低下するケースもあることが示されている。エアガン容積が小さいパラメータセットBAAでは49回スタックすることによって、容積の大きいパラメータセットによる記録の10回スタックと同等なS/N比に達することが示される。

b. エアガン運用効率

スタック回数に対するS/N比の比較ではやはりエアガン総容積が大きいほど少ない回数でS/N比が稼げることが示されている。一方、同じ能力のコンプレッサを用いた場合にはエアガン総容積が大きいほど発振間隔が長くなり、一定のS/N比を確保できるデータを得るための発振時間が長くなる。

今回の基礎実験における4種類の発振パラメータにおける1時間当たりのエネルギー放射率を下表1-2-10に整理する。

表 1-2-10. 発振パラメータセットと単位時間当たりのエネルギー放射率。

コード	構成 (cui)	動作圧 (psi)	エアガン深度 (m)	実効放射エネルギー理論値 (kJ/shot)	順位	発振間隔	エネルギー放射率 (MJ/hour)
AAA	2550	2000	10	70	1	3分	1.4
BAA	1050	2000	10	36	3	1分15秒	1.7
AAB	2550	2000	6	49	2	3分	0.99
ABB	2550	1000	6	12	4	1分30秒	0.48

実効放射エネルギーはシミュレーションソフトウェア GUNDALF (Hatton and Haartsen, 1990) による値である。

もっとも少ない回数で目標の S/N 比に達するパターン AAA より、トリガンによるパターン BAA のほうが 2 割ほどエネルギー放射効率の高いことが示されている。

また上表によれば発振パラメータセット BAA の 1 回あたりの発振エネルギーは 37KJ であり、振源パラメータ AAA の 70KJ の約 1/2 であった。これをもとにすると期待される振幅比はその平方根である 0.72 であるが、今回の実験で得られた BAA のピーク振幅の比率は 0.2 であり、ピーク振幅比率だけからみればシミュレーションから期待される値より観測値のほうが比率の小さい傾向がある。

c. 深部反射の検出

高免アレイの孔中地震計観測点アレイを用いて、住吉池発振点からやってくる地震波の到来方向を調べた。孔中地震計観測記録に 3~10 Hz のフィルターを施し 0.4 秒幅の時間窓によるビームフォーミング解析を行った。地震波の到来強度の表示にはセンブランスを用いた。高免孔中地震計アレイ BKOM および地表地震計アレイ SKOM においてインパルス波形が垂直下方から入射した場合の各アレイのスローネス領域における空間応答特性を次の図 1-2-44 に示す。

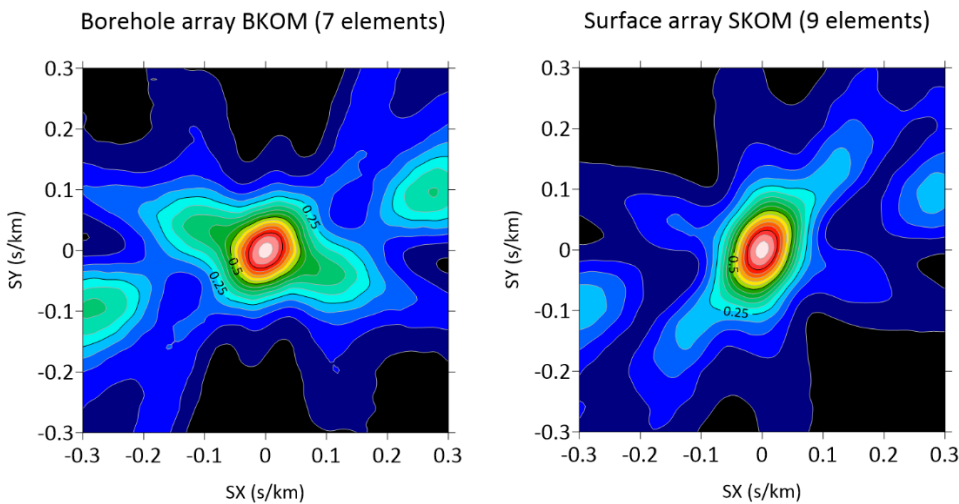


図 1-2-44. 孔中地震計アレイ BKOM と地表地震計アレイ SKOM の空間応答特性。

BKOM および SKOM の両者ともに空間応答のピークの半値幅は±0,05s/km (20km/s に相当)である。

まず発振パラメータセット AAA における初動到来時刻の直前から約 3 秒間の上下動成分ビームフォーミング結果を図 1-2-45 に示す。KOMA における初動到来時刻は約 5.2 秒である。

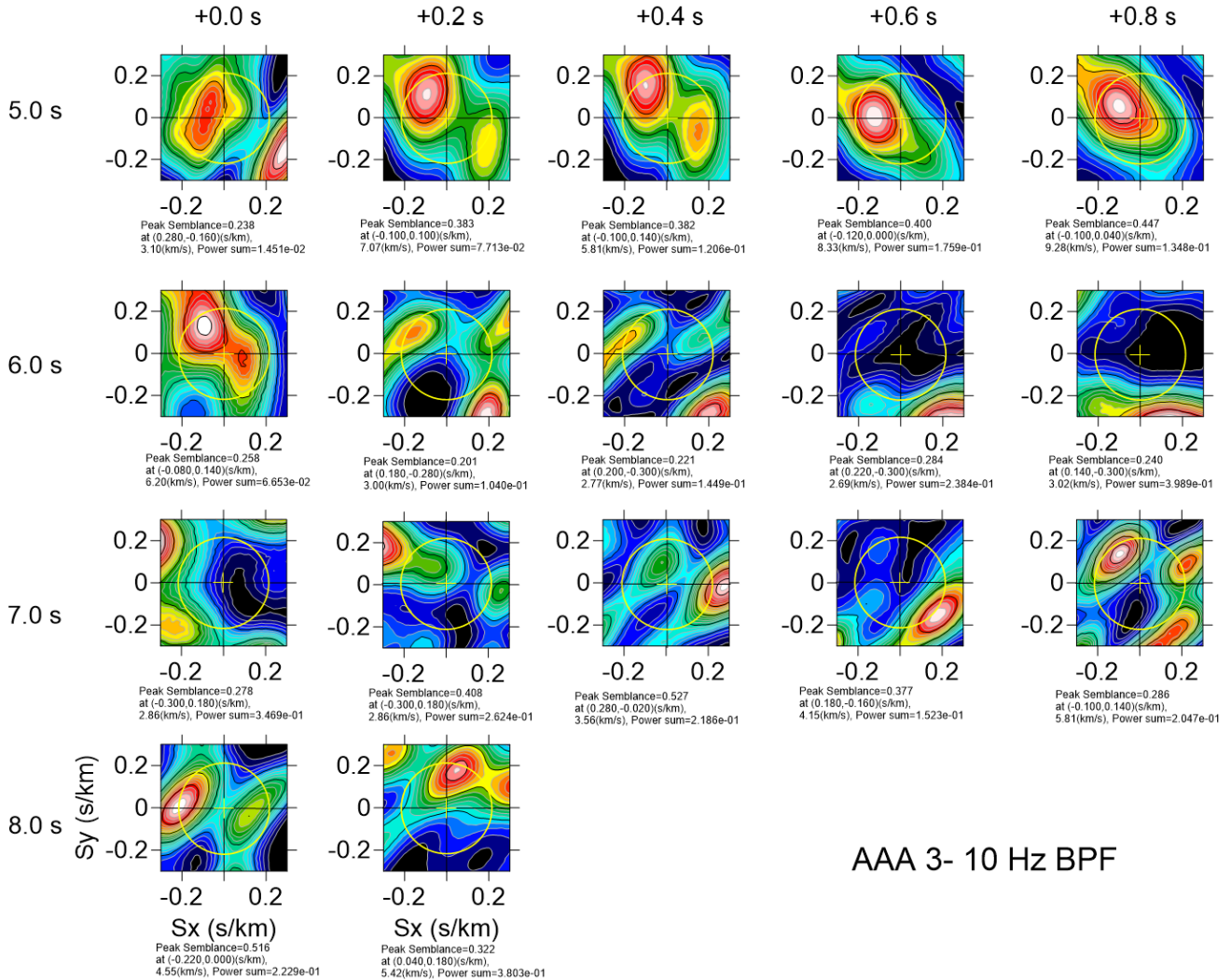
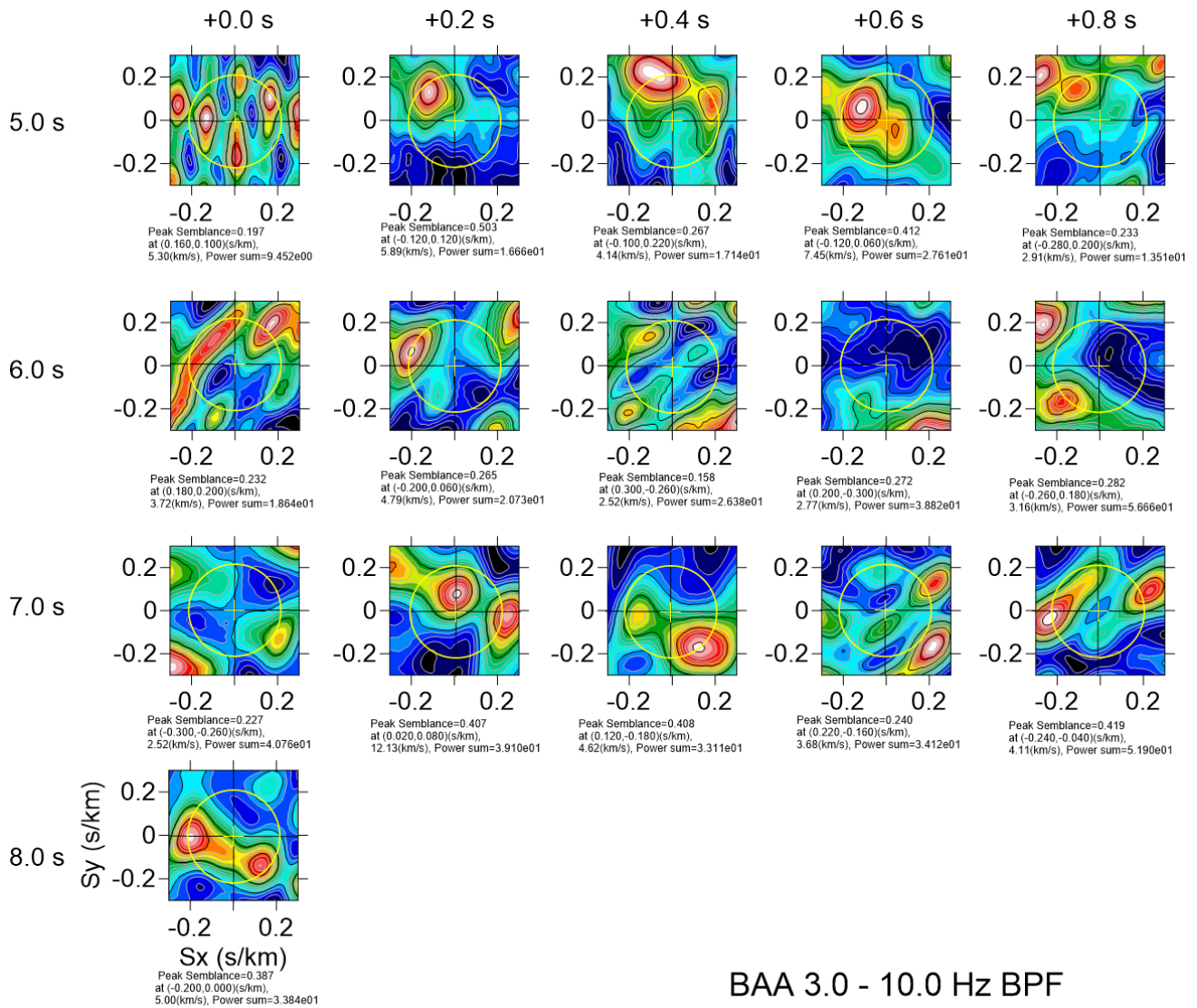


図 1-2-45. 発振パラメータセット AAA による初動付近の到来方向解析結果(5.0~8.0 秒)。

次に発振パラメータセット BAA における初動到来時刻の直前から約 3 秒間のビームフォーミング結果を図 1-2-46 に示す。



BAA 3.0 - 10.0 Hz BPF

図 1-2-46. 発振パラメータセット BAA による初動付近の到来方向解析結果(5.0~8.0 秒)。

初動到来時刻に相当する 5.2 秒付近における波の到来方向は両者とも一致して N45° W 方向を示している。この方向は KOMA からみた SUM 方向 N26° W より 20 度西偏している。また、発振パラメータセット AAA より AAB のほうのセムブランスピーク幅が小さい傾向がある。

5.2 秒以降 5.6 秒まではいずれも時間の経過につれて初動到来方向よりも西偏した波が入射してきていることが示されている。5.8 秒以降 6.0 秒までの区間における波の到来方向はパラメータセット AAA と BAA とで異なる傾向を示すようになる。発振パラメータセット AAA では依然として初動と同一方向からの単一の入射波が卓越するのに対して、発振パラメータセット BAA では複数の波の到来が見受けられるようになる。同じ時間帯であっても発振パラメータセットによって波の入射方向が異なる傾向はこれ以降も見受けられる。

次の図 1-2-47 はそれぞれの発振パラメータセットにおける 5.2 秒±0.2 秒窓における二乗振幅値で規格化した各窓のパワー値である。発振パラメータセット AAA の二乗振幅値が BAA のそれよりも大きい時間帯(5.8 秒および 7.0 秒)の図 1-2-45 と-46 を比較すると、発振パラメータセット AAA の 5.8 秒窓では観測記録では 5.2 秒窓で卓越した入射方向と同じ方向かつ同じ見かけ速度の入射波が見られるのに対

して、発振パラメータセット BAA の 5.8 秒窓では 5.2 秒窓とは異なる見かけ速度の入射波が卓越している。このことは発振パラメータセット AAA の二乗振幅値が BAA のそれよりも大きい時間帯では BAA のそれには無い別の波のエネルギーがやってきていることを示している。さらに発振パラメータセット AAA の到来波のパターンを観察すると、明瞭な到来波に引き続く 0.6 秒後にその到来波とよく似た到来波成分（以降ではゴーストと呼ぶ）が観測される傾向が見受けられる。このことは、発振パラメータセット AAA の継続時間の長い振源波形（図 1-2-26, -27）の影響であると考えられる。

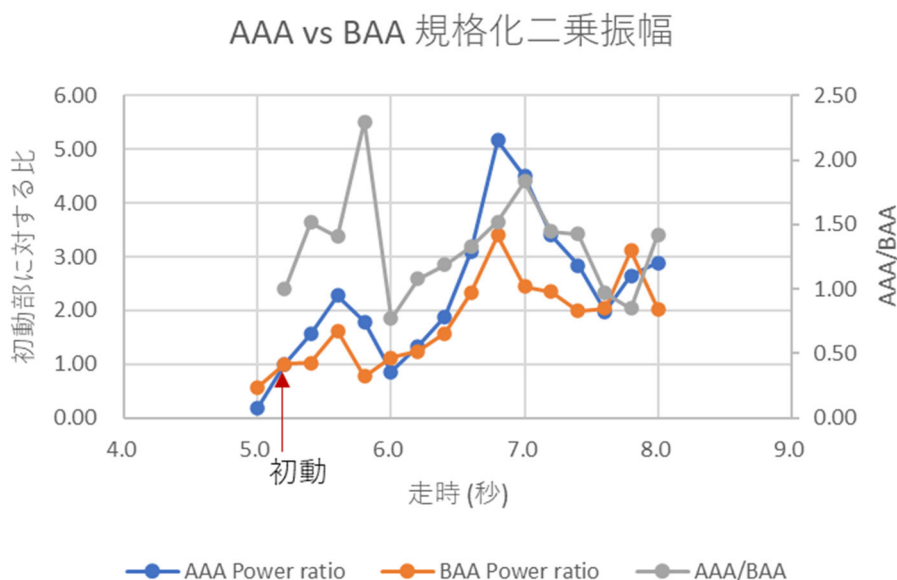


図 1-2-47. 規格化二乗振幅の推移

先述した近傍陸上観測の包絡線の推移のグラフ（図 1-2-27）によれば発振パラメータセット AAA では発振から 0.4 秒後に最初のエネルギーのピークがあり、発振から 1.1 秒後付近に 2 番目のエネルギーのピークが見受けられる。2 番目のピークの高さは最初のピークの高さの半分で、時間差は約 0.7 秒である。これに対して発振パラメータセット BAA では発振から 0.4 秒後にエネルギー放出の最初のピークがあり、2 番目のピークが発振から 1.8 秒後にある。しかし発振パラメータセット BAA では 2 番目のピークの高さは 1 番目のその 1/5 程度であり、AAA のそれに対して明らかに小さい。このことから AAA に見受けられる 0.6 秒後の時間帯におけるゴーストは振源波形の 2 番目の包絡線ピークに対応するものと考えられる。したがって、発振パラメータセット AAA による地震波到来方向解析の結果は振源波形における 2 つ目のエネルギー放出によるゴーストの影響を強く受けていると考えざるを得ない。

つぎに始良カルデラ深部からの反射波の有無について調べてみる。筒井他(2020)によって提案された始良カルデラ西部の構造モデルからは、震源距離 19.7km の KOMA に対して、それぞれの反射面の深さに対応した次の図 1-2-48 のような理論走時が与えられる。筒井他(2020)が指摘した始良カルデラ西部の深さ 13.6km の反射面からの P-SV 反射波は 9 秒弱の走時に現れ、かつ見掛け速度 5km/s 以上が期待される。

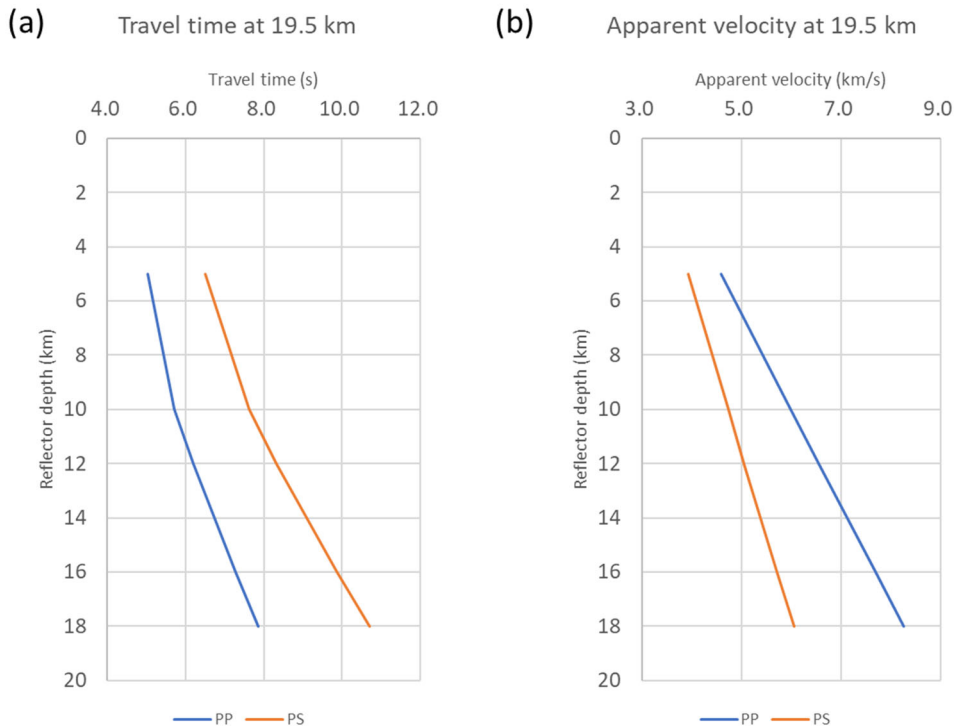


図 1-2-48 震源距離 19.7km における異なる反射面深さに対する (a) 理論走時と (b) 理論見掛け速度。速度構造モデルは筒井他 (2020) の始良カルデラ西部モデルを適用した。

発振パラメータセット AAA と BAA における 13.6km 深における P-SV 変換反射波の理論到来走時 (9 秒) 前後の上下動成分ビームフォーミング結果を、次の図 1-2-49、図 1-2-50 に示す。

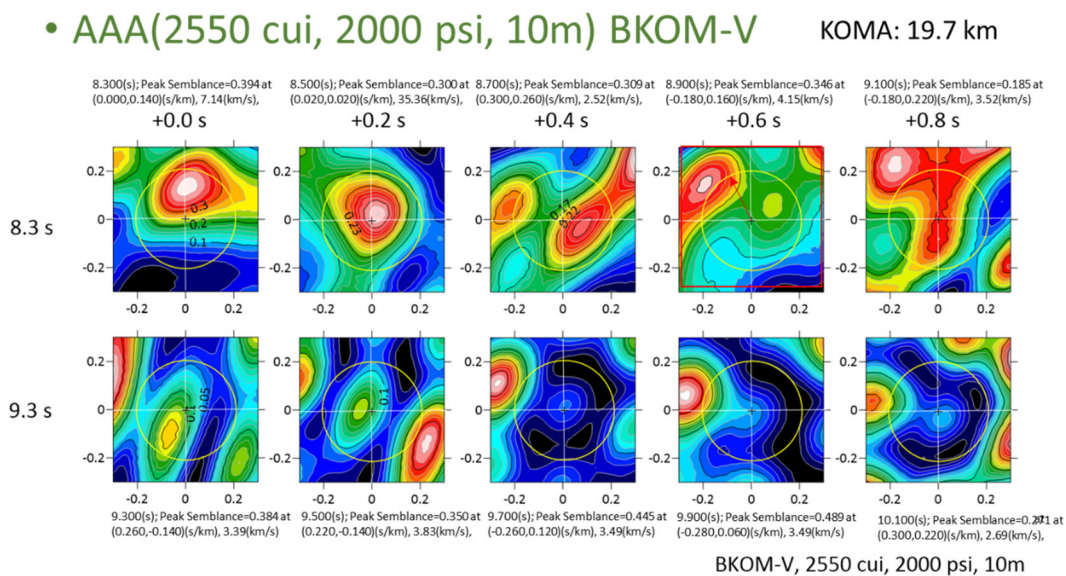


図 1-2-49. 発振パラメータセット AAA に対する上下成分の到来方向解析結果 (8.3~10.1 秒)。

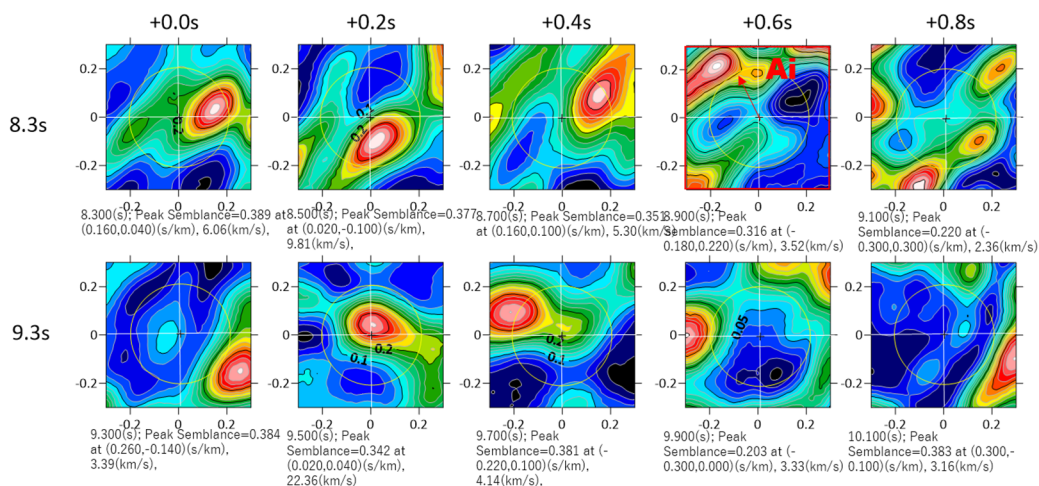
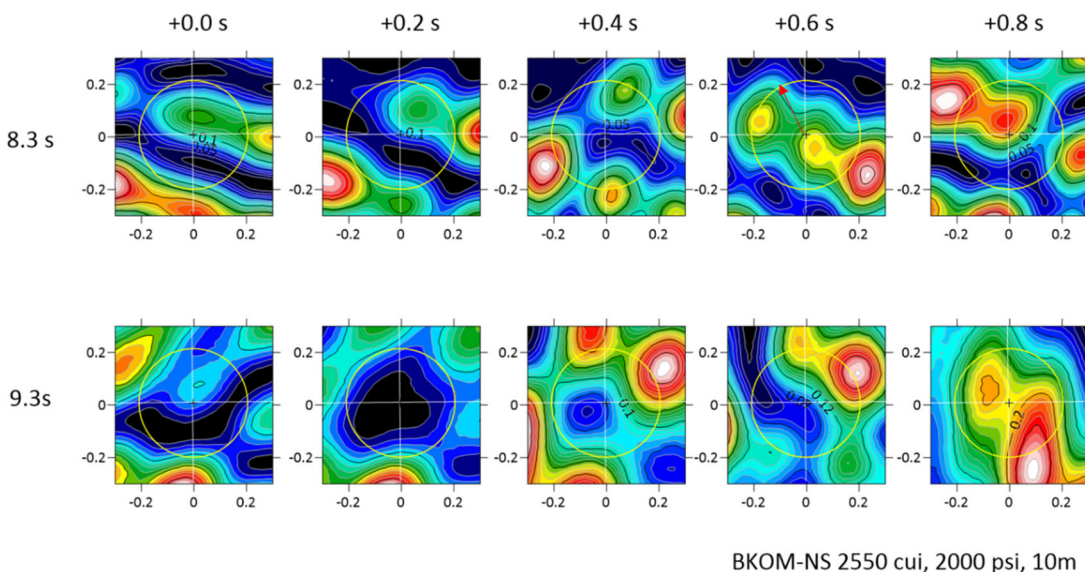


図 1-2-50. 発振パラメータセット BAA に対する上下成分の到来方向解析結果 (8.3~10.1 秒)。

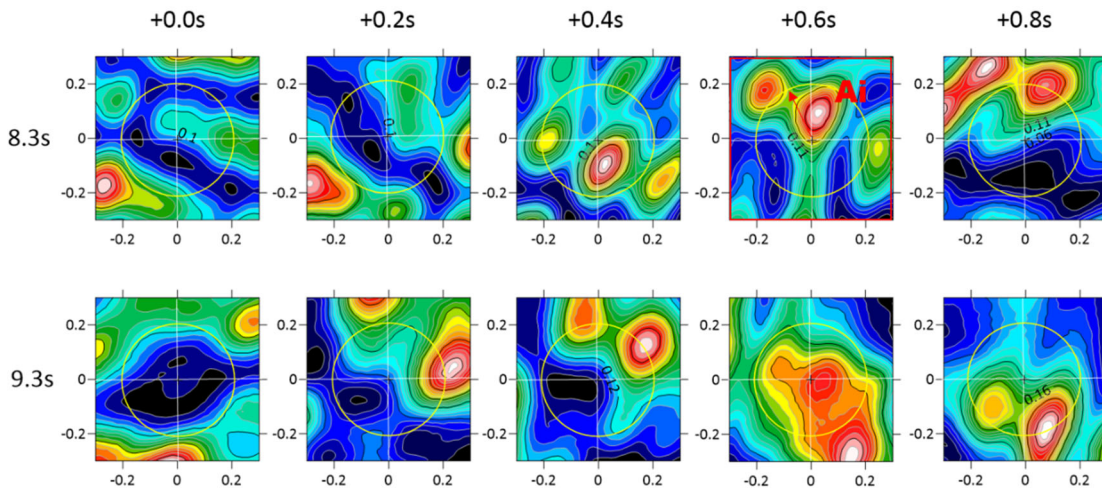
発振パラメータセット BAA では 8.9 秒のところに見かけ速度 5km/s 強で北方向からの入射波成分が認められるが、発振パラメータセット AAA の同じ時間窓では同様な 5km/s 強の入射波成分は認められない。A やはり後続相部分でも先述の初動部分同様に AAA と BAA の差異は大きい。特に 9.1~9.7 秒の区間の相違が著しい。先述の初動付近における地震波到来の考察と同様に発振パラメータセット AAA では先行到来波のゴーストの影響が顕著であると考えられる。したがって、発振パラメータセット BAA による到来波の推定結果のほうが好ましい結果であると考えられる。

次に同じ時間帯で PS 変換波がより明瞭に期待される南北成分についても 2つの発振パラメータセットによる到来方向推定を行った。その結果を次の図 1-2-51, 図 1-2-52 に示す。



BKOM-NS 2550 cui, 2000 psi, 10m

図 1-2-51. 発振パラメータセット AAA に対する南北成分の到来方向解析結果 (8.3~10.1 秒)。



1050cui, 2000psi, 10m BKOM NS

図 1-2-52. 発振パラメータセット BAA に対する南北成分の到来方向解析結果 (8.3~10.1 秒)。

発振パラメータセット BAA の 8.9 秒付近に北方向から入射する明瞭な位相のあることが注目される。この位相は先の図 1-2-50 の同じ時間帯の北方向からの入射波成分と同じものであると考えられる。KOMA は筒井・他(2020)の N-end アレイの約 2km 南南東に位置することから考えると、この明瞭な位相は深さ 13.6km からの P-SV 変換反射波である可能性が高いと考えられる。もしそうであるとすると、本実験で深さ 13.6km からの PS 変換反射波が検出されたものと考えられる。初動入射方向に対してこの後続相の到来方向が時計回りに回転することは筒井他(2020)の報告と同様である。一方、AAA の 8.9 秒付近には同様な波の入射は認められないが、図 1-2-53 および図 1-2-54 に示されるようにこの時間帯では AAA の波形に相対的に大きな振幅の到来が認められる。図 1-2-45 と 1-2-46 に示される初動付近の解析結果の特徴を考慮すると、発振パラメータセット AAA では深さ 13.6 km からの変換反射波はその振源波形に由来する先着波のゴーストに覆い隠されてしまっているものと考えられる。

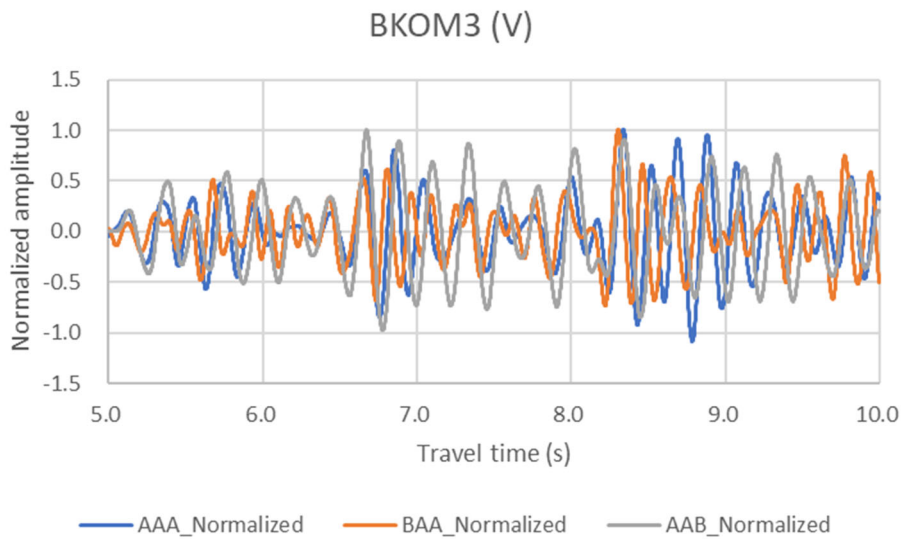


図 1-2-53. BKOM3 観測点における上下成分規格化観測記録。最大振幅で規格化した記録を重ねて示す。

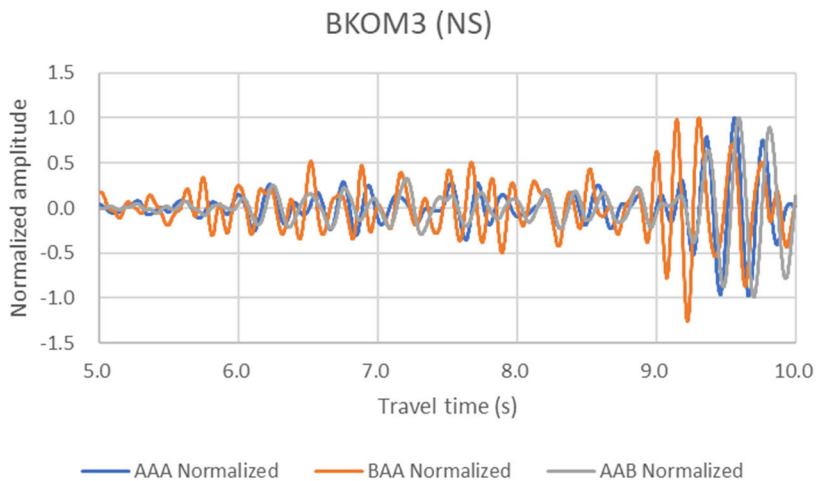


図 1-2-54. BKOM3 観測点における南北成分規格化観測記録。最大振幅で規格化した記録を重ねて示す。

また、同じエアガン容量で深度の異なる発振パラメータセット AAB の波形も AAA と同様な傾向を示し、地震波到来方向の推定でも同様な結果が得られた。やはり発振パラメータセット AAB による観測結果も先着波のゴーストの影響が強く表れていると考えられる。

以上のことからやはり発振パラメータセット BAA のほうが長期連続反射法に良い結果を与えることが示された。単に記録全体の S/N 比を表す目的であれば、より大きな容量のエアガンを使うことでより少ない発振回数で目標の S/N 比を達成することができる。しかし観測記録の後続相部分の分解能の観点からは必ずしも総容量が大きいほど良い結果を与えるとは限らないことを今回の実験の結果は示している。

e. 地表観測と孔中観測点

今回の基礎実験では孔中観測と地表観測とを比較するために、孔中観測点 BKOM1~7 の地表にそれぞれ地表観測点 SKOM1~7 を併設した。地表地震計の設置条件は先述の通りである。

次の図 1-2-55 は地点 7 における地表観測点 SKOM7 の記録と孔中観測点 BKOM7 の記録を比較したものである。

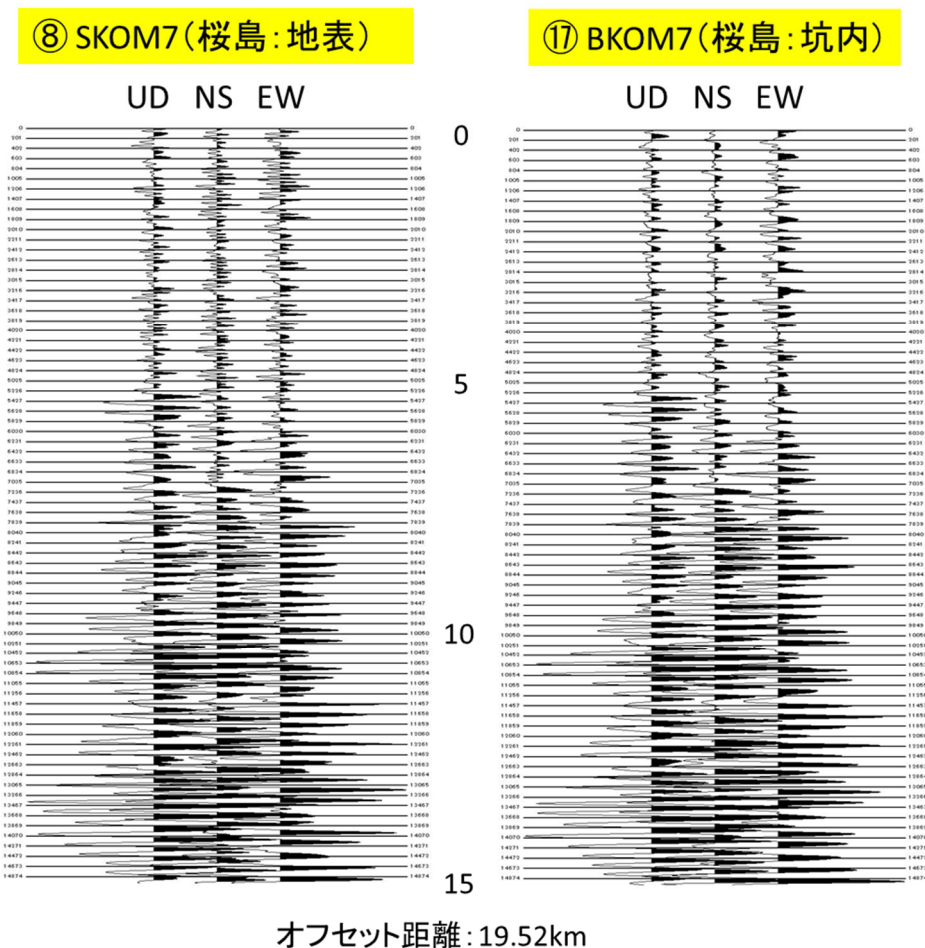


図 1-2-55. 地表観測点記録と孔中観測点記録

上図に示されるように地表受振の多くの記録には、20Hz 以上のノイズが重畳していた。ノイズの大きさは設置場所により異なっていた。

9つの地表受振点の内、SKOM4 及び SKOM5 は他の点と比べ、ノイズレベルが格段に小さかった。観測されたノイズは概ねランダムノイズであり、フィルター処理で抑圧可能である。したがって地表の記録であっても適切なフィルター処理を施せば、深部反射のモニタリングに利用する事が可能であると考えられる。地表観測点は観測網拡張のための予察機動観測に有効であると考えられる。

(1)-2-5. まとめ

令和2年度の長期連続反射法基礎実験により、次のことが明らかになった。

- ・ エアガン発振では構成や水深、動作圧等の発振パラメータセットが異なると発振波形が変化する。水深が浅いと発振パラメータが同じでも発振波形の変異幅が大きくなる。
- ・ 今回の基礎実験では1050 cui トリガン（発振パラメータセット BAA）のほうが2550 cui エアガンクラスタ（発振パラメータセット AAA および AAB）より短い時間内で振源からのエネルギー放出が完了し、2550 cui エアガンクラスタ（発振パラメータセット AAA および AAB）より深部からの反射波の補足に好ましい振源波形を放射することが分かった。
- ・ 1050cui トリガンによる発振では、8.9 秒付近に始良カルデラの地下 13.6 km 深からの変換反射波が確認された。
- ・ 同じ水深かつ同じ圧力で発振を行う場合、2550 cui エアガンクラスタより 1050 cui トリガンのほうが単位時間あたり高い効率で人工地震波の発振を行うことができる。
- ・ 水深 6m の発振は水深 10m における同じエアガンクラスタの半分の出力が地震波として放射されるが、相対的に高周波成分が小さくなるとともに地表での加速度振幅が大きくなる傾向がある。
- ・ 孔中観測点は地表観測点よりノイズが少ない。地表観測点は 20 Hz 以上の周波数帯域のノイズが重畳することが多いが、フィルター処理を施すことによりノイズの抑圧は可能である。今後の観測網の拡張の予察を目的として地表観測点を機動的に展開することは有効であると考えられる。

以上のことから 1050cui トリガンは始良カルデラ深部からの地震反射波を観測する目的に好ましい特性をもつことが分かった。一般にエアガンは総容量が大きいほどその放出エネルギーは大きい、観測記録の後続相部分の分解能の観点からは必ずしも総容量が大きいほど良い結果を与えるとは限らない。単に記録全体の S/N 比を表す目的であればより大きな容量のエアガンを使うことでより少ない発振回数で目標の S/N 比を達成することができるので、初動走時のみを利用する目的であればより大きな容量のエアガンを使うことが良い結果につながる。令和元年度の予備調査で推奨された 2550 cui, 2000 psi, 10m における発振は長期連続反射法の継続的観測という観点では過大な出力であるうえに、振源波形の継続時間が長くエネルギーが時間的に離れた複数のピークに分散する傾向があるため、観測記録上では振源波形の後続のピークに由来する波形によって遅れて現れる深部からの反射波を覆い隠してしまう傾向がある。

また、本実験によって始良カルデラの地下 13.6km からの変換反射波を捉えることができた。長期連続反射法では自然地震より短い波長の地震波の 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。さらにデータを検討することによって、13.6 km 深ばかりではなくそのほかの深度の地震反射面に関する後続相の存在が指摘できる可能性がある。今回得られたデータに含まれる変換反射波/反射波の振幅と走時を継続的に追跡することによって、これらの到来波をもたらす反射面の性質や深度の変化を知り、始良カルデラ深部のマグマだまりの物性変化や深度変化を検出できると考える。

今後長期連続反射法に用いるエアガンは 1050 cui トリガンが望ましいと考えられる。エアガンの発生する振源波形は発振パラメータ、特にクラスタエアガンの構成に大きく依存する。長期連続反射法の

継続性の確保の観点からクラスタエアガンの構成を 1050 cui トリガンに絞って実験を継続実施することで、発振パラメータの検討と反射変化検出の基準となる参照データの蓄積をする必要がある。

謝辞

本項目を実施するにあたり、下記の関係機関・地元住民の皆様のご高配を賜った。住吉池の属する県立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。さらに、ポンツーン搭載試験およびエアガン実験に使用したエアガンシステムのうち、BOLT 1500LL(1500cui)は東京大学地震研究所所有物を借用した。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 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.
- TSUTSUI, T., YAGI, N., IGUCHI, M., TAMEGURI, T., MIKADA, H., ONISHI, K., MIYAMACHI, H., NISHIMURA, T., MORITA, Y. and WATANABE, A. (2013) "Structure of northeastern Sakurajima, south Kyushu, Japan, revealed by seismic reflection survey." *KAZAN*, Vol. 58, No. 1, 239-250.
- 井口正人・為栗健・山本圭吾・大島弘光・前川徳光・森濟・鈴木敦生・筒井智樹・今井幹浩・對馬和希・八木直史・植木貞人・中山貴史・山本芳裕・高木涼太・猪井志織・古賀祥子・西村太志・Titi Anggono・山本希・及川純・長田昇・市原美恵・辻浩・青木陽介・森田裕一・渡邊篤志・野上健治・山脇輝夫・渡邊俊樹・中道治久・奥田隆・立花健二・Enrique Hernandez・橋田悠・平井敬・吉本昌弘・山崎賢志・毛利拓治・清水洋・中本真美・山下裕亮・三ヶ田均・尾西恭亮・田中暁・岡野豊・川林徹也・藤谷淳司・坂口弘訓・今泉光智哲・大倉敬宏・吉川慎・安部裕希・安藤隆志・横尾亮彦・相澤広記・高山鐵朗・山崎友也・多田光弘・市川信夫・加茂正人・富阪和秀・宮町宏樹・小林励司・八木原寛・平野舟一郎・泊知里・西山信吾・吉田沙由美・畠山謙吾・西田誠・加藤幸司・宮村淳一・小枝智幸・増田与志郎・平松秀行・河野太亮・松末伸一・大薄富士男・五藤大仁・宮下誠・伊藤弘志・音成陽二郎, (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, 293-307.
- 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.

- 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 (火山性地殻変動と地下構造およびマグマ活動に関する研究) 事業、345pp.
- 渡辺晃 (1971) 近地震のマグニチュード, 地震 II, 24, 189-200.
- Muramatu, E., (1966) Expectation of maximum velocity of earthquake motion within 50 years throughout Japan. Sci. Rep. Gifu Univ., 3., 470-481.
- 鹿児島県蒲生町 (1969) 蒲生郷土誌, 鹿児島県蒲生町, 530pp.
- Vaccaro, M. J., and Noble, R. M., (1993) Technical Memorandum :EVALUATION OF WATER AND AIR GUN SEISMIC SOURCES AT SENECA LAKE, NAVAL UNDERSEA WARFARE CENTER DETACHMENT NEW LONDON, CT, TM 931059, 29 pp.
- Hatton and Haartsen, (1990), "Computer Modelling of Clustered Airguns", First Break, vol. 8, no. 9, (Sept.)

(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の地下における火山活動の推移を監視評価することを目的とした地盤変動観測と、その結果得られた始良カルデラの活動の推移について述べる。地盤変動観測は地下の物質移動量を把握する手法として定着している。本項目ではGNSS連続観測網の西部による地盤変動観測能力の強化、GNSSキャンペーン観測による地盤変動圧力源解析の高分解能化、GNSS観測データ水平成分と既存の水準測量データの統合解析による地盤変動圧力源の検証、GNSS連続観測による地盤変動圧力源位置と強度の推移と、桜島からの火山灰放出量を考慮した始良カルデラ深部からのマグマ供給量の推移について述べる

また、(2)-2項では始良カルデラ中央部の地盤変動圧力源直上での地盤変動観測を目指す海底地盤変動観測装置の設計と検討について述べる。

(2)-1. 始良カルデラの火山性地殻変動データの蓄積

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

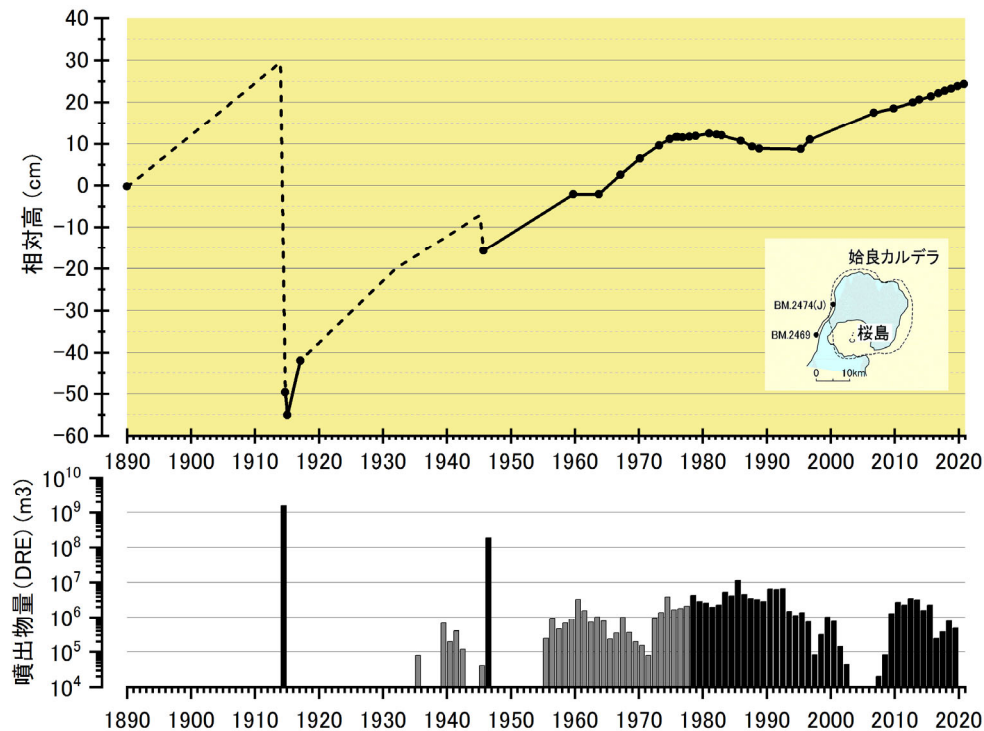


図 2-1-1-1 始良カルデラ西縁の BM2474 の BM2469（鹿児島市）に対する相対上下変動および桜島の噴火による噴出物量の時間変化

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

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

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

以下では、始良カルデラ周辺の地殻変動観測網の継続・強化について述べ、次に 2017 年から 2019 年の期間について GNSS 観測で得られた水平変動からテクトニックな定常的変動の影響を除いたデータと水準測量による上下変位データを統合する形で従来より広範囲のデータを用いて始良カルデラ下の圧力源の位置と体積変化量を求めた結果を報告する。さらに桜島からの噴出物量を考慮した始良カルデラ下へのマグマ供給量の見積もりを示す。

(2)-1-1. 始良カルデラ臨時 GNSS 観測点の拡充と継続

a. 既設 GNSS 観測点における観測の継続

本課題では、原子力規制庁が「原子力施設等防災対策費等委託費（火山影響評価に係る技術的知見の整備）事業」により設置した観測点および 2019 年度に整備した BNTJ 観測点および SNJ2 観測点（図 2-1-1-2 の□印）における GNSS 観測を引き続き継続することとしている。

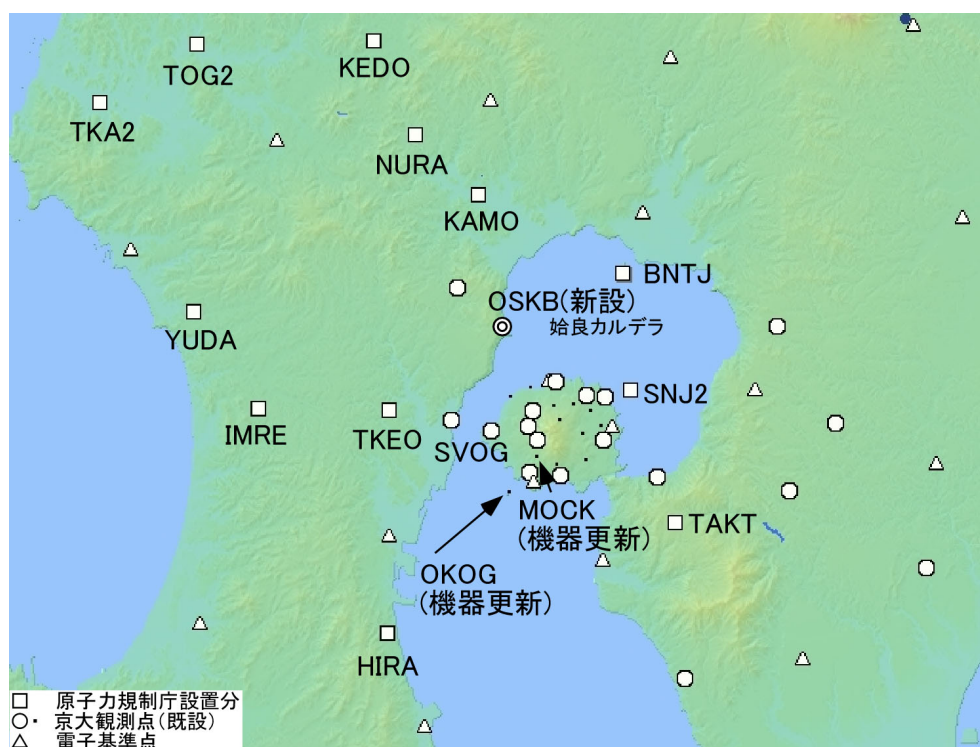


図 2-1-1-2. GNSS 観測点の位置

これらの観測点での観測は順調で、後述の BNTJ 観測点を除いて機器故障等も発生せず、長期の欠測は生じていない。BNTJ 観測点では、2020 年 4 月 6 日から観測点との通信ができなくなり、同月 16 日に現地にて調査した。前回の点検時に昆虫等の侵入対策を強化しており蟻等の侵入はなかったが、充電コントローラーの故障によりバッテリーが放電して電源供給ができなくなっていた。充電コントローラーおよびバッテリーを交換して復旧した。この障害により復旧までの約 10 日間が欠測となった。2020 年台風 10 号は鹿児島県内にも暴風雨をもたらした。BNTJ 観測点は海岸の直近に位置しているため、台風通過後の 2020 年 9 月 15 日に現地にて点検を実施したが特段の異常はなかった。その他の観測点においても台風通過後の定期点検で機器の設置状況等に異状はみられなかった。

原子力規制庁および京都大学が設置した GNSS 観測点で得られた観測データは、SVOG を基準点として基線解析を行い、1 日毎の各観測点の位置データが蓄積されている。得られた位置データの例として、図 2-1-1-3 に 2019 年度に設置した SNJG および BNTJ 観測点の

日毎の位置を示す。夏季にややばらつきが大きいですが、日毎の測位結果は概ね安定している。なお、SNJ2 観測点が安定して観測を継続できることがわかったので、新島において従来から観測していた SNJG 観測点は 2020 年 10 月 2 日に並行観測を終了した。

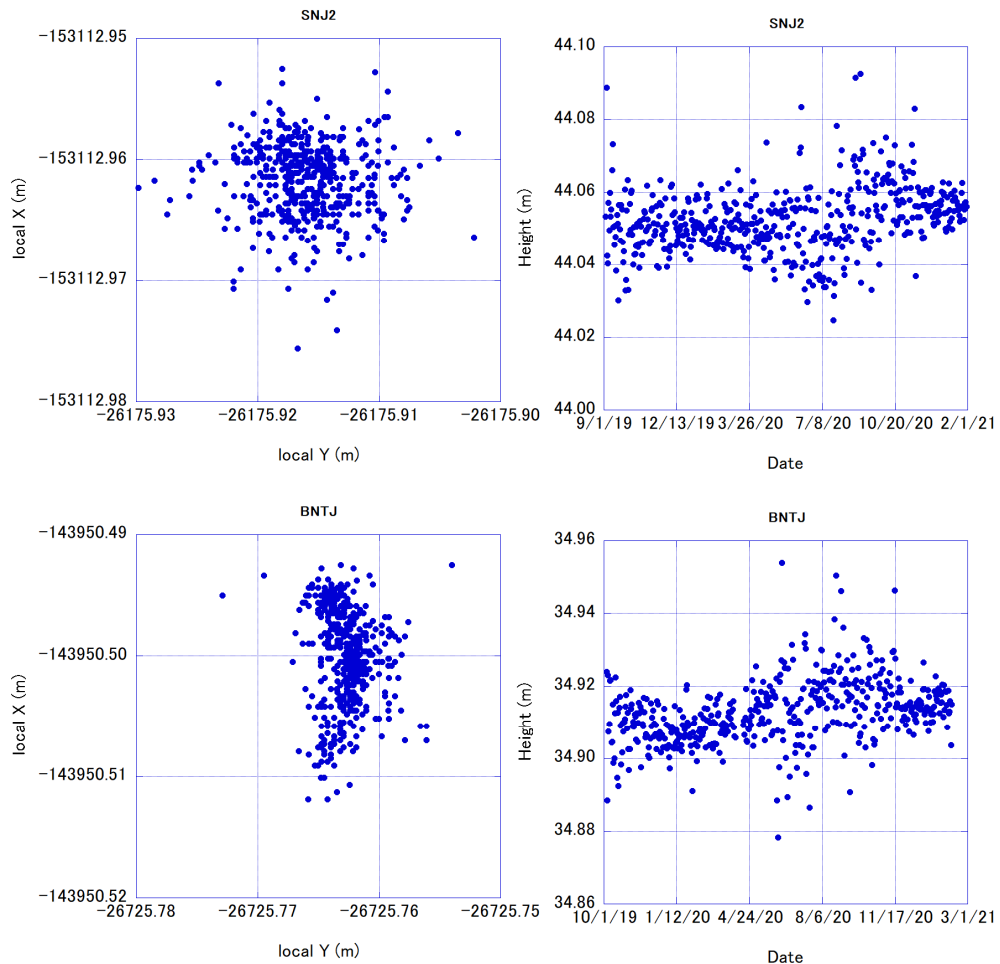


図 2-1-1-3 SVOG を基準点として求めた SNJ2 (上段) および BNTJ 観測点 (下段) の日毎の水平位置 (左列、座標系は 2 系) および楕円体高 (右列)

BNTJ と SNJ2 は始良カルデラをほぼ南北に横切る基線を形成する。図 2-1-1-4 は BNTJ の SNJ2 に対する位置の差を示したもので、2020 年半ばまでは、BNTJ が SNJG に対して北北西へ移動、つまり BNTJ-SNJG 間の水平距離が伸長し、その後移動が止まっている傾向が認められる。また、始良カルデラ中央部から 60km 西方に位置することから始良カルデラ起源の変動が小さいと考えられる YUDA 観測点を基準点として BNTJ 観測点の位置を求めた場合 (図 2-1-1-5) でも、東西および上下成分に若干の季節変動がみられるものの 2020 年半ばごろまで BNTJ が YUDA に対して北方に移動しその後移動が止まっている傾向が認められる。その傾向が互いに似ていることからみて、これらの変動は始良カルデラ下に起源をもつ地盤変動を反映していると考えられる。

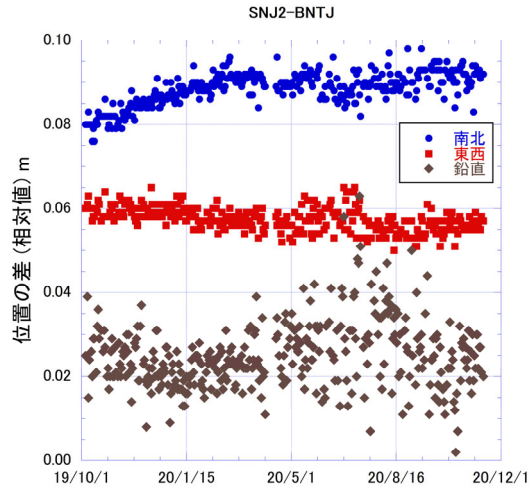


図 2-1-1-4 SNJ2 観測点に対する BNTJ 観測点の位置の時間変化 (基準点:SV0G) の南北、東西、上下成分。値は相対値でそれぞれ北、東、上が正の値をとる。

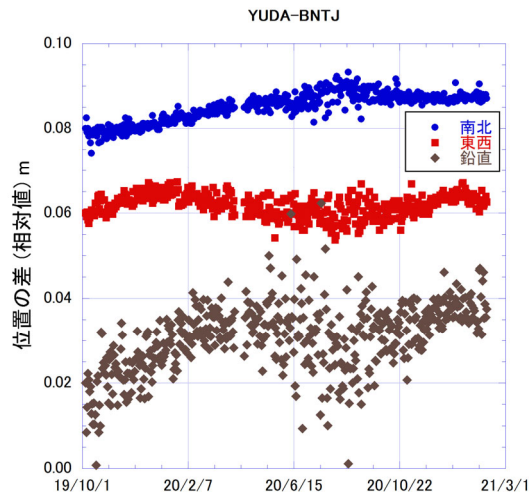


図 2-1-1-5 YUDA 観測点に対する BNTJ 観測点の位置の時間変化 (基準点:YUDA) の南北、東西、上下成分。値は相対値でそれぞれ北、東、上が正の値をとる。

b. 始良カルデラ西縁部への GNSS 観測点新設

上述のように BNTJ および SNJ2 での GNSS 観測は順調であり、これらに加えて始良カルデラ西縁部に観測点を増設することにより、始良カルデラ中央部を囲む比較的短距離かつ標高差の小さい基線網を構築することができる。そこで鹿児島湾西岸の大崎鼻付近 (図 2-1-1-2 の OSKB) に GNSS 観測点を新設することとした。

2020 年 5 月 7 日に現地調査を行って候補地を選定した後、地権者との借地交渉や自然公園法関係の許可申請などを経て、2020 年 11 月 19 日に観測機器および電源機器を設置し (図 2-1-1-6)、同日より OSKB 観測点として観測を開始した。また、併せて水準点も設置した。観測機器は BNTJ 観測点と同様にライカジオシステムズ社製 GNSS 受信機 GR30 と同社製アンテナ AR10 を使用した。観測データは、受信機に装着したメモ리카ードに蓄積

され、モバイル通信網を介して取得することができる。



図 2-1-1-6 OSKB 観測点の機器設置状況

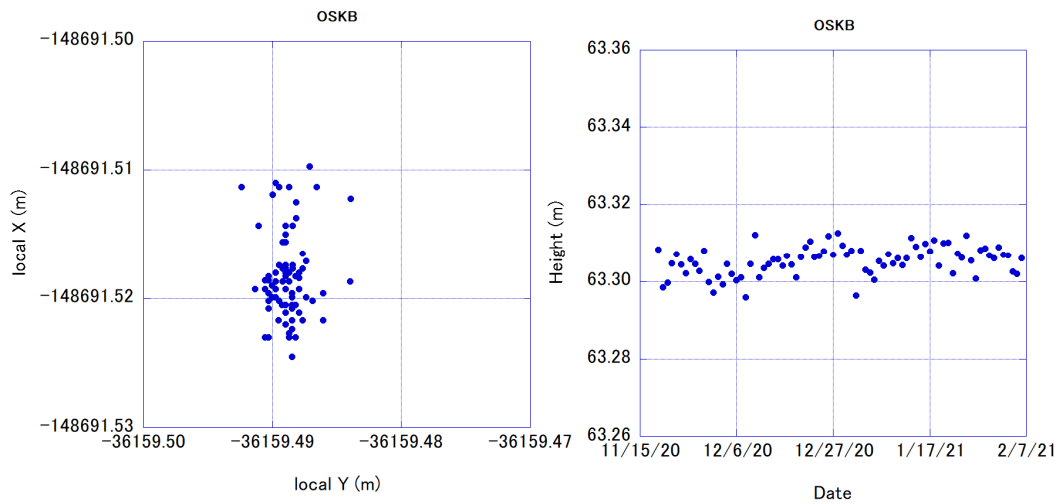


図 2-1-1-7 SVOG を基準点として求めた OSKB 観測点の日毎の水平位置（左、座標系は 2 系）および楕円体高（右）

図 2-1-1-7 に OSKB 観測点の日毎の位置を示す。まだ設置してから日が浅いが、これまでのところ観測は順調で、欠測等は発生していない。

OSKB 観測点を設置したことにより、BNTJ および SNJ2 と組み合わせて始良カルデラ中央部を囲む比較的短距離かつ標高差の小さい基線網が構築された。今後の観測継続によって、始良カルデラの火山性地殻変動をより敏感にとらえるための良質なデータの蓄積が期待される。

c. 既設 GNSS 観測点の機器更新

桜島南西部の持木地区に設置された MOCK 観測点および桜島南西方の沖小島に設置された OKOG 観測点（位置は図 2-1-1-2 参照）では、観測機器の老朽化が進んでおり、これらの観測点は始良カルデラの圧力源解析を行う上でも重要な観測点であることから、機器更新を行うことにした。

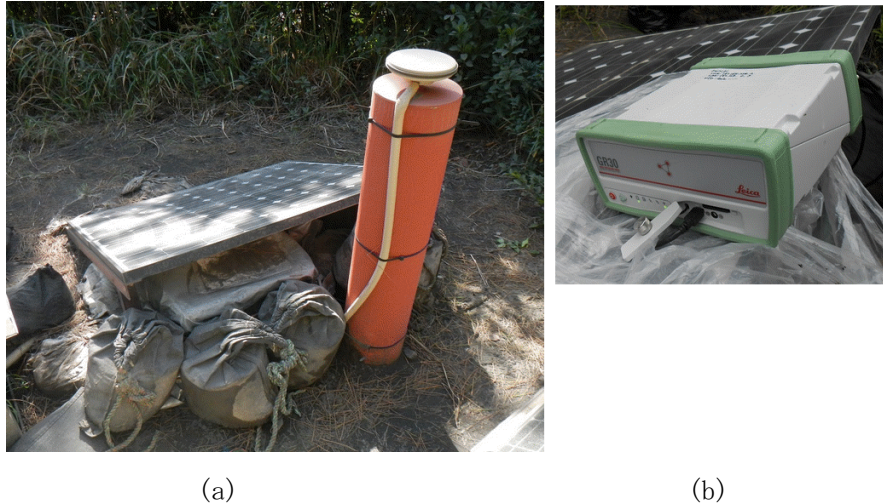


図 2-1-1-8 MOCK 観測点の GNSS 機器設置状況。(a) 全景、(b) 受信機を取り出した状況

MOCK 観測点においては、2020 年 8 月 7 日に機器更新を実施した。アンテナは既設のものを使用し、受信機をライカジオシステムズ社製 GR30 に置き換えた（図 2-1-1-8）。同観測点では GNSS 観測機器に隣接して光学式ディストロメータが設置されており、その制御用 PC にはモバイルルーターが接続されている。そこで GR30 を USB ケーブルでディストロメータ制御用 PC に接続して GR30 への遠隔アクセスを可能にした。しかし、現地のモバイル通信環境があまりよくないため、GR30 の動作状況の確認などは可能だが、遠隔による観測データの取得は難しく、従来通り記録は現地収録としている。図 2-1-1-9 に MOCK 観測点の日毎の位置を示す。これまでのところ順調に観測データが得られている。

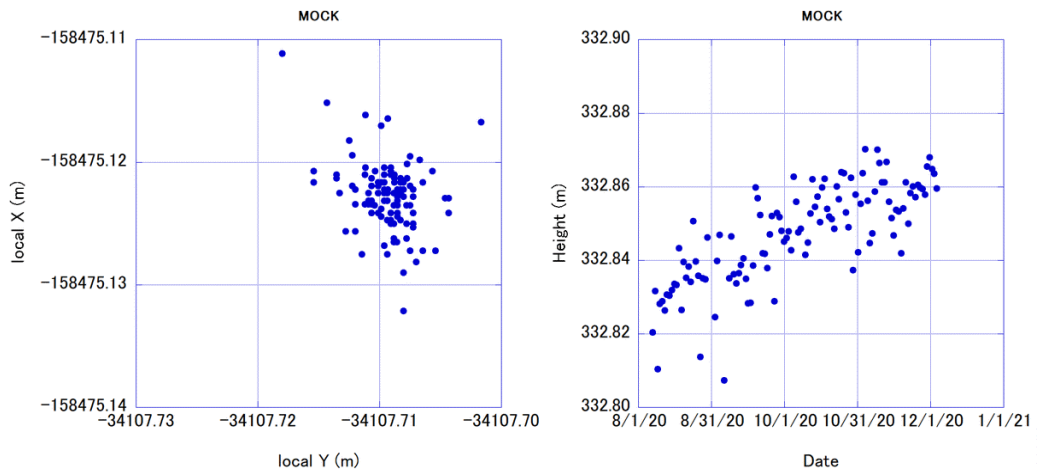


図 2-1-1-9 SVOG を基準点として求めた MOCK 観測点の日毎の水平位置（左、座標系は 2 系）および楕円体高（右）

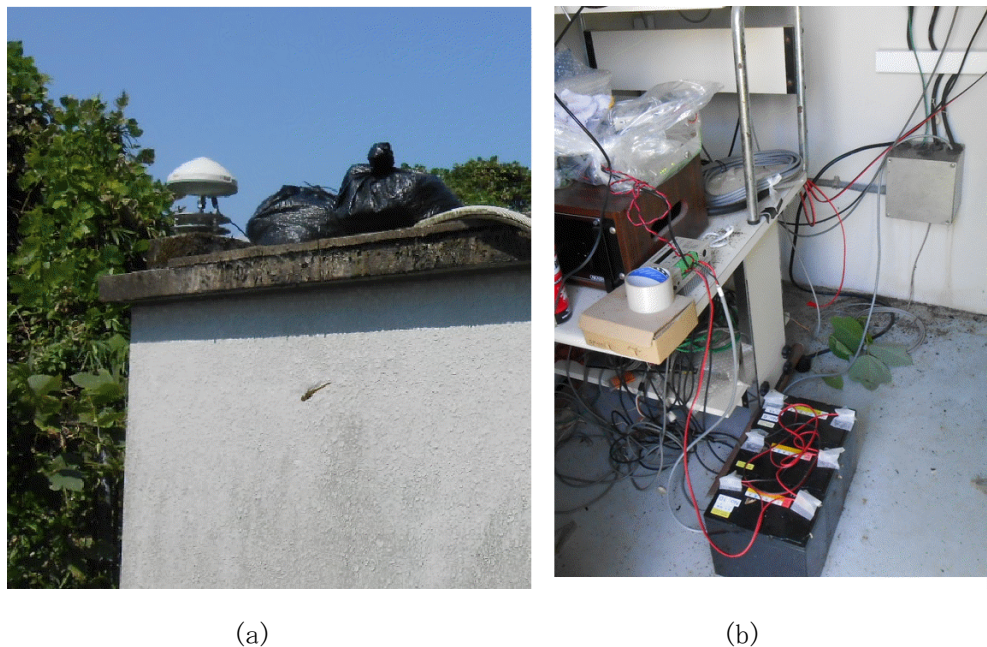


図 2-1-1-10 OKOG 観測点の機器設置状況。(a) アンテナ設置状況、(b) 受信機設置状況

OKOG 観測点においては、現地の下見を行い施工方法の検討や必要資材の準備を経て 2020 年 10 月 1 日に機器更新を実施した。ここではアンテナをライカジオシステムズ社製 AR10 に、受信機を同社製 GR30 に置き換えた（図 2-1-1-10）。また、太陽電池パネルおよび充電コントローラーを交換したほか、モバイルルーターを新たに設置してモバイル通信網による観測データ収集ができるようにした。図 2-1-1-11 に OKOG 観測点の日毎の位置を示す。図に示した楕円体高は、アンテナ交換時に測定したアンテナ高を用いて新旧のアンテナ高の差を補正している。これまでのところ順調に観測データが得られており、アンテナ交換による位置のギャップも認められない。

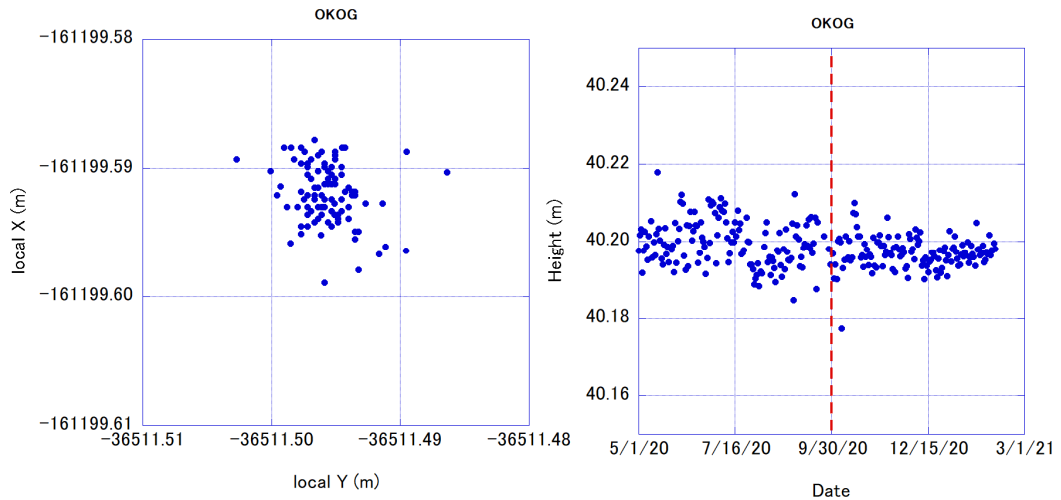


図 2-1-1-11 SVOG を基準点として求めた OKOG 観測点の日毎の水平位置（左、座標系は 2 系）および楕円体高（右）。アンテナ交換を伴う機器更新を実施した 2020 年 10 月 1 日（右図の赤点線）前後の位置を示した。

d. 新島北方の中ノ島におけるキャンペーン観測の実施



図 2-1-1-12 中之島 (NAKN) における GNSS キャンペーン観測の機器設置状況

2020 年 11 月 30 日から 12 月 4 日の期間、新島北方の中ノ島において、既設のベンチマークを利用したキャンペーン観測を行った（図 2-1-1-12）。使用した機器はライカジオシステムズ社製 GNSS 受信機 System500 および同社製アンテナ AT501 で、欠測等はなく所期の観測データが得られた。

中ノ島観測点 (NAKN) で得られた上下変動量を図 2-1-1-13 に示す。NAKN では 2010 年 11 月に対して 5cm 弱の隆起が観測され、2019 年からは 3mm の隆起を示している。近隣の京都大学の連続観測点 (FUTG) および電子基準点 (960719) と比べてみると、変動のパターンが互いによく似ていることから本観測点におけるキャンペーン観測の信頼性は高い

と考えられる。

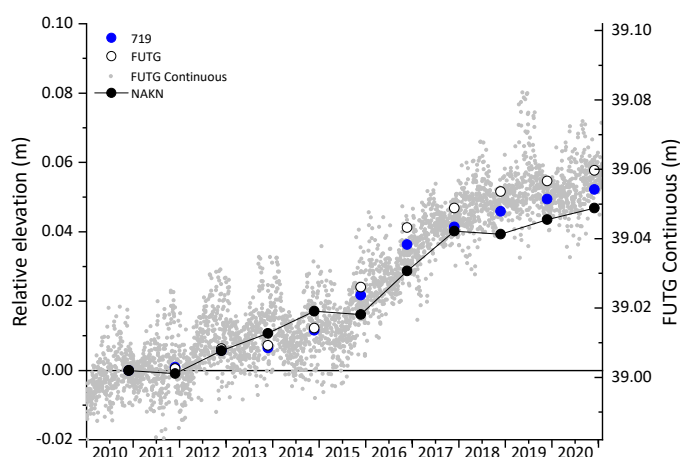


図 2-1-1-13 キャンペーン観測による NAKN（黒丸）の上下変動
電子基準点 960719（青丸）、FUTG（白丸、灰色の点は連続観測）をあわせて示した。

e. GNSS 連続観測による始良カルデラ周辺の地殻変動

始良カルデラ周辺のより広域の地殻変動を把握するため、原子力規制庁および京都大学の GNSS 連続観測点に加えて始良カルデラ中央部から概ね 60km 以内に位置する国土地理院の電子基準点を合わせた約 80 点の観測データを用いて、始良カルデラ中央部から約 80km 離れた甕島に位置する国土地理院の電子基準点 950487（鹿島）を固定点とした基線解析を行い、2017 年以降の各観測点の位置を算出している。基線解析には Leica Geo Office ソフトウェアを使用した。求められた観測点毎の日々の位置に、斎藤・井口（2006）が示した水蒸気圧と相対位置の比を用いる気象補正を適用した。補正には、鹿児島地方気象台における日毎の蒸気圧（気象庁、2020）を用いた。

令和元年度に行った基線解析結果から各観測点の気象補正後の日々の位置のばらつきをみると、水平方向では標準偏差で数 mm 以内であるのに対し、上下方向ではおよそ 20～30mm となり、上下方向のばらつきが大きい。この問題を改善するため、Leica Geo Office ソフトウェアの解析パラメータのうち、対流圏モデルをこれまでの解析で用いていた Hopfield から computed に変更した。図 2-1-1-14 は TAKT 観測点を例に異なる対流圏モデルによる解析結果および気象補正の適用前後を比較したものである。対流圏モデルを computed にすることで上下方向（楕円体高）のばらつきが大きく改善されていることがわかる。また、楕円体高、水平位置とも、気象補正によって年周変化が軽減されている。

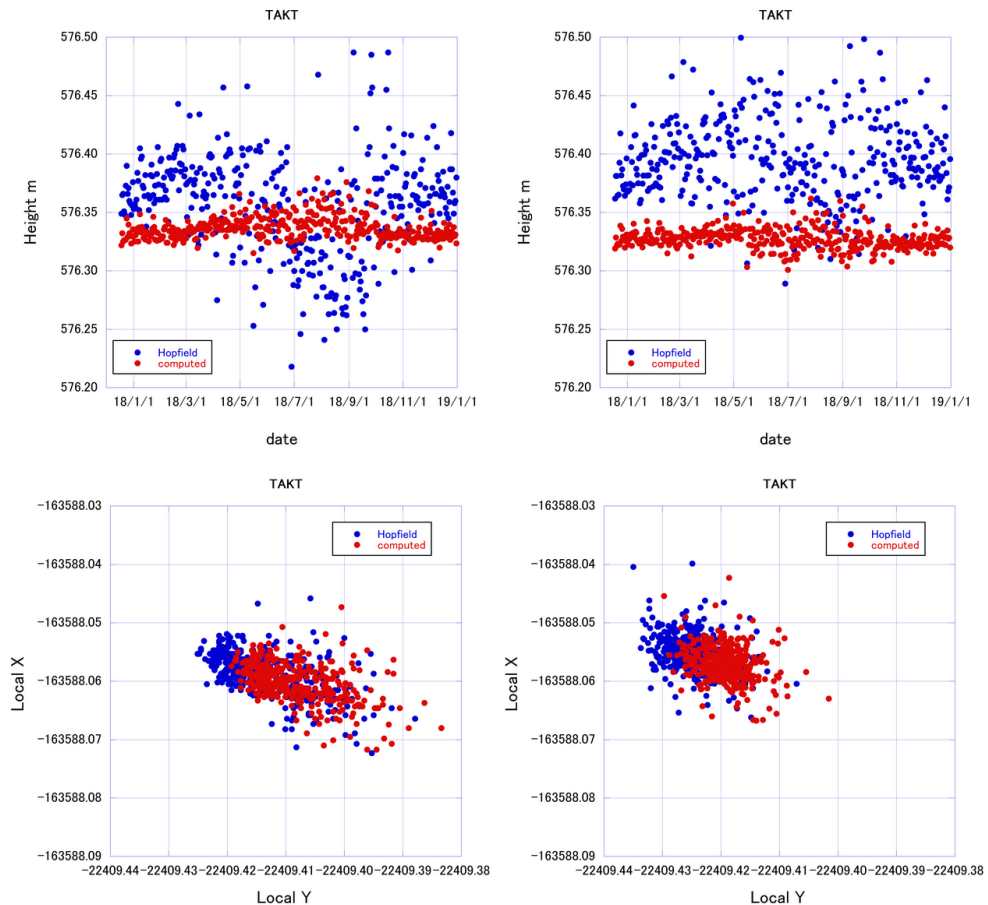


図 2-1-1-14 対流圏モデルを Hopfield および computed として求めた TAKT 観測点の日毎の位置の比較。上段は楕円体高 (m)、下段は水平位置 (m、座標系は 2 系)、それぞれ左図は気象補正前、右図は気象補正後。シンボルの色は青 : Hopfield、赤 : computed。

このように対流圏モデルを変更することで基線解析結果のばらつきを改善できたため、改めて対流圏モデルを computed とした基線解析を行い、各観測点の位置を求めた。これまでのところ、2017 年から 2019 年までの日毎の位置が得られている。基線解析結果の例として、原子力規制庁が設置した観測点で得られた日毎の位置から外れ値を除外し、気象補正を施したものを図 2-1-1-15 に示す。

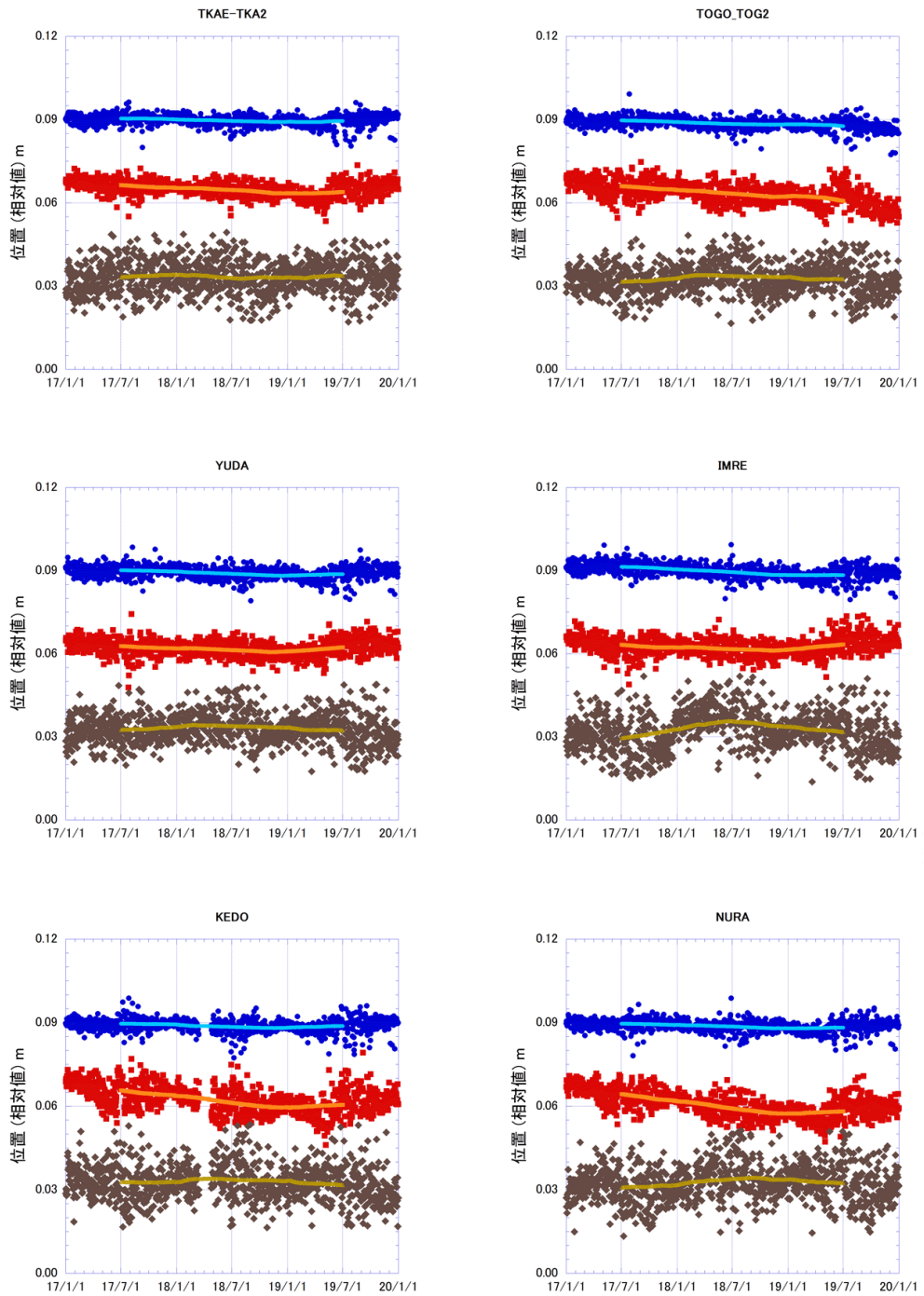


図 2-1-1-15 2017 年-2019 年の GNSS 観測点の位置の時間変化。電子基準点 950487 を固定点として 1 日毎に解析し、気象補正を施した各観測点の位置の南北、東西、上下成分とそれぞれの 365 日移動平均。値は相対値でそれぞれ北、東、上が正の値をとる。TKA2 および TOG2 はそれぞれ TKAE および TOGO を移設したものの。

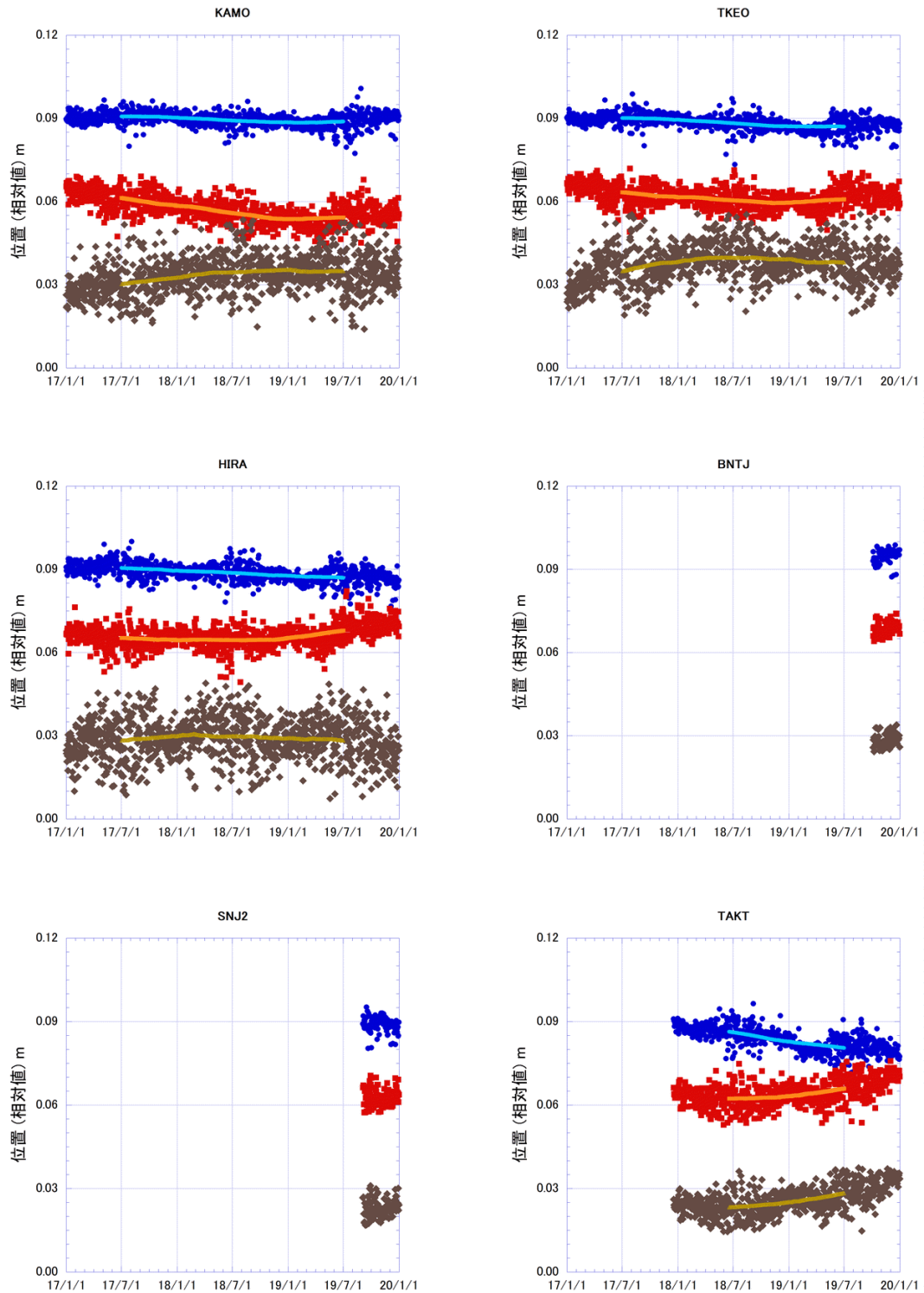


図 2-1-1-15 (続き)。

気象補正によって軽減されてはいるものの年周変化と考えられる変化が認められる観測点もあるが、いずれの観測点でも、期間中の位置変化の方向に大きな変化はみられず比較的単調な変動を示す。そこで、すべての観測点について、日々の位置変化を直線近似しその傾きを用いて2017年初めから2019年末までの各観測点の位置の変化量(変位)を求

めた。図 2-1-1-16 はこうして求めた GNSS 観測点の変位を地図上にプロットしたものである。水平変位をみると、全体として北東-南西方向に伸長するようなテクトニックな広域変動（渡部・田部井、2004）が支配的であるが、始良カルデラおよび霧島の近傍ではそれとは異なる傾向がみられ、火山性地殻変動を反映していると考えられる。上下変位においても、変位の決定精度は水平成分に比べて劣るが、始良カルデラおよび霧島近傍で周辺とは異なる変動の傾向が認められる。

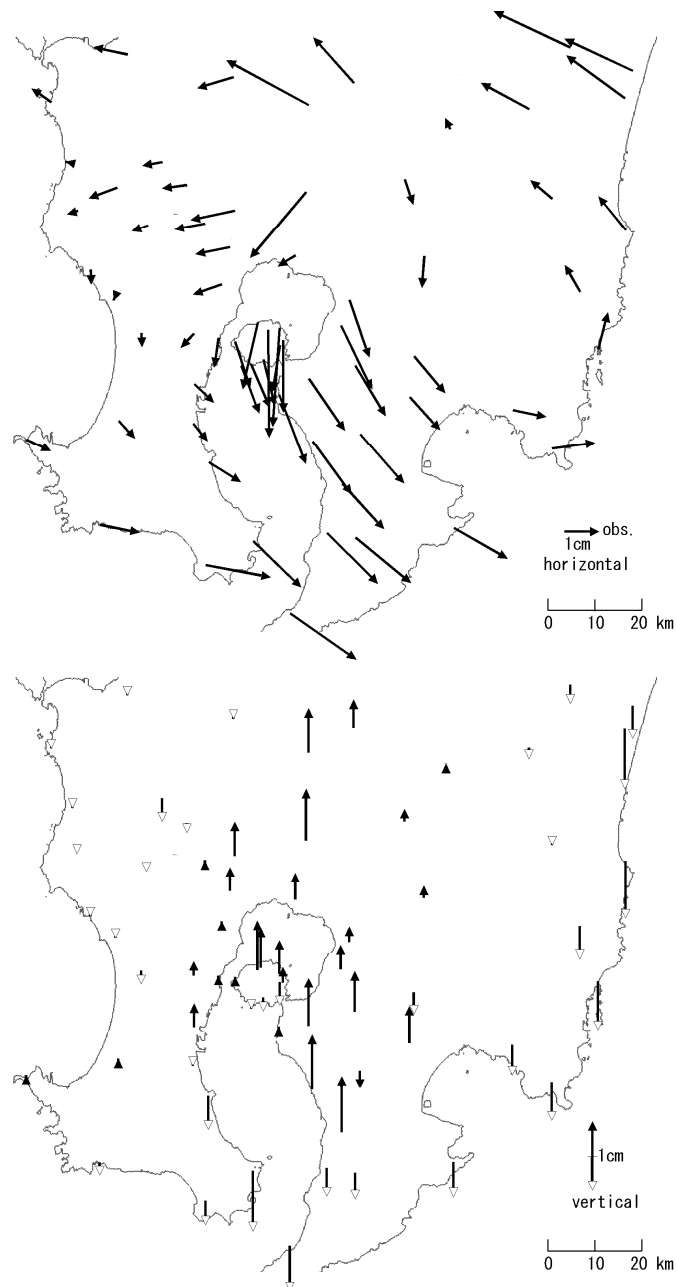


図 2-1-1-16 GNSS 基線解析による 2017 年-2019 年の GNSS 観測点の水平変位（上）および上下変位（下）。電子基準点 950487 を固定点として求めたもの。見やすさのため桜島内の観測点の一部を省略した（以降の図も同様）。

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

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

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

ここで、 T_x 、 T_y は変位の東西および南北成分、 $\Delta\varphi$ 、 $\Delta\lambda$ は観測点の経度および緯度の固定点との差である。図 2-1-1-16 に示した各観測点の水平変位ベクトルから、火山性地殻変動の影響が大きいと考えられる桜島内および霧島近傍の観測点（図 2-1-1-17 の破線内）を除き(1)式に近似することでテクトニックな広域地盤変動による水平変位ベクトル（同図の赤矢印）を求めた。

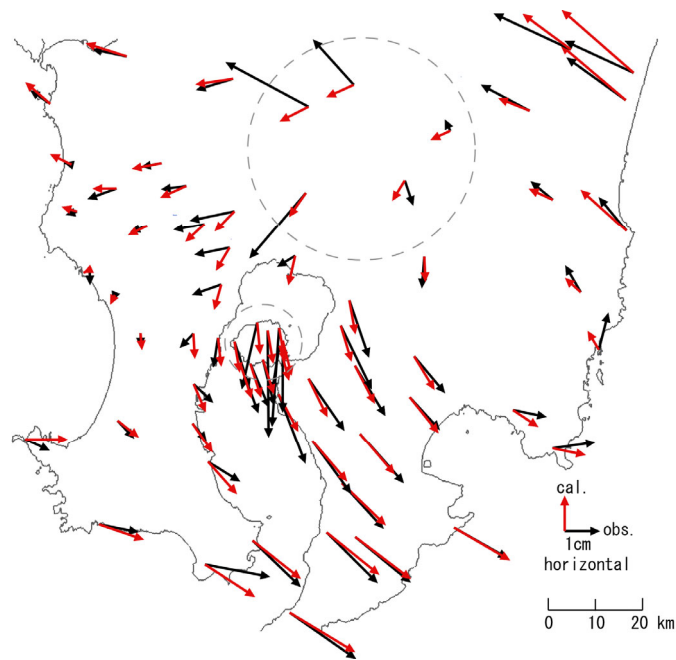


図 2-1-1-17 GNSS 基線解析による 2017 年-2019 年の GNSS 観測点の水平変位（黒矢印、図 2-1-1-16 に示したものと同一）および三次多項式近似による水平変位（赤矢印）。

ここで求めたテクトニックな地殻変動による水平変位ベクトルを観測値から引くことでその影響を除いた水平変位を図 2-1-1-18 に示す。このような補正により、霧島および始良カルデラ近傍で地盤が伸長する傾向がより明瞭になった。次節 c 項ではこの水平変位データを圧力源解析に用いる。一方、上下変位については、対流圏モデルの変更によって

改善したものの、基線長が長いこともあって、その決定精度が水平変位に比べて劣っている。GNSS 観測による上下変位の決定精度の向上は今後の課題である。次節 c 項で述べる圧力源解析ではより高精度な水準測量による上下変位を用いることにする。

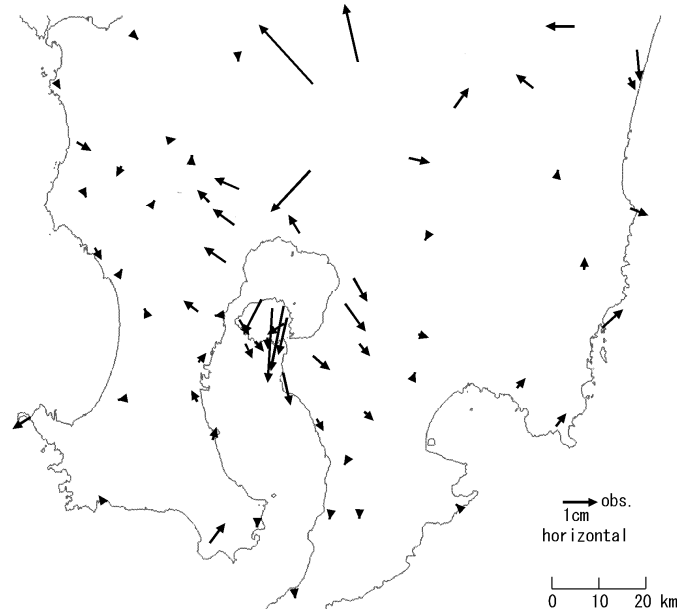


図 2-1-1-18 テクトニックな広域地殻変動の影響を除去した 2017 年-2019 年の GNSS 観測点の水平変位

(2)-1-2. 始良カルデラ下の圧力源解析

a. 圧力源解析に使用した圧力源モデル

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

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

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

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

となる。

圧力源解析では、このモデルを使用して圧力源の位置および体積変化量を未知パラメータとして、観測値とモデルによって計算される変位の差の自乗和が最小となるパラメータをグリッドサーチによって決定した。以下では、GNSS キャンペーン観測で得られた水平変

位データを用いた圧力源解析、および 2017 年から 2019 年の GNSS 連続観測観測点の水平変位データと、水平変位の解析期間とほぼ同時期に実施された水準測量で得られた上下変位データを統合する形で用いた圧力源解析の結果を示す。

b. GNSS キャンペーン観測による圧力源の同定

ここでは、2015 年以降の GNSS キャンペーン観測で得られた水平変位データを用いた圧力源解析結果について報告する。GNSS キャンペーン観測は、表 2.1-2-1 に示した期間に実施され、中ノ島を含むキャンペーン観測点に加えて、原子力規制庁および京都大学防災研究所の GNSS 連続観測点、さらに国土地理院の電子基準点においてキャンペーン観測実施期間に得られた観測データから、基線解析によって各観測点の位置を求め、2 年以上の期間を対象にして得られた水平変位データを基に圧力源の位置と体積変化を求めた。

表 2.1-2-1 GNSS キャンペーン観測の実施期間と連続観測点をあわせた観測点数

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

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

表 2.1-2-2 GNSS キャンペーン観測による圧力源の位置と体積変化

	期間	緯度	経度	深さ km	体積変化 量 10^6 m^3	体積変化 率 $10^6 \text{ m}^3/\text{年}$
A	2015-2017 (2 年)	31° 40' 24"	130° 41' 10"	5.7	6.6	3.3
B	2015-2018 (3 年)	31° 40' 28"	130° 40' 32"	5.8	8.2	2.7
C	2016-2018 (2 年)	31° 41' 31"	130° 39' 19"	11.6	15.7	7.8
D	2015-2019 (4 年)	31° 40' 18"	130° 40' 56"	6.2	10.8	2.7
E	2016-2019 (3 年)	31° 41' 23"	130° 39' 59"	10.8	16.3	5.4
F	2017-2019 (2 年)	31° 40' 32"	130° 40' 32"	10.4	9.6	4.8

G	2015-2020 (5年)	31° 40' 13"	130° 41' 42"	6.8	15.4	3.1
H	2016-2020 (4年)	31° 40' 58"	130° 41' 54"	10.2	23.4	5.8
I	2017-2020 (3年)	31° 40' 29"	130° 41' 50"	11.4	17.0	5.7
J	2018-2020 (2年)	31° 39' 50"	130° 41' 46"	10.7	11.2	5.6

2020年を含む期間の水平変位から得られた圧力源の位置はいずれも始良カルデラの中央部付近で、表 2.1-2-2 の期間 H、I、J は圧力源の深さは期間 C、E、F とほぼ同じ 11 km 付近である。また、試みに水準測量による 2017 年 1 月-2020 年 11 月の上下変位（九州電力株式会社、2021）を用いて求めた圧力源は、北緯 31° 40' 42"、東経 130° 40'、56" 深さ 12.1 km、体積変化量 $23.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ であり、期間 H の圧力源とよく一致する。

一方、期間 G の圧力源の深さはそれより浅く、平成 31 年度報告書で指摘されていると同様に、桜島北部の浅部の膨張の影響を受けて圧力源が見かけ上浅く求められた可能性がある。この影響が少ないと考えられる 2016 年 11 月以降の期間について求められた圧力源の位置や圧力源における体積変化率はおおむね一致する。2016 年 11 月以降 2020 年 11 月に至るまでに始良カルデラ下のマグマの蓄積場所と深さに大きな変化がなく、始良カルデラ中央部の深さ 11km 付近において平均して約 $6 \times 10^6 \text{ m}^3$ /年の割合で体積増加が進行していることが示唆される。

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

1) GNSS 観測による水平変位データ

始良カルデラ下の圧力源解析を行うにあたり、1-1-e 節で示したように、テクトニックな広域地殻変動の影響を除去した後の水平変位には霧島火山の影響が認められるため、これを補正する必要がある。そこで、茂木モデルを適用して、圧力源位置を気象庁（2018）が求めた値（水平位置は図 2-1-2-1 の赤丸、深さは標高-7150m）に固定し、霧島周辺 5 点（同図の灰色の円内）の水平変位を用いて体積変化量を求めたところ、 $14.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ の体積増加が得られ、そこから予測される変位（同図の赤矢印）を補正量として用いた。補正後の水平変位には、始良カルデラ中央部から約 25km の範囲で放射状に伸長するパターンが認められる（図 2-1-2-2）。圧力源解析にはこの補正後の水平変位を用いた。

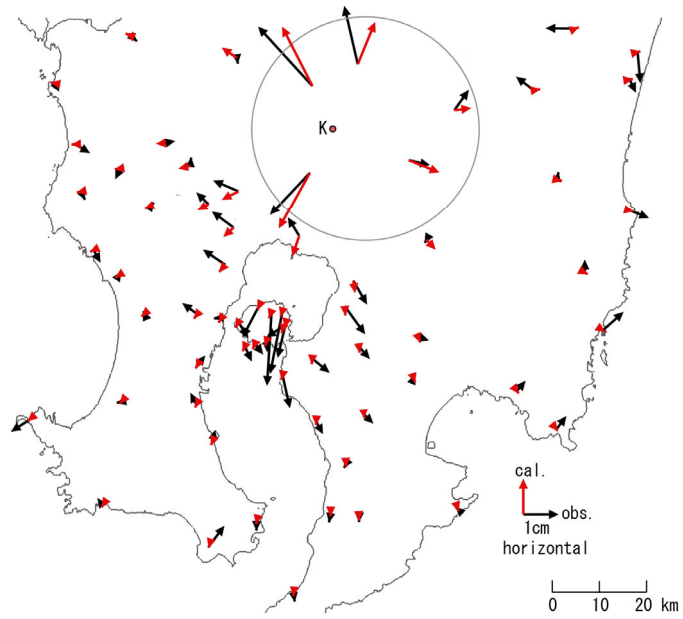


図 2-1-2-1 霧島火山の影響による観測点の水平変位 (赤矢印)。黒矢印は図 2-1-1-18 と同じ、K (赤丸) は気象庁 (2018) による圧力源の位置。

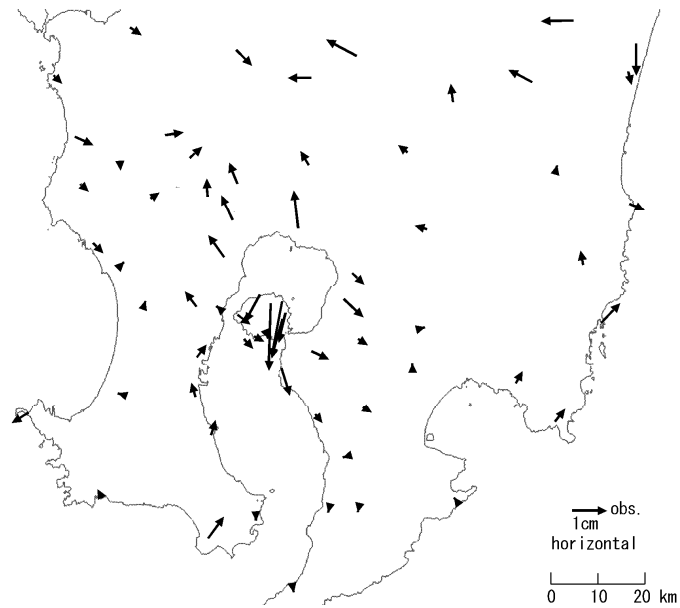


図 2-1-2-2 霧島火山の影響を補正した観測点の水平変位

2) 水準測量による上下変位データ

上下変位データとして用いたのは 2017 年 1 月および 2019 年 11 月に公共測量として実施された水準測量結果（九州電力株式会社、2020）であり、GNSS 観測による水平変位とほぼ同時期をカバーする。

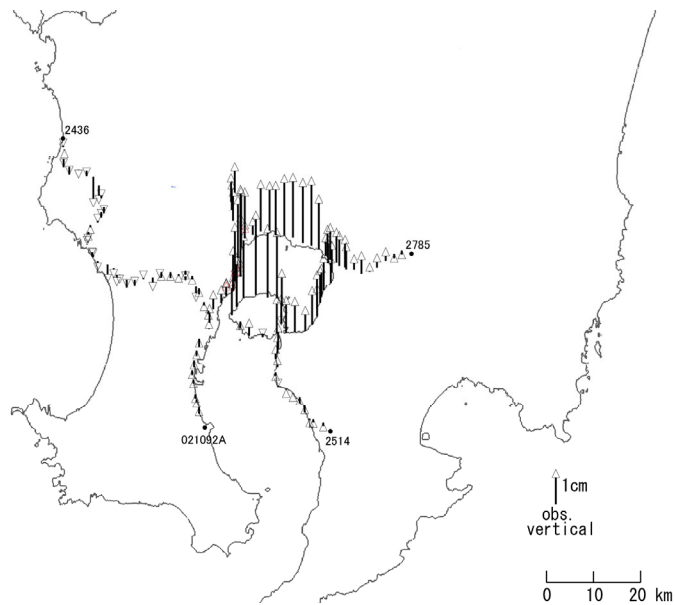


図 2-1-2-3 水準測量による上下変位（2017 年 1 月-2019 年 11 月）
水準点 2436、2785、021092A、2514 を不動点としたもの。

図 2-1-2-3 に水準測量路線の端点である 2436、2785、021092A、2514 を不動点とした上下変位を示す。始良カルデラ周縁部に近づくにつれて隆起が大きくなる傾向が顕著である。また、前節の霧島火山下の圧力源による上下変動量は圧力源に最も近い水準点でも約 1.6 mm と小さいため、霧島火山の影響の補正は行っていない。

3) 始良カルデラ下の圧力源解析

これまでの桜島および始良カルデラ周辺の地盤変動の観測から始良カルデラ下の他に、桜島島内にも圧力源の存在が推定されている。例えばYoshikawa (1961)や江頭 (1988) は水準測量による上下変位を説明するため、南岳の直下にも圧力源を導入した。図 2-1-2-2 に示した水平変位を見ても、桜島北岸部に比べて桜島南岸部の変位量がかなり小さく、桜島島内の圧力源の存在を考慮する必要がある。そこで、本稿で行う圧力源解析でも始良カルデラ下の圧力源に加えて、桜島南岳直下にもう一つの圧力源が存在すると仮定した。モデルの未知パラメータは、始良カルデラ下の圧力源については位置（東西、南北、深さ）および体積変化量とした。南岳直下の圧力源については水平位置を北緯 31° 34′ 50″、東経 130° 39′ 30″ に固定として、深さおよび体積変化量を未知とした。グリッドサーチにおいては、始良カルデラ下の圧力源の水平位置を始良カルデラの中心から東西南北それぞれに 20km の範囲を 0.1km 間隔で、2 つの圧力源とも圧力源の深さを海面下 0km から 0.1km 間隔で 20km まで、体積変化量を 0 m³から 1×10³ m³間隔で±20×10⁶ m³まで、を探索範囲とした。

圧力源解析に使用するデータは、水準測量による上下変位データ 130 点と、水準測量路線近傍（図 2-1-2-4 の灰色の楕円内）の GNSS 観測による水平変位データ 56 点を使用した。なお、桜島内の水平変位データのうち近隣の観測点と極端に異なる変位を示した地点については異常値として除外した。試みに、始良カルデラ中央部から 25 km 以内の水平変位データのみを用いた圧力源解析、上下変位データのみを用いた圧力源解析も行った。

図 2-1-2-4 に GNSS 観測による水平変位と水準測量による上下変位を統合した圧力源解析の結果を示した。また表 2.1-2-3 に得られた圧力源の位置と体積増加量水平変位のみおよび上下変位のみを用いた場合の圧力源の位置と体積増加量を、水平変位のみおよび上下変位のみを用いた場合をあわせて示した。

表 2.1-2-3 圧力源解析で得られた圧力源位置と体積増加量
南岳直下の圧力源の水平位置は固定

	データ数		始良カルデラ下の圧力源				桜島南岳直下の圧力源	
	水 平 変 位	上 下 変 位	緯度	経度	深さ 海 面 下 km	体積 増加量 10 ⁶ m ³	深さ 海 面 下 km	体積 増加量 10 ⁶ m ³
統合	56	130	31° 40′ 03″	130° 41′ 04″	11.2	15.2	3.6	-0.8
水平変位の み	34	-	31° 38′ 19″	130° 40′ 31″	10.3	10.9	3.6	-1.4
上下変位の み	-	130	31° 40′ 06″	130° 41′ 12″	9.8	14.0	1.4	-0.8

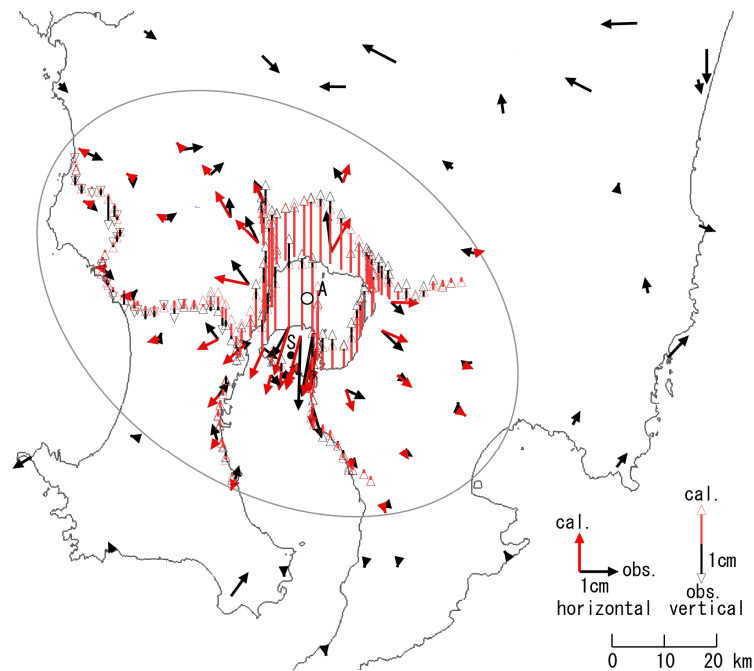


図 2-1-2-4 GNSS 観測による水平変位と水準測量による上下変位を統合した圧力源解析結果。黒矢印：変位の観測値、赤矢印：モデルから予測される変位、A：始良カルデラ下の圧力源の位置、S：桜島南岳直下の圧力源の位置、灰色の楕円内の観測値を圧力源解析に使用した

GNSS 観測による水平変位と水準測量による上下変位を統合した圧力源解析の結果、始良カルデラ下の圧力源は始良カルデラの中央部の深さ 11.2km に求められ、 $15.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ の体積増加を示した。また桜島南岳直下の圧力源は深さ 3.6km、 $0.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ の体積減少と求められた。これらの値は水平変位のみまた上下変位のみを用いた圧力源解析結果と大きな差はない（表 2.1-2-3）が、水平変位のみから求めた始良カルデラ下の圧力源の体積増加量がやや小さく求められているのは、使用した観測点の分布が桜島内に集中していることが影響している可能性がある。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で求められた圧力源は、先行研究（Mogi, 1958；江頭, 1998；井口・他, 2008；Hotta et al., 2016 など）において得られたものと位置がほぼ一致している。また、概ね同じ観測期間をカバーする GNSS キャンペーン観測結果から得られた圧力源（表 2.1-2-2 の E）とは体積変化量もよく一致する。このように本稿で求めた始良カルデラ下の圧力源の位置は、これまでの研究で推定されているものとよく一致する。このことは、今回の圧力源解析で得られた圧力源は妥当なものであるとともに、始良カルデラ下の圧力源の位置は桜島の火噴火以降大きく変化していないことを示すと考えられる。

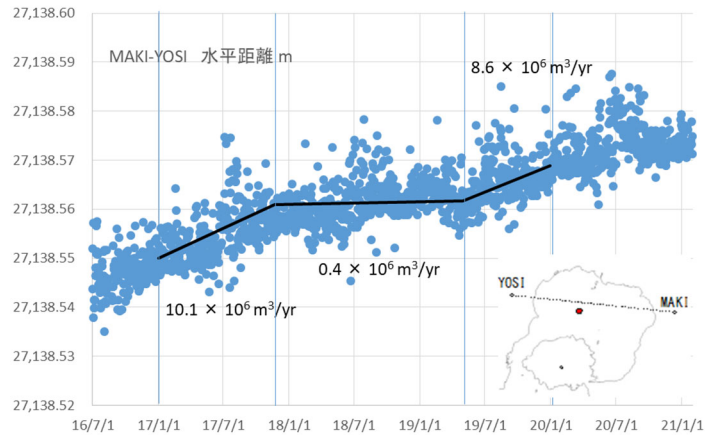


図 2-1-2-5 MAKI-YOSI 間の水平距離 (m) および始良カルデラ下の増圧源の体積変化率

GNSS 観測点 MAKI と YOSI の水平距離の変化は、基線が始良カルデラ中央部の圧力源の直上をほぼ東西に横切ることから、始良カルデラ下の圧力源における体積変化を直接的に反映していると考えられる。図 2-1-2-5 に示した MAKI-YOSI 間の水平距離は、2017 年 11 月以前および 2019 年 5 月以降は単調な伸長を示すのに対し、その間の期間は伸長がほぼ停滞している。2020 年においては 7 月頃まで 2019 年 5 月以降の伸長が継続し、その後伸長が停滞している。これらそれぞれの期間の水平距離の変化量に応じて始良カルデラ地下の増圧源の体積変化量を配分して体積変化率を求めると、水平距離が伸長を示す 2017 年 1 月から 11 月までは体積変化率で $10.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ 、2019 年 5 月から 12 月までは $8.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ となる。b 項で示したように始良カルデラ下の圧力源においては 2017 年以降は平均的には $6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ 程度の体積変化率を示すが、 $9 \sim 10 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ で体積増加が進行する時期と体積増加がほぼ停滞する時期を繰り返していることがわかる。

(2)-1-3. 始良カルデラへのマグマ供給量の推定

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

a. 桜島からの火山灰放出量の検討

桜島から放出される火山灰の放出量を見積もるための基礎データとして、鹿児島県が行っている降灰量調査のデータを利用する。鹿児島県危機管理防災局は、1978 年以降、県内の約 60 か所 (図 2-1-3-1) に観測点を設けて降下火山灰の量を調査しており、各観測点における月毎の面積あたり降灰重量 (以下では降灰量と表記する) を公表している (鹿児島県、2021)。本稿執筆時点で 2020 年 12 月までのデータが存在する。表 2-1-3-1 に 2020 年の観測結果を示す。

表 2. 1-3-1 鹿児島県による降灰量調査結果

各観測点の月毎の面積あたり降灰重量（鹿児島県、2021）および南岳火口からの距離

観測点名	南岳からの距離 km	月間降灰量（2020年） g/m ²											
		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
湯ノ平	3.0	445	937	69	31	482	1547	15	13	80	26	116	87
二俣上	4.5	910	1406	1632	409	310	13	6	1706	18	3	26	318
二俣	5.0	541	1134	939	169	316	37	3	535	6	3	11	147
武	5.2	204	284	131	71	311	181	7	6	38	20	21	124
藤野	4.9	140	343	238	127	557	182	5	9	42	8	13	188
赤水	4.5	465	132	22	17	377	241	3	3	32	3	22	179
小池	5.7	182	311	114	81	251	183	4	7	28	10	52	70
高免	5.1	254	1267	1353	273	71	46	6	11	53	3	16	99
園山	5.8	150	527	1183	406	141	342	5	14	27	2	28	96
黒神	4.5	503	1013	225	526	625	2379	5	9	11	20	31	144
有村	3.1	1585	5421	569	4372	1347	299	6	14	15	78	176	1078
湯之	3.5	183	86	57	38	328	287	4	30	29	85	13	103
持木	3.8	145	140	96	26	371	299	3	5	3	103	11	125
桜島口	5.3	1736	930	703	947	300	217	3	6	4	2	18	135
海潟	7.3	644	1238	90	1643	326	34	12	15	7	111	71	442
垂水	10.5	168	527	118	225	105	9	4	3	12	22	12	283
牛根麓	9.0	691	299	258	323	327	18	3	3	2	3	8	14
柘原	14.8	136	346	68	174	90	5	3	7	8	20	11	245
二川	12.5	314	217	188	42	87	66	3	3	4	2	3	69
市役所	9.7	75	52	12	6	57	96	3	3	6	3	6	15
坂元	10.8	25	69	13	16	28	33	3	1	4	2	5	8
吉野	8.6	17	38	13	6	99	21	3	1	5	2	2	24
丸岡	14.8	3	6	3	3	24	6	2	1	2	2	1	5
東開	12.0	9	12	6	9	7	58	1	1	4	2	1	9
広木	13.7	19	11	3	5	17	9	1	1	2	1	1	8
谷山	15.7	5	2	4	3	5	50	1	2	3	2	1	7
城南	9.0	63	170	198	242	180	192	9	18	26	58	22	31
福山町	18.7	8	35	10	9	11	52	1	3	2	3	2	3
輝北町	20.0	78	54	11	36	26	10	1	2	2	2	1	4
加治木町	17.8	18	64	11	3	51	5	2	5	2	1	1	3
隼人町	20.0	20	29	35	8	16	1	1	1	1	1	1	3
始良町	16.7	11	41	69	19	32	6	2	1	1	1	1	1
吉田町	17.4	3	8	1	2	26	7	1	1	1	1	1	4
国分	20.4	23	31	27	165	11	6	1	1	1	1	2	3
溝辺	27.8	3	11	4	1	3	1	0	1	1	1	1	1
蒲生	21.9	6	8	6	2	27	15	1	1	2	1	1	1
霧島	31.3	2	4	3	17	1	1	1	1	1	1	1	1
栗野	41.8	5	3	2	2	3	1	1	1	1	1	1	1
郡山	20.2	11	6	2	1	8	22	1	1	3	1	2	3
松元	21.4	11	1	1	1	14	10	1	1	1	1	1	1
日吉	29.6	27	4	1	1	1	4	1	1	1	0	1	1
串木野	39.2	1	1	1	1	3	2	1	0	1	1	1	1
金峰	33.2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
宮之城	40.8	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1
東郷	43.8	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1
知覧	32.8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
笠沙	48.4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
枕崎	48.4	1	1	1	2	1	3	1	1	1	1	1	1
大隅	32.0	6	3	4	7	9	1	1	1	1	1	1	1
財部	35.7	4	1	7	1	5	1	1	1	1	0	1	1
大崎	37.2	3	47	12	29	10	1	1	1	1	1	1	7
志布志	43.5	4	1	4	30	20	2	1	1	1	0	1	2
喜入	25.2	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
山川	41.8	1	1	1	2	1	2	1	1	2	1	1	1
鹿屋	28.4	22	14	15	92	6	4	1	1	1	1	1	12
高山	38.2	11	54	5	77	5	1	1	1	1	1	1	1
大根占	39.5	6	30	6	6	1	1	1	1	1	1	1	5
内之浦	51.8	8	26	16	75	2	2	1	1	1	1	1	1
佐多	54.2	2	4	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
霧島田口	36.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
牧園高千穂	37.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
菱刈	48.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

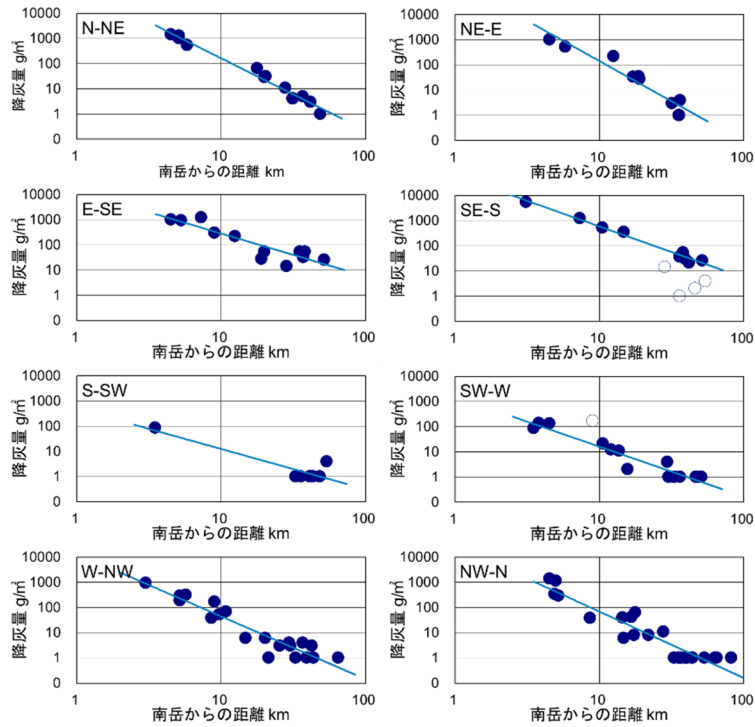


図 2-1-3-2 鹿児島県の降灰観測点における月別降灰量と南岳からの距離の関係
(2020年2月)

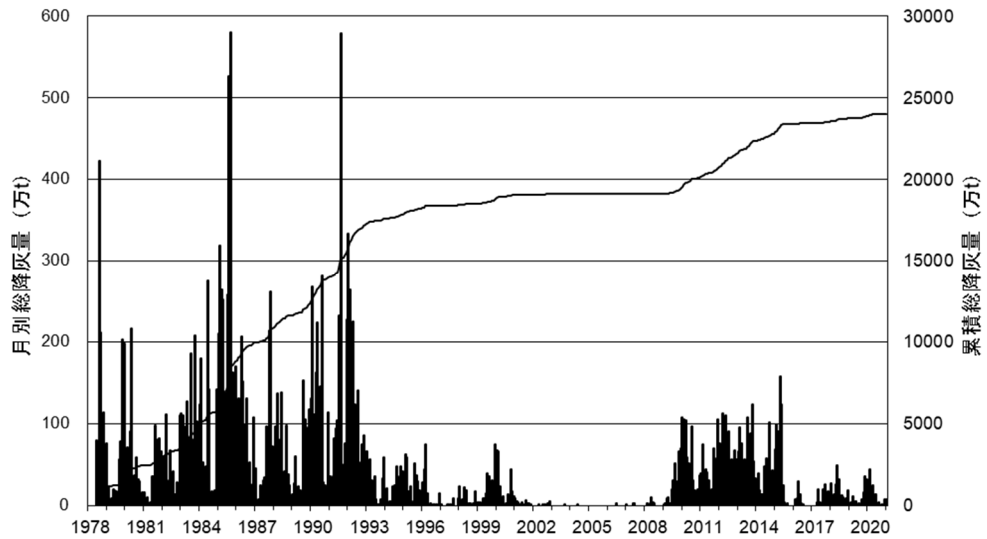


図 2-1-3-3 桜島から放出された月別推定総降灰量とその累積値（1978年6月以降）
縦棒は月別推定総降灰量、線はその累積値をそれぞれ示す。単位：万トン。

b. 始良カルデラへのマグマ供給量の推定

既に述べたように、GNSS 観測点 MAKI および YOSI の間の水平距離の変化（図 2-1-3-4）は、始良カルデラ下の圧力源における体積変化を直接的に反映していると考えられる。MAKI-YOSI 間の水平距離は 2010 年から 2020 年までにおよそ 7cm 伸長しているが、時期によって伸長率が異なり、2015 年から 2017 年までの期間は 12mm/年に達する。2020 年は、1-2-c 項で述べたように、7 月頃まで 2019 年半ば以降の約 7mm/年の伸長が継続しており、その後伸長が停滞している。

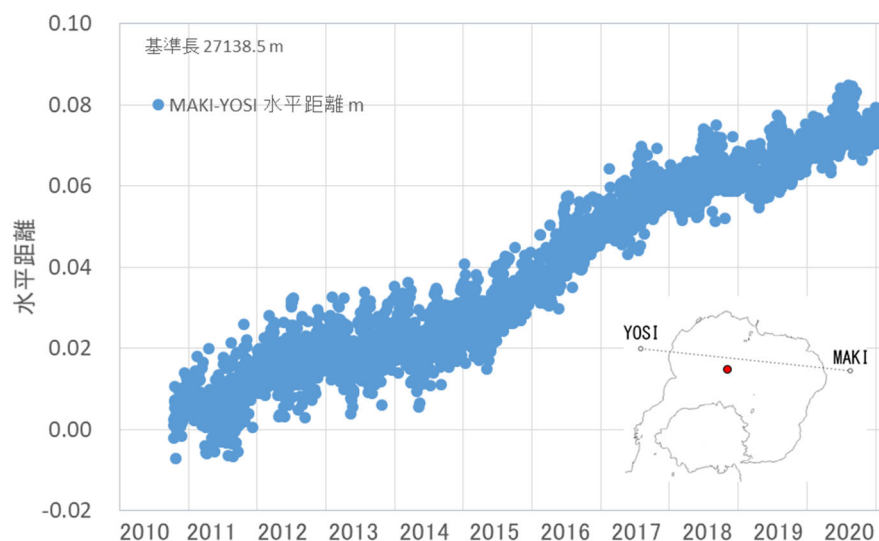


図 2-1-3-4 GNSS 観測点 MAKI と YOSI の間の水平距離の時間変化 (m)

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

以下では始良カルデラ下の圧力源を GNSS による水平変位と水準測量による上下変位を統合した圧力源解析から得られた位置（北緯 $31^{\circ} 40' 03''$ 、東経 $130^{\circ} 41' 04''$ 、深さ 11.2 km）に固定し、MAKI-YOSI 間の月平均の水平距離の変化が圧力源における体積変化に起因するものとして、圧力源における体積変化量を見積もった。これに月毎の火山灰放出量を体積に換算したものを加えて始良カルデラへのマグマ供給量を求めた。降下火砕物の重量を圧力源におけるマグマの体積に換算する際に仮定する密度（以下では DRE 換算密度）は $2.5\text{g}/\text{cm}^3$ がよく用いられる（例えば、江頭・他、1998）が、降下火砕物に含まれない揮発成分の寄与を考慮すると DRE 換算密度はより小さい値をとるほうが妥当かもしれない。ここでは DRE 換算密度として $2.5\text{g}/\text{cm}^3$ および $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ とした場合のマグマ供給量を求めた。

2020 年分のデータを追加した 2010 年 11 月以降の始良カルデラへのマグマ供給量を図 2-1-3-5 に示す。マグマ供給速度は時期により変動はあるが、平均的には、DRE 換算密度を $2.5\text{g}/\text{cm}^3$ とした場合 $8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ 、 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ とした場合 $10 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ である。これまで知られているマグマの供給速度 $1 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{年}$ （Ishihara, 1981）とほぼ同等であるといえる。2020 年においては、7 月頃まで DRE 換算密度を $2.5\text{g}/\text{cm}^3$ とした場合 $9 \times 10^6 \text{ m}^3/$

年、 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ とした場合 $11 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ の割合でマグマが供給され、2020年7月以降は供給速度がやや鈍っているように見える。

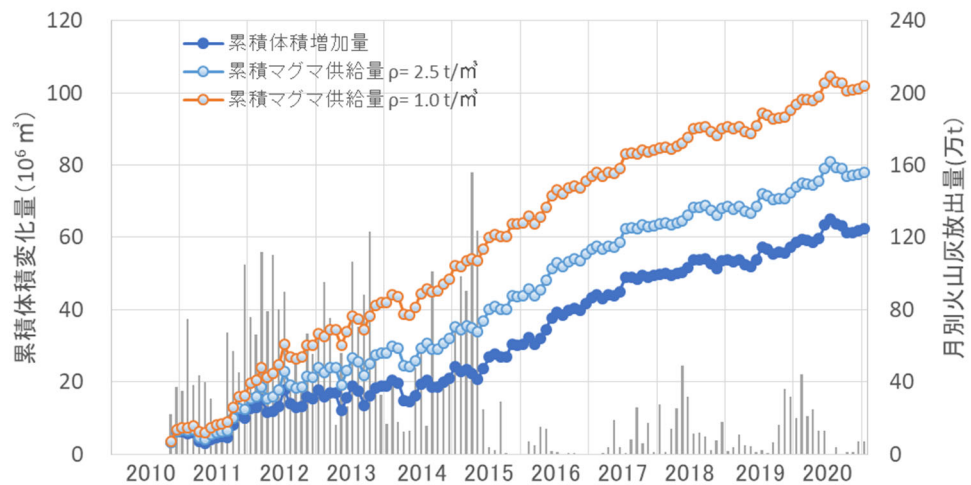


図 2-1-3-5 始良カルデラの中央部の圧力源へのマグマ供給量の時間変化
火山灰放出量を体積に換算する際の密度を $2.5\text{t}/\text{m}^3$ (g/cm^3) および $1.0\text{t}/\text{m}^3$ とした場合のマグマ供給量について示す。圧力源における体積変化および月別火山灰放出量（縦棒）も合わせて示した。

本稿で示した圧力源解析においては、始良カルデラ下および桜島南岳直下に2つの圧力源を仮定することで、対象期間の地殻変動を大きな矛盾なく説明できた（図 2-1-2-4）。しかし、平成 31 年度報告書（京都大学防災研究所、2020）でも指摘されているように、桜島の陸域北部に推測される圧力源（Iguchi et al., 2013; Yamamoto et al., 2013; Hotta et al., 2016）の増圧が大きい時には圧力源解析や、始良カルデラへのマグマ供給量の見積もりへの影響は無視できず、今後の解析においても桜島北部の圧力源の取り扱いについては慎重に検討する必要がある。桜島内の観測点が稠密な GNSS キャンペーン観測は桜島北部の圧力源起源の地殻変動を検出・評価するにも有用であると考えられる。

本稿では始良カルデラ下の圧力源モデルとしていわゆる茂木モデルを採用した。一方で、本研究でも地震観測などから始良カルデラの地下構造に関する知見が蓄積されつつある。このような知見を圧力源モデルに反映させることも検討していく必要がある。

(2)-1-4. まとめ

始良カルデラ周辺における GNSS 観測による地殻変動観測網を継続するとともに老朽化の進んだ観測機器を更新した。また、始良カルデラ西縁部に観測点を新設し、カルデラ内においてカルデラ中央部を囲む基線網を構築した。

2020年のGNSSキャンペーン観測で得られた水平変位データを用いた圧力源解析から得られた圧力源の位置は始良カルデラ中央部の深さおよそ11kmで、先行研究で求められていた位置とほぼ同じであった。

GNSS連続観測においては、基線解析方法の変更とテクトニックな広域地殻変動の補正によって、これまでより広い範囲から抽出した始良カルデラ起源の火山性地殻変動の水平成分と水準測量による上下変位を統合して、2017年–2019年の期間の始良カルデラ下の圧力源の位置と体積変化量を求めた。圧力源の位置は、先行研究で得られていたもの、またGNSSキャンペーン観測で得られたものとほぼ一致する。

桜島から放出された噴出物量を始良カルデラからのマグマ流出量とみなして2020年のデータで始良カルデラへのマグマ供給量を見積り、2010年11月以降のデータに追加した。2020年7月までの期間においてはマグマ供給速度が平均的な $8\sim 10\times 10^6$ m³/年と同程度であったが、7月以降はやや低下している。

2020年7月以降は桜島の活動が比較的低調であったが、今後活動が活発化し陸域北部の変動が大きい場合の圧力源解析においては、桜島北部の圧力源の取り扱いを慎重に検討する必要がある。また点力源モデルの適用の妥当性の検討とともに、始良カルデラの地下構造に関する新たな知見を地盤変動圧力源モデルに反映させることも検討していく必要がある。

参考文献

- Delaney, P.T. and McTigue, D.F. (1994) Volume of magma accumulation or withdrawal estimated from surface uplift or subsidence, with application to the 1960 collapse of Kilauea Volcano, Bull. Volcanol., 56, 417-424.
- 江頭庸夫(1988)桜島火山周辺における地盤変動—1982年～1985年—, 第6回桜島火山の集中総合観測, 15-19.
- Eto, T. (1989) An estimation of the amount and the dispersal of volcanic ash-falls ejected by summit eruptions at Sakurajima Volcano, Proceedings, Kagoshima International Conference on Volcanoes 1988, 448-451.
- Eto, T. (2001) Estimation of the amount and dispersal of volcanic ash-fall deposits ejected by vulcanian type eruption, Rep. Fac. Sci. Kagoshima Univ., 34, 35-46.
- 江頭庸夫・石原和弘(1979)桜島火山周辺における火山灰の降下堆積状態, 火山, 24, 88.
- 江頭庸夫・高山鐵朗・山本圭吾・Muhamad Hendrasto・味喜大介・園田忠臣・木股文昭・宮島力雄・松島健・内田和也・八木原寛・王彦賓・小林和典(1998a)桜島火山周辺における水準測量結果について—1991年12月～1996年10月—, 第9回桜島火山の集中総合観測, 15-29.

- 江頭庸夫・高山鐵朗・園田忠惟・山本圭吾 (1998b) 桜島火山周辺における光波測量結果—1992年1月～1996年12月—, 第9回桜島火山の集中総合観測, 31-37.
- Hotta, K., Iguchi, M., Ohkura, T. and Yamamoto, K. (2016) Multiple-pressure-source model for ground inflation during the period of high explosivity at Sakurajima volcano, Japan - Combination analysis of continuous GNSS, tilt and strain data -, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 310, 12-25.
- 井口正人 (2006) マグマの蓄積過程にある始良カルデラ, *月刊地球*, 28, 2, 115-121.
- 井口正人・高山鐵朗・山崎友也・多田光宏・鈴木敦生・植木貞人・太田雄策・中尾茂・前野直・長尾潤・馬場幸二・大重吉輝・放生会正美 (2008) 桜島および始良カルデラ周辺におけるGPS観測, 第10回桜島火山の集中総合観測, 53-62.
- Iguchi, M., Tameguri, T., Ohta, Y., Ueki, S., Nakao, S. (2013) Characteristics of volcanic activity at Sakurajima volcano's Showa crater during the period 2006 to 2011 *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, 58, 115-135.
- Ishihara, K. (1981) A quantitative relation between the ground deformation and the volcanic materials ejected, *Abstract 1981 IAVCEI Symposium - Arc Volcanism*, 143.
- 石原和弘・高山鐵朗・田中良和・平林順一 (1981) 桜島火山の溶岩流 (I) —有史時代の溶岩流の容積—, *京都大学防災研究所年報*, 24, 1-10.
- 鹿児島県 (2021) 鹿児島県ホームページ,
URL: <http://www.pref.kagoshima.jp/bosai/sonae/sakurajima/index.html>
- 加茂幸介・石原和弘 (1980) 地盤変動から見た桜島の火山活動, 桜島地域学術調査協議会研究報告, 鹿児島県, 19-28.
- 気象庁 (2018) 第141回火山噴火予知連絡会資料, 26.
- 気象庁 (2020) 気象庁ホームページ, URL:
<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>.
- Kriswati, E. and Iguchi, M. (2003) Inflation of the Aira caldera prior to the 1999 eruptive activity at Sakurajima volcano detected by GPS network in south Kyushu. *Ann. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, 46B, 817-826.
- 京都大学防災研究所 (2020) 平成31年度原子力規制庁委託研究成果報告書、原子力施設等防災対策等委託費 (火山性地殻変動と地下構造及びマグマ活動に関する研究) 事業、329pp.
- 九州電力株式会社 (2020) 国土地理院九州地方測量部公共測量成果, 令1九公第268号.
- 九州電力株式会社 (2021) 国土地理院九州地方測量部公共測量成果, 令2九公第172号.
- Mogi, K. (1958) Relation between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surface around them, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, 38, 99-134.
- Omori, F. (1918) The Sakura-Jima eruptions and earthquakes, II. *Bull. Imp.*

Earthq. Inv. Comm., 8(6).

斎藤英二・井口正人 (2006) 口永良部島火山における GPS 連続観測による気象要素を加味した 3 次元変位検出, 火山, 51, 21-30.

佐々憲三 (1956) 地震予知に関する 2, 3 の問題(II), 地殻変動について; 京都大学防災研究所設立 5 周年記念論文集, 3-7.

Takayama, H. and A. Yoshida (2007) Crustal deformation in Kyushu derived from GEONET data. J. Geophys. Res., 112, B06413.

渡部豪・田部井隆雄 (2004) 南西諸島の GPS 速度場とサイスモテクトニクス. 地震, 57, pp. 1-10.

Yamamoto, K., Sonoda, T., Takayama, T., Ichikawa, N., Ohkura, T., Yoshikawa, S., Inoue, H., Matsushima, T., Uchida, K., Nakamoto, M. (2013) Vertical ground deformation associated with the volcanic activity of Sakurajima volcano, Japan during 1996 - 2010 as revealed by repeated precise leveling surveys, Bull. Volcanol. Soc. Japan, 58, 137-151.

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