

# 平成 31 年度原子力規制庁委託研究成果報告書

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

京都大学防災研究所

令和 2 年 3 月

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. 委託研究報告	1
(1) 活動的カルデラ火山の地下構造調査	1
1. 始良カルデラにおける地震観測による地殻構造調査	1
1-1. 始良カルデラ臨時地震観測点の拡充と維持	1
a. 臨時地震観測	1
b. 始良カルデラ北部の弁天島短周期地震計テレメータ装置設置	2
c. 桜島北東部の新島における広帯域地震計設置	3
1-2. 3次元地震波伝播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	5
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	21
1-4. まとめ	27
2. 始良カルデラにおける長期連続反射法探査の有効性の検討	30
2-1. 長期連続反射法の波形取得方法と深部反射波検出の検討	31
a. 観測点（受振点）展開方法の検討	31
b. 深部反射波の検出	32
2-2. 長期連続反射法の振源とその発振方法の検討	61
a. 次年度に行う基礎実験観測の震源の内容の検討	61
b. 土地の調査状況および関係各機関への交渉状況と成果	110
2-3. まとめ	147
(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	155
1. 始良カルデラの火山性地殻変動データの蓄積	155
1-1. 始良カルデラ臨時 GNSS 観測点の拡充と維持	158
a. 既設 GNSS 観測点における観測の継続	158
b. 始良カルデラ北部への GNSS 観測点新設	165
c. 新島の GNSS 観測点の機器更新	167
d. 新島北方の中之島におけるキャンペーン観測の実施	170
1-2. 始良カルデラ下の圧力源解析	172
1-3. 始良カルデラへのマグマ供給量の推定	182
a. 桜島からの火山灰放出量の検討	182
b. 始良カルデラへのマグマ供給量の推定	192
1-4. まとめ	194
2. 始良カルデラにおける海底地盤変動観測の検討	197
a. イタリア国立地球物理学火山学研究所 (INGV) がナポリ湾に設置した海底地盤変動装置の現地調査	198

b.	海底地盤変動観測装置の始良カルデラへの適応性の検討.....	201
c.	地盤変動観測データと海底地形に基づく海底地盤変動観測に最も適切な場所の選定 .....	222
d.	海底地盤変動観測装置の設置に関する調査と設計および海域観測に関連する関係機関への交渉の進捗状況と成果.....	225
f.	まとめ.....	306
(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実施.	308
(4)	委員会等の開催.....	326
a.	第一回外部評価委員会の内容の要点.....	326
b.	第二回外部評価委員会の内容の要点.....	327

## 図表一覧

### 1. 委託研究報告

#### (1) 活動的カルデラ火山の地下構造調査

##### 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. 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	1
表 1.1-1-1	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	1
図 1.1-1-2	弁天島短周期地震計設置状況	2
図 1.1-1-3	弁天島観測点で観測された深発地震の地震記録例	3
図 1.1-1-4	新島観測点に設置した広帯域地震計	4
図 1.1-1-5	新島観測点広帯域地震計記録例	4

###### 1-2. 3次元地震波伝播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	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	6
図 1.1-2-3	解析に使用したイベントの震源分布図	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	9
図 1.1-2-5	深さ 1km、5km、10km、15km、20km における P 波、S 波速度およびその比	10
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	11

###### 1-3. レシーバ関数による始良カルデラ地下構造モデルの高精度化

図 1.1-3-1	九州南部の地震観測点の分布	21
図 1.1-3-2	桜島島内の地震観測点の分布	22
図 1.1-3-3	始良カルデラ周辺の臨時観測点 SK03、SK04、SK05 でのレシーバ関数の波形	23
図 1.1-3-4	桜島島内の観測点 AR5、HAR、KURN でのレシーバ関数の波形	23
図 1.1-3-5	始良カルデラ周辺における深さ 10 km、20 km、30 km でのレシーバ関数イメージ	24
図 1.1-3-6	始良カルデラを通る南北断面のレシーバ関数イメージ	25
図 1.1-3-7	始良カルデラを通る東西断面のレシーバ関数イメージ	25

図 1.1-3-8	宮崎－阿久根測線に沿う断面におけるレシーバ関数イメージ	26
図 1.1-3-9	宮崎－桜島測線に沿う断面におけるレシーバ関数イメージ	27
2. 始良カルデラにおける長期連続反射法探査の有効性の検討		
図 1.2-1	始良カルデラにおける長期連続反射法地震探査に関する検討項目	30
2-1. 長期連続反射法の波形取得方法と深部反射波検出の検討		
図 1.2-1-1	展開方式	31
図 1.2-1-2	2008 年人工地震観測	33
図 1.2-1-3	地震計アレイ	34
図 1.2-1-4	波数ベクトルの概念	35
図 1.2-1-5	ある時間窓に対するビームフォーミング結果	36
図 1.2-1-6	最適なフィルタ処理の選択	37
図 1.2-1-7	若尊測線北東端発破点 S05 のフィルタ処理済み観測記録	38
図 1.2-1-8	アレイ G04 における到来方向解析結果	38
表 1.2-1-1	発破 S05 によって始良カルデラ方向からアレイ G04 に入射する後続波	39
図 1.2-1-9	若尊測線南西端発破 S06 のフィルタ処理済み観測記録	39
図 1.2-1-10	発破 S06 に対するアレイ L15 における到来方向解析結果	40
表 1.2-1-2	アレイ L15 における発破 S06 に対する始良カルデラ方向からの入射波	40
図 1.2-1-11	始良 A 測線における発破 S01 のフィルタ処理済み観測記録	41
図 1.2-1-12	発破 S01 に対するアレイ S07 における到来方向解析結果	41
表 1.2-1-3	アレイ S07 における発破 S01 に対する始良カルデラ方向からの入射波	42
図 1.2-1-13	始良 B 測線における発破 S01 のフィルタ済み観測記録	42
図 1.2-1-14	アレイ N-end における発破 S01 に対する到来方向解析結果	43
表 1.2-1-4	アレイ N-end における発破 S01 に対する始良カルデラ方向からの入射波	43
図 1.2-1-15	速度構造モデル	44
図 1.2-1-16	若尊測線のモデルにおける理論走時と観測走時	45

図 1.2-1-17	始良測線のモデルにおける理論走時と観測走時	46
図 1.2-1-18	アレイ G04 における各深さからの反射波および変換反射波の理論走時と理論見かけ速度	47
図 1.2-1-19	アレイ L15 における各深さからの反射波および変換反射波の理論走時と理論見かけ速度	48
図 1.2-1-20	アレイ S07 における反射波および変換反射波の理論走時と理論見かけ速度	49
図 1.2-1-21	アレイ N-end における反射波および変換反射波の理論走時と理論見かけ速度	50
図 1.2-1-22	アレイ N-end における観測点標高分布と理論相対到来時刻分布	50
図 1.2-1-23	S05G04-B が出現する観測点分布と対応する反射点の分布	51
図 1.2-1-24	S05G04-D が出現する観測点分布と対応する変換反射点の分布	52
図 1.2-1-25	S05G04-E が出現する観測点分布と対応する反射点の分布	53
図 1.2-1-26	S05G04-G が出現する観測点分布と対応する変換反射点の分布	54
図 1.2-1-27	S06L15-A が出現する観測点分布と対応する反射点の分布	55
図 1.2-1-28	S06L15-B が出現する観測点分布と対応する反射点の分布	56
図 1.2-1-29	S06L15-E が出現する観測点分布と対応する変換反射点の分布	57
図 1.2-1-30	S01S07-A 相が出現する観測点分布と対応する反射点の分布	58
図 1.2-1-31	S01Nend-C が出現する観測点分布と対応する変換反射点の分布	59
図 1.2-1-32	始良カルデラの地殻内反射体分布	66
2-2. 長期連続反射法の振源とその発振方法の検討		
図 1.2-2-1	発破による人工振源	61
図 1.2-2-2	エアガン本体	62
図 1.2-2-3	バイブレータ	62
図 1.2-2-4	検討に使用した発振点	64
図 1.2-2-5	高免 (KOM) 観測点における発破データのオリジナル波形と振幅スペクトル	65

図 1.2-2-6	高免(KOM)観測点におけるエアガンデータのオリジナル波形と振幅スペクトル	66
図 1.2-2-7	高免(KOM)観測点におけるバイブロデータのオリジナル波形と振幅スペクトル	66
図 1.2-2-8	4つの常設観測点(KOM, KOR, SUZ, FUK)における300kg発破のV成分記録	67
図 1.2-2-9	高免(KOM)観測点におけるエアガン発振のV成分の記録例	67
図 1.2-2-10	郡山(KOR)観測点におけるエアガン発振のV成分の記録例	68
図 1.2-2-11	錫山(SUZ)観測点におけるエアガン発振のV成分の記録例	68
図 1.2-2-12	福山(FUK)観測点におけるエアガン発振のV成分の記録例	69
図 1.2-2-13	バイブレータの振源スイープ波形と相関処理結果記録における等価な震源波形	70
図 1.2-2-14	高免(KOM) V成分の Correlation After Stack の効果	71
図 1.2-2-15	高免(KOM) V成分の Correlation Before Stack の効果	71
図 1.2-2-16	郡山(KOR) V成分の Correlation Before Stack の効果	72
図 1.2-2-17	錫山(SUZ) V成分の Correlation Before Stack の効果	72
図 1.2-2-18	福山(FUK) V成分の Correlation Before Stack の効果	73
表 1.2-2-1	バイブレータ(複数回スタック)と発破の単発ショットのS/N比の比較	73
図 1.2-2-19	バイブレータ震源の重合効果:重合数とS/N比	74
図 1.2-2-20	ホワイトノイズと、その発振波形との相互相関結果	75
図 1.2-2-21	相互相関によるノイズスペクトルの変化	75
図 1.2-2-22	火山性微動の発振波形による相関処理	76
図 1.2-2-23	火山性微動とバイブレータ発振波形による相関結果の周波数成分	77
図 1.2-2-24	初動の最大振幅の読み取り方法	79
図 1.2-2-25	発破データとエアガンデータから算定されたマグニチュード	79
図 1.2-2-26	発破データとエアガンデータから算定された震源エネルギー	80
図 1.2-2-27	マグニチュードへの速度振幅の依存性	81
図 1.2-2-28	マグニチュードへのオフセット距離の依存性	81
表 1.2-2-2	エアガンと発破の単発ショットのS/N比の比較	82
図 1.2-2-29	エアガンデータに対する重合効果とS/Nの改善 高免(KOM)の例	83



図 1.2-2-30	エアガンデータに対する重合効果と S/N の改善 郡山 (KOR) の例 .....	84
図 1.2-2-31	エアガンデータに対する重合効果と S/N の改善 錫山 (SUZ) の例 .....	85
図 1.2-2-32	エアガンデータに対する重合効果と S/N の改善 福山 (FUK) の例 .....	86
図 1.2-2-33	同じ S/N 比を確保する場合のエアガンの想定発振パターンとバイブ レータの想定発振パターン .....	87
図 1.2-2-34	地表受振点 (引ノ平 HIK) の S/N 比の変化 : 重合数と S/N 比の改善 (1) 線形近似 .....	88
図 1.2-2-35	地表受振点 (引ノ平 HIK) の S/N 比の変化 : 重合数と S/N 比の改善 (2) 2 次多項式近似 .....	89
図 1.2-2-36	エアガンデータの中の後続反射波を調査した京都大学の常設観測点 .....	90
図 1.2-2-37	エアガン発振の Receiver Gather 8 観測点分のオリジナルデータ .....	90
図 1.2-2-38	ハルタ山 (HAR1) 観測点におけるエアガン発振の 15 ショット記録 .....	91
図 1.2-2-39	鹿馬野 (KAB) 観測点におけるエアガン発振の 15 ショット記録 .....	91
図 1.2-2-40	高免 (KOM) 観測点におけるエアガン発振の 15 ショット記録 .....	92
図 1.2-2-41	新島 (SHN) 観測点におけるエアガン発振の 15 ショット記録 .....	92
図 1.2-2-42	吉松 A 坑 (YOA) 観測点におけるエアガン発振の 15 ショット記録 .....	93
図 1.2-2-43	加治木 (KAJ) 観測点におけるエアガン発振の 15 ショット記録 .....	93
図 1.2-2-44	郡山 (KOR) 観測点におけるエアガン発振の 15 ショット記録 .....	94
図 1.2-2-45	福山 (FUK1) 観測点におけるエアガン発振の 15 ショット記録 .....	94
図 1.2-2-46	錫山 (SUZ1) 観測点におけるエアガン発振の 15 ショット記録 .....	95

図 1.2-2-47	大根占 (ONE) 観測点におけるエアガン発振の 15 ショット記録 .....	95
図 1.2-2-48	開聞岳 (KAI) 観測点におけるエアガン発振の 15 ショット記録 .....	96
表 1.2-2-3	チャンバー容量に応じたエアガン性能比較表	98
図 1.2-2-49	チャンバー容量と震源波形周波数特性	100
図 1.2-2-50	ガン深度と震源波形	101
図 1.2-2-51	ガン深度と震源波形周波数特性	101
図 1.2-2-52	ガン圧力と震源波形周波数特性	102
表 1.2-2-4	シングルガンと 2 基クラスタの性能比較	103
図 1.2-2-53	シングルガンと 2 基クラスタの震源波形比較	103
図 1.2-2-54	シングルガンと 2 基クラスタの震源波形周波数特性	104
図 1.2-2-55	各測定点における音圧レベル	105
図 1.2-2-56	エアガン仕様-③ 発振波形	107
図 1.2-2-57	エアガン仕様-③ 発振波形の周波数特性	107
図 1.2-2-58	エアガン仕様-① クラスタ配置とオフセット	108
図 1.2-2-59	エアガン仕様-① エアガンクラスタ構成	109
図 1.2-2-60	連続反射法発振点候補地と実験発振点	110
図 1.2-2-61	九州南部地域の地質構造	112
図 1.2-2-62	始良カルデラ周辺の地形	113
図 1.2-2-63	始良カルデラと周囲の火山の噴火史	114
図 1.2-2-64	桜島火山のテフラ層序と年代・噴出量	115
表 1.2-2-5	鹿児島湾北部沿岸地域の層序表	116
図 1.2-2-65	隼人町周辺の地形分類図	117
図 1.2-2-66	住吉池周辺の地形分類図	118
図 1.2-2-67	予定地周辺の既存試料	118
図 1.2-2-68	ボーリング柱状図	119
図 1.2-2-69	地質断面図	120
図 1.2-2-70	ボーリングコア柱状図①～④	121
図 1.2-2-71	ボーリングコア柱状図⑤～⑦	121
図 1.2-2-72	ボーリング柱状図および N 値の深度分布	122
図 1.2-2-73	国分平野で実施されたボーリング位置および地形地質断面 .....	123
図 1.2-2-74	九州南部火山湖の水温鉛直分布	126
図 1.2-2-75	九州南部火山湖の水素イオン濃度分布	126
図 1.2-2-76	住吉池の O <sub>2</sub> 濃度横断観測結果	127

図 1.2-2-77 国土交通省九州整備局によるボーリングから得られた N 値を基に正木・飯田 (1980) の式を用いて算出した Q 値の深度分布 .....	128
表 1.2-2-6 掘削底面の破壊現象 .....	129
図 1.2-2-78 鹿児島市周辺の地下水深度分布および鹿児島高校正門脇自記水位計の記録 .....	131
図 1.2-2-79 気象庁潮位観測表「鹿児島」による 2019 年 1 月～12 月の潮位 .....	132
表 1.2-2-7 許認可にかかわる団体および機関一覧 .....	134
図 1.2-2-80 住吉池 .....	137
図 1.2-2-81 水深調査航跡 .....	140
表 1.2-2-8 調査の経過 .....	140
図 1.2-2-82 測深作業状況 .....	142
図 1.2-2-83 GNSS 受信機による測量 .....	143
表 1.2-2-9 GNSS 測量結果 .....	143
図 1.2-2-84 G 地点の量水指標 .....	144
表 1.2-2-10 指示値メモ .....	145
図 1.2-2-85 測深結果 .....	146
 (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	
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の時間変化 .....	155
 1-1. 始良カルデラ臨時 GNSS 観測点の拡充と維持	
図 2.1-1-2 GNSS 観測点の位置 .....	158
図 2.1-1-3 GNSS 観測点の位置の時間変化 .....	159
図 2.1-1-4 TOG0 および TOG2 観測点の位置 .....	161
図 2.1-1-5 TOG2 観測点の機器設置状況 .....	161
図 2.1-1-6 0487 (国土地理院鹿島) を固定点とした基線解析結果 .....	162
図 2.1-1-7 BNTJ 観測点の位置 .....	165
図 2.1-1-8 BNTJ 観測点の機器設置状況 .....	166
図 2.1-1-9 BNTJ 観測点の位置の時間変化 .....	166
図 2.1-1-10 BNTJ 観測点を基準点とする SNJ2 観測点の位置の時間変化 .....	167
図 2.1-1-11 新島における観測点の位置 .....	168

図 2.1-1-12	SNJ2 観測点の機器設置状況	168
図 2.1-1-13	SNJ2 および SNJG 観測点における受信状態の例	169
図 2.1-1-14	SNJ2 および SNJG 観測点の位置の時間変化	169
図 2.1-1-15	中之島 (NAKN) における GNSS キャンペーン観測の機器設置状況	171
図 2.1-1-16	キャンペーン観測による NAKN の上下変動	171

## 1-2. 始良カルデラ下の圧力源解析

表 2.1-2-1	キャンペーン観測に合わせた解析期間の設定	174
表 2.1-2-2	変位量を算出した解析期間の組み合わせ	174
図 2.1-2-1	GNSS 観測点及び水準点の位置図	175
図 2.1-2-2	圧力源の位置と観測値と理論値の残差の空間分布	176
表 2.1-2-3	圧力源の位置と体積変化	177
図 2.1-2-3	期間 A~F における圧力源の位置	177
図 2.1-2-4	水準測量による桜島北部 (水準点 S26) の上下変動の時間変化	179
図 2.1-2-5	広域応力場の影響評価	181

## 1-3. 始良カルデラへのマグマ供給量の推定

図 2.1-3-1	鹿児島県による降灰量観測点の分布	182
表 2.1-3-1	鹿児島県による降灰量調査結果の例	184
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	185
図 2.1-3-3	桜島火山から放出された月別推定総降灰重量とその累積値	187
図 2.1-3-4	2019 年 7 月 28 日に発生した南岳の噴火による降灰の現地調査結果	188
図 2.1-3-5	2019 年 7 月の鹿児島県の降灰量観測点における月間降灰量と南岳からの距離の関係	189
図 2.1-3-6	粉塵計による浮遊粒子状物質濃度の時間変化	190
図 2.1-3-7	粉塵計によって降灰による高濃度を検出した例	191
図 2.1-3-8	GNSS 観測点 YOSI と MAKI の間の水平距離の時間変化	192
図 2.1-3-9	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	193

## 2. 始良カルデラにおける海底地盤変動観測の検討

b. 海底地盤変動観測装置の始良カルデラへの適応性の検討	
Fig. 2.2-1 A location plan for the buoys	201
Fig. 2.2-2 A hydrographic chart of Kagoshima Bay	202
Fig. 2.2-3 A wind rose at Kagoshima station since 2009 through 2018	203
Fig. 2.2-4 A wind rose at Makinohara station since 2009 through 2018	203
Table 2.2-1 10-years, 30-years, and 50-years probable wind velocities at Kagoshima and at Makinohara stations	204
Table 2.2-2 10-years, 30-years, and 50-years probable wind velocities on the sea surface	205
Fig. 2.2-5 Tide level at Kagoshima port during January 1948 through December 1991	206
Fig. 2.2-6 A tidal current prediction (After Japan Coast Guard)	207
Table 2.2-3 Reduced wave heights and periods at the point 1 for 10-years probable wind velocity	208
Table 2.2-4 Reduced wave heights and periods at the point 2 for 10-years probable wind velocity	209
Table 2.2-5 Reduced wave heights and periods at the point 1 for 30-years probable wind velocity	210
Table 2.2-6 Reduced wave heights and periods at the point 2 for 30-years probable wind velocity	211
Table 2.2-7 Reduced wave heights and periods at the point 1 for 50-years probable wind velocity	212
Table 2.2-8 Reduced wave height and period at the point 2 for 50-years probable wind velocity	213
Fig. 2.2-7 A wave height spectrum at Kagoshima port from 2008 to 2016	214
Fig. 2.2-8 A wave height rose at Kagoshima port from 2008 to 2016	214
Table 2.2-9 Probable wave heights $H_0$ and periods $T_0$	215
Fig. 2.2-9 A reduced wave height spectrum at Kagoshima port from 2016 to 2018	216

Fig. 2.2-10 A reduced wave height rose at Kagoshima port from 2016 to 2018 .....	216
Table 2.2-10 The environmental parameters .....	218
Table 2.2-11 Environmental parameters in some conditions .....	220
Fig. 2.2-11 Velocity profiles .....	220

c. 地盤変動観測データと海底地形に基づく海底地盤変動観測に最も適切な場所の選定

図 2.2-12 北部鹿児島湾沿岸における垂直変動 .....	222
図 2.2-13 海底地盤変動観測装置試作機設置候補地点 .....	224

d. 海底地盤変動観測装置の設置に関する調査と設計および海域観測に関連する関係機関 d-1. 海底地盤変動観測装置の設置に関する調査および基本設計

d-1.1. 検討概要

2) 海底地盤変動観測装置の基本設計と検討

図 2.2-14 海底地盤変動観測装置の概略図 .....	226
図 2.2-15 供試模型と供試模型諸元 .....	229
図 2.2-16 水理模型実験の様子 .....	230
図 2.2-17 実験結果 .....	231
表 2.2-12 Heave 方向減減係数 .....	231
表 2.2-13 模型・実機ベースにおける造波減衰係数と粘性減衰係数 .....	232
表 2.2-14 解析条件(ケーブルタイプ) .....	233
図 2.2-18 ケーブルタイプを対象とした解析ケース .....	234
表 2.2-15 統計処理結果(方法-1、ケーブルタイプ) .....	235
表 2.2-16 統計処理結果(方法-2、ケーブルタイプ) .....	236
表 2.2-17 係留力の比較表(ケーブルタイプ) .....	237
図 2.2-19 風速、水面の鉛直変位、流れの時系列(方法-2、ケーブルタイプ) .....	237
図 2.2-20 Surge・Heave・Pitch の各方向に対する変位量・傾斜角度、観測装置側 と基台側における係留力の時系列(方法-2、ケーブルタイプ) .....	238
表 2.2-18 解析条件(ピラータイプ) .....	239
図 2.2-21 ピラータイプを対象とした解析ケース .....	239
表 2.2-19 統計処理結果(方法-2、ピラータイプ) .....	240
表 2.2-20 係留力の比較表(ピラータイプ) .....	241
図 2.2-22 風速、水面の鉛直変位、流れの時系列(方法-2、ピラータイプ) .....	241

図 2.2-23	Surge・Heave・Pitch の各方向に対する変位量・傾斜角度、観測装置と 基台の接続点における係留力の時系列(方法-2、ピラータイプ)	242
図 2.2-24	最大満潮時における検討のイメージ図	243
表 2.2-21	解析条件	243
図 2.2-25	最大満潮時における検討結果	243
3) 海底地盤変動観測装置の製作計画の検討		
表 2.2-22	海底地盤変動観測装置の製作に関する全体工程表(案)	246
4) 設置計画時に抽出された課題とそれに対する検討		
図 2.2-26	吊作業のイメージ図(横吊)	247
表 2.2-23	L=11.5m とした場合の許容応力	248
表 2.2-24	許容応力を満たす吊点 B	248
図 2.2-27	吊ピースおよび補強ブラケットの検討結果	249
付録-1 不規則波中における海底地盤変動観測装置の動揺実験(参考)		
表 2.2-25	実験条件	250
図 2.2-28	不規則波中における観測装置の動揺実験時の様子	251
d-1.2. ピラータイプの設計検討		
図 2.2-29	海底地盤変動観測装置(ピラータイプ)一般図	252
表 2.2-26	海底地盤変動観測装置(ピラータイプ)概算数量	253
d-1.3. ケーブルタイプの設計検討		
図 2.2-30	海底地盤変動観測装置(ケーブルタイプ)一般図	254
表 2.2-27	海底地盤変動観測装置(ケーブルタイプ)概算数量	255
d-1.4. イタリア・RESINEX 社製装置の設計検討		
表 2.2-28	解析条件	256
表 2.2-29	検討ケース一覧	256
表 2.2-30	解析結果	257
表 2.2-31	各部材の性能規定値	257
図 2.2-31	RESINEX 社製の Elastic Beacon の一般図	258
d-1.5. 海底地盤変動観測装置の製作設置計画の検討		

表 2.2-32	品質管理要領	270
表 2.2-33	全旋回式起重機船	271
表 2.2-34	固定式起重機船	271
図 2.2-32	全旋回式起重機船 500t 吊 (50 幸神丸) 吊り上げ状況	273
図 2.2-33	固定式起重機船 700t 吊 (大和) 吊り上げ状況	273
図 2.2-34	固定式起重機船 2200t 吊 (駿河) 吊り上げ状況	273
図 2.2-35	【工事全体】施工フロー	275
図 2.2-36	組立ヤード候補地	277
図 2.2-37	固定式起重機船 (2200t 吊 : 駿河) 回航経路	281
図 2.2-38	台船 (3000t 積) 回航経路	283
図 2.2-39	観測装置積込ステップ	285
図 2.2-40	観測装置積込要領	287
図 2.2-41	組立ヤード～観測装置設置箇所 えい航経路	289
図 2.2-42	観測装置設置海域における作業船係留状況	293
図 2.2-43	観測装置 設置ステップ	295
図 2.2-44	観測装置 連結・建て起し・吊り上げ要領	297
図 2.2-45	観測装置設置ステップ (その 1)	299
図 2.2-46	観測装置設置ステップ (その 2)	301
表 2.2-35	計画工程表 (現地作業)	303

### (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実施

図 3.1	研究調査地域と BM2474 における BM2469 に対する相対鉛直変位の時間変化	309
図 3.2	回転楕円体変動源(シル状のマグマ貫入)の中心での厚さの時間変化	311
図 3.3	始良カルデラで制約されたマグマ定置の深さ D に依存したモデルパラメータの値	313
図 3.4	式(2)で定義される 1914-1932(-1936)間の鉛直変動量に関する二乗平均平方根 $\varepsilon$ のコンター図	315
図 3.5	大正噴火後の鉛直変動の空間分布	316
図 3.6	$\psi_{2474}$ の時間変化	317
図 3.7	1996-2007 における GNSS 変位と予測量	318



## 1. 委託研究報告

### (1) 活動的カルデラ火山の地下構造調査

#### 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. 始良カルデラ臨時地震観測点の拡充と維持

###### 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地震観測を継続している（図 1.1-1-1 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、実施日を表 1.1-1-1 に示す。臨時地震観測および業務委託によるデータ回収とバッテリー交換は来年度も継続して実施する。

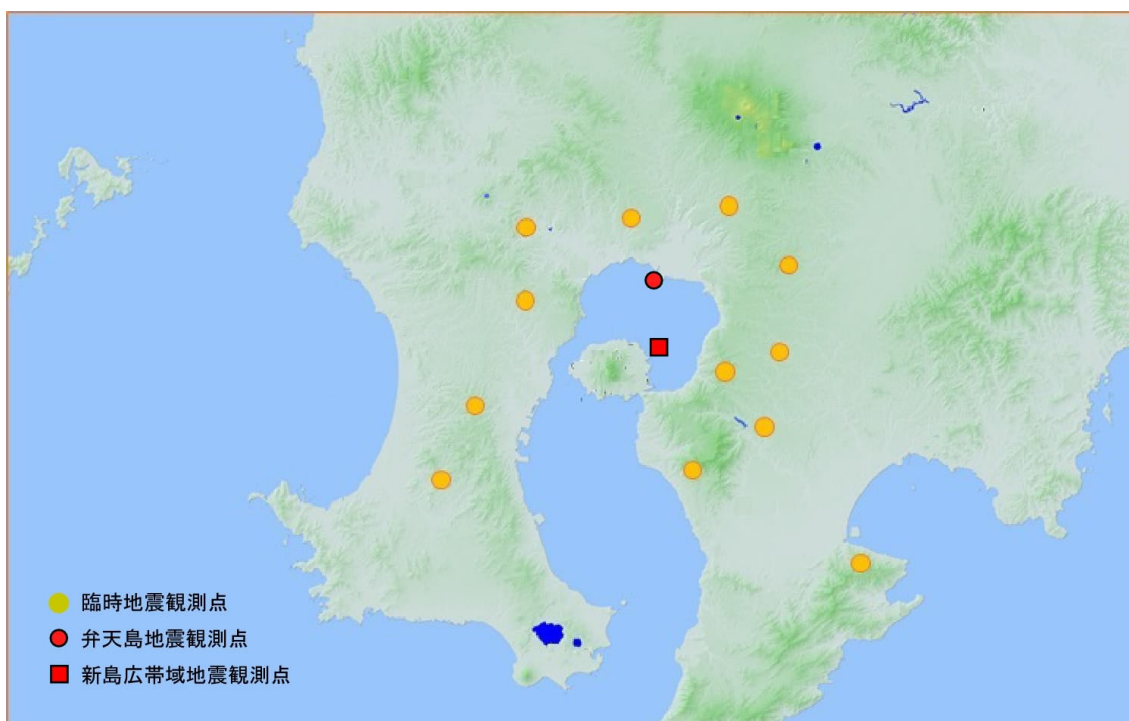


図 1.1-1-1 臨時地震観測点分布

表 1.1-1-1 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

	実施日（多点のため作業は複数日）	異常報告
第 1 回	2019 年 4 月 12 日, 13 日, 17 日, 19 日	なし
第 2 回	2019 年 6 月 15 日, 17 日, 18 日, 24 日	なし
第 3 回	2019 年 8 月 21 日-23 日, 28 日	なし
第 4 回	2019 年 10 月 11 日, 16 日, 23 日, 25 日, 28 日	なし
第 5 回	2019 年 12 月 13 日, 17 日, 20 日, 23 日	なし
第 6 回	2020 年 1 月 24 日, 29 日, 2 月 13 日, 14 日	なし

#### b. 始良カルデラ北部の弁天島短周期地震計テレメータ装置設置

始良カルデラの地下構造を地震波トモグラフィーで調査する上で重要な点は、調査対象としているカルデラ内を通過する地震波線を多数収集することであり、極力カルデラ近傍に地震観測点を設置することが望ましい。そのため、本プロジェクトにおいて始良カルデラ北部の弁天島（図 1.1-1-1 の赤○）に 2019 年 9 月 26 日～10 月 4 日にかけて地震計とテレメータ装置の設置作業を行った。なお当初は隣接する沖小島に観測点を設置する計画になっていたが、下見の結果現地は樹木の繁茂が著しく不適と判断されたため、後述の GNSS 観測点と同様に隣接する弁天島に観測点を設置した。

設置状況を図 1.1-1-2 に示す。地震計はサイモテック株式会社製 SSV-003（3 成分、固有周期 1 秒）の短周期地震計である。地震計は深さ 80cm に埋設し、塩ビパイプで保護している。テレメータ装置は白山工業株式会社製モバイル通信用テレメータ装置 TS19200 を使用し、サンプリング周波数 100Hz、分解能 24bit で A/D 変換を行なっている。DOCOMO 通信網により京都大学防災研究所附属火山活動研究センターのデータサーバーに伝送している。2019 年 10 月 4 日の運用開始後、問題なく連続データの収録が行われている。

図 1.1-1-3 に記録された波形例を示す。この地震は錦江湾で発生した深発地震である。弁天島は小島であり地震観測機器の設置場所としては海岸近傍しかなかった。そのため波浪ノイズが大きく、観測波形もノイズレベルが比較的高いが、M2 程度の小規模地震であっても初動到達時の読み取りには十分な観測精度を保っていることが分かる。本プロジェクト期間中は観測を継続し、始良カルデラを通過する地震波線の収集を行う。

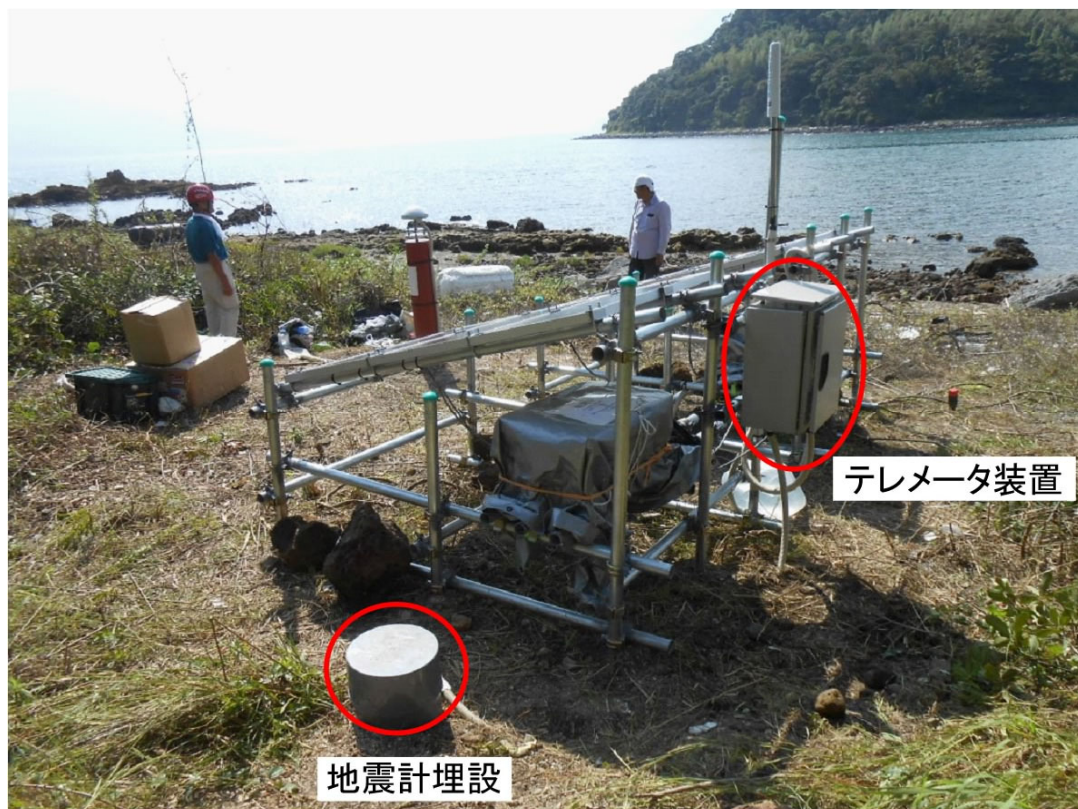
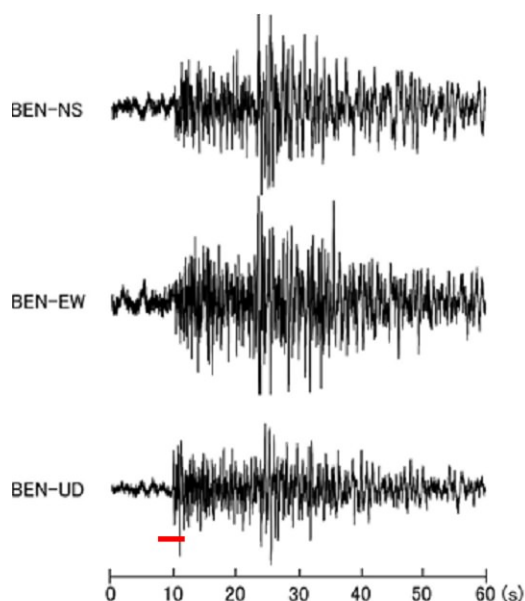


図 1.1-1-2 弁天島短周期地震計設置状況

a) 2019年10月26日 05:28  
錦江湾深発地震 M2.7



b) UD成分の初動付近4秒拡大

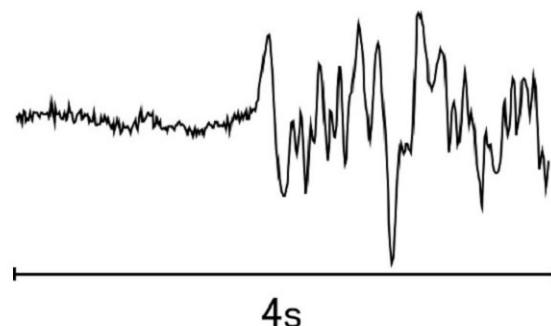


図 1.1-1-3 a) 弁天島観測点で観測された深発地震の地震記録例。b) UD 成分初動付近 4 秒間 ( a) の赤線部) の拡大。

### c. 桜島北東部の新島における広帯域地震計設置

桜島北東部に位置する新島は始良カルデラ中央部に近く、地下構造を推定する上で重要な観測地点である (図 1.1-1-1 の赤口)。始良カルデラの直下で発生する深部低周波地震はカルデラへのマグマ供給に関する重要な情報を含んでいる可能性がある。またレシーバ関数の研究において低周波成分を解析に用いるため、新島において広帯域地震計を設置し地震波の低周波成分を記録できる観測体制を整えた。2019年7月24日に設置作業を行い、同日よりデータ収録を開始した。図 1.1-1-4 に設置状況を示す。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、同センターの新島観測室内に設置した。また、テレメータ装置も同センターの物を使用し、サンプリング周波数 200Hz、分解能 24bit で同センターのデータサーバーに収録されている。

図 1.1-1-5 に新島観測点広帯域地震計で記録された桜島の爆発的噴火に伴う地震動記録を示す。噴火に伴う地震動は周期 1 秒以上の低周波成分が卓越しており、広帯域地震計を設置したことにより正確に地震波を記録できている。広帯域地震計を設置して以降は、ノイズレベルを超えるような深部低周波地震が発生していないが、本プロジェクト期間は観測を継続しデータ収集を行う。



図 1.1-1-4 新島観測点に設置した広帯域地震計

2019年11月17日 13:51  
桜島南岳爆発地震

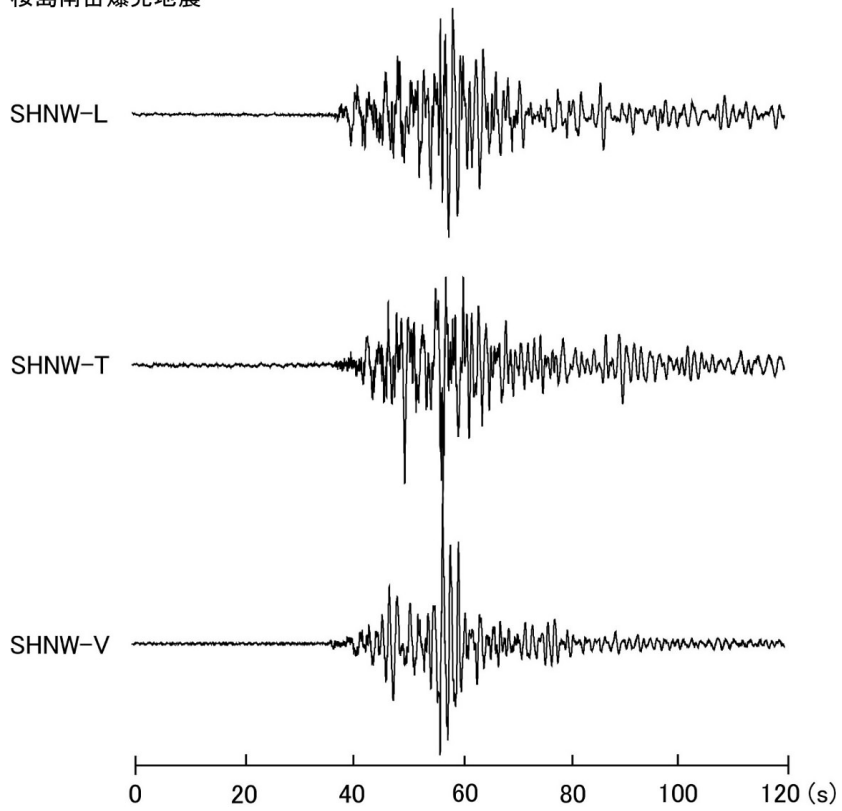


図 1.1-1-5 新島観測点広帯域地震計記録例

## 1-2. 3次元地震波伝播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

### a. 目的

始良カルデラ周辺に設置した地震計により観測された地震波のP波およびS波の到達時刻をデータとして、地震波トモグラフィー法により、地下の3次元的なP波およびS波の伝搬速度構造を求める。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を特定する。

### b. 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○）のデータを含めて計 48 点の観測点で得られた P 波、S 波到達時を用いて 3 次元速度構造解析を行う。

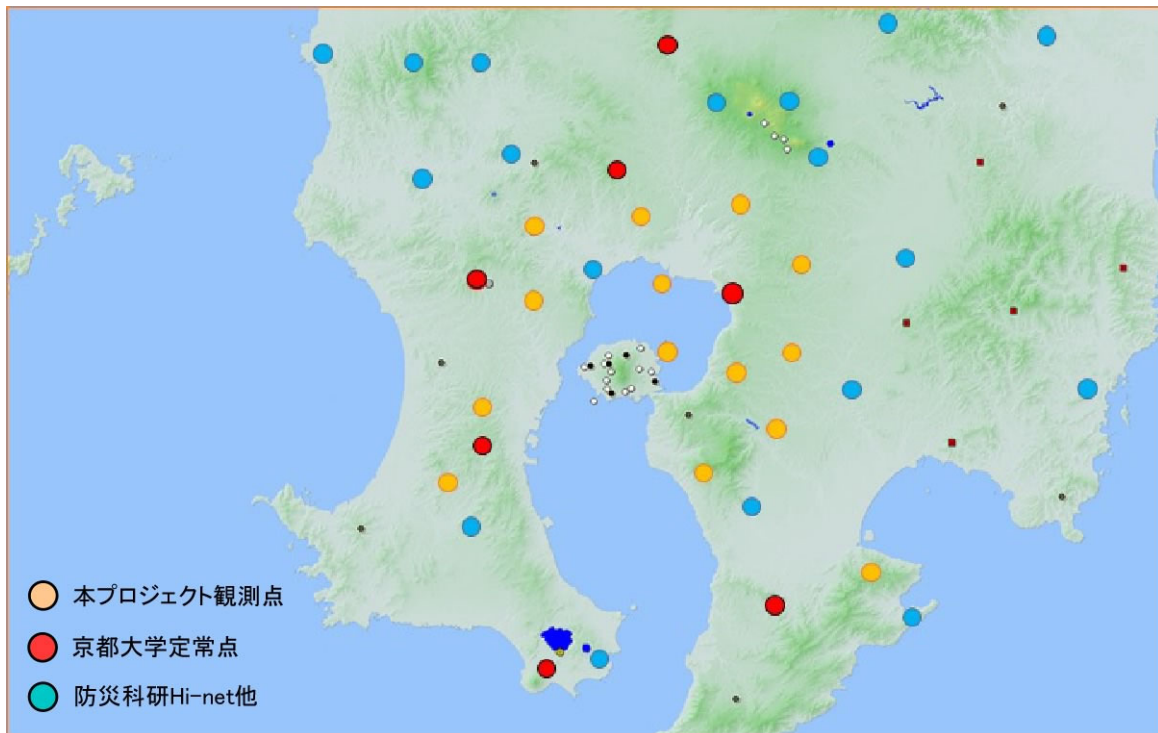


図 1.1-2-1 地震波トモグラフィー解析に使用した地震観測点

表層付近の地震波伝播速度は堆積物や地盤の状況で大きく異なる。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。そのため、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のデータを地震波トモグラフィー解析に使用することで浅部の地震波速度構造を明らかにした。2008年人工地震探査の発破点および地震計設置位置を図 1.1-2-2 に示す。この人工地震探査では 3 次元地震波速度構造の探査深度は約 4km である。ただし、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。

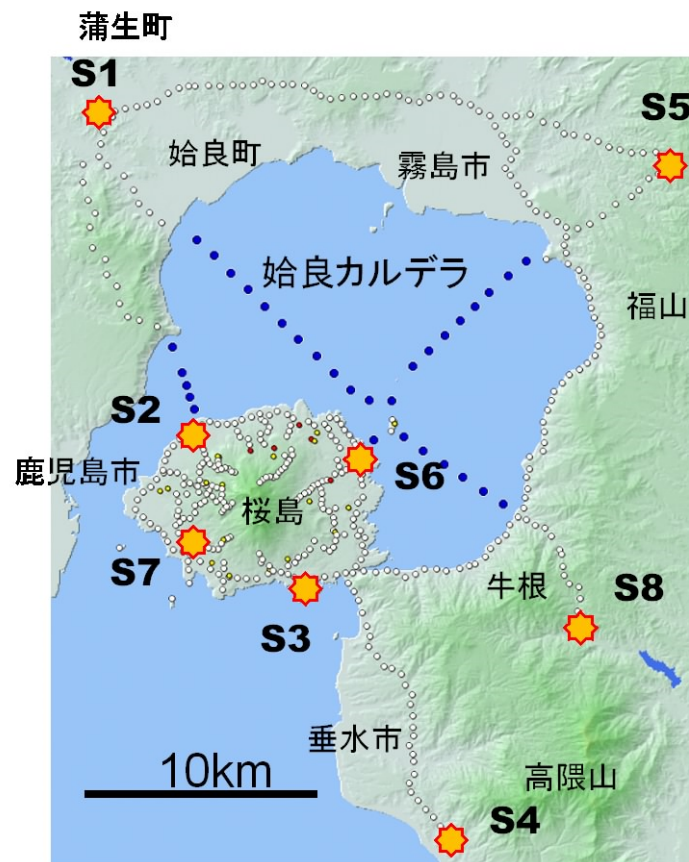


図 1.1-2-2 2008 年人工地震探査の発破点（黄色）と地震観測点（白○と青○）の分布

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305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（本項末尾の表1.1-2-1）。解析に使用した読み取り値は、自然地震P波が14,320、自然地震S波が8,453、人工地震P波が3,121であった。

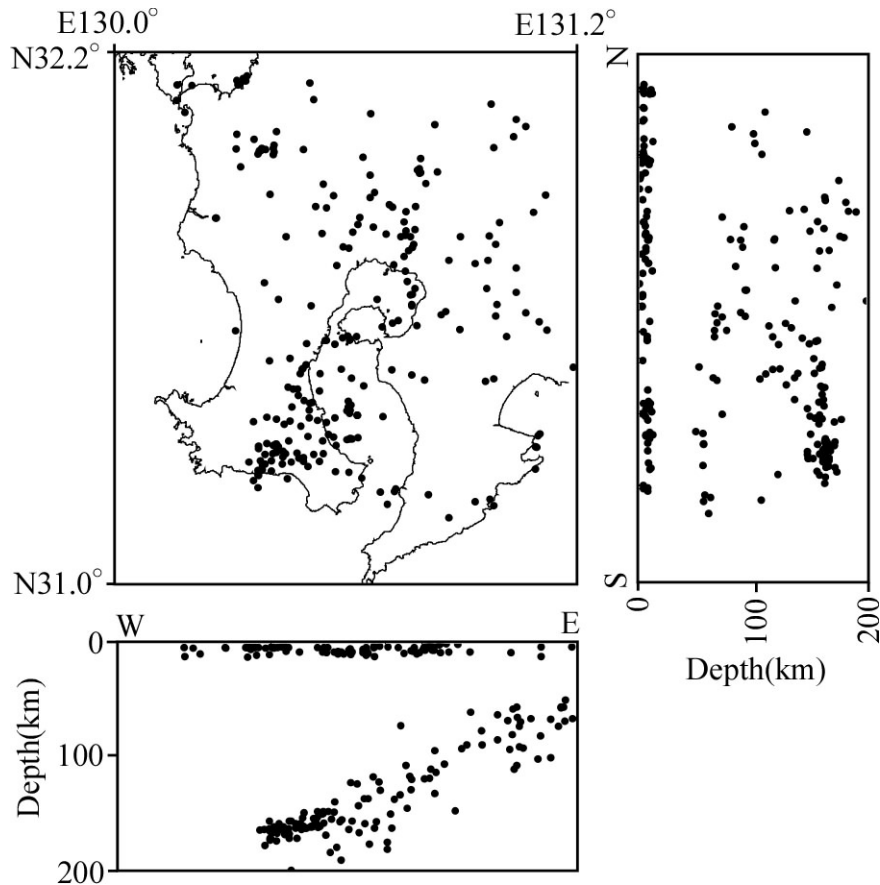


図 1.1-2-3 解析に使用したイベントの震源分布図

### c. 解析方法

地震波トモグラフィインバージョンは八木原・他（2010）の方法を使用している。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（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（ $\pm 0.01$  秒）、B（ $\pm 0.03$  秒）、C（ $\pm 0.10$  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。

#### d. 解析結果

初期モデルの走時残差 WRMS は 0.311 秒で、得られた解モデルの走時残差 WRMS は 0.213 秒となった。チェッカーボードテスト (図 1.1-2-4) におけるパターンの戻りと RDE の分布を比較すると、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、解の信頼性が確保されたとみなせる。実データから得られた速度分布に対する RDE をみると、深さ 15 km までは、RDE は大部分の領域で 0.6 を超えている。人工地震データを使用したため、深さ 1km の P 波の戻りは格段に向上している。深さ 1km の S 波についても地殻内の浅部で発生した自然地震データを多く追加したため向上している。深さ 20 km では RDE が 0.6 を超える領域が限定されるため、今年度の解析では深さ 20km 以上の速度構造についての評価は行わない。

深さ 20km 以浅における 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。大隅半島側は表層まで四万十層の露出があるため地震波速度は速い結果が得られている。カルデラ内部から薩摩半島側においては堆積物の影響で P 波速度は相対的に遅いが、始良カルデラ北東部の P 波速度が速く、S 波速度が遅い領域の海底にある若尊火山があり、熱水活動が影響しているものと考えられる。

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。

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高い。深さ 20km においては解像度が下がるため鮮明ではないが、始良カルデラ中央部で S 波速度の遅い領域が見られる。

今年度の解析は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。自然地震データも M1.5 程度の微小地震まで解析に加えたが、依然として 20km 以深の解像度は悪い。(1)-1-1-b で報告したように令和元年度中に始良カルデラ北部の弁天島において地震観測を開始しており、今後は始良カルデラ直下を通過する波線を追加することが可能である。今年度は 8 観測点以上で初動到達時が読み取り可能な地震を解析に使用しているが、読み取り可能な観測点数が少ない地震においても解析データに加えることが可能か検討を行なう。始良カルデラ内部で発生する微小地震 (M1 程度)、深発地震、やや深発地震のデータ数を増加させることでカルデラ内深部の解像度の向上を行なう。深さ 10km 付近で観測されている地盤変動源について、地震波トモグラフィでは検知できない可能性がある。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解析を行なう予定である。



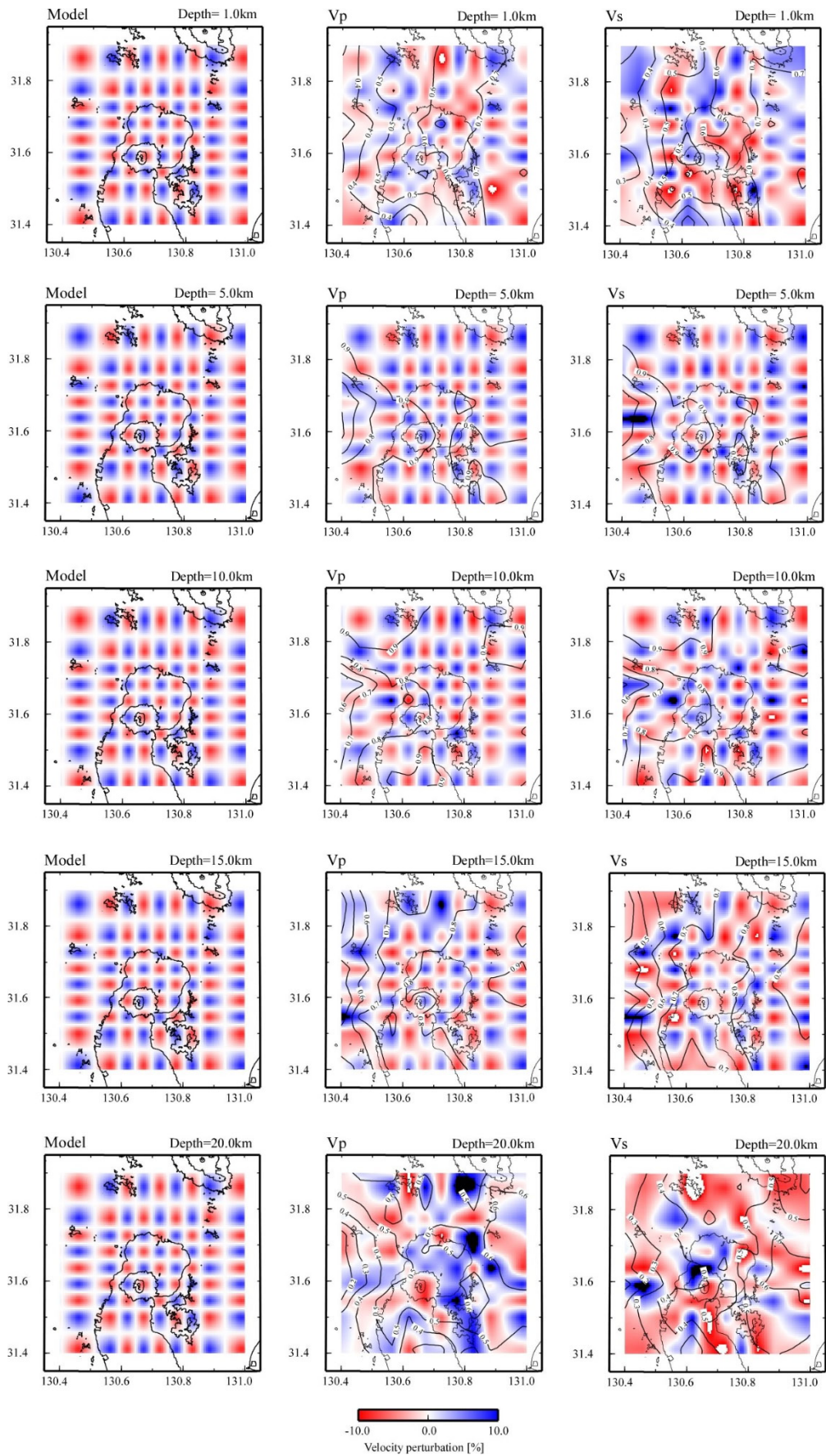


図 1.1-2-4 深さ 1km、5km、10km、15km、20km におけるチェッカーボードテスト結果

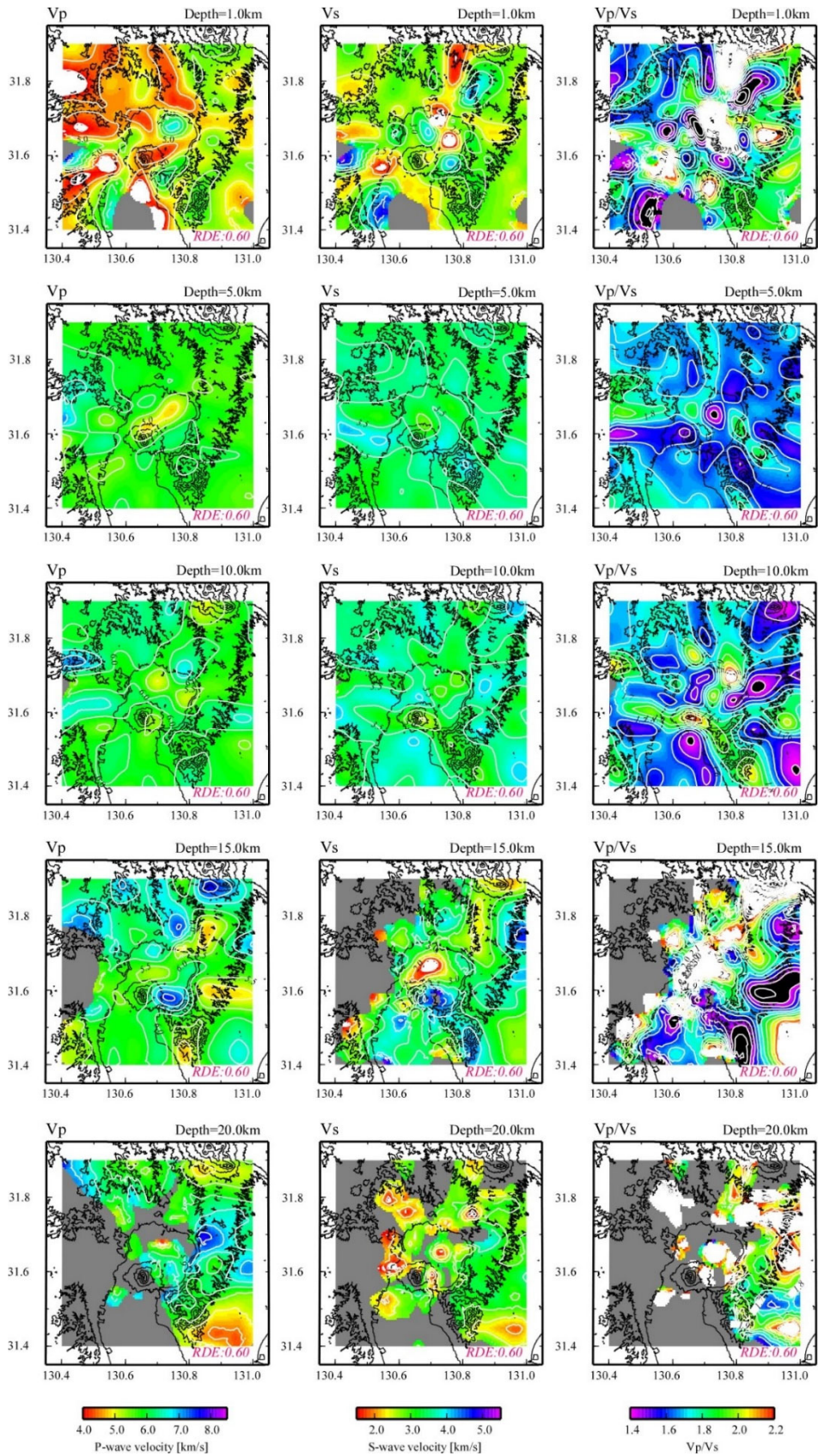


図 1.1-2-5 深さ 1km、5km、10km、15km、20km における P 波、S 波速度およびその比

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



### 1-3. レシーバ関数による始良カルデラ地下構造モデルの高精度化

#### a. はじめに

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。

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溜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、桜島火山とそれを含む始良カルデラの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溜まりがどの深さに存在するかはよくわかっていない。

また、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)。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。

始良カルデラにおいて20km以深の構造を知りマグマ溜まりの大きさと深さ、そしてマグマ生成に関与する水の存在を解明することは、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である。

本報告では桜島とその周辺における定常・臨時観測点の地震波形データを用いたレシーバ関数解析の結果について述べ、これに加えて澁谷・他(2019)の解析結果も述べる。

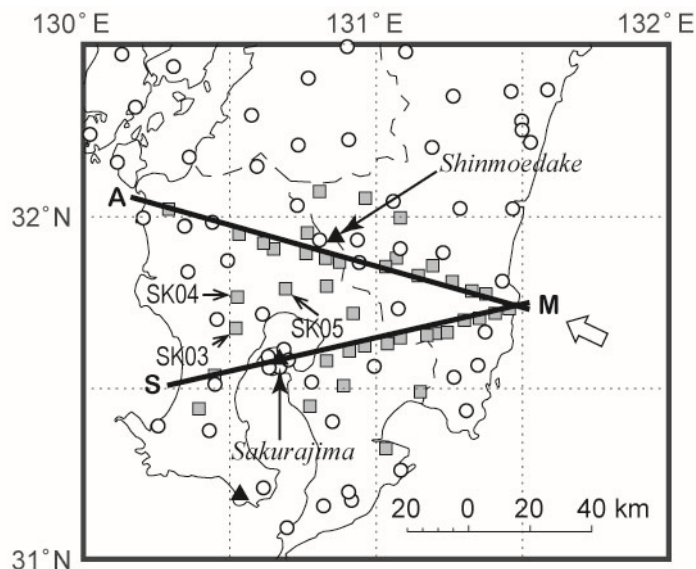


図 1.1-3-1 九州南部の地震観測点の分布を示す。白丸は定常観測点、灰色の四角は臨時観測点である。太線MAとMSはそれぞれ宮崎-阿久根測線と宮崎-桜島測線を示す。黒三角は火山を、白抜きの大い矢印はフィリピン海プレートの運動方向を、破線は県境を示す。

#### b. 地震観測

##### 1) リニアアレイ観測

地震の定常観測網の平均的な観測点間隔は約 20 km である。より解像度の高い地震波速度構造の描像を得るため、我々は定常観測網を埋めるような形で臨時観測を行った (図 1.1-3-1)。図中の太線 MA と MS はレシーバ関数解析のためのリニアアレイで、それぞれ宮崎-阿久根測線と宮崎-桜島測線を示す。これらの測線では定常観測網を補って地震観測点が約 5 km 間隔で配置されるように、固有周期 1 秒の短周期地震計を設置した。地震計の出力はバッテリー駆動のデータロガーに連続収録した。データロガーは GPS 信号に同期させた。

## 2) 桜島とその周辺での観測

桜島島内の地震観測点の分布を図 1.1-3-2 に示す。これらは京都大学防災研究所火山活動研究センターにより維持されているオンライン観測点である。島外の始良カルデラ周辺の観測点は図 1-3-1 に示されている。

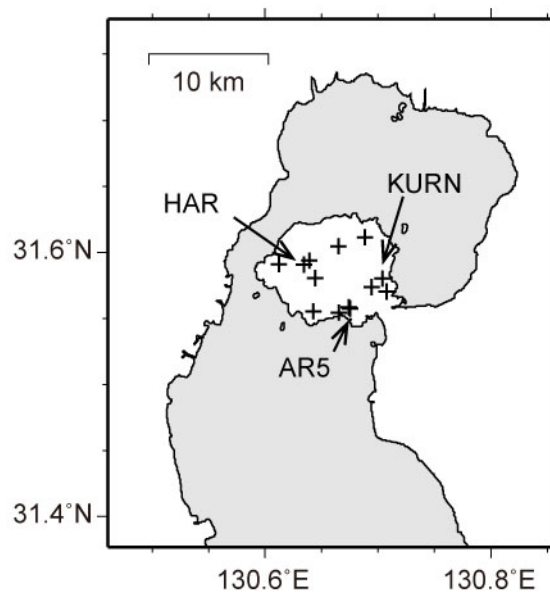


図 1.1-3-2 桜島島内の地震観測点 (+) の分布

### c. レシーバ関数解析

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

レシーバ関数には、入射 P 波が地震波速度不連続面で P 波のまま透過する Pp 相に加え、後続波として、入射 P 波が不連続面で S 波に変換して透過する Ps 相、入射 P 波が地表面で PP 反射し、不連続面で PS 反射する PpPs 相、入射 P 波が地表面で PS 反射し、不連続面で SS 反射する PpSs 相が含まれる。以下では、簡単のために、後続 3 相の中で振幅が最も大きいことが期待できる Ps 変換波について議論する。Ps 変換波は、高速度層上面で変換した場合は正の極性を、低速度層上面で変換した場合は負の極性をもつ。

レシーバ関数を Ps 変換波の共通変換点でスタッキングすることにより、レシーバ関数イメージを作成した。この際、Ps 変換点の位置の計算には気象庁が震源決定に用いている水平成層の地震波速度モデル JMA2001 (上野・他, 2002) を用いた。リニアアレイに沿う深さ断面のイメ

ージングでは、Ps 変換点を断面に投影し、1 km×1 km の正方形の中のレーシーバ関数の振幅をスタッキングした。その際、断面からの距離が 10 km 以内の変換点の振幅は重み 1 で、それより遠い変換点に対しては、[距離]/10 の平方根に反比例する重みを付けてスタッキングした。始良カルデラ周辺のイメージングでは、1 km×1 km×1 km の立方体の中の Ps 変換点についてレーシーバ関数の振幅をスタッキングした。

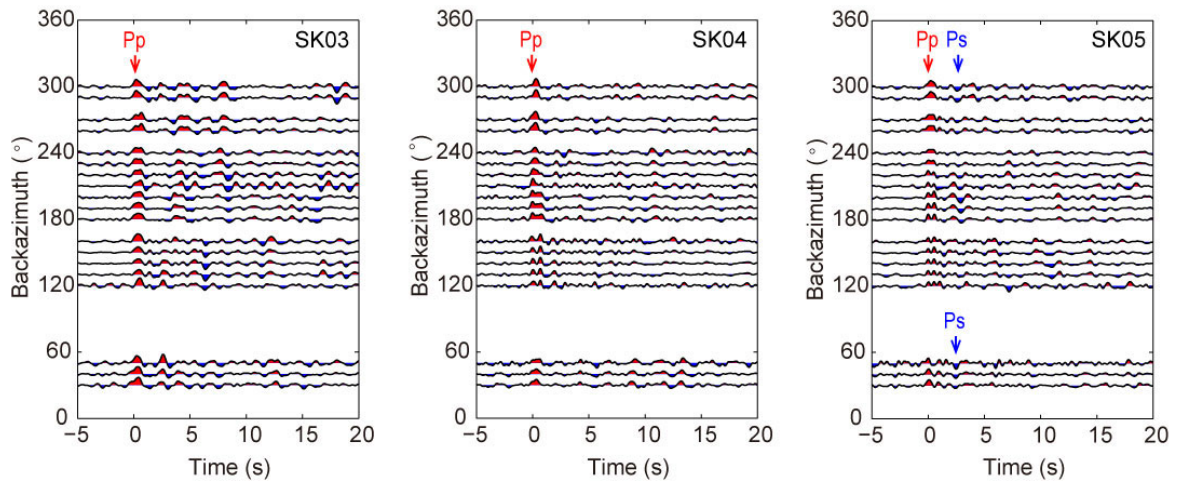


図 1.1-3-3 始良カルデラ周辺の臨時観測点 SK03、SK04、SK05（図 1.1-3-1 に位置を示す）でのレーシーバ関数の波形。到来方向が  $20^\circ$  の範囲に入るレーシーバ関数の radial 成分を重合した。

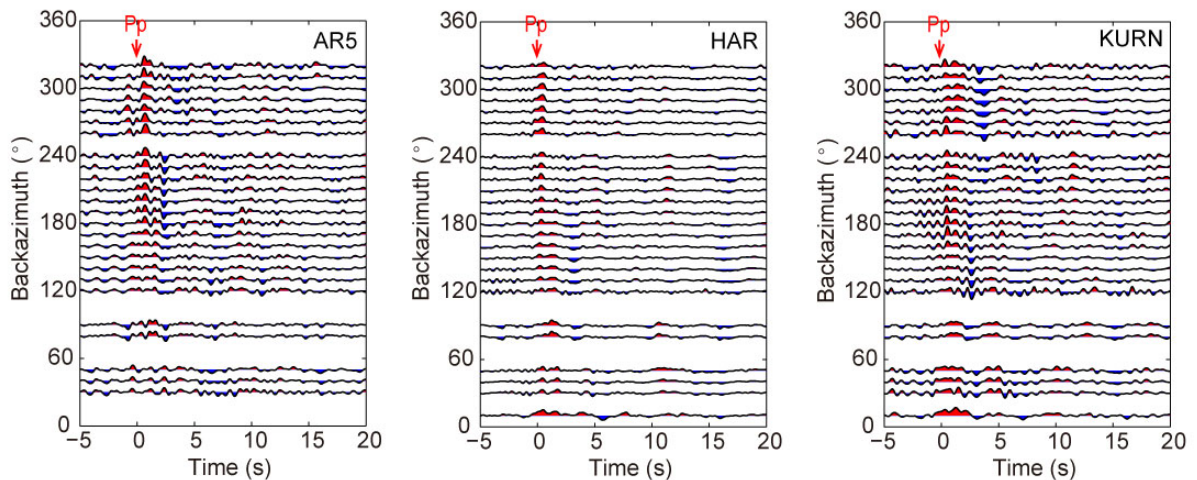


図 1.1-3-4 桜島島内の観測点 AR5、HAR、KURN（図 1.1-3-2 に位置を示す）でのレーシーバ関数の波形。到来方向が  $20^\circ$  の範囲に入るレーシーバ関数の radial 成分を重合した。

#### d. 結果

##### a. レシーバ関数波形例

図 1.1-3-3 に始良カルデラ周辺の臨時観測点 SK03、SK04、SK05（図 1.1-3-1 に位置を示す）でのレーシーバ関数の波形を示す。これらの波形は到来方向が  $20^\circ$  の範囲に入るレーシーバ関数の radial 成分を重合したものである。図中に Pp で示す直達 P 波のパルス形状に方位依存性が見られる。とくに SK04 と SK05 に顕著であり。南東～南西方向から到来するレーシーバ関数では直達 P 波のパルスが 2 山から 3 山に分裂する特徴がみられる。このことは、この方向の深さ十数 km までの構造が複雑であることを示唆している。SK05 では Ps で示すように、直達 P 波から約

2.5 s 後に負の振幅をもつフェーズが見られる。これは深さ約 20 km 以深に低速度層が存在することを示唆する。

図 1.1-3-4 に桜島島内の観測点 AR5、HAR、KURN（図 1-3-2 に位置を示す）でのレーシーバ関数の波形を示す。これらの観測点では Pp で示す直達 P 波の振幅は小さく、むしろ直後の後続波の振幅の方が大きい。これは、表層に非常に小さい S 波速度をもつ場合の特徴である。また、その波形も到来方向により大きく変化していて、浅部構造が複雑で不均質であることを示唆している。さらに、負の振幅をもつフェーズの大きさや形状、および直達 P 波からの相対走時にも到来方向による変化がみられ、低速度領域が不均質に分布していることが示唆される。

#### b. 始良カルデラ周辺

図 1.1-3-5 に始良カルデラ周辺における深さ 10 km、20 km、30 km でのレーシーバ関数イメージを示す。深さ 10 km では霧島火山周辺から始良カルデラの北側まで低速度域の上面を示す青い領域が見られる。深さ 20 km では霧島火山周辺から始良カルデラの北側までと、桜島を中心とする領域が低速度になっていると考えられる。これらの領域には深部低周波地震（白丸）が発生していて、流体の存在が示唆される。深さ 30 km では桜島の周辺と始良カルデラが低速度になっていると考えられる。

始良カルデラを通る南北断面と東西断面のレーシーバ関数イメージをそれぞれ図 1.1-3-6 と図 1.1-3-7 に示す。桜島の下の高さ 20 km～40 km に低速度域に対応する青い領域が見られる。この領域では深部低周波地震（白丸）が発生していて、流体の存在が示唆される。霧島火山の西側の深さ 20 km～30 km にも低速度域があると考えられる。始良カルデラの下の高さ 20 km より浅い領域には波線が通らない部分があり、その構造は不明である。20 km より深い部分は波線が通っていて、桜島の下と同様、40 km まではおおむね低速度域と推定される。始良カルデラの下の高さ 20 km 以浅の領域を解像するためには、錦江湾の海岸線付近に観測点を追加する必要がある。

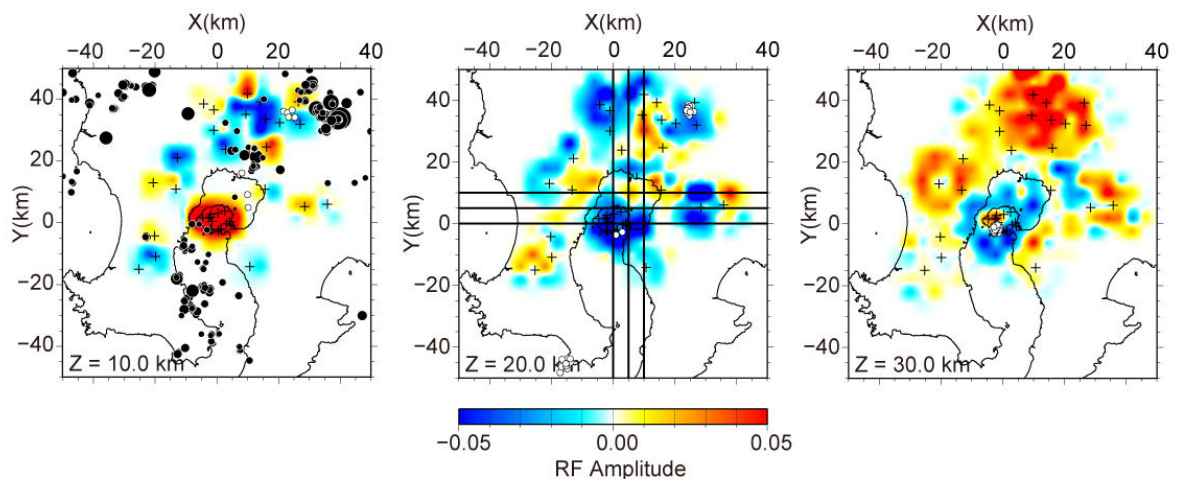


図 1.1-3-5 始良カルデラ周辺における深さ 10 km、20 km、30 km でのレーシーバ関数イメージ。中図の縦線と横線はそれぞれ図 1-3-8 と図 1-3-9 で示す断面の位置を示している。+はレーシーバ関数イメージングに用いた観測点の位置を示す。黒丸は通常の地震を、白丸は深部低周波地震を示す。



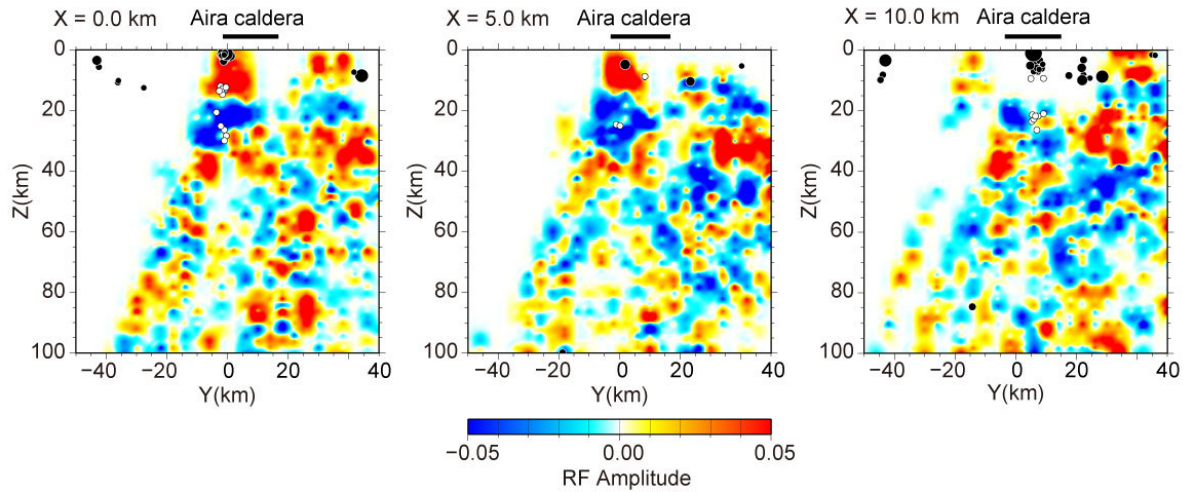


図 1.1-3-6 始良カルデラを通る南北断面のレシーバ関数イメージ。黒丸は通常の地震を、白丸は深部低周波地震を示す。図上の太い横線は始良カルデラの位置を示す。

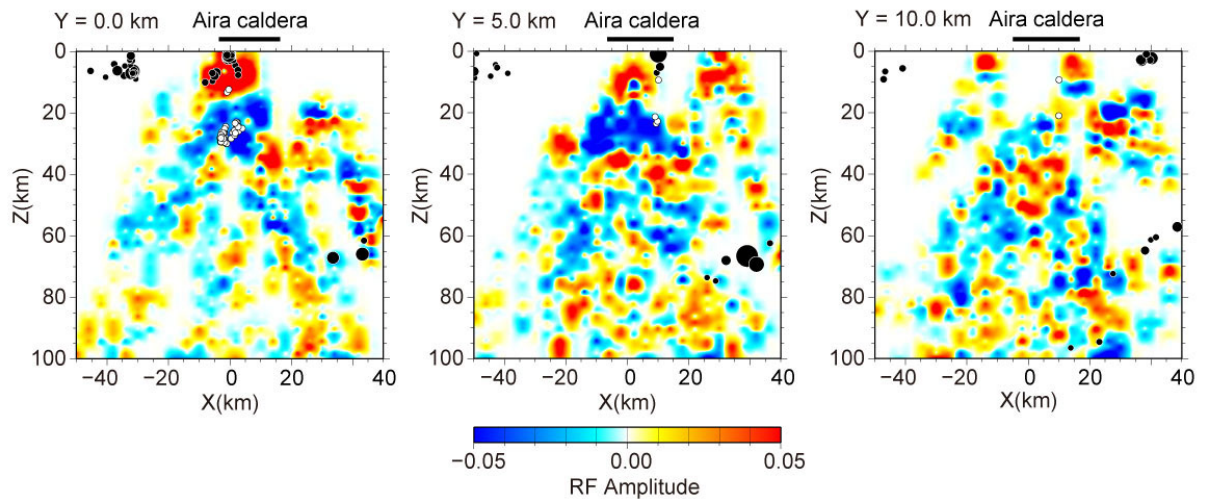


図 1.1-3-7 始良カルデラを通る東西断面のレシーバ関数イメージ。黒丸は通常の地震を、白丸は深部低周波地震を示す。図上の太い横線は始良カルデラの位置を示す。

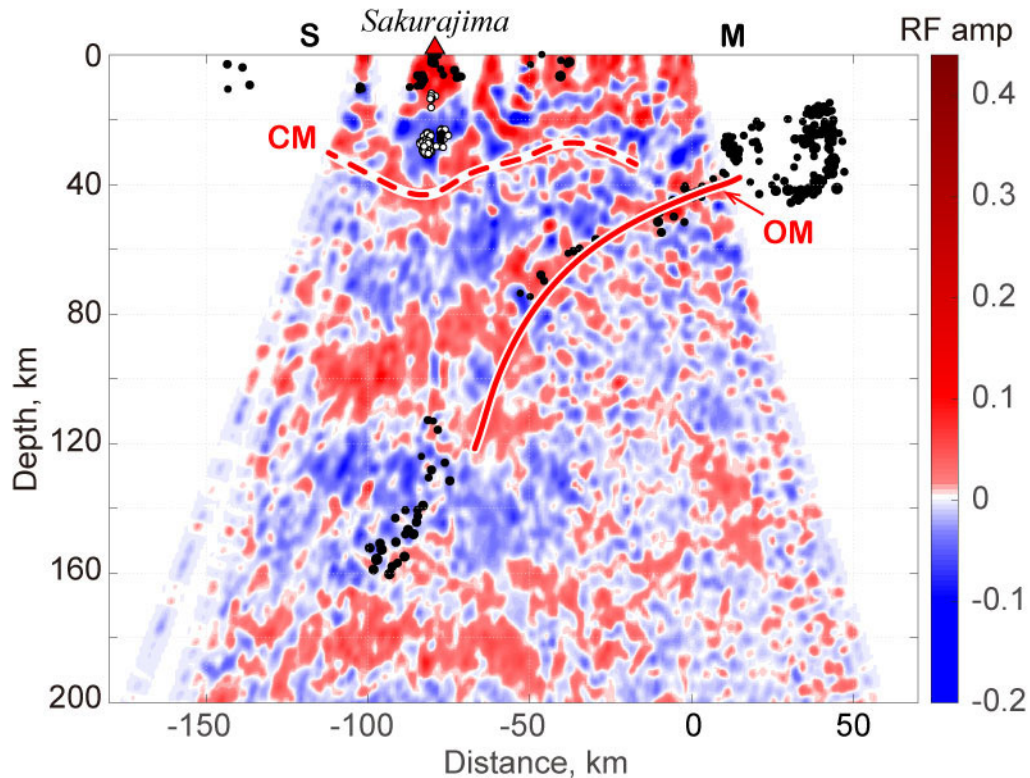


図 1.1-3-8 宮崎－阿久根測線（図 1-3-1 の MA）に沿う断面におけるレイバー関数イメージ。CM と OM を付した赤線は、それぞれ大陸モホ面と海洋モホ面を示す。黒丸は通常の地震を、白丸は深部低周波地震を示す。赤三角は新燃岳（霧島火山）の位置を示す。

### c. 宮崎－阿久根測線

宮崎市から霧島火山を通して阿久根市に至る測線に沿う断面におけるレイバー関数イメージを図 1.1-3-8 に示す。図中、OM を付した赤線で示すように、沈み込むフィリピン海プレート内の海洋モホ面は、深さ 100 km 付近まで高速度層上面として明瞭にイメージされている。途中深さ 60 km 付近に折れ曲がりが見られる。ただし、高角度で傾斜しているフィリピン海スラブを水平成層構造を用いてイメージングしているため、深さ 60 km から 120 km まで浅い側にバイアスのかかったイメージが出現していることに注意しなければならない。

また、CM を付した赤線のように大陸モホ面は、南九州の西半分では高速度層上面として明瞭であるが、東側では不明瞭になる。これは、東側のマントルウェッジ部分が、スラブから供給される「水」の影響で低速度になっているためと考えられる。

さらに、深さ 20 km に低速度層上面を表す青いイメージがほぼ水平に連なっている。新燃岳（霧島火山）の直下に見られる低周波地震（白丸）はこの青いイメージの近傍で発生している。

#### d. 宮崎—桜島測線

宮崎市から桜島火山に至る測線に沿う断面におけるレシーバ関数イメージを図 1.1-3-9 に示す。基本的には図 1.1-3-8 に示す宮崎—阿久根測線と同じ特徴がみられる。すなわち、OM で示す海洋モホ面は、深さ 60 km 付近で上に凸に曲がっていて、深さ 120 km まで明瞭にみられる。CM で示す大陸モホ面は、図 1.1-3-5 に比べれば不明瞭であるが、測線の南西部分に限ってみられる。また、桜島火山の下では大陸モホ面が下に凸に下がっているが、これは青色で示す低速層上面が深くまで下がっているためであり、低周波地震（白丸）もその中で発生している。

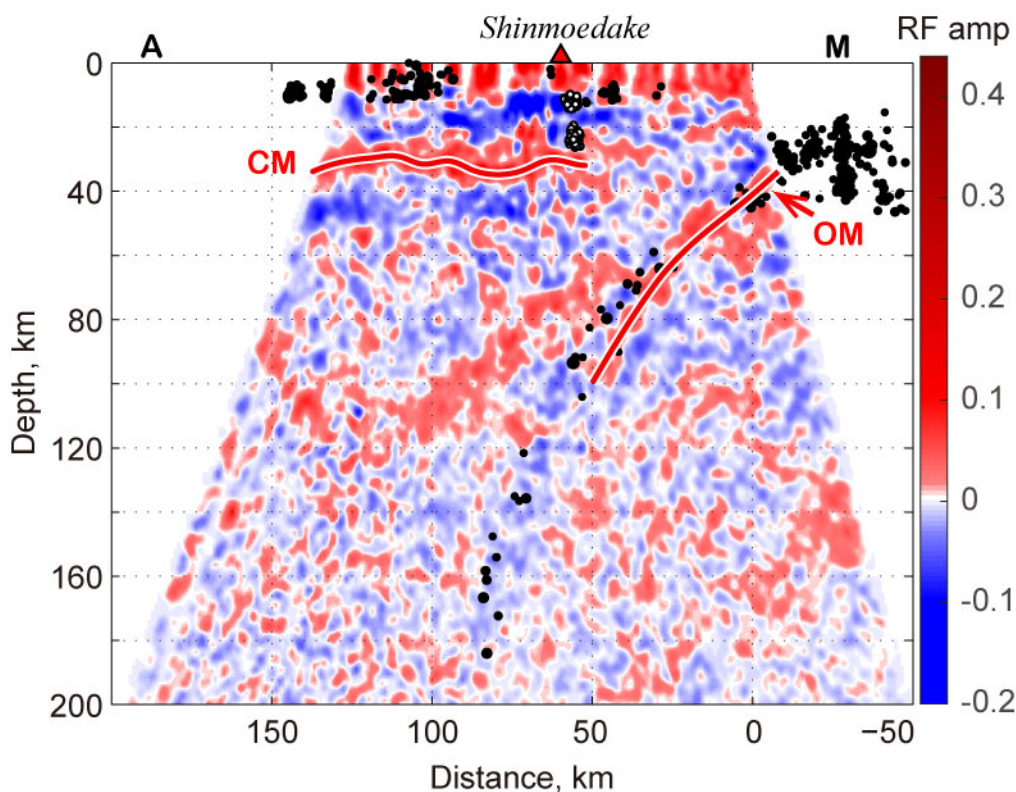


図 1.1-3-9 宮崎—桜島測線（図 1.1-3-1 の MS）に沿う断面におけるレシーバ関数イメージ。CM と OM を付した赤線は、それぞれ大陸モホ面と海洋モホ面を示す。黒丸は通常の地震を、白丸は深部低周波地震を示す。赤三角は桜島火山の位置を示す。

#### 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。従来より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、始良カルデラ北部の弁天島に臨時観測点を増設するとともに桜島北東部の新島に広帯域地震計を設置し、いずれも順調にデータ収録が行われている。

また地震観測記録をもちいて 3 次元トモグラフィーとレシーバ関数の解析が行われた。今回の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のマグニチュードの下限の値を見直し、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。またこれまでに実施された人工地震観測記録を用いて浅部構造の精度を改善した。その結果としてこれまでより高い4kmの解像度を得ることができた。始良カルデラでは中央部と北東部に特徴的な速度異常が見いだされた。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P波速度は高くかつ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。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見いだされた。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。始良カルデア中央部の深さ10km付近については鹿児島湾北部への観測点の増設の効果が今後期待される。

レシーバ関数解析では南九州を横断して始良カルデラとその周辺における深さ20kmより深い構造の解析が行われた。始良カルデラ周辺で得られたレシーバ関数は20km以深に低速度層の存在を示し、桜島で得られたレシーバ関数は表層の著しいS波低速度が不均質に分布していることを示した。この解析によれば始良カルデラ南部の桜島の直下20~30kmにS波低速度領域が示され、低周波地震発生領域との一致から流体の存在が推察された。さらに始良カルデラの東側では深さ40km付近で西から延びる大陸モホ面が不明瞭になることが示され、沈み込むスラブから分離した水の影響が大きいことが推察された。しかし、今回のレシーバ関数解析では地震波の通過がない始良カルデラ北部20km以浅の構造が解明できていないため、鹿児島湾（錦江湾）北部への観測点の増設の効果が今後期待される。

#### 参考文献

- Abe, Y., T. Ohkura, K. Hirahara, T. Shibutani, Along-arc variation in water distribution in the uppermost mantle beneath Kyushu, Japan, as derived from receiver function analyses, *J. Geophys. Res.*, 118, 3540-3556, doi:10.1002/jgrb.50257, 2013
- 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
- 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.
- 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
- 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., 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
- 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.

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

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.

## 2. 始良カルデラにおける長期連続反射法探査の有効性の検討

本項では始良カルデラにおける長期連続反射法探査の有効性の検討について平成 31（令和元）年度の成果について報告する。

始良カルデラにおいて長期連続反射法探査を実現するために検討されなければならない項目群は図 1.2-1 のイメージである。

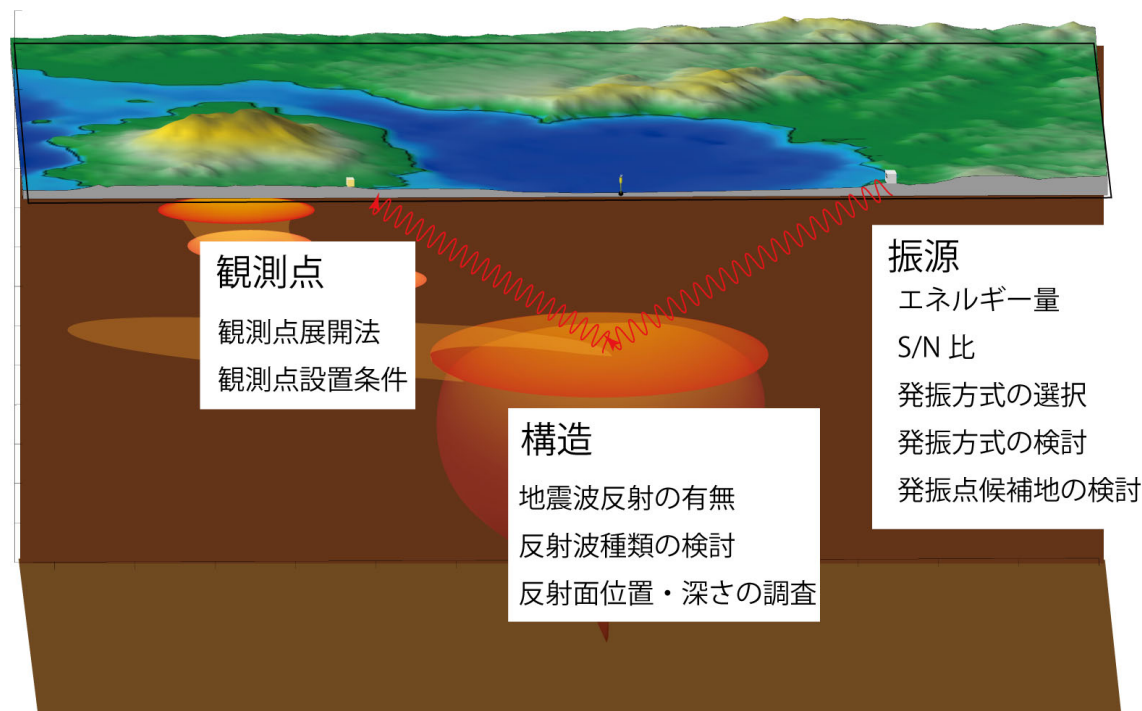


図 1.2-1 始良カルデラにおける長期連続反射法地震探査に関する検討項目

長期連続反射法地震探査では始良カルデラを挟んで発振点と受振点を配置し、始良カルデラの地下深部で反射して地表に戻ってくる人工地震波を観測するという構成をとる。既往の研究では始良カルデラ中央部の深さ 20 キロメートル付近に地震波速度の低速度異常が観測されていることから（国立研究開発法人産業技術総合研究所，2019）、長期連続反射法では概ね深さ 10～20 キロメートルからの反射地震波を捉えられる可能性について検討する。

長期連続反射法地震探査では同一地点における長期にわたる繰り返し発振による地震波の観測を行い、得られた地震波応答から地下構造変化を検出する。長期連続反射法地震探査では定常的な同一地点の発振及び同一地点における地震波観測がともに必要である。震源には震源距離 30～40km の地表観測で十分な振幅を示す地震波を発生させる能力が必要とされ、反復発振に耐える構造でかつ発生する地震波形の再現性が高いことが要求される。一方、地震波観測では地表付近で発生した地震波によって深さ 15km 付近で発生した地震反射波記録を得ることが期待される。さらに、数年にわたる観測を連続的に行うためには発振施設の設計も検討される必要がある。

そのために検討されなければならないこととして、大きく分けて 3 つのカテゴリーの項目群がある。人工的に地震波を発生させる振源に関する検討、始良カルデラの地下構造に関する検討、人工地震波を検出する受振点に関する検討である。

本項では(1)-2-1 節に始良カルデラの地下構造に関する検討と受振点に関する検討に対する報告を記述し、(1)-2-2 節に振源に関する検討に対する報告を記述する。

## 2-1. 長期連続反射法の波形取得方法と深部反射波検出の検討

2008 年に実施された人工地震による構造探査で得られたデータを精査し、鹿児島湾北部を占める始良カルデラ深部で発生する反射波および変換反射波の存在の有無について検討するとともに、長期連続反射法探査に最適な観測点展開法も検討した。

### a. 観測点（受振点）展開方法の検討

長期連続反射法では長期にわたり繰り返し人工的に地震波を地下に照射し、地下から戻ってくる地震反射波を取得しつづける必要がある。地震波を取得するための観測点を展開するにあたり、2つの要素を検討しなければならない。一つは観測点の展開方法で、もう一つは観測点におけるセンサの設置方法である。ここでは地下から戻ってくる地震反射波の記録を長期にわたり取得する展開方法について検討を加える。観測点におけるセンサの設置方法の検討については別項に述べることにする。

地下からやってくる地震波を抽出することを目的とした観測点の展開方法は2つある。1つは発振点から放射方向の線上に観測点（受振点）を配列する方法、もう一つはある範囲のなかに2次的に観測点を配列する方法である。ここでは前者を測線方式、後者をアレイ方式と呼ぶことにする。両者を図 1.2-1-1 に示す。

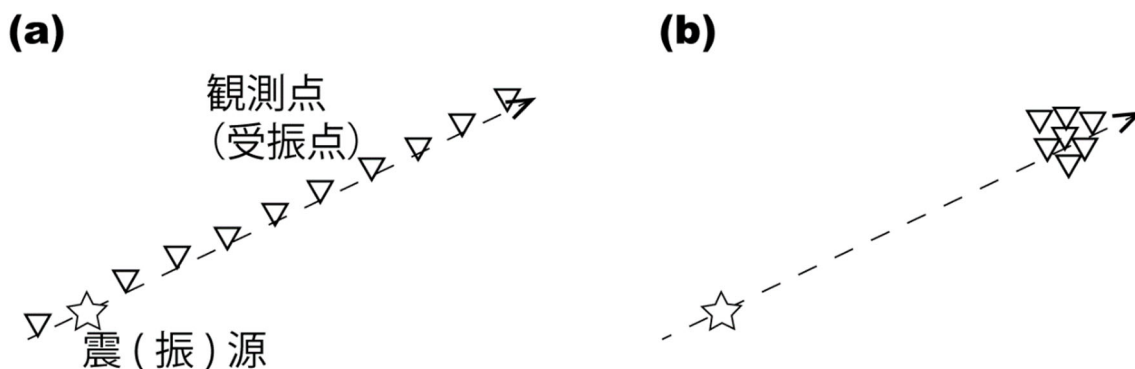


図 1.2-1-1 展開方式 (a)測線方式、(b)アレイ方式。測線方式は振源近傍から観測点を直線状に配置する。アレイ方式はある振源距離の地点の周囲に高密度に観測点を配置する。

測線方式は地下構造調査のほとんどで採用される展開方法である。観測点の列を測線と呼ぶ。測線方式では地下からやってくる地震波の走時と見かけ速度を発振点から連続的に知ることができ、測線直下の大局的な構造を把握することができる。一方、観測点が線状に配列されるため、測線の規模によっては長期にわたって観測態勢を維持することに多大な労力を要求される。

アレイ方式はある限定された範囲内に観測点を高密度に配置する展開方法で、このように展開された観測点群をアレイと呼ぶ。アレイの中には必ずしも発振点を位置させる必要はなく、観測の目的によってアレイと発振点の位置関係を与える。アレイ方式ではある地点における地震波の走時と見かけ速度に加えて、入射方向を知ることができる。測線方式では到来する地震波の測線に沿った方向の見かけ速度のみが得られるのに対して、アレイ方式では地震波の到来方向に沿った見かけ速度を得ることができる。測線方式では地震波の到来が振源方向か否かの

区別にとどまるのに対して、アレイ方式では到来方向を2次元的に知ることができるので振源方向以外から到来する波を詳細に区別することができる。また観測点の展開の広がり局所的であるので、同じ震源距離の観測を維持する場合には測線方式に比べて要求される労力が小さい。

長期にわたり観測を維持する観点からは、維持に要求される労力の少ないアレイ方式が好ましいと考えられる。

さらに後述の検討(a-1-10.1項)によれば地表に受振器を設置する方法より、地中に受振器を設置する方法のほうがより高いS/N比の記録が取得できることが示されている。

このことから長期連続反射法地震探査の観測方式としては、孔中受振器から構成されるアレイ観測方式が好ましいと考えられる。

## b. 深部反射波の検出

### 検討に用いたデータ

本稿では2008年に実施された人工地震探査によって取得された波形データを使用した。この人工地震探査の詳細は井口他(2009)に述べられている。井口他(2009)測線では600点あまりの臨時観測点が展開され、震源では1点あたり200kgのダイナマイトを用いた発破作業が実施された。本稿ではこれらのデータのうち、桜島火山を中心とした鹿児島湾北部沿岸地域に展開された固有周波数2 Hz または4.5 Hzの上下動地震計を用いた陸上臨時観測点と、固有周波数4.5Hzの上下動地震計を備えた海底地震計とによって取得されたデータを取り扱う。

2008年に実施された構造探査の観測記録のうち、鹿児島湾を横断する測線では明瞭な後続相が観察された。ここではこの後続相について整理し、後続相の原因となる構造的な特徴について考察した。

始良カルデラの地下構造はこれまでも議論されてきた。Yokoyama and Ohkawa(1989)が重力測定の結果から、始良カルデラはその周囲に比べて負のブーゲー異常を示すことを報告し、じょうご型の基盤地形の上に低密度の物質が位置するモデルが提唱された。最近では井口他(2009)によって始良カルデラを横断する人工地震実験が行われ、Miyamachi et al. (2013)が深さ4kmまでの地震波速度構造を提唱した。Miyamachi et al. (2013)は始良カルデラ内部はその外側に比べて低い地震波速度を与えることによって観測初動走時が説明できるとしている。

これらの臨時観測点で得られた観測記録の整理方法は、発破点を測線上に含む線状展開の測線と、測線の交差点周辺で形成された群列配置、測線の側方に発破点が位置するファンシューティング法の3種類である。まず3本の測線の観測記録に注目して後続相の検出と走時の同定を行う。次に群列配置を用いて検出された後続相の伝播方向と見かけ速度を推定し、鹿児島湾深部から到来する後続相の洗い出しと、これらを構成する波の種類を同定する。さらにファンシューティング法を後続相発生領域の広がりを拘束することに用いる。本研究で用いた観測点と発破点の配置を図1.2-1-2に示す。

本稿では3本の測線を用いて後続相の検出を行う。鹿児島湾の北西に位置する発破点S01から桜島南西部の発破点S07を經由して大隅半島の発破点S04に至る測線を「始良A測線」、途中で分岐して桜島北東岸の発破点S06を經由する観測点列で構成される測線を「始良B測線」、鹿児島湾の北東に位置する発破点S05から鹿児島湾を北東から南西に横断して桜島北東岸の発破点S06を經由し、桜島南西岸のS07を結ぶ観測点で構成される測線を「若尊測線」と称することにする。始良A,B測線は始良カルデラの西部を横断し、若尊測線は始良カルデラの東部を横断する。



群列（アレイ）観測では図 1.2-1-3 に示される次の 4 箇所を用いて後続相の波の到来方向と見かけ速度とを推定した。1 つめは桜島島内の発破点 S06 に近い G04 観測点を中心とする 6 観測点で構成されたさしわたし約 1 km のアレイ G04、2 つめは鹿児島湾北東部沿岸の L15 観測点を中心とする 7 観測点で構成されたさしわたし約 2 km のアレイ L15、3 つめは再び桜島島内の発破点 S07 付近の 5 観測点で構成されるさしわたし約 1 km のアレイ S07、4 つめは桜島北岸の反射法測線 15 観測点で構成されるさしわたし 0.4 km のアレイ N-end を用いた。4 つのアレイの拡大図を図 1.2-1-3 に示す。アレイ N-end は 4.5 Hz 上下動地震計で構成され、それ以外の 3 つのアレイは 2 Hz 上下動地震計で構成された。

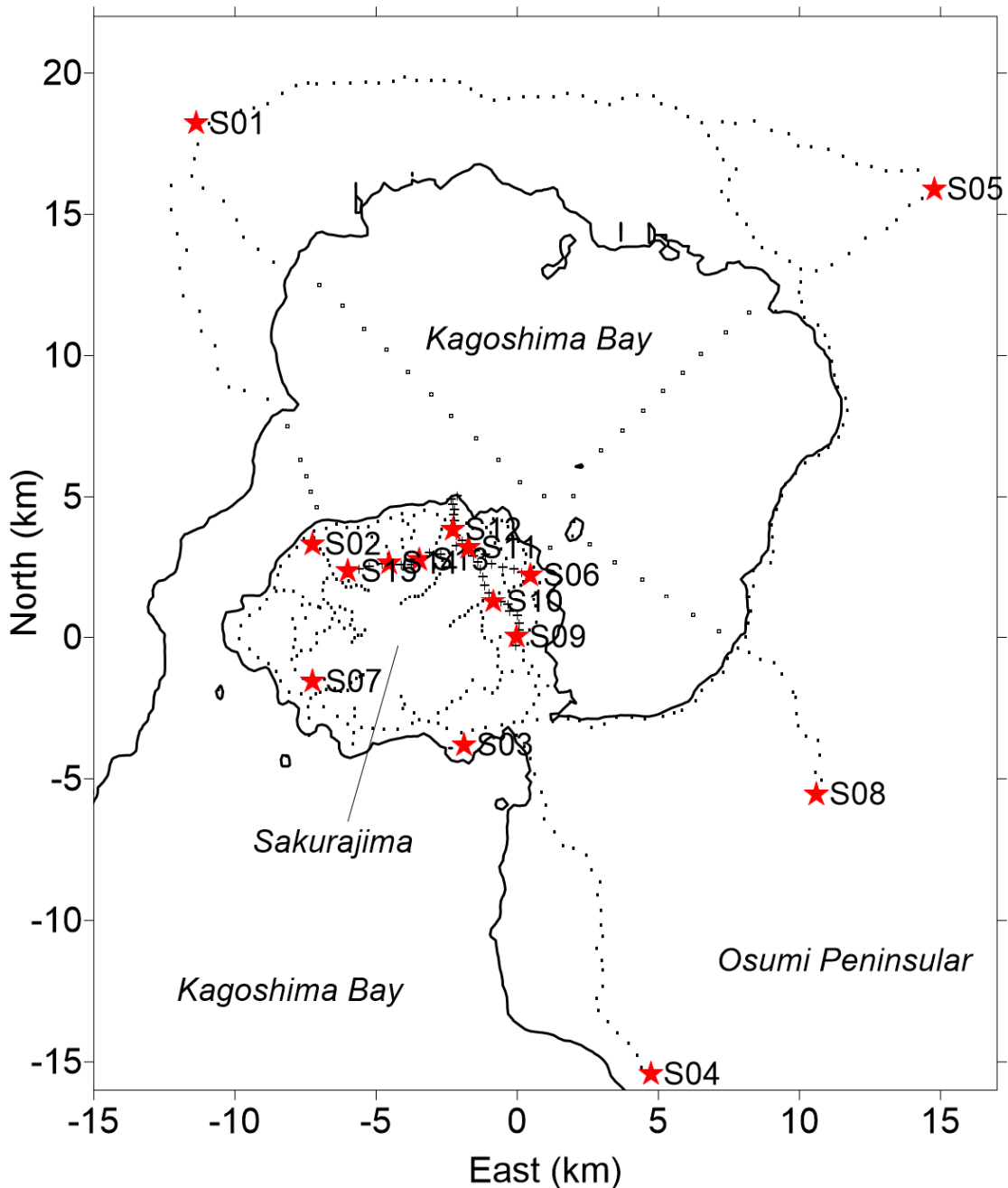


図 1.2-1-2 2008 年人工地震観測。赤い星印は発破点を示す。黒点は 2 Hz 地震計を用いた臨時観測点を示す。十字印は 4.5 Hz 地震計を用いた臨時観測点を表す。座標原点は京都大学黒神 GNSS 観測点（北緯 31 度 35 分 00.89879 秒， 東経 130 度 42 分 05.74741 秒）。

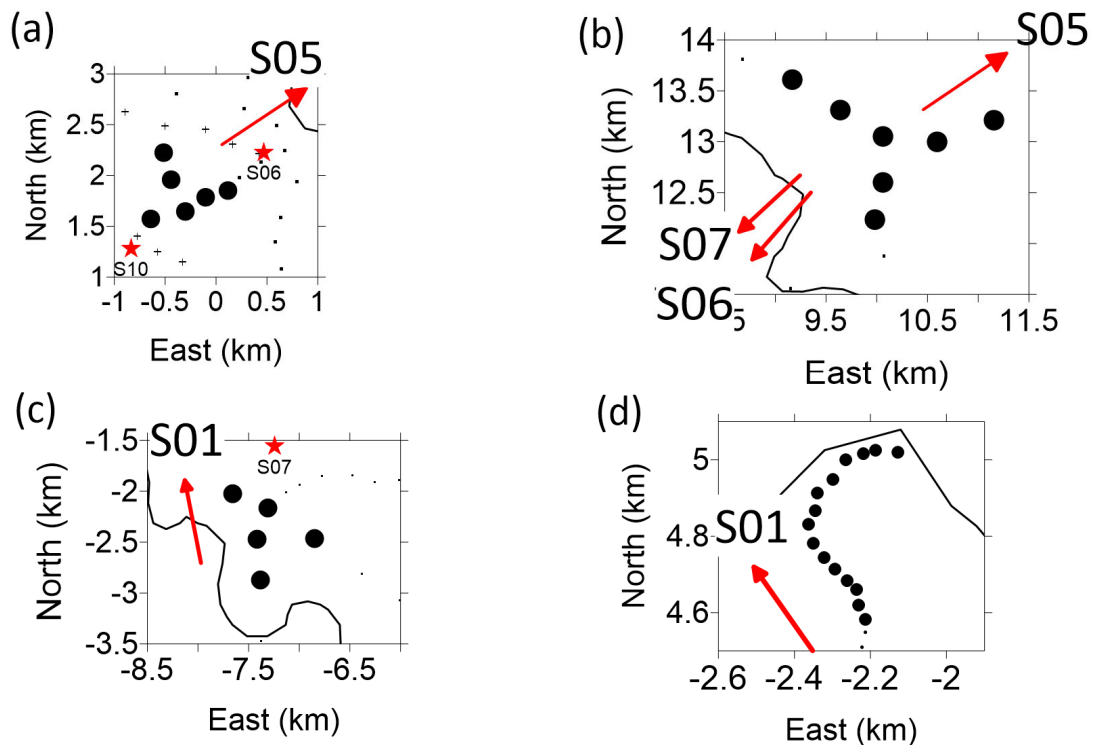


図 1.2-1-3 地震計アレイ 黒丸は地震計アレイを構成する観測点を表す。ドットは地震計アレイ以外の臨時観測点を表す。赤矢印は振源方向を示す。(a)アレイ G04、(b)アレイ L15、(c)アレイ S07、(d)アレイ N-end。

#### アレイ観測記録の解析法

アレイ観測記録の解析では、ある時間窓内の観測記録を構成する到来波成分を見かけ速度と到来方向に注目して分離する。見かけ速度と到来方向の分離を行うにあたっては、周波数領域で観測点間の相互スペクトルを評価する最尤法と、時間領域で直接観測点間の到来時刻差を評価するビームフォーミング法とがある。最尤法は常時微動のように定常的な波形を示す信号の解析に適している。一方、ビームフォーミング法は地震記録のような過渡的な波形を示す信号の解析に適している。ここではビームフォーミング法とそのビームフォーミングの結果の測度として Taner and Koehler (1969) のセンブランスを用いることにする。2次元地震計アレイのビームフォーミング結果の測度としてセンブランスを用いる方法の有用性は篠原他 (1990) が示した。

ビームフォーミング法の概念を示す。アレイの中心を通過する方向にのびる直線を与え、各観測点の位置を投影する。投影された観測点間の到来時刻差からその方向の見かけ速度を算出する。切り出された各観測点の記録に複数の到来波成分が含まれている場合には、肉眼による到来時刻のよみとりは不可能であるので観測記録の波形からセンブランス値を算出して到来時刻の差を評価する。

複数の観測記録に共通して含まれる波の成分の強度を示す尺度がセンブランスである。ある時間窓で切り出された  $N$ 本の波形記録  $x_i(t)$  に対して、すべての観測点に同時に到着する波形成分のセンブランス値は下の式で与えられる。

$$SEM = \frac{\sum_{j=1}^M \left( \sum_{i=1}^N A_i(t_j) \right)^2}{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N (A_j(t_j))^2} \quad (1)$$

センブランス値は0と1の間をとり、センブランス値が1に近いほど同時に到着する成分が強いことを表している。

このセンブランスに計算する時間窓の位置をある規則にそってずらしたものにすると、その規則に沿って並んだ波の成分の強さを表すことができる。

次にある方向に進む波の成分を抽出する場合を考える。以降の本稿ではスローネスベクトルを用いて波の到来方向（進行方向）と速度を表す。スローネスベクトルは直交する2成分のスローネスの組で表される。スローネスベクトルは波数ベクトル $\boldsymbol{\nu}$ （図 1.2-1-4）を周波数 $\omega$ で割り算したものである。

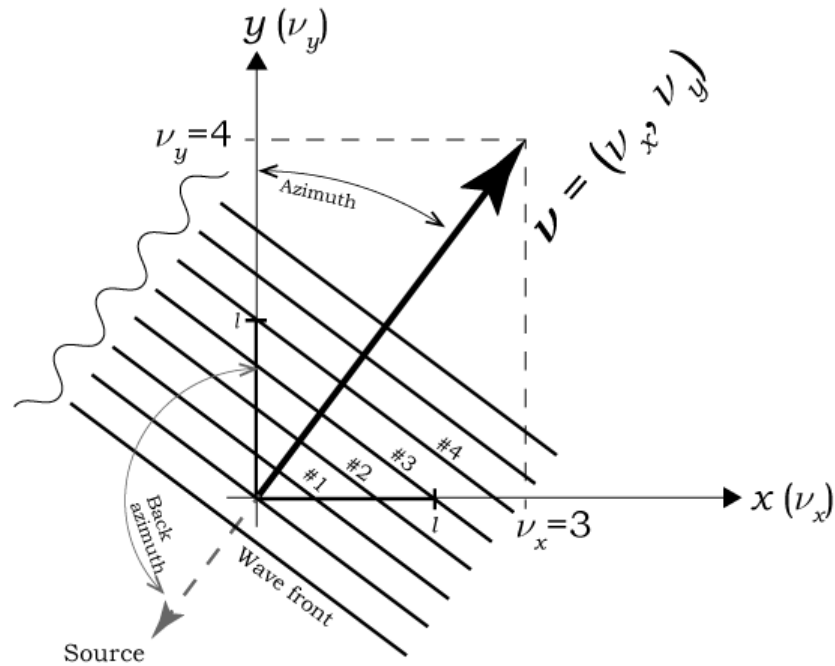


図 1.2-1-4 波数ベクトル $\boldsymbol{\nu}$ の概念。

波の到来方向とアレイの中心から各観測点の位置ベクトルを $\mathbf{x}_i$ とすると、スローネスベクトル $\mathbf{s}$ の波が入射したときアレイの中心に対する各観測点の到来時刻差 $\Delta t_i$ は下式で計算できる。

$$\Delta t_i = \mathbf{s} \cdot \mathbf{x}_i \quad (2)$$

この式を用いて観測点毎の時間窓の位置に時間差を与えた時に得られるセンブランス値は下式で与えられる。

$$SEM(\mathbf{s}) = \frac{\sum_{j=1}^M \left( \sum_{i=1}^N A_i(t_j - \mathbf{s} \cdot \mathbf{x}_i) \right)^2}{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \left( A_i(t_j - \mathbf{s} \cdot \mathbf{x}_i) \right)^2} \quad (3)$$

このようにすると与えられたスローネスペクトル  $\mathbf{s}$  の入射波の相対的な強度を表すことができる。

ある範囲のスローネスペクトルに対するセンブランスの値の分布を示した例を図 1.2-1-5 に示す。

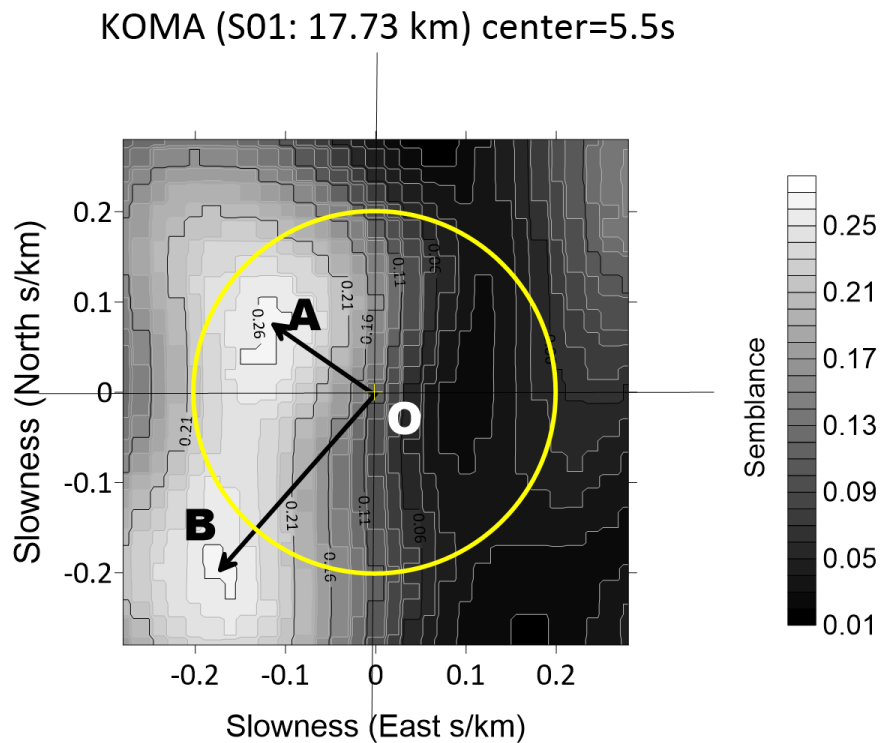


図 1.2-1-5 ある時間窓に対するビームフォーミング結果。センブランス値のピークは薄い色で表され、原点 0 からピークまでの距離はピークに対応する到来波のスローネスを示す。淡色（黄色）の円は 5km/s の見かけ速度を示している。北西からの到来波 A、南西からの到来波 B が現れている。

図 1.2-1-5 には北西からの到来波 A、南西からの到来波 B が現れている。到来波 A は 5km/s より速い見かけ速度を示しており、到来波 B は 5km/s より遅い見かけ速度を示している。

## 2008 年人工地震探査データの処理

### フィルタ処理

顕著な後続相は生記録でも確認することができる。しかし後続相の明瞭度を向上するために後続相が最も明瞭になるフィルタを検討する。以下図 1.2-1-6 に若尊測線の S05 観測記録を例に a) フィルタなし、b) 2 Hz LPF 処理後、c) 2 - 4.5 Hz バンドパスフィルタ処理後、d) 4.5 - 10 Hz バンドパスフィルタ処理後、e) 9 - 18 Hz バンドパスフィルタ処理後の波形記録を示す。それぞれの帯域のフィルタ処理の記録を比較した結果、6 秒から 7 秒台の後続相が明瞭に

見られる 2- 4.5 Hz のバンドパスフィルタ(図 1.2-1-6c)が最適であると判断された。以降の記録の検討ではこの 2- 4.5 Hz バンドパスフィルタ処理を行った記録を用いることにする。

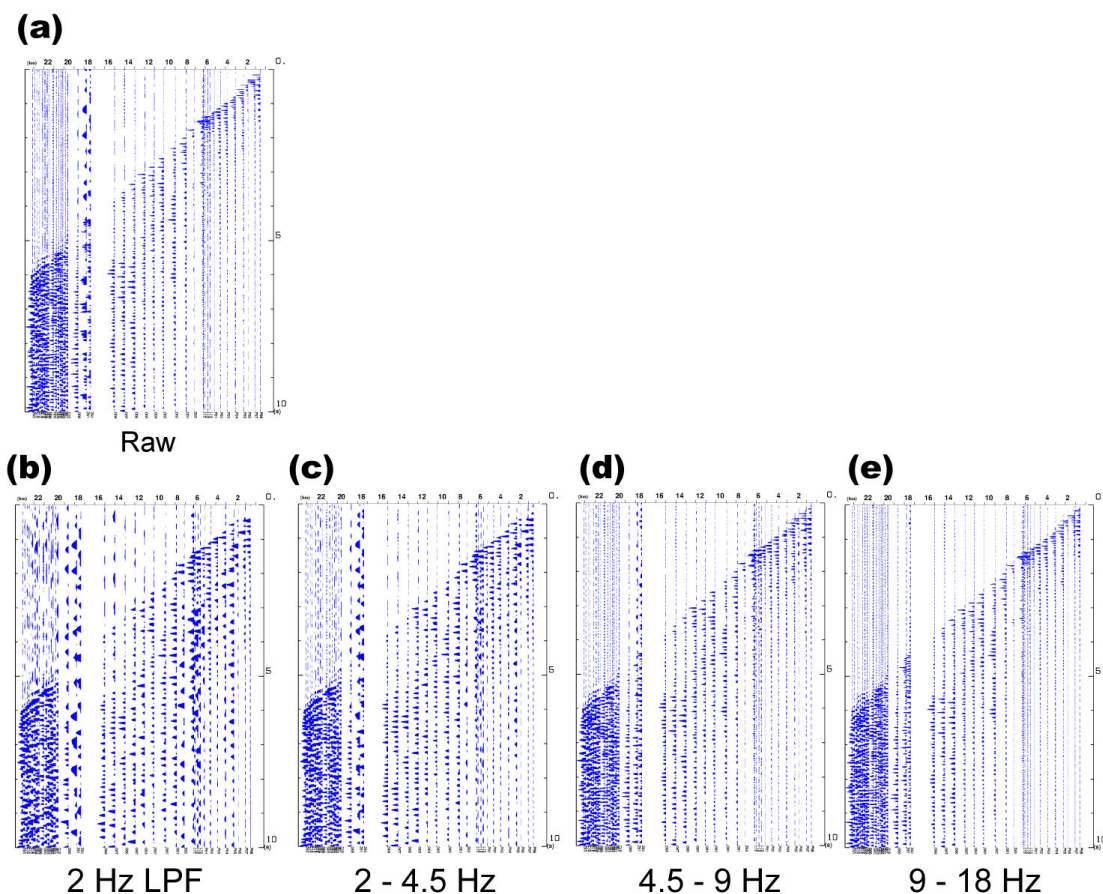


図 1.2-1-6 最適なフィルタ処理の選択。若尊測線の観測記録を示す。負極性部分を塗りつぶした表示である。a) フィルタなし、b) 2Hz LPF 処理結果、c) 2 - 4.5 Hz BPF 処理結果、d) 4.5 - 9 Hz BPF 処理結果、e) 9 -18 Hz BPF 処理結果をそれぞれ示す。

#### 伝播方向と見かけ速度の推定

後続相の見かけ速度と伝播方向の推定にはセンブランスによるビームフォーミングを用いた。センブランスの計算には 0.4 秒長の時間窓を用い、初動付近から 0.2 秒ステップで連続的に伝播方向と見かけ速度の推定を行った。推定結果はスローネス平面上に表示し、目安として 5 km/s に相当する見かけ速度の軌跡を重ねて表示した。以下では振源方向から入射する後続相について整理する。

#### アレイ G04 に入射する発破点 S05 からの地震波

アレイ G04 を含む若尊測線における発破 S05 の観測波形を図 2-1-7 に示す。正極性を塗りつぶして強調したもの(正極性強調)が図 1.2-1-7a、負極性を塗りつぶした負極性強調が図 1.2-1-7b に示される。G04 アレイは桜島北東部の震源距離 20.7km に位置している。アレイ G04 におけるセンブランスによるビームフォーミングの結果を図 1.2-1-8 に示す。図 1.2-1-8 では初動はほぼ発破点の方角から入射するが、時間の経過と共に発破点とは異なる方角から入射する成分が現れてくることを示している。始良カルデラはアレイ G04 からみて発破点 S05 の方角に位置する。発破点の方角以外から入射してくる波についての議論は稿をあらためて行うことにし

て、本稿では発破点方向から入射する成分に注目して整理を行うことにする。発破点方向（北東）から伝播してくる後続相を後述の解釈とともに Table 1.2-1-1 に整理する。桜島北東部に位置する G04 アレイに震源 S05 方向から伝播してくる到来相は A~G の 7 つが認められる。

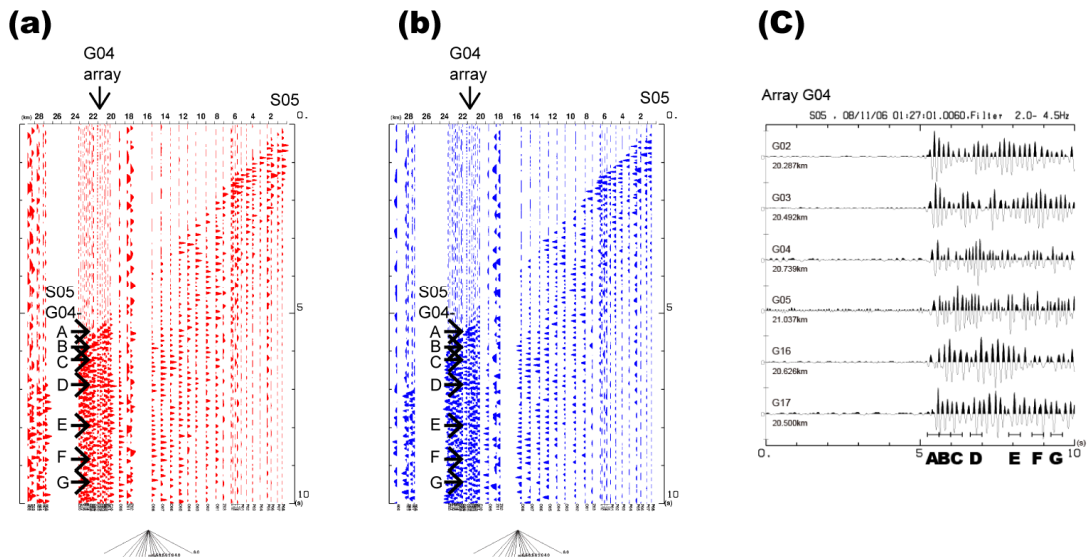


図 1.2-1-7 若尊測線北東端発破点 S05 のフィルタ処理済み観測記録。a) 正極性を塗りつぶした表示、b) 負極性を塗りつぶした表示。ラベル A-G はアレイ処理で抽出された後続相の到来時を示す。c) アレイ G04 内部の個々の地震観測記録。ラベル A-G は対応する名前の後続相が検出された時間窓位置を示す。

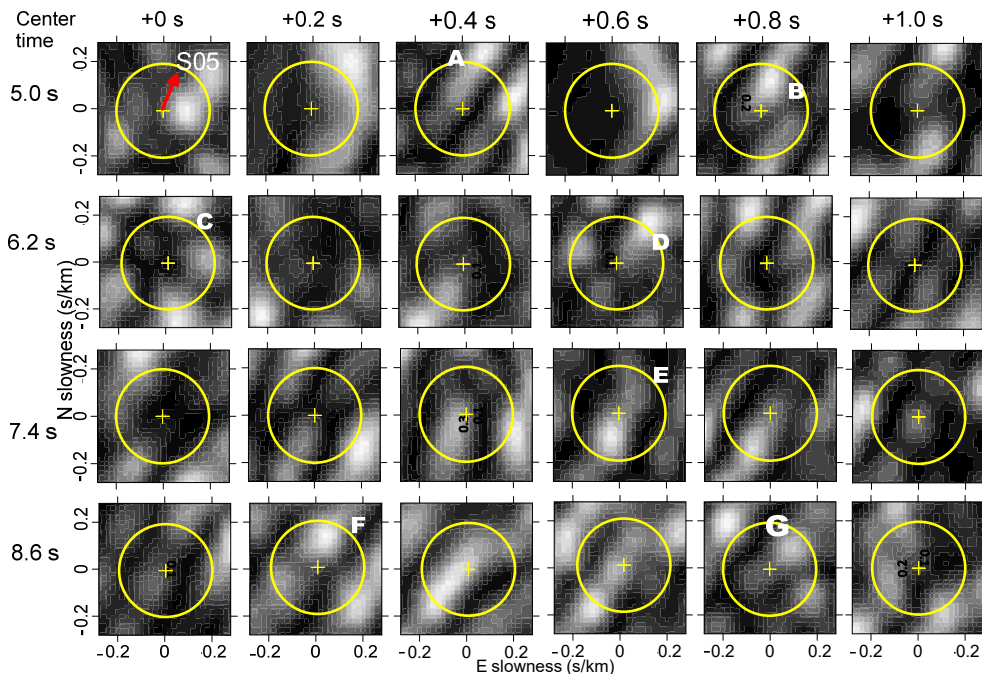


図 1.2-1-8 アレイ G04 における到来方向解析結果。0.2 秒の時間窓で計算されたそれぞれのスローネス平面上のセンブランス強度をグレースケールで示している。白色が最も大きなセンブランス値を示している。縦軸は北方向のスローネスを、横軸は東方向のスローネスを表している。黄色の十字がスローネス平面の原点を表し、黄色の円周は 5km/s の見かけ速度に対応する位置を示す。

表 1.2-1-1. 発破 S05 によって始良カルデラ方向からアレイ G04 に入射する後続波

Distance : 20.7 km

Code	Center time (s)	Apparent vel (km/s)	Polarity	Interpretation
S05G04-A	5.4	4.5	P	First arrival
S05G04-B	5.8	8.0	N	PP from 10 km depth
S05G04-C	6.2	3.9	P	PS from 6 km depth
S05G04-D	6.8	4.8	P	PS from 7 km depth
S05G04-E	8.0	9.7	N	PP from 18km depth
S05G04-F	8.8	6.8	P	PS from 12km depth
S05G04-G	9.4	7.5	P	PS from 14-15km depth

アレイ L15 に入射する発破点 S06 からの地震波

アレイ L15 を含む若尊測線上の S06 の観測記録を図 1.2-1-9 に示す。正極性強調、負極性強調の表示方法は 図 1.2-1-7 と同じである。アレイ L15 は震源距離 14.5km に位置する。アレイ L15 におけるセンブランスによるビームフォーミングの結果を図 1.2-1-10 に示す。始良カルデラ北東岸に位置するアレイ L15 でも時間の経過につれて後続相が様々な方向からやってくる傾向が示されている。これらの後続相のうち、S06 方向（南西）から伝播してくる後続相を後述の解釈と共に表 1.2-1-2 に整理する。鹿児島湾北東岸に位置するアレイ L15 に発破点方向から伝播してくる到来相は初動以外に A~E の 5 つが認められる。

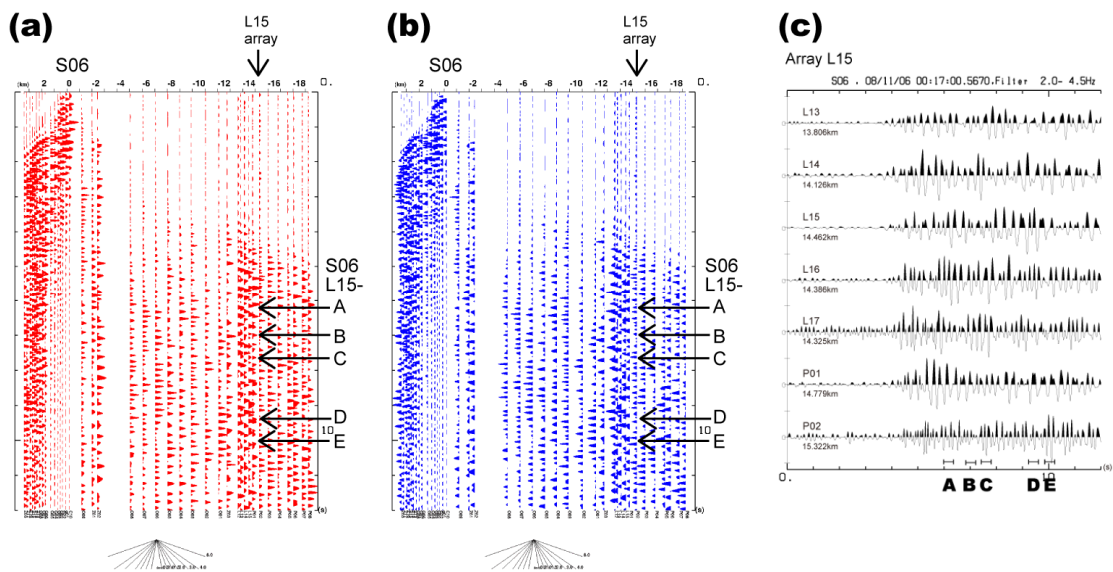


図 1.2-1-9 若尊測線南西端発破 S06 のフィルタ処理済み観測記録。a) 正極性を塗りつぶした表示、b) 負極性を塗りつぶした表示。アレイ解析で得られた始良カルデラから入射する後続波を S06L15-A から -E として示す。c) アレイ内部における観測記録。A~E は始良カルデラ方向から入射する後続波が観測された時間窓を示す。

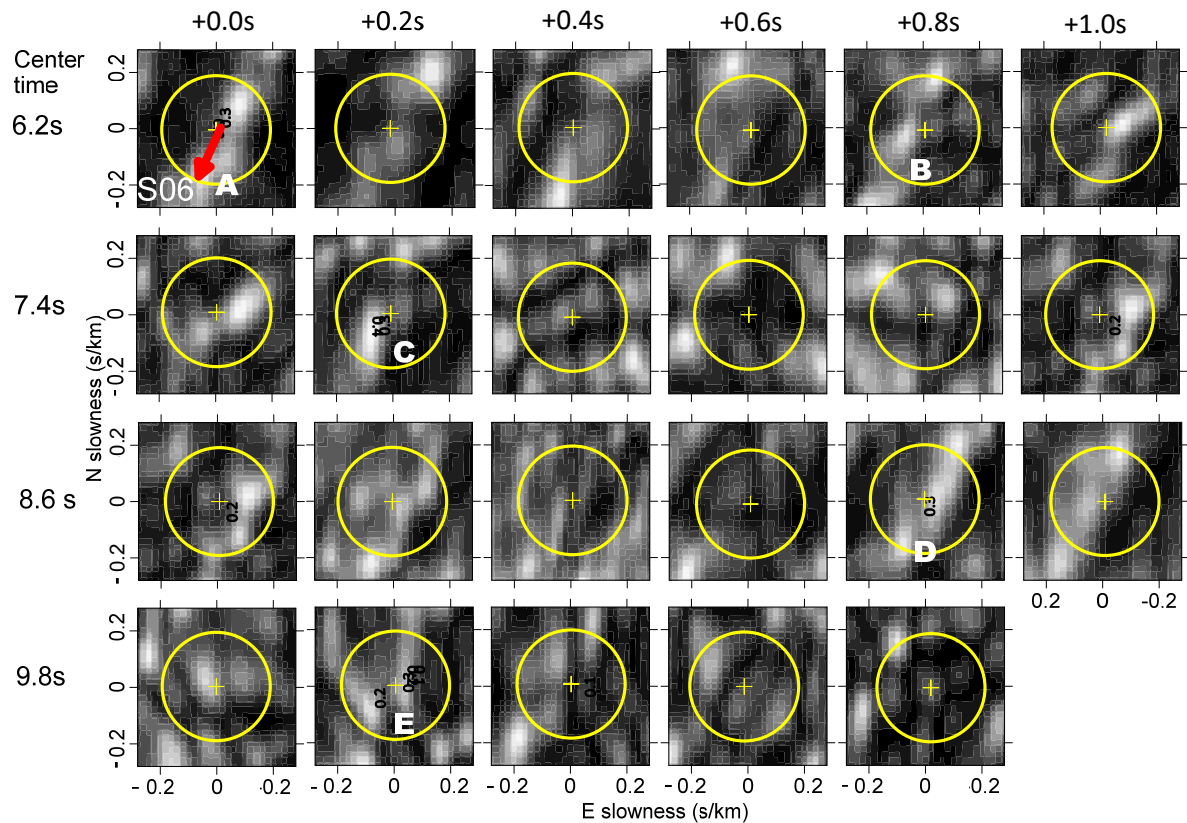


図 1.2-1-10 発破 S06 に対するアレイ L15 における到来方向解析結果。0.2 秒の時間窓で計算されたそれぞれのスローネス平面上のセンブランス強度をグレースケールで示している。白色が最も大きなセンブランス値を示している。縦軸は北方向のスローネスを、横軸は東方向のスローネスを表している。黄色の十字がスローネス平面の原点を表し、黄色の円周は 5km/s の見かけ速度に対応する位置を示す。

表 1.2-1-2 アレイ L15 における発破 S06 に対する始良カルデラ方向からの入射波

Distance: 14.5 km, Apparent inclination: 114.7/1000

Code	Center time (s)	Apparent vel. (km/s)	Polarity	Interpretation
S06L15-A	6.2	5.7	N	PS from 9 km depth
S06L15-B	7.0	13.8	N	PP from 17 km depth
S06L15-C	7.6	11.6	N	PP from 19 km depth
S06L15-D	9.4	5.3	N	S?
S06L15-E	10.0	8.7	P	PS from 18 km depth

#### アレイ S07 に入射する発破点 S01 からの地震波

アレイ S07 を含む始良 A 測線における発破 S01 の観測記録を図 1.2-1-11 に示す。アレイ S07 は桜島南西部の震源距離 21km に位置する。アレイ S07 におけるセンブランスによるビームフォーミングの結果を図 1.2-1-12 に示す。図 1.2-1-12 でも初動到来から時間が経過するにつれて発破点以外の方向から波の到来があることが示されている。アレイ S07 では発破点 S01 の方向に始良カルデラが位置する。これまでと同様に発破点の方角（北北西）から伝播してくる後続相を後述の解釈と共に表 1.2-1-3 に整理する。桜島南西部に位置するアレイ S07 に発破点方向から伝播してくる到来相は初動以外に A~F の 6 つが認められる。発破点の方角から西に約 130 度の方角から入射してくる波、東に約 90 度の方角（火口方向）から入射してくる波などが認め



られるが、これらに関しては稿をあらためて議論することにしてここではこれ以上ふれないことにする。

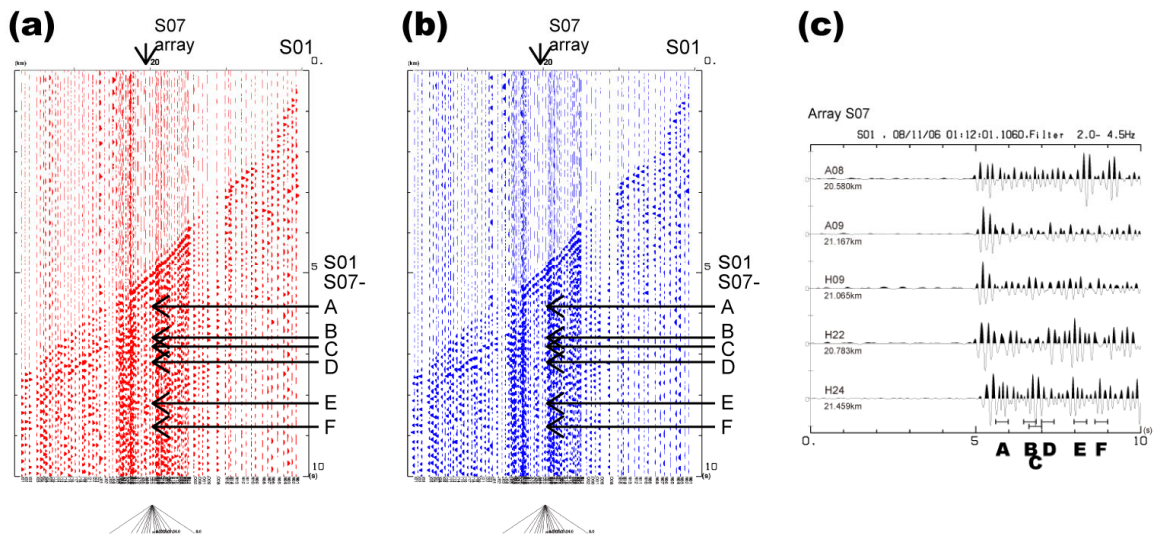


図 1.2-1-11 始良 A 測線における発破 S01 のフィルタ処理済み観測記録。 a) 正極性を塗りつぶした表示、b) 負極性を塗りつぶした表示。アレイ解析で抽出された始良カルデラ方向からの入射波を S01S07-A から -F として示す。 c) アレイ S07 における観測記録。A~F は始良カルデラからの入射波が観測された時間窓を示す。

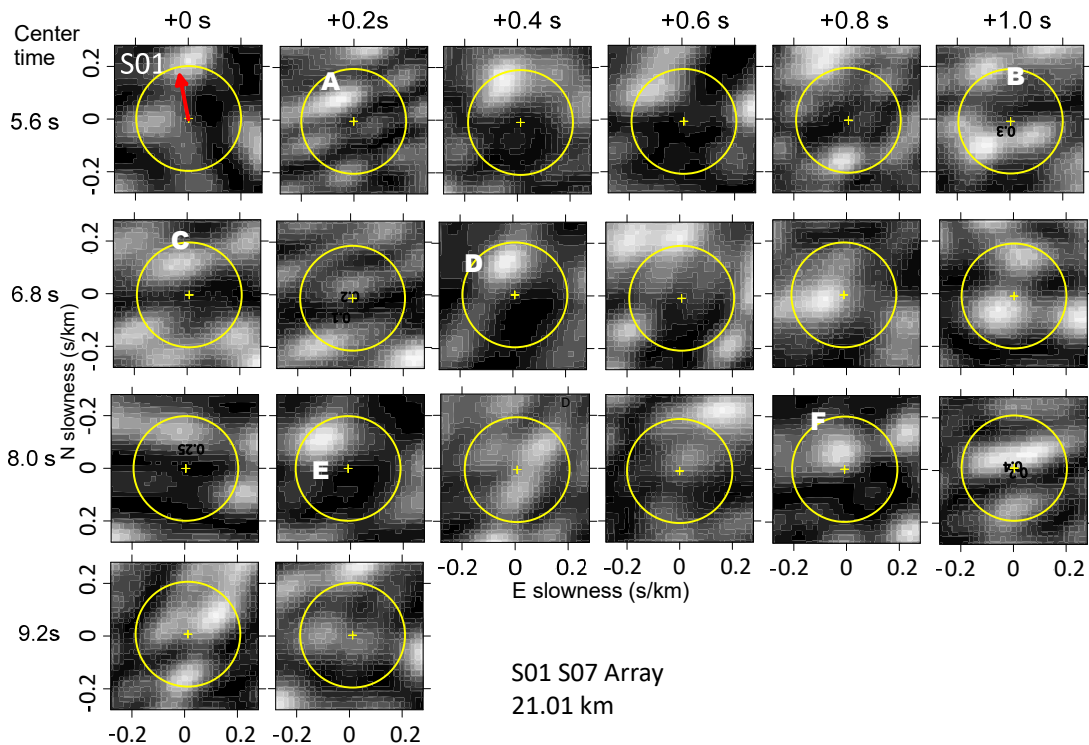


図 1.2-1-12 発破 S01 に対するアレイ S07 における到来方向解析結果。 0.2 秒の時間窓で計算されたそれぞれのスローネス平面のセンブランス強度をグレースケールで示している。白色が最も大きなセンブランス値を示している。縦軸は北方向のスローネスを、横軸は東方向のスローネスを表している。黄色の十字がスローネス平面の原点を表し、黄色の円周は 5km/s の見かけ速度に対応する位置を示す。

表 1.2-1-3 アレイ S07 における発破 S01 に対する始良カルデラ方向からの入射波。

Distance 21.0km, Apparent inclination: 2.9/1000.

Code	Center time (s)	Apparent Vel. (km/s)	Polarity	Interpretation
S01S07-A	5.8	10.4	N	PP from 10 km
S01S07-B	6.6	4.5	P	PS from 5 km
S01S07-C	6.8	8.0	N	PP from 14 km
S01S07-D	7.2	8.4	N?	PP from 16 km
S01S07-E	8.2	P?	PS from 11 km	
S01S07-F	8.8	13.5	N	PP from 21 km

アレイ N-end に入射する発破点 S01 からの後続波

桜島北岸に位置する反射法測線 (図 1.2-1-2 +印) の一部も群列観測の解析が可能である。始良 B 測線の観測記録を 図 1.2-1-13 に示す。アレイ N-end は桜島北岸の震源距離 16.2 km に位置する。アレイ N-end におけるセンブランスによるビームフォーミングの結果を図 1.2-1-14 に示す。アレイ N-end から見て発破点方向に始良カルデラが位置する。発破点方向 (北西) から伝播してくる後続相を後述の解釈と共に表 2-1-4 に整理する。アレイ N-end では初動から 0.8 秒後に発破点とは直角の方角 (火口方向) から到来する波が顕著に認められるが、これについても稿をあらためて議論することにしてここではこれ以上ふれないことにする。

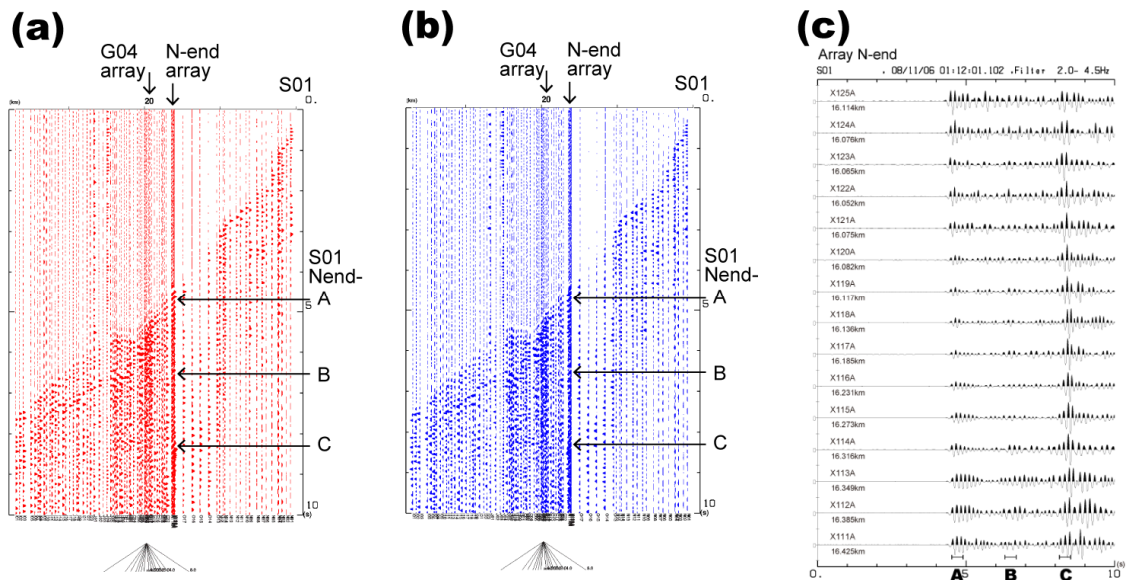


図 1.2-1-13 始良 B 測線における発破 S01 のフィルタ済み観測記録。 a) 正極性を塗りつぶした表示、b) 負極性を塗りつぶした表示。アレイ解析で検出された後続相を S01Nend-A から -C として示す。 c) アレイ N-end における観測記録。始良カルデラから到来する後続相が検出された時間窓を A ~ C で示す。

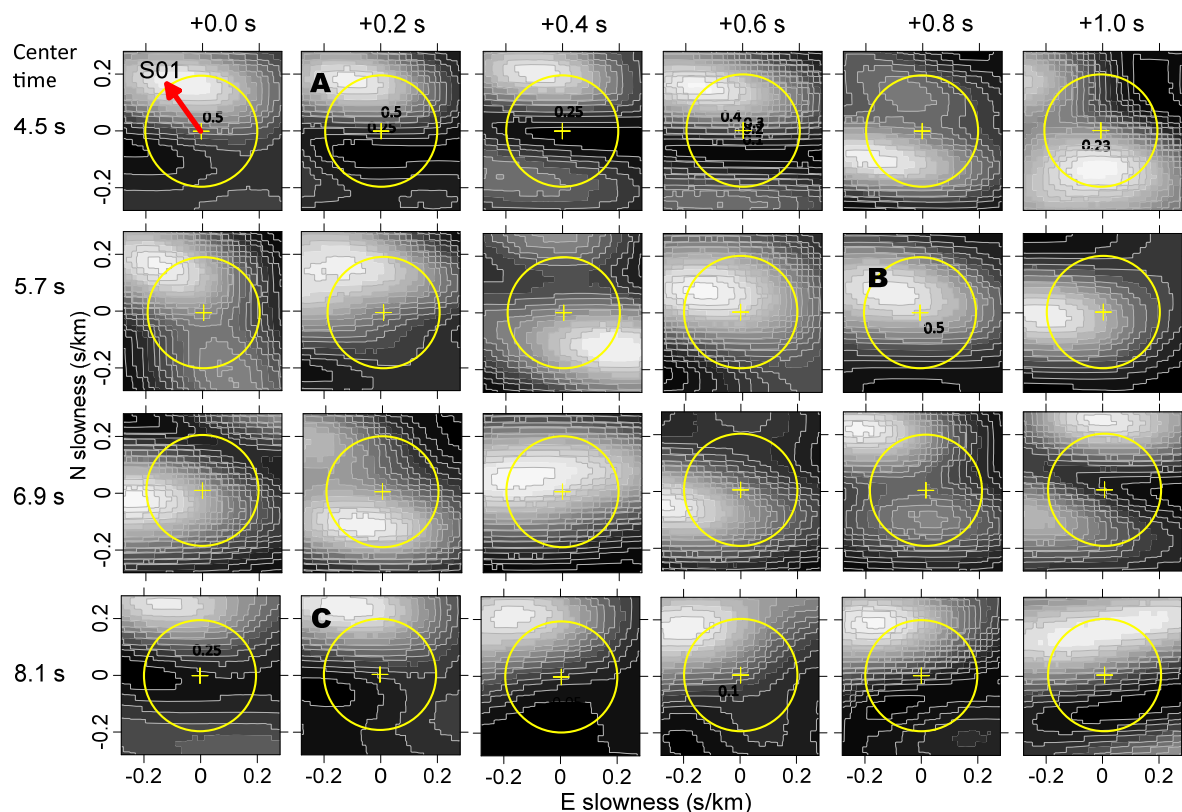


図 1.2-1-14 アレイ N-end における発破 S01 に対する到来方向解析結果。0.2 秒の時間窓で計算されたそれぞれのスローネス平面上的センブランス強度をグレースケールで示している。白色が最も大きなセンブランス値を示している。縦軸は北方向のスローネスを、横軸は東方向のスローネスを表している。黄色の十字がスローネス平面の原点を表し、黄色の円周は 5km/s の見かけ速度に対応する位置を示す。

表 1.2-1-4 アレイ N-end における発破 S01 に対する始良カルデラ方向からの入射波。

Distance 16.2 km, Apparent inclination: 69.8/1000

Code	Center time (s)	Apparent Vel. (km/s)	Polarity	Interpretation
Nend-A	4.7	4.82	P	First arrival
Nend-B	6.5	8.44	N	PP from 15 km depth
Nend-C	8.3	3.64	P	PS from 13.6 km depth

#### 後続相の波の種類と同定とその発生源深度の推定

群列観測で得られた到来波の見かけ速度から到来波を構成する波の種類とその発生源を推定する。本研究に用いた観測波形は上下動成分のみなので、振動様式による波の種類が判別できない。推定を行うにあたり、速度構造モデルを与えて得られた理論走時とそこから得られる見かけ速度を用いる。

本稿で用いた観測記録はダイナマイト発振による人工地震波によるもので、観測記録が主に P 波から構成されるという仮定の下で構造解析に用いられてきた。もし観測記録が上向きにやってくる P 波だけで構成されているのであれば、ある地域における地震波の到来は走時が遅くなるにつれて見かけ速度が大きくなるはずである。しかし、先述の群列観測解析結果からは、遅い到来であっても見かけ速度が比較的遅いものが散見される。このことから観測記録には PP

反射ばかりでなく PS 変換反射も含まれていることがうかがわれるので、解釈にあたり PS 変換波についても検討の対象にする。

### 構造モデル

本稿で用いた構造モデルを図 2-1-15 に示す。鹿児島湾およびその周辺における地震波速度構造モデルは Ono et al. (1978) を皮切りとして、本稿と同じ井口他(2009)のデータを用いた Miyamachi et al. (2013) 等があるが、井口他(2009)の波形記録による初動到来時刻読み取り値を用いて、独自に決定した地震波速度構造モデルを用いることにした。

鹿児島湾北東岸から桜島に至る速度構造を簡略化したものを若尊測線の代表的な構造とし、鹿児島湾北西岸から桜島に至る速度構造を簡略化したものを始良 A, B 測線の代表的な構造として用いることにする。図 1. 2-1-15 のモデルは陸上に配置された群列観測点で得られた反射波／変換反射波の走時を説明することを目的としている。群列観測点で検出された反射波／変換反射波は鹿児島湾海底下の浅部構造を通過しないので、鹿児島湾海底部の観測初動走時の説明までは追求しないことにする。発破点周囲の  $z < 5\text{km}$  の深さまでは 2008 年観測の発破点を中心として半径 5km 以内の初動走時を説明できる速度を与えた。図 2-1-15a に示される始良測線では、 $x < 5\text{km}$  は薩摩半島側の発破 S01 による観測走時を根拠に、 $15 < x < 25\text{km}$  は桜島側の発破(S06)による観測走時を根拠にした。 $5 < x < 15\text{km}$  は S01 側と S06 側とを滑らかに接続する構造とした。図 2-1-15b に示される若尊測線では、 $x < 10\text{km}$  は桜島側の発破 (S06) による観測走時を根拠に、 $20 < x < 25\text{km}$  は大隅半島側の発破(S05) による観測走時を根拠にした。 $10 < x < 20\text{km}$  は両者を滑らかに接続する構造とした。

両者とも井口他(2009)の初動到来の観測時刻を用いるだけでは 4 km 以深の地震波速度を決めることが出来ないので、 $z > 5\text{km}$  の深さの速度は Ono et al. (1978) や安藤ほか(2002)、Saiga et al. (2010)、Alanis et al. (2012) を参照して与えた。また、理論走時の計算には Cerveny and Psencik(1988)の波線追跡法を用いた。

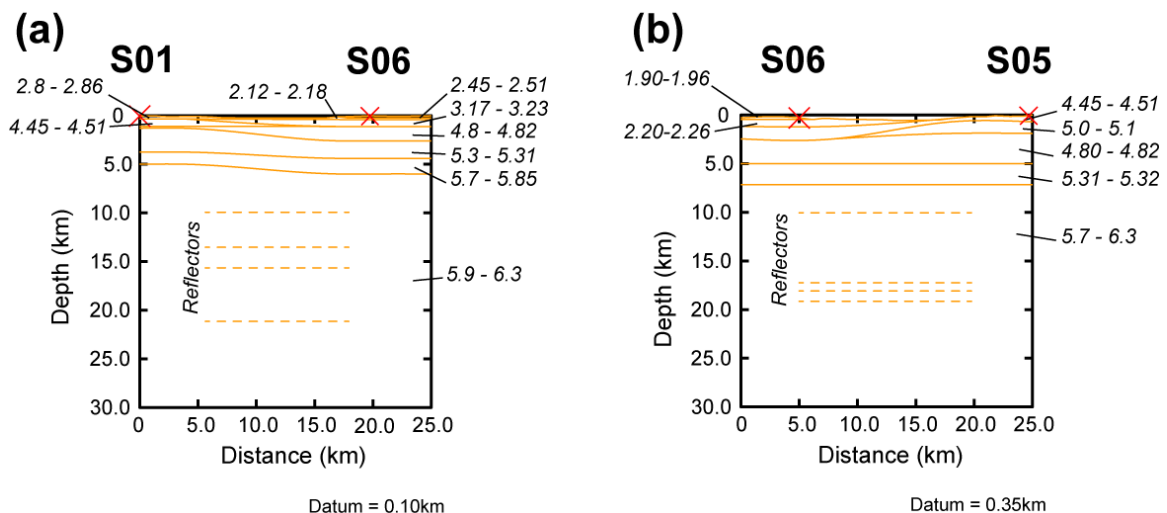


図 1. 2-1-15 速度構造モデル。(a) 始良測線(S01-S06)、(b) 若尊測線(S05-S06)。斜体数字は境界面間の P 波速度 (km/s) を示す。

図 1. 2-1-15a と図 1. 2-1-15b の構造はショットポイント S06 で交差するが、地表付近の構造の解釈が異なっている。これは S06 近傍で得られた到来走時を各測線で独立に解釈を行ったた

めに生じた差異である。S06 近傍の表層構造の差異はいずれも相対的に薄い層であるので、本稿で取り扱う反射波の走時には大きく影響しない。

包括的構造モデルの構築は井口他(2009)の観測波形記録の初動到来時刻を根拠に行った。若尊測線においては図 1.2-1-16a はモデルの浅部構造が S06 近傍の観測初動走時を説明できることを示している。図 1.2-1-16b は S05 近傍の観測初動走時を説明出来ることを示している。始良測線においては図 1.2-1-17a, b がそれぞれの発破点の観測初動走時を説明出来ることを示している。

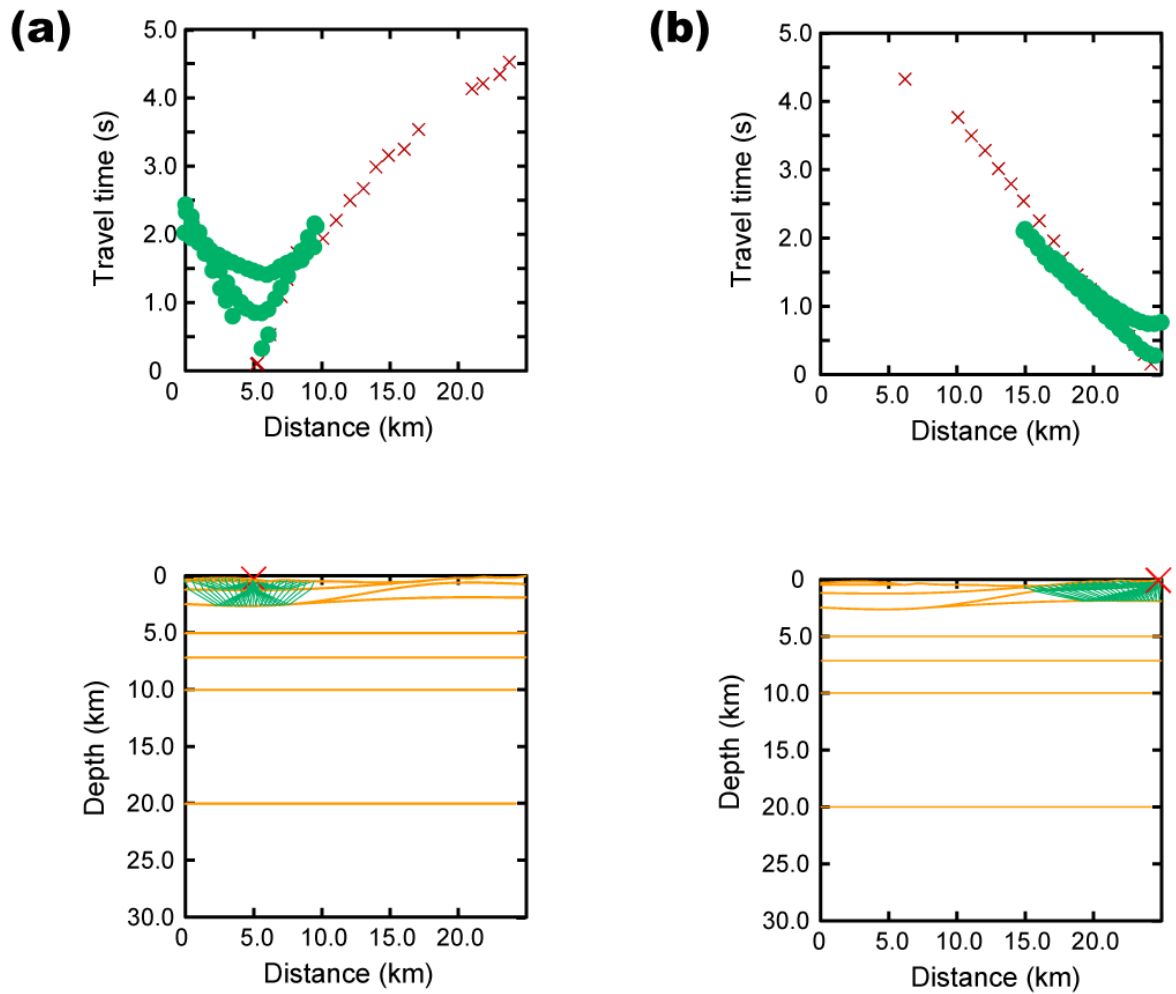


図 1.2-1-16 若尊測線のモデルにおける理論走時と観測走時。

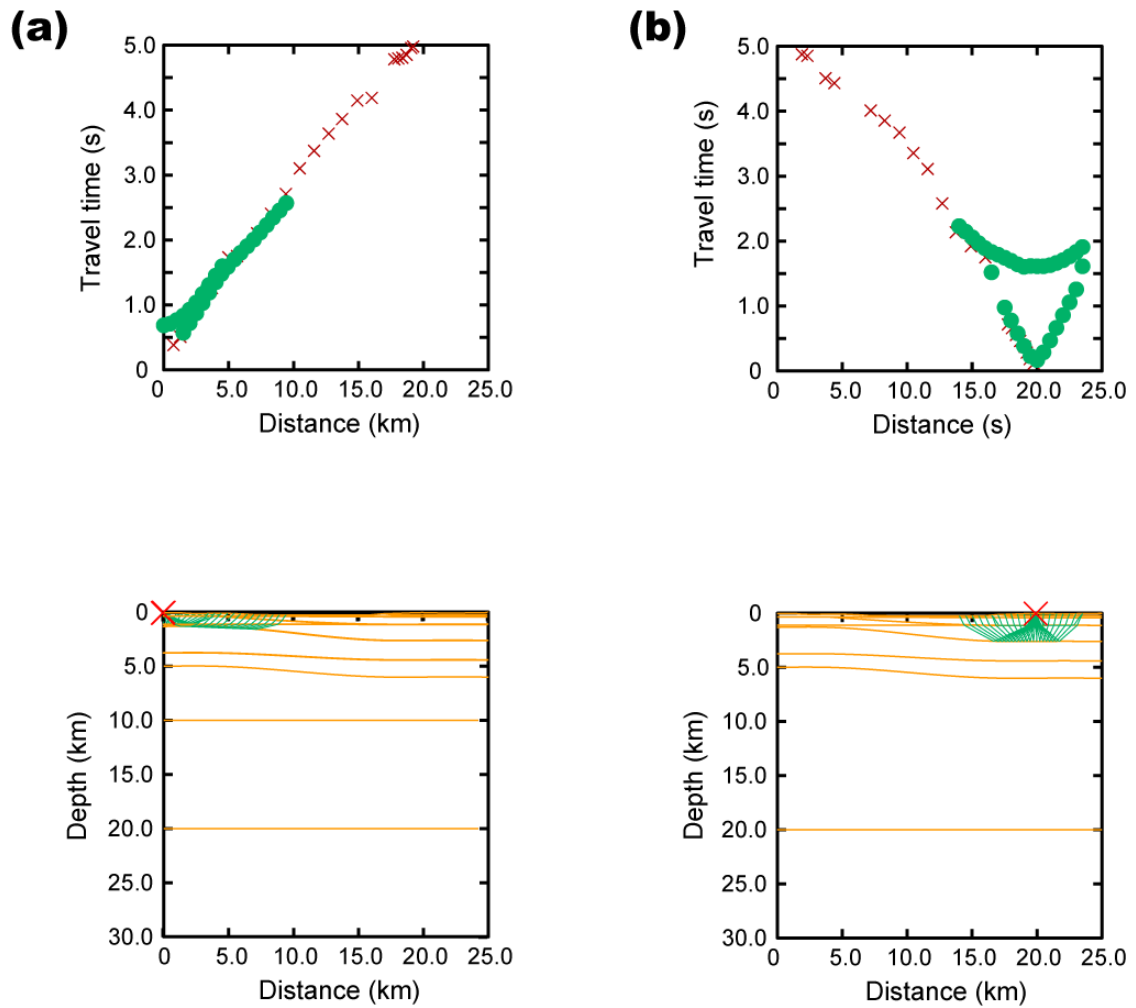


図 1.2-1-17 始良測線のモデルにおける理論走時と観測走時。

#### 若尊測線 S05

若尊測線の下における異なる深さからの反射波に対するアレイ G04（震源距離 20.7km）における理論走時曲線を図 1.2-1-18a に示す。図には PP 反射波の走時と PS 変換反射波の走時とが示されている。図 1.2-1-18b には対応する反射波の見かけ速度を示す。

図 1.2-1-18a では、深さ 16~18 km からやってくる PP 反射波とそれよりも浅い 8~11 km の深さで発生した PS 変換波との走時が一致する。しかしいずれも PP 反射波の方が大きな見かけ速度を示している。両者の見かけ速度の異なることに注目すると PP 反射波と PS 変換反射波の区別が可能である。

図 1.2-1-18b を参照して表 1.2-1-1 の到来相を検討すると、後続相 S05G04-B は 10km 深からの PP 反射に、後続相 S05G04-F は 18km 深からの PP 反射にそれぞれ対比される。それ以外の S05G04-A, C, D, G, H は、見かけ速度が相当する理論走時の PP 反射のそれより小さいことから、より浅い場所で発生した PS 変換反射波と解釈した。到来時と見かけ速度を根拠にして同定した結果を表 1.2-1-1 の最右欄に表示した。

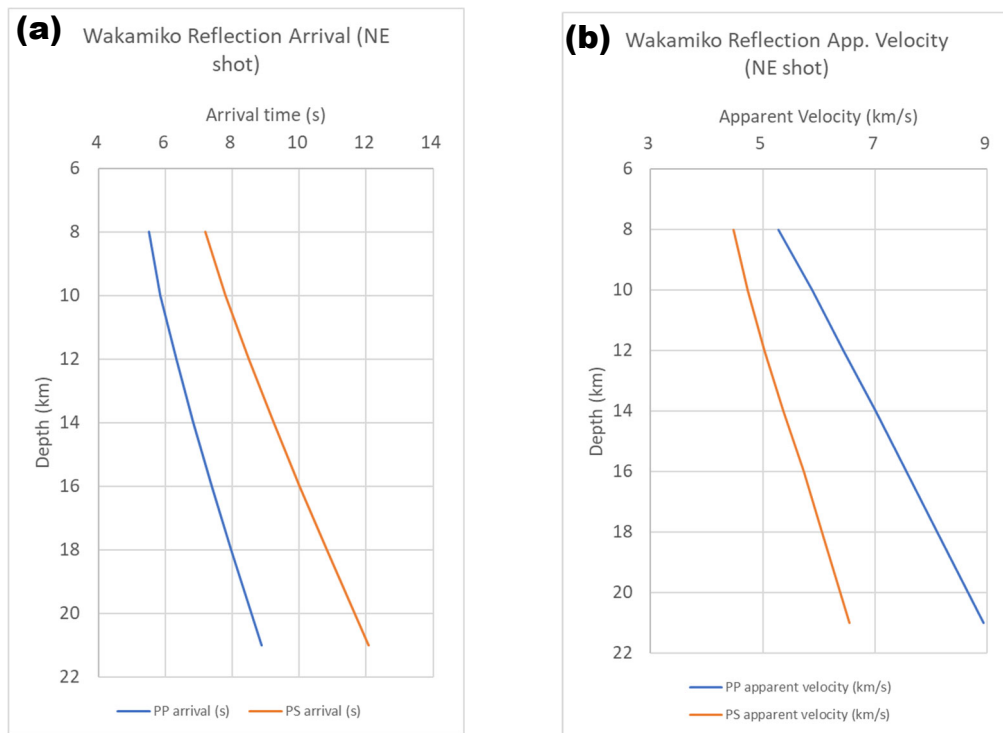


図 1.2-1-18 (a) アレイ G04 における各深さからの反射波および変換反射波の理論走時, (b) アレイ G04 における各深さからの反射波および変換反射波の理論見かけ速度.

#### 若尊測線 S06

S06 は若尊測線上で S05 と対極の位置にある発破である。若尊測線の発破 S06 からアレイ L15 における異なる深度の反射面からの理論走時曲線を図 1.2-1-19a に示す。この部分に相当する理論走時から求めた見かけ速度を図 1.2-1-19b に示す。図 1.2-1-19b を参照して表 1.2-1-2 の到来相を検討すると、到来相 S06L15-A は深さ 9km で発生した PS 変換反射波、S06L15-B は深さ 17km で発生した PP 反射波、S06L15-C は深さ 19km で発生した PP 反射波に対比される。S06L15-D, S06L15-E は該当する走時の PP 反射波より小さな見かけ速度を示すので、PS 反射波である可能性が指摘される。



図 1.2-1-19 (a) アレイ L15 における各深さからの反射波および変換反射波の理論走時, (b) アレイ L15 における各深さからの 反射波および変換反射波の理論見かけ速度。

#### 始良 A 測線 S01

始良 A 測線のアレイ S07 が位置する震源距離 21km 付近を中心とする理論走時曲線を図 1.2-1-20a に示す。この部分に相当する理論走時から求めた見かけ速度を図 1.2-1-20b に示す。図 1.2-1-20b を参照して表 2-1-3 の到来相を検討すると、S01S07-A は深さ 10km からの PP 反射、S01S07-B は深さ 5km からの PS 変換反射波、S01S07-C は深さ 14km からの PP 反射波に対比される。S01S07-D は該当する走時の PP 反射波より見かけ速度が遅く、PS 変換反射波より見かけ速度が速いことから S07 に向かって深くなる面からの PP 反射波か、あるいは S07 に向かって浅くなる面からの PS 変換反射波のいずれか 2つの可能性が考えられる。S01S07-E は PS 変換反射波、S01S07-F は深さ 21km からの PP 反射波に対比される。

また、始良 A 測線で観測される後続相の見かけ速度は水平構造モデルから予測されるそれよりも大きい値を示す傾向が認められることから、アレイ S07 に向かって浅くなるような傾斜をもつ可能性が指摘される。



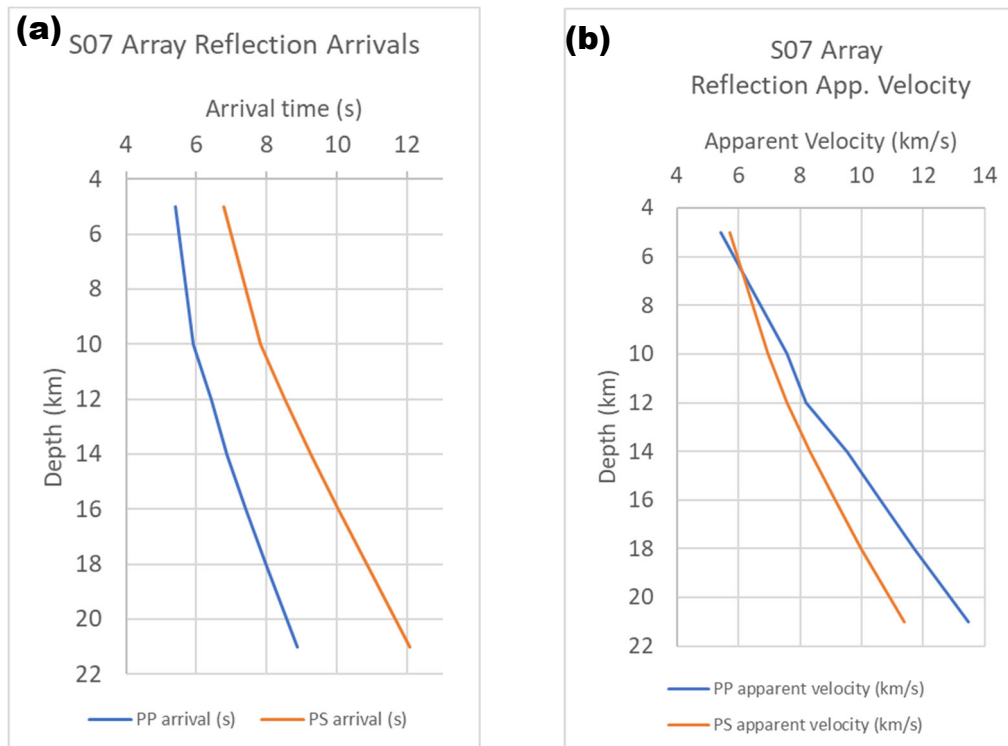


図 1.2-1-20 (a) アレイ S07 における反射波および変換反射波の理論走時, (b) 反射波および変換反射波の理論見かけ速度。

#### 始良 B 測線 S01

始良 B 測線上のアレイ N-end が位置する震源距離 16.2 km における異なる深さからの反射波到来時刻と見かけ速度を図 1.2-1-21 に示す。S01Nend-B は負極性から始まることと到来時および見かけ速度から、深さ 15km における PP 反射で、観測記録の極性から負のコントラストを示すと解釈される。S01Nend-C は正極性から始まるが、走時の点で深さ 13.6 km からの PS 変換反射波の理論走時と一致する。しかし観測された見かけ速度は 3.64km/s を示し、図 1.2-1-21 に示される理論的な見かけ速度 6.05 km/s より小さい。これはアレイを構成する観測点の標高が南に向かって高くなることにともない、標高補正值が南ほど大きな値をとることで説明できる。

図 1.2-1-22a にはアレイ構成点の標高分布、図 1.2-1-22b には理論走時に標高補正值を加えた相対走時をアレイ中心から S01 方向への見かけ距離でプロットした。標高補正值の算出には、P 波表層構造のモデリングから得られた筒井他(2011)の静補正速度 1.14 km/s から  $V_p/V_s$  比 1.73 として算出した速度 0.658 km/s を用いた。図 1.2-1-22b からはこれらの理論走時が 0.2717 s/km、すなわち 3.68 km/s の見かけ速度になることが示され、観測されたみかけ速度が標高補正值の分布で説明出来る。

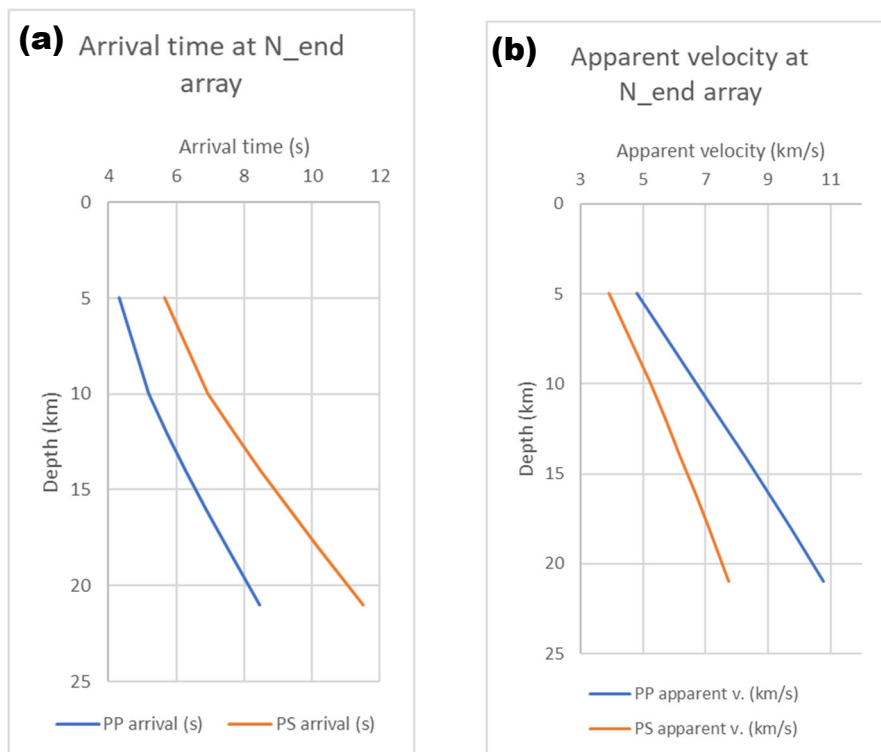


図 1.2-1-21 (a) アレイ N-end における反射波および変換反射波の理論走時, (b) 反射波および変換反射波の理論見かけ速度。

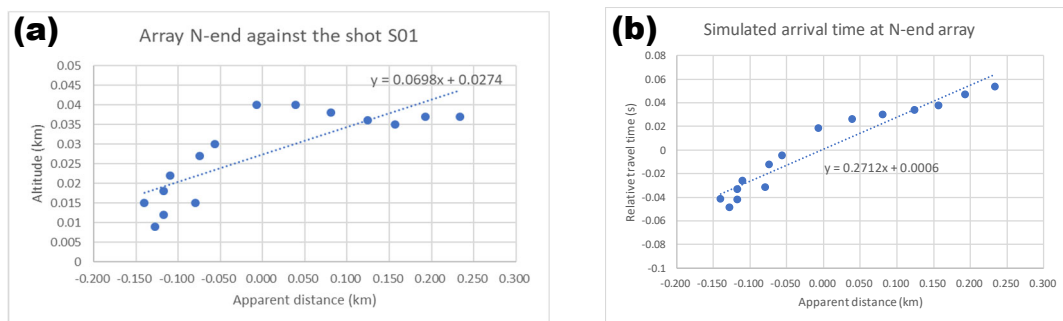


図 1.2-1-22 a) アレイ N-end における観測点標高分布, b) アレイ N-end における理論相対到来時刻分布。

### 個々の後続相の極性

アレイ観測で得られたそれぞれの後続相で卓越する極性を図 1.2-1-7、1.2-1-9、1.2-1-11、1.2-1-13 の該当する走時の波形で確認し、確認結果を表 1.2-1-1 - 1.2-1-4 の中欄にまとめた。P は上方向の、N は下方向の地動であることを示す。これによれば PP 反射と解釈される到来相はいずれも N が優勢である。一方、PS 変換反射と解釈される到来相は P が優勢である。このことから始良カルデラ直下の地殻内で発生した PP 反射はいずれも入射波と逆の極性であることから、負のインピーダンスコントラストの存在を反映していると考えられ、これらはそれぞれの深さのマグマ溜まりの上面を示している可能性が高い。

後続相発生域の広がり

アレイ観測で得られた後続相のうちアレイ周辺の観測点の記録でも確認できるものについて、検出範囲と推定される発生源の範囲を整理した。整理の対象とした後続相は S01S07-A, S01Nend-C, S05G04-B, S05G04-D, S05G04-E, S05G04-G の 6 つである。

ねらった後続相の確認を容易にするために、以降ではアレイの震源距離を基準としたレデュース走時で波形を示すことにする。ここで用いるレデュース走時  $T$  は観測点の震源距離  $x$ 、基準距離  $x_0$ 、生走時を  $t$  として以下の式で計算される。

$$T = t - \frac{(x - x_0)}{v_r} \quad (1.4)$$

ここに  $v_r$  をレデュース速度とする。

アレイ中心の震源距離を基準距離  $x_0$  としたレデュース走時で波形を表示することで、アレイで検出された到来時刻のまわりに特定の見かけ速度をもつ到来相を整理させることができる。なお、基準距離を 0 km としたレデュース走時による波形表示は従来から地殻構造探査データの整理の際に用いられているものと同じである。

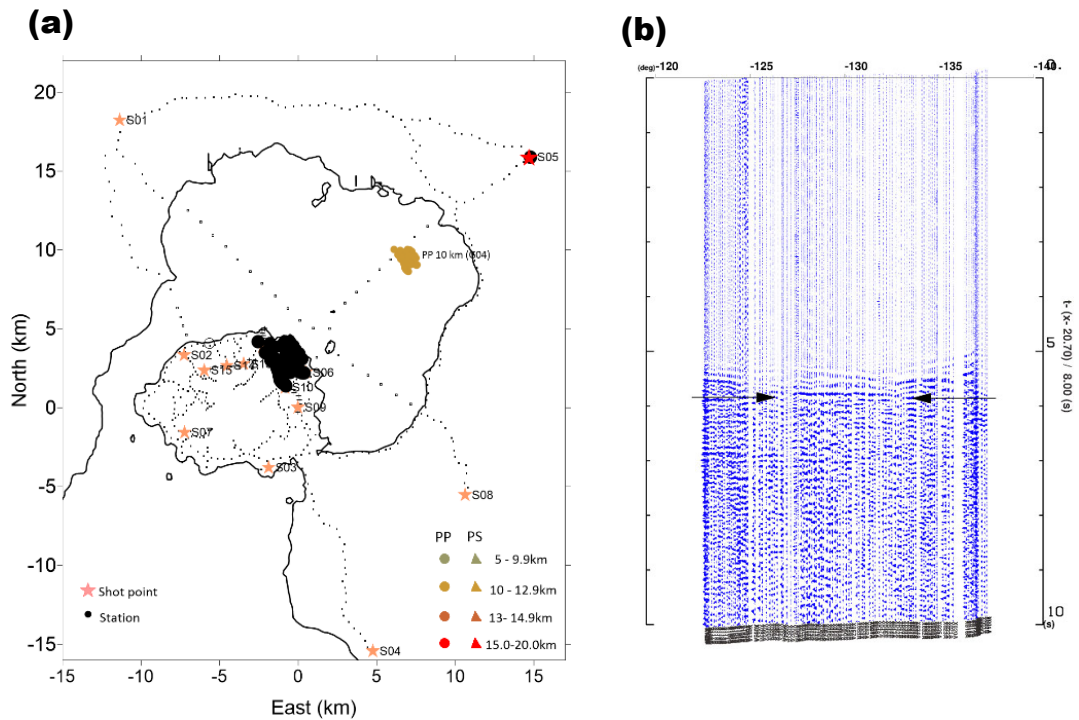


図 1.2-1-23 (a) S05G04-B が出現する観測点分布と対応する反射点の分布。大きい黒丸は観測点を、小さい金丸記号は反射点を示す。(b) レデュース走時でプロットした桜島北東部における観測記録。基準距離 20.7km でレデュース速度 8.0 km/s を用いた。矢印で S05G04-B 相の出現部分を示す。横軸は発破点からみた観測点の方位を北から時計回りを正方向として測った角度で示す。記録は負極性を塗りつぶす表示を採用した。

S05G04-B

アレイ G04 の外で S05G04-B と同様な走時および見かけ速度の到来相が出現する。これらを S05G04-B 相と同一のものとして取り扱うことにする。S05G04-B 相が現れる観測点の分布を図 2-1-23a に示し、桜島北東部の反復反射法南北測線における観測記録の例を図 1.2-1-23b に示す。

図 1.2-1-23a が示すように S05G04-B 相の出現する観測点は主に桜島北東部である。図 1.2-1-23a に推定された反射点の位置を小さい丸で示す。先述のように S05G04-B 相は深さ 10 km における PP 反射波であるので、反射点の水平位置は振源と観測点の midpoint である。S05G04-B 相の反射点はいわゆる若尊カルデラの下に相当する。

#### S05G04-D

S05G04-D 相も同様な到来走時および見かけ速度を示す後続相がアレイの外で現れている。S05G04-D 相が観測される観測点の分布を図 1.2-1-24a に、桜島北部から北東部で観測された記録の例を図 1.2-1-24b に示す。これらを S05G04-D 相として取り扱う。

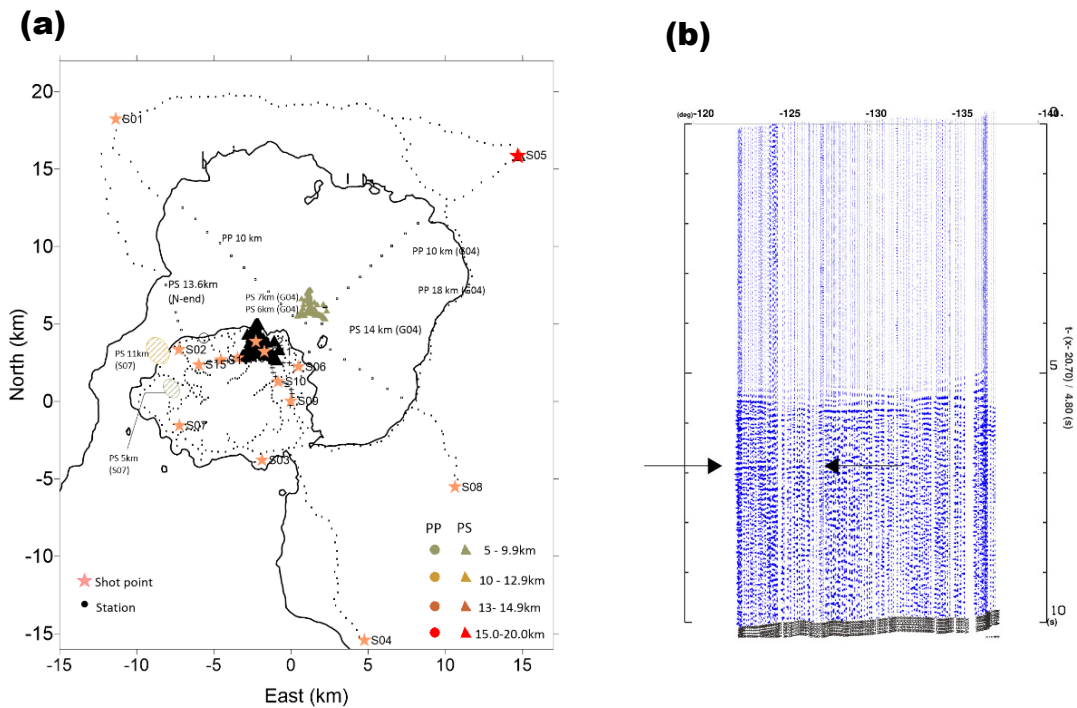


図 1.2-1-24 (a) S05G04-D が出現する観測点分布と対応する変換反射点の分布。大きい黒三角は観測点を、小さいカーキ色三角記号は変換反射点を示す。(b) レデュース走時でプロットした桜島北東部における観測記録。基準距離 20.7 km でレデュース速度 4.8 km/s を用いた。矢印で S05G04-D 相の出現部分を示す。横軸は発破点からみた観測点の方位を北から時計回りを正方向として測った角度で示す。記録は負極性を塗りつぶす表示を採用した。

図 1.2-1-24a に示されるように S05G04-D 相に相当する到来相が現れる観測点も桜島北東部に分布する。しかし PP 反射波である S05G04-B 相のそれに比べて分布域は狭い傾向がある。先述のように S05G04-D 相は深さ 7 km における PS 変換反射波であるので、変換反射点は振源と受振点の midpoint より受振点寄りの位置に推定される(図 1.2-1-24a)。推定された変換反射点は桜島の北東沖のいわゆる安永諸島付近の地下に分布する。

### S05G04-E

S05G04-E 相も相当する到来相がアレイの外でも観測される。 S05G04-E 相が現れる観測点の分布を図 1.2-1-25a に、桜島北東部の反復反射法地震探査南北測線における観測記録の例を図 1.2-1-25b に示す。 これらを S05G04-E と同一のものとして扱うことにする。

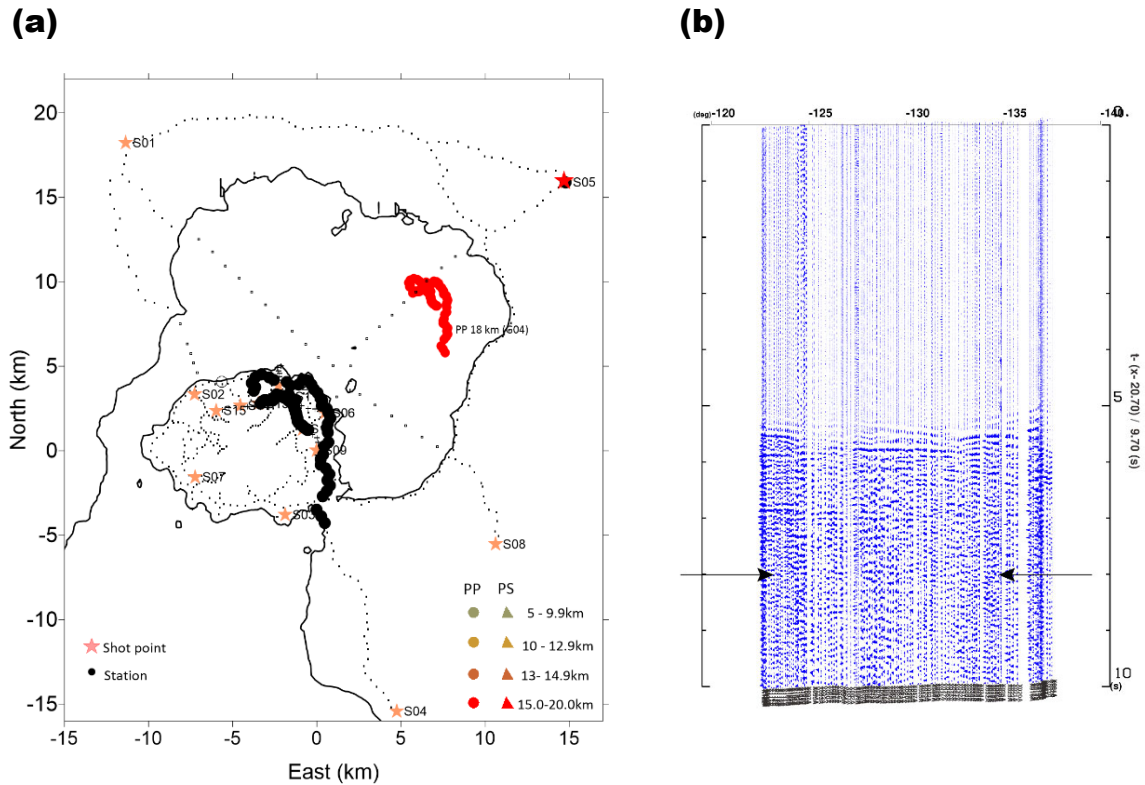


図 1.2-1-25 (a) S05G04-E が出現する観測点分布と対応する反射点の分布。大きい黒丸は観測点を、小さい金丸記号は反射点を示す。(b) レデュース走時でプロットした桜島北東部における観測記録。基準距離 20.7km でレデュース速度 9.7 km/s を用いた。矢印で S05G04-E 相の出現部分を示す。横軸は発破点からみた観測点の方位を北から時計回りを正方向として測った角度で示す。記録は負極性を塗りつぶす表示を採用した。

S05G04-E 相は桜島北岸から東岸にかけて出現し、出現域の全体にわたって突出した振幅の極大を示さない。先述のように S05G04-E 相は深さ 18 km からの PP 反射波であるので、反射点は S05G04-B 相のそれと同様に振源と受振点の midpoint に求められる。その位置は若尊カルデラの下に推定された。

### S05G04-G

S05G04-G 相も相当する後続相がアレイの外でも現れている。 S05G04-G 相の現れる観測点の分布を図 1.2-1-26a に、桜島北部の反復反射法東西測線における記録の例を 図 1.2-1-26b に示す。 これらを S05G04-G 相と同一のものとして取り扱うことにする。

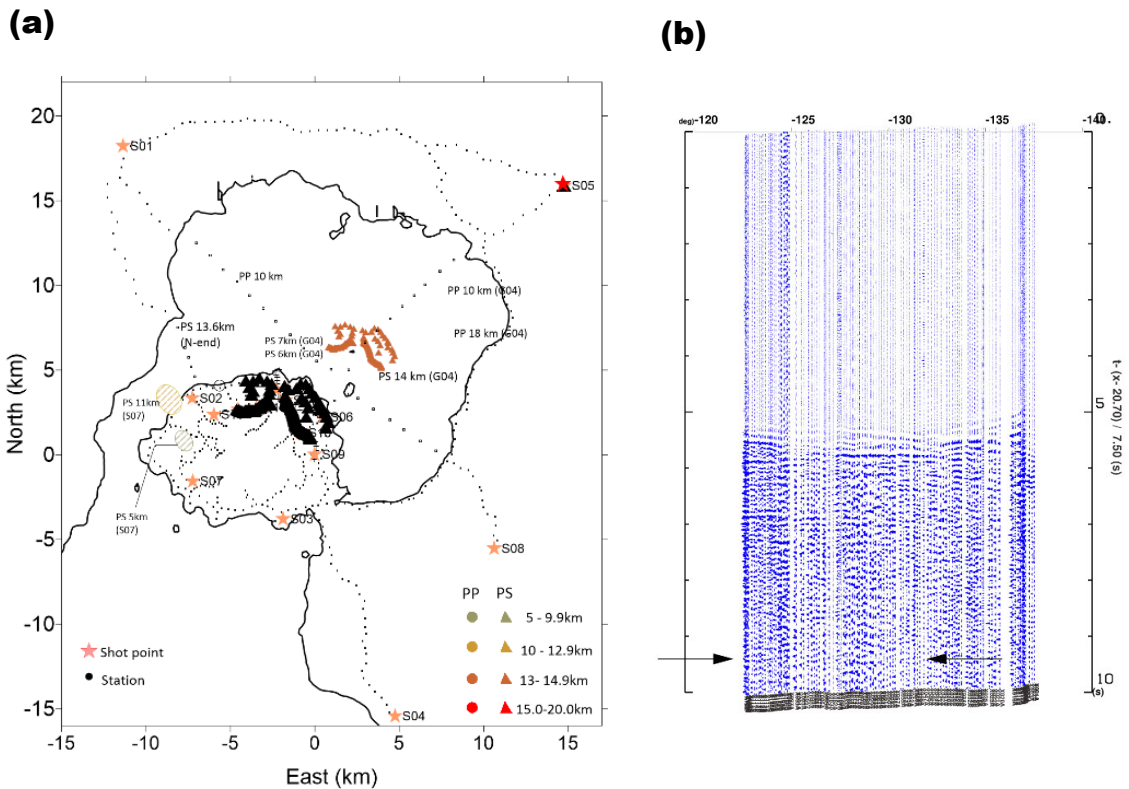


図 1.2-1-26 (a) S05G04-G が出現する観測点分布と対応する変換反射点の分布。大きい黒三角は観測点を、小さいカーキ色三角記号は変換反射点を示す。(b) レデュース走時でプロットした桜島北東部における観測記録。基準距離 20.7km でレデュース速度 7.8 km/s を用いた。矢印で S05G04-G 相の出現部分を示す。横軸は発破点からみた観測点の方位を北から時計回りを正方向として測った角度で示す。記録は負極性を塗りつぶす表示を採用した。

S05G04-G 相は桜島北岸から北東岸にかけて現れる傾向が認められる。先述のように S05G04-G 相は深さ 14km における PS 変換反射波であるので、その変換反射点は振源受振点間の中点より受振点寄りに求められ、S05G04-D 相よりも北東側に位置する(図 1.2-1-26a)。

#### S06L15-A

S06L15-A 相と同じ走時でかつ同じ見かけ速度をもつ後続相がアレイの外でも得られている。これらの後続相を S06L15-A 相と同一のものとして扱うことにする。S06L15-A 相が現れている観測点の分布を 図 1.2-1-27a に示し、鹿児島湾東岸で観測された記録の例を 図 1.2-1-27b に示す。

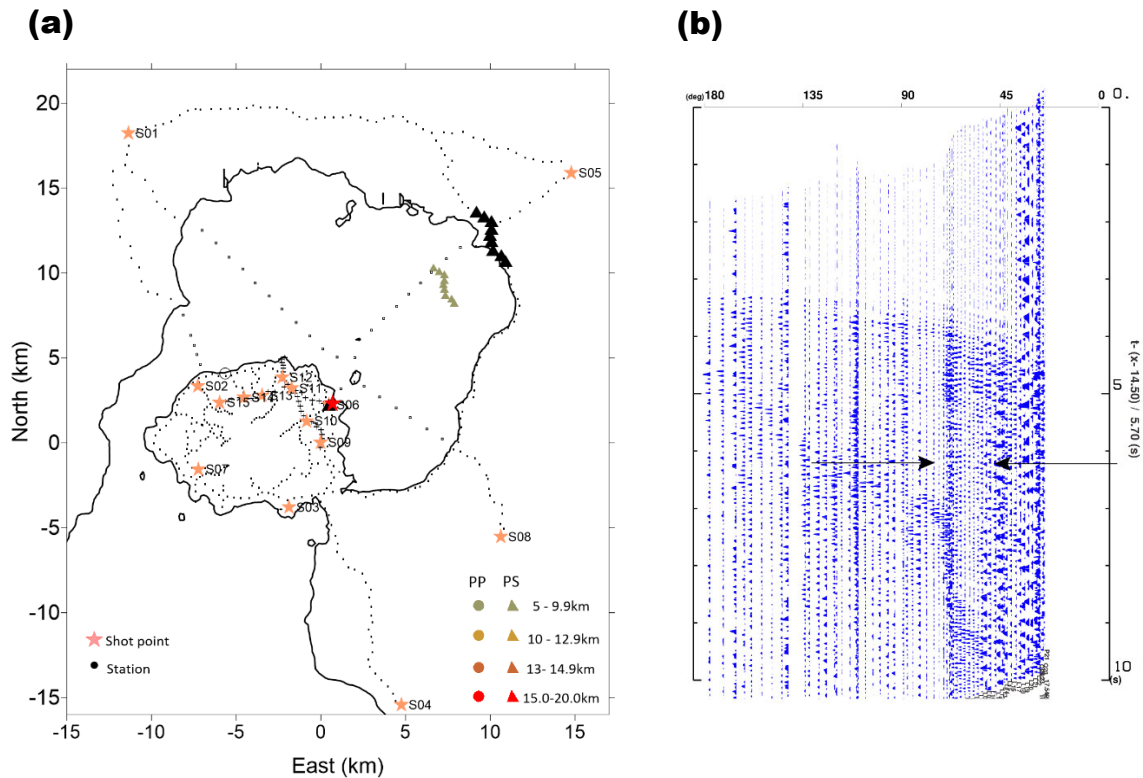


図 1.2-1-27 (a) S06L15-A が出現する観測点分布と対応する反射点の分布。大きい黒丸は観測点を、小さいカーキ色丸記号は反射点を示す。(b) レデュース走時でプロットした鹿児島湾東岸における観測記録。基準距離 14.5 km でレデュース速度 5.7 km/s を用いた。矢印で S06L15-A 相の出現部分を示す。横軸は発破点からみた観測点の方位を北から時計回りを正方向として測った角度で示す。記録は負極性を塗りつぶす表示を採用した。

S06L15-A 相はアレイ L15 の周囲の狭い範囲に限定的に現れている。先述のように S06L15-A 相は深さ 9 km における PS 変換反射波であるので、フォワードモデリングにより変換点は振源距離の midpoint より受振点側に推定される。その位置は若尊カルデラの下である(図 1.2-1-27a)。

#### S06L15-B

S06L15-B 相と同じ走時でかつ同じ見かけ速度をもつ後続相がアレイの外でも得られている。これらの後続相を S06L15-B 相と同一のものとして扱うことにする。S06L15-B 相が現れている観測点の分布を 図 1.2-1-28 a に示し、鹿児島湾東岸で観測された記録の例を 図 1.2-1-28b に示す。

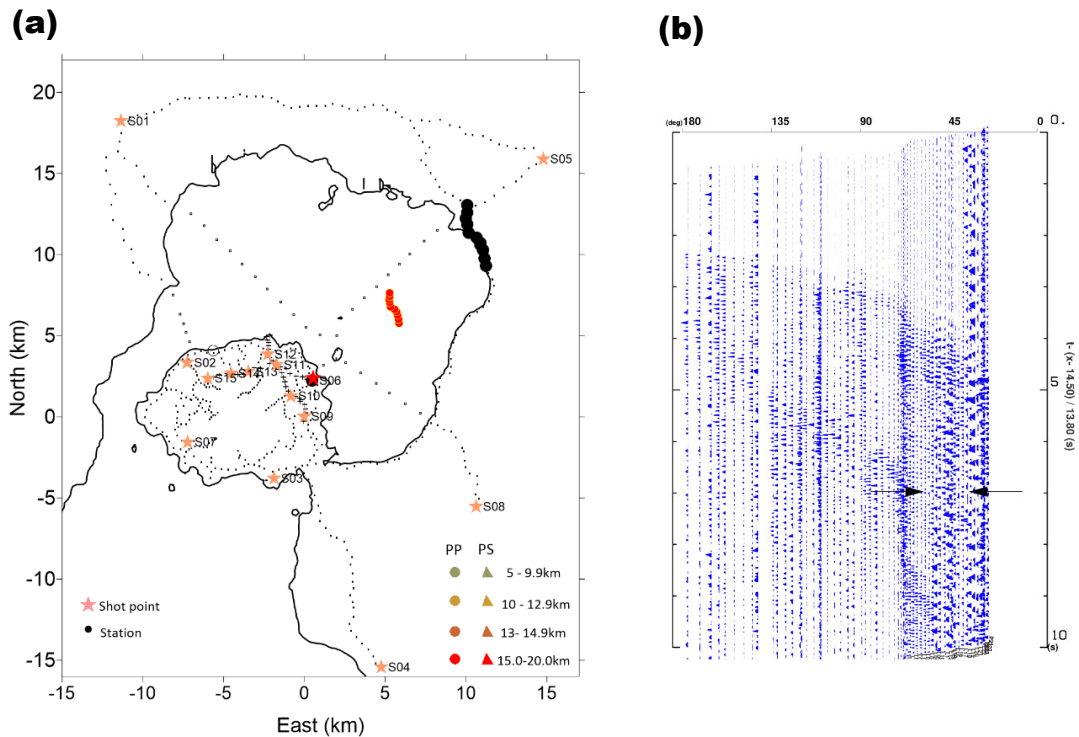


図 1.2-1-28 (a) S06L15-B が出現する観測点分布と対応する反射点の分布。大きい黒丸は観測点を、小さい赤色丸記号は反射点を示す。(b) レデュース走時でプロットした鹿児島湾東岸における観測記録。基準距離 14.5 km でレデュース速度 5.7 km/s を用いた。矢印で S06L15-B 相の出現部分を示す。横軸は発破点からみた観測点の方位を北から時計回りを正方向として測った角度で示す。記録は負極性を塗りつぶす表示を採用した。

S06L15-B 相はアレイ L15 を含みそれより南側の狭い範囲の観測点に現れる傾向がある。先述のように S06L15-B 相は深さ 17 km からの PP 反射であるので、反射点は振源距離の midpoint である東部鹿児島湾中央部に推定される (図 1.2-1-28a)。

#### S06L15-E

S06L15-E 相と同じ走時でかつ同じ見かけ速度をもつ後続相がアレイの外でも得られている。これらの後続相を S06L15-E 相と同一のものとして扱うことにする。S06L15-E 相が現れている観測点の分布を 図 1.2-1-29a に示し、鹿児島湾東岸で観測された記録の例を 図 1.2-1-29b に示す。



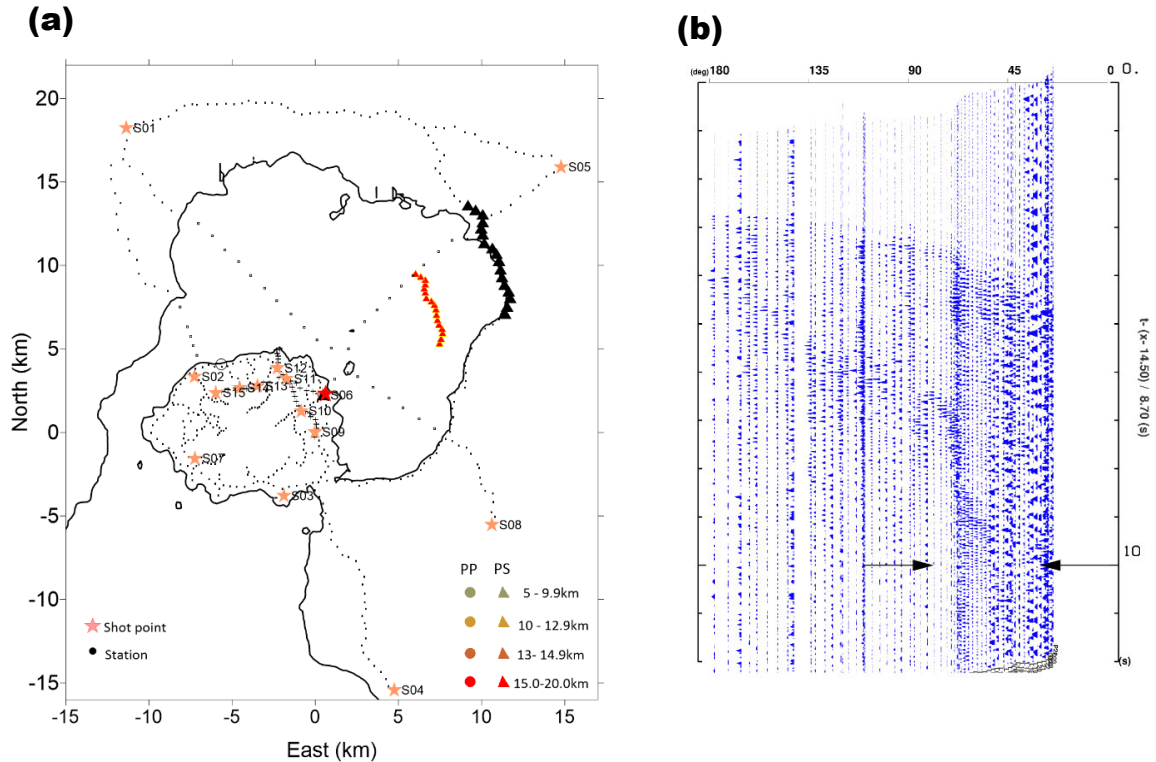


図 1.2-1-29 (a) S06L15-E が出現する観測点分布と対応する変換反射点の分布。大きい黒三角は観測点を、小さい赤色三角記号は変換反射点を示す。(b) レデュース走時でプロットした鹿児島湾東岸における観測記録。基準距離 14.5 km でレデュース速度 8.7 km/s を用いた。矢印で S06L15-E 相の出現部分を示す。横軸は発破点からみた観測点の方位を北から時計回りを正方向として測った角度で示す。記録は負極性を塗りつぶす表示を採用した。

S06L15-E 相は先述の S06L15-B 相よりもやや南に広い範囲で観測されるが、卓越した振幅を示す観測点は見当たらない。S06L15-E 相は表 2 より深さ 18 km における PS 変換反射波であるので、変換反射がおきる場所は振源距離の midpoint より観測点寄りに推定され、S06L15-B 相よりもやや北東の位置になる(図 1.2-1-29a)。

#### S01S07-A

S01S07-A 相と同じ走時かつ同じ見かけ速度をもつ後続相が現れている記録がアレイの外でも得られている。これらの後続相を S01S07-A 相と同一のものとして扱うことにする、S01S07-A 相が現れている観測点の分布を 図 1.2-1-30a に示す。また鹿児島湾東岸で観測された記録の例を図 1.2-1-30b に示す。

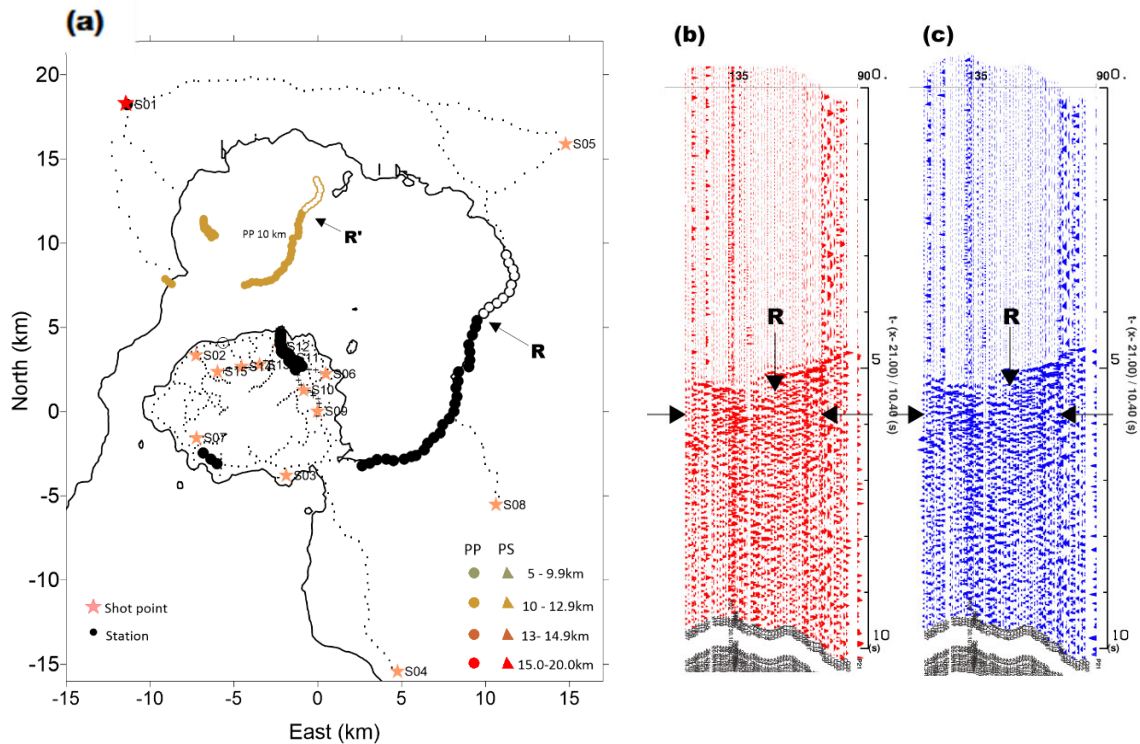


図 1.2-1-30 (a) S01S07-A 相が出現する観測点分布と対応する反射点の分布。大きい黒丸は観測点を、小さい赤色丸記号は反射点を示す。R は S01S07-A 相の極性反転が見られる地点を示し、R' は対応する反射点を示す。(b) レデュース走時でプロットした鹿児島湾東岸における観測記録。基準距離 21.0 km でレデュース速度 10.0 km/s を用いた。矢印で S01S07-A 相の出現部分を示す。横軸は発破点からみた観測点の方位を北から時計回りを正方向として測った角度で示す。記録は正極性を塗りつぶす表示を採用した。(c) 同じ記録の負極性を塗りつぶした表示を示す。

図 1.2-1-30b では S01S07-A 相は鹿児島湾東岸の L07 観測点以南、J11 観測点以北で明瞭に認められる。ただし、正極性が強調される図 30b では R 地点より右側で到来相が明瞭なのに対して、負極性が強調される図 2-1-30c では R 地点の左側で到来相が明瞭になることが注目される。これは R 地点を境に S01S07-A 相の極性が反転していることを表している。

表 1.2-1-4 のように S01S07-A 相は深さ 10km における PP 反射であるので、それぞれの観測点に対応する反射点は振源距離の midpoint に推定される。地点 R に対応する反射点は地点 R' に推定される。地点 R' は負極性反射の発生する領域の北限を示していると考えられ、もし S01S07-A 相の負極性がマグマ溜まりの上面を示しているのだとしたら地点 R' はそのマグマ溜まりの北限を示していると考えられる。なおアレイ S07 は R 地点より南側にある。

#### S01Nend-C

アレイの外側でも S01Nend-C 相と同じ到来時刻で同じ見かけ速度を示す後続相が現れていた。これらを S01Nend-C 相として取り扱うことにする。S01Nend-C 相が現れた観測点の分布を図 1.2-1-31a に示し、桜島北岸における観測記録の例を図 1.2-1-31b に示す。

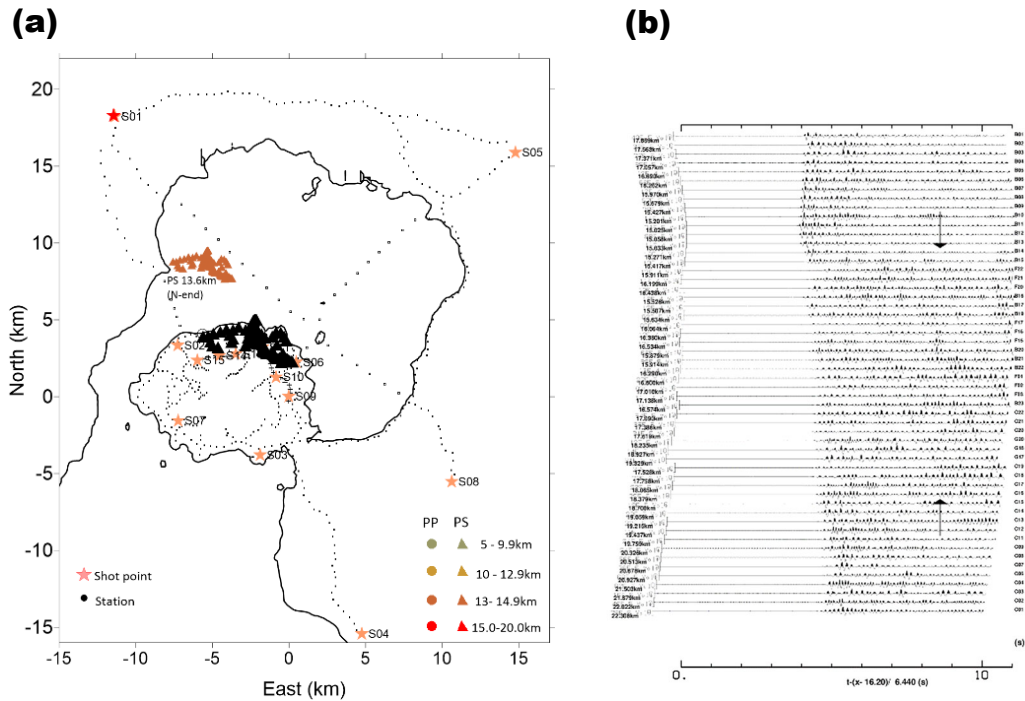


図 1.2-1-31 (a) S01Nend-C が出現する観測点分布と対応する変換反射点の分布。大きい黒三角は観測点を、小さい赤茶色三角記号は変換反射点を示す。(b) レデューズ走時でプロットした桜島北岸における観測記録。基準距離 16.2 km でレデューズ速度 6.44 km/s を用いた。矢印で S01Nend-C 相の出現部分を示す。横軸はレデューズ走時を示す。記録は正極性を塗りつぶす表示を採用した。

図 1.2-1-31b によれば S01Nend-C 相と同様な到来時刻と見かけ速度を示す到来相は桜島北岸の観測点で認められる。比較的狭い領域で大きな振幅を示す傾向がある。表 1.2-1-4 によれば S01Nend-C 相は深さ 13.6 km で生ずる PS 変換反射波である。したがって S01Nend-C 相が生ずる変換反射点はフォワードモデリングにもとづき振源距離の midpoint より受振点寄りに推定される (図 1.2-1-31a)。

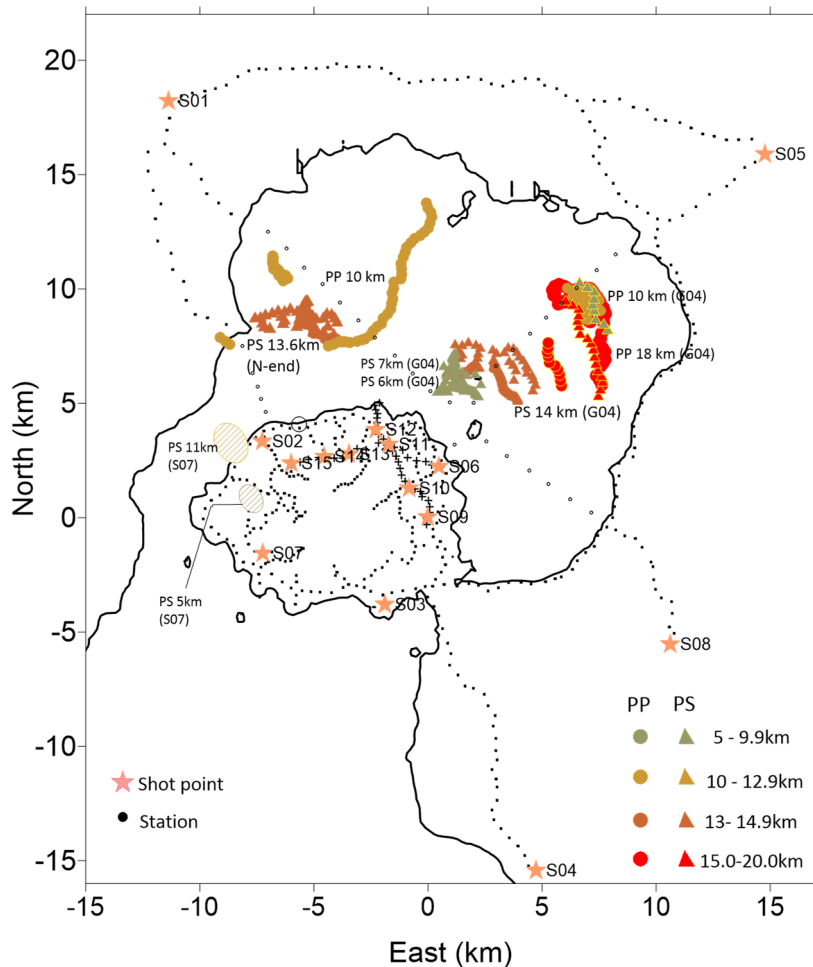


図 1.2-1-32 始良カルデラの地殻内反射体分布。三角シンボルと斜めハッチ領域は PS 変換反射を発生した反射体、丸と交差ハッチ領域は PP 反射を発生した領域を示す。領域の色は深度を示す。カーキ色は 5-9 km 深、黄土色は 10-12.9km 深、茶色は 13-14.9 km 以深を、赤色は 15 km 以深を示す。

今回の解析で推定された反射体の位置をまとめて図 1.2-1-32 に示し、以下に反射体分布の特徴を記述する。始良カルデラ東部は西部に比べて複雑である。始良カルデラ西部と東部では共通して深さ 10km 付近に反射面が推定された。これらが共通のものであるかどうかはまだ証拠がない。このほか、始良カルデラ東部では 17~19km の深さからの PP 反射が認められ、始良カルデラ西部では深さ 21km からの PP 反射が認められた。確認されたすべての PP 反射では極性反転が認められ、PS 変換反射では一部分に極性反転が認められる。このことから PP 反射は始良カルデラ直下の地殻内部の負のインピーダンスコントラストの存在を反映していると考えられ、地殻内のマグマの存在を示している可能性がある。

始良カルデラで見られた反射面分布の偏在が他の水没カルデラでも見受けられるかについて、十和田カルデラを中心に文献調査を行ったが、始良カルデラのような既往の報告は見つけられなかった。

## 2-2. 長期連続反射法の振源とその発振方法の検討

### a. 次年度に行う基礎実験観測の震源の内容の検討

本節では利用可能な既存の振源として火薬による発破および圧縮空気によるエアガン発振、油圧によるバイブレータ発振について長期連続反射法地震探査に対する適性を検討する。適性の検討にあたり既存の人工地震震源装置およびその観測記録等のデータを収集し整理する。また、整理の結果を踏まえて令和2年度に予定されている実験に用いる震源装置の候補を絞り込むと共にその仕様を可能な限り詳細に詰めることにする。

調査で使用したデータセットは次の3種類である。①火山噴火予知計画2008年桜島人工地震探査による発破観測記録、②鹿児島大学2017～2019年度受託研究『大規模人工地震探査による南九州島弧地殻構造の解明』2018年度地震探査の人工地震観測波形記録を利用するとともに、③鹿児島大学2017～2019年度受託研究『大規模人工地震探査による南九州島弧地殻構造の解明』2018年度地震探査のバイブレータ発振波形記録は、鹿児島大学から京都大学に提供を受けたものを利用した。データセット①はダイナマイトを、データセット②はエアガン装置を、そしてデータセット③はバイブレータ装置を人工振源に用いて取得されたものである。ダイナマイトによる発振の瞬間を図1.2-2-1に、エアガン装置本体を図1.2-2-2に、バイブレータを図1.2-2-3に示す。



図1.2-2-1 発破による人工振源。薬量20 kg 爆破の瞬間。孔中にダイナマイトを装薬する。孔中の爆薬の燃焼により人工的に地震波を発生する。

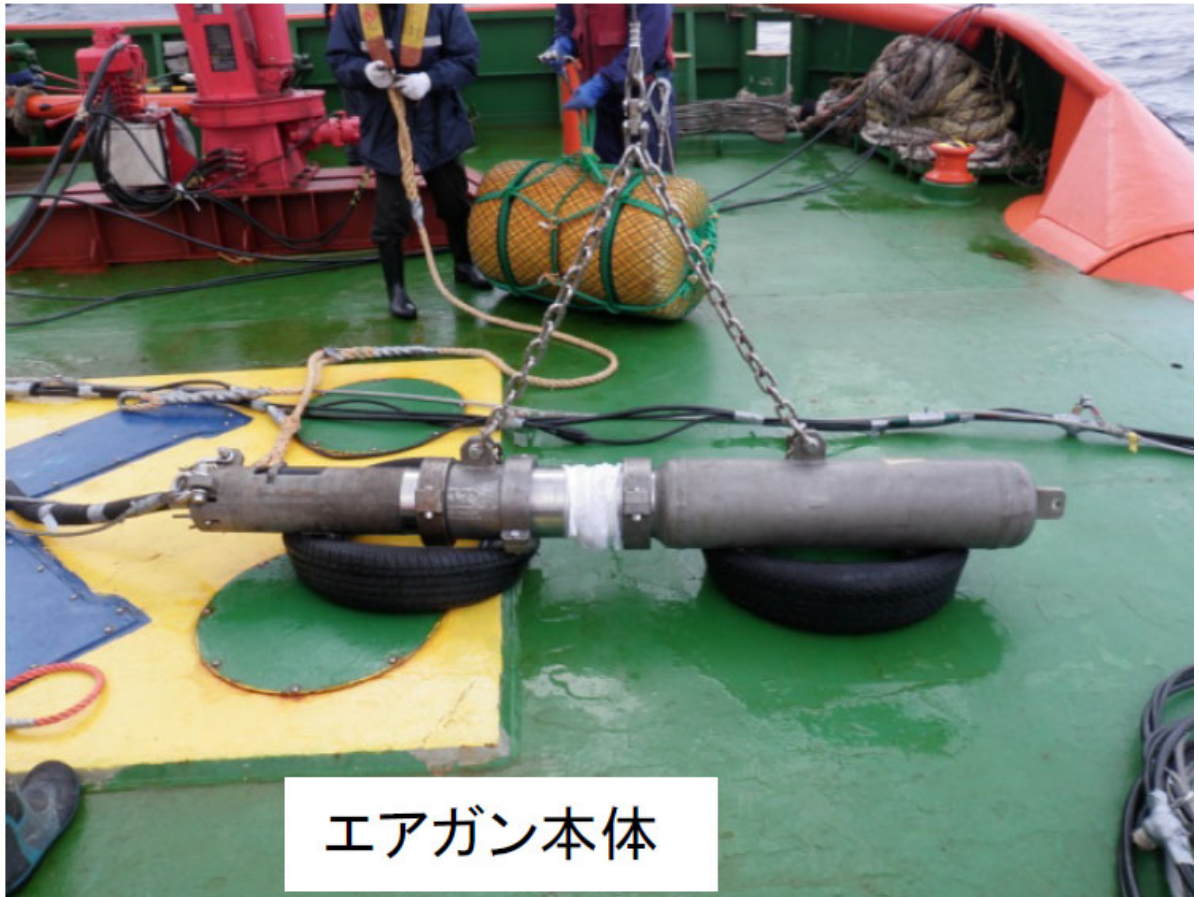


図 1.2-2-2 エアガン本体 Teledyne BOLT 1500LL 型（提供：株式会社 GEOSYS）。水中に吊り下げて圧縮空気の放出により人工地震波を発生する。



図 1.2-2-3 バイブレータ。HEMI：全長 8.4 m，全幅 2.4 m，全高 3.2 m，全重量 18.9 ton. 車両に搭載された油圧機構によって人工的に地震波を発生させる。

本節では a-1 項で発振方式および振源容量の事前検討について述べ、発破による発振を基準としてバイブレータ振源およびエアガン震源のそれぞれの有効性をエネルギーの観点から比較するとともにまた単一発振観測記録と繰り返し発振の重合記録を S/N 比に注目して評価した。また a-1 項では地中と地表における観測記録の両方を S/N 比の観点から評価し、より好ましい観測方法についても検討を行った。

つづく a-2 項ではエアガン振源を対象を絞り、エアガン振源の配列法や主要なパラメータについて検討を行い、その結果を踏まえて a-3 項で試験観測におけるエアガン発振仕様の提案を行った。

### a-1. 発振方式容量の事前検討

ここでは、既存の人工震源装置の観測記録データを整理解析する事により、人工震源の透過力や10km以深の深部反射波のモニタリングへの適応性を検討し、そのモニタリングに最適な震源を絞り込んだ。更に、地震計の地表設置に関わる検討も実施し、それらの結果についてまとめた。

#### a-1-1 検討の対象とした既設観測点

(1)-2-1-b 節で述べられたように、2008年のS01の発破記録の中でオフセット距離が15km以上の観測点では、深部反射面からのPP及びPS反射波が後続波として数多く見出されている。この観測事実をもとに、深部からの広角反射波を良好なS/Nで捉えるために、十分な地震波エネルギーを発生する振源を用いて、振源距離（オフセット距離）をある程度確保した観測点を用いる必要がある。各発振点からのオフセット距離がある程度確保できる京都大学防災研究所火山活動研究センターの常設観測点の中から、以下の4つのS/Nの良い観測点を選定した。

- ・高免 (KOM、桜島内)
- ・郡山 (KOR、桜島外)
- ・錫山 (SUZ1、桜島外)
- ・福山 (FUK1、桜島外)

図1.2-2-4には、検討に使用した発振点の位置 (S01<葉量300kg>及びAB1335~AB1361<エアガン測線の西端側の赤点線で囲った12ショット>及びVc<バイブレータ4台の同時発振>)と検討の対象とした既設観測点の位置 (緑の丸で囲んだ所)を示す。

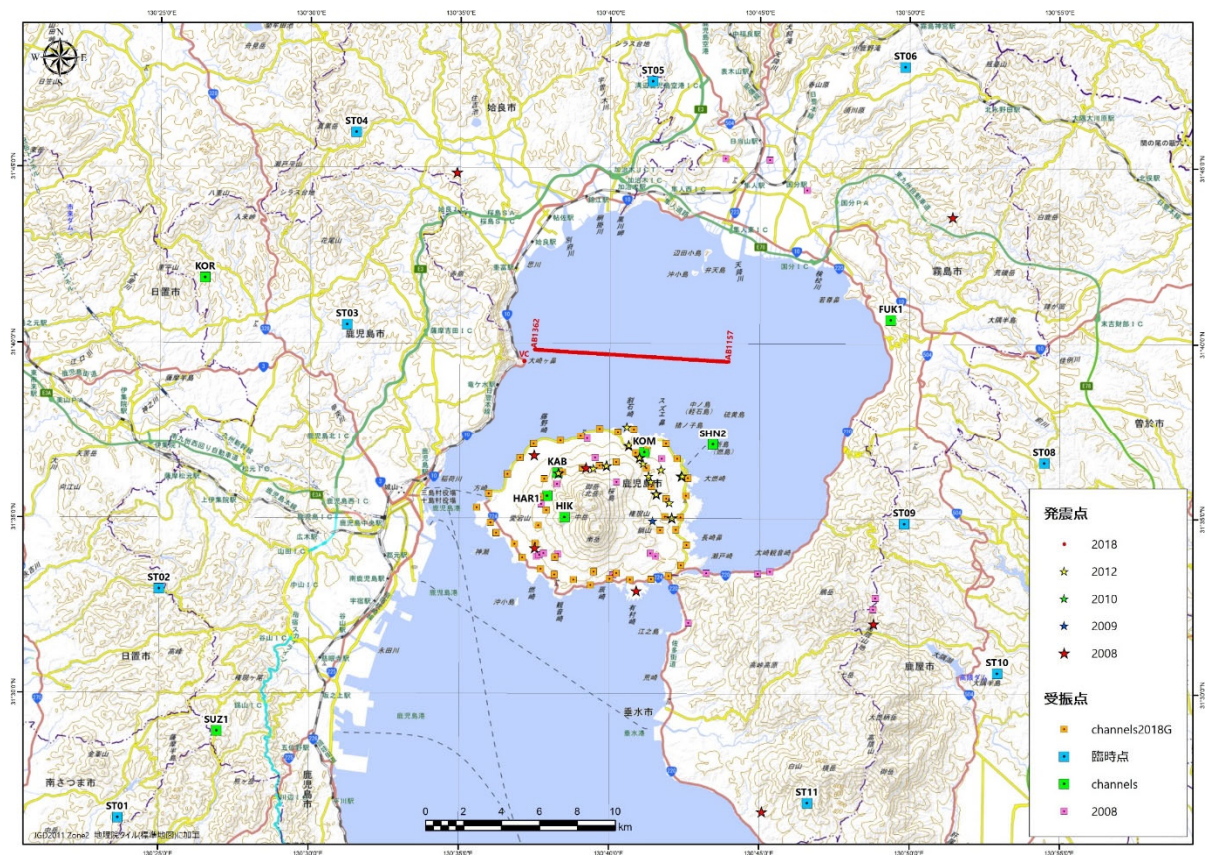


図1.2-2-4 検討に使用した発振点



### a-1-2 検討に用いた発振データ

地下 15km 程度からの深部反射のモニタリングに利用可能と考えられる大型の人工震源としては、大薬量 (300kg 超) の発破、大容量 (6000in<sup>3</sup>相当) のエアガン、それに同期発振を行う複数台の大型バイブレータが考えられる。これらの発振データを以下で検討の対象とした。

具体的に利用可能であったのは、以下の 3 種類の発振データである。

- ① 2008 年実施 発破 (S01 : 300 kg) の発振記録 (井口他, 2009)
- ② 2018 年実施 エアガン (6,000 in<sup>3</sup>) の発振記録の一部 (宮町他, 2019)  
AB1335~AB1361 の中の 12 ショット
- ③ 2018 年実施 複数 (4 台) バイブレータによる連続発振記録 (宮町他, 2019)

### a-1-3 発振データの特徴

図 1.2-2-5 から図 1.2-2-7 には、高免 (KOM) における発破データとエアガンデータとバイブレータデータの周波数スペクトルとオリジナル波形、それに 3 種類のバンドパスフィルタ適用後の波形をそれぞれ示す。また、図 1.2-2-8 には、4 つの既設観測点の 300 kg の発破の V 成分記録をまとめて示した。図 1.2-2-9 から図 1.2-2-12 には、4 つの既設観測点のエアガン発振の V 成分記録を 4 例ずつ示した。

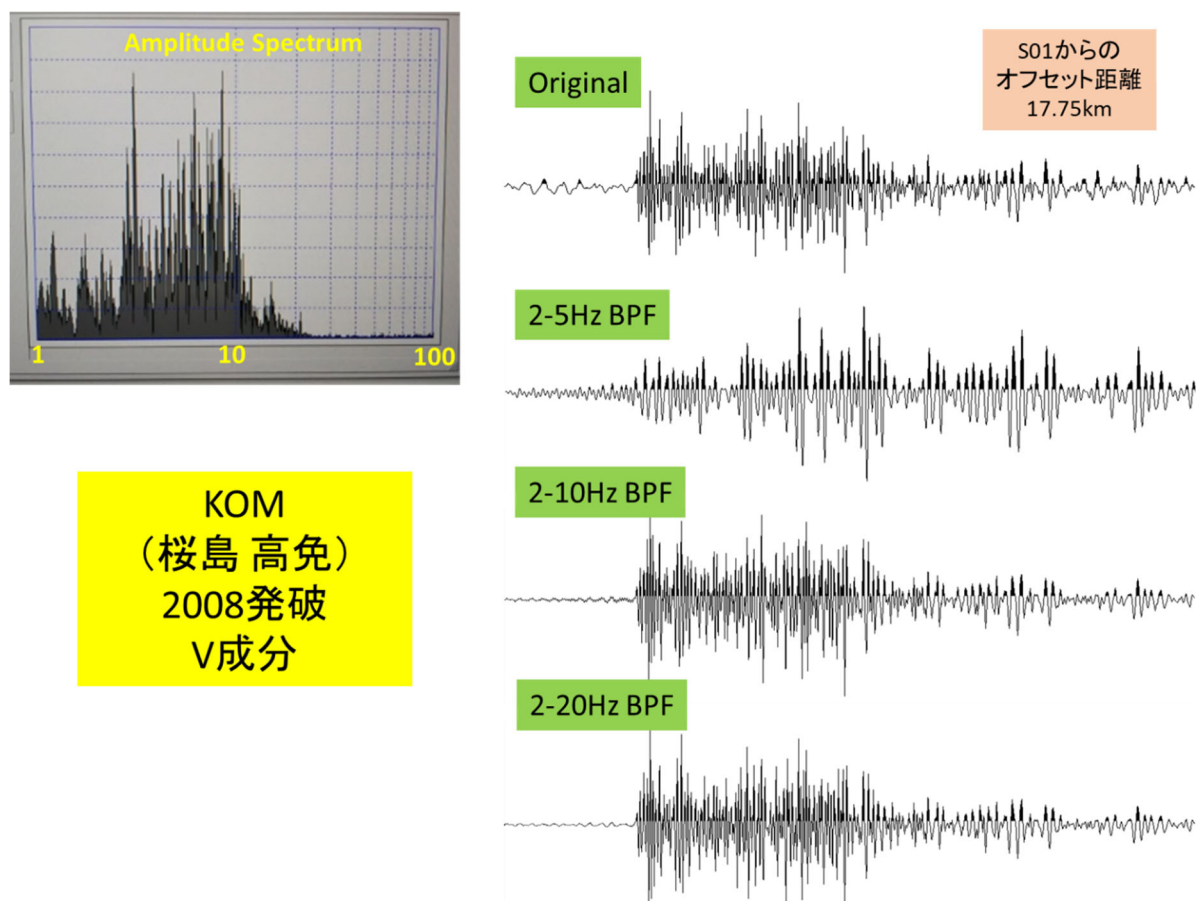


図 1.2-2-5 高免 (KOM) 観測点における発破データのオリジナル波形と振幅スペクトル。振幅スペクトルを左上に示す。振幅スペクトルの横軸の単位は Hz。右側は BPF 適用後の波形を示す。

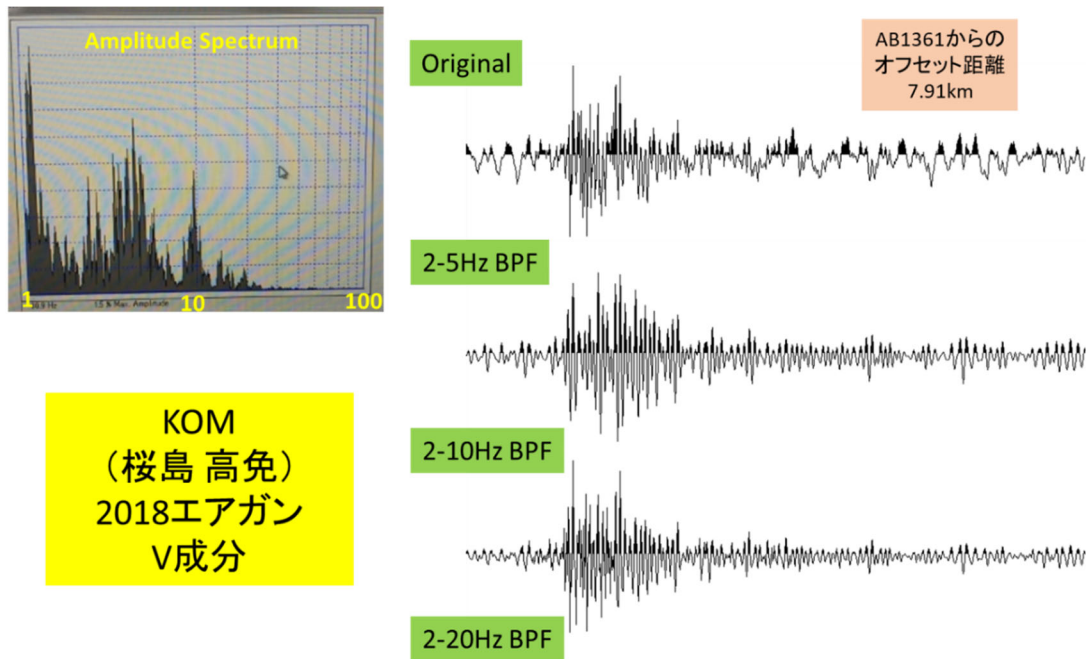


図 1.2-2-6 高免(KOM)観測点におけるエアガンデータのオリジナル波形と振幅スペクトル。振幅スペクトルを左上に示す。振幅スペクトルの横軸の単位は Hz。右側は BPF 適用後の波形を示す。

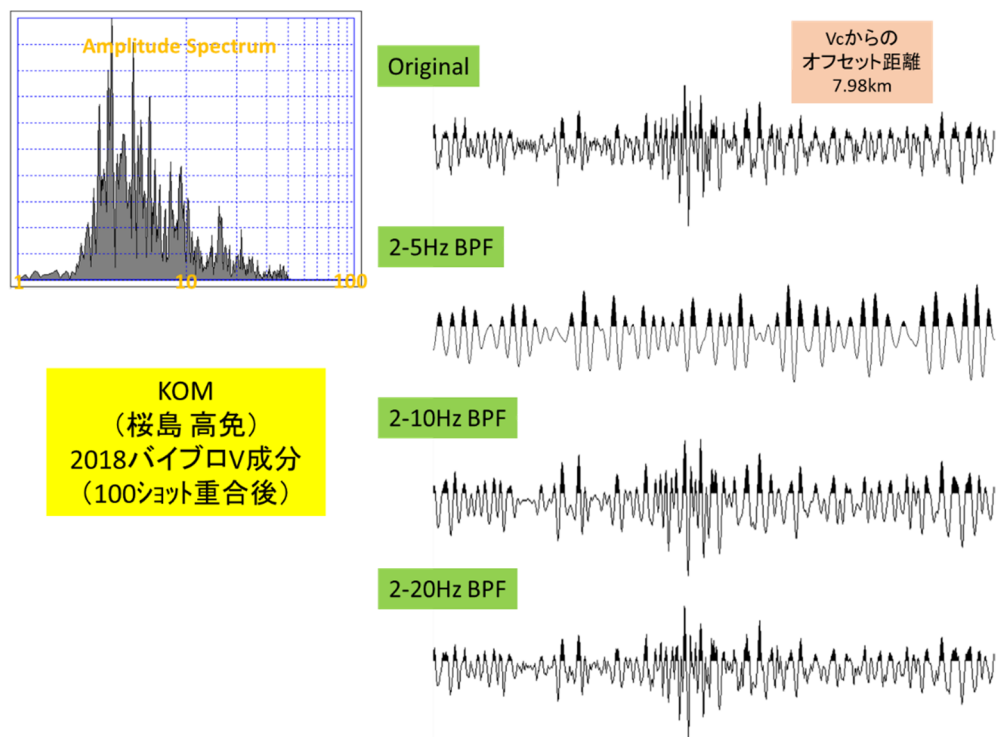


図 1.2-2-7 高免(KOM)観測点におけるバイブロデータのオリジナル波形と振幅スペクトル。振幅スペクトルを左上に示す。振幅スペクトルの横軸の単位は Hz。右側は BPF 適用後の波形を示す。

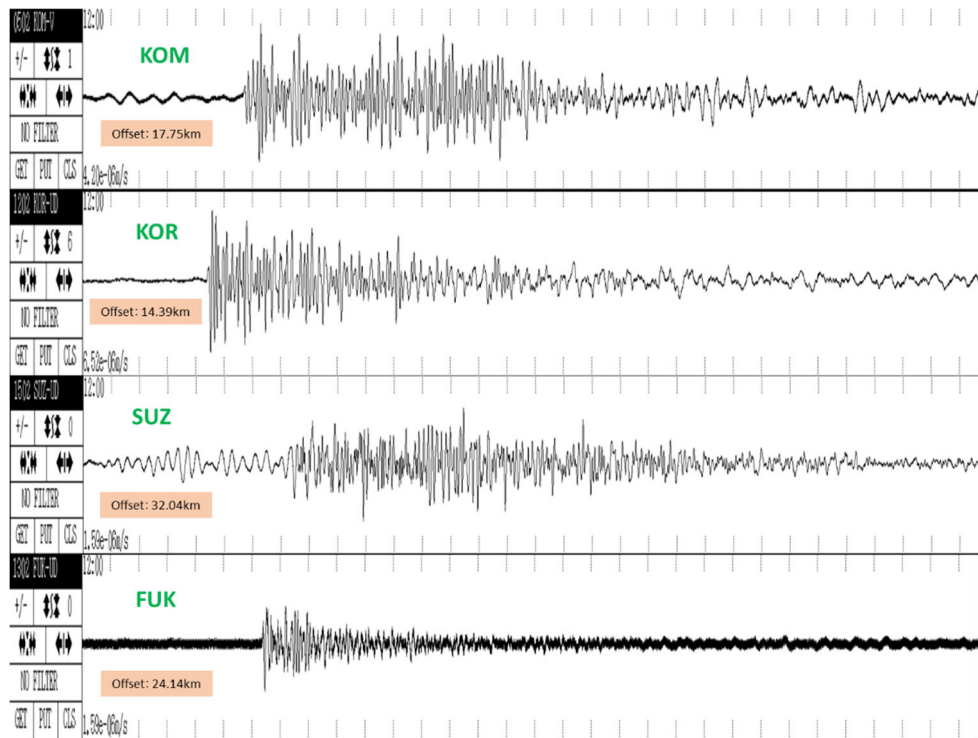


図 1.2-2-8 4つの常設観測点 (KOM, KOR, SUZ, FUK) における 300kg 発破の V 成分記録

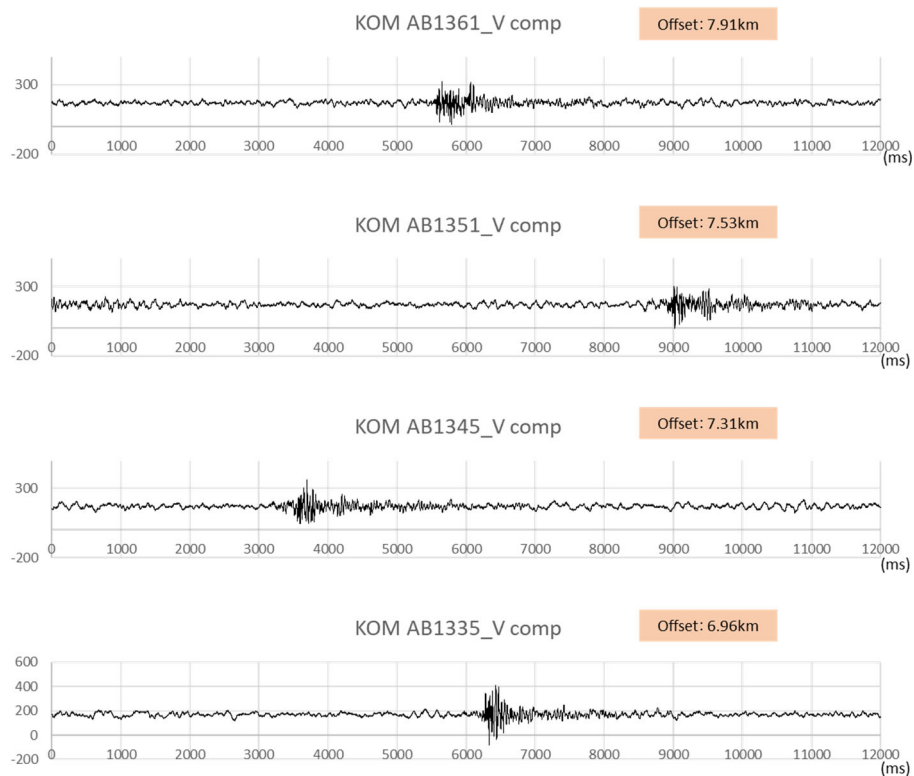


図 1.2-2-9 高免 (KOM) 観測点におけるエアガン発振の V 成分の記録例

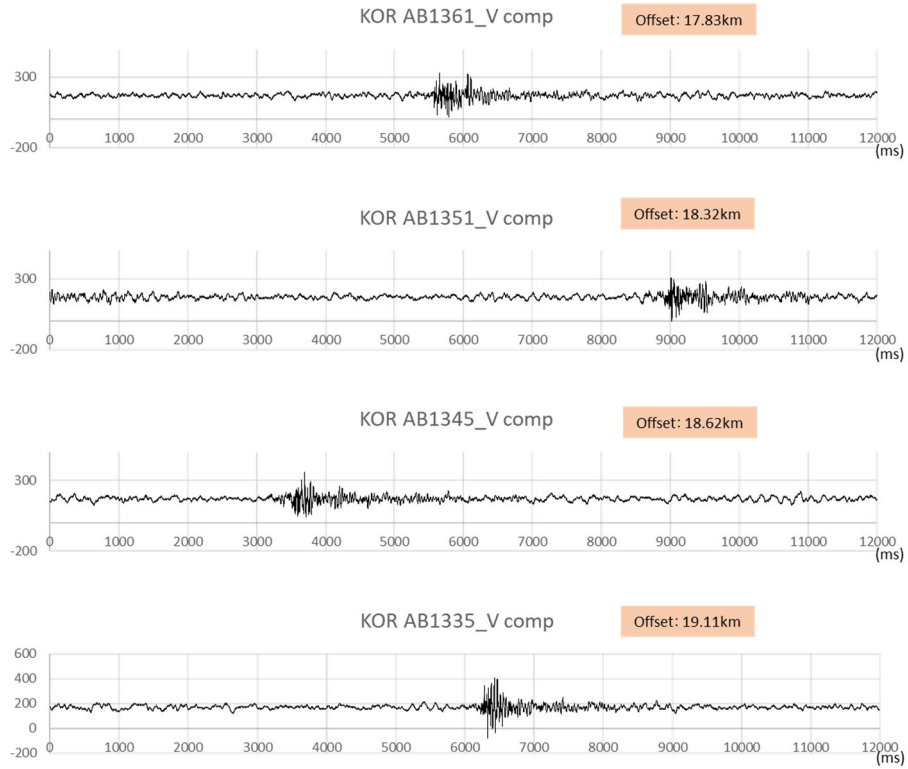


図 1.2-2-10 郡山 (KOR) 観測点におけるエアガン発振の V 成分の記録例

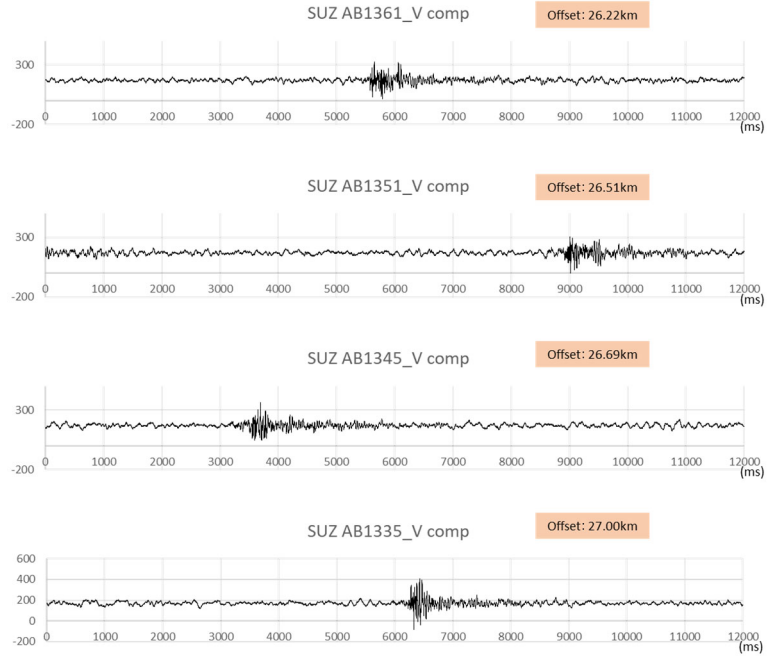


図 1.2-2-11 錫山 (SUZ) 観測点におけるエアガン発振の V 成分の記録例

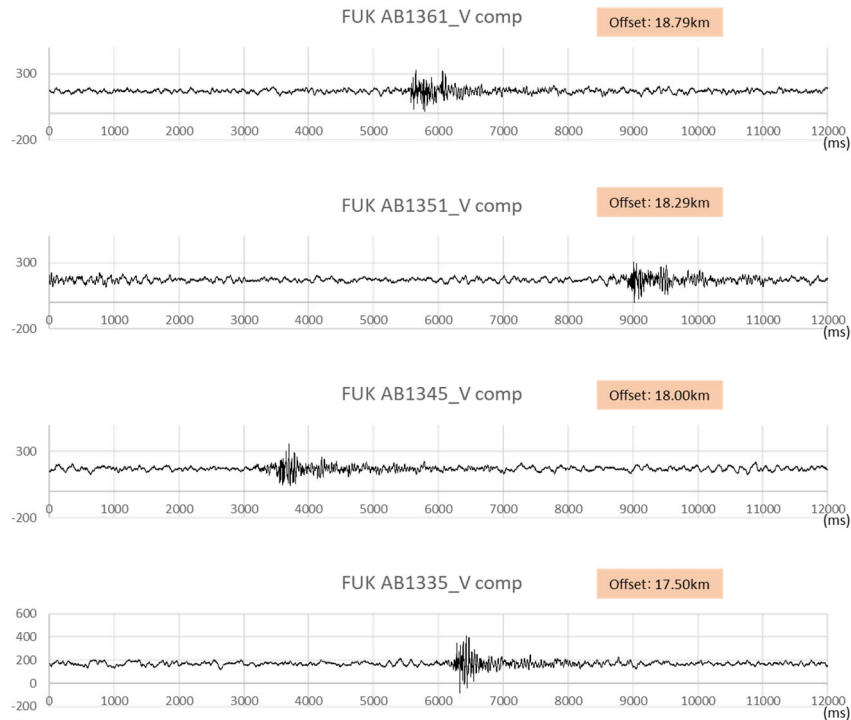


図 1.2-2-12 福山(FUK)観測点におけるエアガン発振のV成分の記録例

以下に、発振データの特徴を列記する。

<発破データ>

- ・立ち上りが明瞭で、S/N の良好な記録である。
- ・有効周波数帯域：2-30 Hz
- ・卓越周波数帯域：2-15 Hz（中でも、3, 6~8 Hz 付近が優勢）
- ・初動の振動継続時間は観測点毎に異なるが、5 秒以上に及ぶものもある。

<エアガンデータ>

- ・立ち上りは発破ほど明瞭ではないものの、オフセット距離 20km を超える観測点にも信号は確実に届いている。単発のショットとしては、想定以上の透過力である。
- ・有効周波数帯域：2-30 Hz
- ・卓越周波数帯域：2-7 Hz, 9-15 Hz（中でも、3~5, 10 Hz 付近が優勢で、8 Hz 付近に顕著なノッチが入る）
- ・初動の振動継続時間は観測点に依らず、概ね 1 秒以内で、500ms 以内のものが多い。

<バイブレータデータ>

- ・100 回以上の垂直重合を実施した後の記録に対しても立ち上りが不明瞭で、S/N が悪い記録である。
- ・有効周波数帯域：3-40 Hz
- ・卓越周波数帯域：3-10 Hz
- ・初動の振動継続時間は、初動が確認可能な観測点では、概ね 1 秒程度である。

発破とエアガンとバイブレータのデータに含まれるノイズを抑制するには、共通して 2-20 Hz のバンドパスフィルタが有効である。

#### a-1-4 バイブレータ震源の評価

図 1.2-2-13 にはデータセット③の観測に用いられたバイブレータのスイープ波形と相関処理結果記録における震源波形に相当する Klauder Wavelet を示す。以下に、主な発振仕様を列記する。

- ・スイープ長 : 20 sec
- ・スイープレンジ : 3-40 Hz
- ・スイープパターン : MD スイープ (Maximum Displacement sweep)

### Klauder wavelet: バイブレータの震源波形

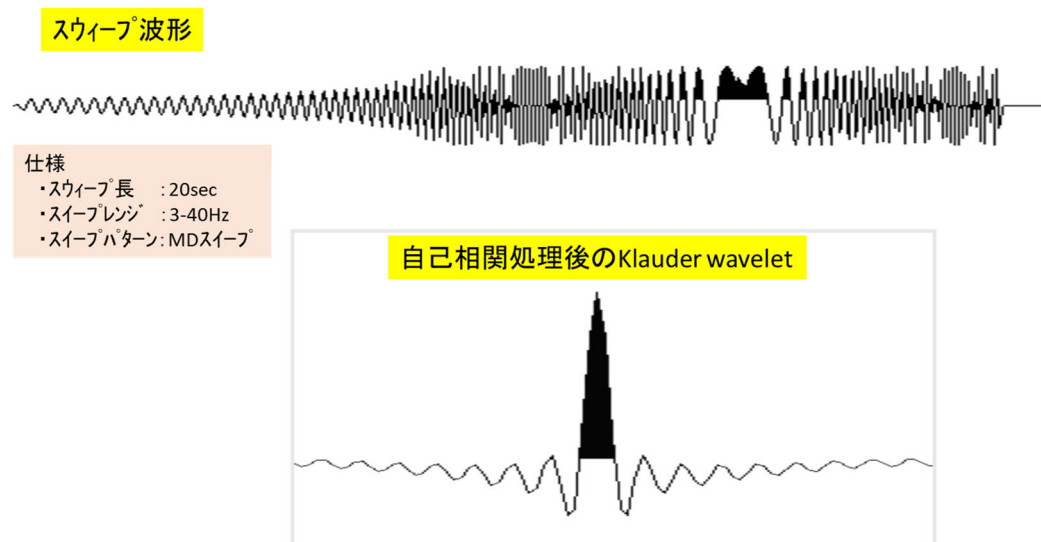


図 1.2-2-13 バイブレータの振源スイープ波形と相関処理結果記録における等価な震源波形 (Klauder wavelet)。

バイブレータは図 1.2-2-13 上段に示すような振源スイープ波形 (以下、振源波形) を発生して振動を地面に伝える為、オリジナルのバイブレータ観測記録から直接に地下の様子を推測する事は出来ない。発破観測記録やエアガン観測記録などのインパルス波形を振源として用いたものと同等の記録に変換するためには、観測記録に対して振源波形との相互相関処理が必要である。また、バイブレータデータの重合効果を見る際には以下の 2 通りの処理の方法がある。

- (1) Correlation After Stack (通称、CAS) : 必要数のショット記録を垂直重合した後に、1 回だけ相互相関処理を行う。
- (2) Correlation Before Stack (通称、CBS) : 必要数のショット記録それぞれに相互相関処理を施した後に、垂直重合処理を行う。

一般には相互相関処理の回数が多い方がランダムノイズの抑制効果が高くなると考えられる為、CBS を選択するのが普通である。しかしながら処理結果に差異が見られない場合には、CAS

の方が効率的であるので、CAS を選択する。図 1.2-2-14 と図 1.2-2-15 は高免 (KOM) 観測点の記録をそれぞれ CAS と CBS で処理した重合数の異なる 3 種類のショット記録である。100 回スタックの記録に関し、CAS では後続波的なノイズ (赤点線で囲った部分) が明確に残っているのに対し、CBS ではそのノイズがかなり抑制されており、この場合は CBS の方が比較検討に有利であると判断した。



図 1.2-2-14 高免 (KOM) V 成分の Correlation After Stack の効果。

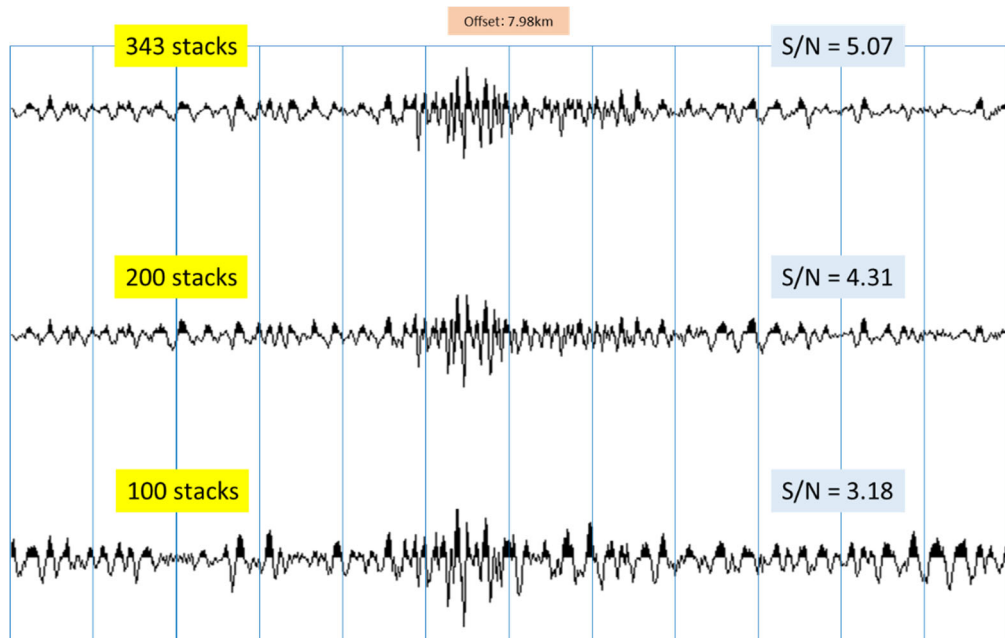


図 1.2-2-15 高免 (KOM) V 成分の Correlation Before Stack の効果。

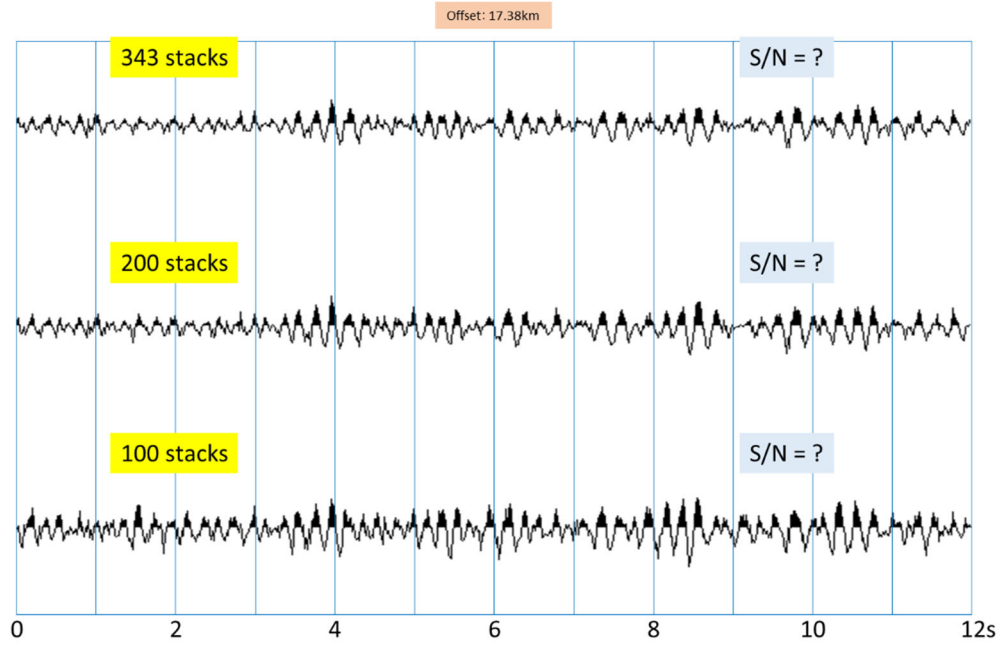


図 1.2-2-16 郡山(KOR) V成分の Correlation Before Stack の効果(BPF 2-20Hz を適用)

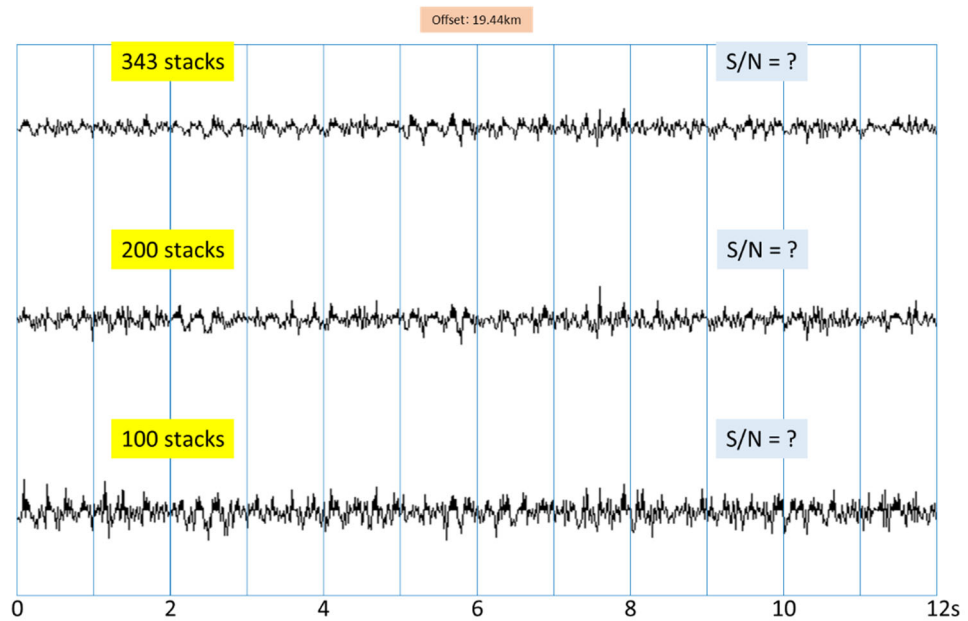


図 1.2-2-17 錫山(SUZ) V成分の Correlation Before Stack の効果(BPF 2-20Hz を適用)。



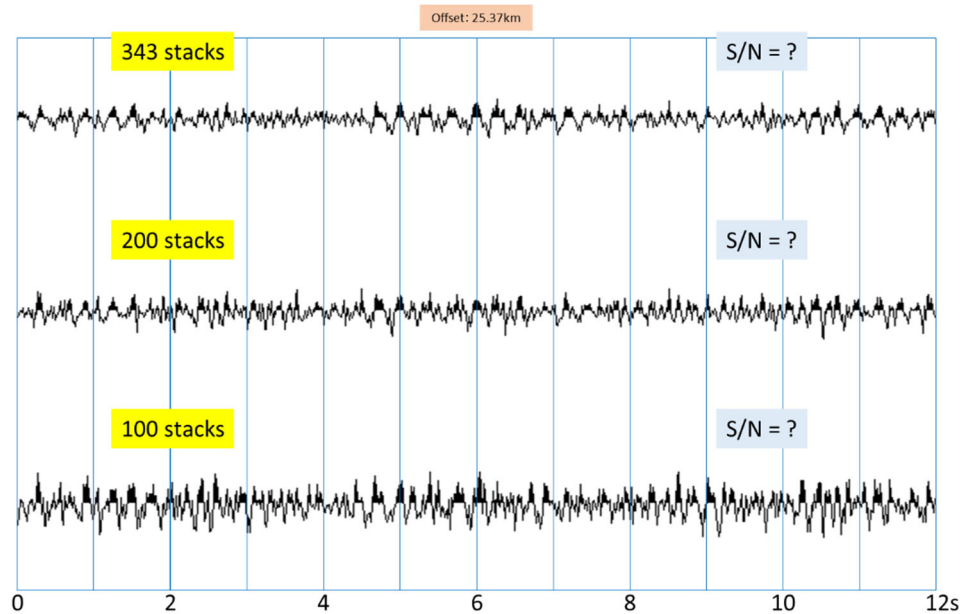


図 1.2-2-18 福山 (FUK) V 成分の Correlation Before Stack の効果 (BPF 2-20Hz を適用)。

表 1.2-2-1 バイブレータ (複数回スタック) と発破の単発ショットの S/N 比の比較

S/N比の比較									
		S/N						S/N	
観測点名 (簡略名)	バイブ発震点 Vcからの距離 (km)	バイブレータ(100回スタック)		バイブレータ(200回スタック)		バイブレータ(343回スタック)		発破	
		App	TRUE	App	TRUE	App	TRUE	App	TRUE
高免 (KOM)	7.98	3.333	3.180	4.429	4.314	5.167	5.069	13.693	13.656
郡山 (KOR)	17.38	-	-	-	-	-	-	17.829	17.801
錫山 (SUZ)	19.44	-	-	-	-	-	-	3.132	2.968
福山 (FUK)	25.37	-	-	-	-	-	-	6.776	6.702

図 1.2-2-16 から図 1.2-2-18 には残り 3 つの観測点における V 成分に対し 100 回、200 回、343 回の発振データを CBS で作成した結果を示す。この結果を基準となる発破データの S/N 比と比較できる形で表 2-2-1 に示す。表 2-2-1 の S/N 比の欄は粗計算結果を App 欄に示し、ノイズの影響を除外した値を TRUE 欄に示す。

まず、発振点 Vc からのオフセット距離が 15km を超える KOM 以外の 3 つの観測点では、重合数の増大に伴い、S/N が若干改善している様に見えるものの、100 回、200 回の垂直重合の記録上はもとより、343 回の重合記録上ですら、初動と思われる信号を確認できなかった。

また、オフセット距離約 8km の KOM 観測点では重合数の増大に伴い S/N 比の改善が明瞭に観察され、ノイズの影響を除外した S/N 比は、100、200、343 回の重合数に対して、それぞれ 3.18、4.31、5.07 となった。

これらの結果から、重合数 (X) と S/N 比 (Y) の関係を表す経験式を求めた。一番フィットする関数は対数関数であった。

$$Y = 1.5374 \cdot \ln(X) - 3.8792$$

これらの関係を図 1.2-2-19 に示す。図 1.2-2-19 の赤点線の形状から分かるように、S/N 比は重合数の増加に対して頭打ちになる傾向がある。即ち、500 回以上重合しても 6 を超える S/N 比は見込めず、発破データの S/N 比の 50% にも達しないものと考えられる。因みに、初動の S/N 比 10 を達成するには、8000 回以上の重合数が必要であると推定される。深部反射の振幅は、初動の振幅の 30% から 60% 程度と想定されている処から、500 回以上重合したとしてもその S/N 比は 3 を大きく下回る可能性が高い。この事は、たとえ発振場所が変わったとしても深部反射を検知できない可能性を示唆している。

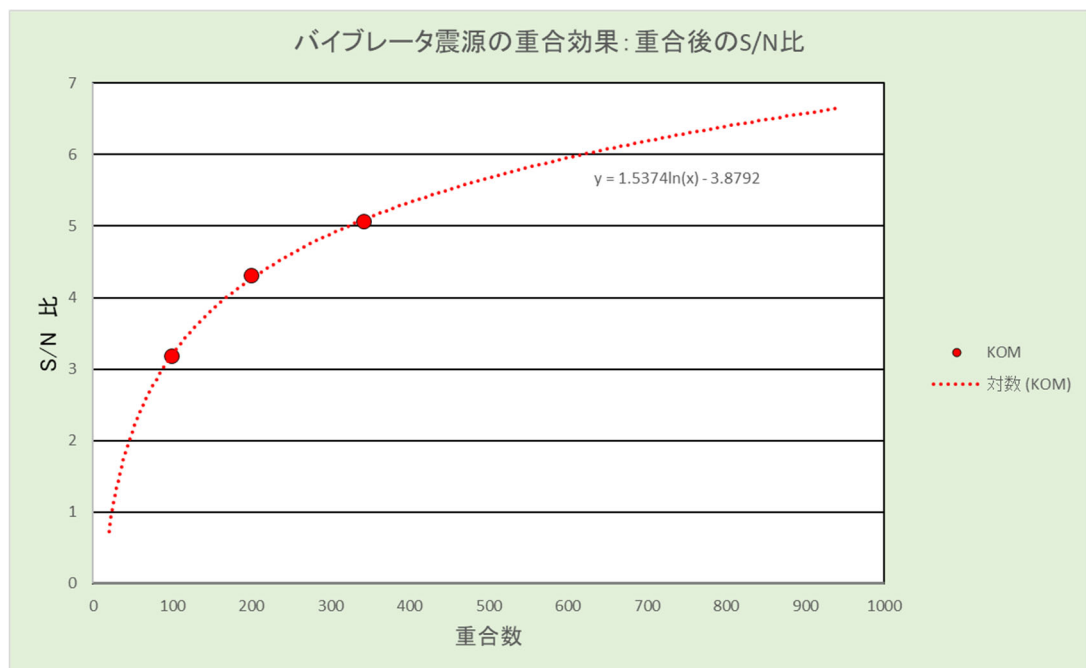


図 1.2-2-19 バイブレータ震源の重合効果：重合数と S/N 比。

一方、500 回のバイブレータによる発振作業の効率に関して言及する。500 回のバイブレータ発振には、トラブルが全くない場合であっても少なくとも 5 時間の専属のオペレータによる連続作業が必要である。また、頻繁にモニタリングを実施した場合専用のバイブレータと専属のオペレータを確保しておく必要がある。そのうえ取得した記録の品質管理には専用ソフトによる相互相関処理や重合処理が不可欠であるため、専用のモニタリングシステムおよび処理システムを確保する必要もある。

また、バイブレータ発振による観測は一過性の過渡的なノイズの汚染に対しては耐性が高いが、火山性微動の混入に対する耐性が高くない。火山性微動は火山の活動度が高まると頻繁に観測されることが知られており、数分以上にわたって続く定常的な地震動現象である。本課題のように火山地帯での地震学的な観測では火山性微動の混入は必ず考慮されなければならない問題である。

火山性微動の性質の一つである定常振幅の性質をもつホワイトノイズに対してバイブレータ発振波形との相互相関を検討することにする。実際に定常なホワイトノイズから構成される観

測記録(図 1.2-2-20a)と本調査で用いた発振波形(図 1.2-2-13 上段)との相互相関をとった結果を図 1.2-2-20b に示す。発振波形との相互相関によって得られる出力もまた定常的な振幅のノイズ波形を示し、図 1.2-2-20a で与えられたホワイトノイズは完全に抑圧されるのではないことが図 1.2-2-20b に示される。

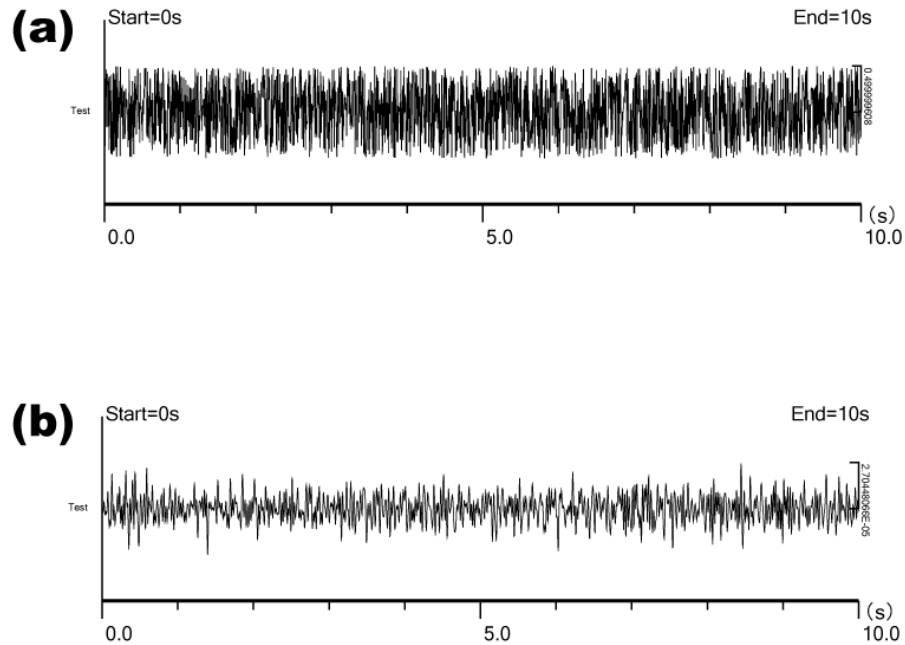


図 1.2-2-20 ホワイトノイズと、その発振波形との相互相関結果。(a)ホワイトノイズ波形、(b)発振波形との相互相関結果。

さらに相互相関前後の波形変化を周波数成分の観点から示したのが、図 1.2-2-21 である。ほぼ定常的なスペクトル密度をもつホワイトノイズであるが、発振波形との相互相関処理により、発振周波数帯域外の成分に対する抑圧は大きいが、発振波形の周波数帯域に対応した定常ノイズに対する抑圧が弱いことが示されている。

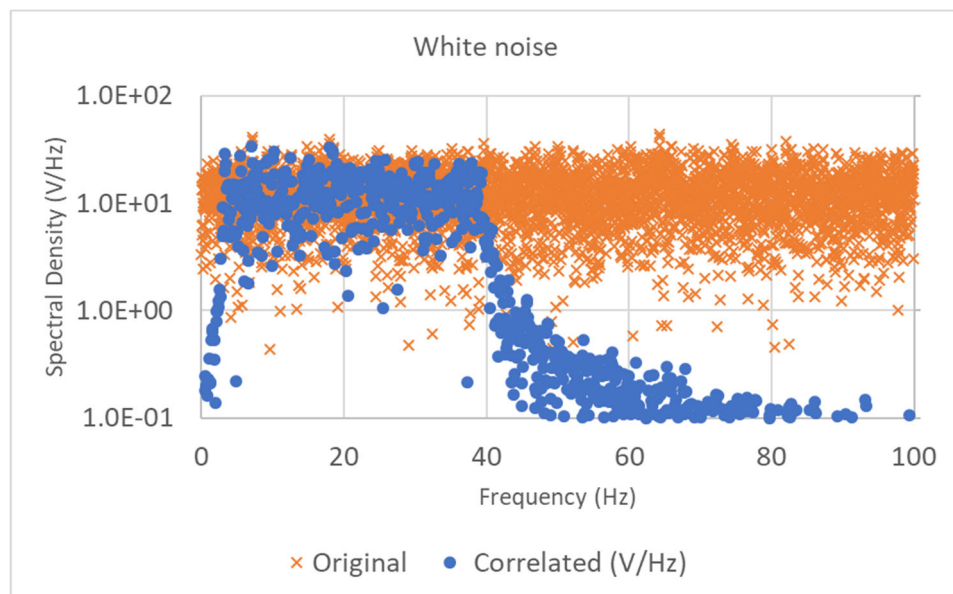


図 1.2-2-21 相互相関によるノイズスペクトルの変化

したがって、パイプレータ発振による地震探査では、過渡的なノイズに対しての耐性は高いが、発振波形と共通の周波数成分の定常的ノイズに対しては耐性が低いことが推察される。このことは活火山地帯ではパイプレータを用いた探査観測が不利な性質を持っていることを意味している。なぜならば活火山地帯では地下から地表への物質の連続した移動に伴い、定常的な振幅の振動である火山性微動が常に発生しており、火山性微動の探査観測記録への混入が避けられないからである。

実際に桜島で観測された火山性微動波形(図 1.2-2-22a)と発振波形(図 1.2-2-13 上段)の相互相関を検討した。火山性微動と発振波形との相関結果を図 1.2-2-22b に示す。また周波数領域における相関前後の変化を図 1.2-2-23 に示す

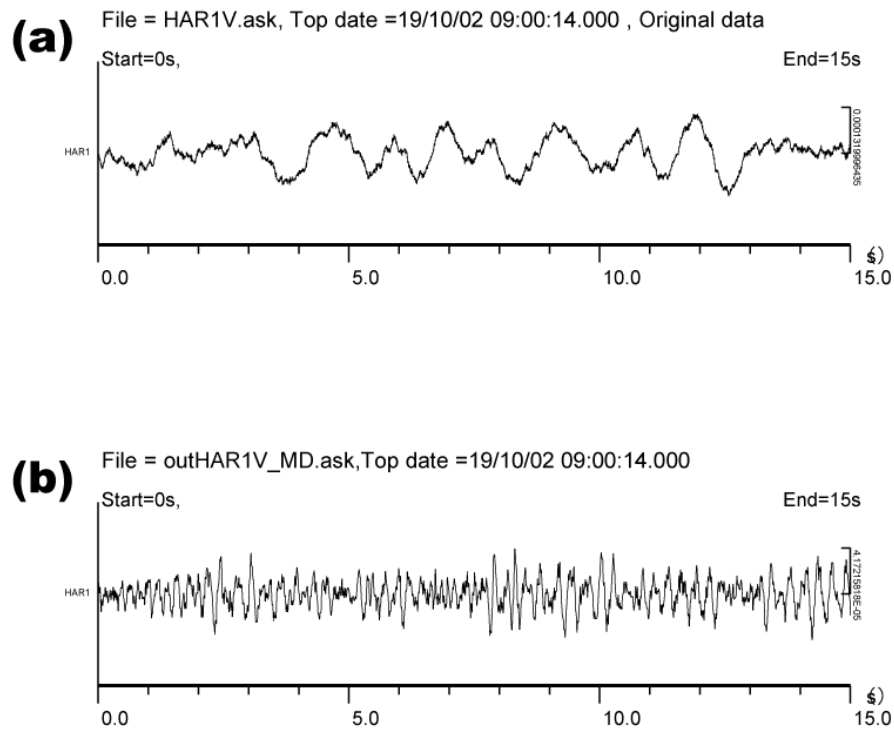


図 1.2-2-22 火山性微動の発振波形による相関処理。(a)火山性微動波形 (HAR1V 観測点、2019/10/2 09:00:14 から 15 秒間)。(b)発振波形との相関結果

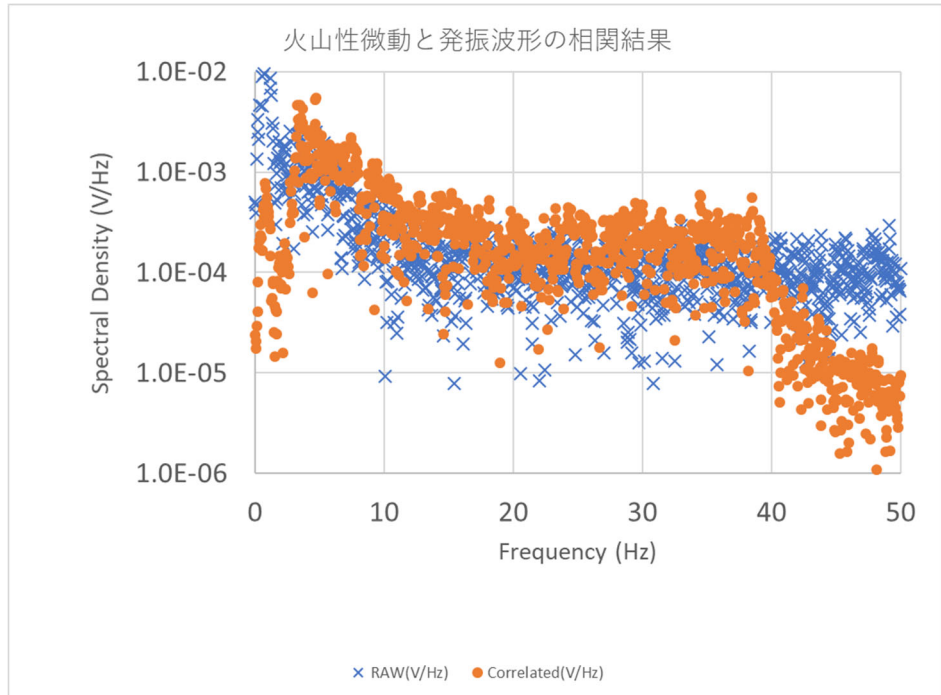


図 1.2-2-23 火山性微動とバイブレータ発振波形による相関結果の周波数成分

火山性微動は先ほどのホワイトノイズとは異なり、3Hz 以下の周波数にピークがあるが、周波数が高くなるにつれてその振幅は小さくなる傾向がある(図 1.2-2-23 Raw)。このような波形に発振波形の相互相関を計算した結果(図 1.2-2-23 Correlated)は、先ほどのホワイトノイズの時と同様に、生波形のスペクトルのうち発振波形の帯域だけ切り出したスペクトルの形を示す。この場合はフラットな周波数特性をもつホワイトノイズの例とは異なり、低周波側に見かけのピークをもつことになり、図 1.2-2-22b のように波形の卓越周波数が大幅に変わったノイズ波形(発振波形と相関をとった火山性微動)がやはり現れることを意味している。この場合でもやはり定常的な振幅を示す成分の除去はなされていない。このことからバイブレータ発振記録の震源波形との相互相関処理では、火山性微動のような振幅や周波数特性が定常的なノイズに対する S/N 比改善の効果が期待できないと考えられる。

以上の検討結果に基づき、バイブレータ震源はこのモニタリング業務には不向きな震源であると判断し、これ以降の人工震源の比較検討から除外する事とした。

#### a-1-5 人工震源の発振エネルギー評価

まず、人工震源のエネルギーを定量的に正しく評価するには、発振場所及び受振位置を固定した状態でそれぞれのデータ取得を実施し、取得された初動振幅などを同一の単位の振幅値に換算して比較出来れば評価を行うのは容易である(例えば、Staples, 1999)。しかしながら、その様な震源のエネルギー比較を主目的とした実験が実施されていない場合には、異なる時期に異なる目的で実施した異種震源のデータを何等かの基準で同じ土俵に載せて比較せざるを得ない。今回の実施時期の異なる 3 つのデータセットの中身を詳細に調べた結果、大学が保有する複数の常設観測点では、何れの発振データも明瞭に記録を取得出来ていた。深度約 11km からの深部反射を捉えた発破データを基準データとし、大学の 4 つの常設観測点でエアガン観測データとの比較を行った。

なお、バイブレータ震源については定常的な振幅の震源波形を長い継続時間にわたり発生し、発振時直後にエネルギーが集中する発破振動波形およびエアガン発振波形とは包絡線形状が異なるので、ここで行う検討から除外することにする。前項の検討から本事業のモニタリング業務には不向きである事が判明したので、本項の検討から除外しても問題はないものと考え

る。  
以下に振源が放出するエネルギーの推定方法について述べる。ここで算出されるエネルギーの値は発破振源とエアガン振源を比較する目的で算出された相対的な指標であり、後述のエアガンシミュレーションで得られる出力エネルギーの絶対値とは必ずしも一致しないことに注意されたい。

ここでは自然地震の規模を表現するマグニチュードを求めて人工震源のエネルギーの概算値を算定する。4つの常設観測点の少なくとも1観測点で記録できている場合には、使用した地震計の感度 (V/kine) に基づき初動の最大振幅を速度振幅  $A_v$  (kine) に換算する。さらに、震源から地震計までのオフセット距離  $r$  (km) を算定し、その値が 200km 未満の場合を対象として、以下の渡辺の式 (1971)

$$0.85 M = \log A_v + 1.73 \log r + 2.5$$

に当てはめ人工震源のマグニチュードを算出する。更に、Gutenberg and Richter (1956) の以下の換算式に従い、

$$\log E = 1.5 M + 4.8$$

複数の観測点で同様の計算を実施し、各人工震源のエネルギーの平均値と標準偏差を求める。この結果の比較から、マグニチュード算定に基づく人工震源の発振エネルギーの予備的な評価を実施する。

次に、エアガン容量  $6000 \text{ in}^3$  のエネルギーと基準データである発破データとを重合効果を含めて比較検討する。エアガンのエネルギーが基準データである発破より勝っていると判断される場合には、エアガンのエネルギーを基準データと遜色のない記録が得られる容量の下限をエアガンシミュレーターである GUNDALF (例えば、Laws, Hatton and Haartsen (1990) 参照) などを駆使して検討する。基準データのエネルギーが勝っている場合には、容量  $6000 \text{ in}^3$  をどの程度増やせば、基準データと遜色のないエネルギーレベルになるかを GUNDALF などを駆使して検討するが、アレイ構成の空間配置の変更により有効な容量を調整できる他、震源スペクトルのノッチを軽減させ透過力を向上させる事も可能な事から、垂直重合の効果も加味してコスト面の検討を含めた総合的な検討を実施するものとする。

また、京都大学の観測所が所有する地震計は地下のトンネルに設置されている為、この業務に用いる地震計を地表付近の 50cm 未満の穴に設置する場合より良好なデータが取得されている事が想定される。その為、表層付近の火山灰の影響をうける地表で観測されたデータについても深部反射のモニタリングの目的の為に利用可能かどうかを検討する。

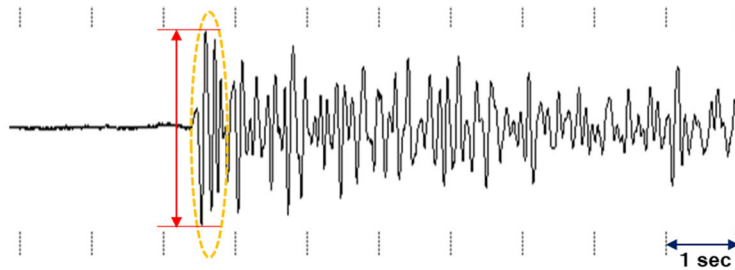
#### a-1-6 マグニチュードに基づく発振エネルギーの推定

初動振幅とオフセット距離から求めたマグニチュードに基づき、各震源に対する発振エネルギーを推定する。

＜初動の最大振幅の算定＞

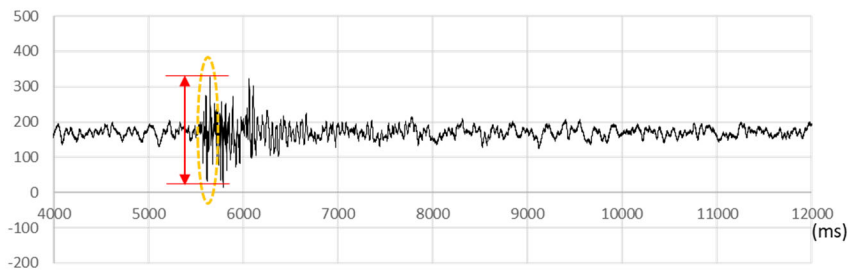
各発振記録における初動の最大振幅の読み取り方法を図 1.2-2-24 に示す。

＜発破データの場合＞



初動から1秒以内の最初の波群のPeak to Peak振幅を最大振幅とした

＜エアガンデータの場合＞



初動から0.5秒以内の最初の波群のPeak to Peak振幅を最大振幅とした

図 1.2-2-24 初動の最大振幅の読み取り方法

・発破観測記録

初動から1秒以内の最初の波群のPeak to Peak振幅を最大振幅とした。

・エアガン観測記録

初動から0.5秒以内の最初の波群のPeak to Peak振幅を最大振幅とした。

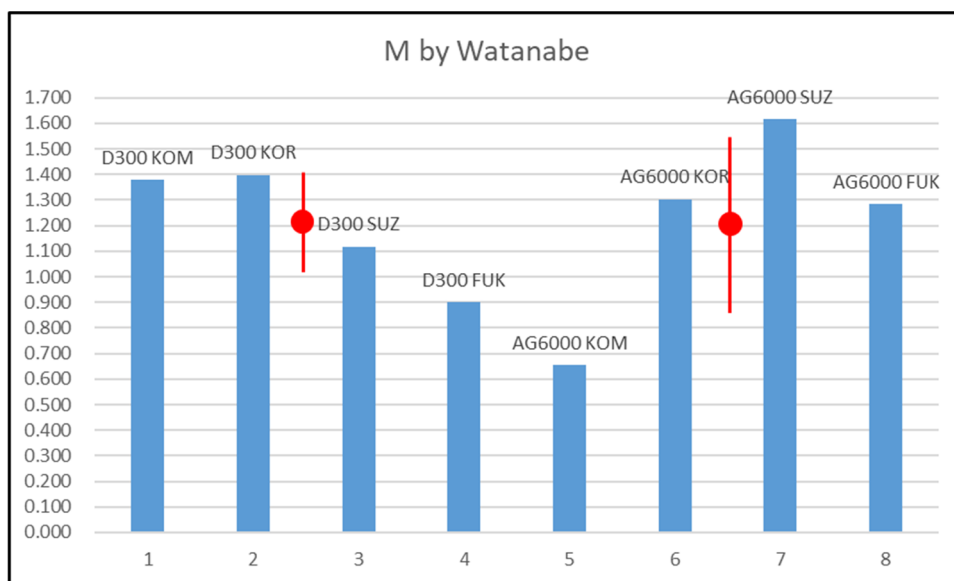


図 1.2-2-25 発破データとエアガンデータから算定されたマグニチュード

図 1.2-2-25 は発破とエアガンデータのマグニチュードを4つの常設観測点のそれぞれについて算定し、棒グラフ化したものを示す。図中の1番から4番までが発破データの結果で、5番から8番までがエアガンデータの最大振幅とオフセット距離の平均値から求めた結果である。図中の赤丸と赤線は、発破とエアガンそれぞれに対し、4つの観測点のマグニチュードの平均と標準偏差を算定したものである。発破とエアガンでマグニチュードの平均値はほぼ同じ値(約1.2)となったが、エアガンの標準偏差が大きい値をとる傾向が見受けられる。

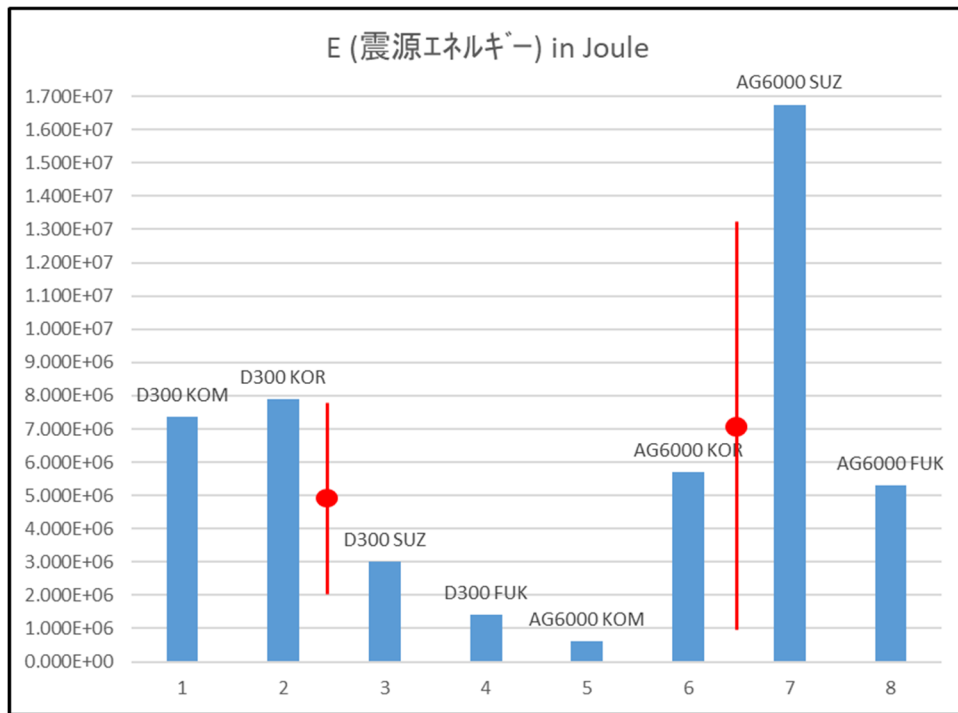


図 1.2-2-26 発破データとエアガンデータから算定された震源エネルギー

図 1.2-2-26 は4つの常設観測点のそれぞれについて発破とエアガンデータから震源エネルギーを算定した結果を棒グラフで示したものである。図中の1番から4番までが発破データの結果で、5番から8番までがエアガンデータの結果である。図中の赤丸と赤線は、発破とエアガンそれぞれに対し、4つの観測点の震源エネルギーの平均と標準偏差を算定したものである。エアガンの方が震源エネルギーの平均値は大きくなったが、分散を考慮してもエアガンの発するエネルギーは発破と同じオーダーであることは間違いないと考えられる。



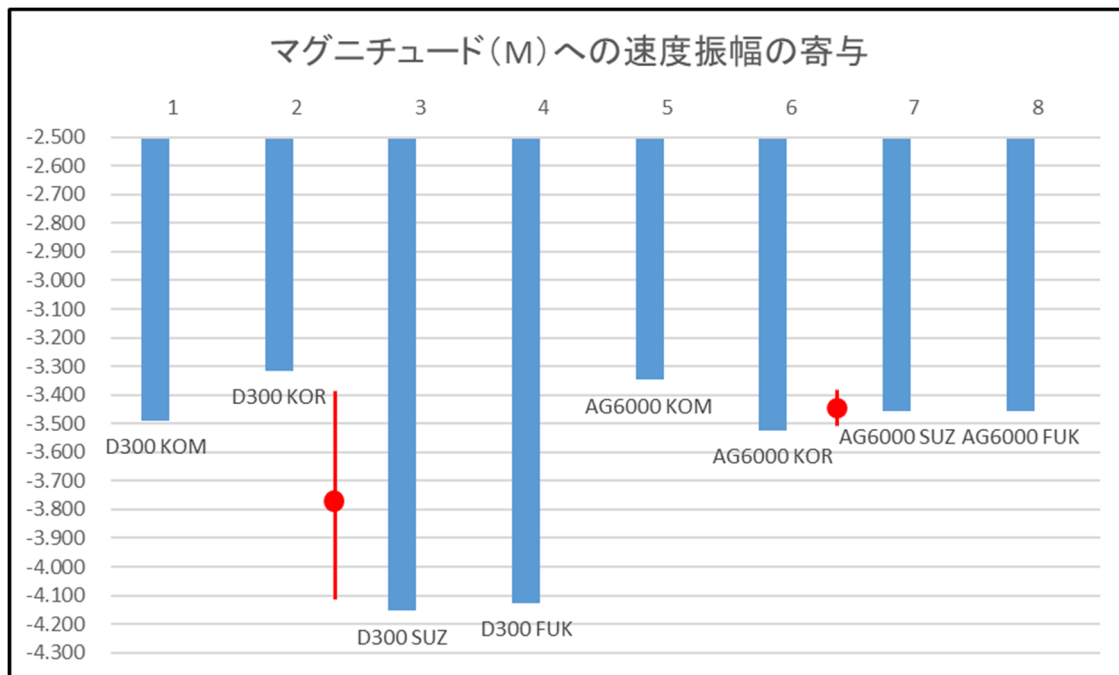


図 1.2-2-27 マグニチュードへの速度振幅の依存性

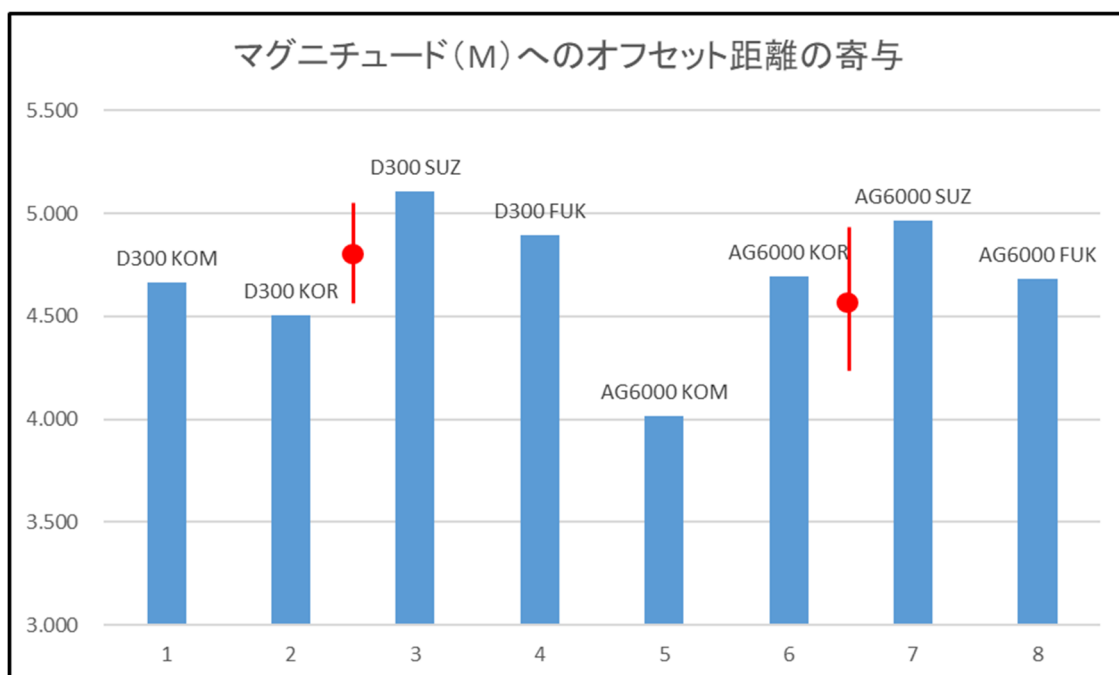


図 1.2-2-28 マグニチュードへのオフセット距離の依存性

図 1.2-2-27 と図 1.2-2-28 はそれぞれ振源ごとにマグニチュードへの速度振幅とオフセット距離の依存性をまとめたものである。図中の 1 番から 4 番までが発破データの結果で、5 番から 8 番までがエアガンデータの結果である。図中の赤丸と赤線は、発破とエアガンデータそれぞれに対し、それらの寄与について 4 つの観測点の平均と標準偏差を算定したものである。発破データの観測点間のばらつきがエアガンより小さくなったのは、今回の検討では振幅が小さかった観測点が 2 点含まれていたものの（マグニチュードを減らす効果）、それらの観測点のオフセット距離が大きかった為（マグニチュードを増やす効果）、結果的にマグニチュードへの寄

与が相殺した事によると考えられる。一方、エアガンのマグニチュード（或いは、震源エネルギー）のばらつきが大きかったのは、観測点間での振幅のばらつきがオフセット距離に依らず極めて小さい処から、主として、オフセット距離の寄与がダイレクトに効いた結果であると考えられる。

a-1-7 各震源の S/N 比の比較

表 1.2-2-2 エアガンと発破の単発ショットの S/N 比の比較

S/N比の比較										
観測点名 (簡略名)	RMS AMP in mV				S/N		RMS AMP in mV		S/N	
	2018 Noise		エアガン(6000 in <sup>3</sup> )		エアガン		2008 Noise	発破 (300 Kg)	発破	
	平均	分散	平均	分散	App	TRUE			App	TRUE
高免(KOM)	0.0303	0.0046	0.1132	0.0169	3.731	3.594	0.0537	0.7355	13.693	13.656
郡山(KOR)	0.0301	0.0046	0.1134	0.0166	3.771	3.636	0.0815	1.4530	17.829	17.801
錦山(SUZ)	0.0321	0.0045	0.1133	0.0165	3.525	3.380	0.0672	0.2104	3.132	2.968
福山(FUK)	0.0295	0.0055	0.1132	0.0165	3.844	3.711	0.0331	0.2245	6.776	6.702
			オフセット距離	7~8(KOM), 18~19 (KOR&FUK), 26~27 (SUZ) km			オフセット距離	約14(KOR),18(KOM),24 (FUK),32(SUZ) km		

表 1.2-2-2 には、エアガンと発破の単発ショットの S/N 比を比較した結果を示した。表には 4 つの常設観測点のノイズと信号の RMS 振幅を mV 単位で示し、エアガンについては 12 ショットの平均値と分散を表示した。表の中の S/N 比は信号の平均値に対するノイズの平均値として求め、App の欄はみかけの S/N 比を、True の欄は Staples et al. (1999) の考え方に従い App の値をノイズの値で補正して求めている。この結果、以下の事が言える。

- ① 少なくとも 4 つの常設観測点では、エアガンの S/N 比はオフセット距離に依らず 3~4 程度を示し比較的良好であった。
- ② 発破の S/N 比は、3~18 と極めて良好であるが、遠い観測点ほど小さい値を示した。ノイズレベルがエアガンデータ取得時 (2018) と比べ、若干大きい事を考慮すれば、概ねエアガンの S/N よりは良好な値を示していると言える。

a-1-8 エアガンの発振データに対する重合効果

4 つの常設観測点で観測されたエアガンデータに対する RMS 振幅に基づく重合効果と S/N 比の改善状況を図 1.2-2-29~1.2-2-32 に 2 種類のグラフで示す。

KOM  
(桜島 高免)

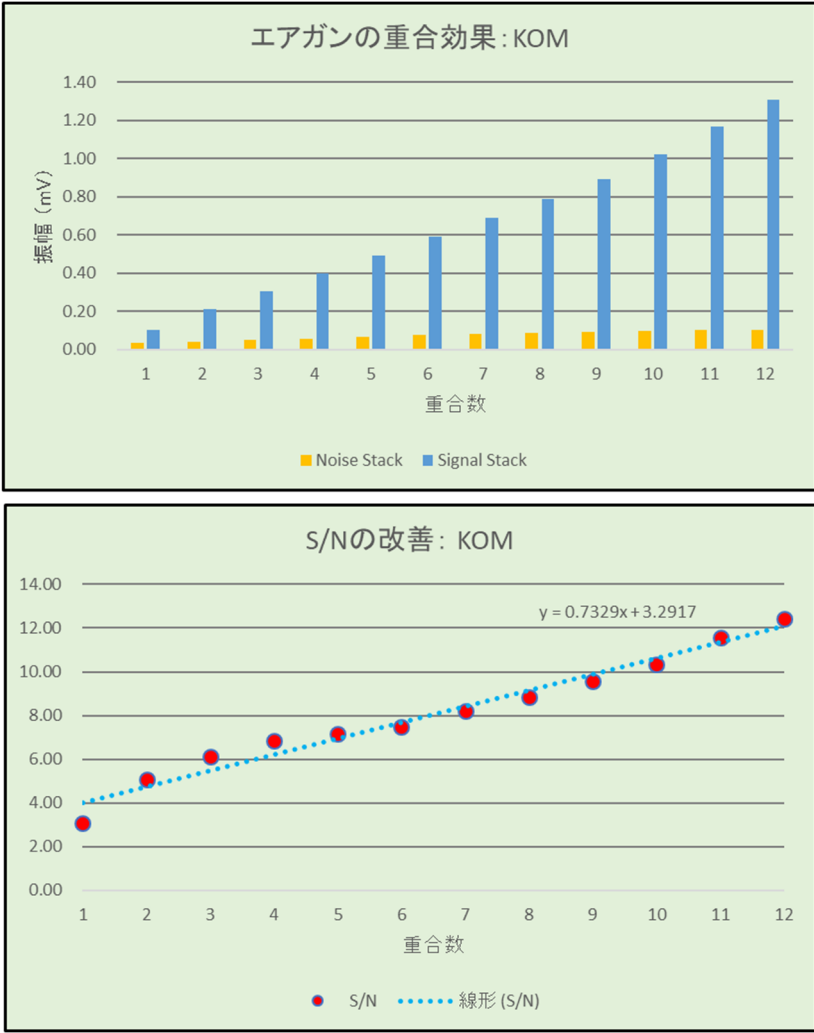


図 1.2-2-29 エアガンデータに対する重合効果と S/N の改善 高免 (KOM) の例

KOR  
(広域郡山)

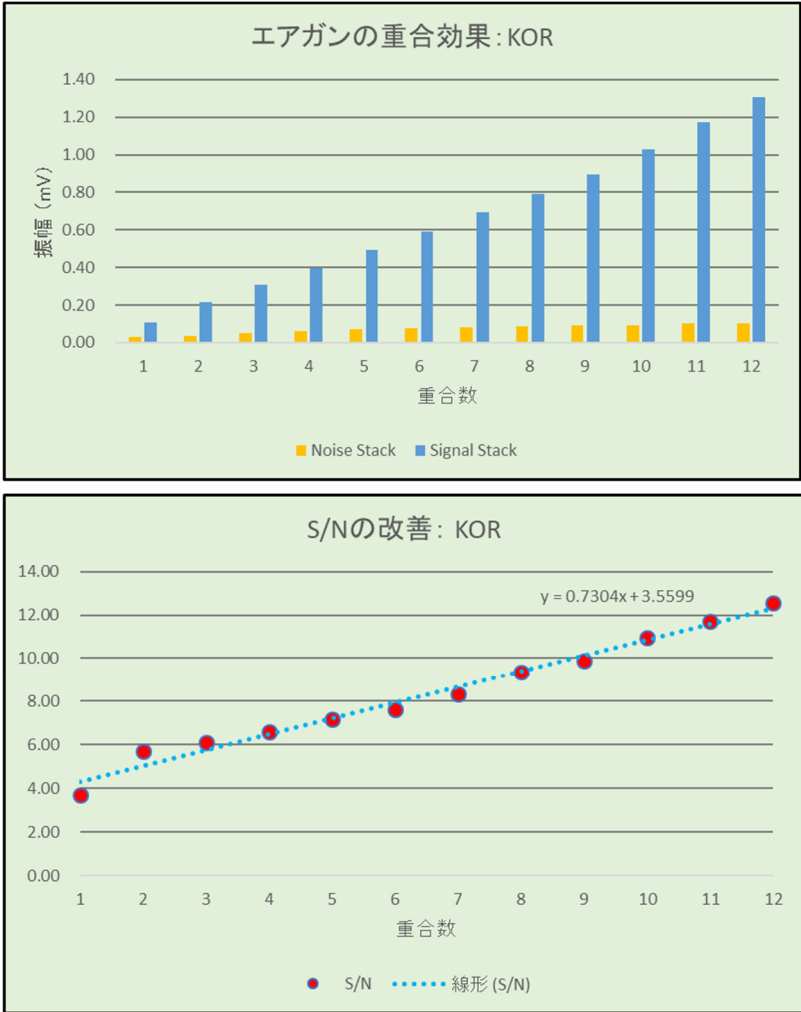


図 1.2-2-30 エアガンデータに対する重合効果と S/N の改善 郡山(KOR) の例

SUZ  
(広域 錫山)

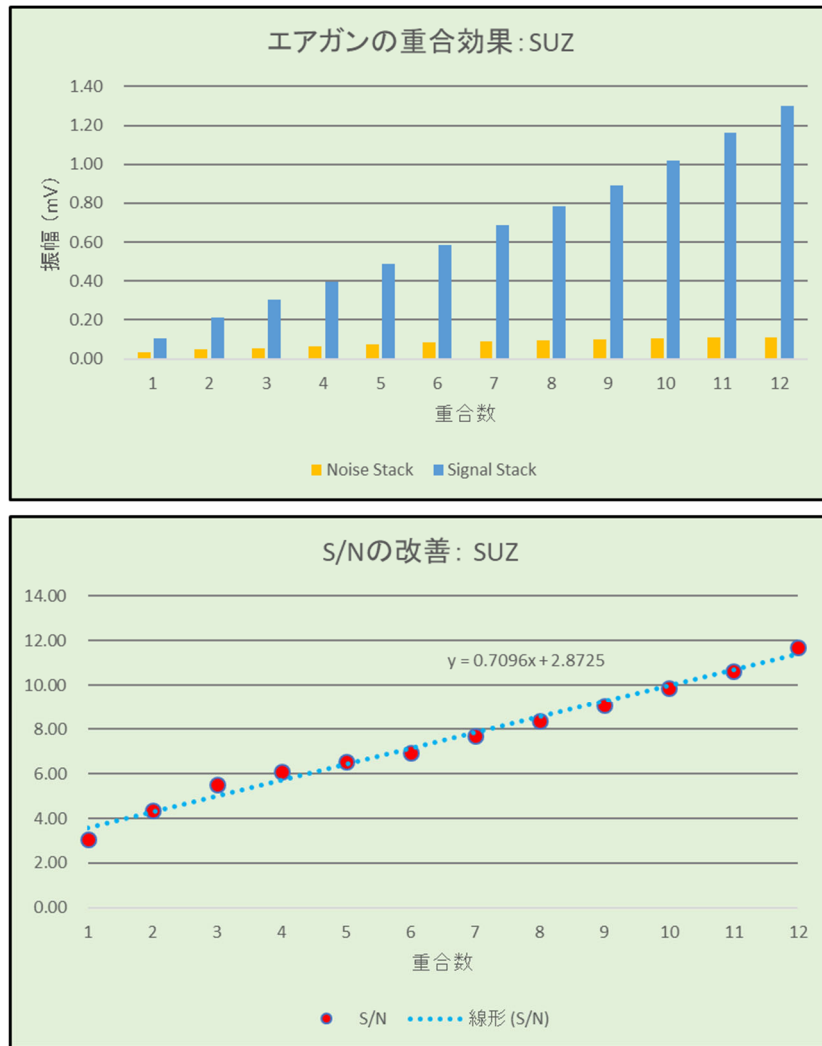


図 1.2-2-31 エアガンデータに対する重合効果と S/N の改善 錫山(SUZ) の例

**FUK**  
(広域 福山)

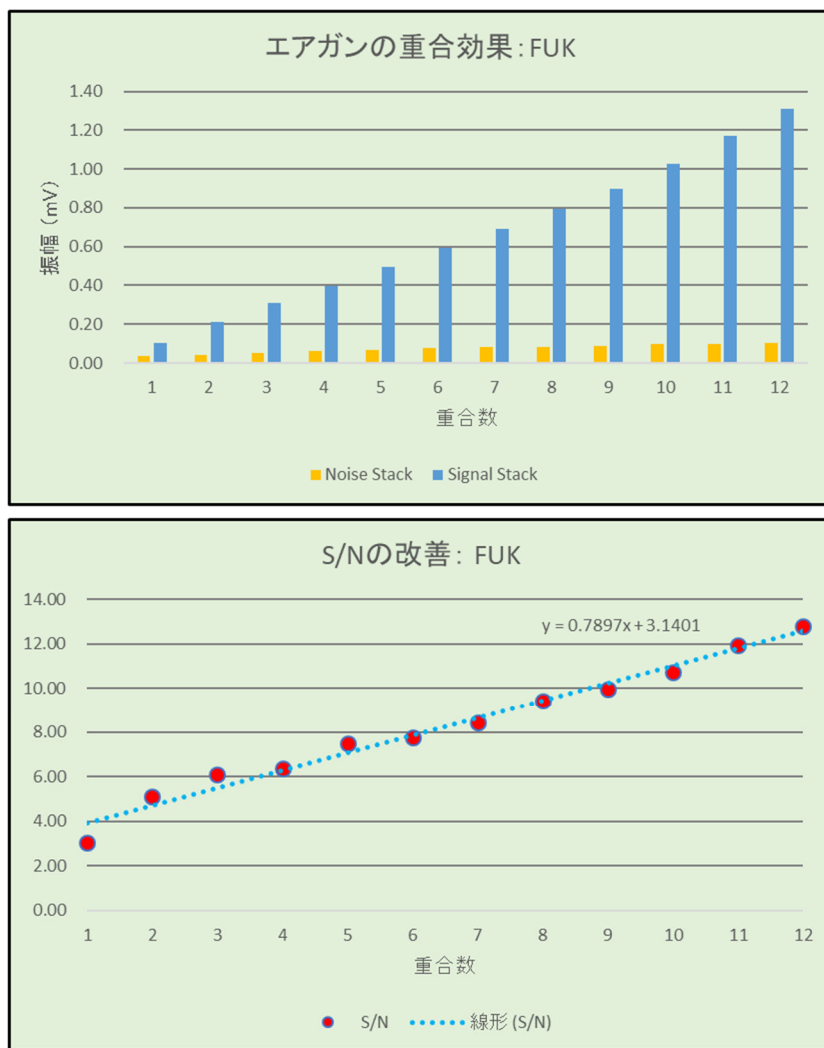


図 1. 2-2-32 エアガンデータに対する重合効果と S/N の改善 福山 (FUK) の例

図 1. 2-2-29 から図 1. 2-2-32 の上段には重合数に対するノイズ (黄土色) とシグナル (薄青色) の振幅 (mV) の変化を棒グラフで表示している。下段の図面には、重合数に対する S/N 比の変化を赤丸で示すとともに、各観測点の S/N (Y) と重合数 (X) の関係の線形回帰による経験式を推定し図中に示した。どの観測点に対してもほぼ線形とみてよい関係が得られた。得られた経験式を観測点毎に列記する。

KOM:  $Y = 0.7329 \cdot X + 3.2917$

KOR:  $Y = 0.7304 \cdot X + 3.5599$

SUZ:  $Y = 0.7096 \cdot X + 2.8725$

FUK:  $Y = 0.7897 \cdot X + 3.1401$

これらの関係式からすべての観測点で 10 回以上の重合を実施すれば、発破と同程度以上の S/N 比を得ることができると考えられる。

a-1-9 人工震源のデータの比較検討結果

大薬量（300kg 超）の発破、大容量（6000in<sup>3</sup>相当）のエアガン、それに大型バイブレータの3種類の大型の人工震源について、地下10km以深からの深部反射波のモニタリングに利用することを想定して、同一の4常設観測点において取得されたデータに基づき比較検討を実施した。

a-1-4項で4台の大型バイブレータの同期発振データについてエアガンや発破データとの比較を単一のショット記録に基づき実施した。バイブレータはそのエネルギー透過力が予想外に悪く、単一のスイープによるバイブレータ観測記録では初動の検出すら困難であった。その後、最大で343回もの発振の観測記録のそれぞれに相互相関処理をほどこした後に垂直重合を実施したものは、オフセット距離が10km未満の観測点においてさえS/N比の顕著な改善は見られず、重合数の増大に伴いS/N比は頭打ちになる傾向が確認された。この傾向を外挿して重合数500回でのS/N比を見積もったが6を下回る結果となった（図1.2-2-19）。また、図1.2-2-16～1.2-2-17に示されるように、オフセット距離が10kmを超える観測点では343回の重合後においてさえ初動信号の到達を確認できていない状況であった。深部反射波の振幅は初動の30%から60%程度と想定される。観測記録における深部反射波のS/N比を3以上に確保する為には初動のS/N比は少なくとも10を確保する必要がある。しかしながら、S/N比10を確保する為には8000回を超える膨大な発振データが必要であると見積もられ、現実的ではない。

バイブレータ振源とエアガン振源を用いた場合の想定発振パターンを図1.2-2-33に示す。バイブレータ振源を用いて高いS/N比が期待される観測を実施するためには、図1.2-2-33下段のように長時間にわたりバイブレータ発振を連続して中断なく行わなければならない。このような発振作業を行った場合、気象庁が火山監視の目的で行っている自然地震観測を人為的に妨害することになり、桜島の火山活動の監視に深刻な影響を及ぼすことが容易に予想される。

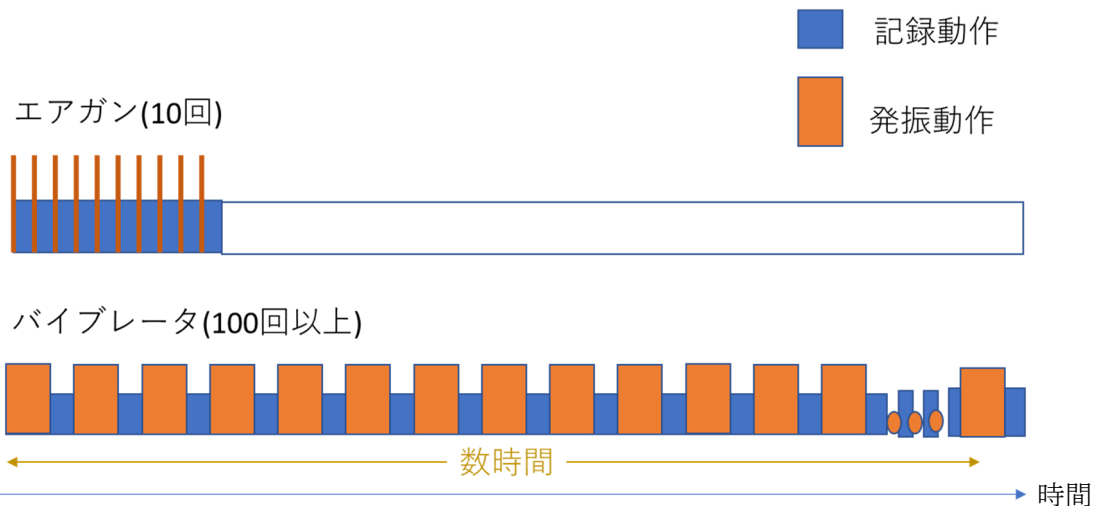


図 1.2-2-33 同じ S/N 比を確保する場合のエアガンの想定発振パターンとバイブレータの想定発振パターン

更に頻繁にモニタリングを実施する事を想定すると、専用のバイブレータに加えて専属のオペレータを確保しておく必要がありコスト的にも難があるものと考えられる。以上の考察に基づき、大型バイブレータはこのモニタリング業務には適さない震源であるとの結論に至り、これ以降の検討から除外した。

a-1-5 項で大容量のエアガンデータについて発破データとの比較検討を行った。まず、マグニチュードに基づき発振エネルギーの推定を試みた。マグニチュードの平均値は発破とエアガンではほぼ同じ値（約 1.2）となり、その標準偏差値はエアガンの方が大きくデータがばらつく結果を示した。震源エネルギーの平均値はエアガンの方が大きくなったが、その標準偏差値はエアガンの方が大きい為、エアガンの方が発破より震源エネルギーが勝っているとは一概にいきれない。それでもエアガンの放出するエネルギーは発破とほぼ同じオーダーのものであることはまちがいない。

引き続き a-1-7 項ではエアガンと発破の S/N 比の比較を RMS 振幅に基づき実施した。その結果、以下の事が分かった。

- ・エアガンの S/N 比は、少なくとも 4 つの常設観測点では、3~4 程度でオフセット距離に依らず良好な値である。
- ・発破の S/N 比は、3~18 と極めて良好であるが、遠い観測点ほど小さい値を示した。ノイズレベルがエアガンデータ取得時（2018）と比べ、若干大きい事を考慮すれば、概ねエアガンの S/N よりは良好な値を示していると言える。

さらに 4 つの常設観測点で観測されたエアガンの発振データに対する重合効果について RMS 振幅に基づき検討した。その結果、10 回以上の重合を実施すれば、発破と同程度の 10 を超える S/N 比が容易に達成できる事が分かった。

#### a-1-10 事前検討結果に関する考察

##### a-1-10.1 地表設置の地震計データから見た浅部地盤のノイズの影響

地表設置の地震計と地下設置の常設観測点のデータの違いを調べる事により、きたる観測に適した地震計の設置方法を検討する。前項までは簡易坑道内に設置された地震計による記録を取り扱ってきたが、ここでは、地表受振点の代表として引ノ平（HIK）を例に挙げ、地表受振点の S/N 比が重合によってどの程度改善されるのかを調査した。この目的のために、発振測線の西側にある 49 ショットのエアガンデータを選別し、ノイズ部分とシグナル部分の RMS 振幅をそれぞれ算定する事により S/N 比を算定し、重合による S/N 比の改善に関して検討した。

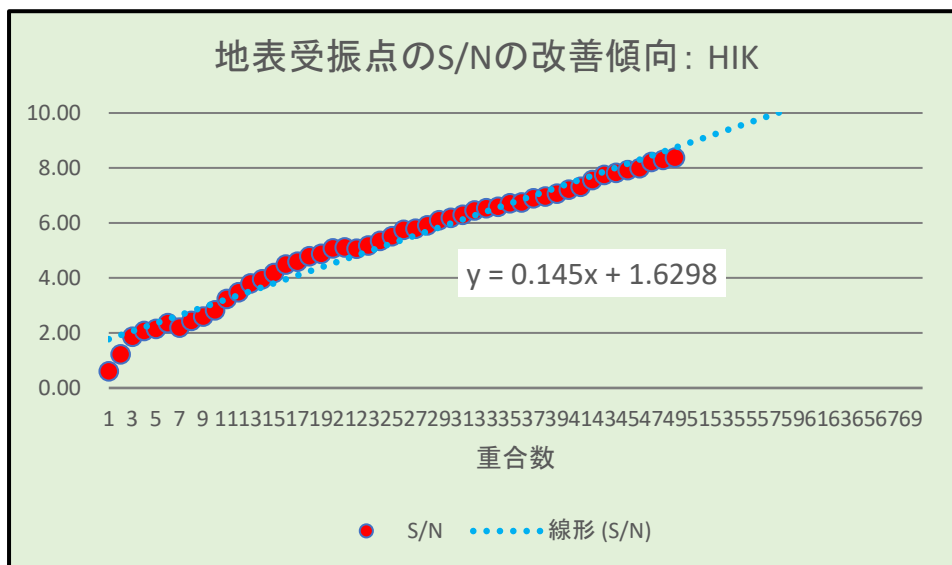


図 1.2-2-34 地表受振点（引ノ平 HIK）の S/N 比の変化：重合数と S/N 比の改善（1）線形近似



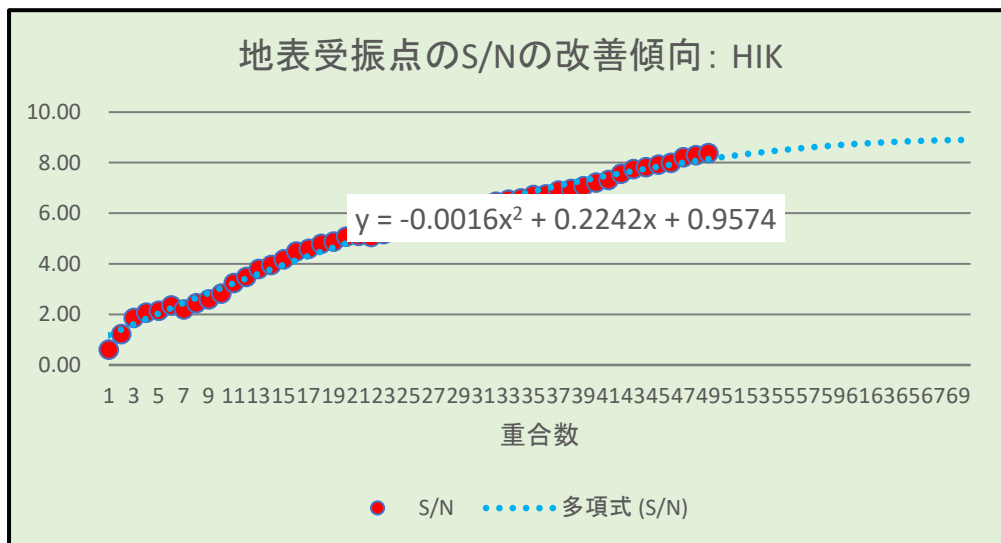


図 1.2-2-35 地表受振点（引ノ平 HIK）の S/N 比の変化：重合数と S/N 比の改善（2）2 次多項式近似

図 1.2-2-34 と図 1.2-2-35 の赤丸は S/N 比の変化（改善傾向）を重合数に対してプロットしたもので、図中には両者の関係を線形近似で当てはめた場合と 2 次の多項式近似で当てはめた場合の関係式をそれぞれ求めて表示した。全体的には、何れの関係式も比較的良くデータの傾向を説明しているが、30 以下の重合数に対しては S/N 比が僅かながら頭打ちになるが見受けられる。多項式近似の曲線はこのような傾向によく合っている。引ノ平(HIK)観測点の単一のショットによる S/N 比は 1 未満であり、図 1.2-2-29～1.2-2-32 に示されるように簡易坑道内に設置された常設観測点 4 点の S/N 比の平均が 3.6 である事を考えれば、HIK 観測点の S/N 比は常設観測点の 4 分の 1 未満である事が分かる。言い換えれば、信号レベルはそれ程変わらない筈なので、S/N 比の違いはノイズレベルの大きさに依存していると考えられ、HIK 観測点のノイズレベルが簡易坑道内の常設観測点の 4 倍程度である可能性が高い。何れにしても、現状のままで 10 に近い S/N 比を得る為には、60～70 ショットの重合が最低限必要である。

地表受振点の S/N 比を改善するためには、地震計を埋設してノイズレベルの低減を図る事が考えられる。しかしながら、埋設によるノイズの低減率については、定量的には知られていないので、次年度の基礎実験の中に盛り込み、地表受振点の設置の際に反映させると共に、深部反射波のモニタリングに必要となる最低限の重合数をその効果も考慮して算定する事とした。

#### a-1-10.2 既存のエアガンデータに検出された後続反射波について

図 1.2-2-36 には、京都大学の桜島観測所において維持管理している 11 箇所の常設観測点の位置を赤丸で示す。これらの観測点の中の南側の 3 点を除く 8 観測点ではオリジナルのエアガン記録の中に図 1.2-2-37 に示す様に、初動の数秒後に不明瞭ではあるが後続波を認める事ができる。

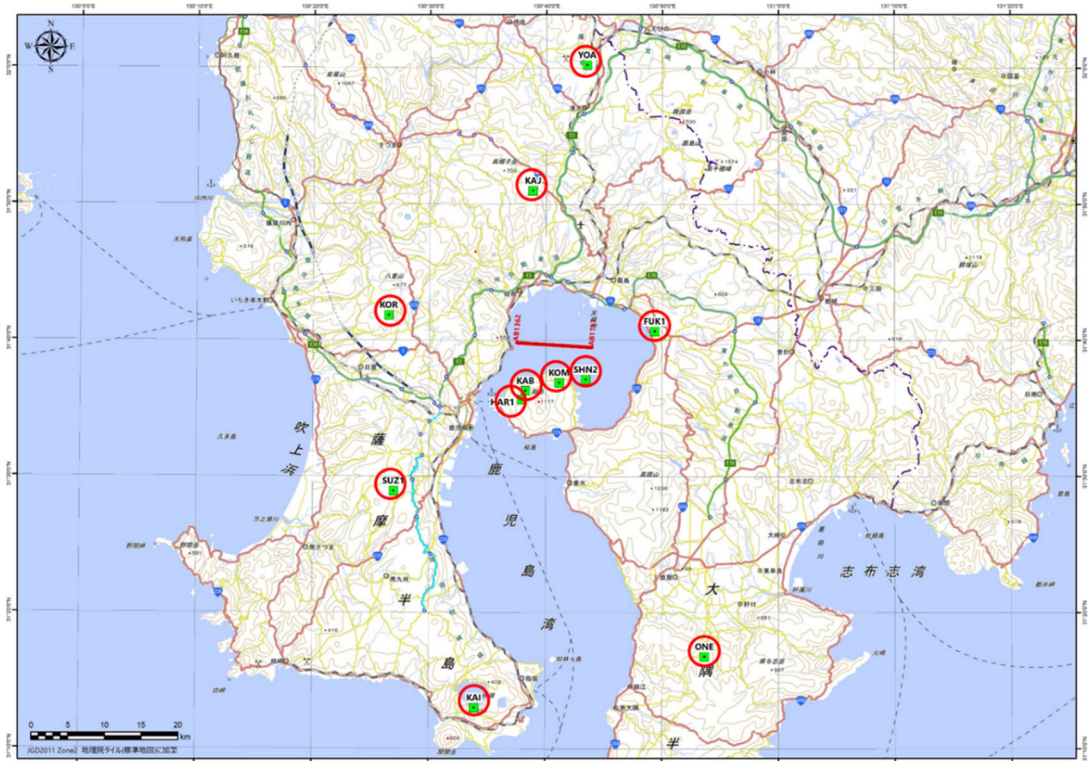


図 1.2-2-36 エアガンデータの中の後続反射波を調査した京都大学の常設観測点

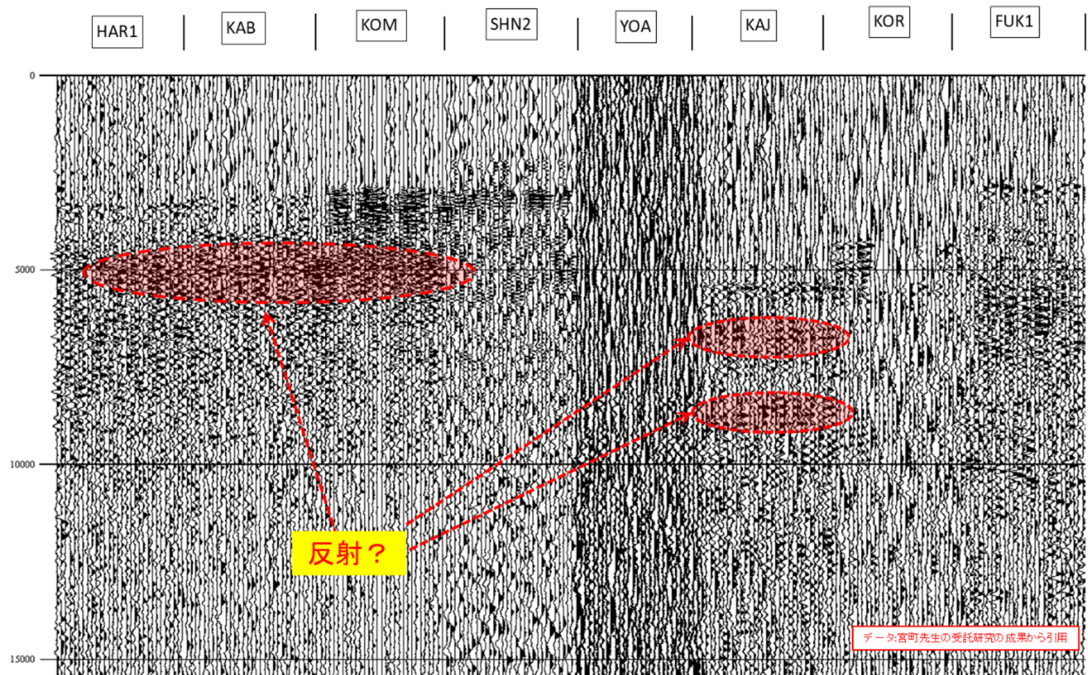


図 1.2-2-37 エアガン発振の Receiver Gather 8 観測点分のオリジナルデータ

図 1.2-2-38~1.2-2-48 には 2-20 Hz のバンドパスフィルタを適用後のエアガンの 15 のショット記録を各観測点について示した。図 2-2-38~2-2-48 は後続波の出現の仕方を大局的に把握するために発振場所を 3 つに分けて東側の 5 ショット、中央部の 5 ショット、西側の 5 ショットと表示した。

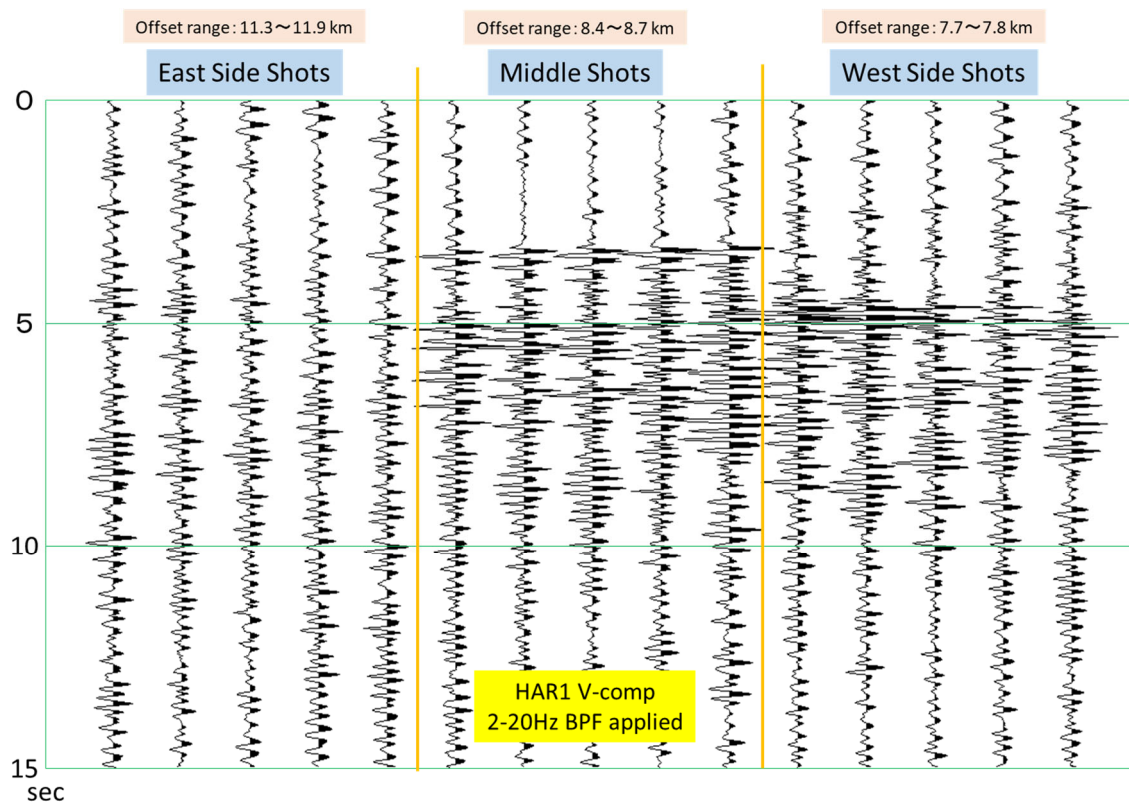


図 1.2-2-38 ハルタ山（HAR1）観測点におけるエアガン発振の 15 ショット記録（2-20Hz BPF を適用）。

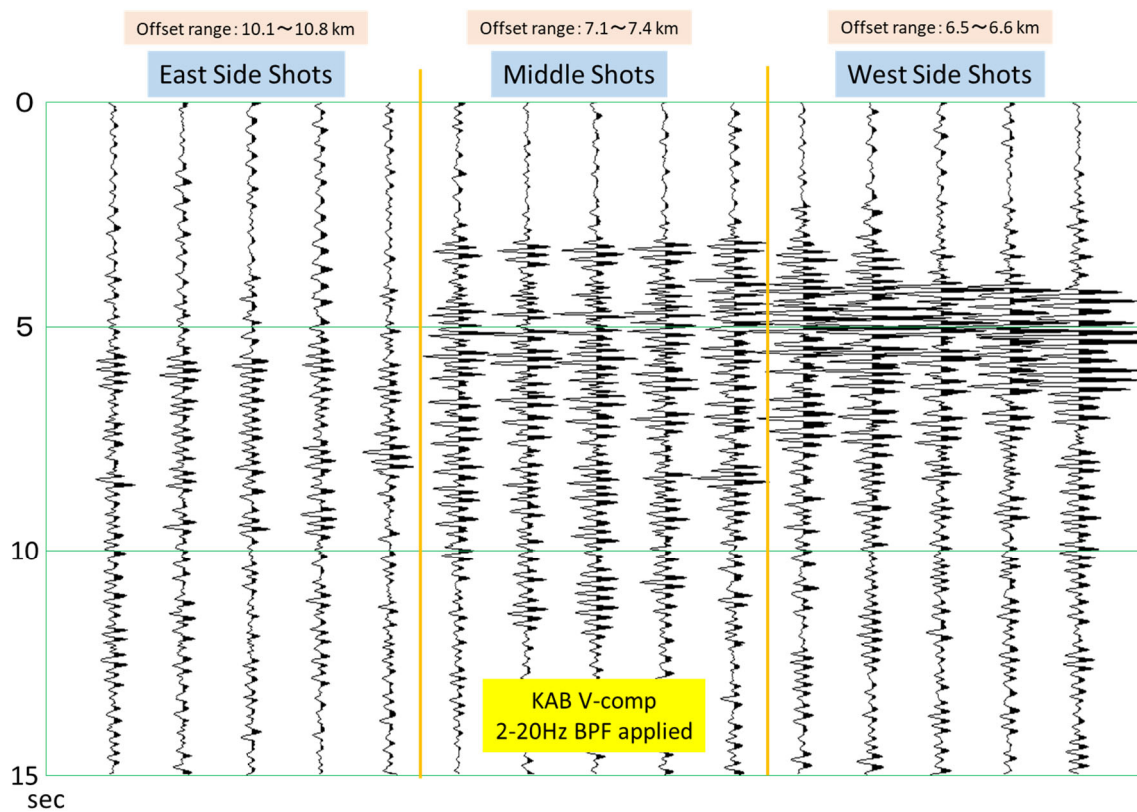


図 1.2-2-39 鹿馬野（KAB）観測点におけるエアガン発振の 15 ショット記録（2-20Hz BPF を適用）

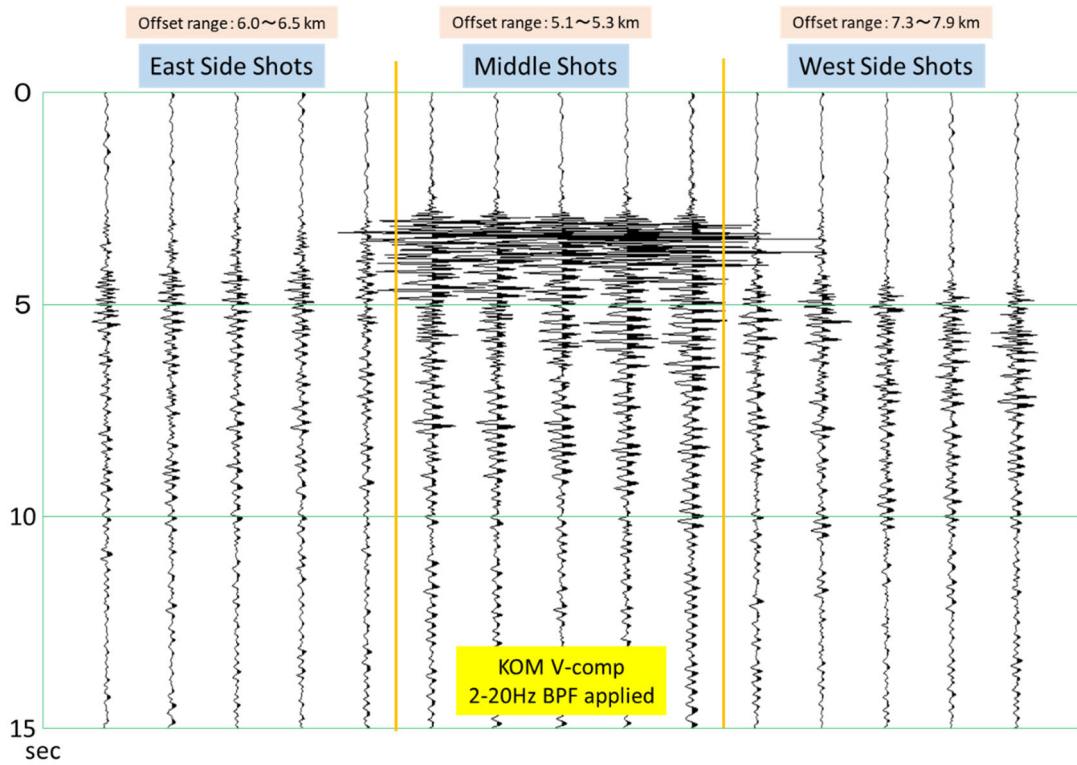


図 1.2-2-40 高免 (KOM) 観測点におけるエアガン発振の 15 ショット記録 (2-20Hz BPF を適用)

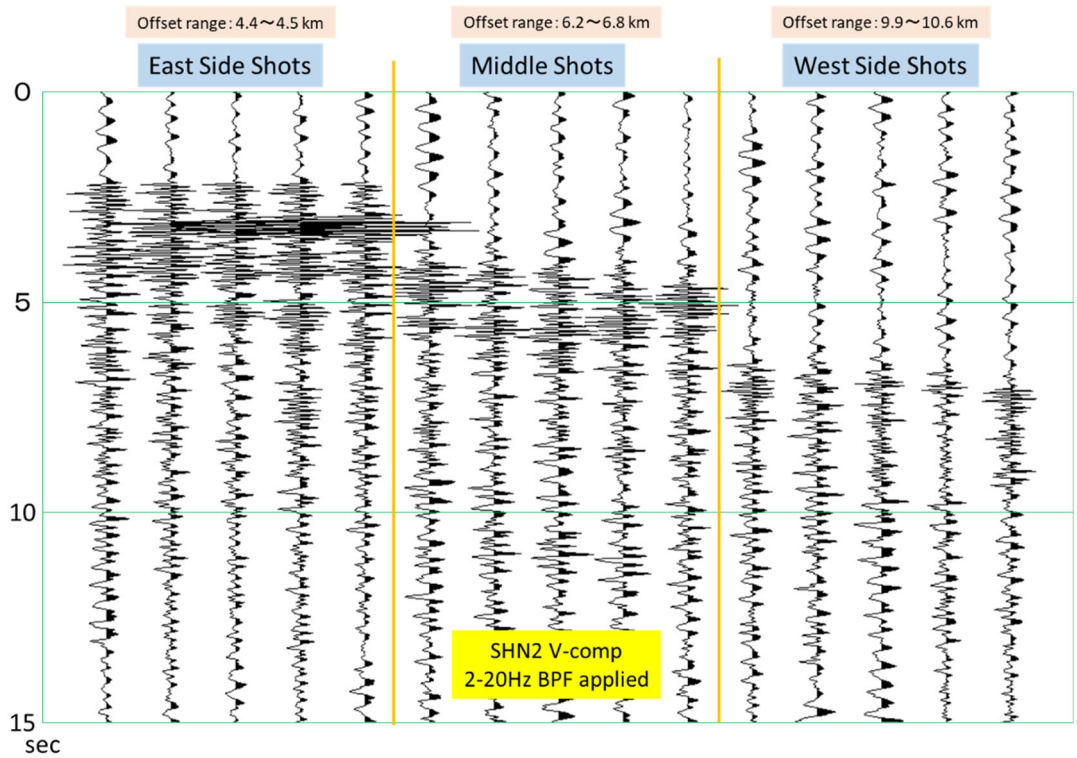


図 1.2-2-41 新島 (SHN) 観測点におけるエアガン発振の 15 ショット記録 (2-20Hz BPF を適用)

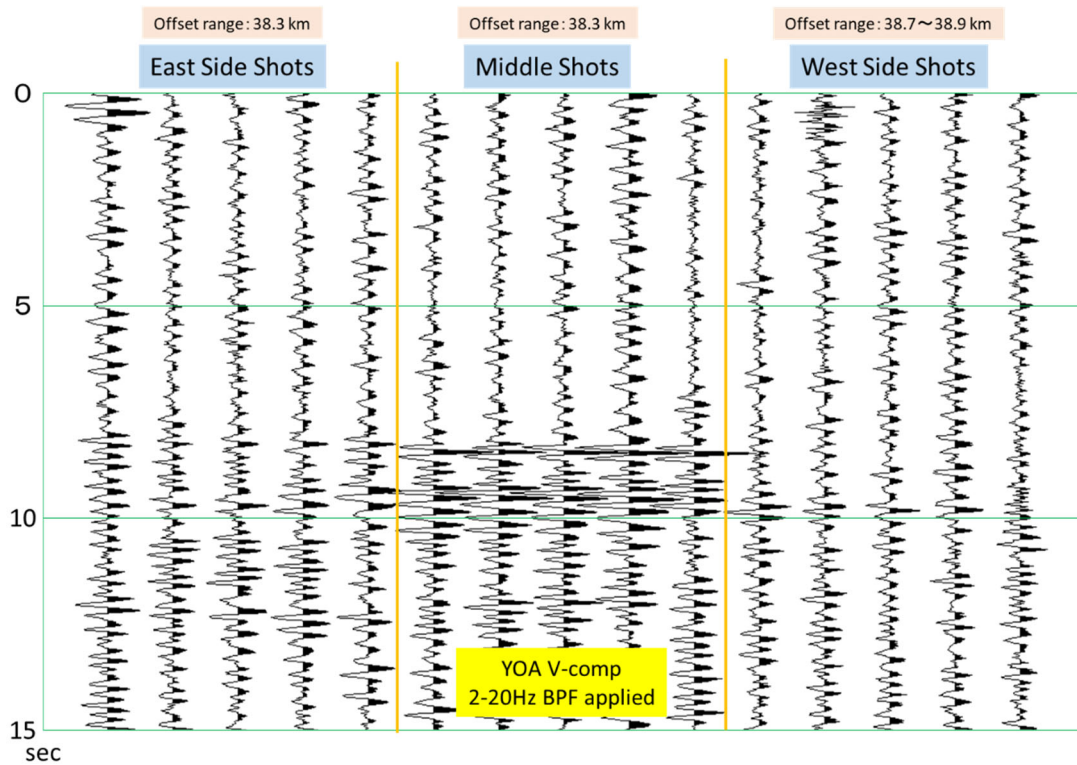


図 1.2-2-42 吉松 A 坑 (YOA) 観測点におけるエアガン発振の 15 ショット記録 (2-20Hz BPF を適用)

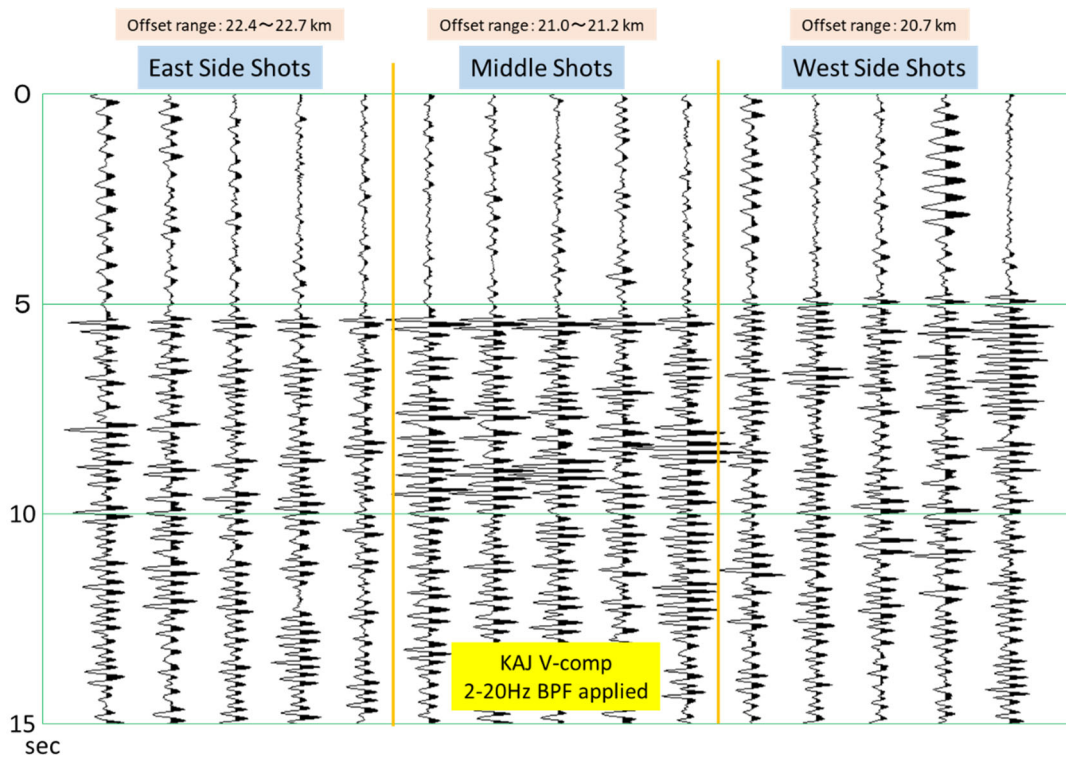


図 1.2-2-43 加治木 (KAJ) 観測点におけるエアガン発振の 15 ショット記録 (2-20Hz BPF を適用)

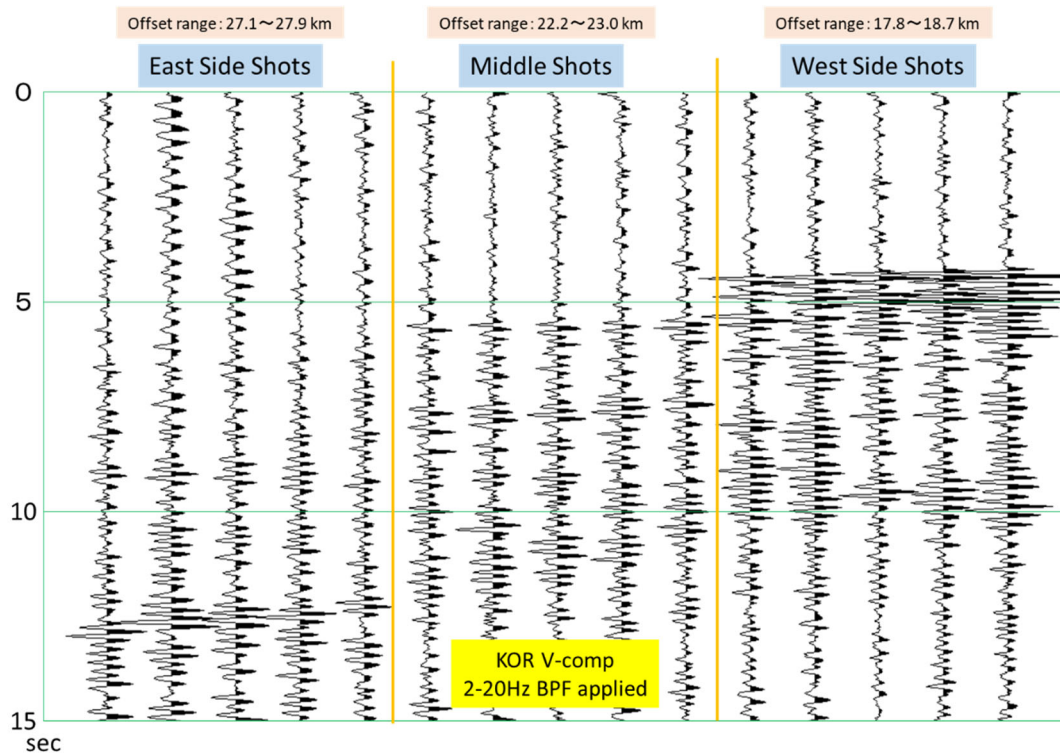


図 1.2-2-44 郡山 (KOR) 観測点におけるエアガン発振の 15 ショット記録 (2-20Hz BPF を適用)

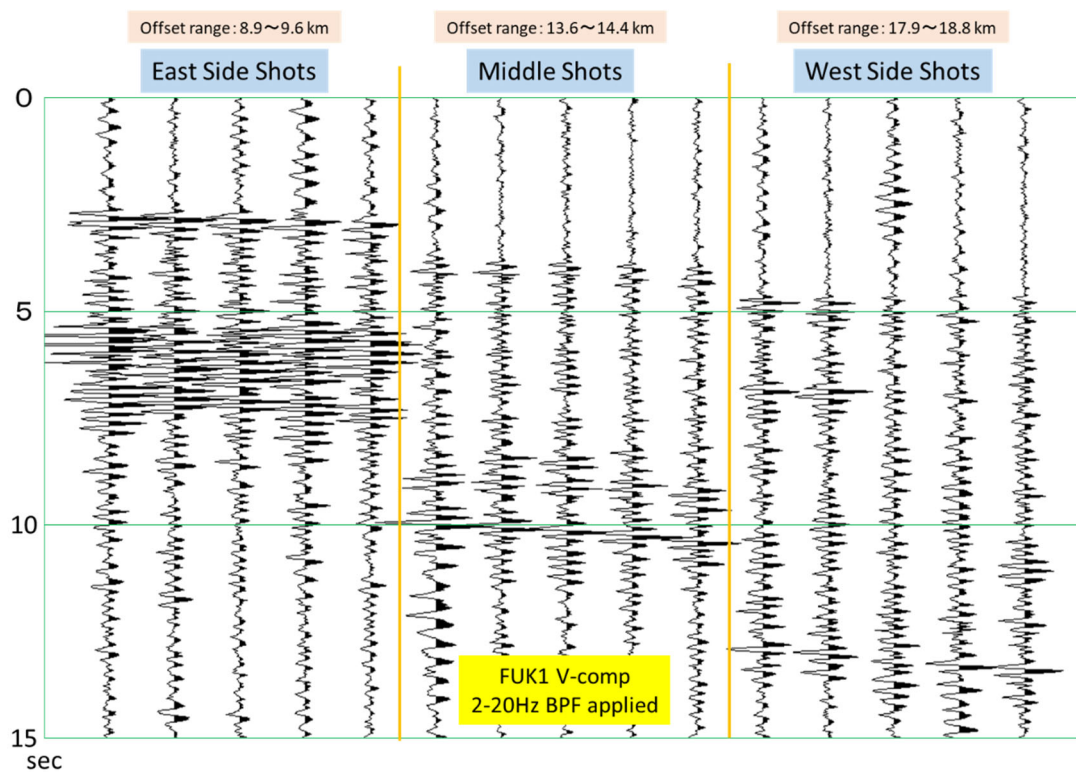


図 1.2-2-45 福山 (FUK1) 観測点におけるエアガン発振の 15 ショット記録 (2-20Hz BPF を適用)。

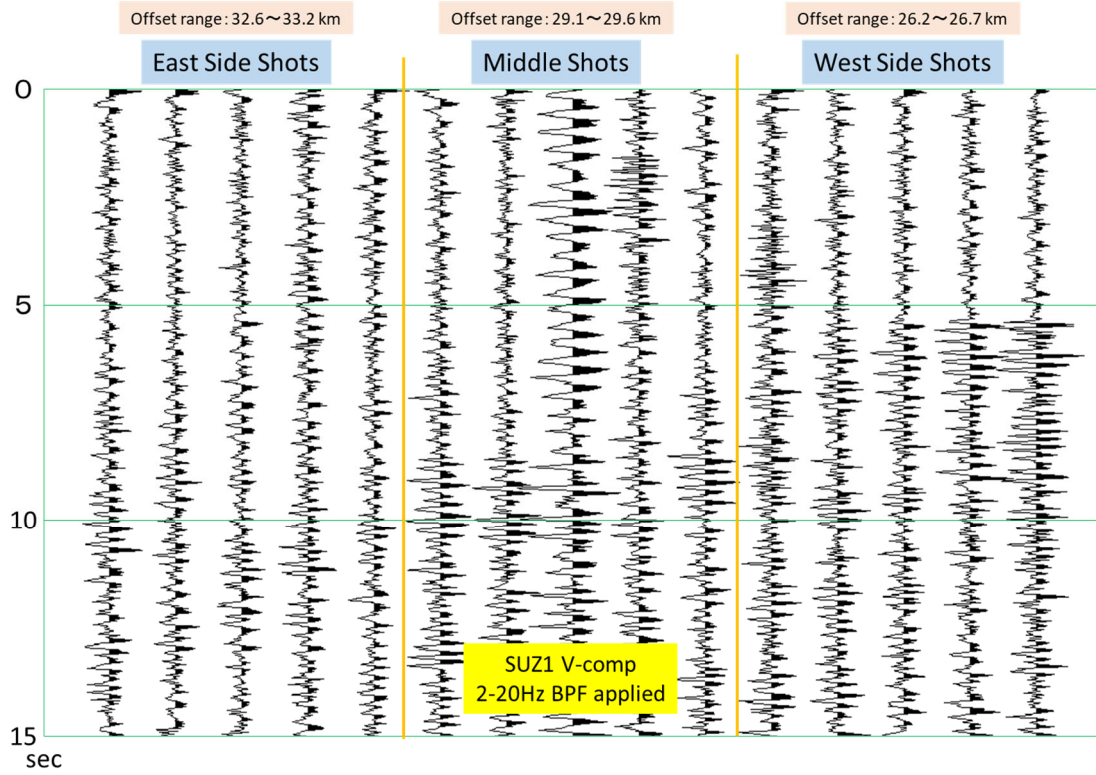


図 1.2-2-46 錫山 (SUZ1) 観測点におけるエアガン発振の 15 ショット記録 (2-20Hz BPF を適用)。

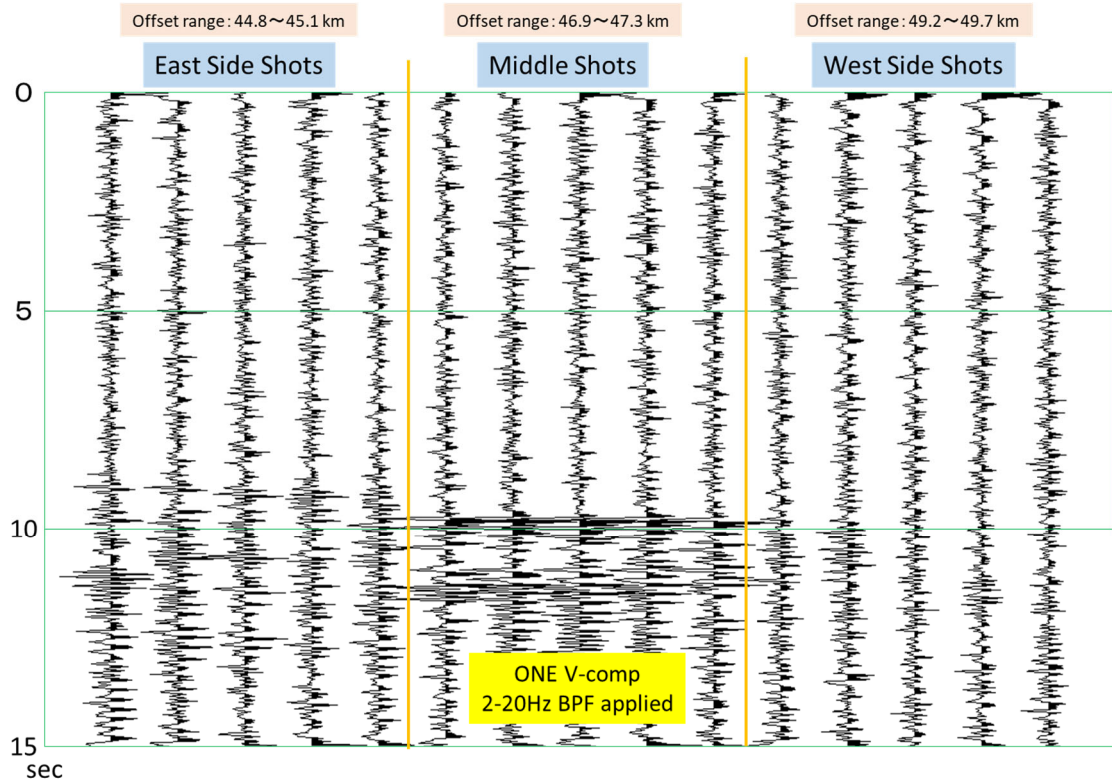


図 1.2-2-47 大根占 (ONE) 観測点におけるエアガン発振の 15 ショット記録 (2-20Hz BPF を適用)

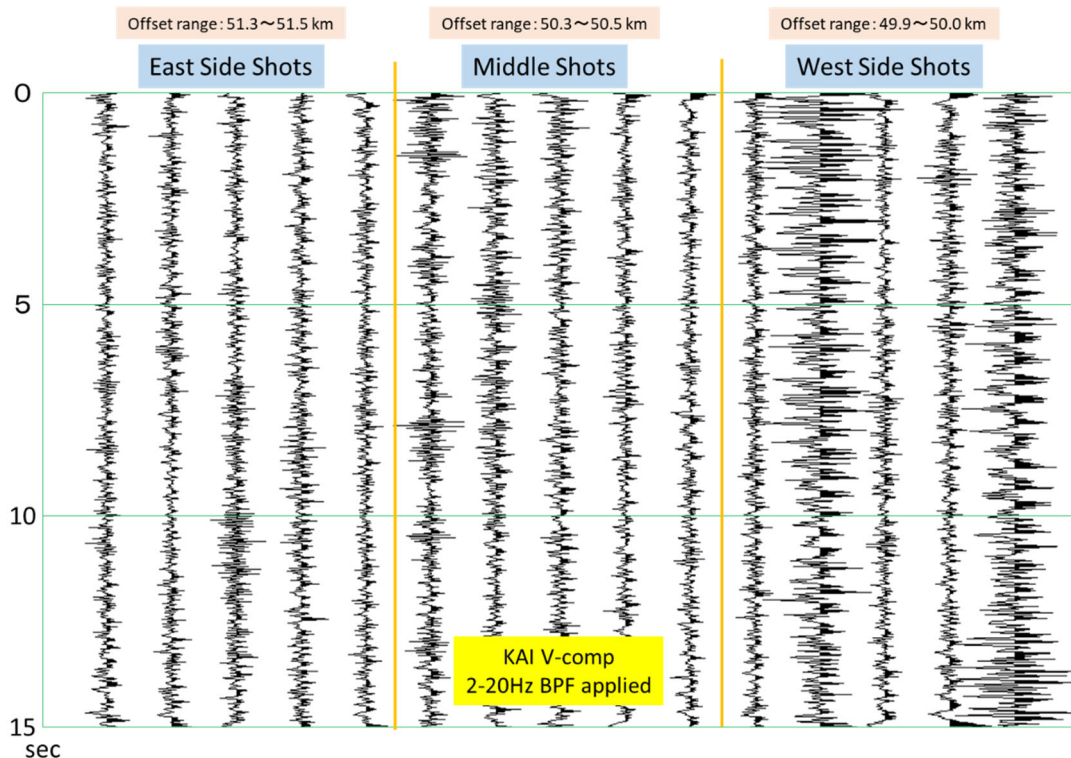


図 1.2-2-48 開聞岳（KAI）観測点におけるエアガン発振の 15 ショット記録（2-20Hz BPF を適用）

以下に、検出された後続波の特徴をまとめる。

- (1) 桜島内の 4 つの観測点（HAR1, KAB, KOM, SHN2）の記録には、初動から 5~7 秒後までの時間に複数の S/N の比較的良好なイベントが見られた。
- (2) 桜島の西側の HAR1（ハルタ山）と KAB（鹿馬野）の 2 観測点では中央部と西側のショットに、中央部東寄りの KOM（高免）観測点では中央部のショットに、東側の SHN2（新島）観測点では東側のショットに顕著なイベントが見られた。オフセット距離は、4~9km の範囲であった。
- (3) 始良カルデラの北側に位置する 2 つの観測点（YOA, KAJ）では、初動から 5 秒後までの時間に複数のイベントが見られた。オフセット距離は、KAJ（加治木）が 21~23km で、YOA（吉松 A）が 38km であった。
- (4) 桜島の西北西に位置する KOR（郡山）観測点では、初動から 5~6 秒後までの時間に複数のイベントが見られた。オフセット距離は 18~28km の範囲であった。
- (5) 桜島の東北東に位置する FUK（福山）観測点では、初動から 5~8 秒後までの時間に複数のイベントが見られた。オフセット距離は 9~19km の範囲であった。
- (6) 桜島の南西に位置する SUZ（錫山）観測点では、中央部と西側のショットに対し、初動から数秒後に不明瞭ながらイベントが見られた。オフセット距離は 26~30km の範囲であった。
- (7) 桜島の南南東に位置する ONE（大根占）観測点では、東側と中央部のショットに対し、初動から 2~3 秒後に顕著なイベントが見られた。オフセット距離は 45~47km の範囲であった。



(8) 桜島の南南西に位置する KAI (開聞) 観測点では、唯一いずれのショットに対しても初動すら検出できていなかった。オフセット距離は 50~52km の範囲であった。

これらの後続波がどの深度からの PP 或いは PS 反射波であるかは現時点では不明であり、今後の解析により明らかになるものと期待される。6000in<sup>3</sup> のエアガンのデータには、深部からの反射波と思われる数多くのイベントが予想以上に広範囲の観測点で検出されており、エアガン震源がモニタリングに適した震源である事を直接的に示した観測事実となった事は極めて重要である。

#### a-1-10.3 最適な震源の容量の選別方法

以上述べてきた様に、6000in<sup>3</sup> のエアガンは震源の透過力の面でも S/N 比の面でも、エアガン震源は大薬量の発破に代替できる震源である。

現実的なモニタリングのツールとして、継続的な発振作業を環境に調和させながらトラブルなく行っていく為には、エアガンアレイをシンプルな形状とすると共に、その総容量を可能な限り小さく設定できるのが望ましい。これに関する検討は別の章で記述する

## a-2. 発振方式の検討及びシミュレーション

ここでは、エアガンを長期連続反射法地震探査に用いる震源として扱い、エアガンアレイモデリングソフトウェア GUNDALF を用いて、各種エアガンパラメーターと震源の性能に関する検討を行う。一般的にエアガンは海域で使用されるが、本検討においては陸域でエアガンを使用することから、エアガン仕様を基礎的な段階から設計する必要がある。

a-1 項で用いたデータの取得時に使われた総容量 6000cui エアガンアレイを再評価し、その上で、エネルギー透過力/調達の可否/費用対効果等の諸条件を総合的に考慮し、本モニタリングに適したエアガンの発振方式を検討する。

### a-2-1 エアガンアレイモデリングソフトウェア GUNDALF について

GUNDALF はエアガンアレイ波形モデリングソフトウェアである。仮定ではなく実波形観測データに基づきモデルに与える数値を決定しているため、モデルと実際の乖離が少なく、個別のエアガン震源の性能を同一の土俵で比較を行うことが出来る利点がある。また、新規にエアガンアレイを設計する際、各種エアガンパラメーターを条件に応じて設定可能であることから、本検討ではエアガン震源のエネルギーの評価と設計に GUNDALF を用いる。

特に指定が無ければ GUNDALF でモデリングした震源波形は、エアガンから十分な水深がある海底の遠方の点で観測したと仮定した Far Field での震源波形となる。

表 1. 2-2-3 チャンバー容量に応じたエアガン性能比較表

	1500cui	1250cui
Number of guns	1	1
Total volume (cu.in.)	1500.0 ( 24.6 litres)	1250.0 ( 20.5 litres)
Peak to peak in bar-m.	10.3 +/- 0.514 ( 1.03 +/- 0.0514 MPa, ~ 240 db re 1 muPa. at 1m.)	10.4 +/- 0.518 ( 1.04 +/- 0.0518 MPa, ~ 240 db re 1 muPa. at 1m.)
Zero to peak in bar-m.	4.62 ( 0.462 MPa, 233 db re 1 muPa. at 1m.)	4.75 ( 0.475 MPa, 234 db re 1 muPa. at 1m.)
RMS pressure in bar-m.	0.524 ( 0.0524 MPa, 214 db re 1 muPa. at 1m.)	0.512 ( 0.0512 MPa, 214 db re 1 muPa. at 1m.)
Primary to bubble (calculated zero to peak)	1.67 +/- 0.155	1.69 +/- 0.156
Bubble period (s.)	0.169 +/- 0.00322	0.158 +/- 0.00304
Maximum spectral ripple (dB): 10.0 - 50.0 Hz.	24.9	29.4
Maximum spectral value (dB): 10.0 - 50.0 Hz.	207	207
Average spectral value (dB): 10.0 - 50.0 Hz.	197	197
Total acoustic energy (Joules)	7757.9	7884.3
Total acoustic efficiency (%)	2.3	2.8

	1000cui	750cui
Number of guns	1	1
Total volume (cu.in.)	1000.0 ( 16.4 litres)	750.0 ( 12.3 litres)
Peak to peak in bar-m.	10.4 +/- 0.521 ( 1.04 +/- 0.0521 MPa, ~ 240 db re 1 muPa. at 1m.)	10.4 +/- 0.519 ( 1.04 +/- 0.0519 MPa, ~ 240 db re 1 muPa. at 1m.)
Zero to peak in bar-m.	4.86 ( 0.486 MPa, 234 db re 1 muPa. at 1m.)	4.94 ( 0.494 MPa, 234 db re 1 muPa. at 1m.)
RMS pressure in bar-m.	0.499 ( 0.0499 MPa, 214 db re 1 muPa. at 1m.)	0.477 ( 0.0477 MPa, 214 db re 1 muPa. at 1m.)
Primary to bubble (calculated zero to peak)	1.68 +/- 0.158	1.68 +/- 0.159
Bubble period (s.)	0.146 +/- 0.00282	0.13 +/- 0.00256
Maximum spectral ripple (dB): 10.0 - 50.0 Hz.	28.5	31.8
Maximum spectral value (dB): 10.0 - 50.0 Hz.	206	205
Average spectral value (dB): 10.0 - 50.0 Hz.	196	196
Total acoustic energy (Joules)	7996.3	7852.4
Total acoustic efficiency (%)	3.5	4.6

条件:型式1500LL, エアガン深度10m, 2000psi

### a-2-2 総容量 6000cui エアガンアレイの再評価

a-1 「発振装置方式容量の事前検討」において、総容量 6000cui エアガンアレイは十分な透過力を持つことが示された。以下に 2018 年鹿児島大学の探査（データセット③）において海域で使用された総容量 6000cui のエアガン発振仕様を示す。

- (1) 総容量 : 6000cui

- (2) ガン深度 : 12m
- (3) ガン圧力 : 2000psi
- (4) アレイ構成 : 1500cui×4基 曳航
- (5) 型式 : Bolt社 1500LL

しかしながら、海域ではなく陸域の発振施設で用いられるシステムとしてはサイズが大きいのが現実的に不利な点として挙げられる。実際の総容量 6000cui エアガンアレイの発振構成及びパラメーターに基づき、シミュレーション結果から得られた特徴的な点を以下に列記する。

- (1) 有効周波数帯域はおおよそ 5-30Hz であるが、8Hz に明瞭な深いノッチが存在する。これは、桜島島内の常設観測点で得られた受振データの周波数スペクトルとも符合する。
- (2) 二次バブルの影響が強く、PB 比 (Primary to Bubble Ratio) は 3.0 程度と低い。一般的に PB 比を高くすると受振データの分解能を向上させることができる。
- (3) シミュレーション結果の周波数スペクトルを見ると、有効周波数帯域の所々にノッチがみられる。
- (4) 総弾性波エネルギー出力 (Total Acoustic Energy) は 171566.4(J) であり、発振効率 (Percentage of total potential energy appearing as acoustic energy) は 12.6% であった。

これらの結果から(1)-(3)についてそれぞれ改善し、(4)については極力総容量 6000cui の総弾性波エネルギー出力を同等に保ち、さらに低周波領域の周波数特性を改善したエアガンアレイを設計すれば良いことが解る。

#### a-2-3 エアガンパラメーターとエアガン性能・特性

主要なエアガンパラメーターとエアガン震源の性能・特性を以下に列記し、それぞれのパラメーターに関してエアガン震源の性能・特性に与える影響について述べる。

〈エアガンパラメータ〉

- ・チャンバー容量
- ・ガン深度
- ・ガン圧力
- ・アレイ

〈エアガン震源の性能・特性〉

- ・弾性波エネルギー出力
- ・周波数特性
- ・P/B 比

##### a-2-3.1 チャンバー容量

チャンバー容量は圧縮空気を蓄える体積(単位:in<sup>3</sup>,Litter)で表される。エアガンを複数用いてアレイ化した場合は、エアガン複数基の総容量となる。当然、チャンバー容量が大きくなれば放出される弾性波エネルギーは大きくなる傾向にあるが、ガン深度・ガン圧力・ガン型式とも関連があり単純な総和にはならない。同一のエアガンタイプ(型式:Bolt社 1500LL, シングル)を水深 10m/ガン圧力 2000psi の同一条件で発振した結果を表 1.2-2-3 及び図 1.2-2-49 に示

す。チャンバー容量と震源波形の周波数特性には明確な相関があり、チャンバー容量が大きくなれば震源波形は低周波側にシフトする。一方、シングルガンにおいて結果はエネルギー出力とチャンバー容量の大きさに関して単純な比例関係を認めることはできなかった。つまり、チャンバー容量のみがガンが放出するエネルギーの代表的なパラメータとは言い切れず、その他のパラメータも総合的に考慮する必要があることを示唆している。

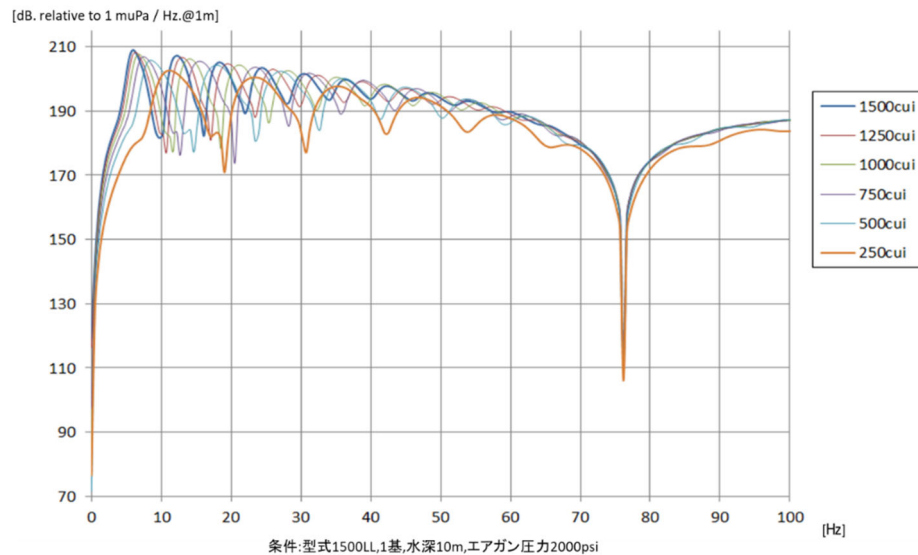


図 1.2-2-49 チャンバー容量と震源波形周波数特性

#### a-2-3.2 ガン深度

ガン深度はエアガンのチャンバーポートから水面までの距離である。エアガンが放出した上向きの波が水面で反射して直達波と干渉し、特定の周波数成分を抑圧し有効周波数帯域を制限する。また、水中に放出された圧縮空気が静水圧と等しくなるまでバブルルームは一瞬で膨張し、振動をしながらバブルルームは崩壊していく。バブルルームのサイズを決定する主要なパラメーターがガン深度である。

同一の条件でガン深度を変化させたグラフを 図 1.2-2-50 及び図 1.2-2-51 に示す。

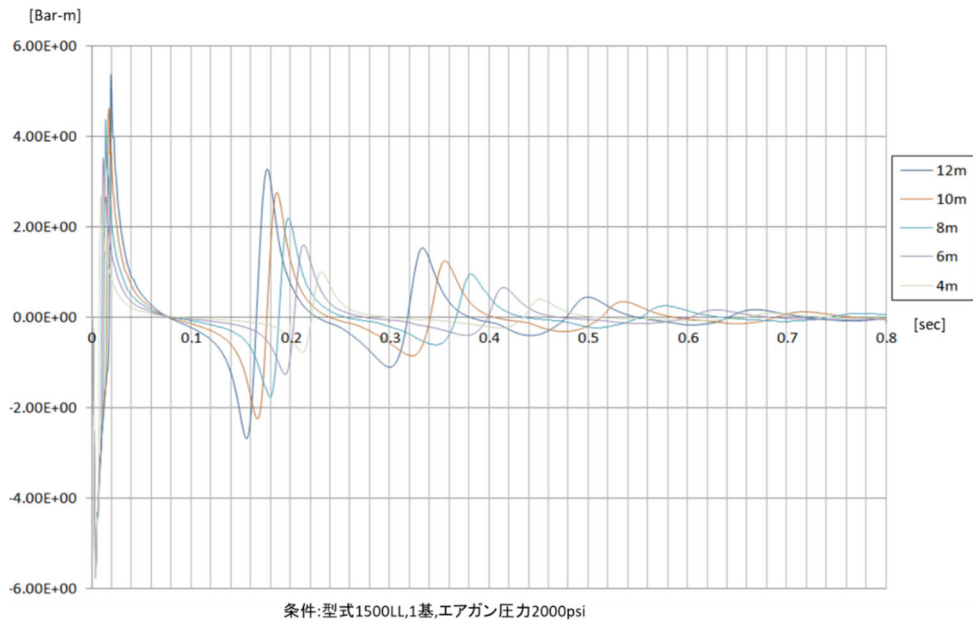


図 1. 2-2-50 ガン深度と震源波形

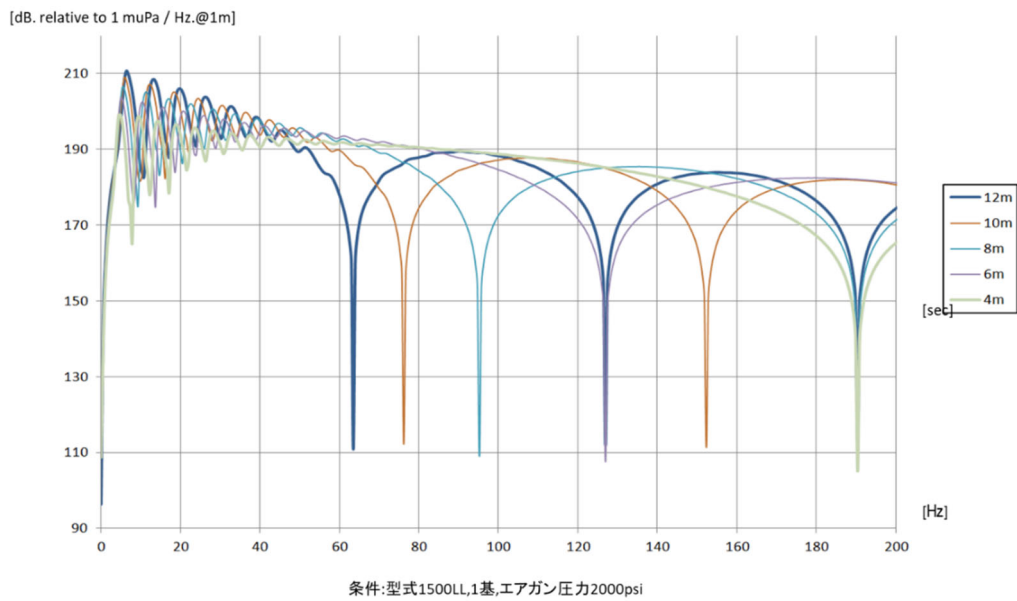


図 1. 2-2-51 ガン深度と震源波形周波数特性

ガン深度が浅くなるとバブルルーム周囲にかかる静水圧が低下し、バブルルームの崩壊が早くなる為、バブル波形の振幅が低下する。このとき周波数領域においてノッチ周波数は高周波数側にシフトする。一方、ガン深度が浅いほど総弾性波エネルギー出力は小さくなる。極端な例えではあるが、チャンバー容量 1500(cui)のガンをガン深度 4m に設定すると総弾性波エネルギー出力はマイナス 4710(J)となり震源としての用をなさない。従って、ガン深度を浅く設定するとバブルは抑制され、ノッチ周波数は高周波領域にシフトして震源波形の分解能は向上するが、総弾性波エネルギー出力は低下する。

つまり、ガン深度の決定にあたり震源波形の分解能と透過力、総弾性波エネルギー出力はトレードオフの関係にあるといえる。陸上発振施設的设计に当たっては、ガン深度の設定がピット掘削コストに効いてくるが、同時にエアガンの透過力も十分に考慮する必要がある。

### a-2-3.3 ガン圧力

エアガンを発振する空気圧(単位:psi)をガン圧力と呼び、通常 2000psi の圧力で発振される。エアガンは圧縮空気を一瞬にして放出し弾性波を発生させる為、同時に発生する衝撃波が発振施設に損傷を与えることは容易に想像できる。例えば、同一の条件下(ガン深度、チャンバー容量)でガン圧力のみを変化させた場合、図 1.2-2-52 に示すようにガン圧力の低下に伴い総弾性波エネルギー出力も下がり、周波数がより高域にシフトする。今回のモニタリングでは 10Hz より下の周波数帯域が特に重要なので、ガン圧力を絞る際は有効周波数帯域を損なわないような配慮が必要である。

[dB. relative to 1 muPa / Hz.@1m]

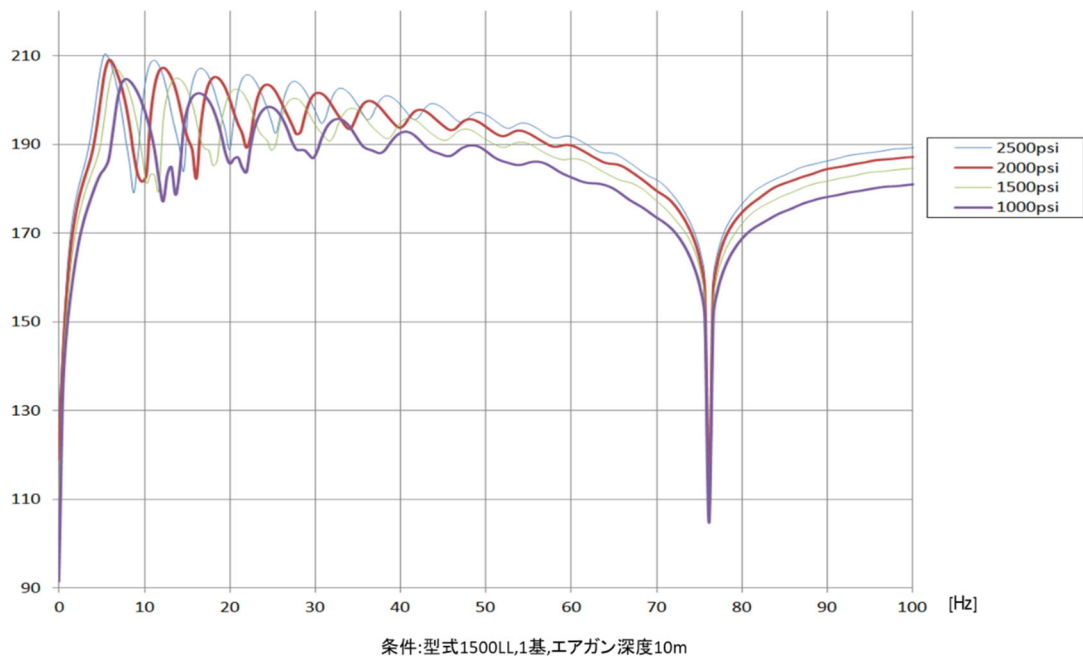


図 1.2-2-52 ガン圧力と震源波形周波数特性

### a-2-3.4 クラスタ/アレイ化

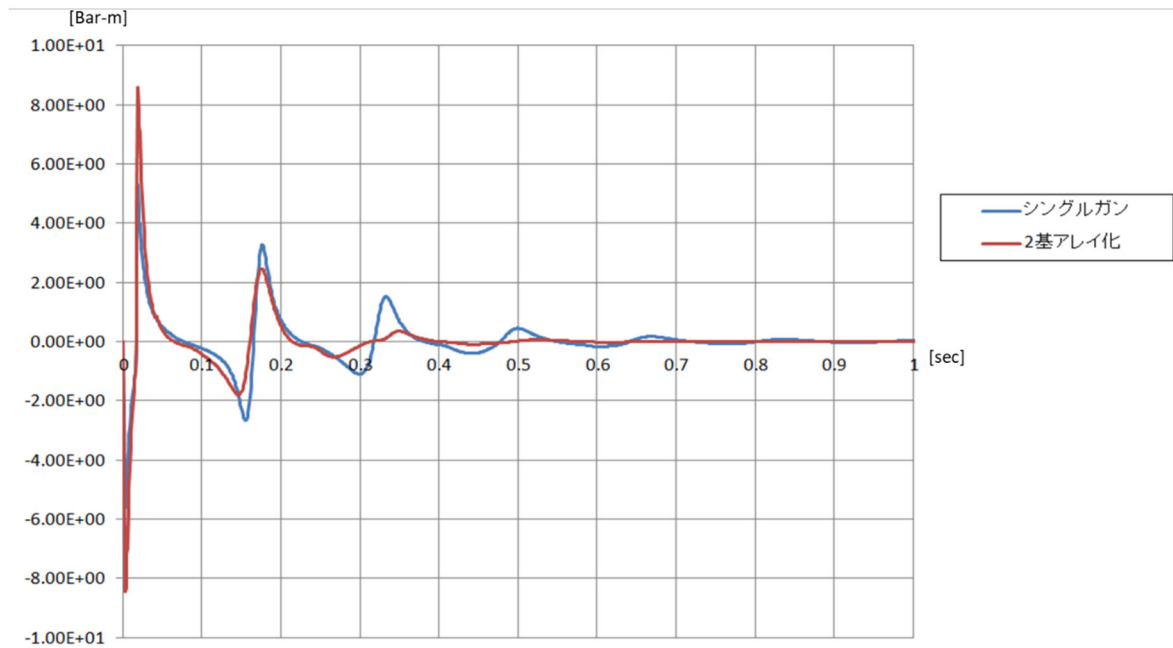
震源波形の分解能向上を図る手法としてクラスタ/アレイ化がある。これはエアガンを複数基組み合わせることでエアガン同士の相互作用を励起し、発振エネルギーの増大とともに異なるバブルタイミングをもつ震源波形を加算することによってバブルが抑制される効果が生ずる。

クラスタ/アレイの有効性を示す例として、ガンの総容量が同じ①1500cui, 1基, 水深 12m, 2000psi と②750cui, 2基, 水深 12m, 2000psi の各性能比較、波形及び周波数特性を表 1.2-2-4, 図 1.2-2-53, 図 1.2-2-54 にそれぞれ示す。

表 1.2-2-4 シングルガンと2基クラスタの性能比較

	シングルガン	2基クラスタ
Number of guns	1	2
Total volume (cu.in.)	1500.0 ( 24.6 litres)	1500.0 ( 24.6 litres)
Peak to peak in bar-m.	10.9 +/- 0.547 ( 1.09 +/- 0.0547 MPa, ~ 241 db re 1 muPa. at 1m.)	17 +/- 0.602 ( 1.7 +/- 0.0602 MPa, ~ 245 db re 1 muPa. at 1m.)
Zero to peak in bar-m.	5.3 ( 0.53 MPa, 234 db re 1 muPa. at 1m.)	8.6 ( 0.86 MPa, 239 db re 1 muPa. at 1m.)
RMS pressure in bar-m.	0.59 ( 0.059 MPa, 215 db re 1 muPa. at 1m.)	0.713 ( 0.0713 MPa, 217 db re 1 muPa. at 1m.)
Primary to bubble (calculated zero to peak)	1.63 +/- 0.157	3.49 +/- 0.319
Bubble period (s.)	0.157 +/- 0.003	0.157 +/- 0.00113
Maximum spectral ripple (dB): 10.0 - 50.0 Hz.	25.9	19.6
Maximum spectral value (dB): 10.0 - 50.0 Hz.	209	207
Average spectral value (dB): 10.0 - 50.0 Hz.	197	201
Total acoustic energy (Joules)	12616.0	52069.7
Total acoustic efficiency (%)	3.7	15.3

条件:型式1500LL, エアガン深度12m, 2000psi



条件:型式1500LL, エアガン深度12m, 2000psi

図 1.2-2-53 シングルガンと2基クラスタの震源波形比較

[dB. relative to 1 muPa / Hz.@1m]

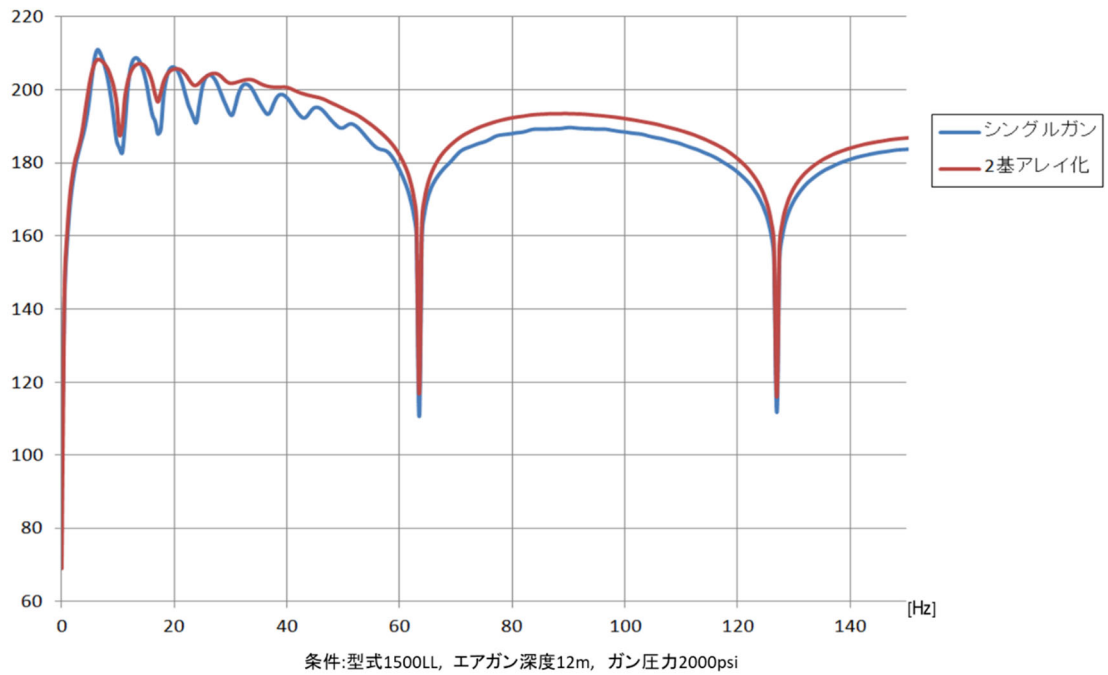


図 1. 2-2-54 シングルガンと 2 基クラスタの震源波形周波数特性

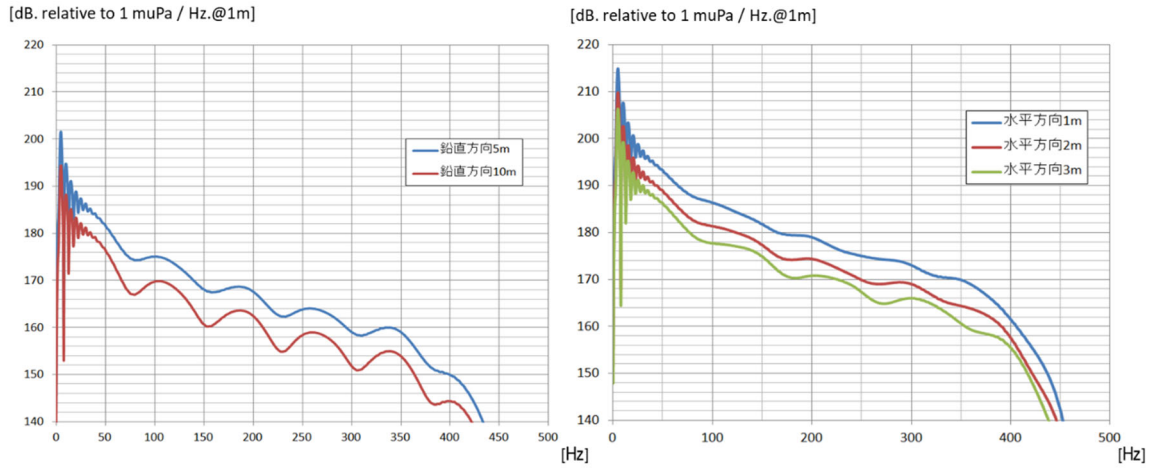
これらの結果から総チャンパー容量が等しければ、クラスタ構成を組んだ方が総弾性波エネルギー出力及びピーク出力が高く、周波数特性も改善されていることが解る。

#### a-2-3.5 エアガンの衝撃波

発振施設設計では、エアガンが発生する衝撃波がピット外壁に損傷を与えないようにエアガンを十分にピット壁から隔離する若しくは、衝撃波に耐えられる壁素材を選定しなければならない。現段階で最終的なエアガン仕様は決定していないが、ここでは衝撃波のレベルの目安を把握する為に、チャンパー容量 1500cui (総容量 3000cui) のガンを 2 基クラスタ構成にして深度 10m, ガン圧力 2000psi で発振した際の各測定点における音圧レベルを GUNDALF でモデリングした結果を図 2-2-55 に示す。測定点はエアガン震源の中心から水平距離で 1m, 2m, 3m, 鉛直下方 5m, 10m に設定した。

隔離距離が大きいと音圧レベルが下がる事が確認でき、低周波帯域にエネルギーが集中する傾向が確認できた。 実際の発振施設設計に用いる圧力値等は基礎実験で取得することになる。





条件:型式1500LL, 総容量3000cui, 2基クラスタ, エアガン深度12m, ガン圧力2000psi

図 1. 2-2-55 各測定点における音圧レベル

#### a-2-4 エアガン発振仕様の考慮事項

今までの検討結果から導き出される、実際のエアガン発振仕様についての考慮事項を以下に列記する。

＜エアガン発振仕様の考慮事項＞

- (1) 総容量を絞っても有効な弾性波エネルギー出力を有するエアガン構成にする必要がある。総チャンバー容量は 6000cui と同等が望ましいが、基礎実験と発振施設設計においてはスペースの制約があり、機材の容積を全体的に圧縮することが求められる。それを可能にする為にクラスタ/アレイ化をして発振効率を高める工夫が必要である。
- (2) 周波数特性に関しては、観測事実に基づき 2-15Hz で有効周波数帯域が確保できるような特性を持ったエアガン構成にする必要がある。総容量 6000cui で見られた 8Hz 付近のノッチを改善し、可能なかぎり平坦な周波数特性を持たせる。
- (3) 費用面から、現実的に運用可能なエアガン(型式:1500LL, 容量 1500cui, 4 基)を基礎として設計する。
- (4) ガン深度については、深度 12m と深度 10m を比較した結果、弾性波エネルギー出力に関して顕著な差が無いことから、基礎実験の実施及び発振施設建設にとってはガン深度が浅くなることが望ましく 10m を当初の設定深度とする。
- (5) 一般的に石油探鉱における対象深度 2km 前後の探査においては震源波形の分解能向上を目的としてクラスタ/アレイを設計する。本モニタリングでは対象深度 15km と深い為、分解能を落とす事もやむを得ず、その代わりに震源エネルギー出力を増大させるような設計とする。

以上の条件が、本モニタリングに用いるエアガン発振仕様に求められる考慮事項であると考えられる。

### a-3. 試験観測におけるエアガン発振仕様提案

ここではこれまでの検討結果を踏まえて具体的なエアガンクラスタ/アレイの構成及びエアガン発振仕様について述べる。本発振仕様案を基にして、試験観測においてはパラメーター条件を変化させて、桜島島内の観測データから震源エネルギー透過力の評価を行う。

#### a-3-1 エアガンクラスタ/アレイの構成

毎ショットの発振波形の再現性は、モニタリングにおける重合効果において重要な要素である。その為にはエアガンクラスタの間をRigid Barと呼ばれるステンレス鋼のフレームで堅牢に固定し、ガン相互の間隔を一定に保ち波形の再現性を高める。加えて、エアガンから放出される圧縮空気放出時のバブルルーム周囲の擾乱は、エアガン本体を予期せぬ方向に振じりエアホース/配線に損傷を与える。その故障リスクを低減するのにもRigid Barによる連結は有効である。

#### エアガン仕様-①

- (1) 総容量 : 4500cui
- (2) ガン深度 : 10m
- (3) ガン圧力 : 2000psi
- (4) アレイ構成 : 1500cui×2 基クラスタ, 750cui×2 基クラスタ
- (5) 型式 : Bolt社 1500LL

#### エアガン仕様-②

- (1) 総容量 : 4500cui
- (2) ガン深度 : 10m
- (3) ガン圧力 : 2000psi
- (4) アレイ構成 : 1500cui×3 基クラスタ トリガン構成
- (5) 型式 : Bolt社 1500LL

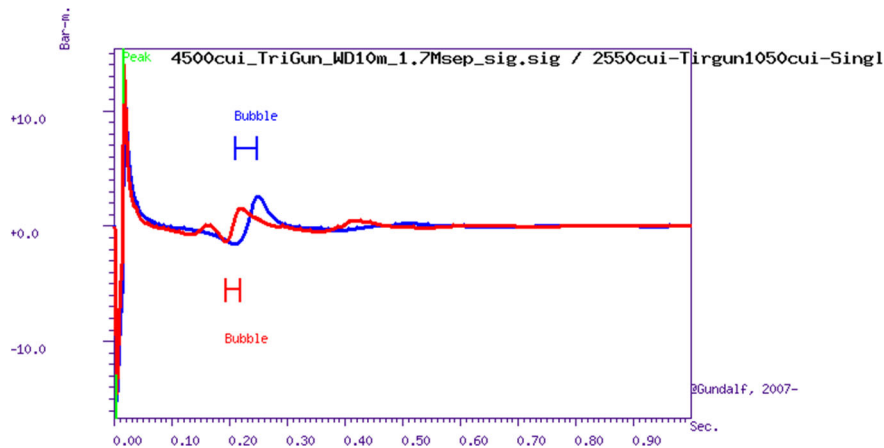
#### エアガン仕様-③

令和2年度の実験は、さしあたりエアガンの保有がある機関からエアガンを借用して実施することが計画された。このような形態でエアガン構成-①を実現するためには、借用するエアガンに装着するチャンバーを新たに調達する必要がある。このような調達は経理上実現が難しいために、下記のエアガン仕様-③を検討した。

- (1) 総容量 : 2550cui
- (2) ガン深度 : 10m
- (3) ガン圧力 : 2000psi
- (4) アレイ構成 : 350cui×3 基クラスタ トリガン構成+1500cui シングル
- (5) 型式 : Bolt社 1500LL

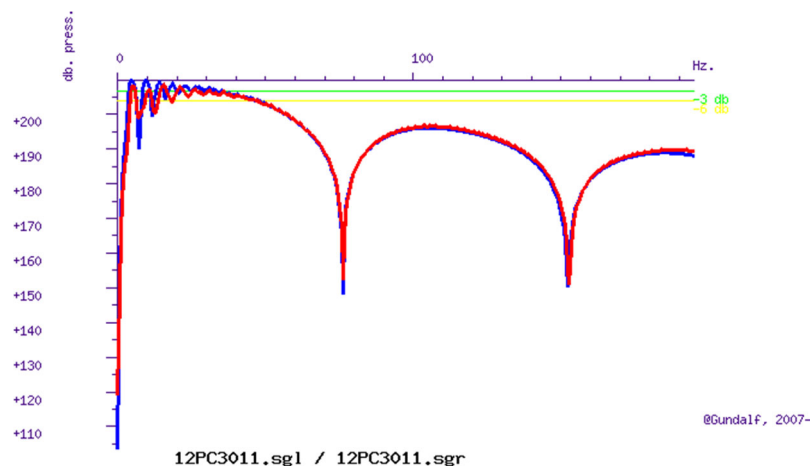
エアガン仕様-③の特徴は1500cuiを1本だけに減らし、その代わりに350cui×3のトリガンを追加したことである。

実際の発振波形などについてはGUNDULFによるシミュレーションが行われ、時間領域の波形と周波数特性ともに確認がなされた。発振波形を図1.2-2-56に、発振波形の周波数特性を図1.2-2-57に示す。エアガン仕様-③は、エアガン仕様-①で見られる7 Hz付近のノッチ（落ち込み）が小さいことがわかる。



Combined signatures 4500cui\_TriGun\_WD10m\_1.7Msep\_sig.sig 2550cui-Tirgun1050cui- Single1500cui\_WD10m\_1.4Msep\_sig.sig

図 1.2-2-56 エアガン仕様-③ 発振波形。青曲線はエアガン仕様-①を示す。



Combined amplitude spectra 4500cui\_TriGun\_WD10m\_1.7Msep\_sig.sig 2550cui-Tirgun1050cui- Single1500cui\_WD10m\_1.4Msep\_sig.sig

図 1.2-2-57 エアガン仕様-③ 発振波形の周波数特性。青曲線はエアガン仕様-①を示す。

また、エアガン仕様-③の放出エネルギーは73,611Jであると推定された。190,657Jであるエアガン仕様-①に対して、エアガン仕様-③は1/2.6の出力である。このことからこの仕様を採用した場合にはエアガン仕様-①に比べて3倍の発振回数が必要であると推察される。

一方、350cui×3のトリガンはそのまま手をくわえることなく使用できる機材を保有する機関が存在しているため、経理上の問題は解消できる。

このことからエアガン仕様-③は令和2年度の実験を実施するための現実的な仕様として提案される。

a-3-2 エアガン発振方法

始良市蒲生の住吉池において基礎実験が予定されている。住吉池でエアガン発振を行うには、海域で実施する調査のように作業船を利用できない為、エアガン本体を十分な水深がある地点まで曳航し、その地点でエアガンを投入及び揚収可能な設備を用意することとなる。現地の作業環境、特に重機の搬入経路等を考慮して、最も実現可能性が高いと考えられるのは池にポンツーン(Pontoon)を浮かべ、エアガンの投入及び揚収の作業足場とする方式である。

図 1. 2-2-58 及び図 1. 2-2-59 に参考例としてエアガン仕様-①の構成を示す。

クラスター配置 & オフセット

Gun	Pressure (psi)	Volume (cuin)	Type	x (m.)	y (m.)	z (m.)	delay (s.)	sub-array	p-p contrib (pct.)
1	2000.0	1500.0	1500LL	0.000	0.000	10.000	0.00000	1	25.9
2	2000.0	1500.0	1500LL	0.000	1.600	10.000	0.00000	1	24.9
3	2000.0	750.0	1500LL	0.000	3.500	10.000	0.00000	2	24.0
4	2000.0	750.0	1500LL	0.000	4.700	10.000	0.00000	2	25.2

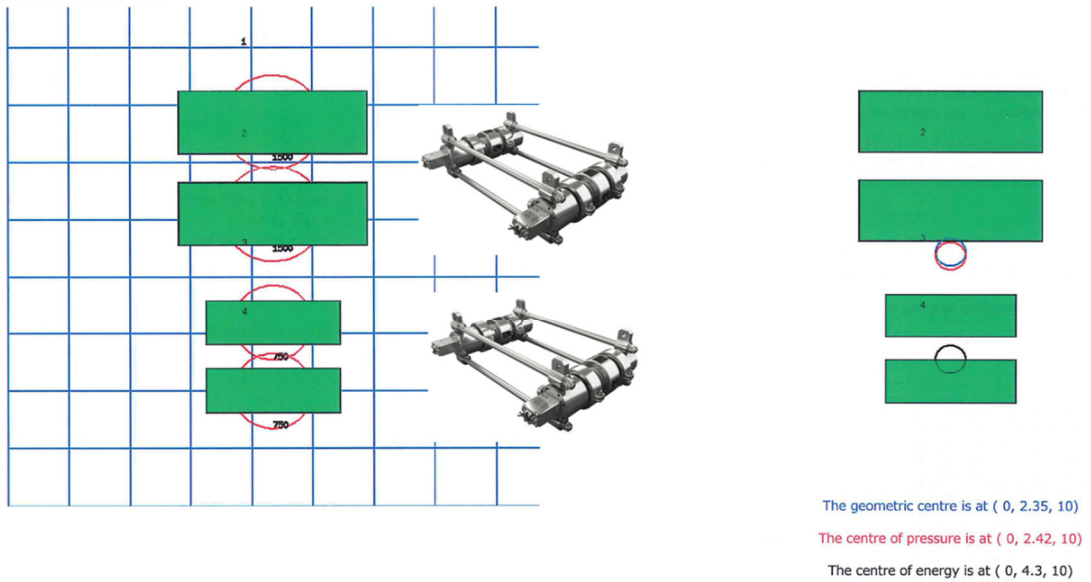


図 1. 2-2-58 エアガン仕様-① クラスタ配置とオフセット

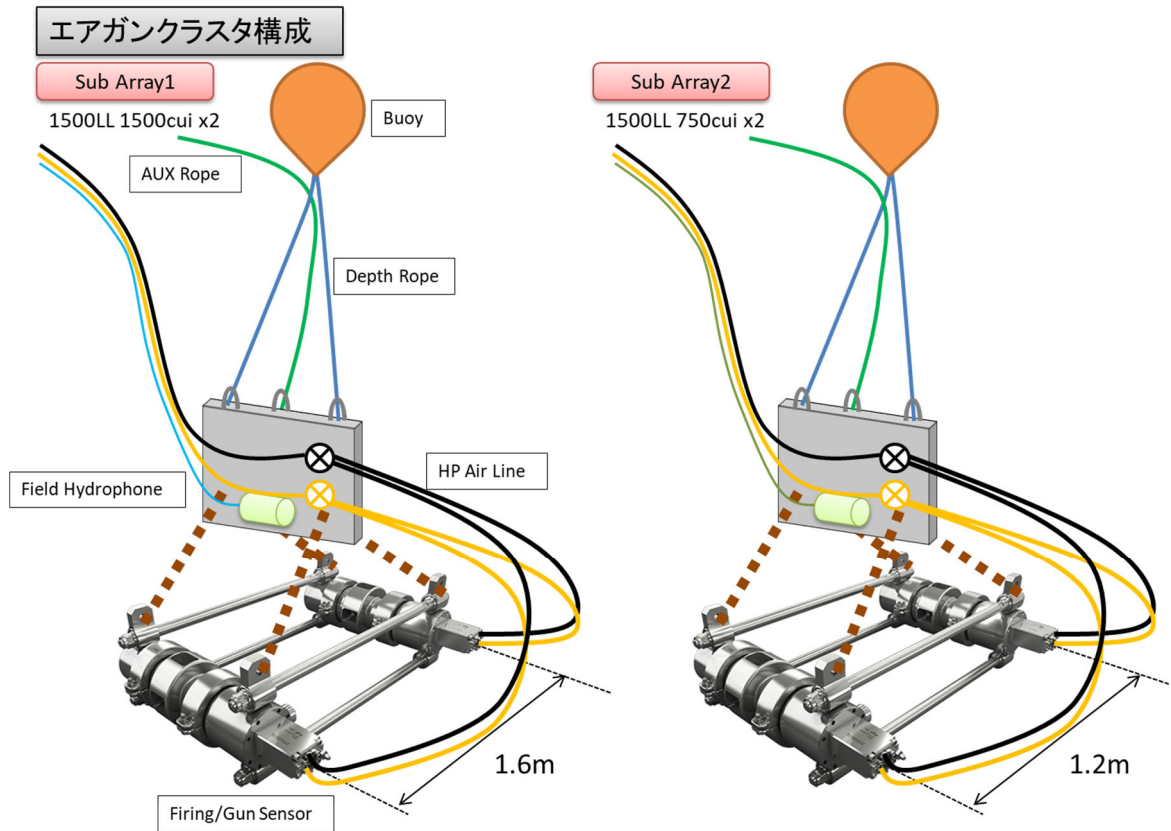


図 1.2-2-59 エアガン仕様-① エアガンクラスタ構成