

### 3. 研究報告

現在活動中の桜島において、位相シフト光パルス干渉法を用いた観測装置（以下、「光システム」という）を投入して順調に火山観測を行い、火山性地震および火山性微動、構造探査人工地震のデータを取得した。本計画では光システムを実際の火山観測に投入し、運用することを通してフェージビリティスタディを行い、光システムを用いた火山観測の実用化に向けたノウハウを蓄積した。

光システムは11月11日から12月8日までの26日間連続運用され、その間に70回の地震イベント（火山性地震および火山性微動を含む）と14回の人工地震を記録することができた。これらの記録はこれまで火山観測で用いられてきた地震観測システムと同等の質を示し、マグマの動きに伴う振動の特徴の検出および火山体深部構造からの反射波の検出を含む基礎的な火山学的解析にも用いることが可能であることが本事業で検証された。

#### 3. 1 位相シフト光パルス干渉法を用いた振動観測システムの総合的評価

##### (1) 業務の内容

###### (a) 業務題目

課題 E 火山観測に必要な新たな観測技術の開発

「位相シフト光パルス干渉法を用いた振動観測システムの総合的評価」

###### (b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
秋田大学大学院国際資源学研究科	准教授	筒井智樹	tomoki@gipc.akita-u.ac.jp
白山工業株式会社 基盤開発部	部長	平山義治	hirayama@hakusan.co.jp
白山工業株式会社 防災研究システムユニット	副部長	池田敏晴	
東京工業大学大学院理工学研究科		竹内敬二	
		安藤 浩	
		水谷義弘	

###### (c) 業務の目的

本委託業務では 1) 光センサシステムで得られたデータ解析および解析結果の評価、2) 光センサシステムの総合評価、3) 他課題への観測データの提供を実現する。

###### (d) 平成28年度の実施計画

- 1) 光センサシステムで得られたデータ解析および解析結果の評価、
- 2) 光センサシステムの総合評価、
- 3) 他課題への観測データの提供

###### (e) 平成28年度業務目的

本委託業務は、新しい計測技術（位相シフト光パルス干渉法）を応用した火山性地震センサ（以下「光センサシステム」という。）を活火山の観測に実際に投入して得られた観測データを解析し火山活動の情報を引き出すとともに、光センサシステムを総合的に評価するため、フィージビリティスタディを実施するものである。

光センサシステムはセンサ部と信号処理部を光ケーブルで接続する観測システムである。光センサシステムはセンサ部の地動変換と信号処理部までの信号伝送とがともに非電氣的であるので、本質的に耐熱性および耐蝕性、耐雷性、防爆性が高い。

本委託業務では光センサシステムで得られた火山性地震および火山性微動等の火山内部から自発的に放射される地震波とともに構造探査で実施される人工地震波の観測データを、従来の観測システムで得られたデータとともに解析することで深部構造やマグマだまりに関連した火山地震学的情報を引き出す。本委託業務では共同実施機関（白山工業株式会社）がすでに使用可能な状態である光センサシステム試作品を用いて火山観測を実施し取得したデータを解析に使用する。光センサシステムは性能試験を目的とする室内実験および数回の屋外運用をすでに行っているが、火山の地球物理学的観測を目的とした屋外運用は未経験である。本委託業務では光センサシステムの評価の一環として、共同実施機関による光センサシステム運用の期間中に、従来のシステムによる人工地震観測も実施する。光センサシステムで取得されたデータを従来のシステムで得られたデータと比較し、ともに解析に用いることによって、本システムの火山観測への適用性を検証評価することができる。

光センサシステムが本来持つ特徴（耐熱性、耐蝕性、耐雷性）は火山体での長期モニタリングに適しているばかりではなくこれまで設置できなかった場所での観測運用が期待され、実用化されたあかつきには火山活動の活発化を容易にいち早く捕らえることが期待される。

本委託業務で実際の火山観測データの解析を通して精度とダイナミックレンジの確保が実証できれば、光センサシステムは本来の特性と合わせてより火山観測に適合したシステムの一つとなり得る。さらに本課題終了後においては後年度課題への応募や追加財源の確保を通して、実用化への取組みが予定されている。これらの取組みがなされることによって、光センサシステムはこれまで観測が難しかった環境の火山における実用的な火山モニタリング観測に使用する目処がたつものと期待される。また他の課題との連携を通して他の火山における運用の実現も期待される。

## (2) 平成28年度の成果

### (a) 業務の要約

現在活動中の桜島において、位相シフト光パルス干渉法を用いた観測装置（以下、「光システム」という）を投入して順調に火山観測を行い、火山性地震および火山性微動、構造探査人工地震のデータを取得した。本計画では光システムを実際の火山観測に投入し、運用することを通してフィージビリティスタディを行い、光システムを用いた火山観測の実用化に向けたノウハウを蓄積した。

光システムは11月11日から12月8日までの26日間連続運用され、その間に70回の地震イベント（火山性地震および火山性微動を含む）と14回の人工地震を

記録することができた。これらの記録はこれまで火山観測で用いられてきた地震観測システムと同等の質を示し、基礎的な火山学的解析にも用いることが可能であることが本事業で検証された。

(b) 業務の実施方法

本業務では光システムを、現在活動中である桜島に設置し、約 1 ヶ月間の臨時観測を行ってデータ取得を行った。課題責任機関（秋田大学）と共同実施機関（白山工業株式会社）との分担は以下の項のように行われた。

1) 実施機関と業務分担

a) 課題責任機関

①位相シフト光パルス干渉法を用いた振動観測システムによる火山観測の総合的評価

a. プロジェクトの総合推進

課題責任機関は位相シフト光パルス干渉法を用いた振動観測システムによる火山観測のフェージビリティスタディを推進し、観測計画を統括する。課題責任機関は本委託業務を含むプロジェクト全体の推進にも貢献するために、関連する委員会に参加すると共に、研究集会にも参加し話題提供および報告を行う。

b. 光センサによる火山観測の準備

光センサシステムによるデータ取得を実施するために準備を行う。主な準備内容は京都大学防災研究所火山活動研究センターとの交渉および借用契約、観測点配置計画をはじめとする調整である。

c. 人工地震観測の実施

12月に桜島火山構造探査（人工地震実験）に参加し、従来の観測装置を設置して人工地震観測を実施し、データを取得する。本項目は「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」による桜島火山構造探査の一環を構成し、同探査の機材を観測に使用する。本観測で取得されたデータは光センサシステムの観測データと併せて、光センサシステムの観測データの評価および深部構造およびマグマだまりに関する解析に用いる。

d. 光センサ観測システムの見学

次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの次世代火山研究推進事業の他課題や火山研究人材育成コンソーシアム構築事業の求めに応じ、桜島火山構造探査実施期間中に、光センサシステムを紹介し、見学する機会を設定する。

e. データ解析

共同実施機関が回収した光センサシステムによる観測データに解析を施す。本解析では光センサシステムのデータの他、従来のシステムによる観測データも合わせて解析を実施する。解析内容は自然地震と人工地震の抽出、ホドグラム解析、見かけ速度

および到来方向解析、反射法構造解析を予定している。

#### f. 総括

c. で得られたデータの解析および e. で行う解析を通して、観測データを使用する立場から光センサの火山観測への適用の有効性について検証する。共同実施機関がとりまとめた光センサの今後の改良点も踏まえて、光センサを実際に火山観測に適用した際の問題点を洗い出して報告書のとりまとめを行い、光センサの火山観測への適用の有効性について総合的に評価する。なお、報告書作成にあたっては課題責任機関と共同実施機関は共同して制作を行う。課題責任機関は事後評価において、本委託事業の成果報告を行う。

②フィージビリティスタディ終了後の事業継続の取り組みや次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの次世代火山研究推進事業の他課題や火山研究人材育成コンソーシアム構築事業との連携

#### a. フィージビリティスタディ終了後の事業継続に向けた取り組み

次の事業ステージに向けた財源の確保策を講じ、センサをボアホールに入れて観測できるような小型化と、光ファイバを高価な偏波保持ファイバから安価なシングルモードファイバへ変更する開発を目指す。さらにこの光センサシステムを実用化する上ではまだ解決しなければならない問題、センサの多点化を狙ったパルス的高速化およびデータ解析装置の高度処理化、センサ筐体の防水、耐熱化、センサのダンパの高性能化、伝送距離の拡大などについてどのように改善していくかの検討を行い、より小型かつより安価な観測システムの検証に繋げていく。

#### b. 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの次世代火山研究推進事業の他課題や火山研究人材育成コンソーシアム構築事業との連携

以下の連携を目指す。

##### 1) 次世代火山研究推進事業 課題 A : 「各種観測のデータの一元化」

試験観測の結果について、オフラインデータを提供する形で連携する。

##### 2) 次世代火山研究推進事業 課題 B : 「先端的な火山観測技術の開発」ーサブテーマ 4 : 「火山内部構造・状態把握技術の開発」

本課題で行う桜島における人工地震観測結果を提供することで、内部状態把握の基礎となるデータの取得を光センサシステムで行い、従来システムで得られたデータと併合して解析に供することで連携する。特に本システムでは地動を信号に変換するセンサおよびセンサからの伝送路が電氣的に絶縁された構成になっていることから、センサ部の耐雷性、防爆性等に優れている。このことから比較的長期間の地震計アレイ観測に向いているため、今後パルス幅に対する検証を重ねたうえで多点化をすれば、光センサだけのアレイ観測によって火山内部構造・状態把握の基礎となるデータの取得が期待されるほか、光センサシステムは、現時点では常時定点観測が難しい海底火山のモニタリングや、温度の高い火道周辺でのモニタリング等が実現できる可能性がある火山噴火の切迫度評価に対する新たな知見がえられる可能性という点で連携を深

めることを目指す。

### 3) 火山研究人材育成コンソーシアム構築事業

試験観測期間中に、求めに応じ、火山研究人材育成コンソーシアム参加者（参加機関）を含む構造探査参加者に実際の観測を見学する機会を提供する。

## b) 共同実施機関

### ①位相シフト光パルス干渉法を用いた振動観測システムによる火山観測の実施

#### a. プロジェクトの総合推進

課題責任機関が統括する観測計画に従い、位相シフト光パルス干渉法を用いた振動観測システムによる火山観測のフェージビリティスタディを推進する。

#### b. 光センサによる火山観測の準備

光センサシステムによるデータ取得を実施するために準備を行う。

#### c. 光センサによる観測の実施

光センサシステムを桜島に設置し、一定期間のデータ取得のため、実施前の光センサシステムの整備および観測期間中の光センサシステムの維持管理を行う。また、光センサシステムの送受信装置の設置にあたり、京都大学火山活動研究センターの設備を借用し設置する。

さらに共同実施機関は期間中には業務協力者の立ち会いを実施し、本業務に関して協力者の専門的知識に立脚した助言をいただくことで、取得データの高度化を図る。

#### d. 光センサ観測システムの見学

次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの次世代火山研究推進事業の他課題や火山研究人材育成コンソーシアム構築事業の求めに応じ、光センサシステムの紹介、説明を行う。

#### e. データ解析

光センサシステムによる観測データを回収し、光センサの性能に関する解析とノウハウの整理を行う。

#### f. 総括

c. およびe. を通して、光センサを実際に火山観測に適用した際の問題点および今後の改良に資する情報をとりまとめる。報告書の製作は、課題責任機関と共同して行う。

なお、成果のとりまとめにあたっては、項目 1) 光センサシステムを実際に運用した場合の特性の記載に関して光センサで得られた観測記録を用いて振幅レベル、検出可能な周波数帯域、ノイズレベル等の評価を行い、項目 2) 光センサシステムの野外運用の際のノウハウ(今後の改良点、運用上の特徴等)の記載に関しては利用可能な試作機の耐環境性や設置作業時の作業性、運用の際の作業性などに注目して収集を行い、

整理し、項目 3) 光センサシステムで得られたデータを用いたデータ解析および解析結果の評価に関しては地震学的解析を施し、深部構造やマグマだまり等に関連する情報を引き出し、既存のデータと比較して評価を行い、また、項目 4) 他課題への観測データの提供を行う。

②フィージビリティスタディ終了後の事業継続の取り組みや次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの次世代火山研究推進事業の他課題や火山研究人材育成コンソーシアム構築事業との連携

a. フィージビリティスタディ終了後の事業継続に向けた取り組み

次の事業ステージに向けた財源の確保策を講じ、センサをボアホールに入れて観測できるような小型化と、光ファイバを高価な偏波保持ファイバから安価なシングルモードファイバへ変更する開発を目指す。さらにこの光センサシステムを実用化する上ではまだ解決しなければならない問題、センサの多点化を狙ったパルス的高速化およびデータ解析装置の高度処理化、センサ筐体の防水、耐熱化、センサのダンパの高性能化、伝送距離の拡大などについてどのように改善していくかの検討を行い、より小型かつより安価な観測システムの検証に繋げていく。

b. 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの次世代火山研究推進事業の他課題や火山研究人材育成コンソーシアム構築事業との連携

(c) 業務の成果

1) 観測の実施

桜島において位相シフト光パルス干渉システムを用いて火山観測を行った。観測とそれに伴う作業は共同実施機関が課題「位相シフト光パルス干渉法を用いた振動観測システムによる火山観測の実施」として担当した。以下に共同実施機関の報告に沿って要点を述べる。

a) 位相シフト光パルス干渉システムの諸元

観測に用いた位相シフト光パルス干渉システム（以下、「光センサシステム」という）の仕組みは文献 1) に示され、「位相シフト光パルス干渉法」という名称で白山工業株式会社が特許 5118004 号および 5118246 号を取得している。

実際に用いた観測システムは独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構の許可のもと、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構平成 26-27 年度技術ソリューション事業(フェーズ 1 案件)「新しい光干渉法を用いた無電源 4D モニタリングシステムの開発」で開発されたシステムを観測に使用した。

本事業では自然地震の他に、「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の一環として観測期間中に実施された桜島火山反復地震探査の発破による人工地震波形の記録も行った。

## 位相シフト光パルス干渉システムの仕様

サンプリング周波数： 200Hz、1kHz  
センサユニットの測定時間： 200ns  
センサユニット数： 3

光ファイバ長： 測定装置－1番目のセンサユニット間 150m、1番目と2番目および2番目と3番目のセンサユニット間 30m

## センサ部

測定物理量： 加速度  
測定周波数帯： 0.1-50Hz  
分解能： 120dB 以上  
センサの自己共振周波数： 52.2Hz、減衰定数 0.6  
測定成分： 鉛直1成分、水平2成分の3成分＋レファレンス用固定端1成分で計4成分  
筐体サイズ： 20cm×20cm×20cm  
筐体重量： 約7kg

## 光パルス送受信部

サイズ： 送信装置、受信装置とも 60cm×43cm×65cm  
重量： 送信装置、受信装置ともに約40kg  
消費電力： 合計で約500W

## 設置状況

センサユニット及び白山工業製のJU210微動計を京都大学防災研究所附属火山活動研究センター桜島火山観測所所有の高免坑道に設置するとともに、光送受信装置を坑道に隣接した観測室内に設置し、その間を光ファイバケーブルで接続した。

センサユニットの設置方向は、火口方向(L)、火口と直交方向(T)、上下動方向(V)である。坑道内部と、センサユニット設置位置を図1に示す。

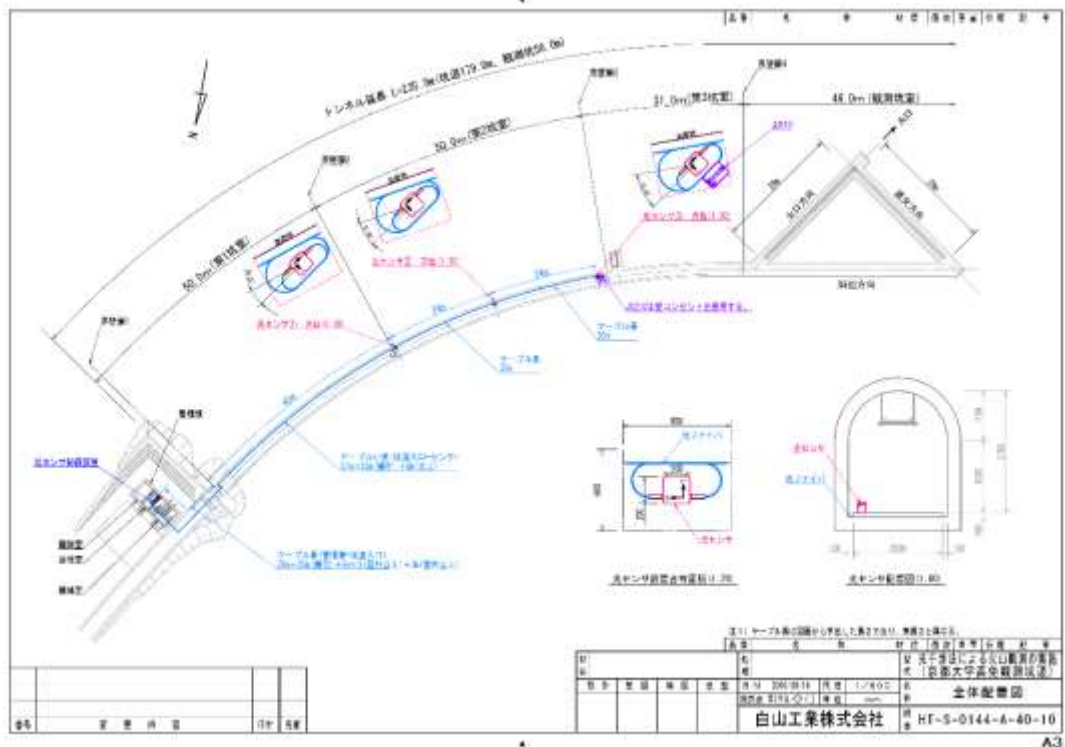


図 1 光センサシステム設置図



b) 観測データ

2016年11月13日から2016年12月8日まで、時系列波形図より、70個のイベントが記録されていることを確認した。そのリストを表1に示す。気象庁の震源リストとUSGSカタログを参照して各イベントに対応する震源情報を対応させた。気象庁の震源リストにもUSGSカタログにも無いイベントについては、桜島周辺のV-net気象庁データも参照して確認し、火山性地震(Volc)と記し、マグニチュードの欄に火山性地震の種別を記入した。火山性地震の分類にあたり、文献2)、文献3)、文献4)を参考にした。

表1：設置期間中に観測したイベントリスト

番号	yymmdd	HHMM	震央地名(気象庁/USGS)	マグニチュード
E01	161113	223	種子島近海	M3.3
E02	161113	632	熊本県熊本地方	M2.7
E03	161113	648	Volc	A型
E04	161113	2002	Amberkey, NewZealand	M7.8
E05	161113	2250	熊本県天草・芦北地方	M2.3
E06	161116	2252	奄美大島北東沖	M3.9
E07	161116	2309	奄美大島北東沖	M3.7
E09	161118	1019	福岡県北西沖	M4.2
E10	161118	1207	鹿児島県大隅地方	M2.3
E10.5	161119	147	Volc_TR_2Hz	C型
E11	161119	1148	和歌山県南部	M5.4
E12	161119	1841	五島列島近海	M4.2
E13	161119	2020	五島列島近海	M3.3
E14	161119	2119	大隅半島東方沖	M1.4
E15	161120	1807	日向灘	M2.3
E16	161121	1716	Volc	B型
E17	161122	336	Volc_TR_2Hz	C型
E18	161122	559	福島県沖	M7.4
E19	161122	646	熊本県熊本地方	M2.7
E20	161122	650	Volc	B型
E21	161122	1015	熊本県阿蘇地方	M3.2
E22	161122	1922	Volc	B型
E23	161122	2303	福島県沖	M5.7
E24	161123	1859	小笠原諸島西方沖	M5.9
E25	161123	2010	熊本県熊本地方	M3.6
E26	161124	623	福島県沖	M6.2
E27	161124	935	鳥島近海	M5.3
E28	161124	2052	鹿児島湾	M1.4
E29	161125	1011	熊本県阿蘇地方	M3.1
E30	161125	1109	鹿児島県薩摩地方	M1.0
E31	161125	1829	日向灘	M3.2

E32	161125	2324	Karakul, Tajikistan	M6. 6
E33	161126	229	熊本県熊本地方	M2. 5
E34	161126	352	豊後水道	M3. 8
E35	161126	744	鹿児島湾	M3. 4
E36	161127	144	薩摩半島西方沖	M2. 8
E37	161127	654	Volc	BL 型
E38	161129	716	鹿児島県薩摩地方	M1. 8
E39	161129	2228	大隅半島東方沖	M1. 9
E40	161201	22	熊本県熊本地方	M2. 4
E41	161201	1106	Volc	B+BL 連続発生型
E42	161201	1157	熊本県熊本地方	M2. 9
E43	161202	243	熊本県熊本地方	M3. 1
E44	161202	450	鹿児島湾	M1. 4
E45	161202	619	熊本県熊本地方	M3. 6
E46	161202	1841	日向灘	M3. 6
E47	161202	1856	熊本県天草・芦北地方	M2. 3
E48	161203	442	熊本県天草・芦北地方	M2. 2
E49	161203	2224	熊本県熊本地方	M2. 4
E50	161204	1847	熊本県熊本地方	M2. 5
E51	161204	2102	Volc	微動
E52	161204	2228	熊本県熊本地方	M2. 6
E53	161204	2236	Volc	微動
E54	161205	1152	熊本県熊本地方	M3. 7
E55	161206	249	大分県南部	M3. 3
E56	161206	1212	熊本県熊本地方	M3. 6
E57	161206	1702	熊本県天草・芦北地方	M2. 6
E58	161206	1927	鹿児島湾	M0. 6
E59	161206	2212	種子島近海	M2. 2
E60	161206	2215	Volc	BL 型
E61	161206	2257	Volc	微動
E62	161207	30	Volc	BL 型
E63	161207	120	Volc	微動
E64	161207	146	熊本県熊本地方	M2. 9
E65	161207	415	Volc	微動
E66	161207	427	Volc	微動
E67	161207	619	Volc	BL 型
E68	161207	703	Reuleuet, Indonesia	M6. 5
E69	161208	907	薩摩半島西方沖	M2. 2

以下ではこの中から、火山性の C 型火山性地震の観測例を紹介する。

11 月 22 日 3 時 36 分 継続時間約 3 分

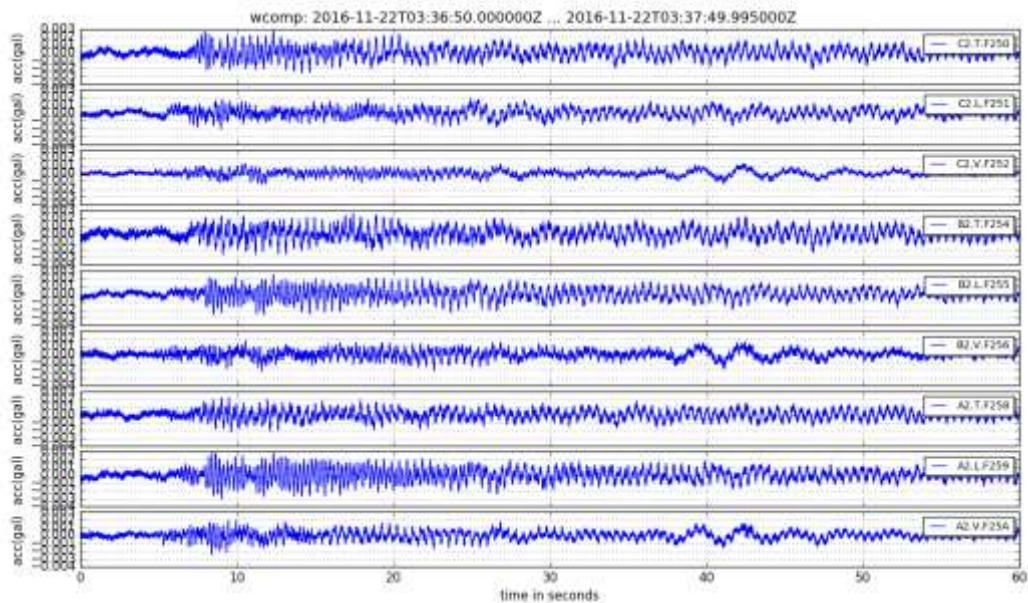


図2 C型地震イベント(11/22 03:36)に対する光センサC観測点で得られた波形

上記図2の地震イベントに対する、光センサC観測点及び既設の Trillium-240(KMT 観測点)の立ち上がり時の波形を以下の図3に示す。

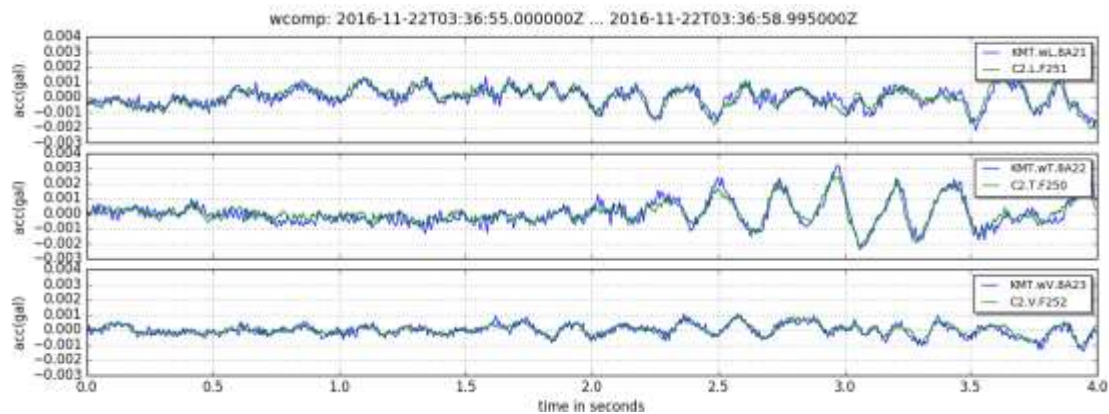


図3 C型地震(11月22日03時36分)の初動付近

図2のイベントのスペクトルを図3に示す。11月19日01時47分のイベントと同様に2 Hz付近、4 Hz付近、6 Hz、8 Hzに鋭いピークが現れている。

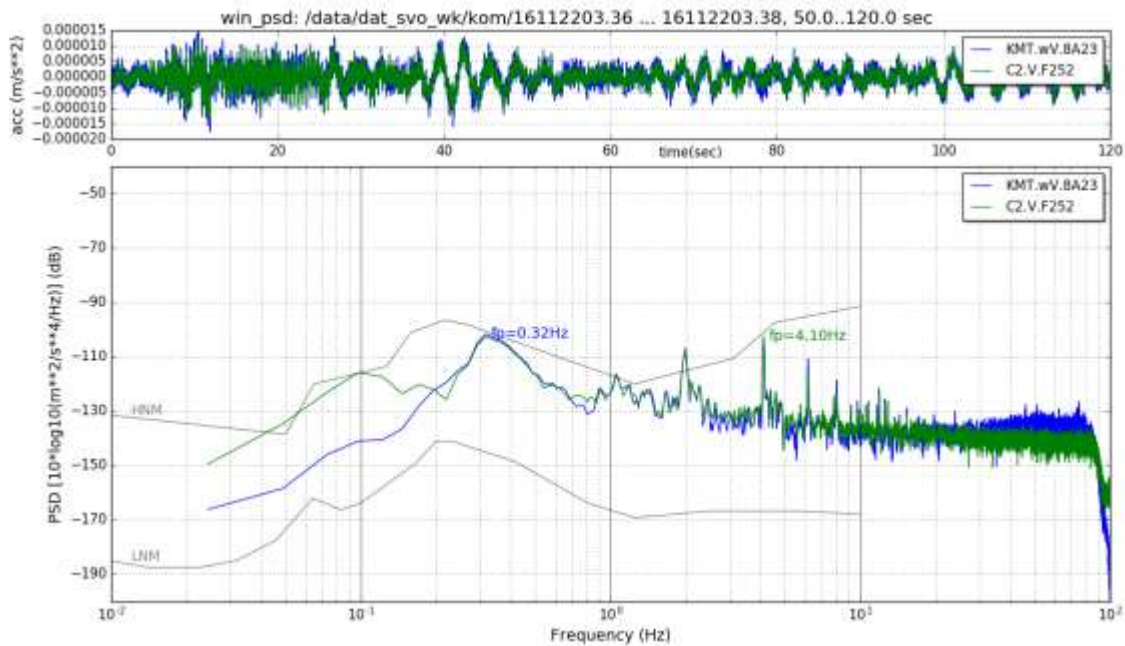


図 3 C 型地震イベント (11/22 03:36) に対する光センサ C 観測点および既設の Trillium-240 (KMT) の上下動成分のスペクトル。

c) データ整理形態および課題 A へのデータ提供

光センサシステムで取得されたデータは 1kHz と 200Hz サンプリングの連続データである。

比較対象として同時に観測を行った JU210 は 200Hz でサンプリングしている。ただし、坑道内には GPS 信号の受信ができないため、設置直前に坑道外で時刻同期をさせ、設置観測中は装置内部時計による自走とさせた。撤収時、12 月 9 日 13 時までで -91msec のズレが生じていた。

課題 A に提供した観測データのフォーマットは、WIN 形式であり、1 分長ファイルを 1 時間ごとにアーカイブにまとめ、日ごとのフォルダに収録した。

## 2) データ解析

2016年11月12日から12月8日まで京都大学高免坑道で位相シフト光パルス干渉法振動観測システム（以下、「光センサシステム」という）を用いて観測を行った（図4）。本報告では観測点の総称名をKMT0とし、各観測点を坑道入り口から順にKMT0A2, KMT0B2, KMT0C2と名付け、以降ではそれぞれをA, B, C観測点と称することにする。

観測期間中には70回のイベントを観測した。イベントの詳細は観測報告の表1に述べられている。観測されたイベントのうち、火山性地震波形と人工地震波形について解析を行った結果について述べる。光センサシステムの出力した生データはすべて加速度記録であり、かつ図4(b), (c)のV, L, T方向の地動に対して負極性出力であったので、極性反転を行った上で時間について積分して速度記録に変換したものを解析対象とする。以下では各V, L, T方向の地動に対して正極性となるように統一した。

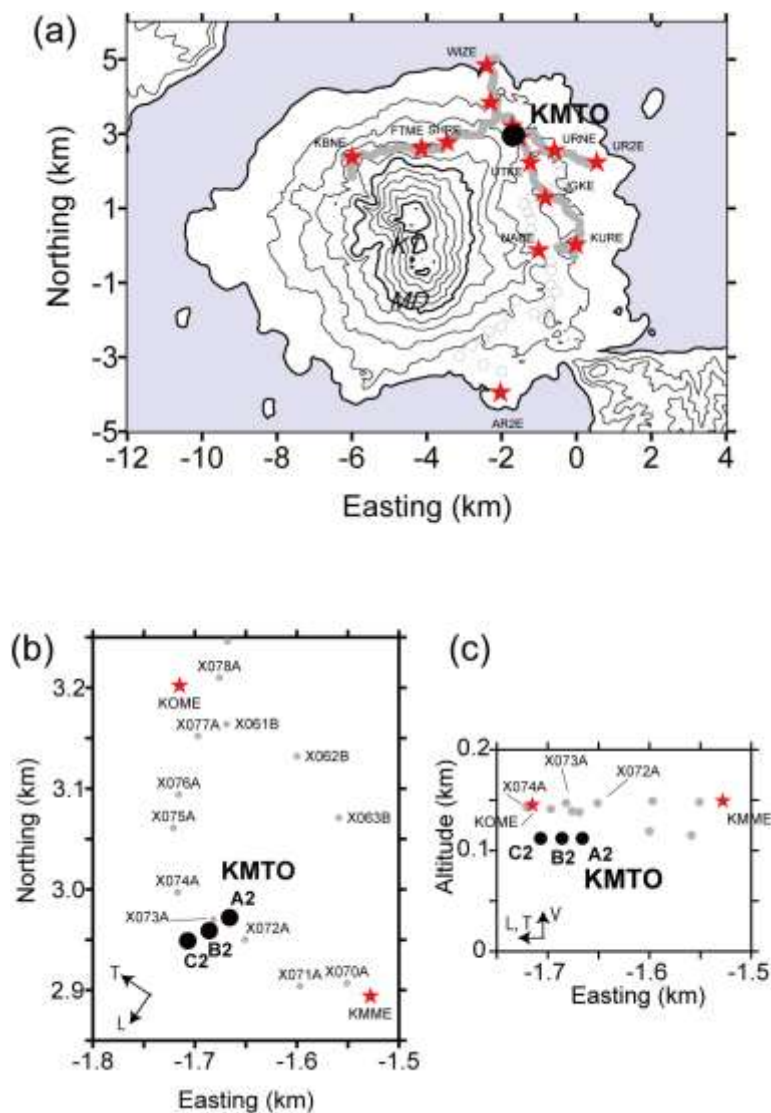


図4 観測点地図 (a)観測点KMT0と反復地震探査測線、(b)KMT0付近拡大平面図、(c)KMT0付近断面図。いずれも黒丸が光センサシステム観測点、灰色丸は反復地震探査観測点、星印は反復地震探査発破点をそれぞれ示す。KT：北岳、MD：南岳を示す。

### a) 火山性地震

火山活動に伴って火山の地下では熱水などの移動や過剰圧による岩盤の破壊にともない様々な波形の火山性地震が発生する。本観測では2016年11月19日01時47分頃と11月22日03時36分頃に継続時間が長く2Hz付近の周波数成分が卓越する特徴的な地震イベントが記録されている。このような特徴的な波形を示す地震イベントはこれまでも桜島で観測されてきており、文献3)ではC型地震として分類され、その周波数特性や粒子軌跡が報告された。それ以降最近では文献5)はC型地震と卓越周波数の一致する単一周期の卓越するハーモニック微動について、爆発イベントとその卓越周波数の変遷について報告している。C型地震イベントは、一般的な火山性地震に比べて回数こそ少ないが希なタイプのイベントではない。

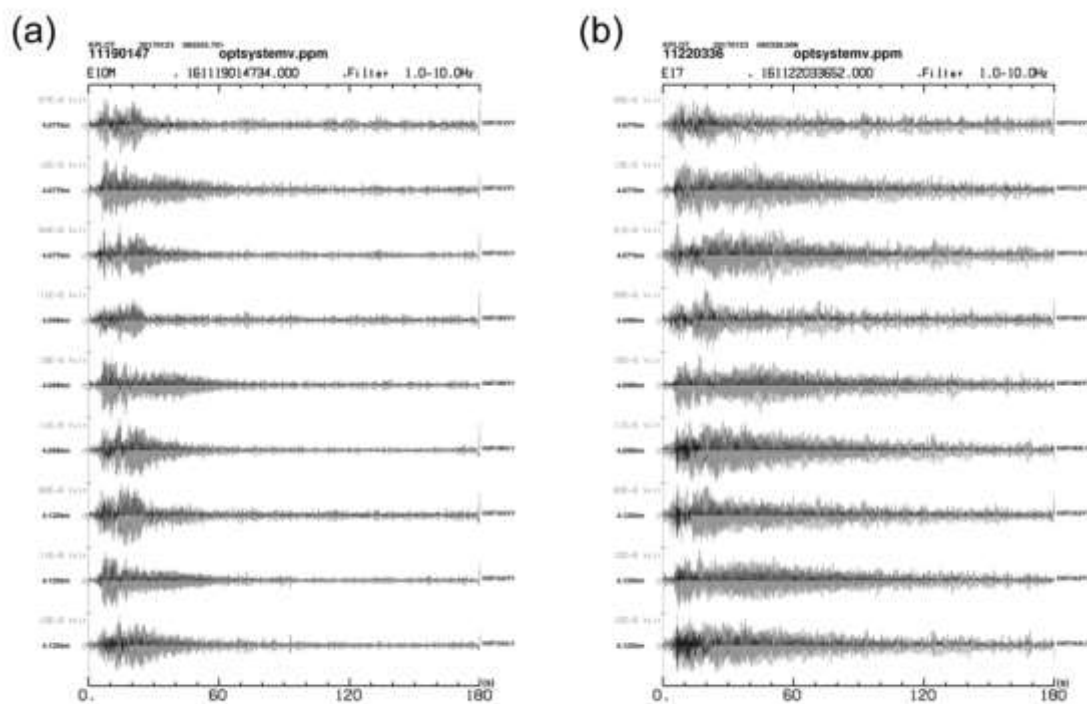


図5 各観測点における変換ずみ速度波形。(a)イベント11190147, (b)イベント11220336

本稿では観測された2つのイベントをそれぞれイベント11190147、イベント11220336と観測年月日時分を含むコード名で称することにする(図5)。イベント11190147は初動から10秒間は高周波が卓越し、その後2Hz付近の周波数成分が卓越するようになり、約70秒かかって減衰する(図5(a))。一方、イベント11220336は初動から10秒までの特徴と後続部分で約2Hzの成分が卓越する点は前者と同じであるが、2Hz付近が卓越しだしてから減衰するまでの時間が長く初動から180秒以上揺れ続けるという点が異なる(図5(b))。

本報告では継続時間が長いイベント11220336に注目し、その記録を速度記録に変換した上で火山学的見地から波動場について解析を行った。解析の内容は周波数成分と粒子軌跡、そして見かけ速度についてである。

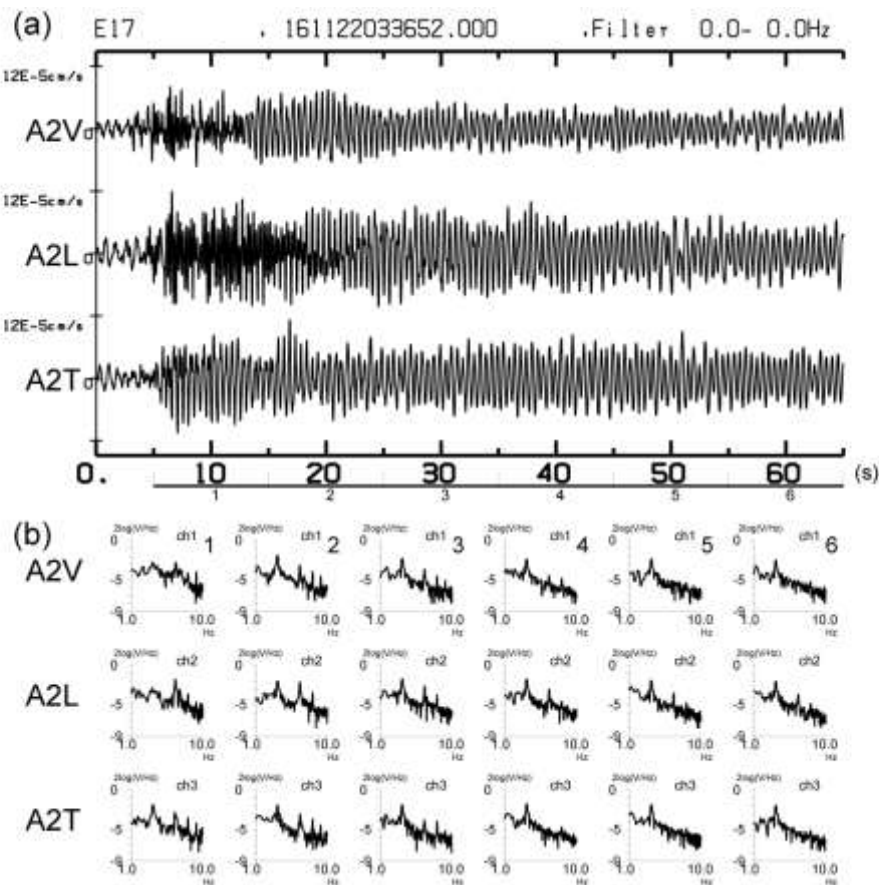


図 6 A2点における時間経過に伴うスペクトルの変化。(a)波形、(b)各成分の振幅スペクトル

まず最初にイベント 11220336 の周波数成分について調べた。図 6(a) には最も地表に近い観測点 A2 における地動速度波形記録と、図 6(b)にはこれに対応する各成分のパワースペクトルを示す。図 6(b)のパワースペクトルの計算は図 6(a)に示す波形記録中の 10 秒間の時間窓 1~6 で行った。

次に図 6(a)に沿って記録の特徴を述べる。本イベントは記録の先頭(11月22日 03:36:52)の5秒後から始まっている。振動の始まりから約10秒間はV(上下動)成分およびL(火口方向)成分の記録には本イベントの始まりから約10秒間は約4 Hzの成分が卓越していることが記録にも示されている。振動の始まりから10秒以上経過すると、いずれの成分も共通して約2 Hzの周波数成分が卓越するようになる。その後は緩やかに振幅が減少してゆき、2 Hzの成分が卓越する傾向は振動がノイズに覆いかくされるまで継続する。図 6(b)のパワースペクトルでもこのような変化が伺われる。図 6(b)のパワースペクトルでは記録の目視では判別できない周波数成分の推移も示されている。すなわち、窓1では3~5 Hzの帯域が比較的大きな値でフラットな形のスペクトルであったものが、時間の経過につれて窓2、窓3では2 Hzの基底周波数成分のピークに加えて複数の鋭い高調波成分ピークを伴うスペクトルを示すようになり、窓4以降はこれらの高調波ピークが衰えて、窓5以降では2 Hzだけに鋭いピークを伴う右下がりのスペクトルに変化して行くことが示される。このようにC型地震では時間と共に周波数成分の構成が変化し、最終的には基底周波数成分が卓越することは文献3)と5)でも報告されている。他の窓とスペクトルの傾向

異なる窓 1 の波形は、その傾向が他の B 型地震とも似ていることから、その後に引き続き単一周期成分の振動の引き金となった火山性地震とも解釈できる。さらにスペクトルの形の特徴から窓 3 以降では基底周波数における単一周期の振動がほぼ定常的になったと判断された。

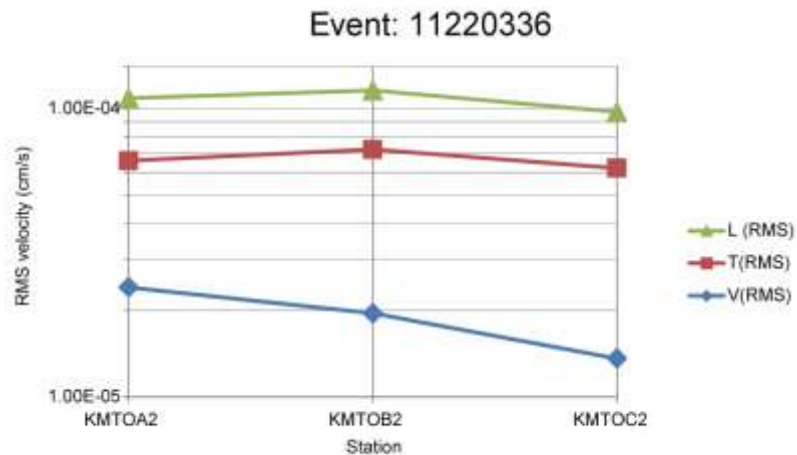


図 7 C 型地震 11220336 の KMT0 における振幅分布

2Hz 付近の成分が卓越している初動から 30 秒付近について振幅分布、粒子軌跡を調べてみた。まず 3 観測点の各成分の振幅分布を図 7 に示す。図 7 には坑道入り口に近い A 観測点より奥に B, C 観測点に進むにつれて上下動振幅が小さくなる傾向が示されている。これに対して水平動成分では観測網の中間にある B 観測点で振幅が最大になる傾向が見受けられるが、上下動成分のような単調な振幅の減少を見いだすことができない。坑道入り口に近い A から奥の C に向かって坑道の土かぶりが深くなることを考慮すると、上下動振幅は土かぶりの深さと逆相関していることを示している。



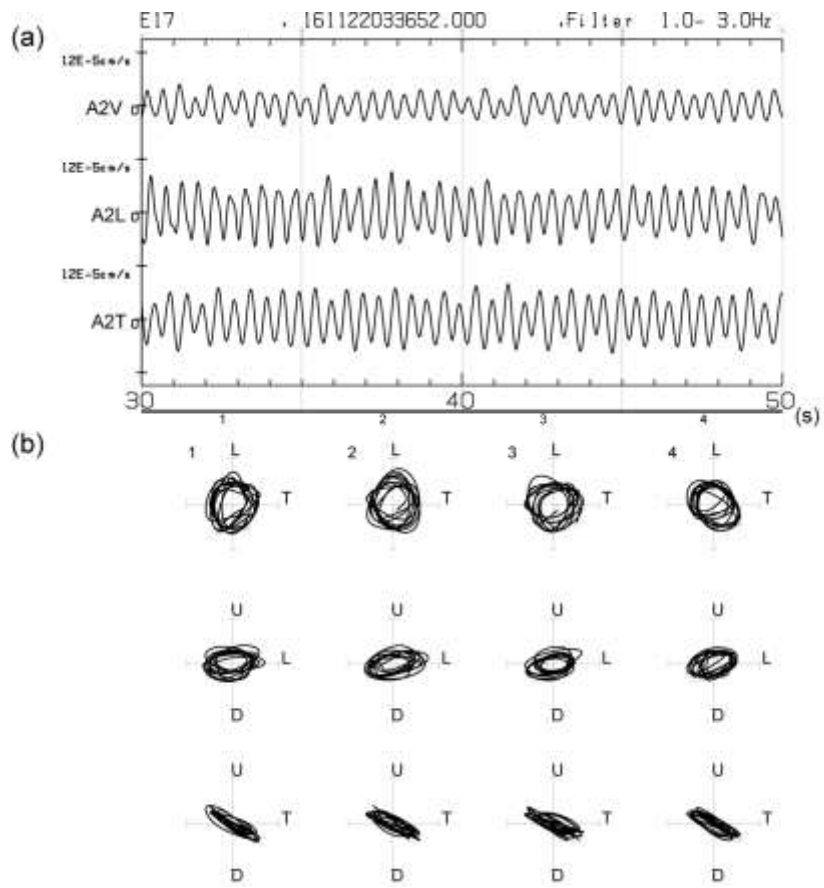


図8 KMT0A2における振動軌跡。(a)波形、(b)粒子軌跡

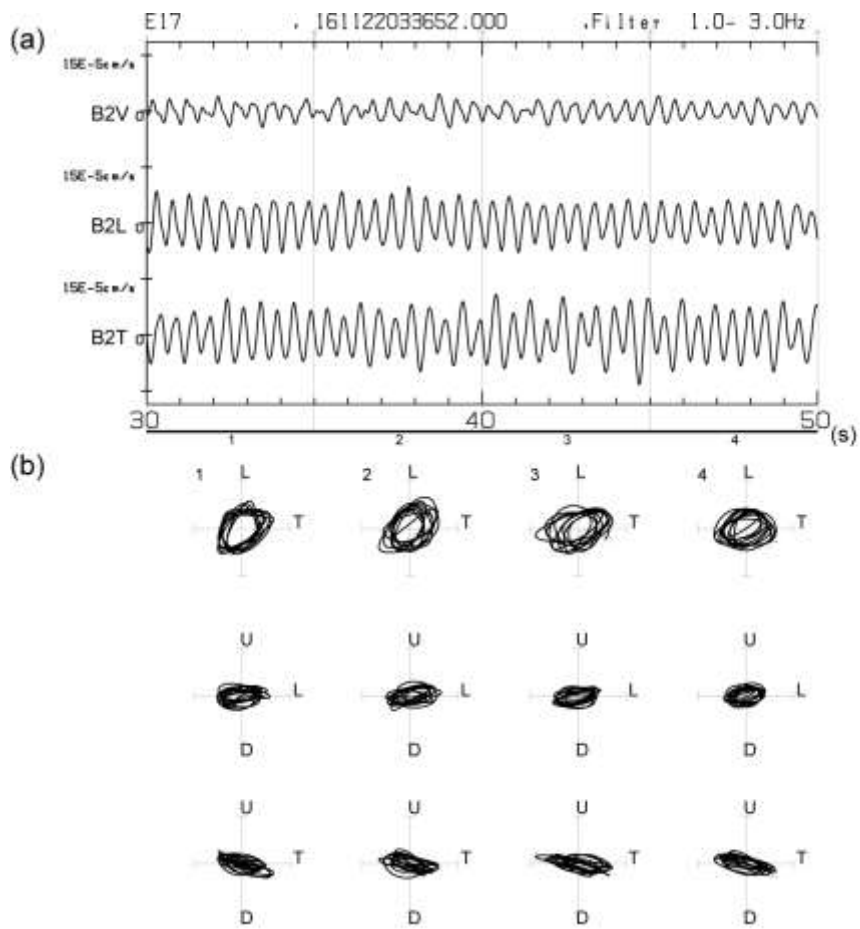


図9 KMT0B2における振動軌跡。(a)波形、(b)粒子軌跡

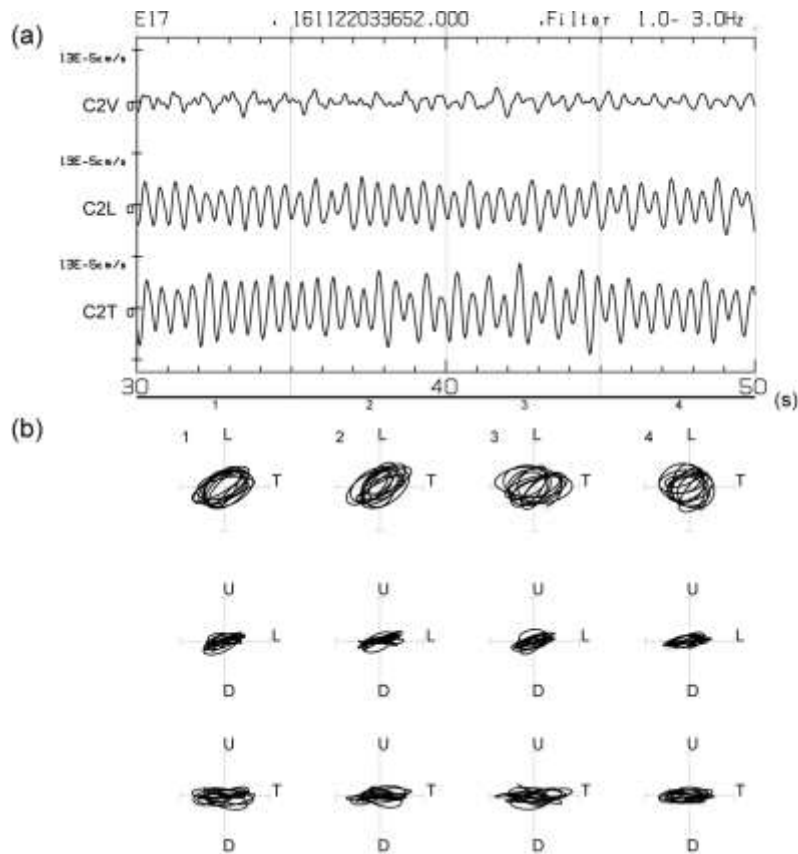


図 10 KMTOC2 における振動軌跡。(a)波形、(b)粒子軌跡

次に各点における振動軌跡を対応する区間の変換速度波形とともに図 8 ～ 図 10 に示す。いずれの観測点においても加速度波形を速度波形に変換したうえで 1 ～ 3 Hz の帯域通過フィルターを施したものを軌跡描画に用いている。図 8 から図 10 ではいずれの観測点においても振動軌跡の水平成分が円運動をしていることが共通している。このような振動軌跡は文献 3) の C 型の後続部分、文献 5) のハーモニック微動でも報告されている。文献 3) は C 型地震の後続部分が表面波の性質をもっていることを示唆し、文献 5) は地表設置の地震計に加えて孔中地震計における解析によってこのような振動が Rayleigh 波的な性質を持つことを示した。しかし、本観測では振動面が火口方向と平行にならずに、垂直に近い角度を示すことが注目される。このことは特徴的な単振動波形が Rayleigh 波であると仮定するならば、波が火口方向とは別の方向から到来していることを示している。後述するが、最も火口に近い発破 NABE からの地震波の到来方向も同様な傾向を示すことから、桜島東部の浅部構造の影響を受けていると考えられる。

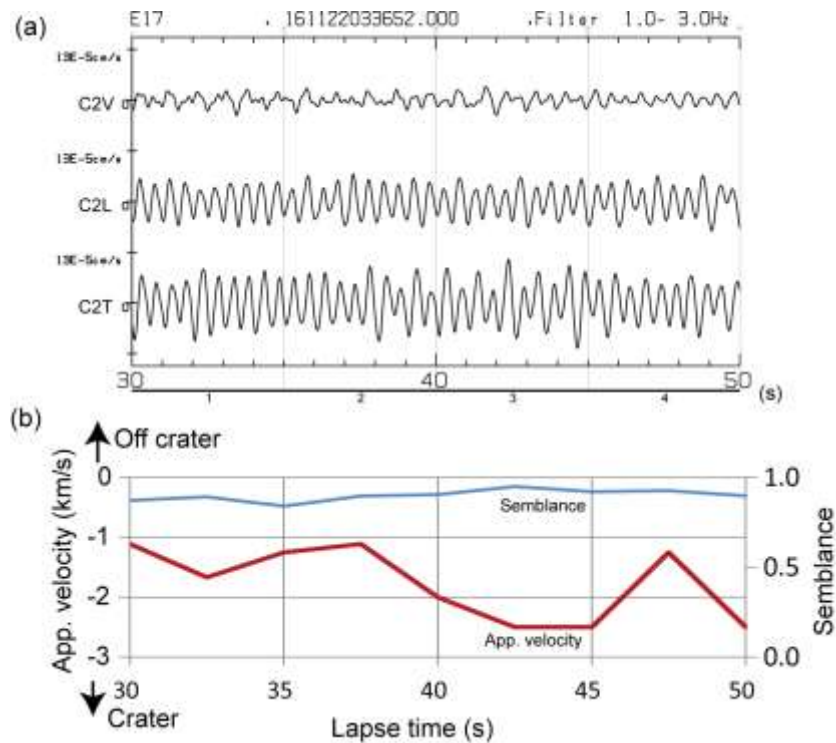


図 11 KMT0 における見かけ速度の時間変化. (a)波形、(b)見かけ速度とセンブランス値

さらに図8から図10で示した区間における到来波の到来方向の推移を調べることにする。図11は三つの観測点A~Cを線状アレイとして扱い、坑道の奥から入り口方向に沿った見かけ速度の時間変化を示したものである。図11(a)は波形(図10(a)再掲)を、図11(b)は見かけ速度と対応するセンブランスピーク値の分布を示す。センブランスとは文献5)が提唱した、エネルギーで正規化されたコヒーレンスの尺度である。センブランスは0と1の間の値をとり、1に近い値であるほど両者のコヒーレンスが高いことを表している。見かけ速度の符号は波の伝播の向きを表す。すなわち正の見かけ速度は坑道の入り口から奥に向かう方向つまり火口に近づく向きに伝播することを表す。一方、負の見かけ速度は坑道の奥から入り口に向かった方向、つまり火口から離れる向きに伝播することを表す。

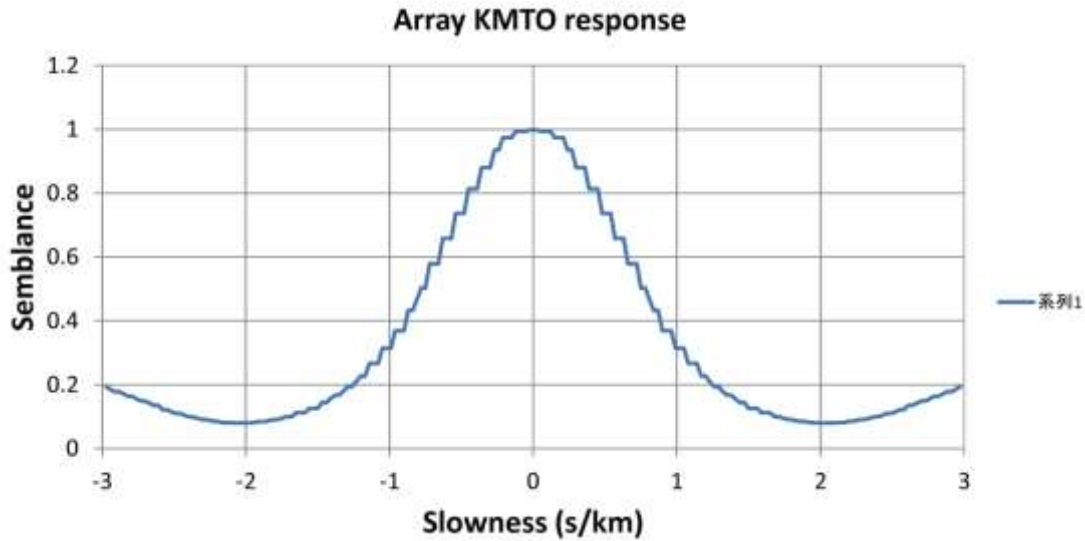


図 12 KMT0 アレイのスローネス応答曲線

さらに図 12 は本システムを直線アレイと見なしたときの垂直入射インパルス波形に対する応答を示す。横軸のスローネスは速度の逆数である。スローネス 0 s/km は与えた入射方向 (= 垂直入射) を表している。図 9 によればスローネス 0 s/km のインパルスに対して、アレイ KMT0 は幅を持ったスローネス推定値を与えることが示される。センプランスの片側半値幅は 0.78 s/km であった。すなわち KMT0 アレイでは同時に入射する 0 s/km のスローネスを持つ波と 0.33 s/km のスローネスをもつ波とを分離することができず、少なくとも 0.78 s/km 以上のスローネス差がないと同時に入射する 2 つ以上の波が区別できないことを示している。

図 11 (b)からは、解析した区間のすべてで見かけ速度が負の値を示し、1.1~2.5 km/s の値を示している。すなわち、高免坑道において C 型地震の後続部に対応する波動は、火口方向に向かう波数成分を持っていることが示される。この結果は一見して文献 3) や文献 5) の結果と違って見えるので、さらにしらべることにする。現状の光センサシステムでは電磁式地震計のように電気パルスを与えて外部から振り子を強制振動させることができないために、直前や直後に観測された自然地震や人工地震記録からセンサの正常動作を確認することしかできない。後述のように 12 月 8 日に行われた人工地震記録が正常であったので、センサは正常であるものとして話を進めることにする。

しかしながら、正味の S 波速度をきめてやれば到来方向に関する手がかりが得られる。

これまでに行われた探査では高免坑道の近傍に発破点 KOME と KMME が設定されていた。文献 7) によると発破点 KOME (報告では 09S12) の近傍 1 km 以内の距離で 1.1 km/s の見かけ速度が観測されている。また 2014 年に坑道近傍で行われた小規模探査では発破点から 0.1 km 以内で 0.5~0.8 km/s, それ以遠では 1.3 km/s の見かけ速度が観測されていた。これらの速度はいずれも P 波速度であるので、 $V_p/V_s = 1.73$  を仮定した場合、観測坑道周辺の S 波速度は 0.64 km/s 程度であろうと推察される。したがって、C 型地震の後続相の伝播方向は坑道方向そのものではなく、坑道に対して角度をもった方向であることが考えられる。坑道の周囲の S 波速度 0.64 km/s, 見かけ速度 2.5 km/s とした場合、後続相の伝播方向

は坑道に対して約 75 度である。また、見かけ速度を 1.1 km/s とした場合、後続相の伝播方向は坑道に対して約 64 度である。今回の観測は坑道に観測点を設置したので、3 つの観測点が線上に配置され、坑道に対して垂直な方向に対しての波数成分の分解能が取れない。したがって後続相の伝播方向を示す波数成分のうち、坑道に垂直な成分が坑道の南に向かうのか、あるいは北に向かうのかはただちに判別できない。C 型地震が火口直下の浅いところで発生すると仮定すれば、後続相は坑道の南東側から坑道に対して 64~75 度の角度で入射して来ることになるであろう。このことは本観測における水平面の振動軌跡が T 方向に細長くなることと調和的であるうえに、文献 5) が本坑道の約 500m 北方に位置する高免観測点におけるハーモニック微動の振動方向が南東-北西方向であることを示していたのと調和的である。したがって、高免観測坑道で観測される C 型地震の後続相は火口直下から直接伝播してくるのではなく、一旦東海岸方面に出た波が回り道をして到達した可能性が示唆される。

以上のように光センサシステムを用いて火山性地震の波動特性の解釈ができることを示した。

#### b) 人工地震観測波形

2016 年 12 月 8 日には反復地震探査の実施にともない、桜島島内で 14 箇所の発破作業が行われた (図 4(a))。本システムによる観測でもこれら 14 箇所の発破に伴う人工地震記録がそれぞれ得られている。これらの観測波形のうち、坑道近傍の KOME、坑道の西方に位置する発破 SHRE、坑道の北方に位置する発破 WIZE、坑道の南方に位置する JGKE、坑道の東南東に位置する発破 UR2E のそれぞれに対する速度変換ずみ観測波形を図 13~図 17 に示す。

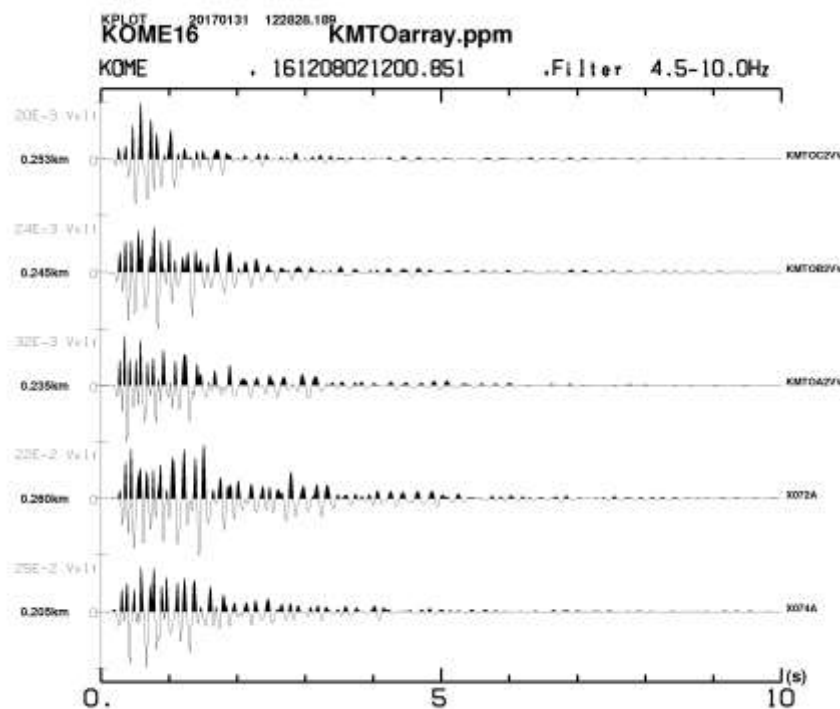


図 13 発破 KOME 観測波形 (速度記録)

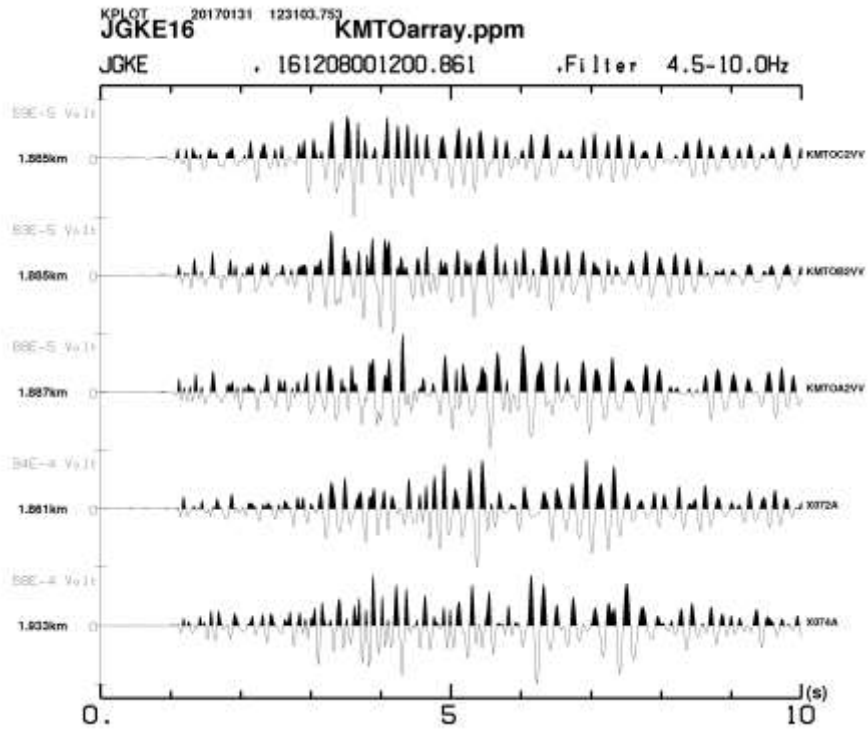


図 14 発破 SHRE 観測波形（速度記録）

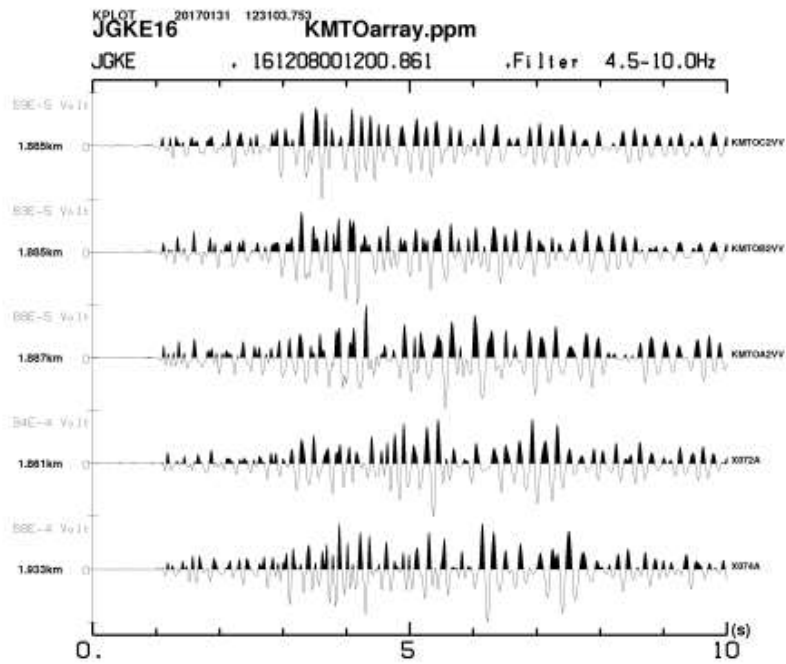


図 15 発破 JGKE 観測波形（速度記録）

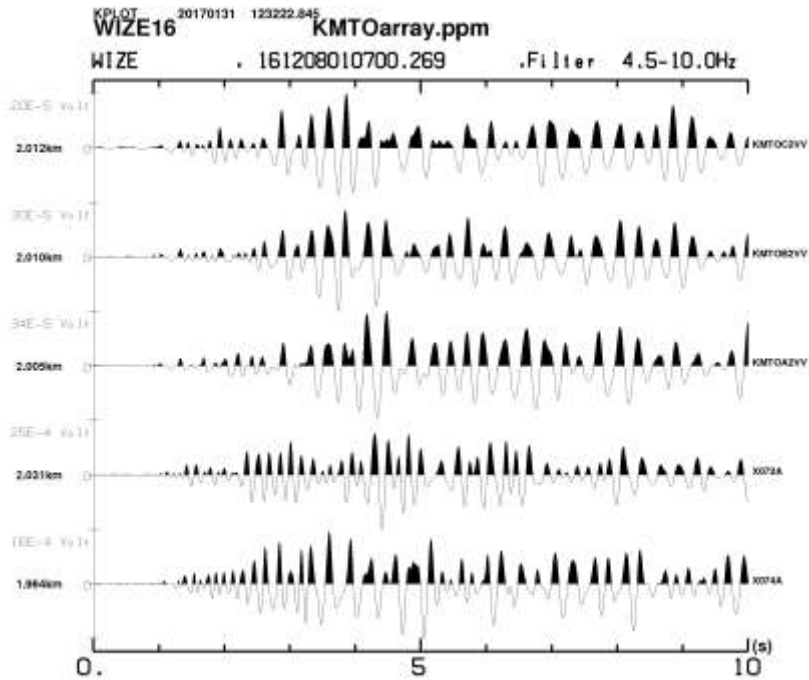


図 16 発破 WIZE 観測波形 (速度記録)

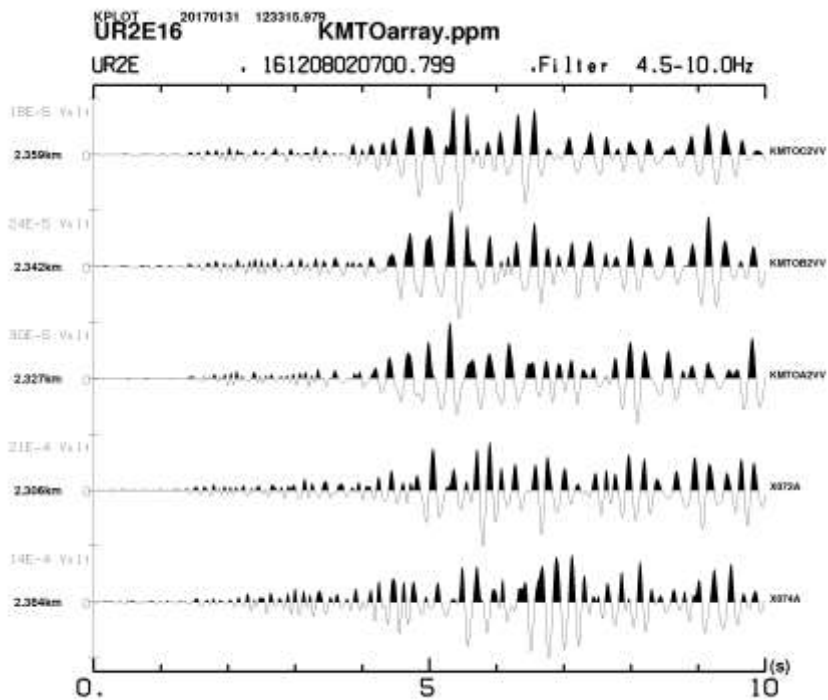


図 17 発破 UR2E 観測波形 (速度記録)

それぞれ発破 KOME は震源距離約 0.24 km、発破点 SHRE は 1.8 km、発破点 WIZE は 2.0 km、発破点 JGKE は 1.9 km、発破点 UR2E は 2.3 km の震源距離であった。図 13 ～ 17 のそれぞれの上 3 本の記録は本システムによる上下動観測記録を地動速度記録に変換した記録を、



下2本は KMT0 の上方で交差する反復探査測線の観測点 X072A, X074A における記録を示している。反復探査測線観測記録は平成 28 年度桜島火山反復地震探査グループから提供されたものである。本システムの観測点は坑道中に設置されたのに対して、反復探査測線の観測点は地表に設置されている。図 13 ~ 17 に示されるように、本システムによる観測波形と従来の構造探査観測システムによる観測波形とはおおむね一致している。

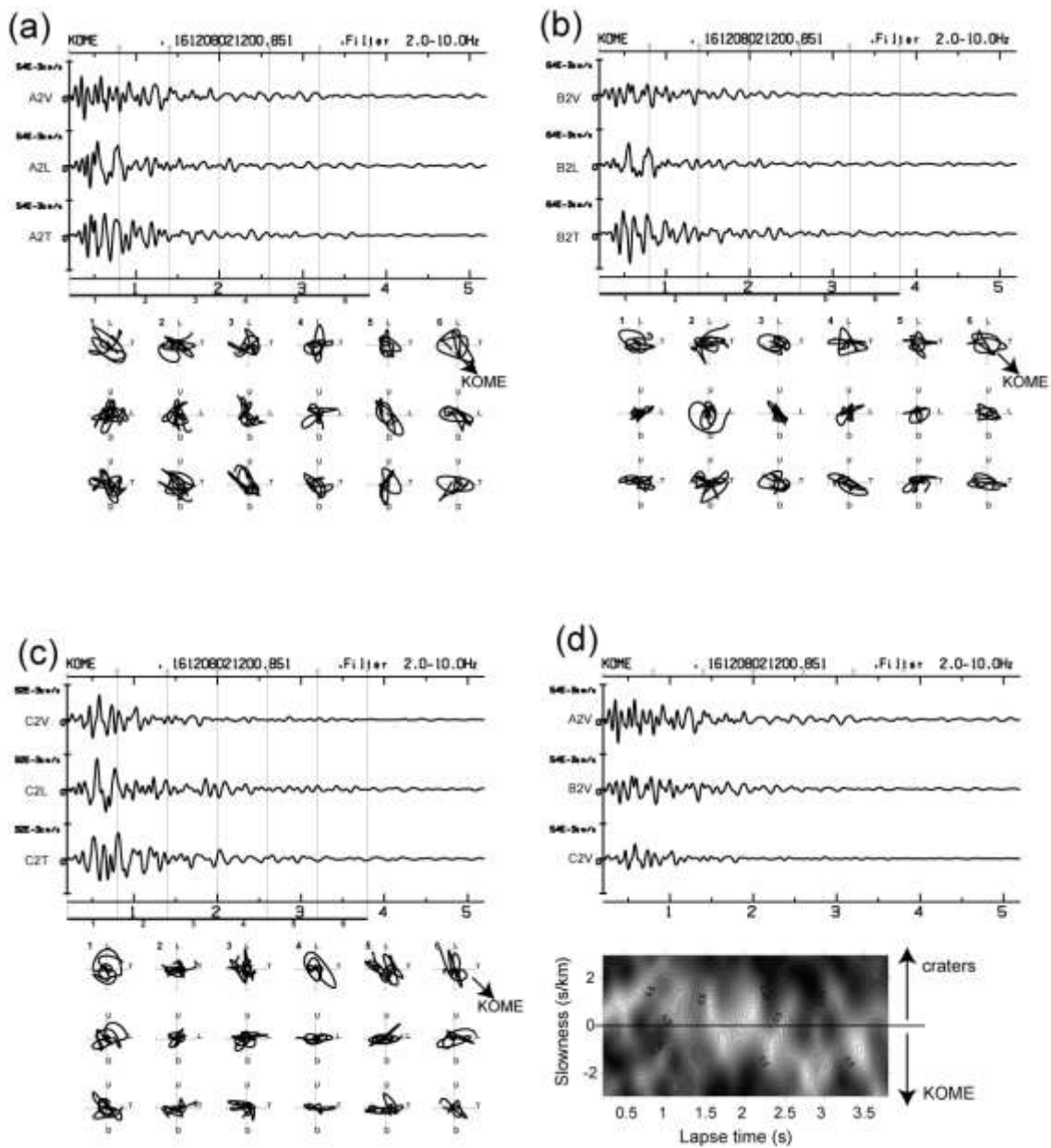


図 18 発破 KOME 観測波形と振動軌跡 (a) ~ (c)、見かけ速度解析 (d)

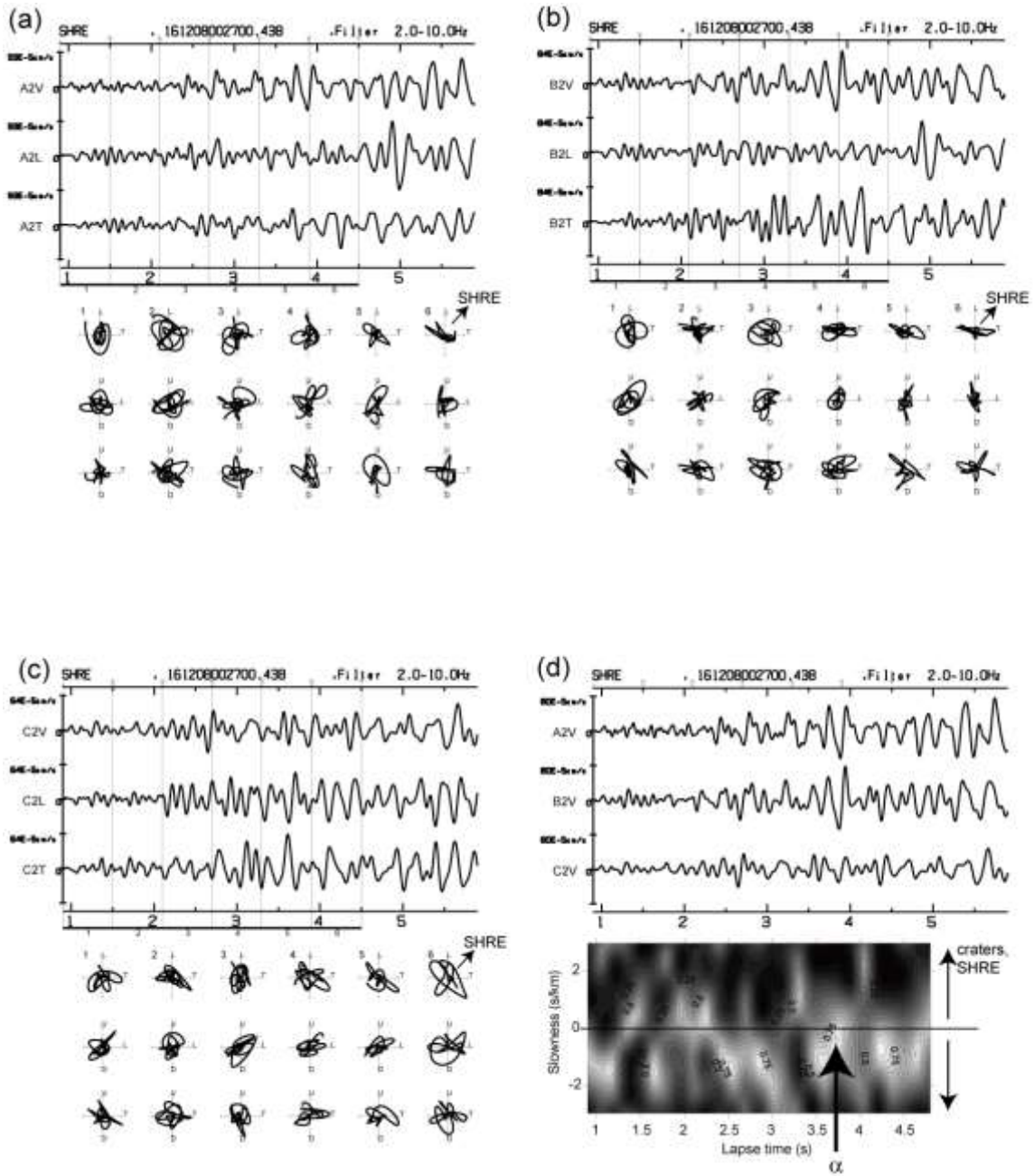


図 19 発破 SHRE 観測波形と振動軌跡 (a) ~ (c)、見かけ速度解析 (d)

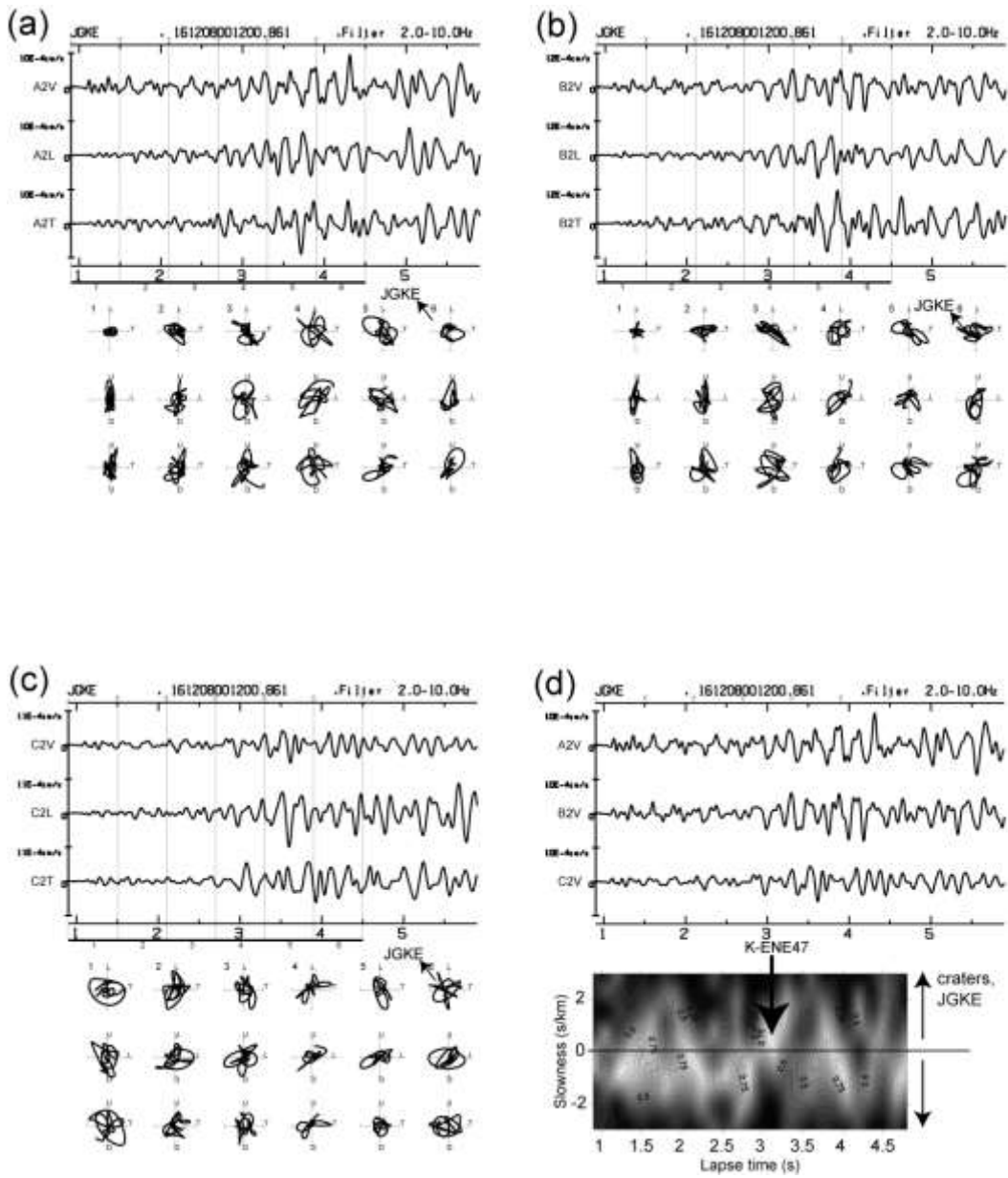


図 20 発破 JGKE 観測波形と振動軌跡(a) ~ (c)、見かけ速度解析(d)

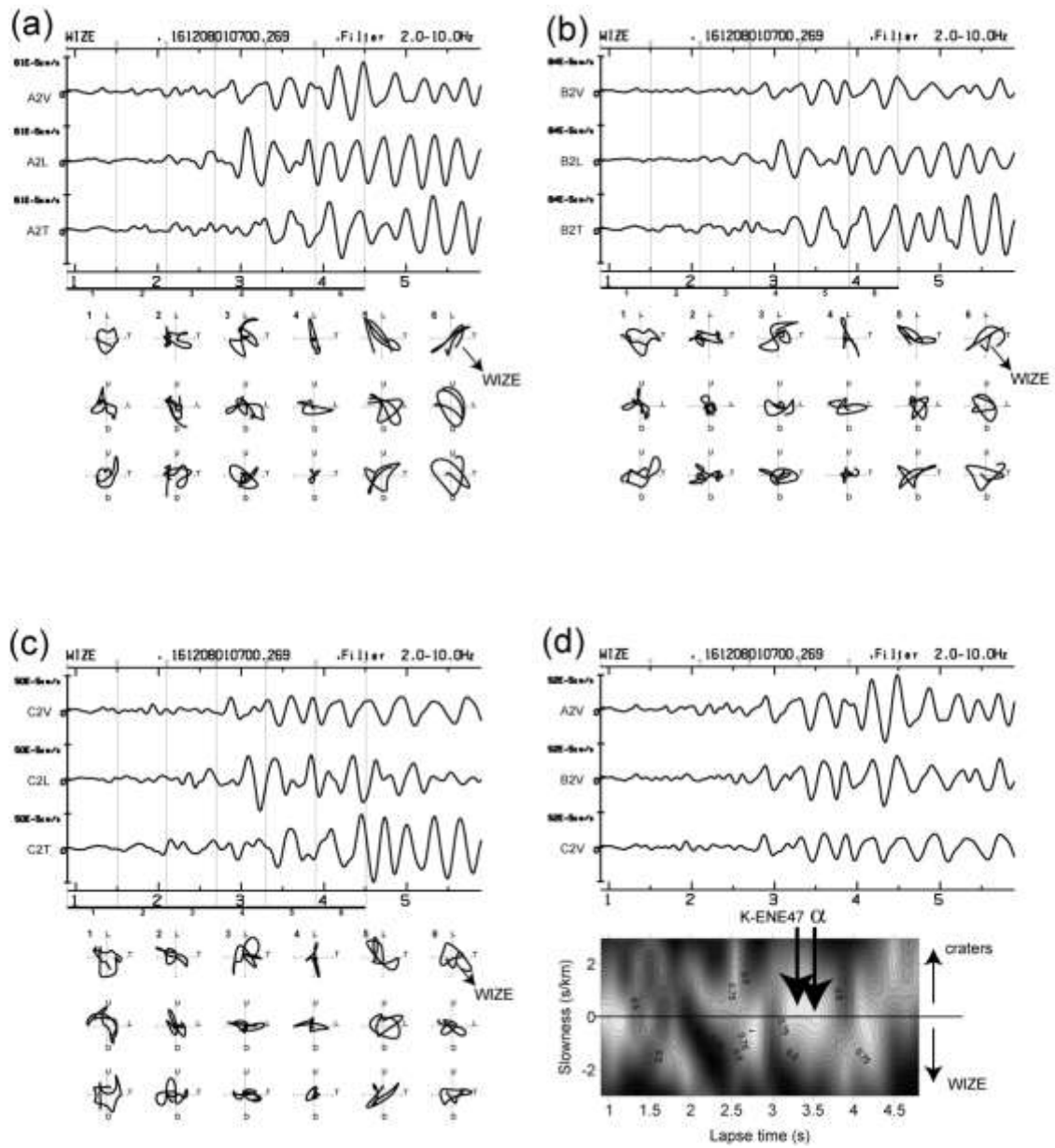


図 21 発破 WIZE 観測波形と振動軌跡 (a) ~ (c)、見かけ速度解析 (d)

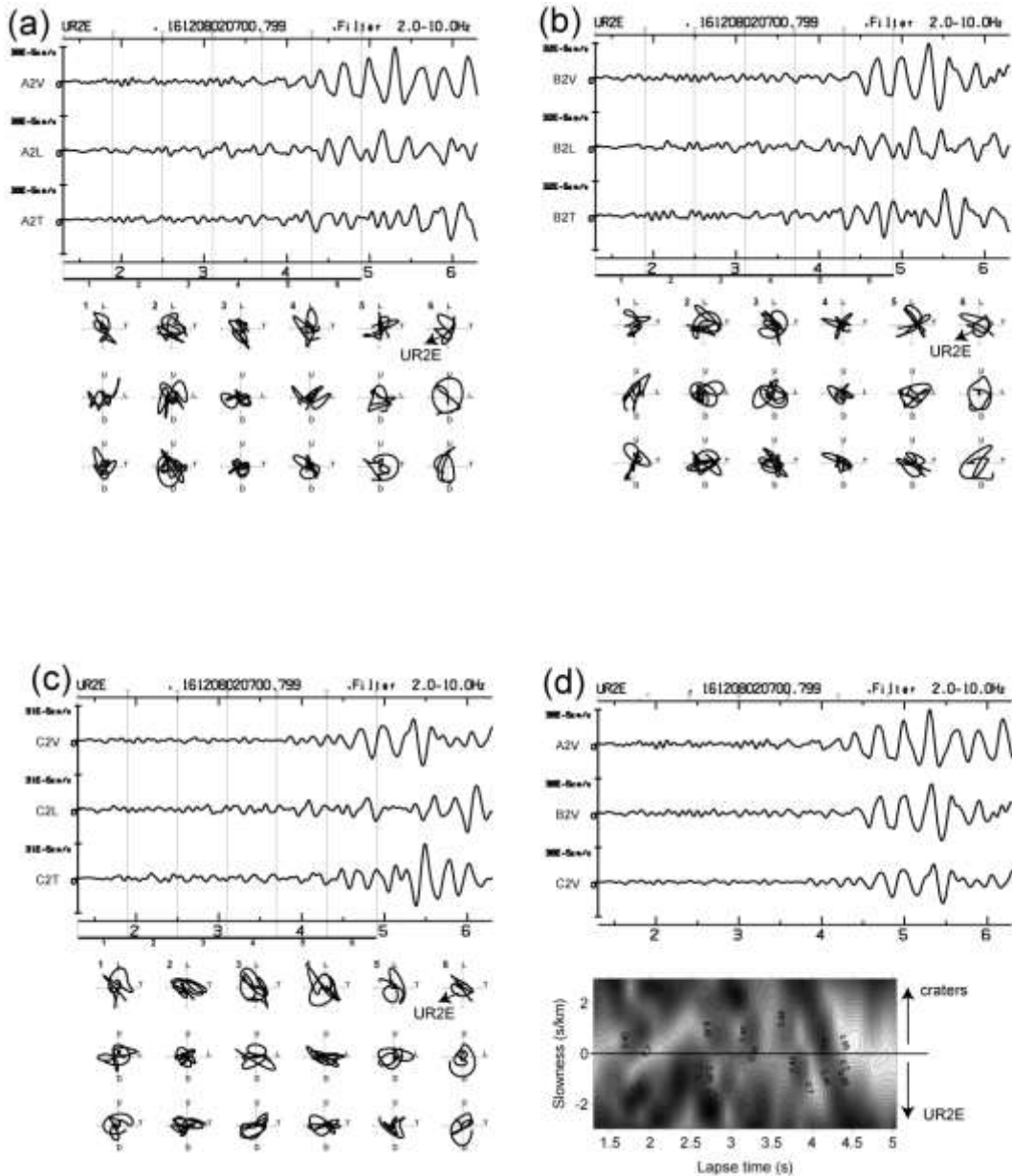


図 22 発破 UR2E 観測波形と振動軌跡 (a) ~ (c)、見かけ速度解析 (d)

次にこれらの観測記録に対して各点の振動軌跡と到来方向解析の結果をそれぞれ図 18 ~ 22 に示す。それぞれの図で (a) は A 観測点、(b) は B 観測点の、(c) は C 観測点の振動軌跡をそれぞれの観測波形と共に示し、(d) は上下動成分から推定された到来方向と見かけ速度の推移を波形と共に示す。

図 18 は発破 KOMO の解析結果である。(a) の時間窓 1 では初動部分の振動が KOMO 方向と平行な方向である。(b), (c) の該当する窓では (a) とは様相の異なる複雑な動きをしている。(d) の該当する部分では発破点から離れる方向 (正のスローネス) に約 1 km/s の速度で伝わる波のあることが示されている。

図 19 ~ 図 22 は異なる 4 方向から KMT0 に入射する地震波を観測したものであるが、発破点の方向と平行な初動部分の振動方向を示す点は共通している。しかし、後続部分の振動様式は発破点によって異なっている。各図 (d) に示される見かけ速度分布も同様に発破点

によって異なるパターンを示している。図 19 ~ 21 のそれぞれの(d)図では注目される入射波成分を矢印で示す。西方から入射する SHRE (図 19(d)) および北方から入射する WIZE (図 21(d)) に対して、3.5~3.7 秒付近に小さなスローネス (つまり大きな見かけ速度) をもつ波の入射が見受けられる。いずれも見かけ速度は 2 km/s を超えている。これは KMT0 アレイの延長方向に対して垂直に近い大きな角度で入射する波の存在を表しており、各図 (a) ~ (c) で相当する時間窓 5 における各点の振動軌跡が上下方向であることとその走時の点から文献 8) が指摘した桜島北東部の海面下 5.8 km の反射面  $\alpha$  からの反射波に相当し、火山活動にともなうマグマの動きに反応する性質がある。さらに南方からの JGKE (図 52(d)) および北方からの WIZE (図 21(d)) では、3.2~3.3 秒付近にも小さなスローネスをもつ波の入射が認められる。これは文献 9) で述べられた海面下 4.7 km の反射面 (K-ENE47) からの反射波に相当し、こちらも火山活動にともなうマグマの動きに反応する性質がある (文献 10)。

さらに 2016 年ではそれまでの反復探査に加えて、追加実施された発破点 NABE は 3.2 km、発破点 AR2E は 6.9 km の震源距離であった。これらの観測記録における振動軌跡および見かけ速度解析の結果についても図 23, 図 24 で紹介する。これらの図の表示方法は前述のそれと同じである。

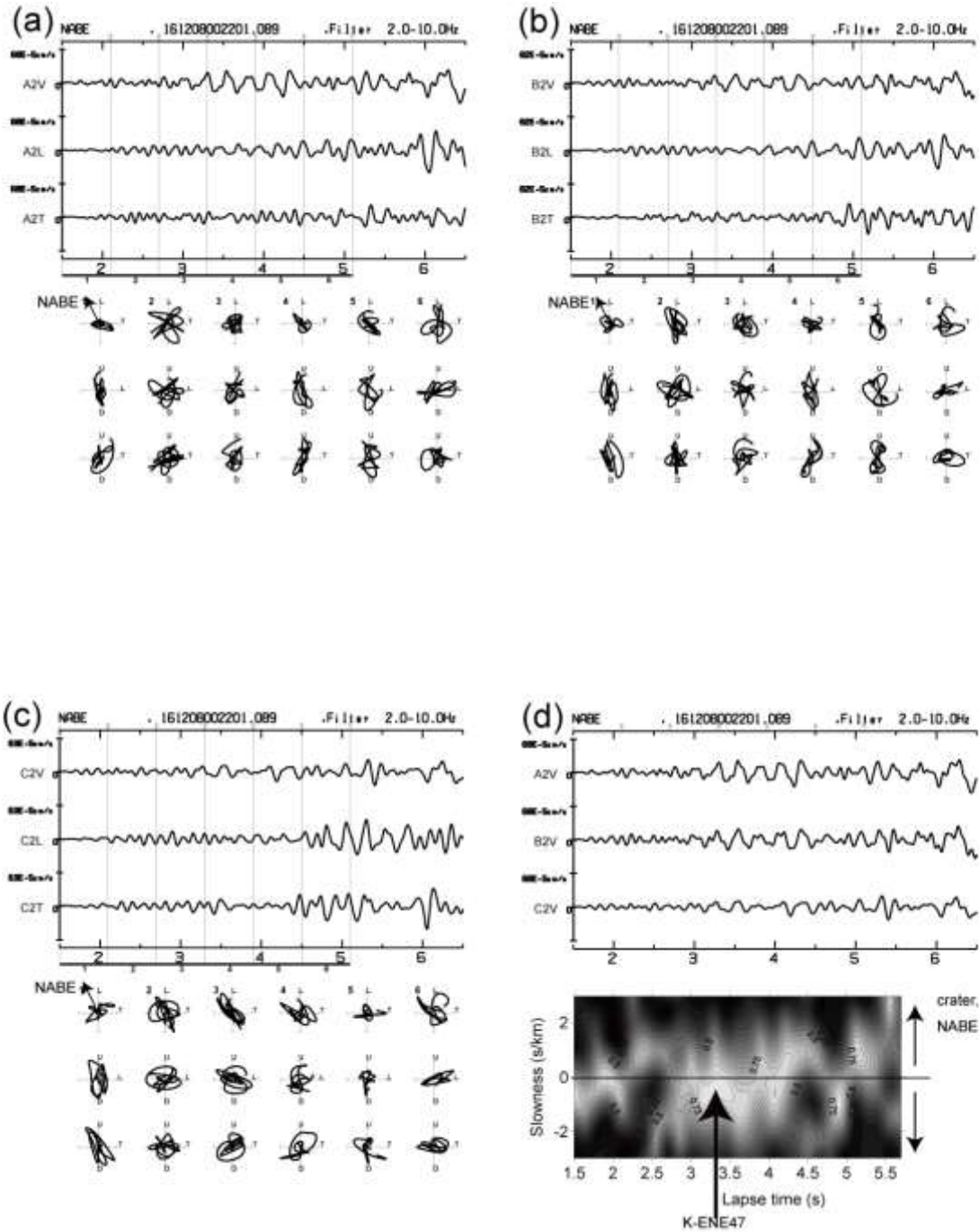


図 23 発破点 NABE 観測波形と振動軌跡(a~c)、見かけ速度解析(d)

発破点 NABE の記録で注目されることは、2 つある。一つは 3.3 秒付近にも小さなスローネス成分を持つ波の入射が見られることである。図 23(a) ~ (c) では相当する時間窓 3 で上下方向の振動が出ていることから、地下から垂直に近い角度で KMT0 アレイに入射する波であると考えられる。この波は走時の点から先ほどと同様に海面下 4.7 km の反射面(K-ENE47)からの反射と考えられる。

発破点 NABE に関して二つ目に注目されることは、図 23(a) ~ (c) に示されるように初動部分の時間窓 1 で発破点の方向と初動の振動方向が一致しないことである。また、d に示されるように該当する部分で小さなスローネスをもつ波が観測されており、KMT0 アレイ

の延長方向に対して垂直に近い角度で波が到来していることが示される。このことから発破 NABE からの初動部分は KMT0 アレイの延長方向に対して大きな角度で入射していることが推定される。この傾向は 1) で述べた C 型地震の後続部分の振動方向および入射方向のふるまいとよく似ていることが注目される。

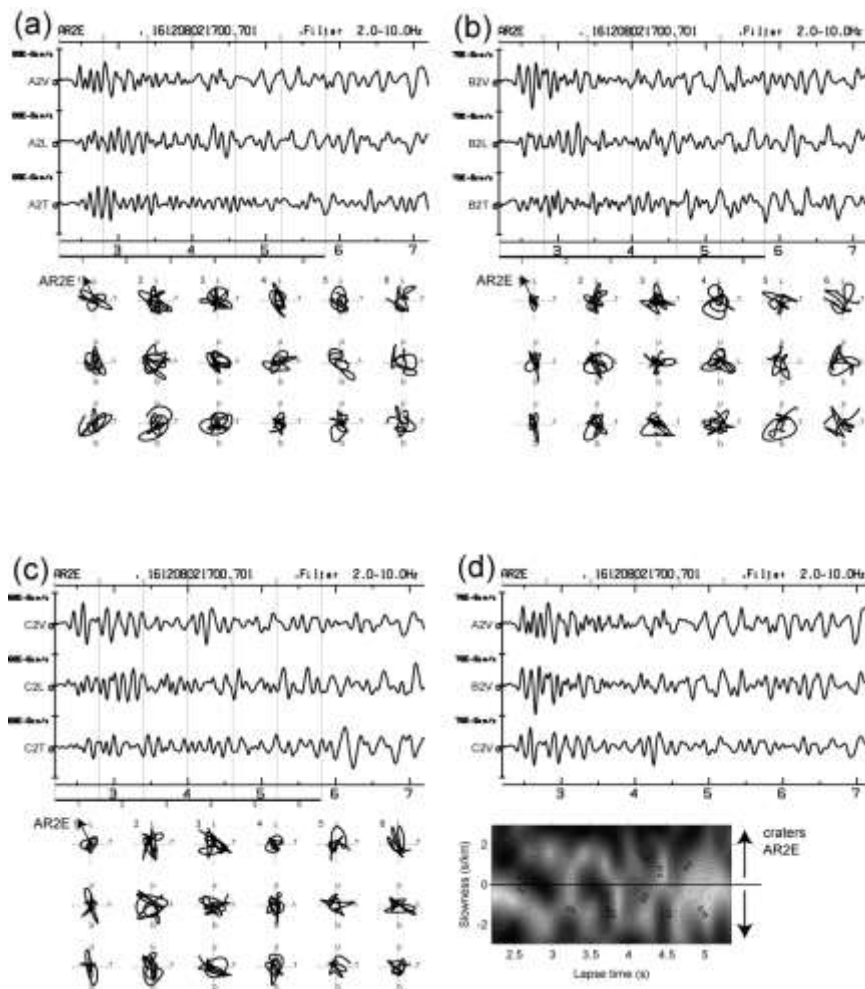


図 24 発破点 AR2E 観測波形と振動軌跡 (a~c)、見かけ速度解析 (d)

アレイ KMT0 から最も遠方に位置する発破点 AR2E では図 24(a) ~ (c) に示されるように初動の振動方向、到来方向ともに発破点の方位とほぼ平行である。この記録で注目されることは d の 4.8~5 秒付近にスローネスの小さな波の到来が見受けられることである。(a) ~ (c) で相当する時間窓 3 の振動軌跡は水平動が卓越する様式を示していることから、この到来波はこれまで指摘されていなかった PS 変換波であると考えられ、走時の点から海面下数キロメートルに変換面が推定される可能性がある。

以上のことから、光センサシステムを用いた人工地震波の観測によっても、マグマの動きに反応する火山深部の地震波反射面を検出することができた。

また、火山性地震や微動の観測でも振動軌跡解析および見かけ速度解析を通して火山現象の解析に用いる事が可能であることが示された。

光センサシステムは従来の観測システムと同様に、火山観測に使用できると考えられる。



### 3) 見学会の実施

#### 位相シフト光パルス干渉法センサ 見学会

日時：

2016年12月9日（金） 9:30-12:00

場所：

京都大学防災研究所火山活動研究センター本館（鹿児島市）および京都大学高免観測坑道（鹿児島市）

内容：

1. 京都大学高免観測坑道の説明（京都大学職員、火山活動研究センター）（写真1）
2. 高免観測坑道に移動
3. 位相シフト光パルス干渉法センサ見学（10人一組にて）（写真2）
4. 高免観測坑道火山観測装置見学（10人一組にて）

参加人数：約30名（主に平成28年桜島火山構造探査参加者）

全体を約10名ずつの範囲で3班に分け、位相シフト光パルス干渉法システム見学、地盤変動観測設備見学、坑道内地震観測設備見学を順に実施した。見学会では位相シフト光パルス干渉法システムに関して活発な質疑が行われた。質疑の内容には今後の事業方針に示唆を与えるものもあった。



写真1 京都大学高免観測坑道説明



写真2 位相シフト光パルス干渉法システムの見学風景

#### c) 問題点

本解析は光センサシステムが正常に動作していることを前提に行われたものである。光センサシステムによるデータを地震計アレイとして取り扱ったのは今回が初めてである。

本課題以前に光センサシステムの性能評価は、振幅スペクトルの一致という形で評価されてきたが、地震計アレイとして取り扱われる場合には各点の位相特性にも注意が払われなければならない。位相特性の差が明らかでなければ信頼できる解析結果を得ることができないのである。

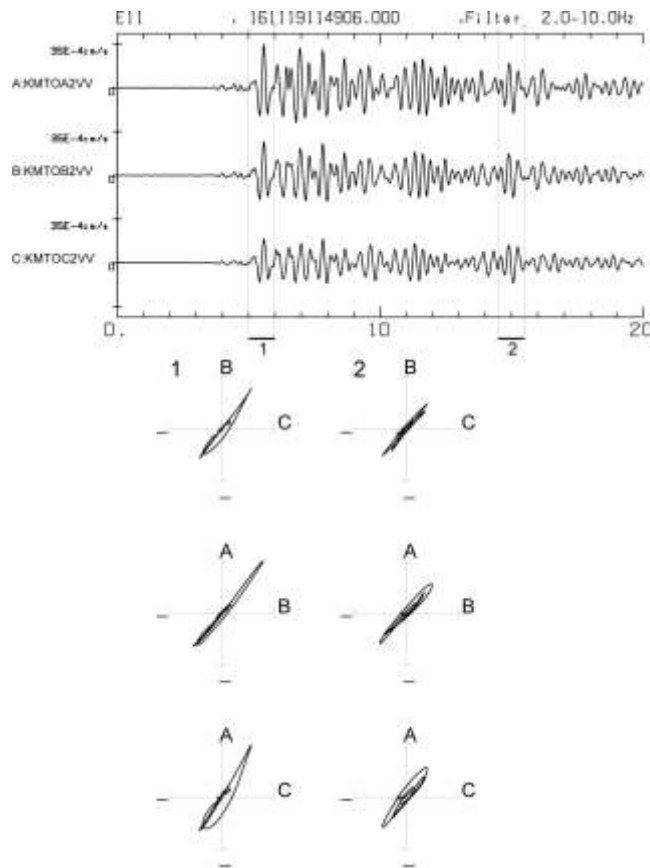


図 25 KMT0 上下動観測点のリサージュ波形。2016 年 11 月 19 日 11 時 49 分に観測された和歌山地方の地震。上は速度変換済み観測波形、下はそれぞれの観測点の組み合わせに対するリサージュ波形。

実際に本課題では C 型地震の振動軌跡の解釈や発破 NABE の初動到来方向が期待される震動源方向とは異なることが明らかになったが、解析結果の信頼性を確立するためには各成分、各観測点の振り子が正常に動作していることを確認する必要がある。本課題で用いた光センサシステムには、電磁式地震計に見られるようなテスト信号で振り子に強制的な動きを与える機構が実装されていない。なお光センサシステムには、先述のように電気回路のヘルスチェックの機能は実装されており、電話回線を通して電気回路のチェックを実施することは可能である。

ここではセンサの位相特性を確認するために、垂直下方から入射する自然地震波の観測波形を用いたリサージュ波形を描くことにする。図 25 では桜島から約 540 km 離れた和歌山地方で発生した地震の観測記録とそのリサージュ波形を示したものである。この記録では地震波は KMT0 アレイにはほぼ垂直に入射するとみなされ、各点の走時差は非常に小さい。初動部（窓 1）と後続相（窓 2）のリサージュ波形は原点を通る 45 度の直線に近い形状を

示している。このことは KMT0 を構成する 3 観測点の間に顕著な位相特性の差がないことを示している。さらに窓 1 に比べて窓 2 の方が直線に近いリサージュ波形を示していることから、窓 2 の顕著な到来相が窓 1 のそれより深部よりやってきたもの、すなわち KMT0 アレイに対して下方から入射してきた波であることを示している。

窓 2 の粒子軌跡を詳しく見ると、隣接する観測点はほぼ直線動きを示しているが、B を挟む A と C では粒子軌跡が微妙に上下に膨らんでいる。このことは A と C の間に微妙な位相差があることを示しており、震央方向が KMT0 アレイに対して斜め方向にあることと整合的である。しかし、隣接する観測点の組では BC の組より AB の組の方がリサージュ波形が微妙に上下に広がる傾向があるので、AB 間の位相差はほぼ同じ方位でほぼ同じ間隔の配置の BC 間のそれに比べてわずかに大きいことが示唆される。先述のように本課題では約 23 m 間隔の 3 点観測であったので、スローネス分解能が 0.78 s/km にとどまった。そのために各観測点の位相特性の差によるスローネス応答特性の劣化は表面化しなかったが、将来本システムが高分解能を期待されるより多点のアレイ観測に応用されるようになれば、テスト信号等による位相特性の検定方法の実装がより強く要請されるものと思われる。

#### (d) 結論ならびに今後の課題

##### 1) 結論

平成 28 年 11 月 13 日～12 月 8 日までの 26 日間にわたり桜島で位相シフト光パルス干渉法を用いた振動観測装置を用いた火山観測を行った。データ収録は特段の問題発生がなく経過し、20G byte におよぶ連続データを収録した。得られた連続データは合計 70 回の自然地震および火山性地震、火山性微動と、14 回の人工地震波形の記録に成功していた。

これらの地震観測波形からは、本課題の位相シフト光パルス干渉法システムが 0.5～20Hz の帯域内で既存の観測システムと一致する波形の得られることが示され、本課題のシステムが火山における地震観測に十分利用可能なものであることが検証された。しかし、より長周期側の観測を狙うのであれば 0.1 Hz 付近のノイズレベルの改善が望まれる。

さらに本課題のシステムのデータを粒子軌跡解析および見かけ速度解析に供した。火山性地震の解析結果は、これまでに報告された結果と整合するものが得られ、観測システム設置場所と活動火口の間構造に由来すると考えられる現象が明らかになった。また構造探査の人工地震観測記録からは、桜島深部のマグマに関連する反射面からの見かけ速度の大きい反射波を検出した。

以上のことから、位相シフト光パルス干渉法を用いた振動観測装置は火山観測に用いることができる基本性能を有していると考えられる。

しかしながら、今年度用いたシステムには現状で以下のような問題点と課題がある。実用化に向けては以下の課題を克服する必要がある。

## 2) 問題点と今後の課題

本事業の一環として行われた解析は光センサシステムが正常に動作していることを前提に行われたものである。光センサシステムによるデータを地震計アレイとして取り扱ったのは今回が初めてである。

本課題以前に光センサシステムの性能評価は、振幅スペクトルの一致という形で評価されてきたが、地震計アレイとして取り扱われる場合には各点の位相特性にも注意が払われなければならない。位相特性の差が明らかでなければ信頼できる解析結果を得ることができないのである。

実際に本課題ではC型地震の振動軌跡の解釈や発破NABEの初動到来方向が期待される震動源方向とは異なることが明らかになったが、解析結果の信頼性を確立するためには各成分、各観測点の振り子が正常に動作していることを確認する必要がある。

本課題で用いた光センサシステムには、電磁式地震計に見られるようなテスト信号を与える機構が現時点で実装されていない。先述のように電気回路のヘルスチェックの機能は実装されており、現状でも電話回線を通して電気回路のチェックを実施することは可能である。

将来本システムが高分解能を期待されるより多点のアレイ観測に応用されるようになれば、テスト信号等による位相特性の検定方法の実装がより強く要請されるものと思われる。

## 3) 謝辞

本課題を遂行するにあたり、本事業では独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構の平成26-27年度技術ソリューション事業(フェーズ1案件)である、「新しい光干渉法を用いた無電源4Dモニタリングシステムの開発」で開発された振動観測システムを使用した。同システムの本課題への利用にあたり、石油天然ガス・金属鉱物資源機構の格別のご厚意とともに許可をいただくことができた。ここに記して感謝の意を表します。

さらに、本課題の観測を遂行するにあたり、京都大学防災研究所 井口正人教授には高免観測坑道および同観測局舎のスペースの提供をはじめとして様々な便宜の提供を受けた。また京都大学防災研究所火山活動研究センター職員には観測の遂行ならびに見学会の実施についてご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

また、使用した反復探査測線観測データは平成28年桜島火山反復地震探査参加者の手による発破作業および観測点設置回収作業を通して得られたものである。平成28年桜島火山反復地震探査参加者の皆様に謝意を表します。

(e) 引用文献

- 1) Yoshida, M., and 11 persons, Real-time displacement measurement system using phase-shifted optical pulse interferometry: Application to a seismic observation system, Japanese Journal of Applied physics, 55, 022701, 2016.
- 2) Minakami, T., Fundamental research for predicting volcanic eruptions Part 1. Bull. Earthq. Res, Inst. Univ. Tokyo, 38, 497-544, 1960.
- 3) 加茂幸介・古澤 保・赤松純平, 桜島の火山性微動の性質について、火山第2集, 22, 41-58, 1977.
- 4) 井口正人, 火山性地震 BL・BH の初動の押し引き分布、京都大学防災研究所年報, 32B-1, 13-22, 1989.
- 5) Mariyanto, S., Iguchi, M., Tameguri, T., Constraints on the source mechanism of harmonic tremors based on seismological ground deformation, and visual observations at Sakurajima volcano, Japan., Journal of Volcanology and Geothermal Research, 170, 198-21, 2008.
- 6) Tarner, M. T., and Koehler, F., (1969) Velocity spectra - digital computer derivation and applications of velocity functions, GEOPHYSICS, 39, 859-881, 1969.
- 7) 筒井智樹・井口正人・為栗 健・他 33 名, 桜島火山における反復地震探査(一回目), 京都大学防災研究所年報, 53B, 241-259, 2010.
- 8) Tsutsui, T., Iguchi, M., Tameguri, T., and Nakamichi, H., Structural evolution beneath Sakurajima Volcano, Japan, revealed through rounds of controlled seismic experiments, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 315, 1-14, DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2016.02.008, 2016
- 9) 筒井智樹, 為栗 健, 井口正人, 中道治久, 大島弘光, 青山 裕, 植木貞人, 山本希, 野上健治, 武尾 実, 大湊隆雄, 市原美恵, 及川 純, 小山崇夫, 前田裕太, 大倉敬宏, 清水 洋, 松島 健, 宮町宏樹, 小林励司, 八木原 寛, 桜島反復地震探査における測線外発破記録に見られる後続相, 日本地球惑星連合 2016 年大会、S-VC47-09、幕張メッセ国際会議場(2016/5/22-27), 2016.
- 10) 筒井智樹, 井口正人, 中道治久, 為栗 健ほか 29 名, 桜島火山における反復地震探査(最終回), 日本地球惑星連合 2017 年大会、(発表申し込み済み)、幕張メッセ国際会議場(2016/5/20-25), 2017.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等  
なし

(g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

### (3) 平成29年度の業務計画案

平成28年度は坑道内にセンサを設置して光システムによる火山観測の評価を行った。平成29年度はセンサを屋外に設置して1ヶ月以上の観測運用を行い、より実際の観測環境での適合性の検証、及び光関係部品の耐久性のテストを行うとともに、耐雷性等の検証も実施する。これらの観測結果を評価する。