３．２ 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

(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による火山観測の実施」

(b) 担当者

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

(c) 業務の目的

本委託業務では 光センサシステムによる火山観測の実施を実現する。

(d) 平成２８年度の実施計画

光センサシステムによる火山観測の実施

(e) 平成２８年度業務目的

本委託業務は、新しい計測技術である位相シフト光パルス干渉法を応用した振動観測システム（以下「光センサシステム」という。）を、火山性地震の観測に資するシステムとしての実用化に取り組み、高度な火山防災の基礎となる高品質なデータの取得に寄与することを目的としている。本業務ではフィージビリティスタディとして、試作品ではあるが、すでに使用可能な状態である位相シフト光パルス干渉法を用いたセンサを活火山の観測に実際に投入する。そしてこの光センサシステムで取得されたデータと既設のセンサによる記録との比較を行い、本システムの火山観測への適用性を検証する。

新技術を応用したセンサを実際の観測に用いることを通して、このセンサが本来持っている耐腐食性、耐雷性などの性質をより高めた実用センサを構築するためのフィードバックノウハウを取得するとともに、火山でのモニタリングへの展開の可能性を切り開き、将来、この光センサシステムの利点を活かした海底火山のモニタリングへの展開や、地中深部観測（耐用上限：200℃程度）などへの展開を目指すものである。

(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、「光センサシステム」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。本計画では光センサ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、光センサ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。

光センサシステムは 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

本業務では光センサシステムを、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）との分担のうち、共同実施機関は 1)実施機関と業務分担の項のように行われた。

1) 実施機関と業務分担　（共同実施機関分）

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

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った。

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った。また、光センサシステムの送受信装置の設置にあたり、京大火山活動研究センターの設備を借用して設置した。

ｄ．光センサ観測システムの見学

構造探査終了後、構造探査に関係された機関と学生、及び業務協力者に対して、桜島に設置した光センサシステムの紹介、説明を行った。

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った。

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た。

なお、成果のとりまとめにあたっては、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、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、整理を行った。

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組み

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の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

課題Ａ「各種観測のデータの一元化」との連携

本課題で行った桜島における自然及び人工地震観測結果を提供することで、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。

課題Ｂ「先端的な火山観測技術の開発」－サブテーマ４「火山内部構造・状態把握技術の開発」との連携

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気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。

「火山研究人材育成コンソーシアム構築事業」との連携

平成２８年１２月９日、桜島での人工地震探査にたずさわった関係者約３０名に対し、実際に稼動している光センサシステムの見学会を行った。

2) 観測の実施

a). 観測に用いた位相シフト光パルス干渉システムの諸元

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」で開発されたシステムを、石油天然ガス・金属鉱物資源機構の許可のもとで観測に使用した。

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称する）の仕組みは白山工業が特許を取得した「位相シフト光パルス干渉法」を使用している。その原理は､(1)レーザー光をパルス化して 2 分化し､一方のパルスを適切に遅延させて干渉させることにより、干渉波の他に、基準面と振動面の入力波のレベルも測定できる（特許 5118004 号）、(2)入力パルスの一部の位相をπ/2 だけずらして(1)と同様の干渉をさせる

ことにより、2つの干渉波を得ることができ、その干渉強度の変化を見ることにより、レーザー光の半波長以上の変位を測定することができる（特許5118246号）、というものである[文献1]。

今回の観測で使用した光センサシステムの仕様は以下のとおりである。

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

測定周波数帯域　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　　ともに約40kg

消費電力　合計で約500W

b).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。

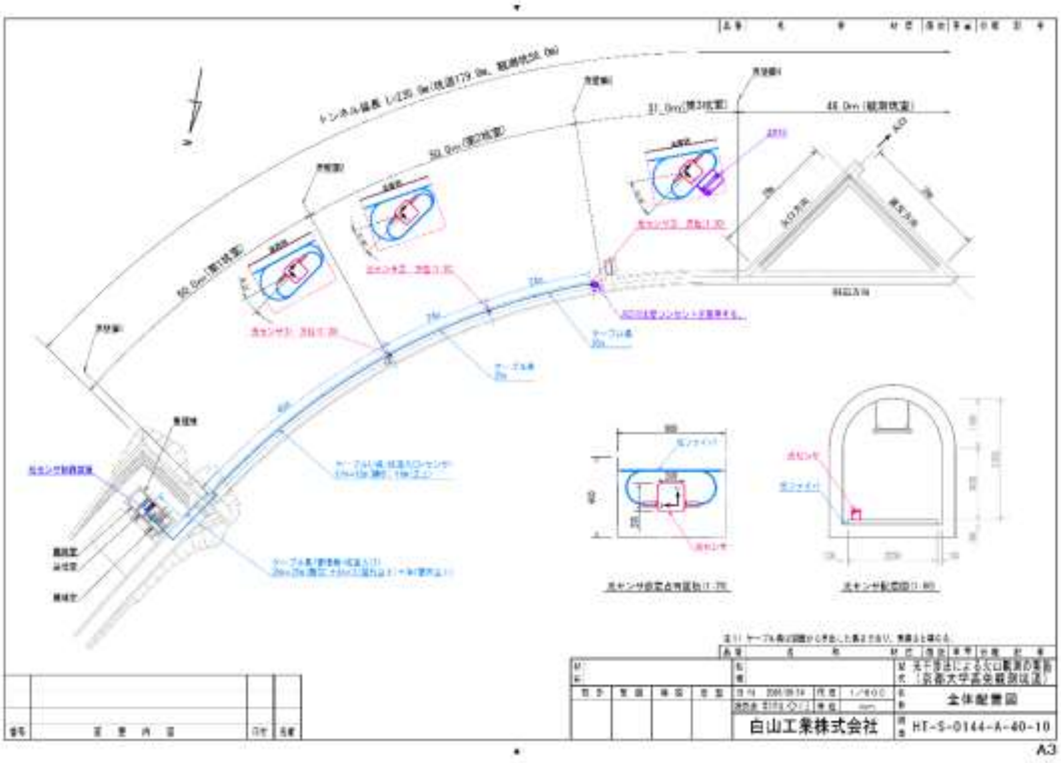

図 1 光センサシステム設置図

センサユニットは高免坑道内の第 2 坑室に 3 ヶ所設置し、入口から A, B, C 観測点とした。微動計 JU210 は C 観測点に隣接して設置した(写真 1)。なお、微動計の電源は坑道内の 100V コンセントを使用した。

A 観測点

B 観測点

C 観測点（光センサと JU210 とを併設）

写真 1　光センサシステム設置状況

写真２　観測室内の光送受信装置の設置状況

観測は 2016 年 11 月 13 日から 2016 年 12 月 8 日まで連続して行われた。その間、観測状況を監視するため、携帯端末による回線を確保して東京からヘルスチェック等を行った(写真 2）。

(c) 業務の成果

1) 光センサシステムの運用

ここでは坑道内の微動計 JU210 および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の常設観測点との比較について述べる。

a). 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。そのリストを以下の表 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

この中から、まず火山性の地震現象（火山性地震または火山性微動）の観測例を紹介する。

A 型地震　11 月 25 日の桜島 M1.0

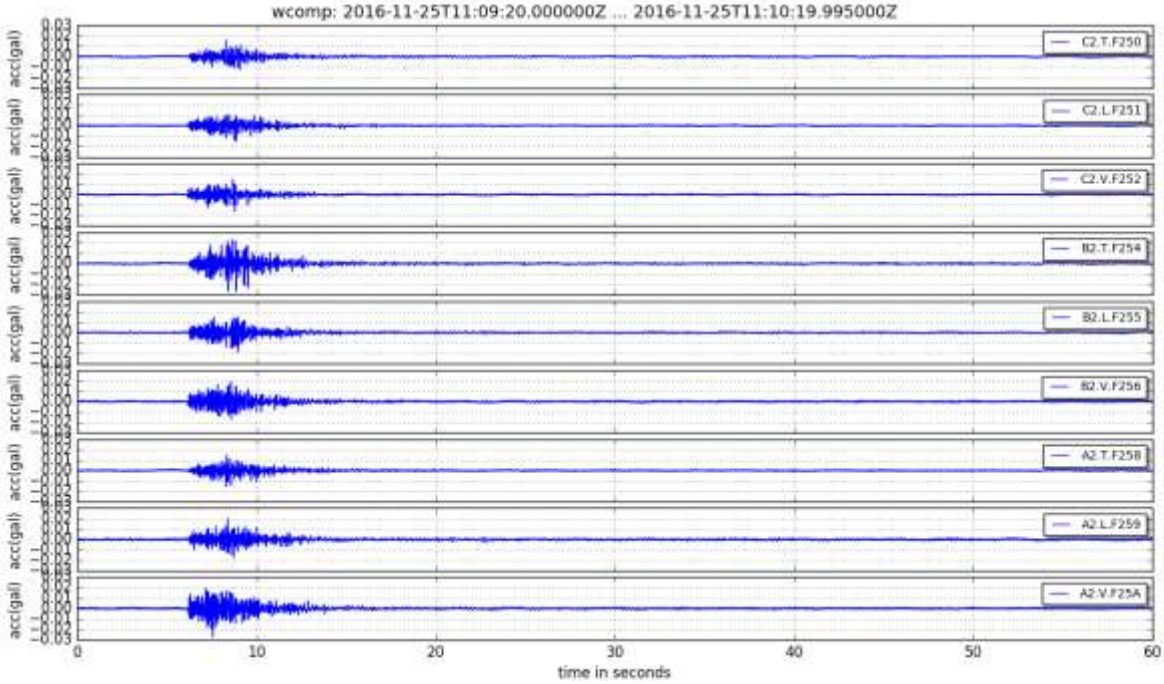

図 2　A 型地震の記録例

次に図 2 で示したイベントに対する光センサ C 観測点及び既設の Trillium-240(京都大学 KMT 観測点)の立ち上がり時の波形を図 3 に示す。後述のように Trillium-240 はスペック上、20Hz 以上でノイズレベルが高くなるため、30Hz のローパスフィルタをかけている。なお、KMT 観測点は桜島高免坑道のセンサ室内にあり、C 観測点とは界壁扉をはさんで至近距離にある。

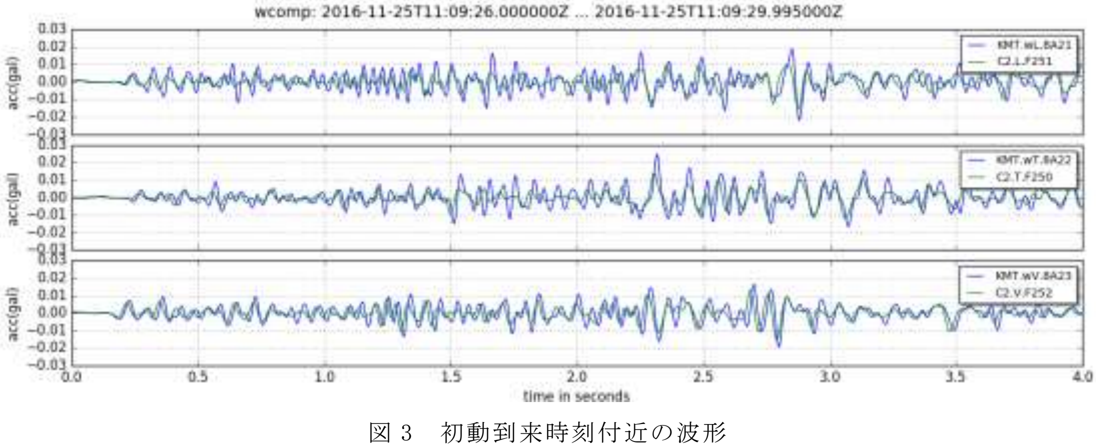

図 3　初動到来時刻付近の波形

上記図 2 で示した地震の、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を図 4 に示す。なお、スペクトルのグラフにはローパスフィルタはかけていない。

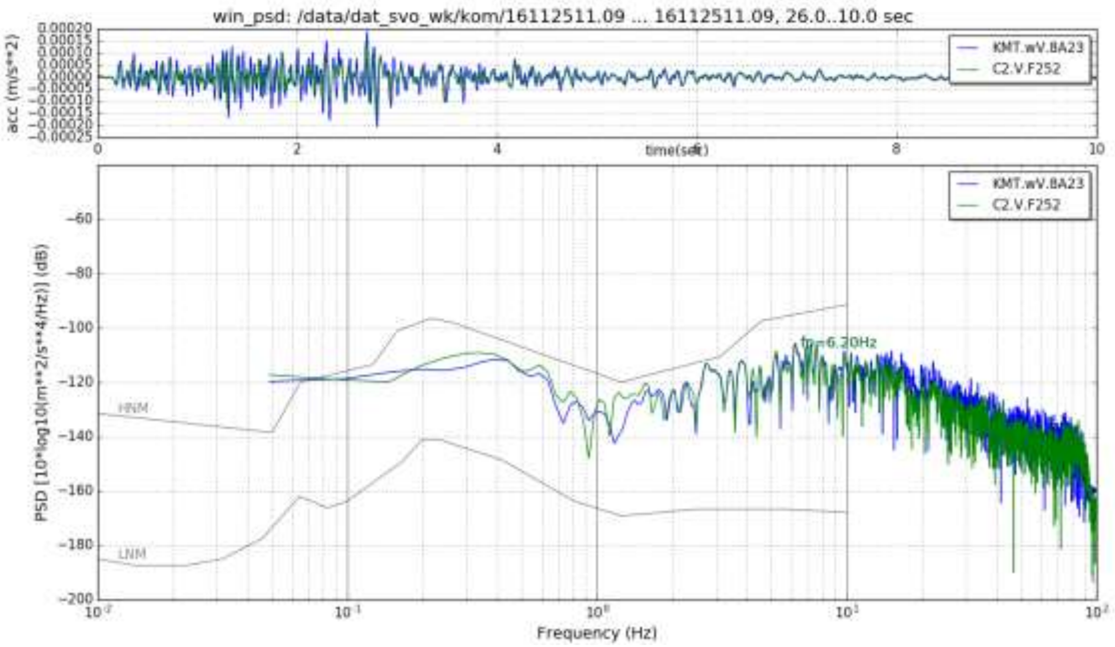

図 4　A 型地震記録のスペクトル例

B 型(BH 型)地震　11 月 21 日 17 時 16 分

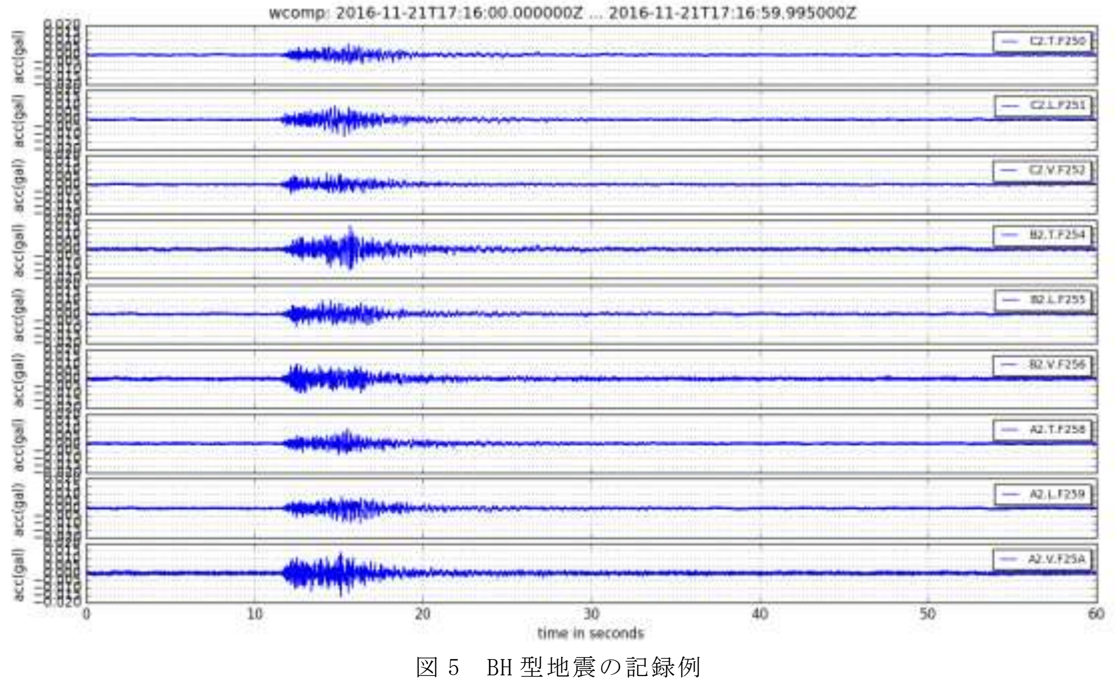

図 5　BH 型地震の記録例

上記図 5 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図 6 に示す。

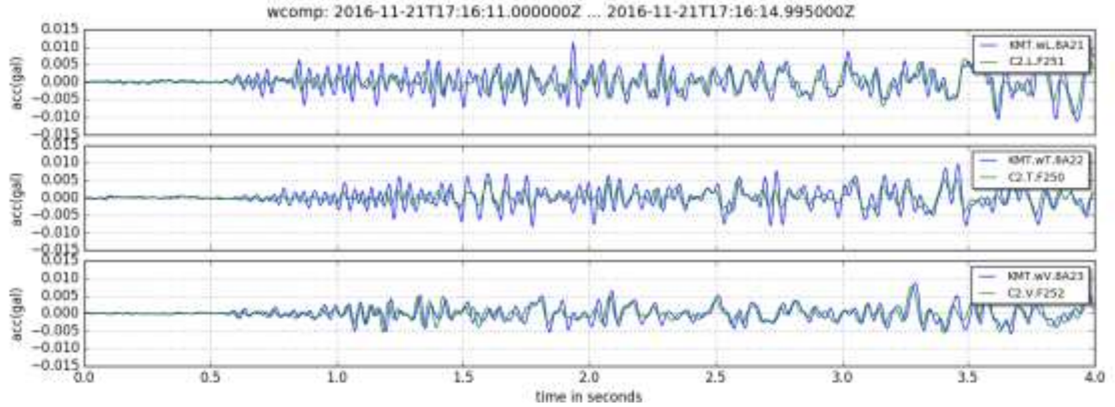

図 6　初動付近の波形

上記図 5 の地震イベントにおける光センサ 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を図 7 に示す。

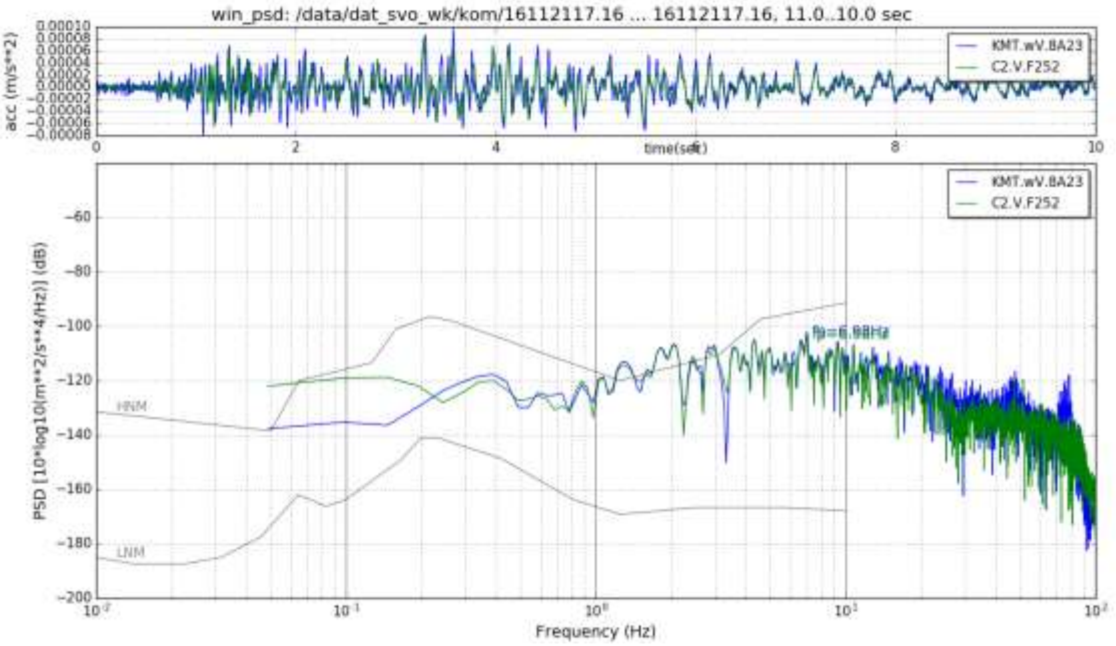

図 7 BH 型地震のスペクトル例

BL 型地震

11 月 27 日 6 時 54 分

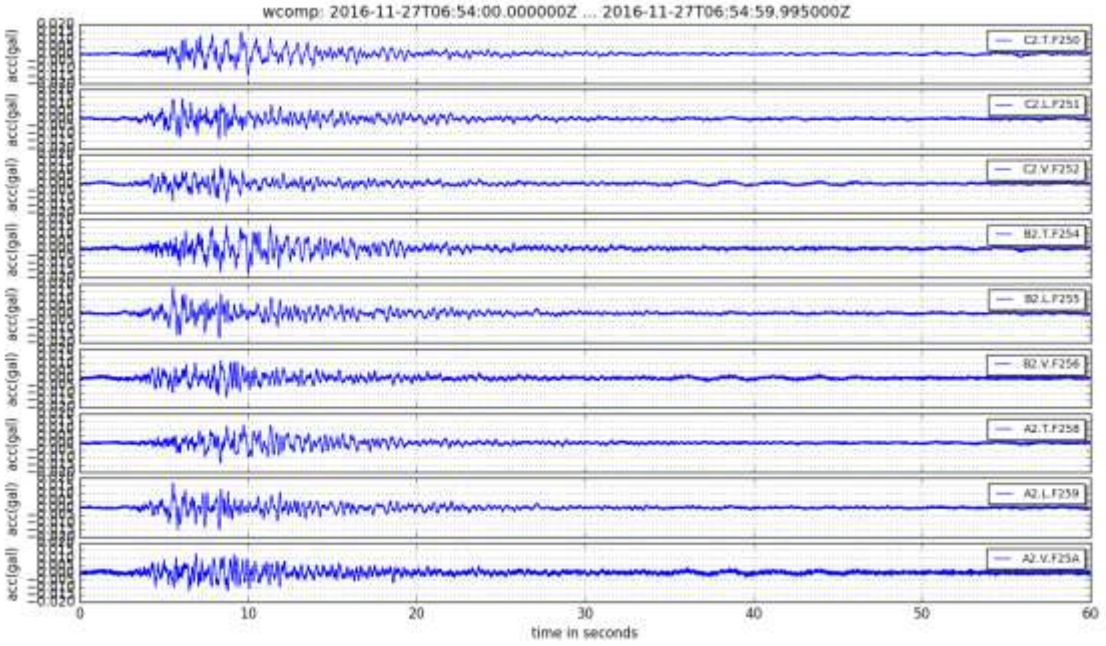

図 8 BL 型地震の観測例

上記図 8 の地震イベントの、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図 9 に示す。

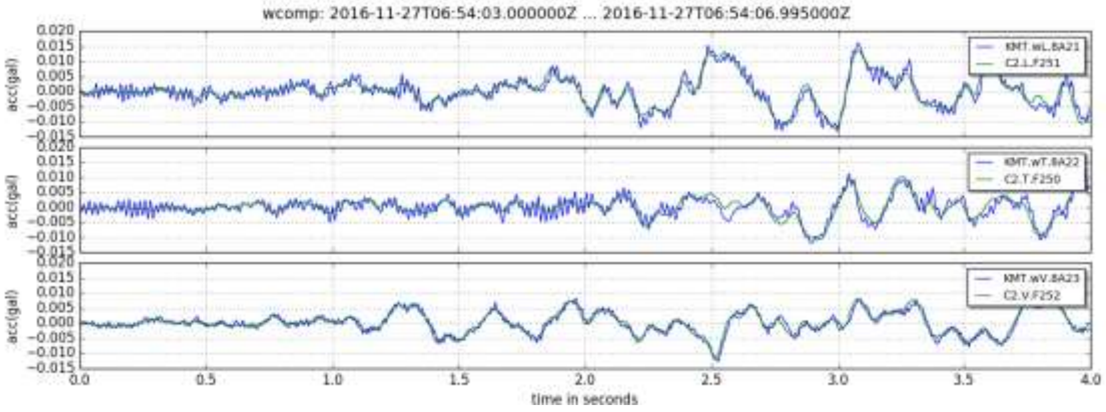

図 9　BL 型地震の初動付近の波形

上記図 8 の地震の、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を図 10 に示す。

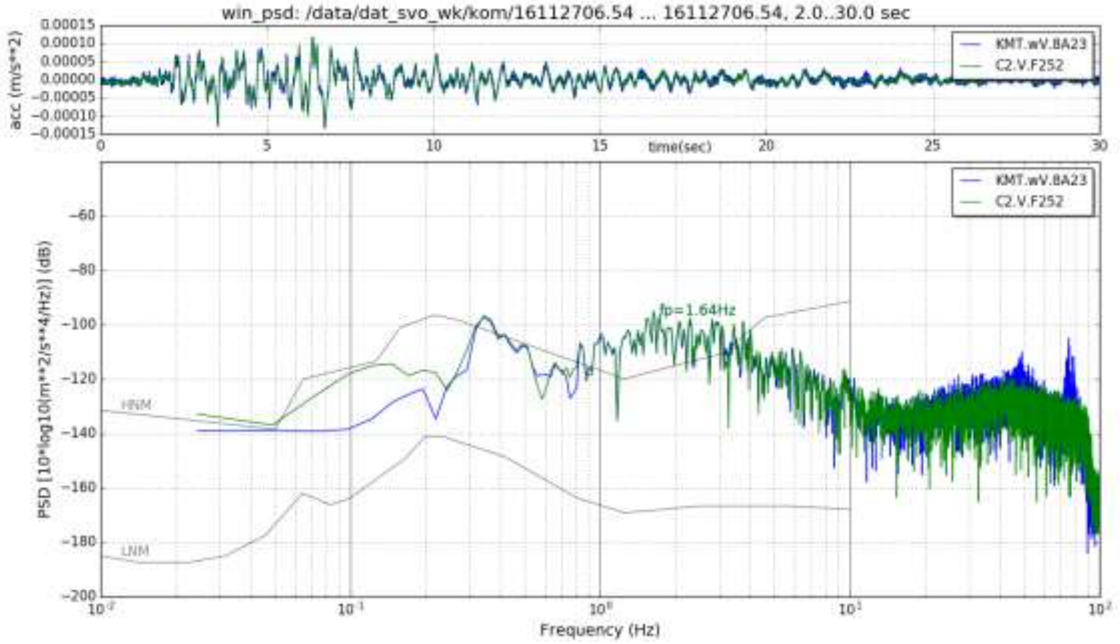

図 10　BL 型地震のスペクトル例

C 型地震

ほぼモノトーンの周波数 2Hz の波形が継続している波形がみられた。

11 月 19 日 1 時 47 分　継続時間約 1 分

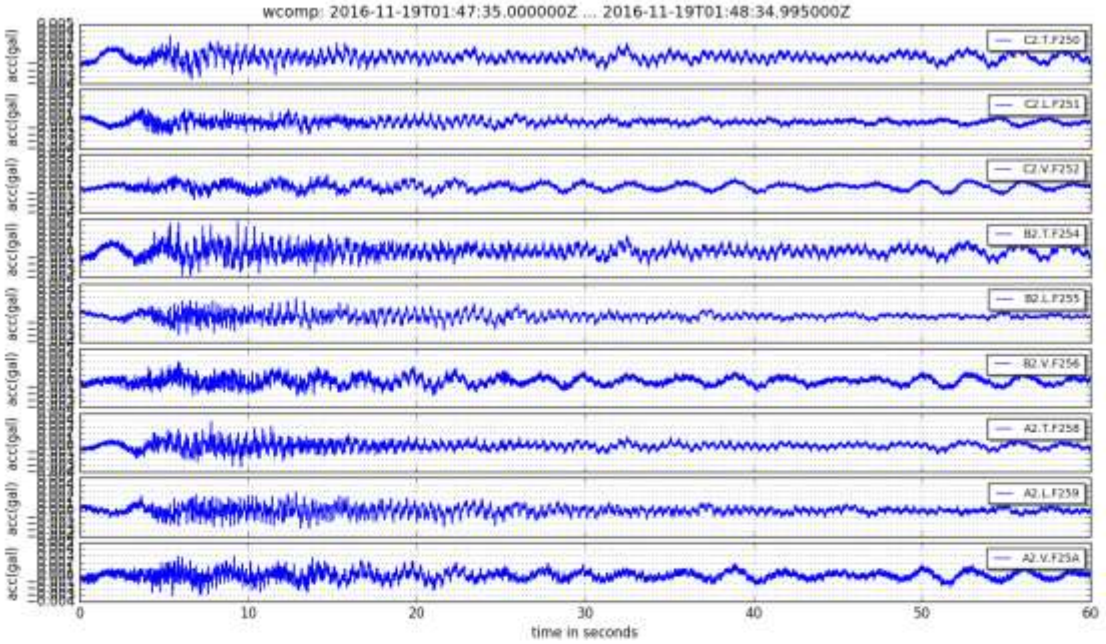

図 11　C 型地震（11 月 19 日 01 時 47 分）

上記図 11 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 12 に示す。

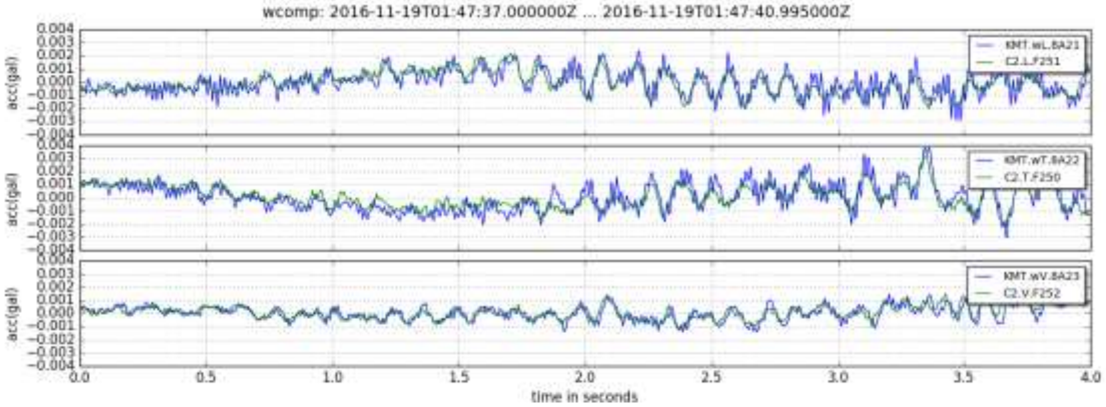

図 12　C 型地震（11 月 19 日 01 時 47 分)の初動付近

上記図 12 の地震イベントの、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を下の図 13 に示す。2 Hz 付近、4 Hz 付近、6 Hz, 8Hz に鋭いピークが現れている。

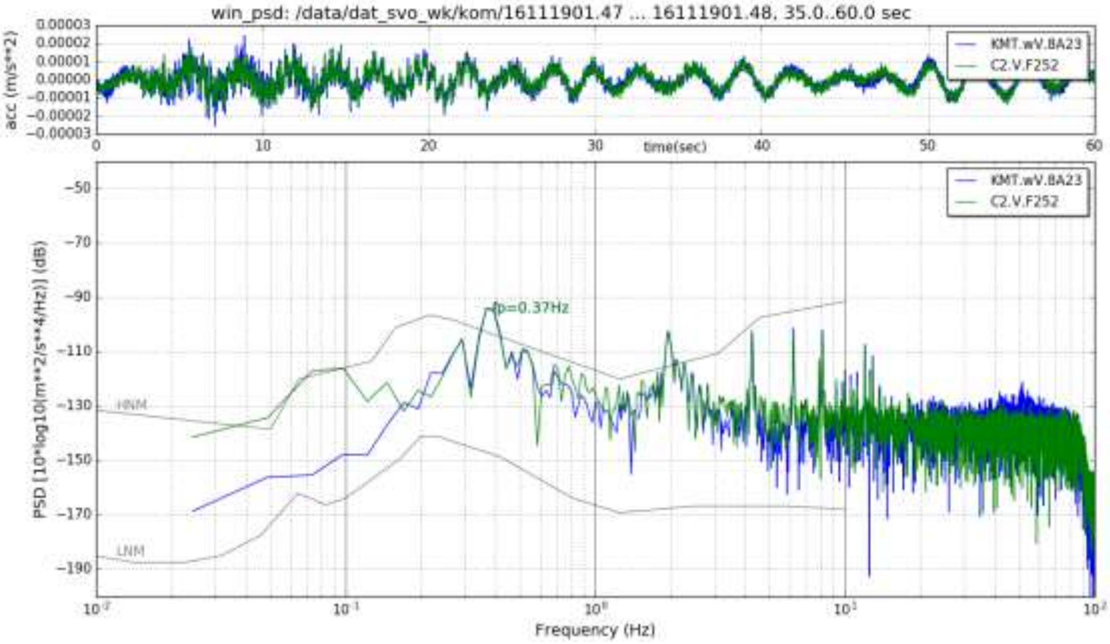

図 13　C 型地震（11 月 19 日 01 時 47 分)のスペクトル

11 月 22 日 3 時 36 分　継続時間約 3 分

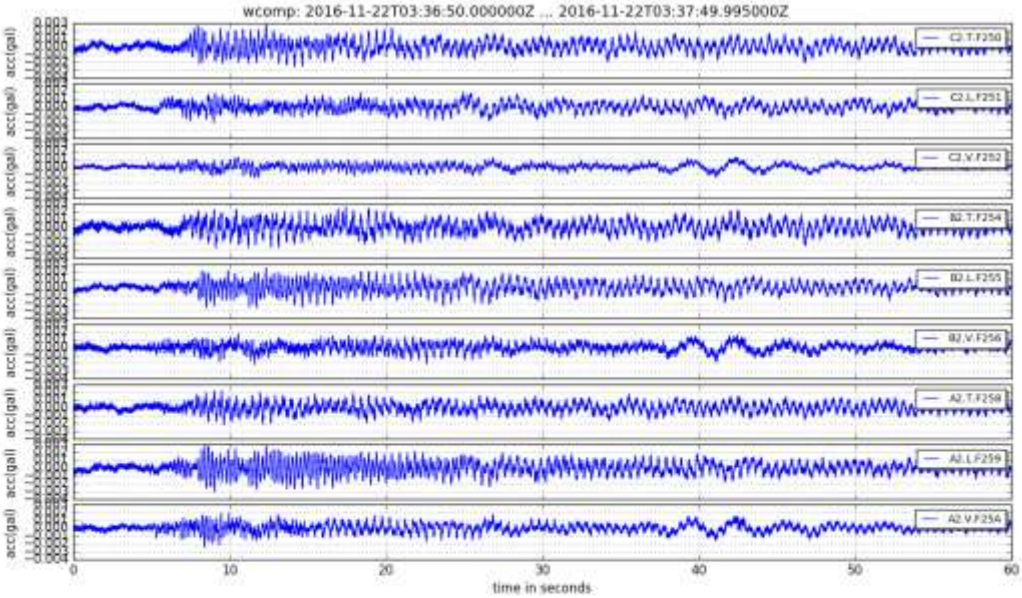

図 14　C 型地震イベント(11/22 03:36)に対する光センサ C 観測点で得られた波形

上記図 14 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 15 に示す。

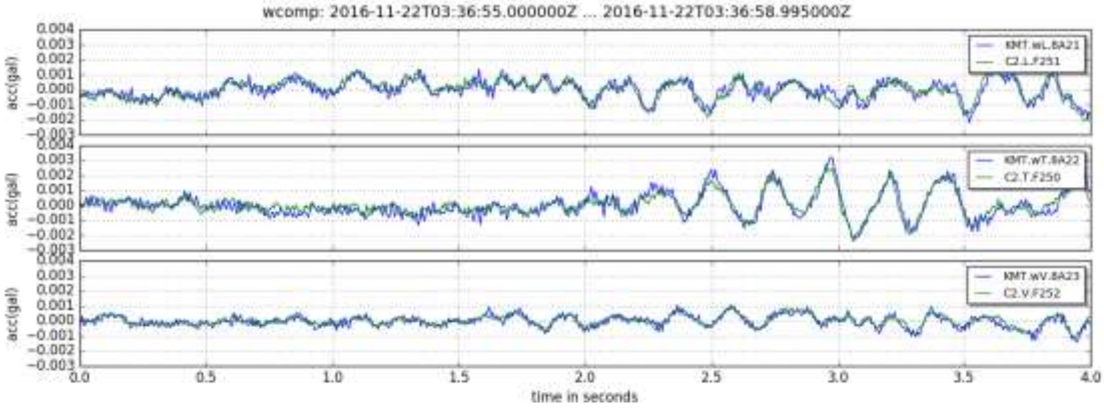

図 15　C 型地震 (11 月 22 日 03 時 36 分)の初動付近

図 14 のイベントのスペクトルを図 16 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, 8Hz に鋭いピークが現れている。

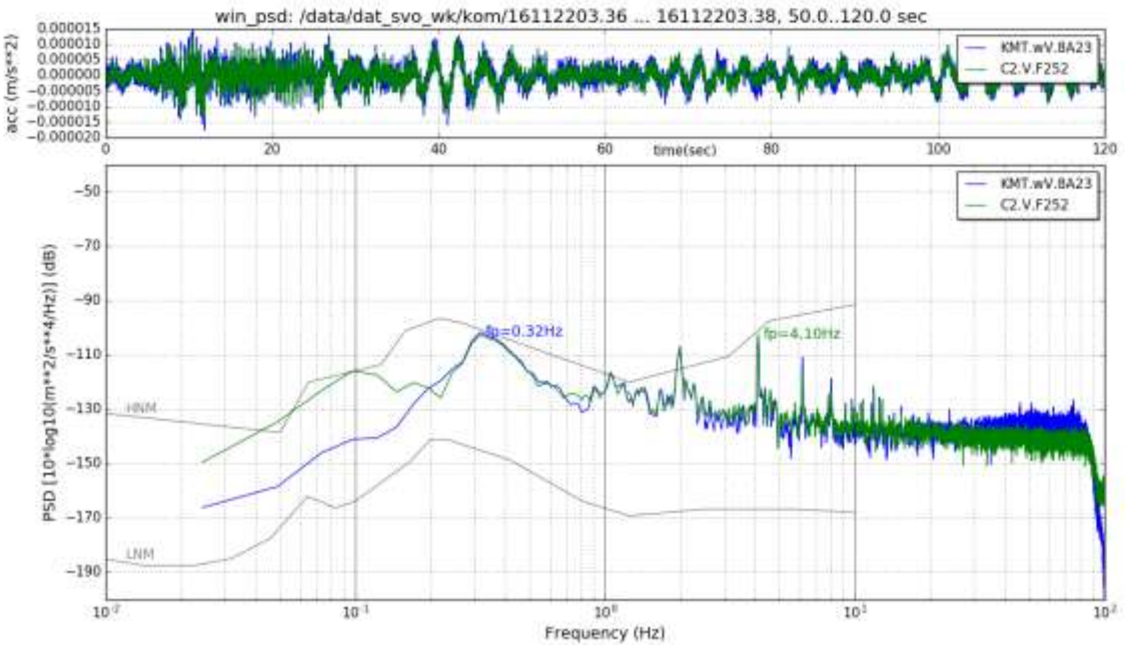

図 16　C 型地震イベント(11/22 03:36)に対する光センサ C 観測点および既設の Trillium-240(KMT)の上下動成分のスペクトル。

図 17 に気象庁観測点（鍋山および赤生原）で得られた C 型地震イベントの記録を比較のために示す。

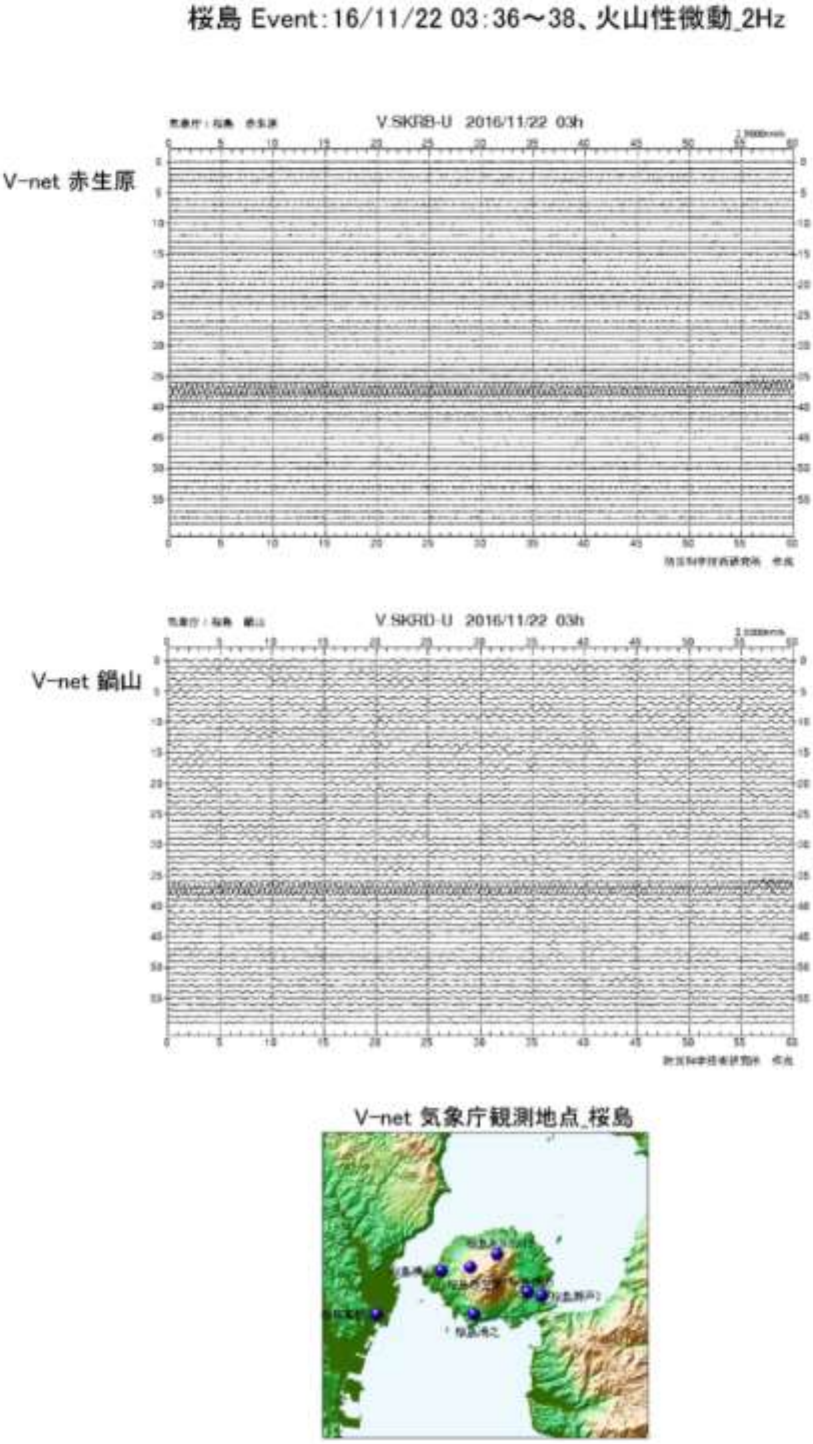

図 17　上：V-net 気象庁赤生原観測点、　下： V-net 気象庁鍋山観測点での記録を示す。当初は火山性微動として取り扱ったために、表記が火山性微動となっている。

火山性微動　12 月 7 日 1 時 20 分

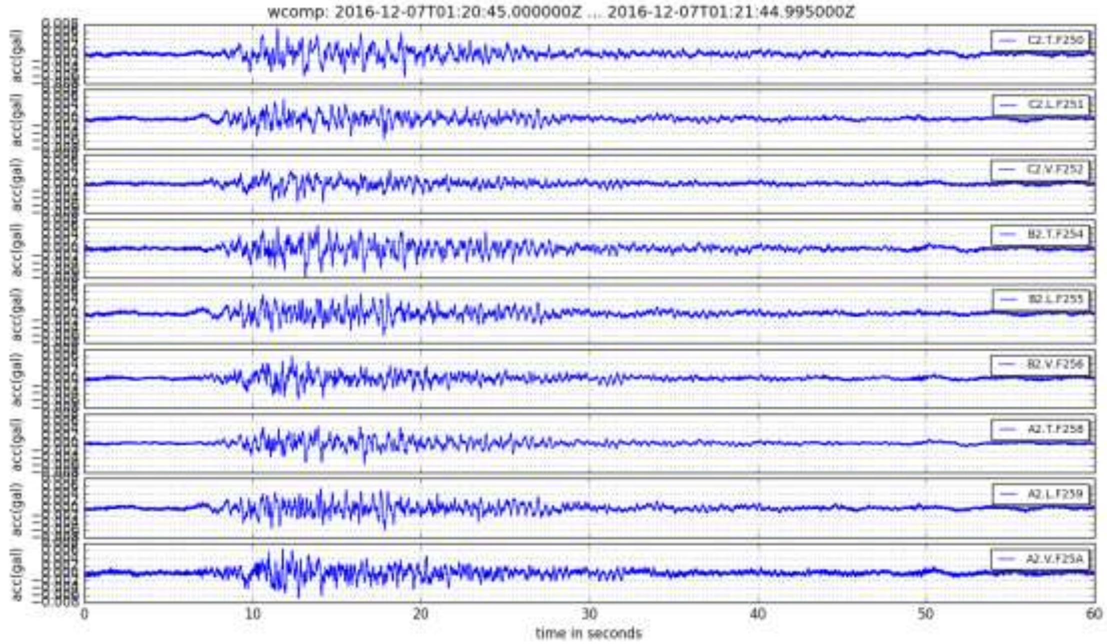

図 18　火山性微動観測波形例

上記図 18 の火山性微動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図 19 に示す。

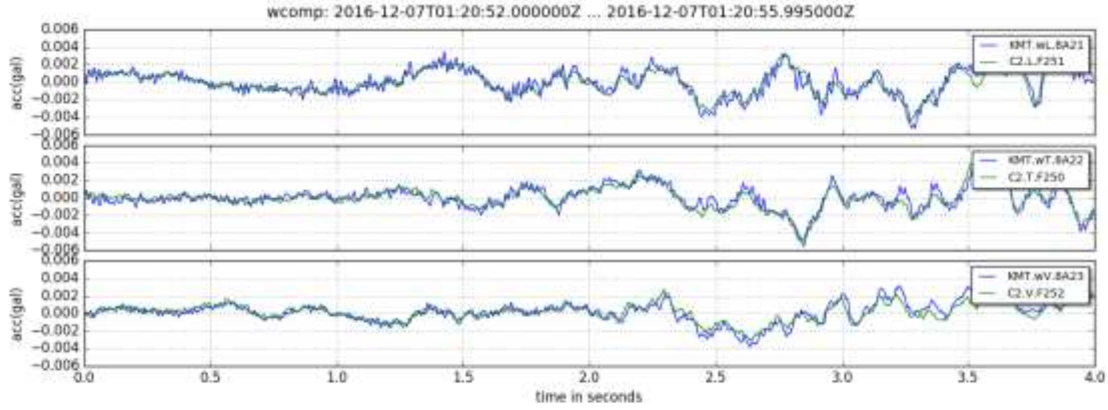

図 19　火山性微動の波形立ち上がり部の比較

上記図 18 に示す火山性微動イベントの、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を図 20 に示す。

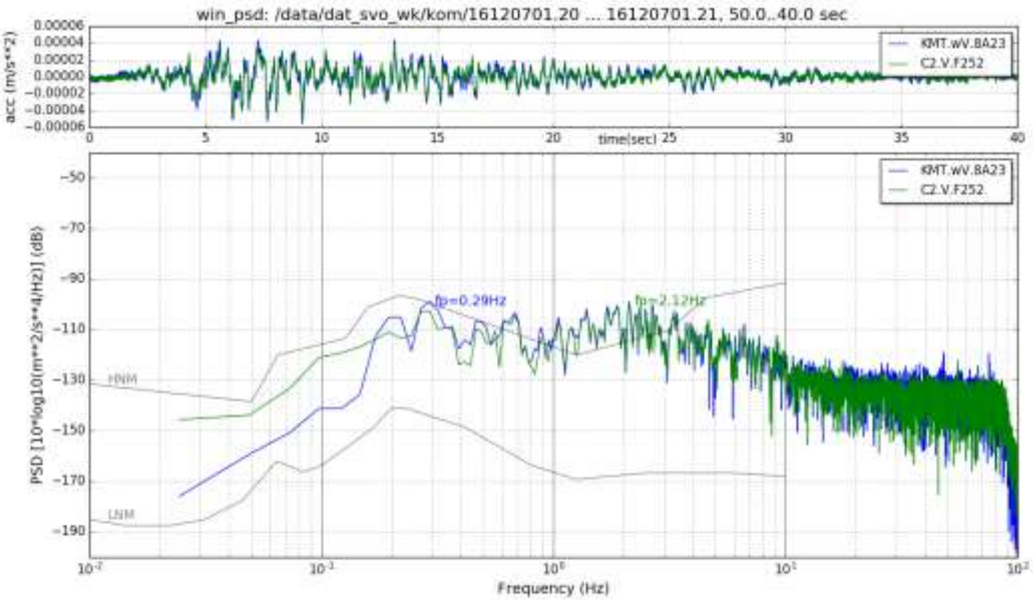

図 20　火山性微動のスペクトル

火山性以外の遠地地震や近地地震の記録にも成功した。ここでは遠地地震の例として、2016 年 11 月 13 日のニュージーランド M7.8（図 21）および 2016 年 11 月 22 日福島沖 M7.4（図 22）、近地地震として 12 月 5 日の熊本県熊本地方等の地震 M3.7（図 22）および 2016 年 11 月 18 日の福島県西方沖 M4.2 （図 23）の記録を示す。

2016 年 11 月 13 日　ニュージーランド　M7.4

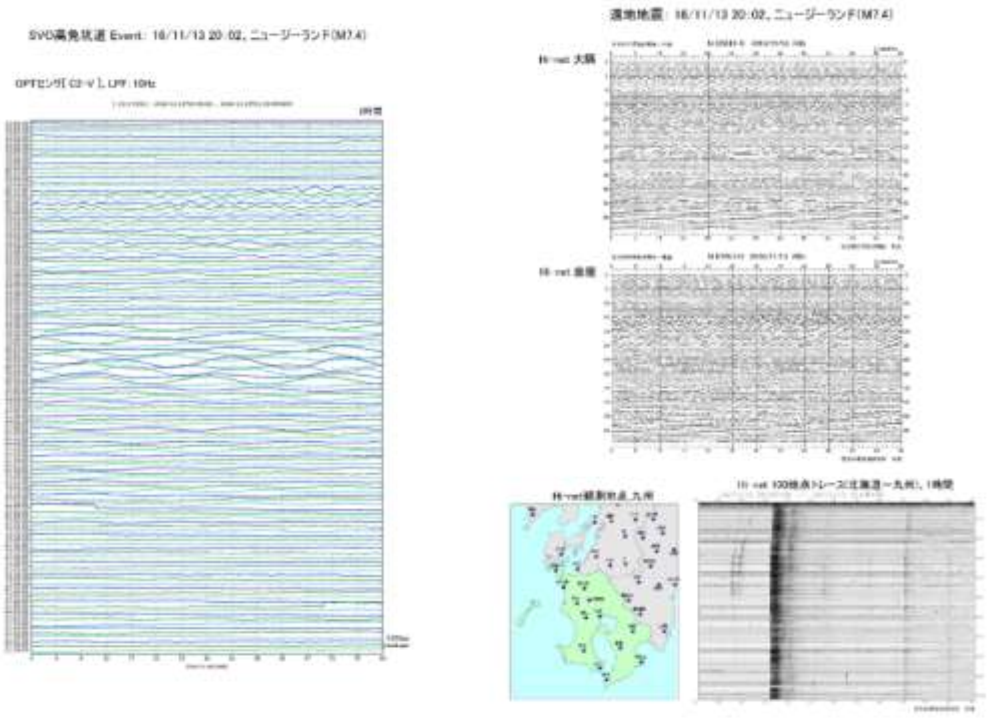

図 21 光センサシステムで取得された記録（左）と、Hinet 大隅、鹿屋の波形（右）

2016 年 11 月 22 日 05 時 59 分　福島沖　M7.4

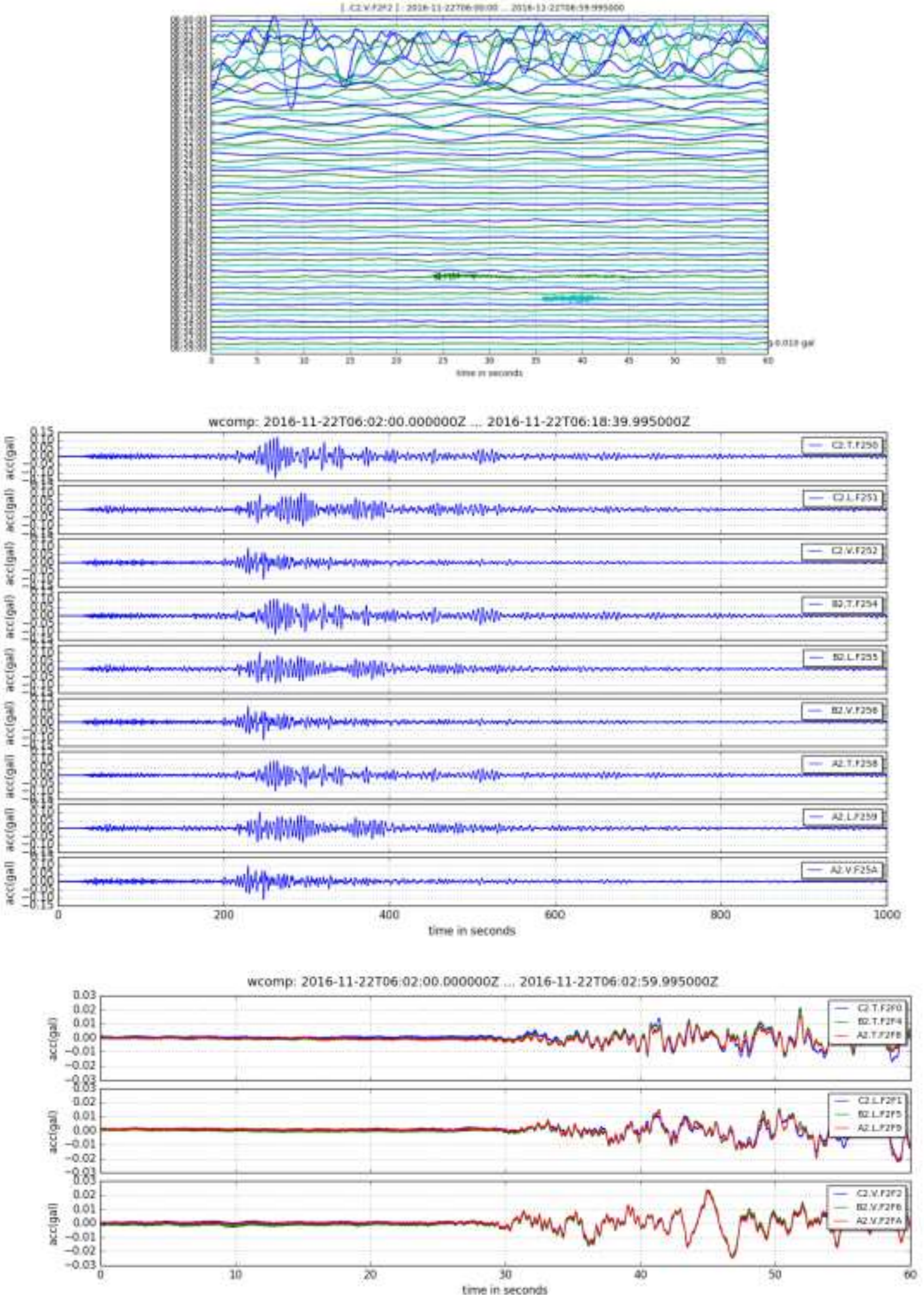

図 22　福島沖地震の観測記録。上：1 時間波形記録　中：光センサ 3 観測点 3 成分の記録(横軸が 1000 秒)　下：波形の立ち上がり部分について、各光センサの同じ成分を重ね合わせたもの。波形は良く一致している。

近地地震

2016 年 12 月 5 日熊本県熊本地方　M3.7

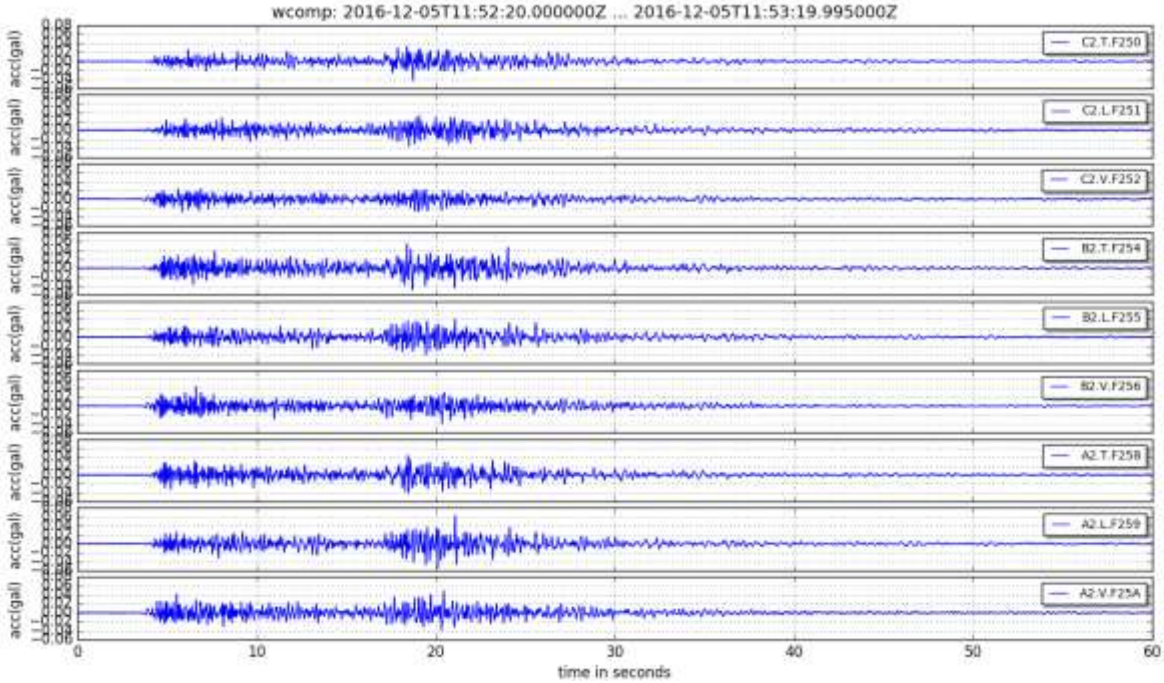

図 23 熊本で発生した地震。P 波および S 波が明瞭に見えている。

2016 年 11 月 18 日　福岡県北西沖 M4.2

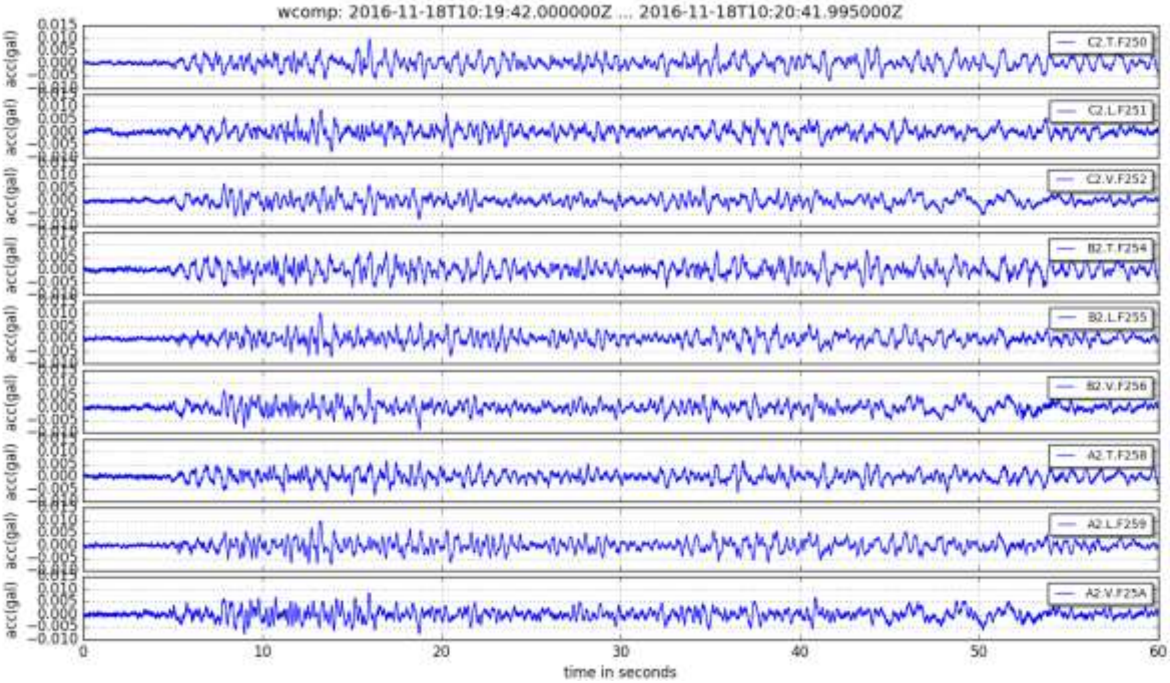

図 24 福岡県西方沖地震

b）振幅レベル・周波数帯域とノイズレベル

i）振幅レベル

静穏時の振幅

　2016 年 11 月 21 日 23 時から 1 時間の記録を図 25 に示す。光センサシステムでは図 26 にあるように、大体 1mgal の加速度を検知している。

　なお JU210 は坑内設置後、撤収まで独立に稼働させて連続観測を記録したが、60Hz のハムノイズが大きいためここでは波形の表示をしていない。

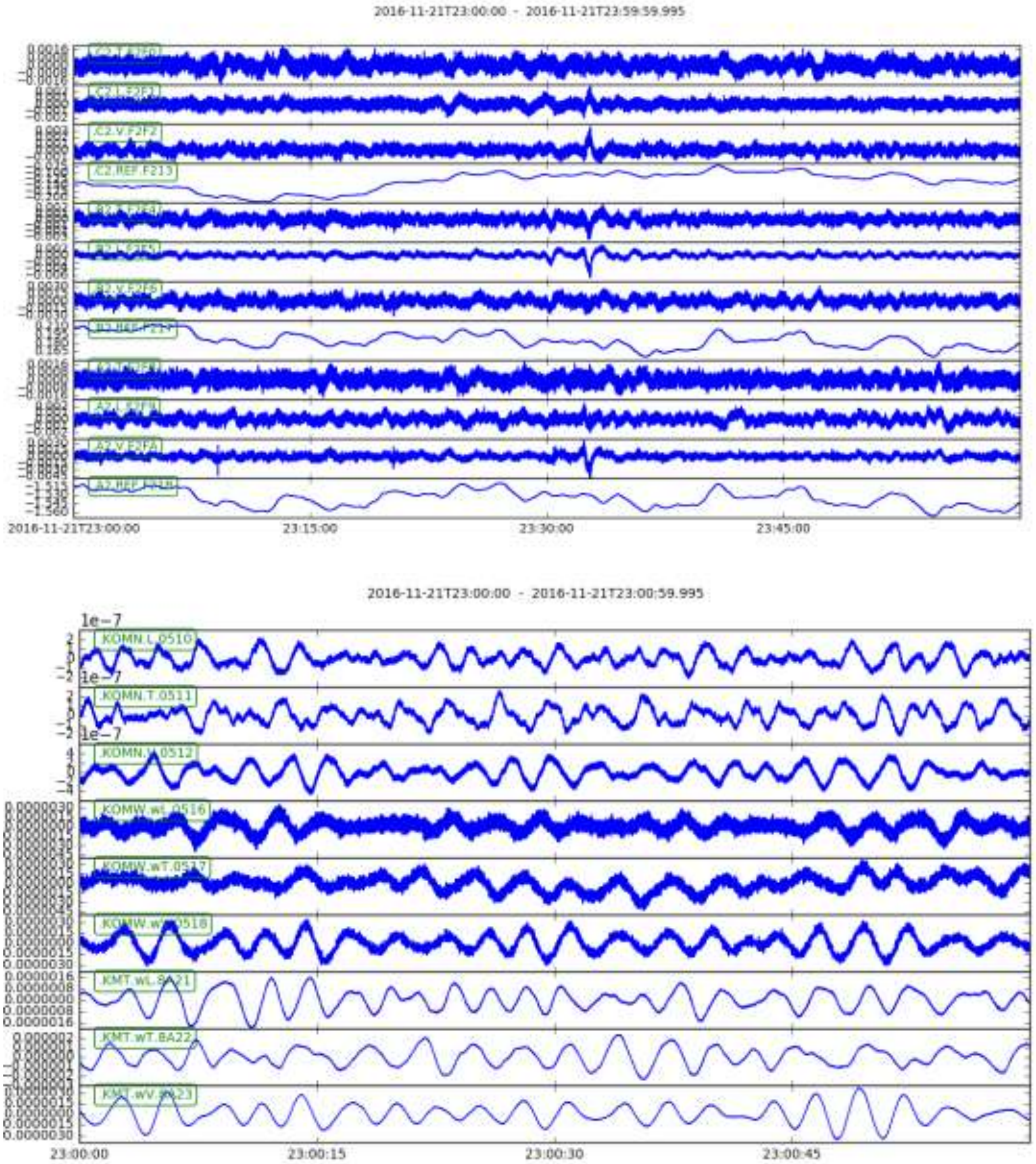

図 25　2016 年 11 月 21 日 23 時から 1 時間の記録．高免（白浜）観測点 KOMN 地中短周期地震計、KOMW 高免（白浜）観測点地表広帯域地震計、高免坑道内広帯域地震計 KMT の波形を示す。観測点 KMT は速度記録で単位は m/s である。

ii）周波数帯域とノイズレベル

この時間帯における光センサのノイズスペクトルを以下の図 26 に示す。

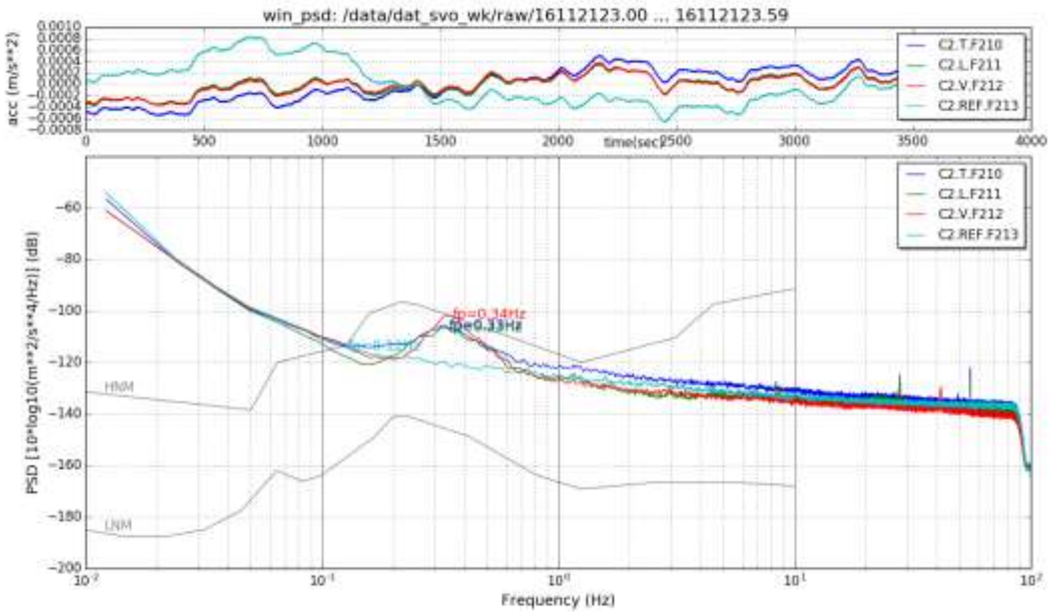

図 26　C 観測点におけるノイズスペクトル、T 方向（濃青）、L 方向（緑）、上下方向（赤）と固定端（水色）の各成分を示す。

レファレンスとして固定端で反射させた記録のスペクトル（水色線）は、センサ以外の部分のノイズ全体をあらわしていると考えられる。

0.3Hz 付近のなだらかなピークは海洋潮汐などが原因だと思われる。観測時間によってこのピークの周波数は移動している。また、高周波数側のノイズレベルが-140dB 程度であることがわかる。

同じ時間帯の既存の観測点については、高免坑道内で光センサの C 観測点を設置した位置から界壁扉を隔てた至近距離に広帯域地震計 Trillium-240 が設置されている KMT 観測点がある。

次に、光センサと加速度センサ JA40-GA 搭載の微動計（JU210)、KMT 観測点（高免坑道内設置の Trillium-240）のノイズスペクトルの比較を行う。なお、光センサは加速度計であるのに対して、Trillium-240 広帯域地震計は速度計であるため、この記録を微分して加速度記録として比較をする。

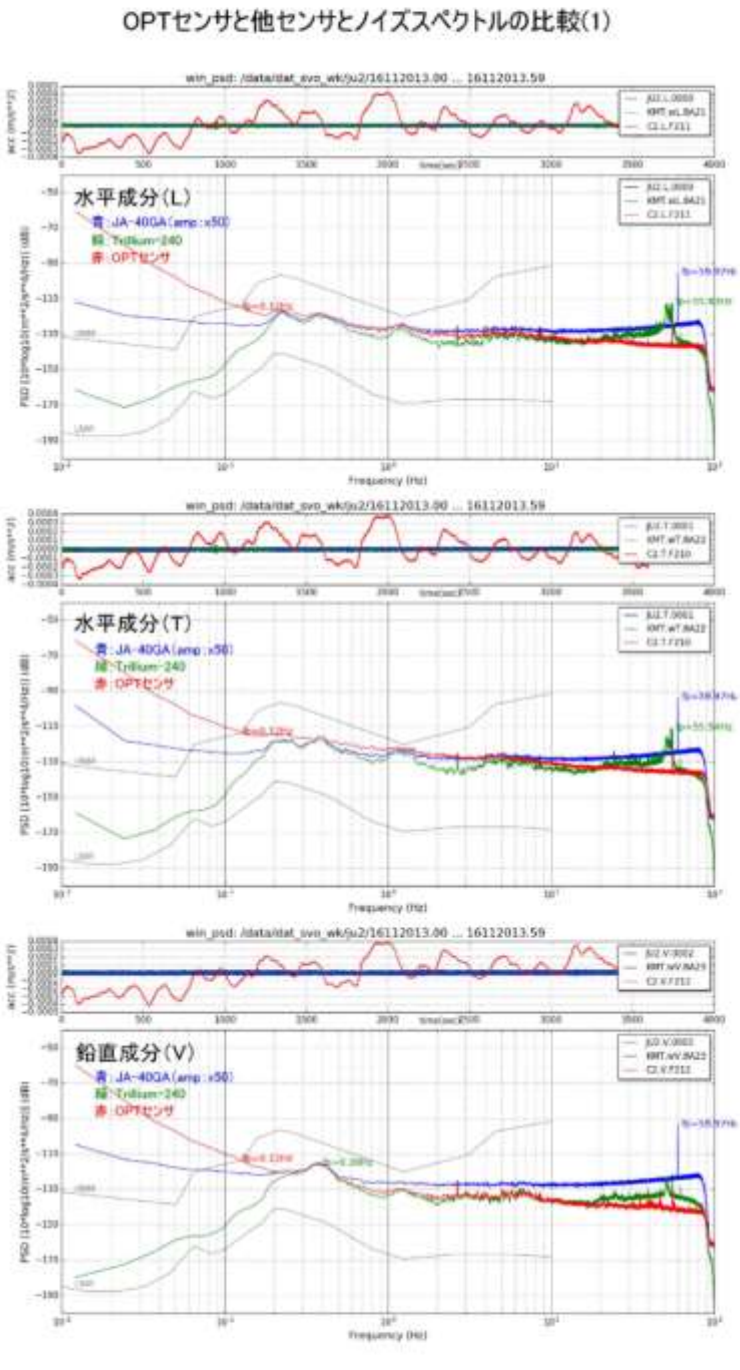

図27　2016年11月20日13時から14時までの1時間のノイズスペクトル。青線がJA-40GA、緑線がTrillium-240、赤線が光センサをそれぞれ示す。

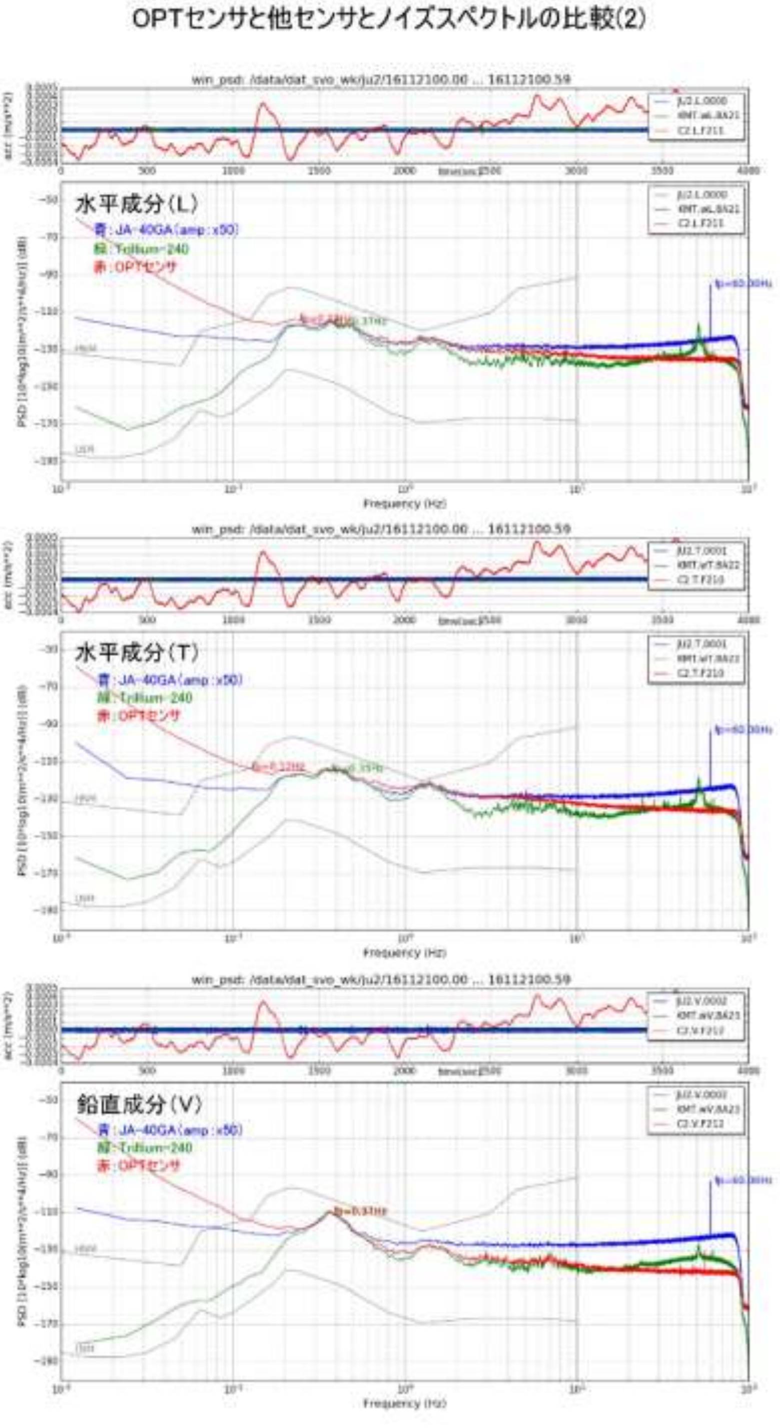

図 28 高免観測坑道内に設置したセンサの比較。2016 年 11 月 21 日 0 時から 1 時までの 1 時間のノイズスペクトル。青線が JA-40GA、緑線が Trillium240、赤線が光センサをそれぞれ示す。

図 27, 28 をみると、光センサ（赤線）は 0.1Hz よりも周波数が小さいところで他のセンサよりもノイズレベルが大きい。これは各グラフ上部に示した波形データからも明らかで

ある。

光センサは約 0.2Hz 以上の周波数領域で、加速度センサ（青線）よりも概ねノイズレベルが低く、1Hz～10Hz の帯域では Trillium240（緑線）と比較しても同等であることがわかる。10Hz 以上の部分については、加速度センサ JA40-GA よりは明らかに良い。ただし、10Hz 以上の帯域で緑線の Trillium240 のノイズレベルが高くなっているのは、もともと 20Hz 以上でノイズレベルがあがるスペックであることがデータシートに記述されていることと、光センサシステムと比較する目的で本来の速度データを微分しているために高周波側でより盛り上がりが強調されていることによる。先に示した静穏時のノイズスペクトルの図にあるように 20Hz 以上で-140dB 程度というのは光のシステムノイズに相当する位置であるので、今回の試験環境において、静穏時、20Hz 以上での光センサの信号はシステムノイズに埋もれていると判断したほうが良いと考える。

光センサの長周期成分のノイズは、上記の図を見ると、3 成分ともほぼ同じ動きをしている。実際、それぞれのセンサユニットの各成分の波形を重ねると、以下の図 29 の右側のようになる。

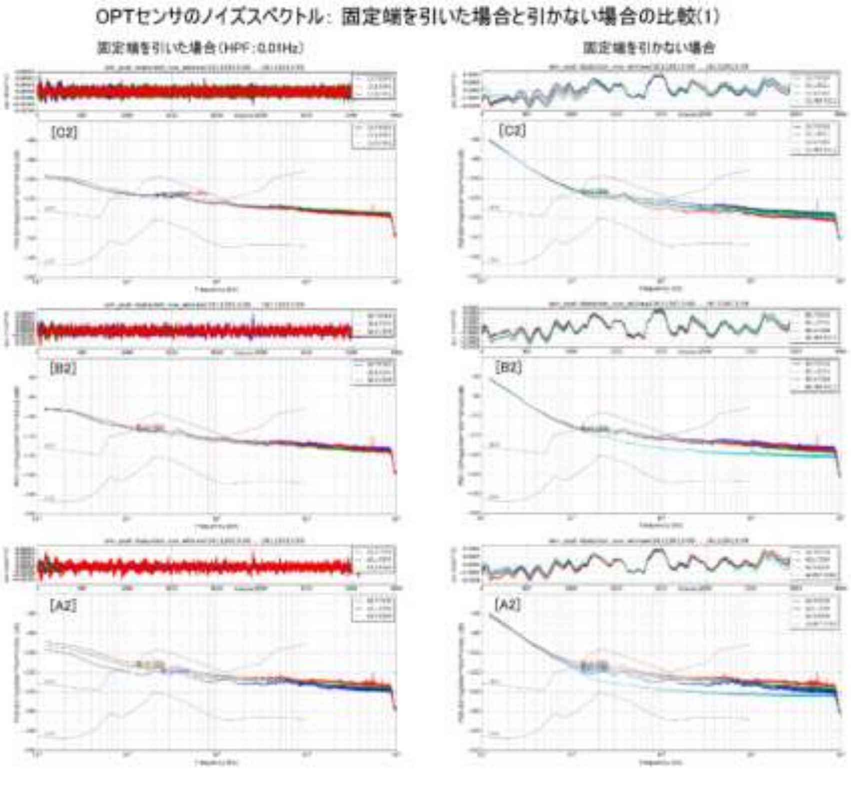

図 29 光センサ出力の長周期ノイズ

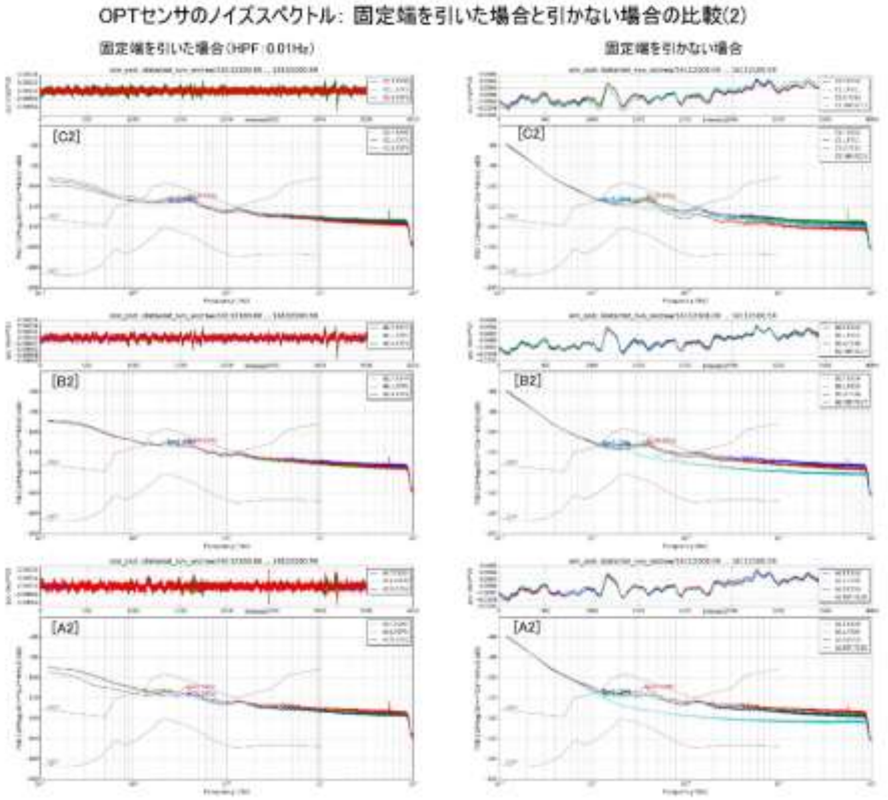

図 30　光センサ出力の固定端出力差分処理結果

上の図 30 の右側は、3 成分を構成する各センサユニットに加えて、レファレンスとして設置した固定端の波形も同時に表示している。時刻歴波形は 4 成分とも同じ形状をしている。したがって、各センサの成分のノイズレベルを下げる方法として、各成分からレファレンスとなる固定端の成分を引けば、ノイズレベルが下がることが期待される。その処理をしたのが上の図 30 の左側である。レファレンス波形を引くことにより、長周期成分の振幅が大きな振動はなくなっている。ノイズスペクトルも、0.1Hz より低い周波数のところが改善され、およそ JA-40GA と同程度のレベルとなっている。

しかし、0.1Hz よりも高周波数側では、ノイズレベルの改善はされていない。この原因は、光センサのノイズ波形と、固定端センサのレファレンス波形のコヒーレンスを取ることにより、解釈が可能である。両者のコヒーレンスは図 31 のように、概ね 0.1Hz 以上の周波数領域では非常に低いため、差し引いてもほとんど効果がないと判断できる。

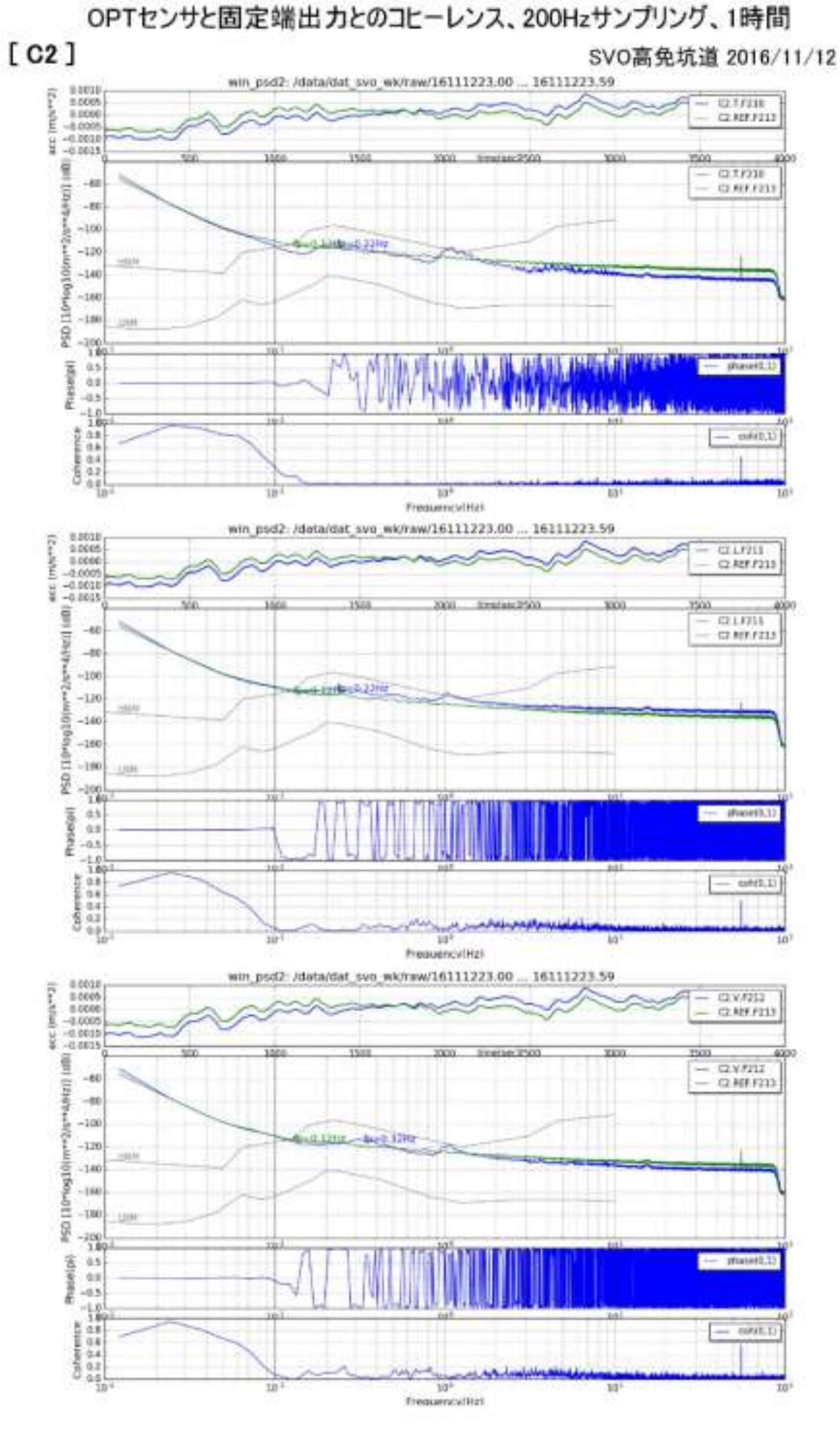

図 31　光センサ出力と同センサ固定端出力間のコヒーレンス

iii）その他必要と思われる比較

構造探査時に取得された光センサの波形と、広帯域地震計 Trillium-240（京都大学所有）との比較を図 32 に示す。振幅も含めて両者の波形がよく一致していることがわかる。

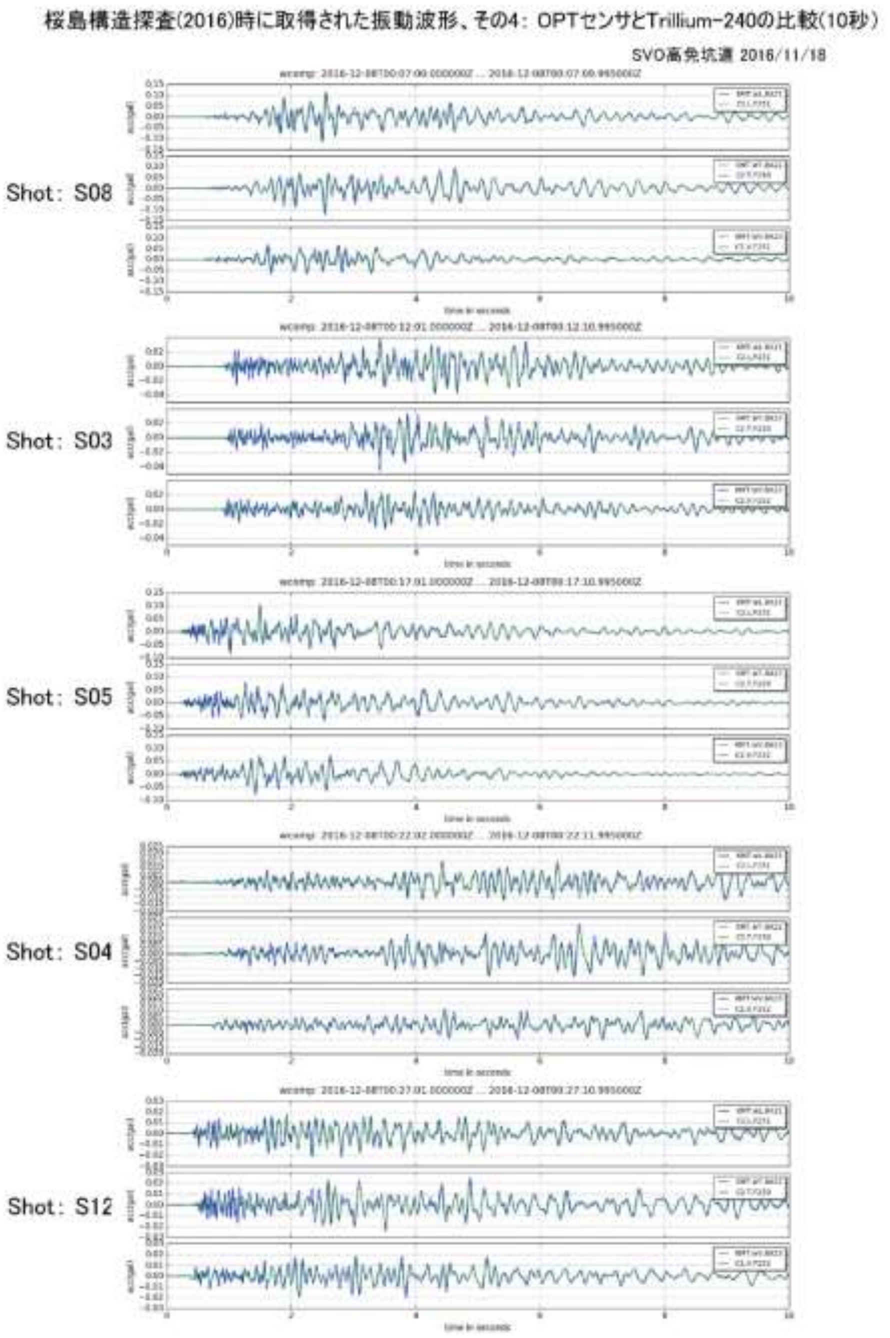

図 32　構造探査時の光センサと Trillium-240 の立ち上がりの波形の記録。各ショットについては「位相シフト光パルス干渉法を用いた振動観測システムによる火山観測の総合評価」報告書を参照すること。図 33 の発破点表記と「総合評価」での観測点の対応は次のようになっている：S08(FKRE), S03(JGKE), S05(UTKE), S04(NABE), S12(SHRE) 。

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。

d) 光センサシステム野外運用のノウハウ

i) 運用上の特徴

i.a) 耐環境性

今回は観測坑道内の比較的静穏で温度湿度も安定していると思われる環境下での観測であったので、センサ自体の耐環境性に関しては今回は試験の機会がなかった。

光ファイバケーブルについては、センサを設置した坑道から光送受信装置を設置した観測室内まで屋外を通して敷設した。屋外のケーブルは既設されていたダクト等にインシュロックで固定し、風が強いときなどでもあまり動かないようにした。11月13日から12月8日までの観測期間内ではおおむね晴か曇で、雨は1日だけであった。この間、観測には特に問題はなかった。

i.b) 設置時の作業性

観測室内での設置にあたり光送受信装置がそれぞれ40kgと重く、運び入れて設置するまで2人がかりでの作業であったが、おおむね順調に設置ができた。なお、このシステムはデータ取得のためにGPS情報が必要である。観測室内にGPSのリピーターがあったため、滞りなく観測することができた。

また、遠隔モニタリング目的での携帯電話回線の構築については、窓外にアンテナを取り付けることで回線を無事確立させることができた。

光ケーブルについては、観測室から坑道内部まで、あらかじめケーブル敷設用の管が敷設してあったので、当初それを使用しようとした。しかし、管内の曲がりの所で光ケーブル端にあるセンサ接続コネクタを通すことができず断念し、i.a)に記述したように屋外に敷設することになった。

センサについては、設置自体はトンネル内での火口方向(L)と火口と直交方向(T)の方向を設置するのに少々時間を要した程度であった。

またセンサ底面が約20cm×20cmと広いために、設置にあたり床面への固定の問題が懸念された。この問題に対して3点支持で対応ができると考え、センサ支持台を作成した。しかし、設置後に実際の観測波形を見たところ、図33に見られるように60Hz付近以上に大きなノイズが見られることが判明した。この原因を調査した結果、三点支持台そのものによる振動であることが判明したため、三点支持台をはずしエアコンパテを使ってセンサと地面を密着させることでノイズを押さえることができた。センサの設置には、余分な振動が入らないような注意が必要であることを実感した。

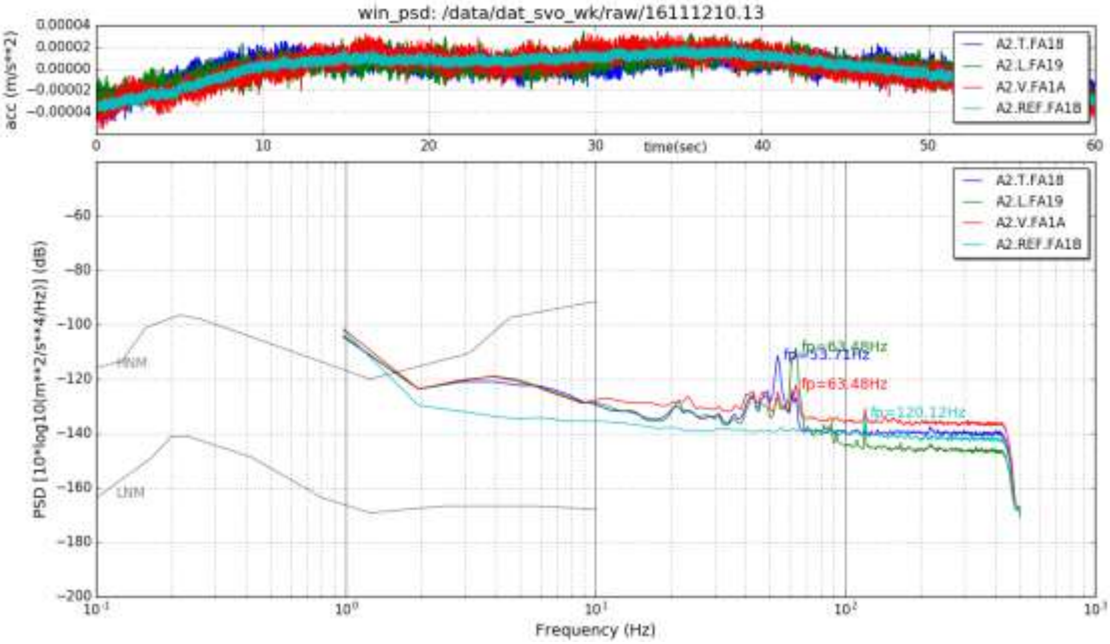

図 34　三点支持台を使用したときの観測記録

i.c) 運用時の作業内容

設置後回収までの約 1 ヶ月間は東京で観測状況をモニタリングし、途中不具合発見時には現場での調整作業を予定していたが、今回の観測では順調に観測ができ、特に不都合はなかった。

2)見学会の実施

位相シフト光パルス干渉法センサ及び送受信装置　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：

5．　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 3)
6．　高免観測坑道に移動
7．　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 4)
8．　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 3　京都大学高免観測坑道説明

写真 4　光センサシステムの見学風景

(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て火山観測を行った。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。

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

a)　設置および運用の際の問題点と今後の課題

現状では光送受信機がそれぞれ 40kg と重く、運び入れて設置するまで 2 人がかりでの作業が必要である。今後軽量化及び細分化が必要である。また光ケーブルは 150m 長で約 10kg と重く、ようやく一人で扱える。耐雷と軽量化を考えた場合は、保護管は金属以外の素材で作成する必要がある。

センサ部には電源が必要ないが、光送受信装置には約 500W の電力が必要である。今後低消費電力化が必要である。

データの部分ダウンロードを含めたシステム全体の管理は電話回線を介したリモートコントロールで行い、特に問題は見当たらなかった。

センサの設置についての問題も明らかになった。センサは直接地面に固定する方が良い結果が得られた。試作機ではセンサ底面が広い面（約 20cm×20cm）になっている。これは、3 点支持によるセンサ支持台を作成した。しかし 3 点支持台を用いると、60Hz 付近以上に大きなノイズが見られることが判明した。三点支持台をはずし、エアコンパテを使ってセンサと地面を密着させることで 60 Hz 付近のノイズを押さえることができた。

光センサシステムの連続運用ではバイアス電圧のジャンプによる欠測が発生していた。今回の運用では 2016/11/12 から 2016/12/7 までの間に、3 回のバイアス電圧のジャンプが記録された。光センサシステムではセンサに送信する光パルスを生成するための光強度変調器を使用しており、変調器に印可するバイアス電圧でその消光比を管理している。本システムの送信部では、このバイアス電圧を内部でモニタし、高い On/Off 比を保つように自動制御している。バイアス電圧は”それる”方向にドリフトし続けるので、どこかでジャンプさせて戻す操作が必要となる。この操作の際に一時的にデータの欠落やデータの異常が発生する。本問題の解決策は見つかっていないので、現状のシステムで連続観測を行う場合、1 週間に 1 回程度のデータ欠落もしくはデータ異常が生じてしまう。ただし、この不具合は改善の目処が立っており、検証も始めているので、次回は改善できると期待できる。

周期 2 秒以長の周波数帯域に現れるノイズに関して、その原因が未解決である。さらに長周期側の計測が要求されることも視野に入れて、引きつづき究明が必要である。

12 月 9 日午前に現地で行われた説明会において、光パルス発生装置等の寿命の質問があげられた。この問題に関しては現在未検証であるので、今後検証が必要である。

(e) 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。

(f) 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.

(g) 成果の論文発表・口頭発表等
なし

(h) 特許出願，ソフトウエア開発，仕様・標準等の策定
1)特許出願
なし
2)ソフトウエア開発
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

今年度は活動的火山の坑道内での観測を行った。翌年度今回の観測で健在化した課題のうち、バイアス電圧のドリフトによる修正を行った上で、より実際の観測環境での適合性の検証、及び光パルス発生装置等の光関係部品の耐久性のテストを行う。具体的には、今年度使用した光システムを東大地震研浅間観測所の敷地にアレイ展開し、数ヶ月連続観測を行い、光システムの耐久性を検証するとともに、耐雷性等の検証も行う。