

次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト  
次世代火山研究推進事業

課題 B2-2: 火山観測に必要な新たな観測技術の開発  
発

位相シフト光干渉法による多チャンネル火山観測方式の検討と開発

平成 29 年度  
成果報告書

平成 30 年 5 月

文部科学省研究開発局  
国立大学法人秋田大学

本報告書は、文部科学省の科学技術試験研究委託事業による委託業務として、国立大学法人秋田大学が実施した平成29年度「火山観測に必要な新たな観測技術の開発（位相シフト光干渉法による多チャンネル火山観測方式の検討と開発）」の成果を取りまとめたものです。

グラビア



(a)

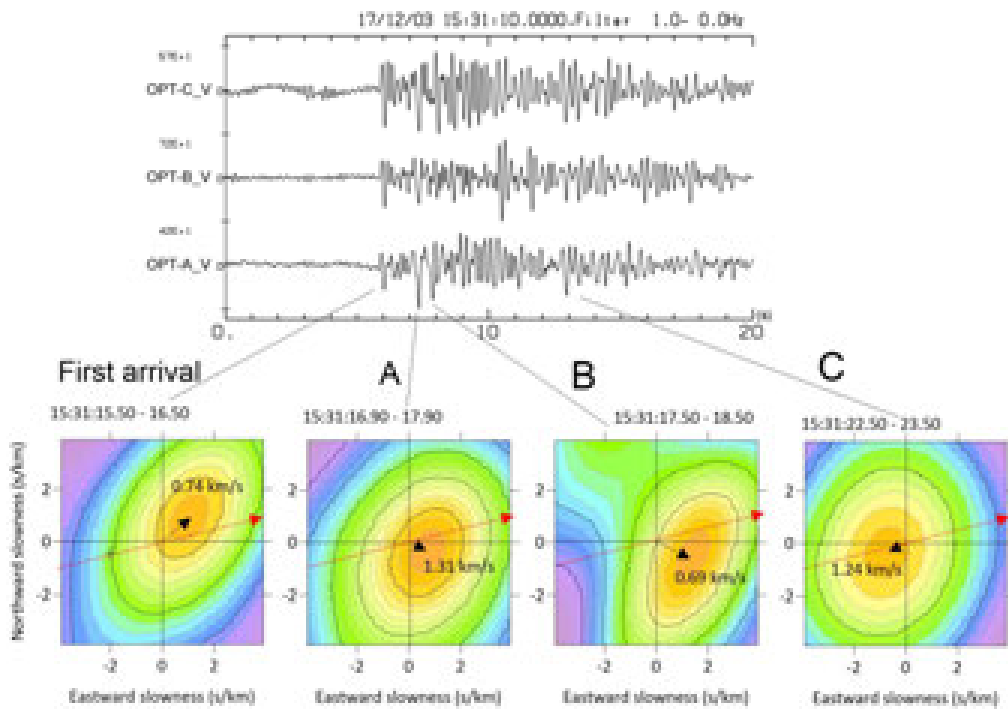


(b)

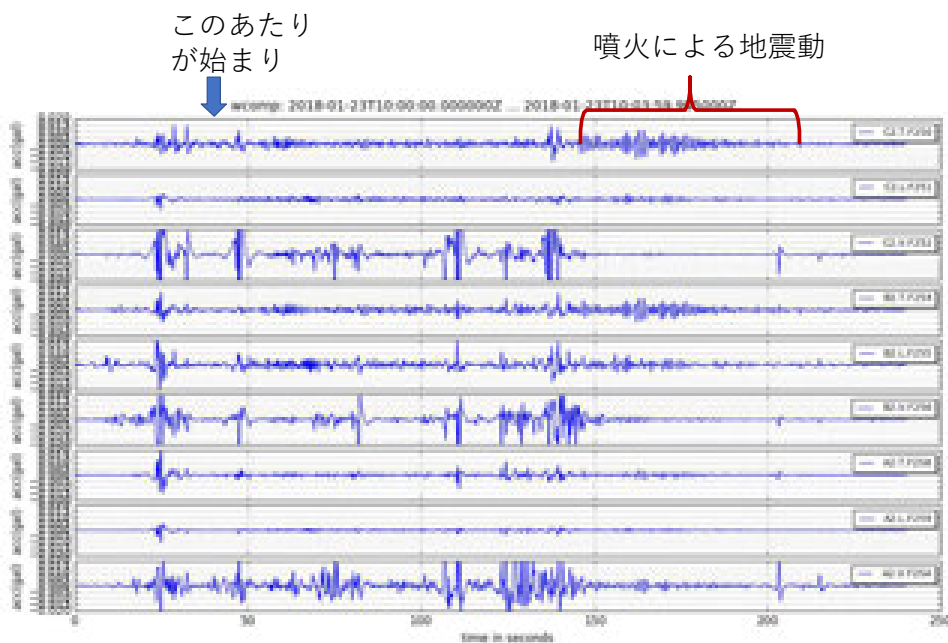
写真 1. 光センサの設置と設置状況. OPT-A 点. (a)設置作業, (b)設置状況



写真 2. 浅間火山観測所本館内における光送受信機設置状況



浅間山における A 型地震イベントの各相の到来方向と見かけ速度. 赤矢印は本来の伝播方向を示す.



光センサで捉えられた草津本白根山爆発地震  
浅間火山観測所から約 30 km の距離の草津本白根山で発生した爆発地震を観測した.

## はじめに

位相シフト光パルス干渉法振動観測システム試作機（以下、光センサシステム）を火山観測に実際に投入して運用することで、実用化に向けての改良点を洗い出すことを目的として平成28年度にひきつづき実施され、一定の成果を得たことを報告する。

火山研究も火山防災も基本は現地における観測である。火山観測システムのセンサは火山の内部で今起きていることをとらえるための「耳」である。火山性地震や火山性微動として火山の地下から発せられる地震波や火山の地下を通ってくる地震波は、火山の地下で今起きていることを知らせてくれる貴重な情報である。直接目に見えない火山活動をとらえるためには、なにか変わったことが起きていないかどうか、この「耳」を常に働かせておく必要がある。

火山地帯で「耳」を常に働かせるために、火山観測システムのセンサは一番厳しい環境に置かれる。腐食性の火山ガスが充満する場所、高温にさらされる場所、雷常襲地の火山の山腹などにこそセンサが必要である。より早く異常を検知しようとするほどセンサを取り巻く環境条件は厳しい。腐食性の火山ガスが充満する場所、高温にさらされる場所、雷常襲地の火山の山腹などにこそセンサが必要である。このような場所では従来のセンサでは腐食による急速な劣化による維持労力の増大や、あるいは落雷による焼損が頻繁に発生する。

本事業で取り扱う光センサシステムはこのような場所でこそ大きなアドバンテージを持つ。光センサシステムはセンサ部に電気回路を持たない。光センサシステムでは地震波による地面の動きをレーザー光の位相差として検出する。光センサシステムではセンサで検出された位相差を光信号として光ファイバで直接送ることができる。光センサは従来システムにつきまとう接触不良、絶縁破壊などの電氣的トラブルとは無縁である。したがって光センサは高温と腐食性ガスにも耐え、さらには雷サージのような電気ショックにも耐えることができる。

本事業では光システム試作機を浅間火山の観測に実際に投入して118日間運用した。この火山観測の運用を通して浅間山のA型火山性地震1イベント、B型火山性地震51イベント、草津本白根山爆発地震、域外地震417イベントの記録に成功した。さらに、118日間の長期運用を通して、バイアス電圧変動対策の効果の検証およびセンサ検定方式の検証、さらには光システムを構成する光デバイスの劣化に伴うシステム挙動についての知見等を得ることができた。これは後年度予定されている新システムの設計および運用に活かされるべき貴重なノウハウの一つであり、実用化に向けての一步となる重要な成果が得られた。

## 目 次

1. 課題の概要	1
2. 研究機関および研究者リスト	2
3. 研究報告	2
3. 1 位相シフト光干渉法による多チャンネル火山観測方式の検討と開発（秋田大学）	4
(1) 業務の内容	4
(a) 業務題目	4
(b) 担当者	4
(c) 業務の目的	4
(d) 10ヶ年の年度実施計画	5
(e) 平成29年度業務目的	8
(2) 平成29年度の成果	10
(a) 業務の要約	10
(b) 業務の実施方法	10
1) 実施機関と業務分担	10
(c) 業務の成果	13
1) 観測の実施	13
2) データ解析	25
3) 見学会の実施	67
(d) 結論ならびに今後の課題	67
1) 結論	67
2) 問題点と今後の課題	68
(e) 謝辞	69
(f) 引用文献	70
(g) 成果の論文発表・口頭発表等	72
(h) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定	72
(3) 平成30年度の業務計画案	72
3. 2 位相シフト光干渉法による多チャンネル火山観測方式の検討と開発（白山工業）	74
(1) 業務の内容	74
(a) 業務題目	74
(b) 担当者	74
(c) 業務の目的	74
(d) 10ヶ年の年度実施計画	75
(e) 平成29年度業務目的	78

(2) 平成29年度の成果.....	79
(a) 業務の要約.....	79
(b) 業務の実施方法.....	79
1) 実施機関と業務分担.....	80
2) 観測の実施.....	81
(c) 業務の成果.....	88
1) 光センサシステムの運用.....	88
2) 見学会の実施.....	109
(d) 結論ならびに今後の課題.....	109
1) 結論.....	109
2) 問題点と今後の課題.....	109
(e) 謝辞.....	110
(f) 引用文献.....	110
(g) 成果の論文発表・口頭発表等.....	111
(h) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定.....	111
(3) 平成30年度の業務計画案.....	111
4. 活動報告 .....	112
4.1 会議録 .....	112
4.2 対外的発表 .....	113
5. むすび .....	113

## 1. 課題の概要

本委託業務では、位相シフト光干渉法によるセンサを用いた振動観測システム（以下、「光センサシステム」という。）を、火山地帯における多点（多成分）アレイ観測用システムに拡張し、次世代の火山観測に適した観測システムの諸元と仕様を確立することを目的とする。

平成 28 年度に実施したフィージビリティスタディの成果を踏まえて、JOGMEC-Phase1 光センサ試作機を用いた各種検証業務を行う。【①火山での実際の観測環境による検証，②光センサシステムの原理的な特徴である耐雷等の検証】また，これら検証結果等を踏まえ，光センサシステムを用いた多チャンネル観測システムの実用化に向けた要素技術の開発・組み込みと検証を行うことにより，観測システムの諸元と仕様を確立する。この光センサシステム開発については，東京工業大学と協力して有限要素法解析等における設計検証を行い，このシステムに適した振動子の設計等を行う。なお，光センサシステムを配置する火山は，関東で活動的な火山である浅間山を想定している。そのため，平成 29 年度から東京工業大学のほか東京大学地震研究所を協力機関に加え，東京大学地震研究所浅間火山観測所において観測を実施する。

本委託業務は，火山研究人材育成コンソーシアムに対して，新しい観測方法の創出に向けたインスピレーションをもたらすことで火山防災の充実に寄与できる可能性がある。すなわち，火山研究人材育成コンソーシアムの参加者に本委託業務で行う観測を見学してもらうことにより，本委託業務の担当者が思いつかなかったような新しい火山の観測法に気がついてもらうチャンスを提供できる。さらに，発見的学習の機会を提供することによって，火山に強い関心と深い理解をもつ人材の育成に貢献することが期待される。

本委託業務で得られた成果は，光センサシステムを火山のモニタリングシステムとして実用的に使用できることになる。この光センサシステムの利点を考えれば，海底火山のモニタリングへの展開が一番に考えられ，また 200 °C 程度であれば，地中深部観測にも有効な展開ができると考えられる。なお，このシステムは性質上，例えば，海底での観測網の展開に威力を発揮すると考えられるので，将来は海底火山の観測，海底でのカルデラ火山のモニタリングにも展開することを考えている。このシステムの開発検討にあたっては，気象庁や火山研究機関などのユーザーに広く利用されるよう，ニーズの調査を行い，要素技術の改良点の抽出・把握や必要に応じた改良及び転用技術の開発に向けた情報収集を行うとともに，これらの機関の火山観測システムの次回更新時に導入に向けて，機関向けの開発研究の方向性について，関係者と検討を行う。



## 2. 研究機関および研究者リスト

所属機関	役職	氏名	担当課題
秋田大学国際資源学研究科	准教授	筒井 智樹	3.1
白山工業株式会社 基盤開発部	部長	平山 義治	3.2
白山工業株式会社 基盤開発部	副部長	池田 敏晴	3.2
白山工業株式会社 基盤開発部		竹内 敬二	3.2
白山工業株式会社 防災研究システムユニット		安藤 浩	3.2
東京大学地震研究所 火山噴火予知研究センター	教授	武尾 実	3.1, 3.2
東京大学地震研究所 火山噴火予知研究センター	センター長 准教授	大湊 隆雄	3.1, 3.2
東京大学地震研究所 技術部総合観測室	技術専門員	辻 浩	3.1, 3.2
東京工業大学大学院理工学研究科	准教授	水谷 義弘	3.2

## 3. 研究報告

現在活動中の浅間山において、位相シフト光干渉法を用いた観測装置（以下、「光センサシステム」という）を投入して火山観測を行い、火山性地震および火山性微動のデータを取得した。さらに平成 28 年度の計画実施で明らかになった問題点、バイアス電圧ジャンプによる欠測発生現象、システム耐久性の問題、センサ検定方法の確立等にも取り組んだ。また本計画の目標の一つである多点観測の高精度な実施を狙って、光センサ観測網内の浅部構造調査を実施した。

光センサシステムは 2017 年 9 月 13 日から 2018 年 1 月 23 日まで 133 日間にわたり東京大学地震研究所浅間火山観測所構内の地表を利用して設置された。光センサの実稼働日数は 108 日であった。稼働期間中に浅間山で発生した火山性地震は A 型 1 イベント、B 型 51 イベントの記録が得られた。それに加えて 1 月 23 日午前 10 時頃発生した草津本白根山の爆発地震の記録も得ることができた。また火山性ではない自然地震は 417 イベントを観測した。

本年度は地震波到来方向の推定をねらって、光センサを 1 辺約 20m の三角形の頂点を構成するように設置した。光センサが設置された観測所構内の表層部は主に浅間山の火山活動によって放出された軽石の堆積によって構成されたほぼ水平な構造で、地表の地震波速度が著しく遅いことが表層構造調査によって明らかになった。また光センサ設置点の一つには近傍の構造物の地震学的影響が見られた。

さらに近傍発震による光センサの検定作業を 2 回実施した。1 回目は光センサ設置直後（2017 年 9 月）に実施し、2 回目を光センサ撤収直前（2018 年 1 月）に実施した。2 回の検定作業の実施により、応答波形の変化を得るとともにこの検定方式の問題点が明らかに

なった。

光センサシステムのバイアス電圧ジャンプによる欠測軽減は期間中にシステムに改修を施した。改修後の欠測率は改善が見られた。しかし、最終的にはバイアス電圧を与えるデバイスの劣化の著しい進行が表面化し、2018年1月には所期の性能を発揮し得ない状況に陥った。このような状況の出来に伴って、システム構成デバイスの劣化に伴うシステムのふるまいと構成デバイスの劣化特性に対する貴重な知見を得ることができた。

平成29年度観測の一つの目的として耐雷性の検証が挙げられていたが、諸般の事情により観測開始が遅れ現地における雷多発シーズンを逸したため、実証に至らなかった。

### 3. 1 位相シフト光干渉法による多チャンネル火山観測方式の検討と開発（秋田大学）

#### (1) 業務の内容

##### (a) 業務題目

課題 B2-2：火山観測に必要な新たな観測技術の開発

「位相シフト光干渉法による多チャンネル火山観測方式の検討と開発」

##### (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所 白山工業株式会社 基盤開発部	准教授	筒井智樹	tomoki@gipc.akita-u.ac.jp
	部長	平山義治	hirayama@hakusan.co.jp
	副部長	池田敏晴 竹内敬二	
白山工業株式会社 防災研究システムユニット		安藤 浩	
東京大学地震研究所 火山噴火予知研究センター	教授	武尾 実	
	センター長・准教授	大湊隆雄	
東京大学地震研究所 技術部総合観測室	技術専門員	辻 浩	
東京工業大学大学院理工学研究科		水谷義弘	

##### (c) 業務の目的

本委託業務では、位相シフト光干渉法によるセンサを用いた振動観測システム（以下、「光センサシステム」という。）を、火山地帯における多点（多成分）アレイ観測用システムに拡張し、次世代の火山観測に適した観測システムの諸元と仕様を確立することを目的とする。

平成 28 年度に実施した桜島の観測坑道内におけるフィージビリティスタディの成果を踏まえて、JOGMEC-Phase1 光センサ試作機を用いた各種検証業務を行う。【①火山での実際の観測環境による検証，②光センサシステムの原理的な特徴である耐雷等の検証】またこれら検証結果等を踏まえ、光センサシステムを用いた多チャンネル観測システムの実用化に向けた要素技術の開発・組み込みと検証を行うことにより、観測システムの諸元と仕様を確立する。この光センサシステム開発については、東京工業大学 未来産業技術研究所と連携して進めることとし、センサ形状や特性把握等に関しては、東京工業大学と協力して有限要素法解析等における設計検証を行い、このシステムに適した振動子の設計等を行う。なお、光センサシステムを配置する火山は、関東で活動的な火山である浅間山を想定している。（特に、長期観測と雷の影響調査を予定しているため、雷が多い浅間山が適している。）そのため、平成 29 年度から東京工業大学のほか東京大学地震研究所を協力機関に加え、東京大学地震研究所浅間火山観測所において観測を実施する。

本委託業務は、火山研究人材育成コンソーシアムに対して、新しい観測方法の創出に向

けたインスピレーションをもたらすことで火山防災の充実に寄与できる可能性がある。すなわち、火山研究人材育成コンソーシアムの参加者に本委託業務で行う観測を見学してもらうことにより、本委託業務の担当者が思いつかなかったような新しい火山の観測法に気がついてもらうチャンスを提供できる。さらに、発見的学習の機会を提供することによって、火山に強い関心と深い理解をもつ人材の育成に貢献することが期待される。

本委託業務で得られた成果は、光センサシステムを火山のモニタリングシステムとして実用的に使用できることになる。この光センサシステムの利点を考えれば、海底火山のモニタリングへの展開が一番に考えられ、また 200 °C 程度であれば、地中深部観測にも有効な展開ができると考えられる。なお、このシステムは性質上、例えば、海底での観測網の展開に威力を発揮すると考えられるので、将来は海底火山の観測、海底でのカルデラ火山のモニタリングにも展開することを考えている。このシステムの開発検討にあたっては、気象庁や火山研究機関などのユーザーに広く利用されるよう、ニーズの調査を行い、要素技術の改良点の抽出・把握や必要に応じた改良及び転用技術の開発に向けた情報収集を行うとともに、これらの機関の火山観測システムの次回更新時に導入に向けて、機関向けの開発研究の方向性について、関係者と検討を行う。

#### (d) 10ヶ年の年度計画実施

平成28年度：

（課題E「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」および「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」として実施）  
光センサシステムを使用して、桜島火山構造探査にあわせて桜島のフィールドで観測を行って、桜島に既設のセンサの結果との比較検証を行うことにより、光センサシステムの火山観測での有効性を検証した。振幅レベル、検出可能な周波数帯域、ノイズレベル等の観測と比較、地下構造（深部構造、マグマだまり）の把握に資する記録かどうかの検証を行った。

平成29年度：

課題責任機関は主に以下の項目 1)～5)を実施する。

- 1) 光センサシステムで取得されたデータの火山学的解析
- 2) 平成29年度光観測網内部の表層地震波速度調査
- 3) 光センサシステムのH29年度観測の総合評価および総括
- 4) プロジェクト運営

共同実施機関は火山観測とその実施準備を行い、以下の5)～7)を実施する。

- 5) 長期運用時の安定性の検証
- 6) 耐雷性の検証
- 7) バイアス電圧ジャンプによる欠測現象を低減させる改良を行うとともに検証を行う。

5)については平成28年度の見学会時に指摘のあった、長期運用時における光発生装置等の時間的な耐久性を調査する。6)は原理的な特徴の一つである雷に強いことを、活動的火山での観測を行いながら、調査検証する。7)は平成28年度の連続観測で判明した、バイア

ス電圧のジャンプによる欠測が起きないように改良を行う。プロジェクト運営会議等を通してユーザーニーズの把握に努める。

平成30年度：

課題責任機関は以下の項目を実施する。

- 1) 平成29年度に得られたデータのより精密な火山学的解析および検討
- 2) 光センサシステムの総合評価と総括
- 3) プロジェクト運営

共同実施機関は以下の項目を実施する。

- 4) 第一次分の増設センサの製作
  - 5) 光センサシステムへの増設チャンネルの試験実装
- 4)は新たに汎用のシングルモードファイバを使用した新センサの製作を行う。5)は多点化のプロトタイプとしての増設チャンネルの試験実装を行い、室内実証試験を行う。プロジェクト運営会議等を通してユーザーニーズの把握に努める。

平成31年度：

課題責任機関は以下の項目を実施する。

- 1) 観測データの火山学的解析
- 2) 光センサシステムの総合評価と総括
- 3) 平成31年度光システム観測網の表層地震波速度調査
- 4) プロジェクト運営

共同実施機関は火山観測とその準備を行い、以下の項目を実施する。

- 5) 第二次分増設センサの製作
  - 6) 長時間多点観測に関する要素技術の開発
  - 7) 新しい光受信装置試作機の製作
- 5)は新しい方式でのセンサを平成30年度にひきつづき追加製作する。6)は汎用シングルモードファイバ伝送による火山観測を行う。7)では実証試作機の中心となる新しい光送受信装置を前倒しで作成し、JOGMECで作成したプロトタイプとの性能比較を実際の火山でアレイ観測を行うことにより、検証する。プロジェクト運営会議等を通してユーザーニーズの把握と集約に努める。

平成32年度：

課題責任機関は以下の項目を実施する。

- 1) 観測データの火山学的精密解析
- 2) 光センサシステムの総合評価と総括
- 3) プロジェクト運営

共同実施機関は以下の項目を実施し、室内検証を主に行う。平成32年度以降、平成31年度で作成した送受信装置を用いた試験、観測を行うとともにセンサの追加実装を順次おこない、火山観測に適した光センサシステムを構築する。

- 4) 第三次分増設センサ製作

5) シングルモードファイバによるセンサシステムの安定性の改善を行う。

6) 増設チャンネルの本格実装を行う。

平成 31 年度の観測結果および、課題 B をはじめとする実際に火山観測を行っている方々のニーズを踏まえて改良を行う。プロジェクト運営会議等を通して引き続きユーザーニーズの把握に努める。

平成 33 年度：

課題責任機関は以下の項目を実施する。

- 1) 観測データの火山学的解析
- 2) 光センサシステムの総合評価と総括
- 3) 平成 33 年度光センサシステム観測網の表層地震波速度調査
- 4) プロジェクト運営

共同実施機関は火山観測とその準備を行い、以下の項目を実施する。

- 5) 第四次分増設センサ製作
- 6) 18 成分の多点火山観測の実施

6) はこれまでに製作した合計 18 成分での火山観測を火山地帯で行い、火山観測における総合的な対環境性の検証を行う。もし開発が早まれば、課題 B と連携し、可能な限り課題 B-4 の対象火山に投入して観測を行う。プロジェクト運営会議等を通して引き続きユーザーニーズの把握に努める。

平成 34 年度：

課題責任機関は以下の項目を実施する。

- 1) 観測データの火山学的精密解析
- 2) 光センサシステムの総合評価と総括
- 3) プロジェクト運営

共同実施機関は以下の項目を実施する。実証試験は室内で行う。

- 4) システムの多点化プロトタイプの改修、
- 5) 第五次分増設センサの製作を行う。

平成 33 年度の観測結果及び課題 B の方々の意見を踏まえた改良を行う。もし開発が早まれば、課題 B と連携し、可能な限り課題 B-4 の対象火山に投入して観測を行う。プロジェクト運営会議等を通してユーザーニーズの把握を継続し集約に努める。

平成 35 年度：

課題責任機関は以下の項目を実施する。

- 1) 観測データの火山学的解析
- 2) 光センサシステムの総合評価と総括
- 3) 平成 35 年度光システム観測網の表層地震波速度調査
- 4) プロジェクト運営

共同実施機関は火山観測とその準備を行い、以下の項目を実施する。

- 5) 多点プロトタイプシステムの検証と、火山運用実績の獲得

6) 合計 24 成分でのアレイ観測の火山地帯における実施

もし開発が順調に進んでいる場合、課題 B と連携し、可能な限り課題 B-4 の対象火山に投入して実証実験を行う。プロジェクト運営会議等を通してユーザーニーズの把握を継続する。

平成 36 年度：

課題責任機関は以下の項目を実施する。

- 1) 観測データの火山学的精密解析
- 2) 光センサシステムの総合評価と総括
- 3) プロジェクト運営

共同実施機関は以下の項目を実施し、室内検証を中心に行う。

- 4) 多点実用システムへの改装を行う。
- 5) 多点化実用システムの構築と室内検証

平成 35 年度の観測結果及び課題 B の方々の意見を踏まえた改良を行う。もし開発が想定以上に進捗した場合には、可能な限り課題 B-4 の対象火山に投入して観測運用を実施する。プロジェクト運営会議等を通してユーザーニーズの把握を継続する。

平成 37 年度：

課題責任機関は以下の項目を実施する。

- 1) 観測データの火山学的解析
- 2) 光センサシステムの総合評価と総括
- 3) 平成 37 年度光センサシステム観測網の表層地震波速度調査
- 4) プロジェクト運営

共同実施機関は火山観測とその準備を行い、下記の項目を実施する。

- 5) 光センサシステムを適用した火山観測システムとして最終評価を確定する。
- 6) 課題 B-4 で実施中の火山において、24 成分のアレイ観測を行い、多点化実用システムの火山運用実績の獲得を行う。

(e) 平成 29 年度業務目的

課題責任機関（秋田大学）は、以下の項目を実施する。下記項目は共同実施機関（白山工業株式会社）と連携して事業を行う。

① 光センサシステムで取得されたデータの火山学的解析

a. 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。主な準備内容は東京大学地震研究所との交渉、観測点配置計画の策定、光システム設置に先立つ下見をはじめとする調整である。現地の下見は協力機関の東京大学地震研究所関係者とともに行う。

#### b. 光センサによる火山観測および表層地震波速度構造調査の実施

②で実施する表層地震波速度調査の発震によって光センサ長期観測運用中に光センサ個々の動作を確認するデータを取得し、観測データの信頼性向上に寄与する。光センサの動作検定は平成 28 年度のフィージビリティスタディの評価時にその機能が実装されていなかったことが指摘されていたもので、その欠点を補う方策として実施可能な動作検定法を実施する。これは後述の②の実施とともに展開された光センサ近傍で簡易な装置（かけや等）による発震を行い、データを取得する。また、②の結果から平成 30 年度に予定されているデータの精密解析のための走時補正值を得る。

#### c. 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火山学見地から解析を施す。本解析では光センサシステムのデータは火山活動に伴う地震等を抽出し、ホドグラム解析、見かけ速度および到来方向解析を予定している。また b. で得られた動作検定データも本項目の業務に援用して解析を行う。秋田大学現有の設備に若干の強化を加えながら使用して本委託業務を実施するとともに、観測波形表示ソフトウェア等を調達し使用する。

### ② 光センサ観測網内部の表層地震波速度調査

実際の火山観測で展開された光センサ観測網の内部の表層地震波速度を調査する。秋田大学が現有する地震探査装置一式を用いて、光センサ展開運用中に光センサ観測網内で実施する。本調査にあたり若干の消耗品が必要である。得られたデータには屈折法等の解析を施し、光センサ観測網の表層地震波速度構造を解明する。秋田大学現有の設備に若干の強化を加えながら使用して本委託業務を実施するとともに、屈折法解析ソフトウェア等を調達し使用する。

### ③ 光センサシステム観測の総合評価および総括

①のデータ解析結果および共同実施機関からの報告を踏まえて、光センサシステムの総合評価を行う。特に、1)長期運用時の安定性の検証、2)耐雷性の検証、3)バイアス電圧ジャンプによる欠測の低減、の3項目に重点をおいて総合的な評価を行う。昨年度と同様に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、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、整理する。

### ④ プロジェクト運営

火山研究運営委員会や研究集会などに参加し、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連携した取り組みを実施する。

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」-サブテーマ 4:  
「火山内部構造・状態把握技術の開発」

本課題で行う浅間山における地震観測結果を提供することと、各種委員会およびフォーラムの場に参加して他課題担当者との意見交換の機会を持ちユーザーのニーズを把握して今後の改良に反映すること、および後年度における課題 B 観測対象火山への観測運用投入によって、他課題と連携する。

3) 火山研究人材育成コンソーシアム構築事業

実施期間中に、求めに応じ、火山研究人材育成コンソーシアム参加者に実際の観測を見学する機会を提供する。

## (2) 平成 29 年度の成果

### (a) 業務の要約

現在活動中の浅間火山において、位相シフト光干渉法を用いた観測装置（以下、「光センサシステム」という）を投入して光センサアレイによる火山観測を行い、火山性地震および火山性微動のデータを取得した。今年度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機器の耐久性と耐雷性の検証を行うとともに、バイアス電圧ジャンプによる欠測現象を低減させる改良を施し、バイアス電圧の変化が原因となる欠測の低減化を狙った。また、光センサアレイ観測データ解析の高精度化を目指して、小規模地震探査を用いて光センサアレイ設置場所の浅層構造を調査するとともに、光センサの動作検定を行った。

光センサシステムは平成 29（2017）年 9 月 13 日から翌平成 30（2018）年 1 月 23 日までの 133 日間（うち連続稼働日数 125 日間）設置され、その間に 193 回の地震イベント（うち A 型 1 イベント、B 型 5 イベント）と小規模地震探査の発震を記録することができた。さらに平成 30 年 1 月 23 日には、草津本白根山の爆発にともなう地震動の記録も得ることができた。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

平成 29 年度は長野県と群馬県の県境に位置する浅間火山において試験観測を中心として共同実施機関（白山工業株式会社）と連携して事業を行った。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。

試験観測を行うにあたり、長野県北佐久郡軽井沢町長倉 2 1 2 5 東京大学地震研究所浅間火山観測所とその構内を、協力機関の一つである東京大学地震研究所の共同利用の一環として使用した。

## 1) 実施機関と業務分担

### a) 課題責任機関

#### ① 光センサシステムで取得されたデータの火山学的解析

#### a. 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。主な準備内容は東京大学地震研究所との交渉、観測点配置計画の策定、光システム設置に先立つ下見をはじめとする調整である。現地の下見は協力機関の東京大学地震研究所関係者とともに行う。

#### b. 光センサによる火山観測および表層地震波速度構造調査の実施

②で実施する表層地震波速度調査の発震によって光センサ長期観測運用中に光センサ個々の動作を確認するデータを取得し、観測データの信頼性向上に寄与する。光センサの動作検定は平成 28 年度のフィージビリティスタディの評価時にその機能が実装されていなかったことが指摘されていたもので、その欠点を補う方策として実施可能な動作検定法を実施する。これは後述の②の実施とともに展開された光センサ近傍で簡易な装置（かけや等）による発震を行い、データを取得する。また、②の結果から平成 30 年度に予定されているデータの精密解析のための走時補正值を得る。

#### c. 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火山学見地から解析を施す。本解析では光センサシステムのデータは火山活動に伴う地震等を抽出し、ホドグラム解析、見かけ速度および到来方向解析を予定している。また b. で得られた動作検定データも本項目の業務に援用して解析を行う。秋田大学現有の設備に若干の強化を加えながら使用して本委託業務を実施するとともに、観測波形表示ソフトウェア等を調達し使用する。

#### ② 光センサ観測網内部の表層地震波速度調査

実際の火山観測で展開された光センサ観測網の内部の表層地震波速度を調査する。秋田大学が現有する地震探査装置一式を用いて、光センサ展開運用中に光センサ観測網内で実施する。本調査にあたり若干の消耗品が必要である。得られたデータには屈折法等の解析を施し、光センサ観測網の表層地震波速度構造を解明する。秋田大学現有の設備に若干の強化を加えながら使用して本委託業務を実施するとともに、屈折法解析ソフトウェア等を調達し使用する。

#### ③ 光センサシステム観測の総合評価および総括

①のデータ解析結果および共同実施機関からの報告を踏まえて、光センサシステムの総合評価を行う。特に、1)長期運用時の安定性の検証、2)耐雷性の検証、3)バイアス電圧ジャンプによる欠測の低減、の3項目に重点をおいて総合的な評価を行う。昨年度と同様に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、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、整理する。

#### ④ プロジェクト運営

火山研究運営委員会や研究集会などに参加し、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連携した取り組みを実施する。

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」

本課題で行う浅間山における地震観測結果を提供することと、各種委員会およびフォーラムの場に参加して他課題担当者との意見交換の機会を持ちユーザーのニーズを把握して今後の改良に反映すること、および後年度における課題 B 観測対象火山への観測運用投入によって、他課題と連携する。

3) 火山研究人材育成コンソーシアム構築事業

実施期間中に、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長期運用時の安定性の検証

a. 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、観測実施前の光センサシステムの整備を行う。

b. 光センサシステムによる火山観測の実施および表層地震波速度構造探査の支援

平成 28 年度の桜島での見学会時に指摘のあった、光発生装置等の時間的な耐久性を調査する。光センサシステムを東京大学地震研究所浅間観測所施設内に設置し、一定期間データ取得を行う。また上記観測運用の中で長期連続観測時の光送受信装置の性能変化の概要の把握、観測期間中に発生するであろう雷に対する光センサの挙動を把握する。観測期間中は光センサシステムの維持管理を行う。さらに観測期間中に実施される予定の表層地震波速度構造探査を支援する。

c. データ解析

観測データを回収し、長期連続観測時の光送受信装置の性能変化をより詳細な把握するとともに、光センサの性能に関する解析とノウハウの整理を行う。

d. 光センサシステムの総括

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で行う。

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、日変動などの長周期成分や、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今後の改良点、運用上の特徴等の記載に関しては耐雷性等の耐環境性や設置作業時の作業性、長期運用時のシステムの安定性などに注目して収集を行い整理し、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、4) 他課題への観測データの提供を行う。

## ②耐雷性の検証

### a. 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、観測実施前の光センサシステムの整備を行う。

### b. 光センサシステムによる火山観測の実施

原理的な特徴の一つである雷に強いことを、活動的火山での観測を行いながら、調査検証する。観測場所の候補として東大浅間観測所構内を考えている。観測期間中は光センサシステムの維持管理を行う。① b と同じ期間に平行して実施する。

### c. データ解析

観測データを回収し、観測期間中に発生するであろう雷に対する挙動を詳細に把握するとともに、光センサの性能に関する解析とノウハウの整理を行う。

### d. 総括

① d. の 2) と同じ期間に平行して、光センサシステムにおける耐雷性の検証の総括を行う。

## ③バイアス電圧ジャンプによる欠測現象を低減させる改良と検証

### a. 光センサシステムの修正

平成 28 年度の観測で明らかとなった、バイアス電圧異常による欠測への対策を施す。① b と同じ期間に平行して実施する。これまで指摘されていたバイアス電圧ジャンプに伴う欠測現象を低減化する対策をシステムに施すとともに、観測運用中の光センサシステムの挙動に応じてシステムを修正する。また後年度実施を視野にいれて観測期間終了後も必要に応じてシステムの修正を行う。

### b. データ解析

観測データを回収し、バイアス電圧ジャンプに伴う欠測の軽減対策を検証するとともに、光センサの性能に関する解析とノウハウの整理を行う。

### c. 総括

① d. の 2) と同じ期間に平行して、光センサシステムにおけるバイアス電圧ジャンプによる欠測改善の検証の総括を行う。

## (c) 業務の成果

### 1) 観測の実施

浅間火山において位相シフト光干渉システムを用いて火山観測を行った。その結果, 124

Gbyte に及ぶ連続データを収録した。以下に要点を述べる。

a) 位相シフト光干渉システムの諸元

観測に用いた位相シフト光干渉システム（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。

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

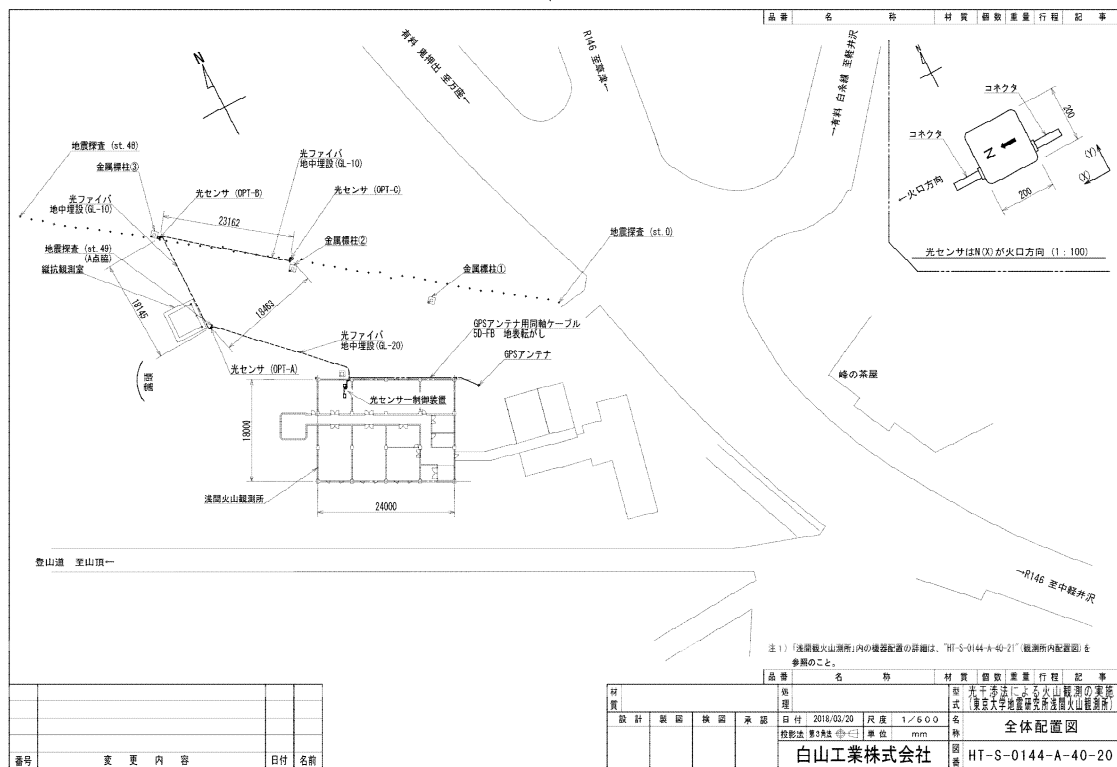
サイズ： 送信装置, 受信装置とも 60cm×43cm×65cm  
重量： 送信装置, 受信装置ともに約 40kg  
消費電力： 合計で約 500W

設置状況

センサユニットを東京大学地震研究所浅間火山観測所構内に設置するとともに、光送受信装置を隣接した観測所本館内に設置し、その間を光ファイバーケーブルで接続した。本報告では観測点の総称名を AVO とし、各観測点を送受信装置に近いものから順に OPT-A, OPT-B, OPT-C と名付け、以降ではそれぞれを A, B, C 観測点とも称することにする。

3 つのセンサユニットはいずれも地表に設置された。センサユニットの設置方向は、

X(N)成分を火口方向に向け、Y成分を火口と直交方向に、Z成分を上下動方向に向けて設置し、以降でそれぞれをL成分、T成分、V成分と称する。観測所本館とセンサユニット設置位置を図1に示す。



光センサーシステム設置図

図1に示されるように、平成29年度は3つの光センサーOPT-A～OPT-Cが三角形のそれぞれの頂点となるように配置し、いわゆるトリパタイトアレイを構成した。これは火山で発生する地震波の到来方向と見かけ速度を知り、その波源の位置と深さを推定するためである。本計画の到達点である多成分観測の一つのスタイルである多点アレイ観測のノウハウの確認と、この観測方式への光センサーシステムの適用性の検証を考慮したものである。

近年、火山活動をより深く理解するために、従来からの展開法ばかりでなく、複数の高密度地震観測点配置(地震計アレイ)を用いた研究が行われるようになってきた。国内では文献2が2011年の霧島山新燃岳の噴火に伴う火山性微動を山を取り囲む2カ所の地震計アレイで観測し、2月2日の噴火に伴って発生した火山性微動の到来方向を時々刻々解析することでこの噴火の直前から噴火終了までの震動源の動きを追跡した。この研究は火山噴火にともなう破壊現象の前線を追跡したという意味で火山噴火過程の研究に貢献している。さらに文献3は250点からなる高密度観測で人工地震を観測し、桜島火山直下のマグマだまりの位置と深さ、そして火山活動の進展に伴うマグマだまり内部物性変化の手がかりを得た。また、海外ではセントヘレンズ火山を対象としたiMUSH計画が現在進行中である(文献4)。これはセントヘレンズ火山の周辺に合計900点以上の観測点からなる複数の地震計アレイを配置して自然地震あるいは人工地震を観測し、セントヘレンズ火山直下

のモホから上部マントルまでの構造の詳細な姿を解明することを狙ったものである。このように地震計アレイを用いた火山研究は近年めざましい進展を見せている。地震計アレイ観測を長期にわたって維持すれば、火山活動に関する情報がこれまで以上に緻密に得られるはずである。

#### b) 火山性地震観測

2017年9月13日から2018年1月8日まで118日間にわたり東京大学地震研究所浅間火山観測所構内を利用して位相シフト光干渉法振動観測システム（以下、光センサシステムと呼ぶ）を用いて観測を行い、1月23日にシステムを撤収した。システムの稼働状況を表1に示す。精査の結果、今年度の観測では実稼働日数108日であった。また2018年1月22～23日にかけて一時的にシステムを稼働させて記録を取得した。

その結果124 Gbyteに及ぶ連続データを収録し、1月23日までに浅間山で発生した火山性地震はA型1イベント、B型51イベントの記録が得られた。それに加えて1月23日午前10時頃発生した草津本白根山の爆発地震の記録も得ることができた。また火山性ではない自然地震は417イベントを観測した。

表1 光センサシステムの稼働状況と地震イベント記録回数

観測 期間	年月日	データ	データ	備 考	地震回数(※)			火山性地震記録時刻(B型、A型)		
		欠落数(秒)	欠落率(%)		EQ	B型	A型			
	2017年8月29日			浅間火山観測所下見、設置場所等確認						
	2017年9月12日	2013	2.33	設置作業						
(I)	9月13日	200	0.231	0000:スタート、0604~0855:表層構造探査	1	1		2:50		
	9月14日	13	0.015		4					
	9月15日	0	0		2					
	9月16日	0	0		4					
	9月17日	0	0		9					
	9月18日	3	0.003		0					
	9月19日	25	0.029	モバイルルータ設置、遠隔監視開始	4					
	9月20日	0	0		3					
	9月21日	4209	4.872	2150~2400:OnOff比異常	6					
	9月22日	41602	48.15	0000~1157:OnOff比異常、1157:On-Off比レベル調整	1					
	9月23日	0	0	1127、1715:On-Off比レベル調整	1	1		12:07		
	9月24日	0	0		3					
	9月25日	2	0.002		3					
	9月26日	13	0.015		3					
	9月27日	0	0		3					
	9月28日	0	0		6					
	9月29日	19	0.022		1					
	9月30日	0	0		2					
	2017年10月1日	50	0.058		4					
	10月2日	56	0.065	0850、1459:On-Off比レベル調整	4	1		2:43		
	10月3日	2	0.002		8	1		3:32		
10月4日	4	0.005		5						
10月5日	143	0.166		1						
10月6日	0	0		3	1		0:40			
10月7日	0	0		2						
10月8日	358	0.414		2						
10月9日	16	0.019		3						
10月10日	17	0.02		0						
10月11日	60	0.069		0						
10月12日	48	0.001	1414:収録停止(送信装置改修の為に取り外し)	0						
10月13日~19日	*	100	この間、収録停止	-						





イベントを図 3 ～ 6 に示す. また, 撤収直前の 1 月 23 日 10 時頃に発生した草津本白根山爆発に伴う爆発地震も光システムで捉えることができた.

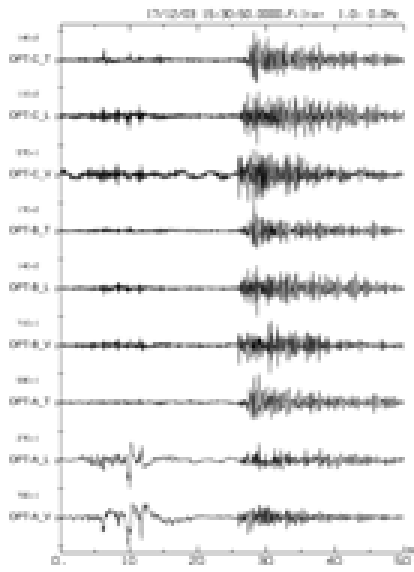


図 2. A 型地震記録

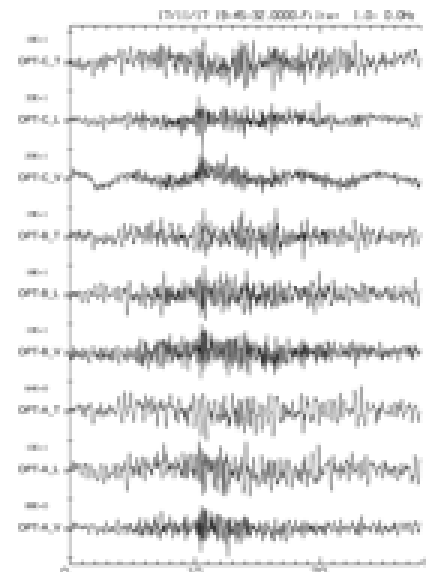


図 3. B 型地震記録 (1)

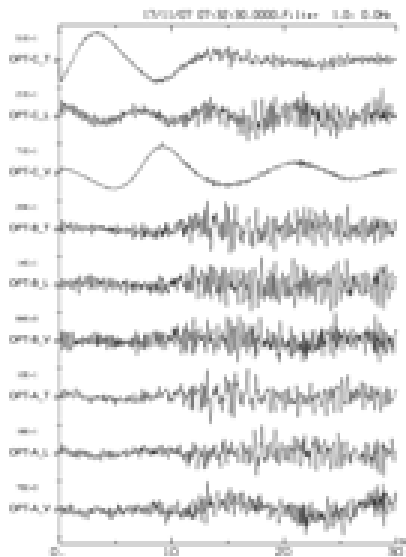


図 4. B 型地震記録 (2)

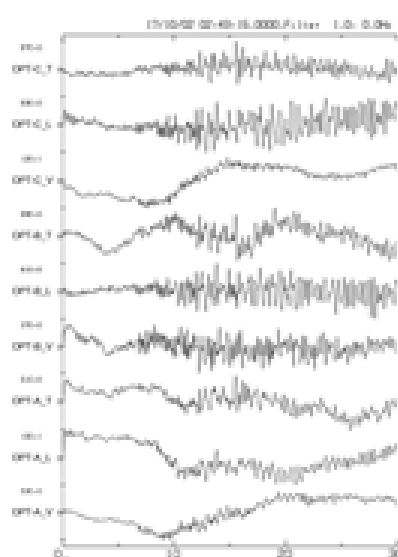


図 5. B 型地震記録 (3)

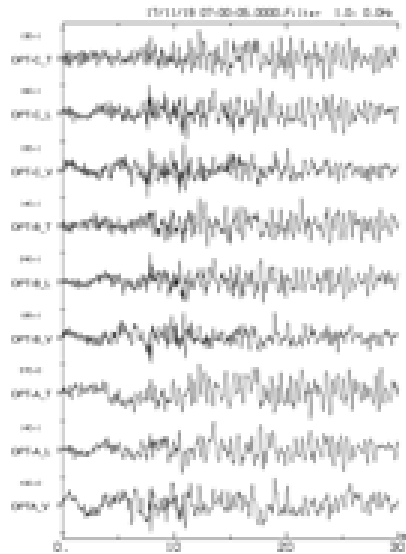


図 6. B 型地震記録(4)

#### 光センサアレイの空間的応答特性

AVO 構内に展開された光センサアレイの空間応答特性を図 7 に示す。空間応答特性とはアレイに垂直下方から平面波が入射した場合の解析結果に相当する。理想的な地震計アレイであれば、垂直入射する平面波はスローネス平面上の原点に点としてプロットされる。

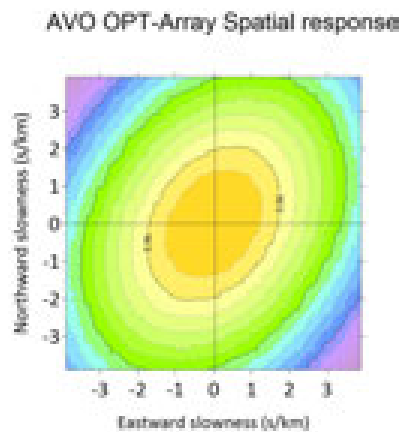


図 7. 光センサアレイの空間応答特性

図 7 からは、光センサアレイの応答のピークの形がやや北東－南西に延びていることと、スローネス  $-3.8 \text{ s/km}$  から  $3.8 \text{ s/km}$  の範囲では副次的な感度のピークが認められないことが示される。

### c) 表層構造調査

今年度は光センサを面配置して地震計アレイを構成して火山観測を行ったが、光センサアレイの地下構造をあらかじめ知っておくために表層付近の地震波速度の調査を目的とした小規模地震探査を行った。

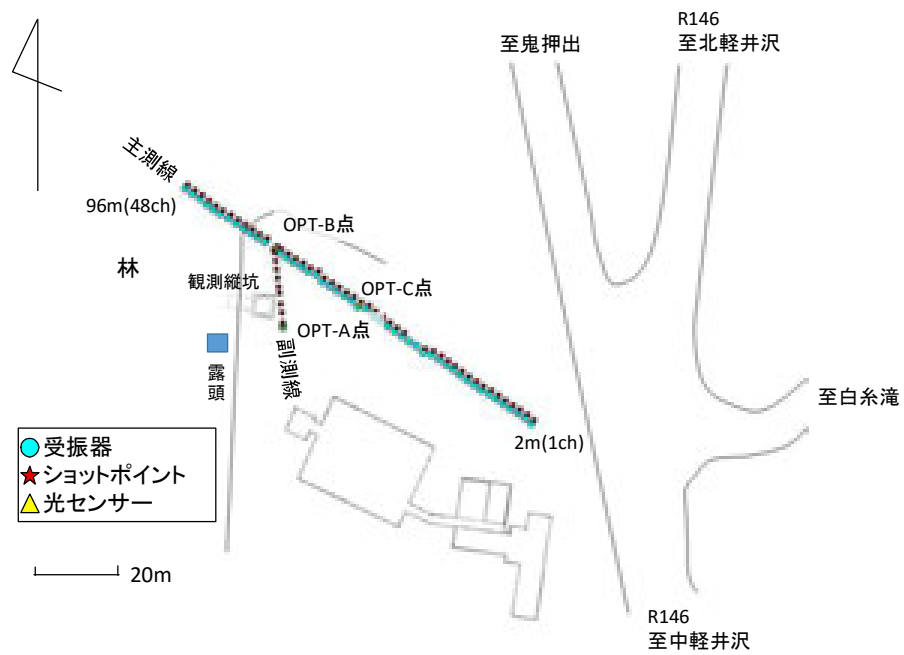
測線図を図 8(a)に示す。図 8(a)中の☆印がショットポイント、○印が受振点、△印が光センサ設置点である。図 8(b)中の灰色の線は測線を表す。受振点は、直線状に 2 m 間隔で 48 チャンネルを設置した主測線に加えて OPT-A 点付近に 1 観測点を副測線用として置き、計 49 チャンネルを設置した。

主測線で 72 m 地点に設置予定だった受振器は OPT-B 点付近に設置する必要性から 71.3 m 地点に設置した。ショットは、すべての受振器から北東側に 1m 離れた場所で行った。48 m 地点でのショットは埋設されている光ファイバを避けるために受振器から東側に 1.3 m 離して行った。32m, 34m 地点のショットは、震源付近に蜂の巣があったため行っていない。

また副測線として、Ch. 49 (OPT-A 点付近) と Ch. 36 (OPT-B 点付近の受振器) の間を、2 m 間隔でショットを行った。光ファイバ埋設場所を避けるために、OPT-A 点から 7 m 地点離れたショットの代わりに A 点から 7.5m 離れた地点でのショットを行った。

表 2 に探査仕様を示す。すべてのデータの取得において、サンプリング周期は 1 ms、記録長は 1 秒とした。主測線および副測線の発振の観測は全 49 チャンネルで行った。

(a)



(a)測線図

(b)

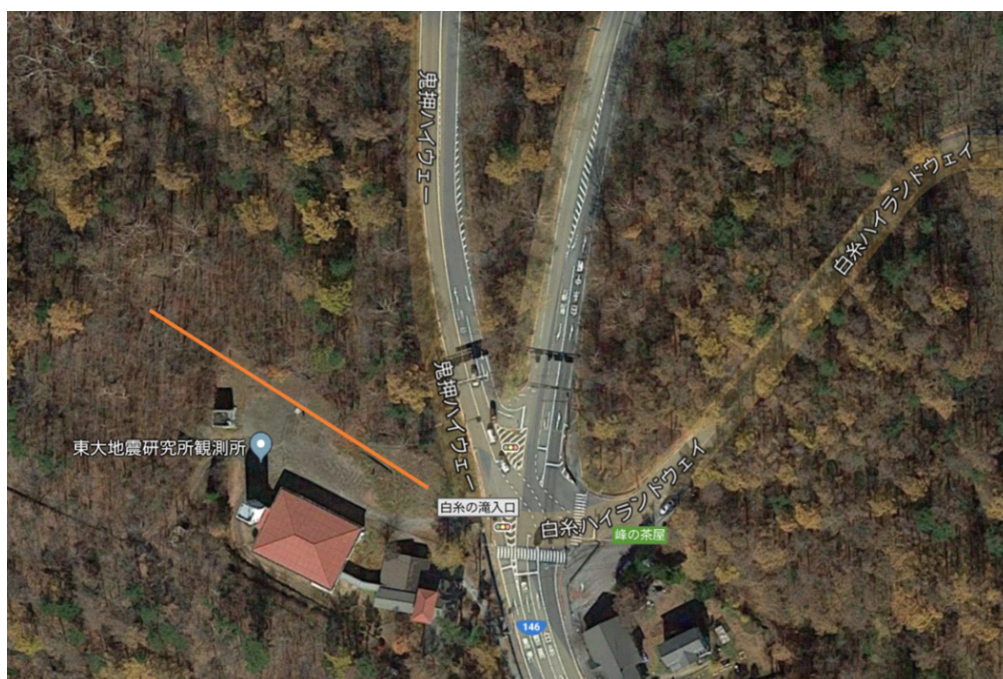


図 8 (b)測線の周りの様子(Google map 使用)

表 2. 探査仕様

チャンネル数	48ch(測線) + 1ch(A 点)
受振器間隔	2m
ショット間隔	2m
サンプリング周期	1ms
記録長	1s
データ型式	SEG-2

使用した機材は、震源に「かけや」(質量 6 kg)、探鉱器に DAQlinkIII (Seismic Source 社製)、受振器に SM-11 上下動成分 (固有周波数 30 Hz, Sensor Nederland 社製)を用いた。かけやに装着したハンマースイッチでショットマーク信号を発生し、DAQ-Link III の記録開始を制御した。

観測点位置の測量はトータルステーション SET-5W (Sokkia 社製)と電子野帳 SHC-8 (Sokkia 社製)を用いて行った。測量にあたりトータルステーションを測線中ほどの約 35 m 地点に据え付けて原点とし、96 m 地点の受振器との間を基線(x 軸方向)にして、地震探査測線の受振器位置と光センサ位置を計測した。測量結果を図 8(a) に示す。

車通りの多い交差点の傍であったため、交通ノイズを避けるために 2017 年 9 月 13 日の午前 6 時から午前 9 時に行った (写真 1)。



写真 1. 探査風景

#### d) センサ検定

センサが適正な動作を確かめるためには、何らかの方法でセンサに強制的な入力を与えなければならない。今回試用した光センサシステムではセンサ振り子の強制運動機構は実装されていない。ここでは木製の「かけや」を用いてセンサ近傍の地表面に打撃を加えることでセンサ振り子に強制的な入力を与えることにした。

震源にもちいた「かけや」は、本来は木造建築物の組み立てに用いる道具である。ここでは、別項の浅層構造調査の地震探査に用いたものと同一の木製のもの(質量は約 6 kg ,

柄の長さは 90 cm) のものを用いた。この「かけや」を用いて埋設されている光センサの約 1m 近傍の地表を打撃したときに発生する地動を OPT-A ~ OPT-C 点で観測した。同一点での打撃は最低 3 回実施した。

2 回の動作検定作業を光センサ観測期間中に行った。1 回目は光センサ設置翌日の 2017 年 9 月 13 日に、2 回目を光システム撤収当日の 2018 年 1 月 23 日に実施した。1 回目の実施時の天候は曇りで地表面は軽く湿った状態であった。2 回目の実施時の天候は曇りであったが、地表には約 15 cm ほどの積雪があり、その下の地表面は硬く凍結していた。

1 回目の実施時には光センサシステムの動作は正常であったが、2 回目の実施時には光センサシステムの光学-電子システムの不調のために、上下動成分のチャンネル以外は明らかに異常な波形が記録されていた。

#### e) 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 124 Gbyte に及ぶ連続データである。

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

### 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．本項では光センサシステムで記録に成功した火山性地震についてアレイ解析を行い，その結果について述べる．

#### A 型火山性地震

2017 年 12 月 3 日（気象庁）に発生した A 型火山性地震（以降，イベント 03153110 とする）を対象としてアレイ解析を行った．光センサで取得されたアレイ観測記録にセンブランス（文献 6）を用いたビームフォーミングを適用して到来相の伝播方向を推定した．

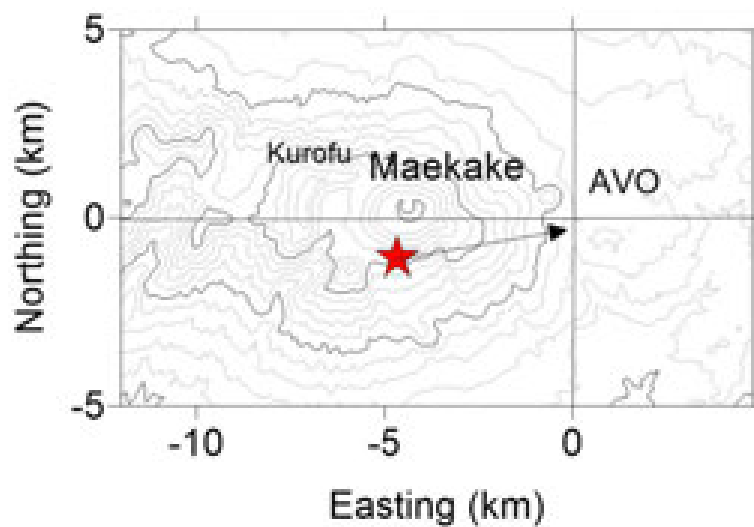


図 9. イベント 03153110. 星印は震央を示し，AVO は光センサ設置点を示す

気象庁震源リスト（文献 7）によればイベント 03153110 は前掛山直下深さ 4km に震央が推定され，発震時刻は 2017 年 12 月 3 日 15:31:14.5 である（図 9）．地震波は 15:31:15.7 に光センサに到来した．上下動成分を図 10 上段に示す．図 10 の地震記録は 1 Hz のローパスフィルターを施している．初動は比較的鋭い立ち上がりを示している他，初動から約 1.2 秒，1.5 秒，8 秒後に明瞭な後続相 A，B，C が認められる．



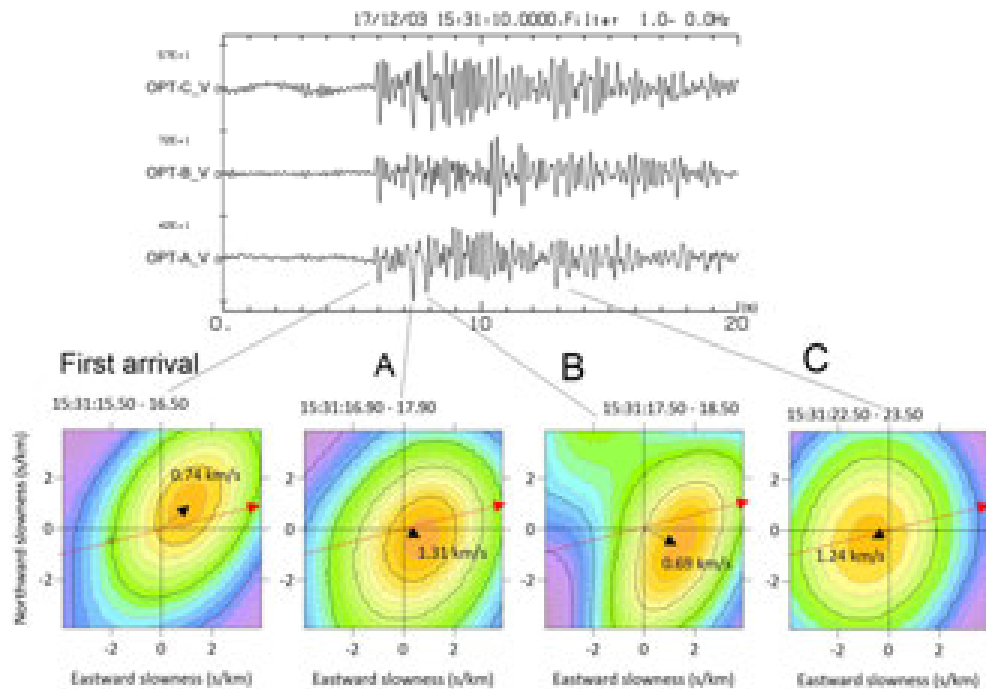


図 10. イベント 03153110 の各相の到来方向と見かけ速度．赤矢印は本来の伝播方向を示す．

到来方向解析の結果は図 10 下部に示されている．図 10 では震央方向から発した波の伝播方向を赤矢印で示す．初動は南西から到来している．初動は本来の方向より北寄りの方向に向かって伝播している．A および B は見かけ速度が異なるが同じ方向に伝播している．C は逆に震央方向に向かって伝播している．

別項の表層探査からはアレイの直下の構造はおおむね水平成層で最表層の速度が約 300 m/s ，解析下限の速度が 1000 m/s 程度が得られていることを考慮しても，P 波初動のみ見かけ速度が 0.74 km/s とかなり小さい値であることが注目される．また，それに引き続く A 相はより大きい 1.31 km/s の見かけ速度を示しており，初動より小さい入射角で入射してきていると考えられる．B 相は A 相の直後に到来しているが，A 相の見かけ速度より小さい 0.69 km/s を示していることと，図 2 に示されるように水平動が大きく動く時刻に到来時刻が一致していることから S 波であると考えられる．さらに C 相は見かけ速度が A 相と同様であることから，これもまた反射波の到来である可能性が高い．

検討を進めるために，OPT-C 点における粒子軌跡（ホドグラム）を図 11 に示す．OPT-C 点は 3 点の光センサ観測点のなかで最も人工物から離れたところに設置されている．

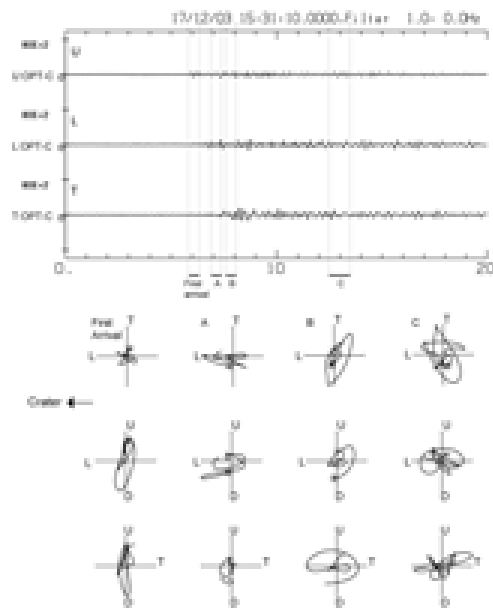


図 11. OPT-C 点のホドグラム

図 11 によれば、初動部分 (First arrival) では上下動成分が卓越していることが示されている。イベント 03153110 の震央位置 (光システムから約 4 km) と震源深さ (海面下 4 km) を考慮すると P 波の振動軌跡の方向は概ね L 方向下がり 36.5 度であることが予想され、地表付近の平均地震波速度を 420 m/s とした場合の見かけ速度 705 m/s ( $=420 / \sin 36.5^\circ$ ) と概算される。420 m/s は後述の表層地震波速度調査の結果を用いた。観測結果では初動の 1 周期分で T 軸に対して約 35 度の角度を持った振動軌跡を示している。さらに、振動方向から推定される到来方向は震央方向より北寄りの方角である。

上下動が卓越するのは初動部分だけであり、時間の経過とともに水平動成分の動きが大きくなる傾向も示されている。この中で注目されるのは時間窓 A で L 成分、時間窓 B で T 成分の動きが卓越することである。L-T 平面での振動が時間窓 A では L 軸に平行な方向に卓越し、ひきつづく時間窓 B では第 1 象限から第 3 象限に卓越し、時間窓 C では第 2 象限と第 4 象限に卓越している。時間窓 A で L 成分が卓越することは、一方向だけに振動する S 波の到来を示していると考えられる。イベント 03153110 の震源位置と初動振動方向を考慮すると、震源から直接到来する S 波は T 成分が卓越するはずであるので、むしろ時間窓 B の到来波のほうが震源から直接到来した S 波と考えられる。したがって時間窓 A で観測された L 成分が卓越する到来波は、震源よりも観測点に近い場所で P から S に変換した波を示していると考えられる。このことはやはり同じ時間窓における到来方向解析の結果と一致する。

時間窓 B で卓越している振動が震源からの直達 S 波であるとする、その卓越方向から到来方向は震央方向より北寄りの方角であると推定され、先述の P 波初動の到来方向と一致するとともに同じ時間窓の到来方向解析結果と一致する。

最後に時間窓 C でもやはり水平動が卓越しているが、L-T 平面内の振動方向が先ほど

の時間窓 B のそれとは異なり，第 2 象限と第 4 象限に含まれる．このことから時間窓 C の振動は S 波であると考えられ，先に到来している直達 S 波より遅れて到来していることから SS 反射である可能性が指摘される．同じ時間窓における到来方向解析結果からは火口とは反対方向から大きな見かけ速度で到来していることが示されている．

直達 P 波および直達 S 波の到来方向に共通して見受けられる北寄り偏倚は，文献 8 が明らかにした浅間山から烏帽子火山群にかけての中央部に存在する高速度体の影響の可能性はある．個々の観測点における振動方向とアレイ全体でみた到来方向との差異は個々の光センサ観測点直下に起因する走時補正值の差が関わっている可能性がある．

### B 型火山性地震

次に B 型火山性地震の到来方向解析とその結果について述べる．解析の対象としたのは 2017 年 11 月 17 日 19:45 に観測されたイベントである．以降，このイベントをイベント 17194532 と呼ぶことにする．イベント 17194532 は気象庁震源リストにも USGS 地震リストに無く，浅間山近傍の観測点だけで確認される．先ほどの A 型地震とは，初動が不明瞭であることと，S 波到来が不明瞭な記録波形であることから B 型地震として分類した．

光センサアレイにおけるイベント 17194532 の上下動成分記録を図 12 上段に示す．このイベントは記録の先頭から 5 秒付近で揺れが始まり，10 秒付近でパルス状の位相が到来するという特徴を示している．

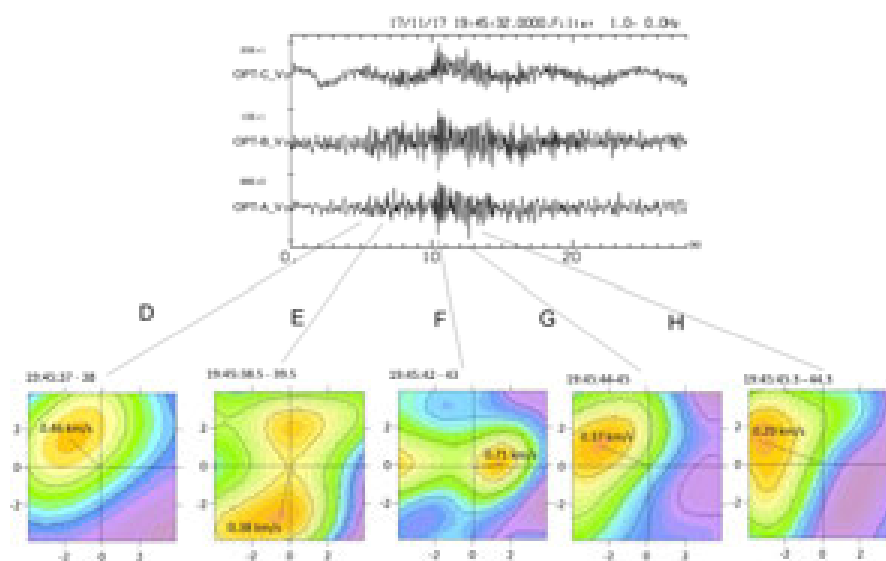


図 12. B 型地震の到来方向解析

このイベントの到来方向解析を行った結果を図 12 下段に示す．到来解析を行った 1 秒間の時間窓を早い順に D~H と呼ぶことにする．時間窓 D は記録先頭から 5 秒に位置するが，見かけ速度 0.46 km/s で北東に進む波の入射が示されている．時間窓 E は記録先頭から 6.5 秒に位置し，見かけ速度 0.38 km/s で南南西に進む波の存在の他に約 0.7 km/s で北に向か

って進む波の存在を示している. 時間窓 F は記録先頭から 10 秒に位置しておりパルス状の到来位相に対応しているが, このパルス状の到来位相が見かけ速度  $0.71 \text{ km/s}$  で東に向かってすすんでいることを示している. 時間窓 G, H はそれぞれ見かけ速度  $0.37 \text{ km/s}$  で北西, 見かけ速度  $0.29 \text{ km/s}$  で北西に向かって進む波を示している. 光センサアレイ直下の地震波速度構造を考慮すると, 時間窓 D, G, H は光アレイ近傍の道路で発生した自動車通行ノイズが卓越していると考えられるので, 火山性地震の本体は時間窓 E から F にかけての時間帯である.

前述のイベント 03153110 と同様にホドグラム解析を行った結果を図 13 に示す.

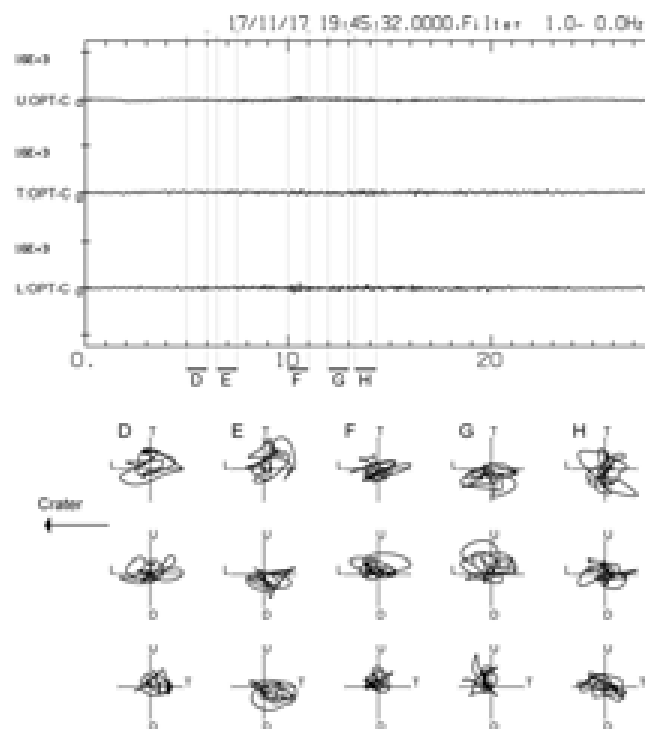


図 13. イベント 17194532 のホドグラム

イベント 17194532 もともと S/N 比が小さいイベントであった. 図 13 のホドグラムでは全般的に上下動よりも水平動が卓越する振動様式が示されている. しかしその中でも位相の到来が明瞭な時間窓 F は到来方向に明らかな特徴があり, L 軸に平行な振動の卓越することが示されている. 同様な振動様式を示す先述の A 型地震の時間窓 A を考慮すると, この到来相は伝播経路上で P 波から S 波に変換した波の可能性がある. しかし, 時間窓 F で示されている波の見かけ速度は, 先述の A 型地震の初動のそれと同程度であるがわずかに小さい値を示している. このことから, 時間窓 F に示されている波はイベント 03153110 より大きな入射角で到来している可能性が高い. 時間窓 F における振動軌跡の軸がイベント 03153110 の初動部の振動軌跡の軸よりも寝ていることはこの可能性を支持している. この時間窓 F の明瞭な到来相は時間窓 F の到来方向解析では光センサアレイの西方に位置する浅間山火口方向から入射していることが示されている. このことから時間窓 F で示され

た入射波は先述の A 型地震より浅い場所で発生した地震の P 波初動と考えられる。文献 5 が指摘した B 型地震は A 型地震よりも浅い場所で発生する傾向があるという結果と整合する。

#### 草津本白根山爆発地震

2018 年 1 月 23 日 10 時 02 分の草津本白根山の爆発（文献 9）にともなって発生した爆発地震を、約 30 km 離れた AVO 構内の光センサアレイでも観測することができた（図 14）。

文献 9 によれば 9 時 59 分から 8 分間にわたり草津白根山直近の地震観測網で火山性振動現象が観測されていたほか、AVO 近傍の V-NET 小浅間山観測点でも火山性振動現象が観測されていた。また、防災科学技術研究所 F-net 観測網でも草津本白根山から発した長周期振動の観測が報告されていた（文献 10）。

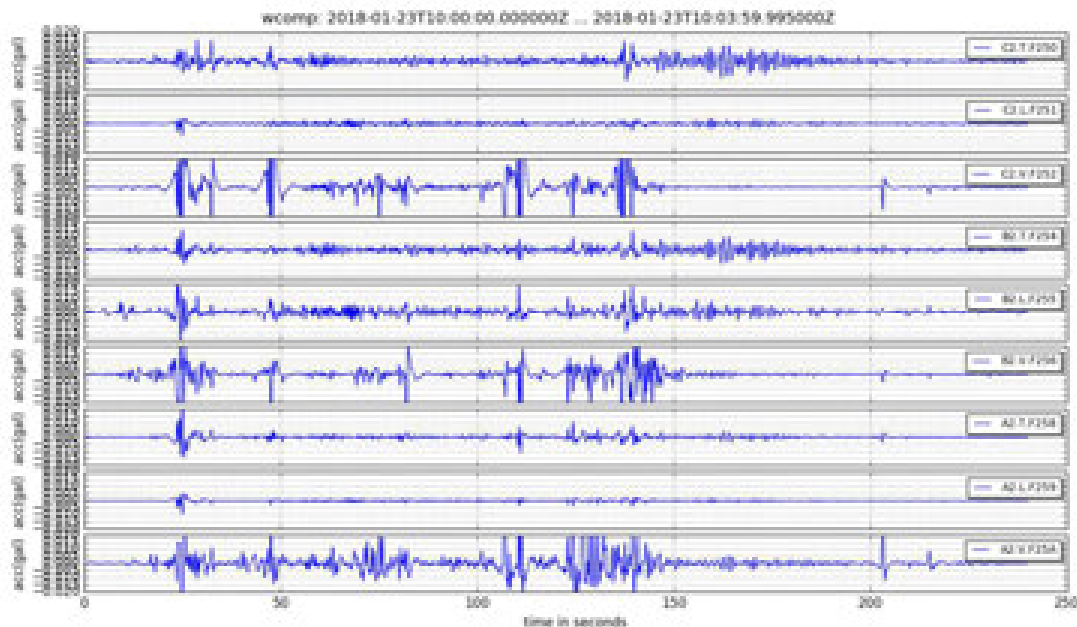


図 14. 草津本白根山爆発地震観測波形

この記録波形のうち上下動成分を図 15 上段に示し、到来方向解析結果を図 15 下段に示す。

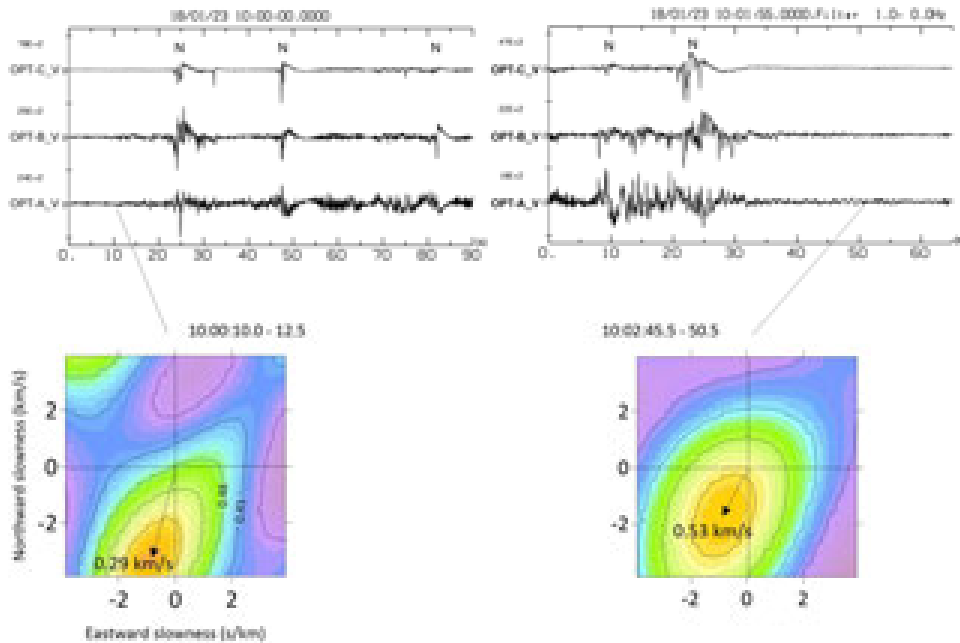


図 15. 草津本白根山の爆発地震記録。上段は 1 Hz ローパスフィルター処理後の上下動成分記録を示す。N は交通ノイズであることを示す。

残念なことに草津本白根山の爆発地震記録には交通ノイズ（図中 N ラベルで示す）が含まれていた。10 時 00 分付近の爆発直前の時刻と、爆発時刻直後の 10 時 02 分付近の交通ノイズを含まない部分で到来方向解析を行った。なお、このときは水平動成分が不安定な状況であったと検定作業結果から判断されたため、本イベントに関してホドグラム解析を適用しなかった。

図 15 ではいずれの結果も南西方向への進行波の入射を示している。本来、草津本白根山は AV0 からみて北方に位置するので、本白根山からの地震波は南方に向かう進行波になるはずである。しかし、観測結果は南南西方向の進行波を示しており、想定より東寄りの入射方向であることが推定される。本光センサアレイでは入射方向の系統的な偏りが存在することが先述の A 型地震解析から指摘されていたので、現時点では妥当な解析結果と考えられる。

1 月 23 日の観測ではシステムに不具合が生じており観測に最適な状況ではなかったが、約 30 km 離れた草津本白根山の爆発イベントを含む火山性振動を捉えることができた。このことから光センサシステムは火山観測に適用できることがあらためて確認された。

## 考察

### OPT-A 点のノイズについて

今回得られた地震記録を観察すると、OPT-A 点 (OPT-A) では他の点 (OPT-B, OPT-C) に比べて 1 Hz より低周波側のノイズが大きいことが注目される。この現象はイベントの振幅が小さいときに特に顕著に表れる。

光センサ各点において地震イベントや交通ノイズの合間の比較的定常的な時間帯のノ

イズレベルを調べたものが、下の図 16 ～ 18 である。

すべての観測点で共通して 10 ～ 50 Hz でノイズが大きくなる傾向にあるほか、60 Hz の成分が線スペクトルとして現れている。60 Hz の成分については白山工業の報告で述べられている。

これらの図の周波数 1 Hz ( $10^0$ )より低周波側に注目すると、OPT-A 点（図 16）はその他の OPT-B, OPT-C 点（図 17, 18）にくらべて 1 Hz より低周波側でノイズが大きい傾向を示している。

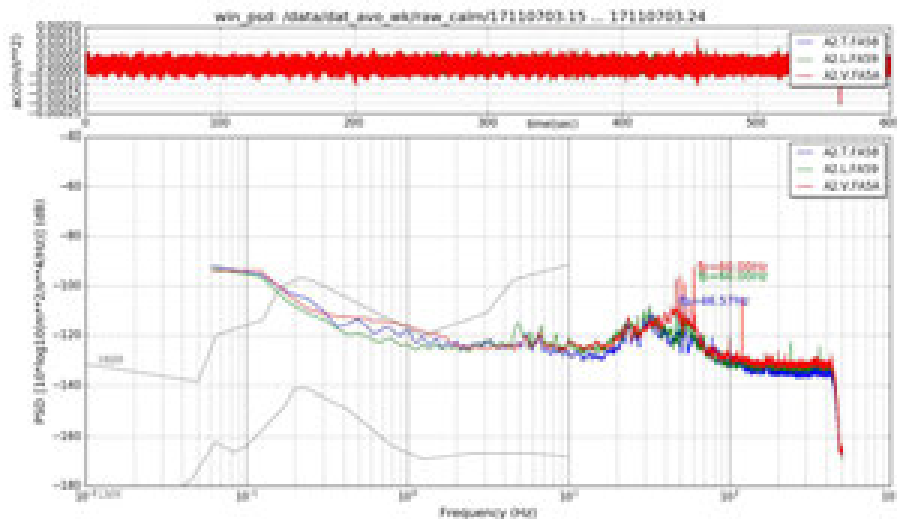


図 16. OPT-A 点のノイズスペクトル

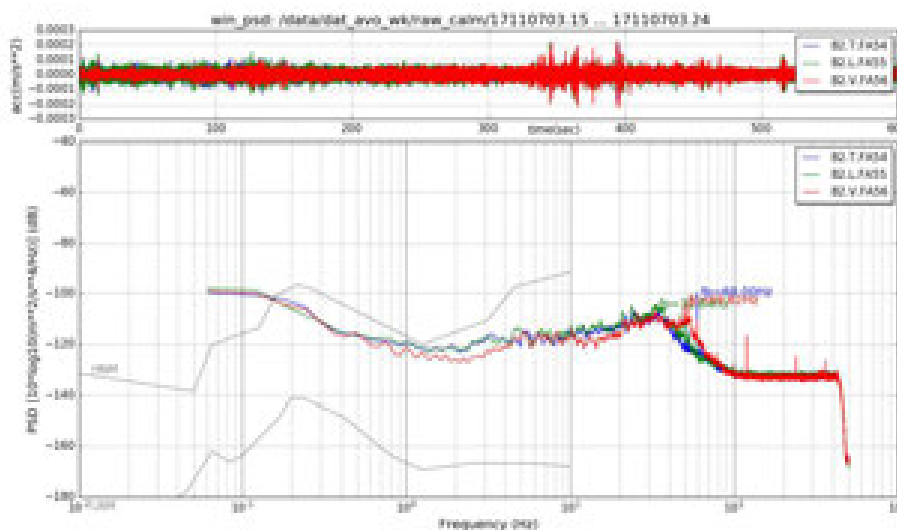


図 17. OPT-B 点のノイズスペクトル

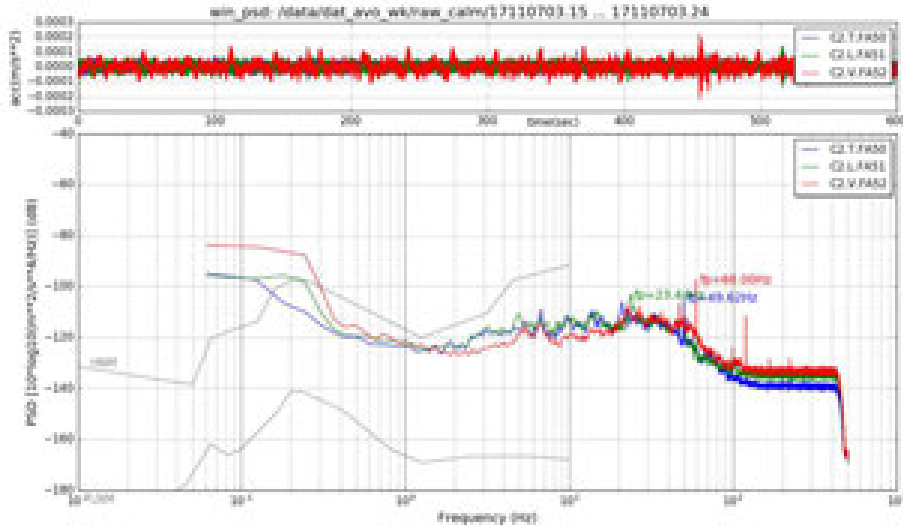


図 18. OPT-C 点のノイズスペクトル

先行する年度の試験観測でも光センサは長周期側のノイズが大きい傾向にあることが報告されているが、その個体差については特段の指摘はなかった。したがってこの現象は平成 29 年度観測に固有のものである可能性が高い。

この原因として 2 つの要因が挙げられる。

- 1) 設置場所の影響
- 2) センサ毎の個体差

ここでは 1) の要因が強く働いている可能性が高いと考えられる。光センサ各点はいずれも土中埋設されており、大地とのカップリング、OPT の条件は同じと考えられる。しかし、注目されることとしては、OPT-A 点の数メートル以内近傍には東京大学地震研究所の地震観測用縦坑（深さ 26 m）が存在している。この縦坑に関連する工作物はコンクリート造りの上屋と 75cm のコンクリートで巻かれた内径 5m の縦坑である（文献 11）。別項で述べたが、小規模地震探査の副測線が OPT-A 点と OPT-B 点間に設定されている。この副測線の走時曲線では OPT-A 点から 5 m の区間で高速度が観察されており、逆測線の OPT-B 点近傍と異なる様相を呈している。

さらに別項のように観測縦坑底（26 m 深）にある東京大学地震計の記録の提供をいただいて、光センサ各点近傍からの速度を調べてみると、OPT-A 点のみ約 2 km/s の速度を示す。これは別項で述べられた構造の速度値より高い値である。それ以外の光センサ各点は別項で求められた表層付近の速度構造と一致する速度を示している。したがって OPT-A 点のみ近傍の工作物の地震学的な影響を強く受けていると考えられる。

つぎに 2) の要因の可能性について検討する。先述のように前年度の試験観測時には、ノイズレベルの個体差について特段の指摘はなかった。このノイズレベル記録取得時には前年度の試験観測以降のシステム改修が加えられていなかったため、輸送時の問題が生じていないのであれば 2) の要因がはたらいっている可能性は低いと考えられる。

以上のことから OPT-A 点において 1 Hz より低周波側のノイズが大きいことは、OPT-A 点の設置環境、特に設置場所の近傍の人工構造物の影響が大きいと考えられる。



b) 表層構造調査

主測線

得られた波形記録のうち特徴的なものを図 19 から図 21 に示す.

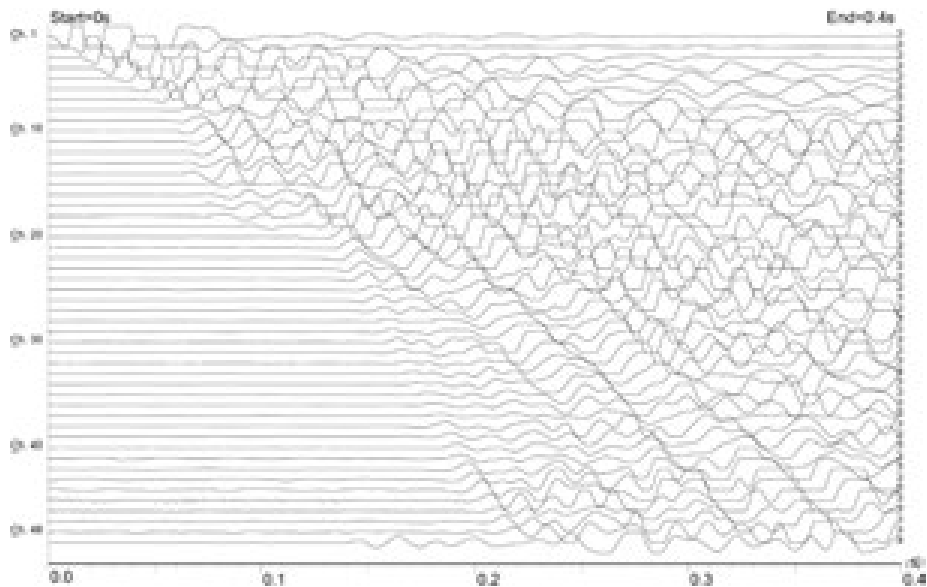


図 19. ショットポイント 2 m 地点における波形記録

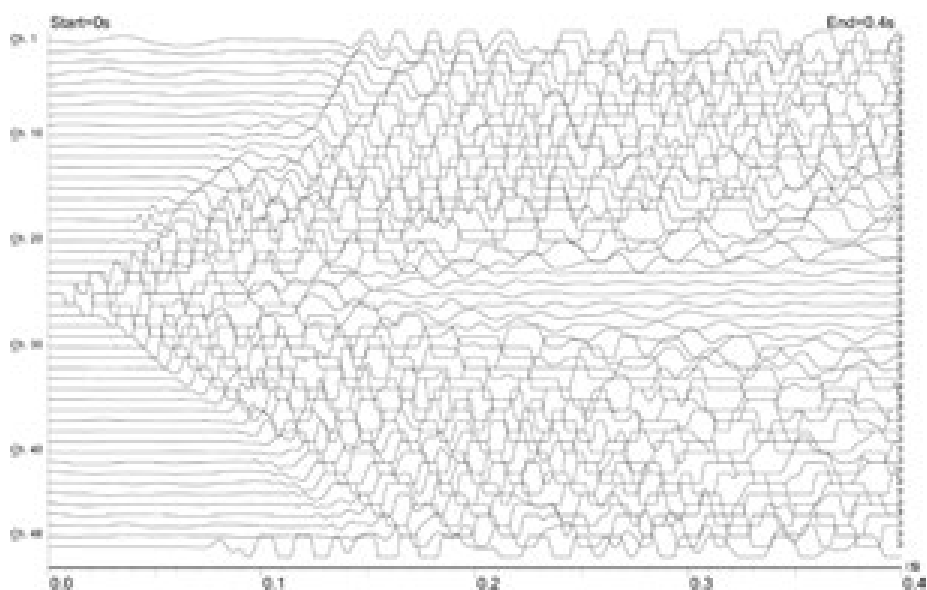


図 20. ショットポイント 50 m 地点における波形記録

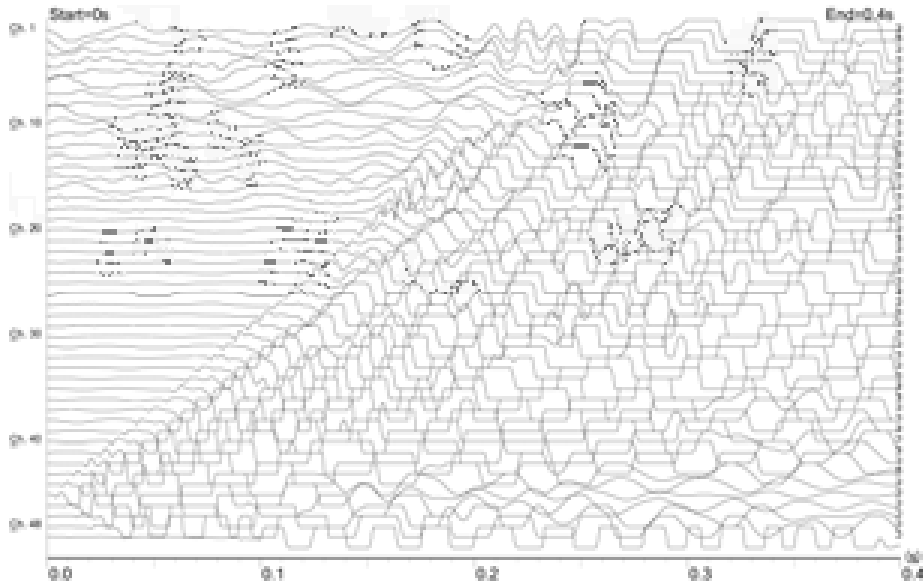


図 21. ショットポイント 90 m 地点における波形記録

波形記録から初動走時をよみとり，走時曲線を作成した結果を図 22 に示す．

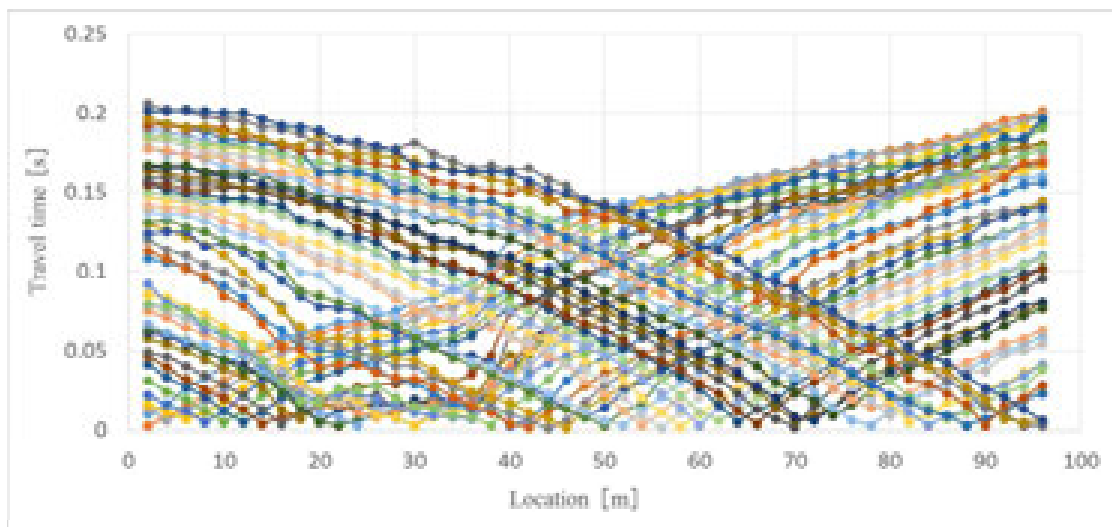


図 22. 主測線走時曲線

n

図 22 を概観すると，ショットポイントから離れるにつれて走時曲線のグラフの傾きが小さくなる傾向，すなわち走時曲線の見かけ速度が大きくなる傾向が示されている．このなかで，20 ～ 30 m 地点の間ではこの傾向に当てはまらない走時曲線が見受けられる．詳細に調べてみるとこの区間で初動走時が乱れているのは震源が 20 ～ 30 m 地点にある場合の震源近傍の初動走時だけであり，60 m 以降の震源位置の発震に対するこの区間の初動走時は乱れていない．

図 22 の初動走時曲線の一部の例を図 23 から図 25 に示す．図 23 は，ショットポイント 2 m 地点，図 24 はショットポイント 50 m 地点，図 25 はショットポイント 90 m 地点である．これらの図ではショットポイント近傍では 260 ～ 300 m/s の見かけ速度を示し，シヨ

ットポイントから 10 m 以上離れると 400 m/s 以上に、さらに 50 m 以上離れると 1100 m/s の見かけ速度が現れることが示されている。

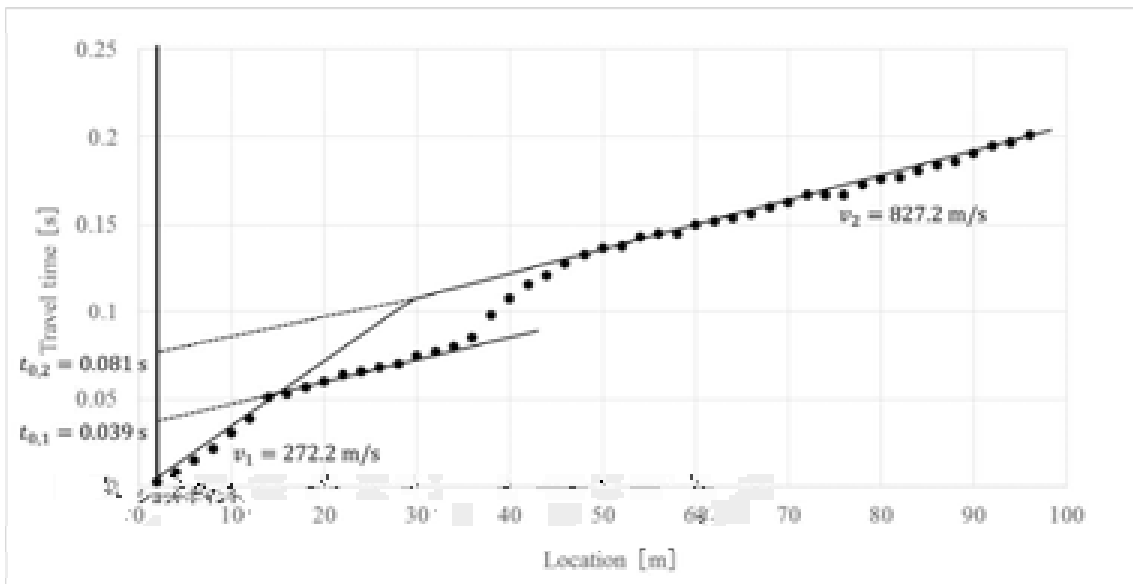


図 23. ショットポイント 2 m 地点における走時曲線

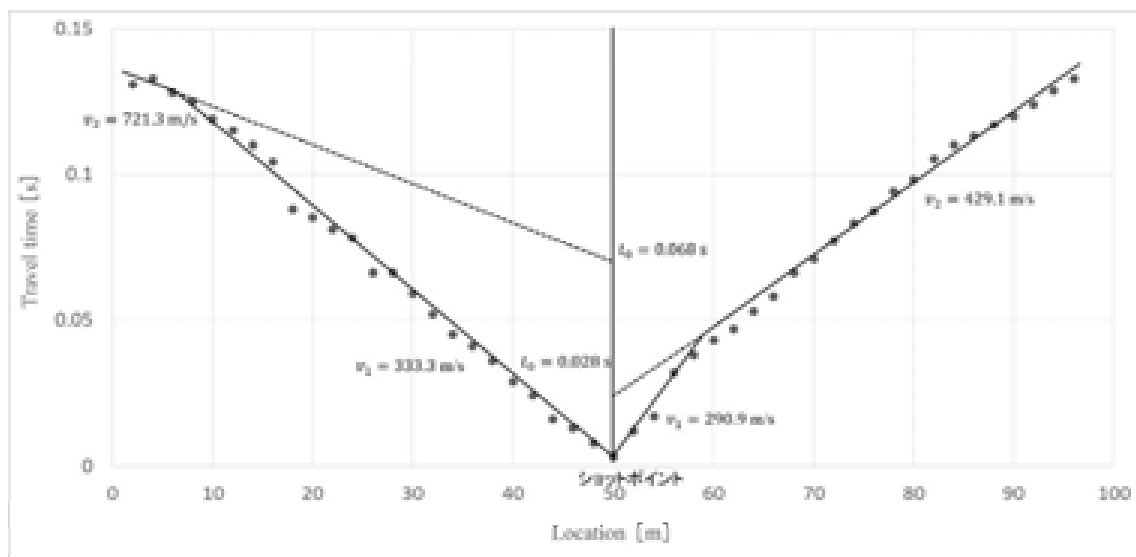


図 24. ショットポイント 50 m 地点における走時曲線

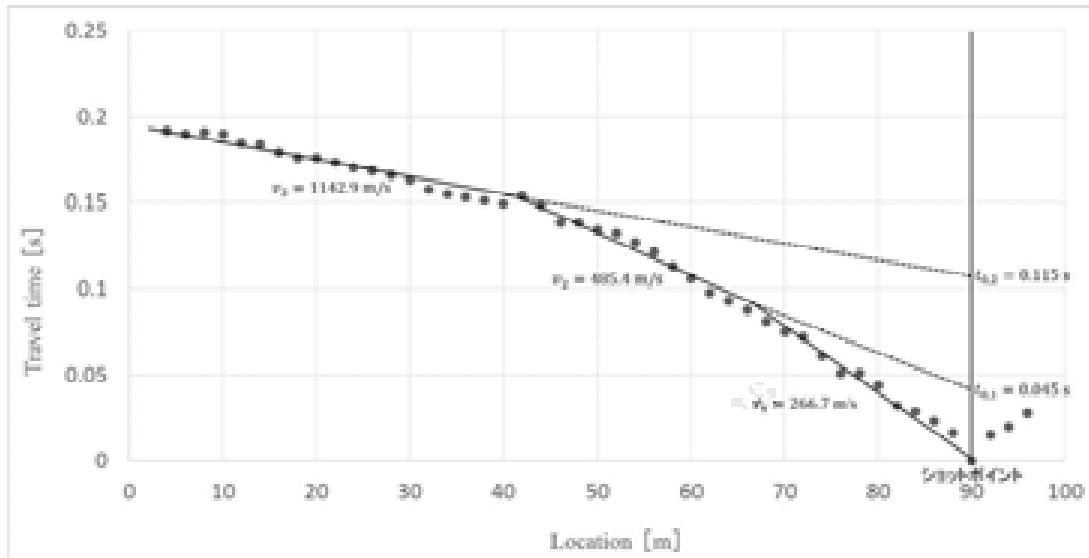


図 25. ショットポイント 90 m 地点における走時曲線

#### 副測線 (OPT-A – OPT-B 間)

OPT-A – OPT-B 間を結ぶ測線を副測線と呼ぶことにする。主測線とは異なり、副測線では OPT-A 点付近の受振器(ch.49)、OPT-B 点付近の受振器(ch.36)の間を一定間隔でショットしていき、それぞれ ch. 49 と ch. 36 で走時を観測した。このような観測法を Common Receiver 方式と呼ぶことがある。ちなみにある場所で行われた発振を多数の受振器で観測する主測線の観測法を Common Shot という。

副測線上のショットは基本的に 2m 間隔で行ったが、OPT-A 点から 7m 地点は、光センサを繋いでいる光ファイバが地中に埋めてあったため、実際には 7.5m 地点にずらして行った。

副測線における共通受振点記録を図 26～27 に示す。それぞれの初動よみとり値を表 3 に示す。表 3 から作成した走時曲線を図 28 のように示す。ここで、Location は OPT-A 点からの距離であり、OPT-A 点から 18 m の地点に OPT-B 点がある。

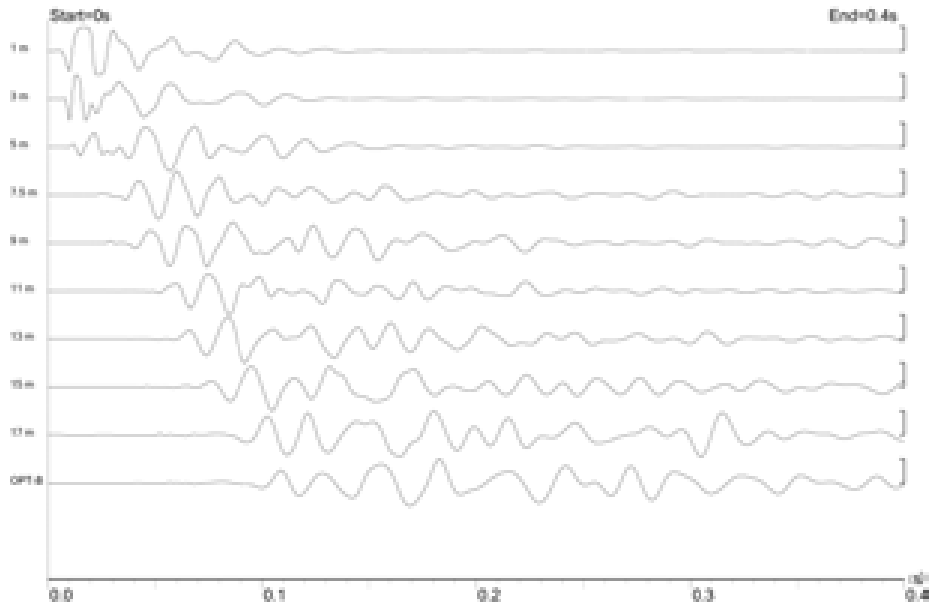


図 26. 副測線 OPT-A 点における共通受振点記録

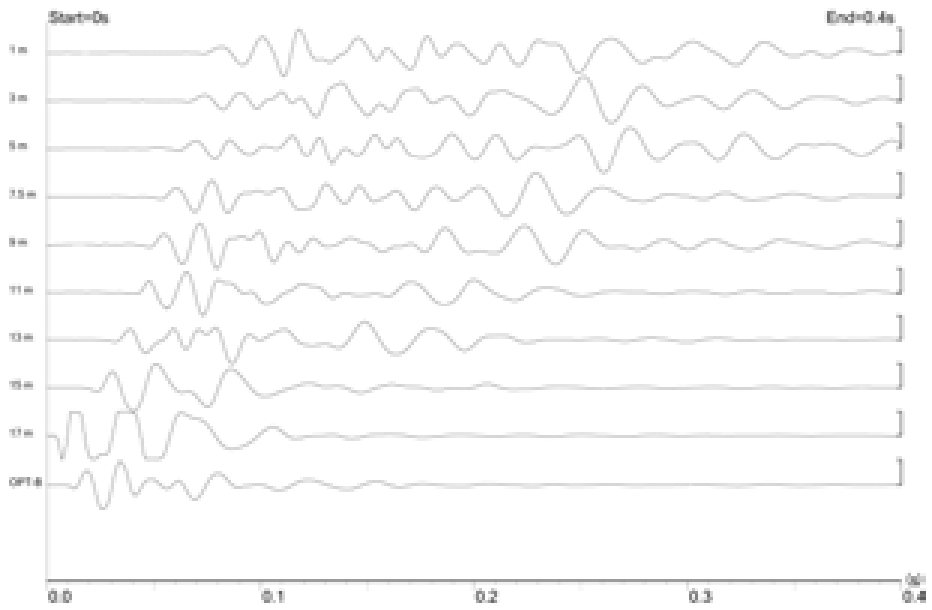


図 27. 副測線 OPT-B 点における共通受振点記録

表 3. 副測線初動よみとり値

Shot location	OPT-A 点, 49ch (s)	OPT-B 点, 36ch (s)
OPT-A 点から 1 m	0.004	0.069
OPT-A 点から 3 m	0.008	0.061
OPT-A 点から 5 m	0.009	0.055
OPT-A 点から 7.5 m	0.028	0.048
OPT-A 点から 9 m	0.038	0.042
OPT-A 点から 11 m	0.048	0.037
OPT-A 点から 13 m	0.054	0.028
OPT-A 点から 15 m	0.064	0.017
OPT-A 点から 17 m	0.069	0.001
OPT-B 点から 1 m (OPT-A 点から 19 m)	0.069	0.009

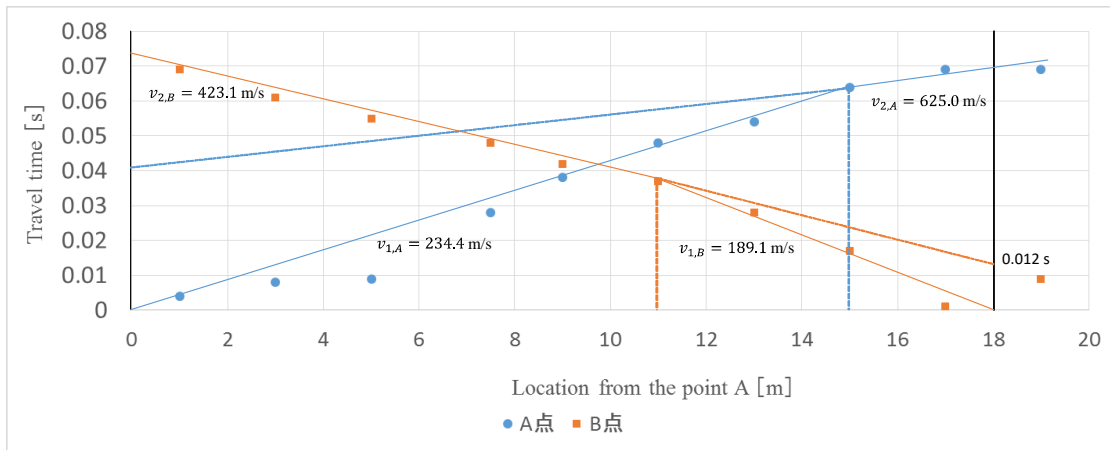


図 28. OPT-A - OPT-B 間の走時曲線

観測縦坑底地震計との走時差

副測線近傍, OPT-A 点から 5 m 地点までの区間の側方には東京大学地震研究所の観測縦坑があり, 縦坑底の深さ 26 m に地震計が設置されている. それぞれの光センサ近傍のショットを, その直近の光センサで観測した波形と, 東京大学地震研究所から提供された近傍の観測縦坑底で観測された波形 (AVO 地震計) とを図 29 ~ 34 に示す.

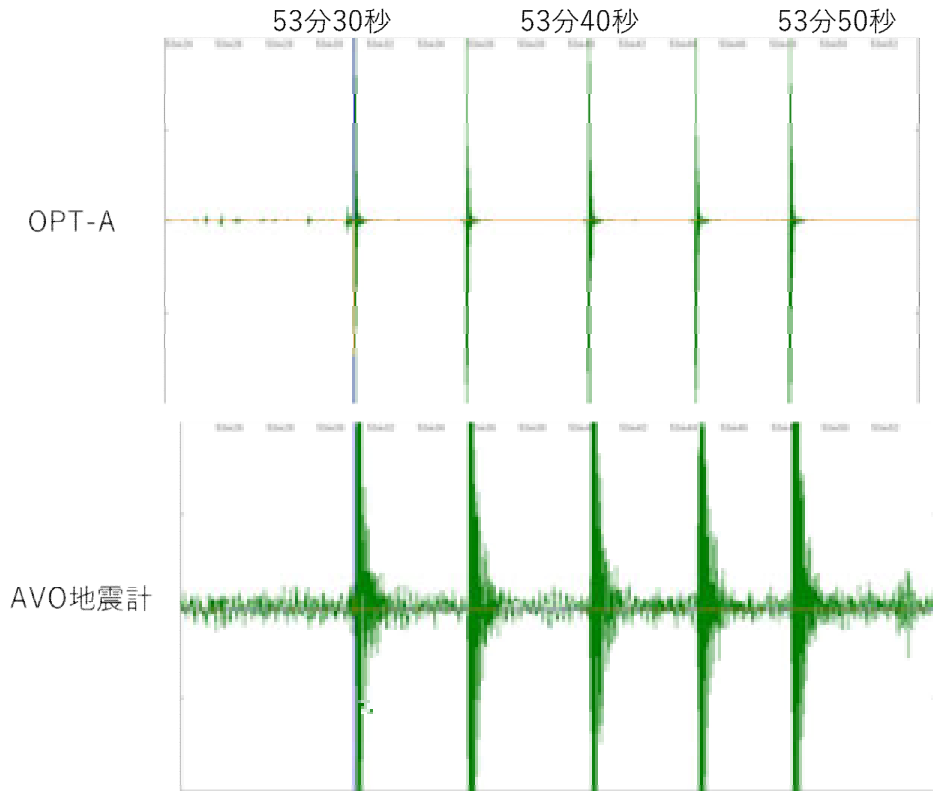


図 29. OPT-A 点ショット地震波形

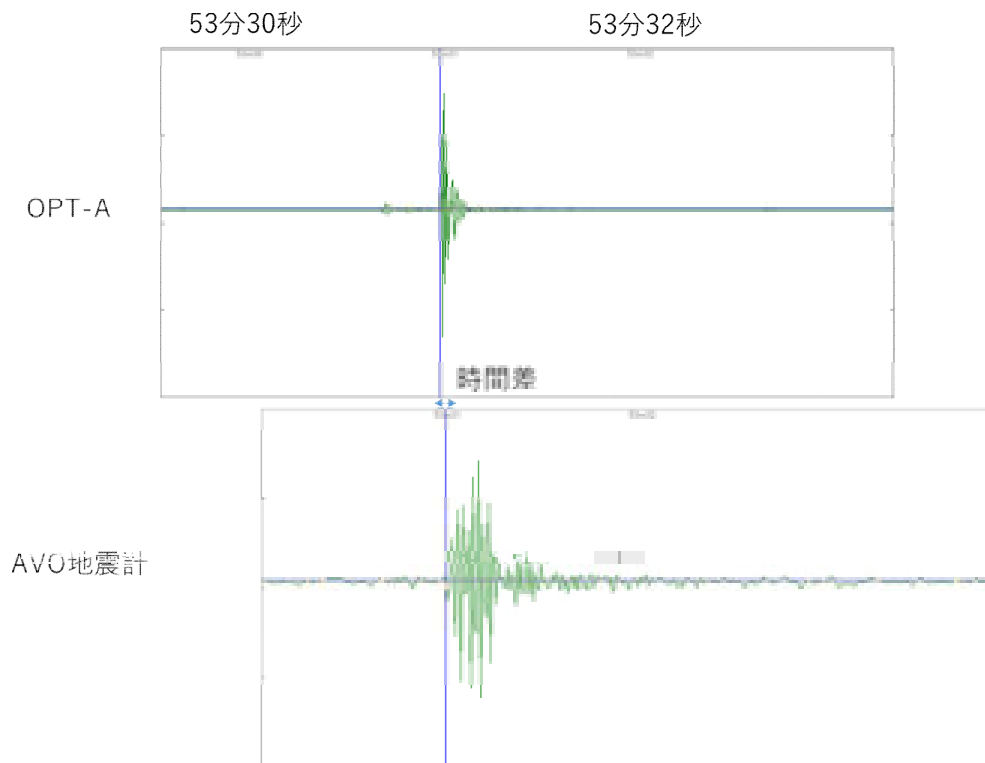


図 30. OPT-A 点ショット地震波形(拡大)

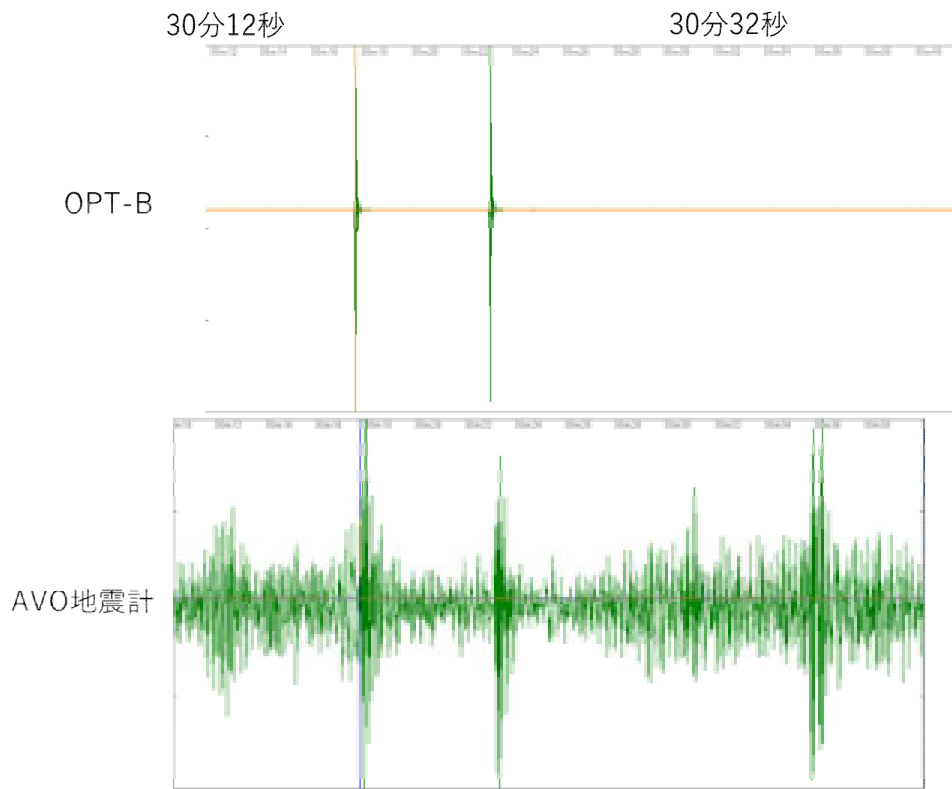


図 31. OPT-B 点ショット地震波形

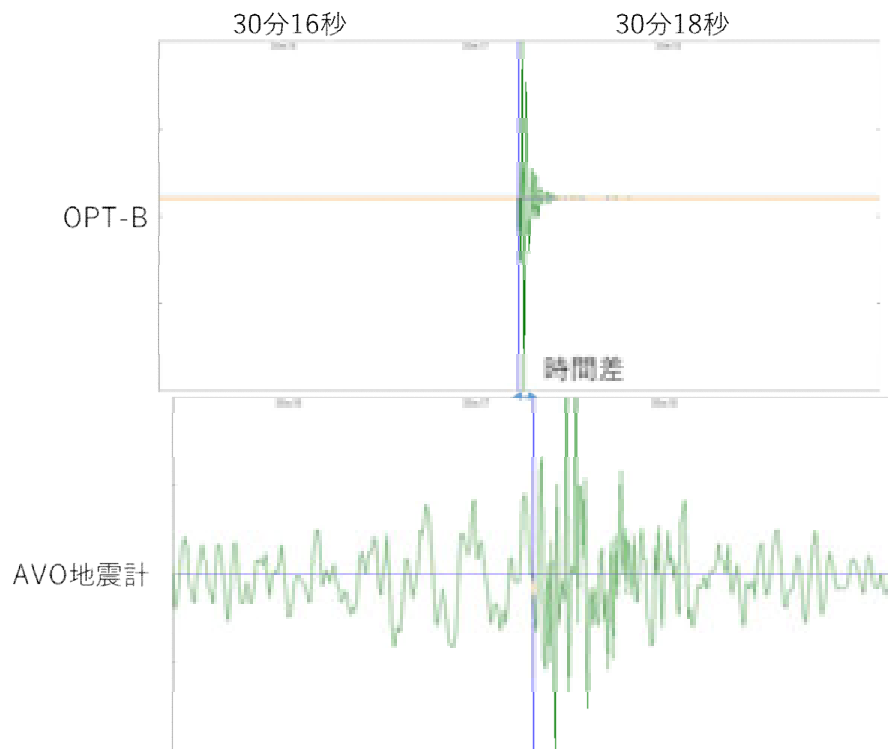


図 32. OPT-B 点ショット地震波形(拡大)



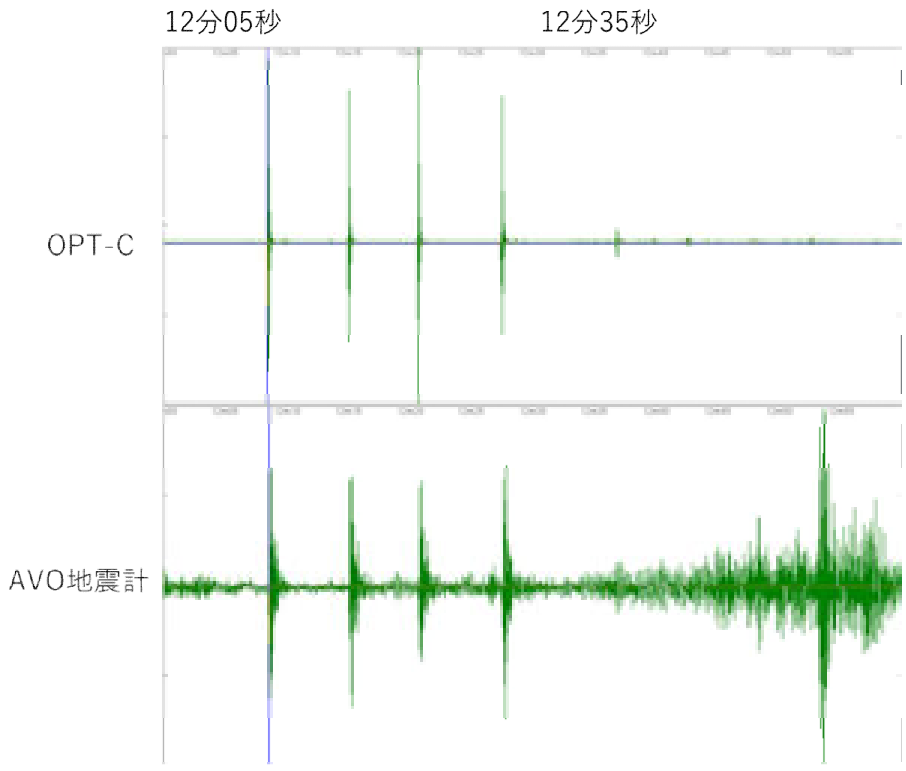


図 33. OPT-C 点ショット地震波形

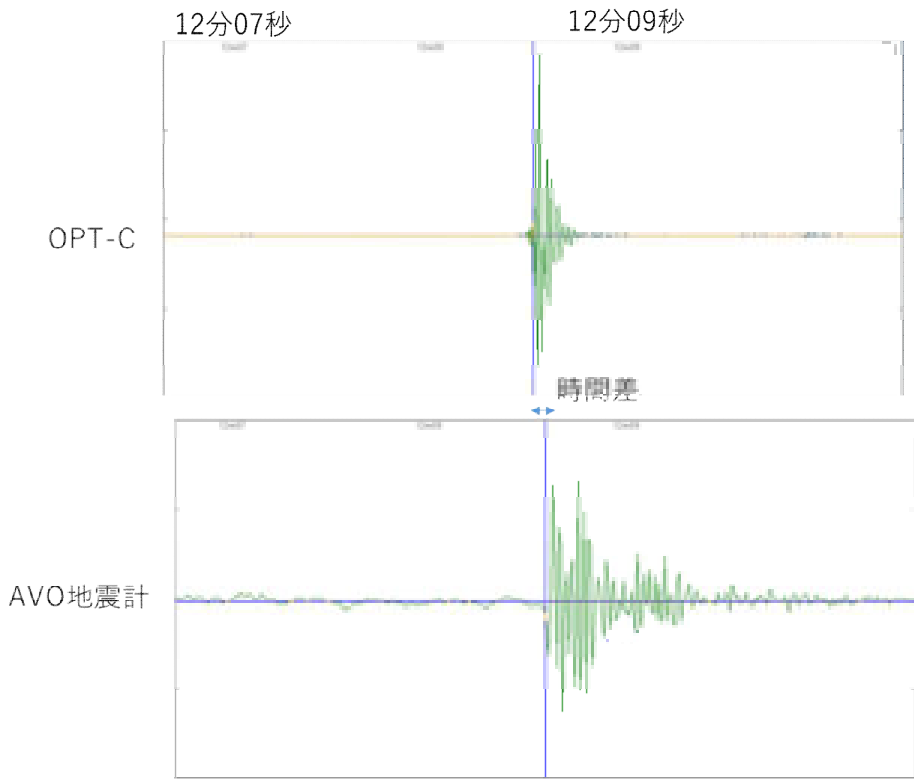


図 34. OPT-C 点ショット(拡大)

## 表層構造調査

表層構造調査の主測線で得られたデータに屈折法解析と反射法解析を施した。屈折法解析では RAYFRACT (Intelligent Resources Inc. 製) を解析に用いた。RAYFRACT は Wavepath Eikonal Traveltime (WET) 逆解析 (文献 12) によって地下構造の推定を行う屈折法地震探査の解析ソフトである。反射法解析には Seismic Un\*x (文献 13) を用いた。

## 屈折法解析

RAYFRACT を用いて初動走時の逆解析を行った。RAYFRACT では 2 つの異なる初期モデルを生成して、それぞれを WET 逆解析に与えて結果を比較することができる。1 つめの初期モデルの与え方は WET tomography と称し、DeltatV inversion (文献 14) による初動走時の 1 次元逆解析結果をそのまま後続の WET inversion に与える方法である。もう一つは Smooth inversion と称し、DeltatV inversion の結果を測線方向に平均化した水平構造を WET inversion に与える方法である。

まず WET inversion について述べる。WET tomography の解析にはグリッドサイズ 0.17m を使用した。

WET tomography を行った結果を図 35 ~ 37 に示す。ここで図 35 は DeltatV inversion の結果を示し、WET inversion に用いる初期モデルを表す。図 36 は WET inversion の走時計算に用いた実際に波が通った経路の分布密度を表す。色が明るいところほど多くの波が通り、信頼度の高いところであることを示す。図 37 は、WET inversion を行った結果である。

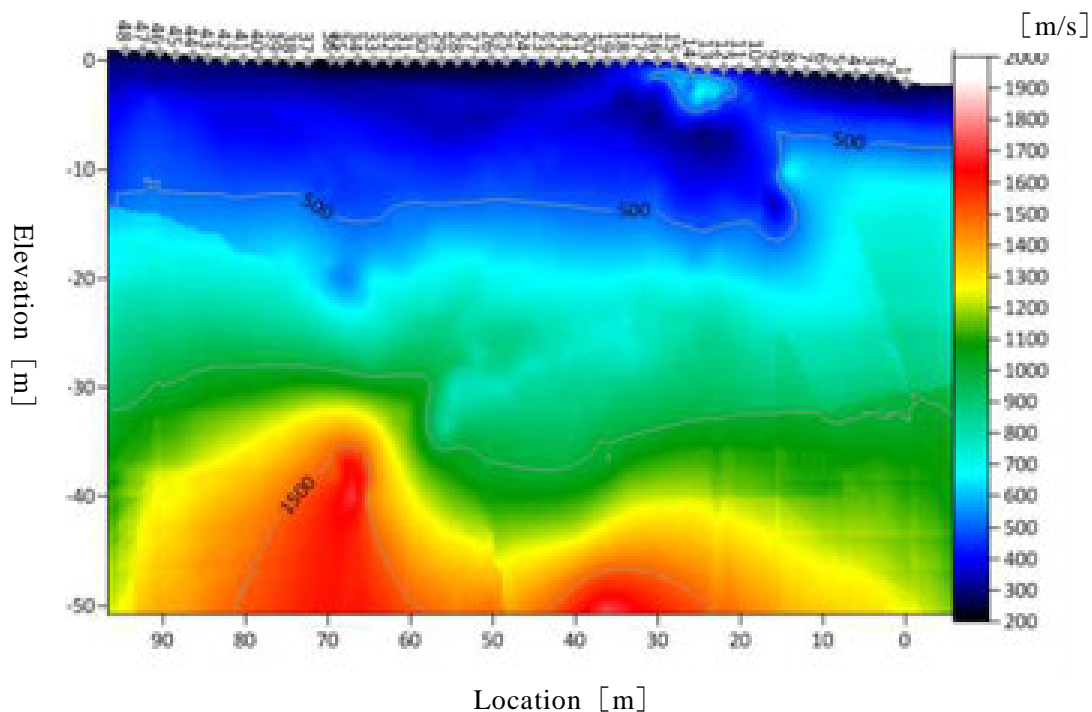


図 35. DeltatV inversion の結果

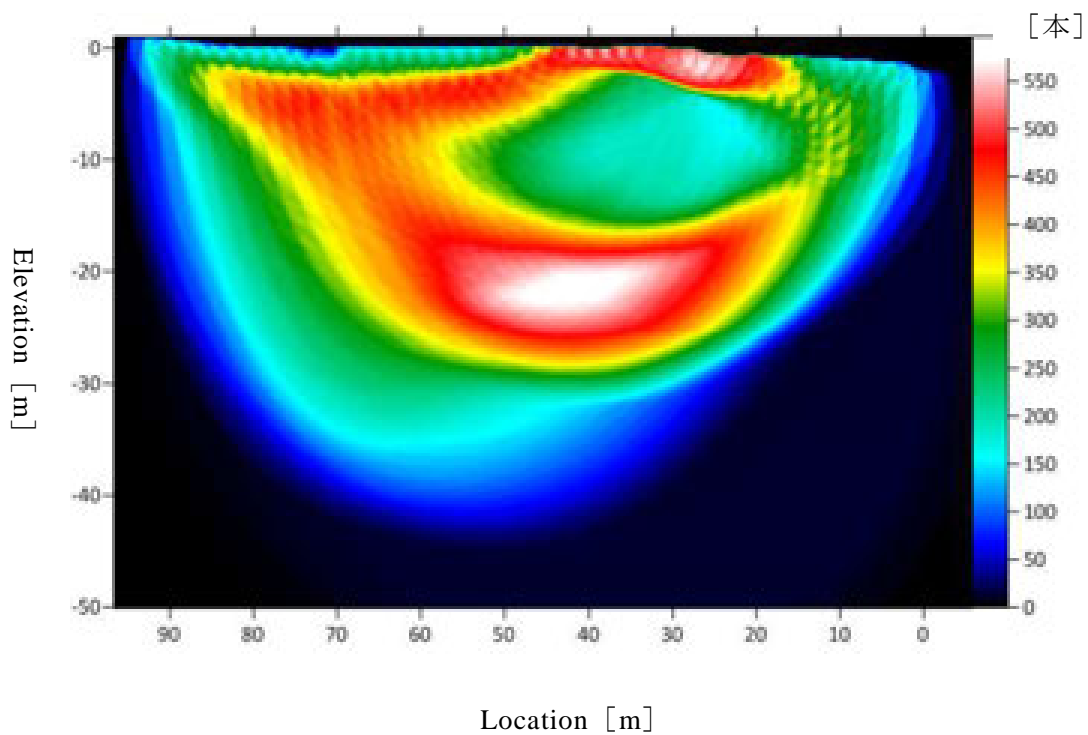


図 36. WET inversion における波線経路の本数分布

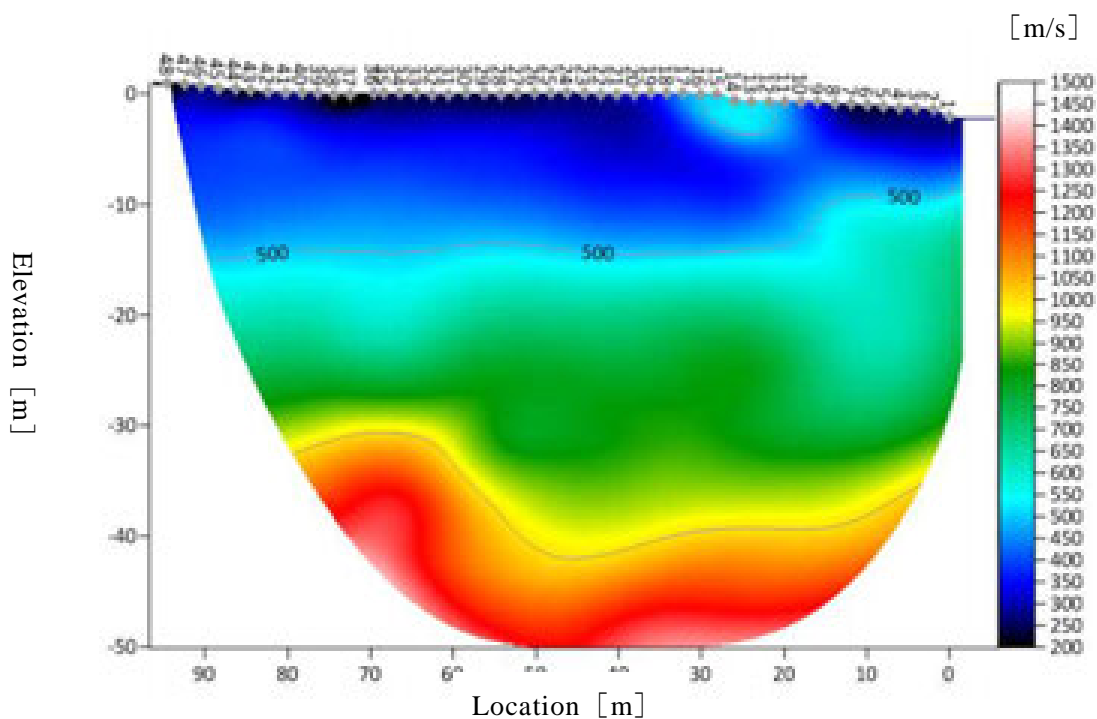


図 37 WET inversion の結果

次に Smooth inversion について述べる. Smooth inversion の解析にもグリッドサイズ 0.17 m を使用した.

Smooth inversion を行った結果を図 38 ~ 40 に示す. ここで図 38 は WET inversion に与えた初期モデル, 図 39 は波の通った経路の分布, 図 40 は逆解析結果を表す.

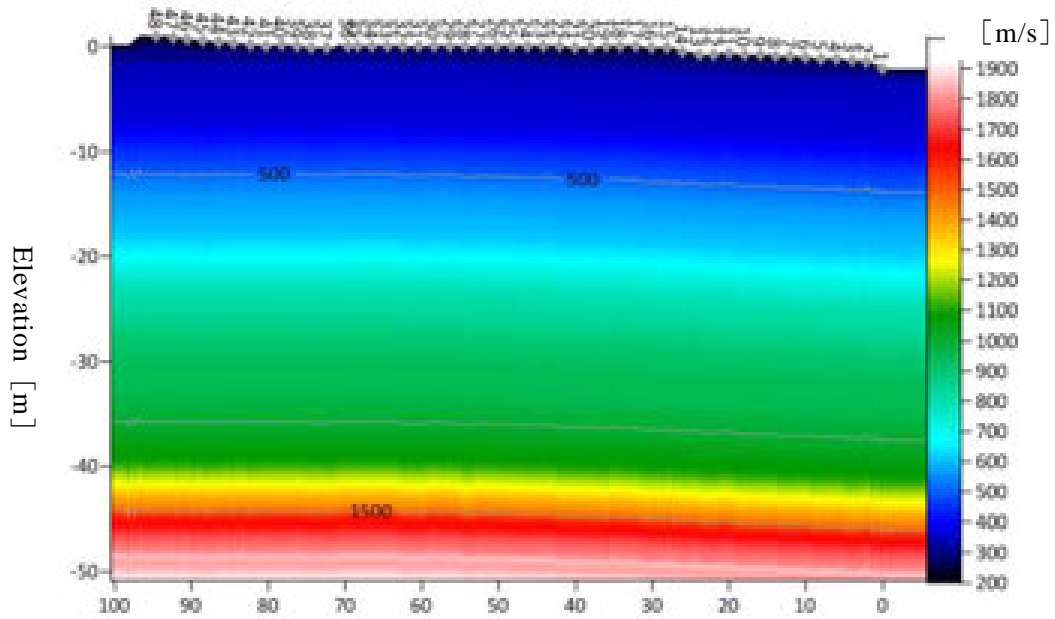


図 38. Smooth inversion の初期モデル

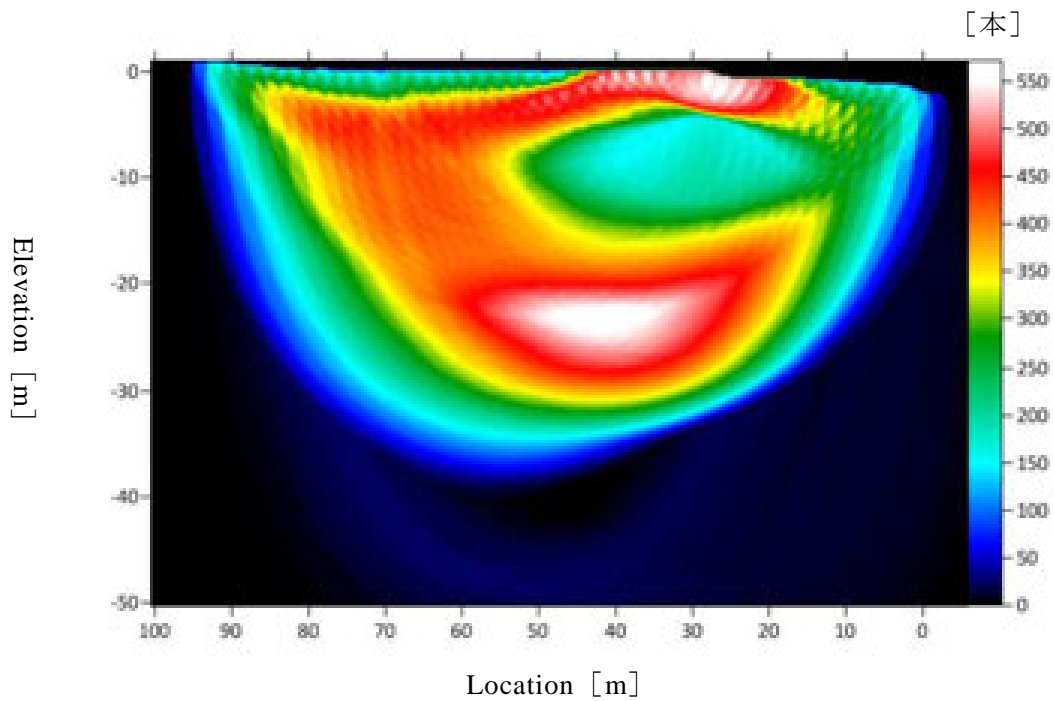


図 39. Smooth inversion における波線経路の本数分布

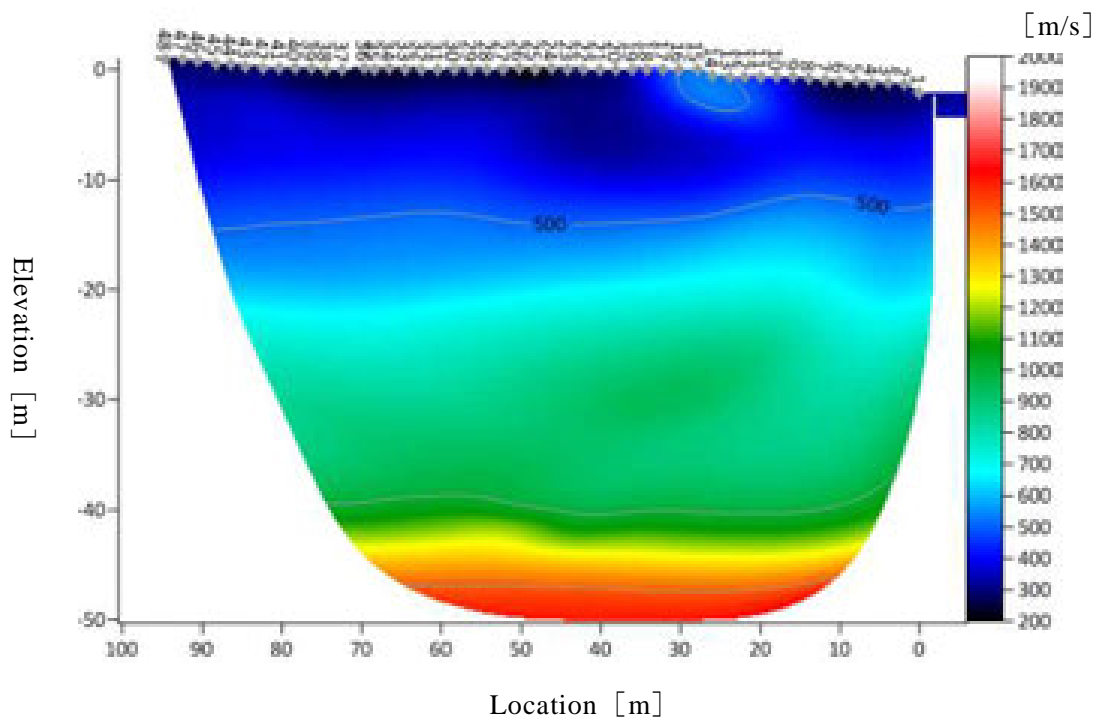


図 40. Smooth inversion の結果

RAYFRACT を用いて逆解析を行った結果、いずれの手法でもおおよそ水平成層構造をしており、20 ~ 30 m 地点の地表付近に薄い高速の部分が存在していることが示された。一方、WET tomography の結果と Smooth inversion の結果とで異なる部分は波線の通過本数が少ない場所に対応している。波線通過本数が多い場所は、どちらの手法でも解析結果は一致している。

各地点 (0 m, 50 m, 90 m) における速度プロファイルを図 41 に示す。

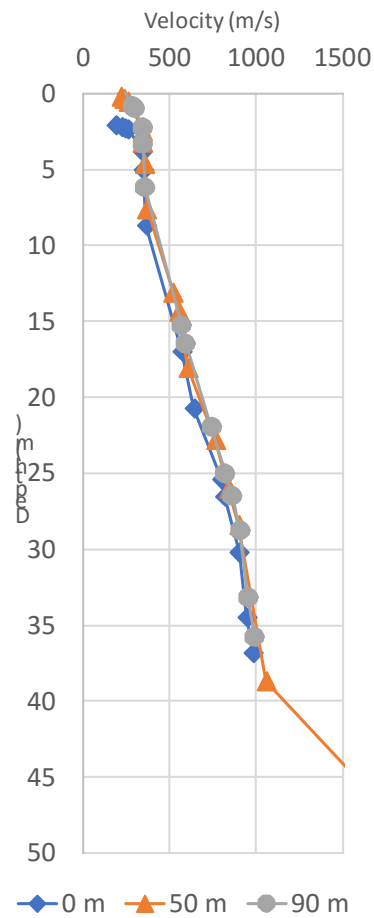


図 41. 速度プロファイル

図 41 には次のような速度構造の特徴が示されている。深さ 5 ~ 10 m にわたり速度のほぼ一定な層があることと、深さ約 10 m 以降は速度勾配をもつこと、深さ 20 m 付近に速度勾配の変化する場所のあることである。すなわち、速度の様子が大きく変化している場所は深さ 5 m, 10 m, 20 m 付近であることがわかる。

#### 反射法解析

反射法解析の処理を以下の順に行った。処理内容は基本的な反射法地震探査のデータ処理法である。

1. フォーマット変換
2. 帯域フィルタ処理 (fc, fl, fh, fc = 10, 20, 60, 120 Hz)
3. 予測デコンボリューション処理 (予測距離 0.01 s, 演算子長 0.03 秒)
4. 初動ミュート処理
5. CMP ソート
6. 速度解析
7. NMO 補正

## 8. f-k マイグレーション

## 9. 深度変換

最初に、今回の探査で取得した波形データ (SEG-2 型式) を解析用フォーマット (su 型式) に変換した。su フォーマット変換直後の波形記録例を図 42 に示す。以下、ショットポイント 74m 地点における結果を示す。

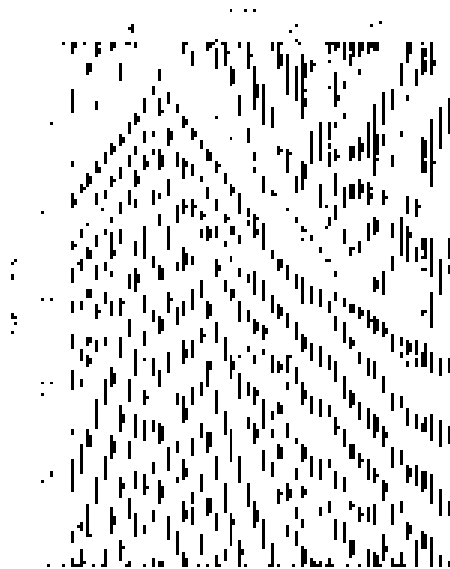


図 42. フォーマット変換直後の波形

帯域フィルタ処理を行う前に、得られた波形記録のどの周波数に地震波のエネルギーが集中しているか確認するためにフーリエ変換を行った。その結果を図 43 に示す。

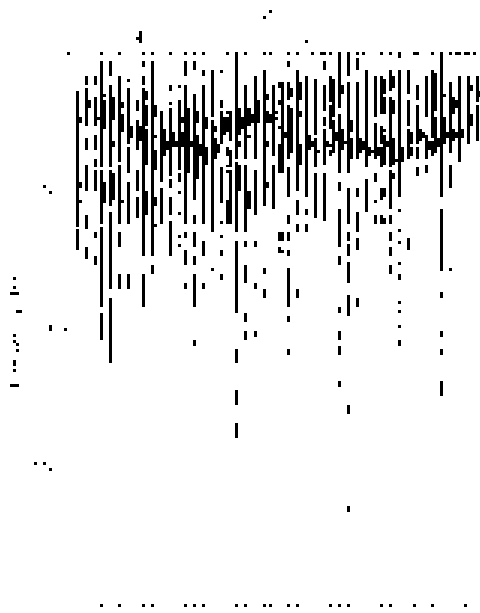


図 43 . フーリエ変換結果

次に予測距離を 0.01 秒，演算子長を 0.03 秒として予測デコンボリューション処理を行った．予測デコンボリューション処理をした結果の例を図 44 に示す．

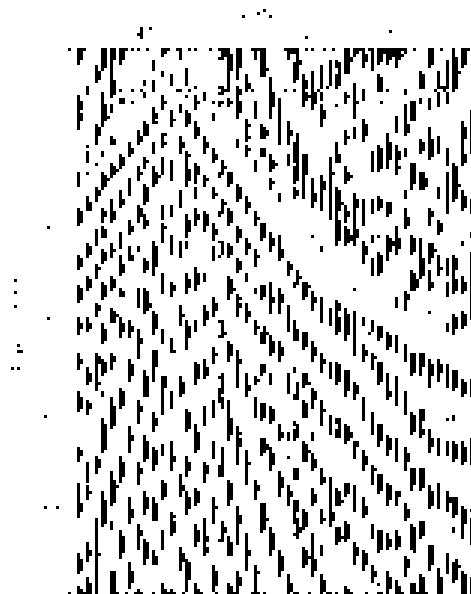


図 44. 予測デコンボリューション後の波形

初動ミュート処理後の波形を，それぞれの CMP ごとに並べ替え，CMP ギャザーを作成した．これ以降，CMP ギャザーを用いて解析を行う．図 45 に CMP ソートした結果の例を示す．これ以降では CMP 番号 27 における結果を示す．図中横軸の cdpt は，同一の CMP ギャザー内における通し番号である．





図 45. CMP ソート

CMP 番号 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 の各 CMP において速度解析を行った。速度解析からよみとった往復走時  $t$  (s) と平均速度  $v$  (m/s) は以下のようなになる。また往復走時と平均速度の関係を図 46 に示す。なおここでは処理プログラムの都合上、図中の表示では距離の単位に cm を用いている

- CMP20  
 $t = 0.095$  s,  $v = 430$  m/s, depth = 20.4 m
- CMP30  
 $t = 0.160$  s,  $v = 450$  m/s, depth = 36.0 m
- CMP40  
 $t = 0.131$  s,  $v = 470$  m/s, depth = 30.8 m
- CMP50  
 $t = 0.111$  s,  $v = 430$  m/s, depth = 23.9 m  
 $t = 0.144$  s,  $v = 480$  m/s, depth = 34.6 m
- CMP60  
 $t = 0.089$  s,  $v = 420$  m/s, depth = 18.7 m  
 $t = 0.137$  s,  $v = 497$  m/s, depth = 34.0 m
- CMP70  
 $t = 0.091$  s,  $v = 450$  m/s, depth = 18.2 m
- CMP80  
 $t = 0.130$  s,  $v = 401$  m/s, depth = 26.1 m

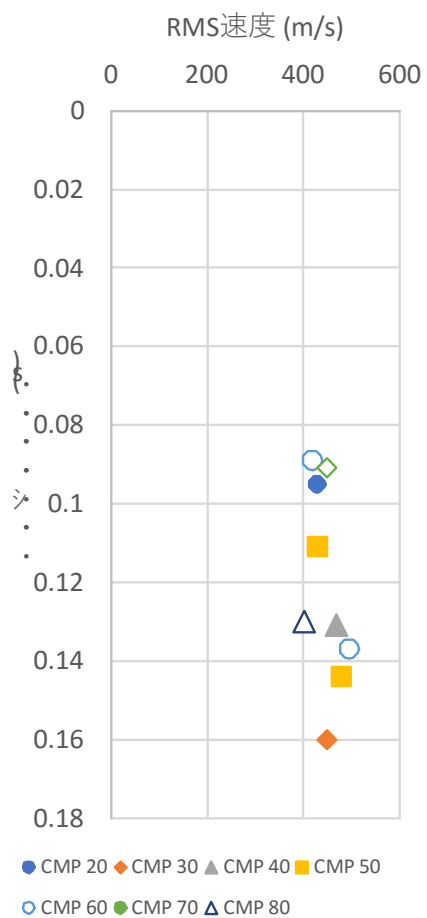


図 46. 速度解析結果

また、よみとりに用いた速度スペクトル図のうち、CMP 番号 50 のものを図 47 に例として示す。平均速度と往復走時をよみとった位置を○で囲っている。

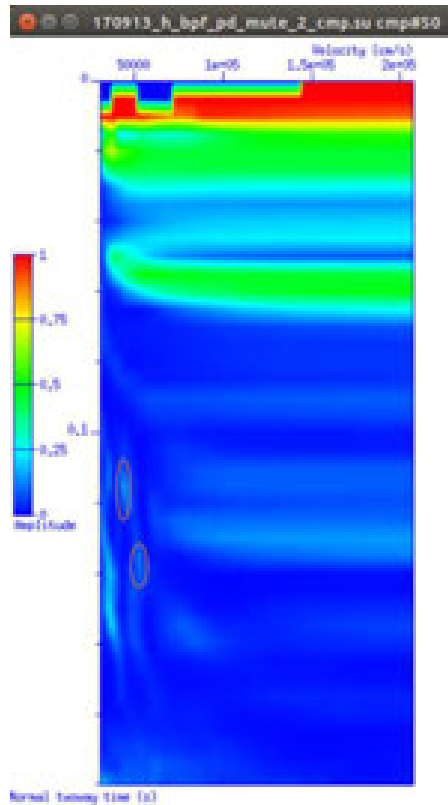


図 47. 速度スペクトル図(CMP 番号 50)

速度解析で求めた往復走時と平均速度を用いて、NMO 補正を行った結果を図 48 に示す。



図 48. NMO 補正後の波形

NMO 補正済みの CMP ギャザーをスタックして時間断面を作成し、さらに f-k マイグレーション (文献 15) を行った結果を図 50 に示す。ここで使用した速度関数は CMP 番号 40 における速度解析で求めた値である。

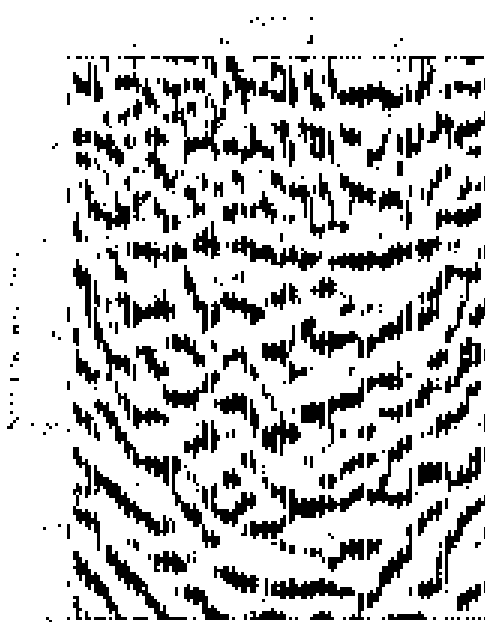


図 50. 時間断面 (f-k マイグレーション処理後)

f-k マイグレーション処理後の波形 (図 50) を深度変換した結果を図 51 に示す.

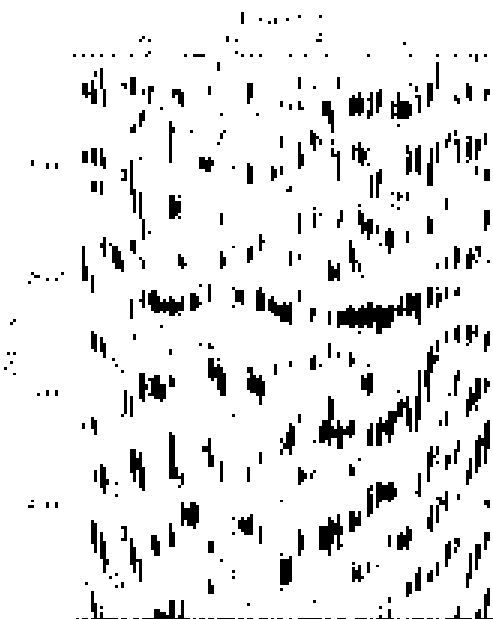


図 51. 深度断面

図 51 から、深さ 5m 付近と深さ 20m 付近に明瞭な反射面が存在していることが示された.

## 表層構造調査結果

表層構造調査結果を図 52 に示す。

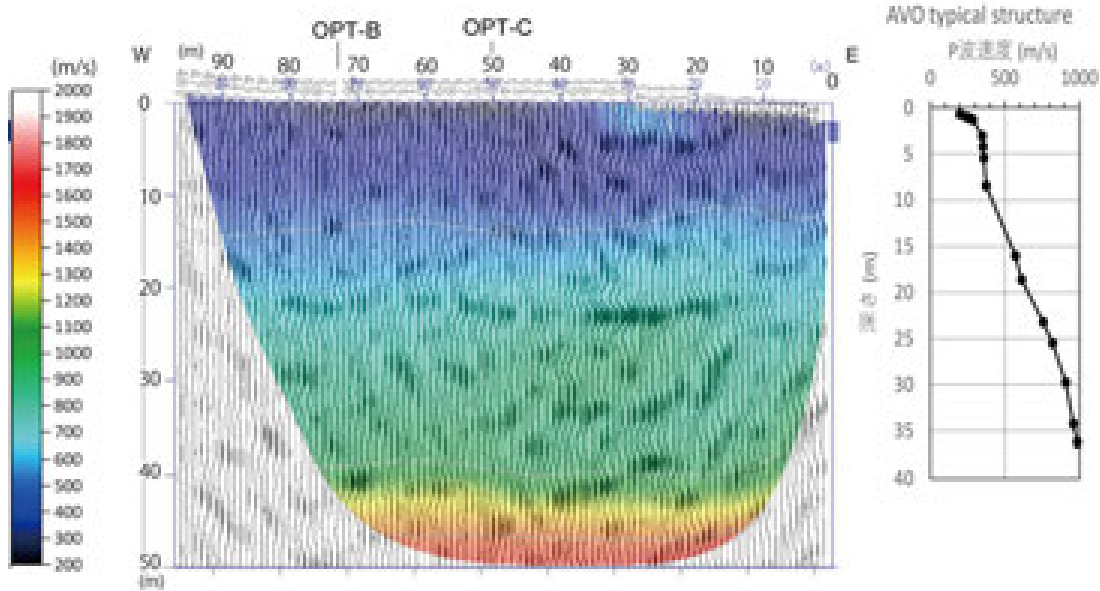


図 52. 解析結果のまとめ

図 52 は、RAYFRACT の Smooth inversion の解析結果に反射法解析の結果を重ねたものである。両解析結果とも測線方向にほぼ均一なほぼ水平な構造であることを示している。図 52 右側に示す屈折法解析結果の平均速度プロファイルで深さ約 20 m の速度勾配の変わる箇所と、左側の反射法解析における明瞭な反射面の位置はほぼ一致している。深さ約 20 m の反射面は速度の値そのものの不連続によるものでなく、むしろ密度の不連続面を表している可能性がある。

### 観測縦坑底地震計との走時差

OPT-A 点近傍の縦坑の深さ 26 m に設置している東京大学地震研究所の地震計(以下 AVO 地震計と称する)と地表の OPT-A 点におけるショットの初動到達時刻を表 4 に示す。また、同じように OPT-B 点、OPT-C 点ショットも表 5、表 6 に示す。

表 4. OPT-A 点と AVO 地震計の初動到達時刻と平均速度

光センサ OPT-A 到来時 刻 (時:分:秒)	AVO 地震計時 刻 (時:分:秒)	時間差 (秒)	平均速度 (m/s)
7:53:30.977	7:53:30.990	0.013	2000
7:53:35.419	7:53:35.430	0.011	2363
7:53:40.274	7:53:40.280	0.006	4333
7:53:44.511	7:53:44.520	0.009	2888
7:53:48.258	7:53:48.260	0.007	3714
7:53:56.298	7:53:56.310	0.012	2166
			平均:2690

表 5. OPT-B 点と AVO 地震計の初動到達時刻と平均速度

光センサ OPT-B 到来時 刻 (時:分:秒)	AVO 地震計時 刻 (時:分:秒)	時間差 (秒)	平均速度 (m/s)
7:11:55.769	7:11:55.830	0.061	426
7:12:08.525	7:12:08.590	0.065	400
7:12:15.041	7:12:15.100	0.059	441
7:12:20.696	7:12:20.760	0.064	406
7:12:27.552	7:12:27.610	0.058	448
			平均:423

表 6. OPT-C 点と AVO 地震計の初動到達時刻と平均速度

光センサ OPT-C 到来時 刻 (時:分:秒)	AVO 地震計時 刻 (時:分:秒)	時間差 (秒)	平均速度 (m/s)
7:30:17.228	7:30:17.300	0.072	361
7:30:22.580	7:30:22.660	0.08	325
7:30:52.719	7:30:52.780	0.061	426
7:31:45.628	7:31:45.700	0.072	361
7:31:50.407	7:31:50.470	0.063	412
			平均:374

表 4 から, OPT-A 点から深さ 26 m までの平均速度は 2690m/s で, OPT-B 点(表 5), OPT-C 点(表 6)のそれと比べて明らかに速くなっている. この結果は, 図 28 で OPT-A 点付近に存在している高速度部分と整合がとれている. 一方, OPT-B 点, OPT-C 点ショットにおいて平均速度は約 400 m/s となり, RAYFRACT の結果求められた速度構造と整合がとれ

ている。

以上のことから、光センサ各点における走時補正值を求めると表7のようになる。表7の値はOPT-B点を基準とした場合に走時に加算されるべき補正值である。表中の垂直平均走時は、P波が各点の平均速度で深さ26mから地表まで垂直に伝播した場合の走時の平均値を示す。

表7. 光センサ各点の走時補正值

光センサ観測点	平均速度 (m/s)	垂直平均走時 (s)	走時補正值 (s)
OPT-A	2690	0.010	0.051
OPT-B	423	0.061	0.000
OPT-B	374	0.070	-0.009

#### 考察

主測線20～30m区間と副測線OPT-Aの地表付近に存在する高速度部分

主測線20～30m区間の高速度部分はほぼ地表に沿って現れているので、この高速度部分に対応する地表の特徴を探ることとする。この区間の地表付近を写真2に示す。



写真2. 主測線20～30m区間の地表の状況（白山工業提供：2017年12月5日）

写真2でわかるように20～30m区間の受振器はコンクリート擁壁の側方1m以内に設置されていた。地表に現れている部分の高さは約70cmであった。このコンクリートの擁

壁の横方向の広がりには RAYFRACT の結果の高速度部が存在している部分と一致している。また、高速度が存在している深さが約 3 m である。地表面から約 70 cm の高さのコンクリート擁壁が深いところまで続いているとは考えにくい。さらに観測で用いられた受振器は単体では下方の地面の境界面からの地震波と側方のコンクリート擁壁からの地震波を弁別することができない。さらに、図 52 から高速度が存在している場所に明瞭な反射面がみえている。この部分の反射面は、地表面においてコンクリート擁壁がある部分にしかみえていない。これらのことから RAYFRACT の結果における 20 ~ 30 m 地点の高速度部と反射法解析における深さ 3 m 付近の明瞭な反射面は、いずれも測線側方に存在するコンクリート擁壁の影響であると考えられる。

副測線上にも観測点近傍の人工物が観測に同様な影響を与えている場所が存在している。図 53 に副測線の初動走時曲線を示す。

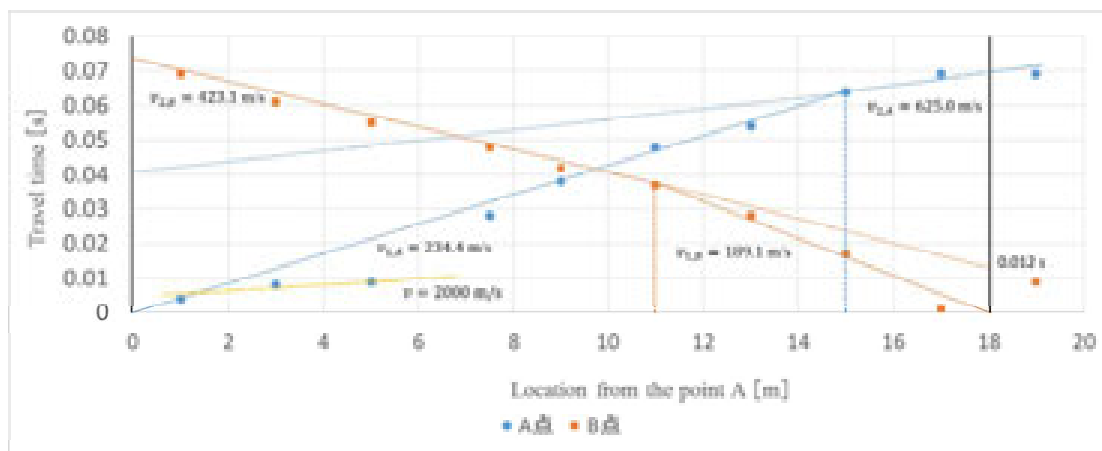


図 53. 副測線の初動走時曲線 A 点は OPT-A 点における発振を、B 点は OPT-B 点における発振を示す。

予備的な情報をもたずに図 53 を見た場合、一様傾斜 2 層構造の走時曲線として解釈することが可能である。しかし RAYFRACT による解析の結果として、観測所構内の主測線では横方向にほぼ一様な速度構造を示していることが明らかにされている。このような主測線の構造の特徴を考慮すると図 53 の走時曲線を単純に一様傾斜構造と解釈することは正しくなく、主測線 20~30 m 区間と同様に副測線では OPT-A 側の地表付近に高速度体が存在している可能性を考えてもよい。このような考察の後にあらためて図 53 の 3m, 5m 地点の区間 (OPT-A 点近傍) に注目すると、2000 m/s の見かけ速度を示している。対応する区間の地表付近を写真 3 に示す。



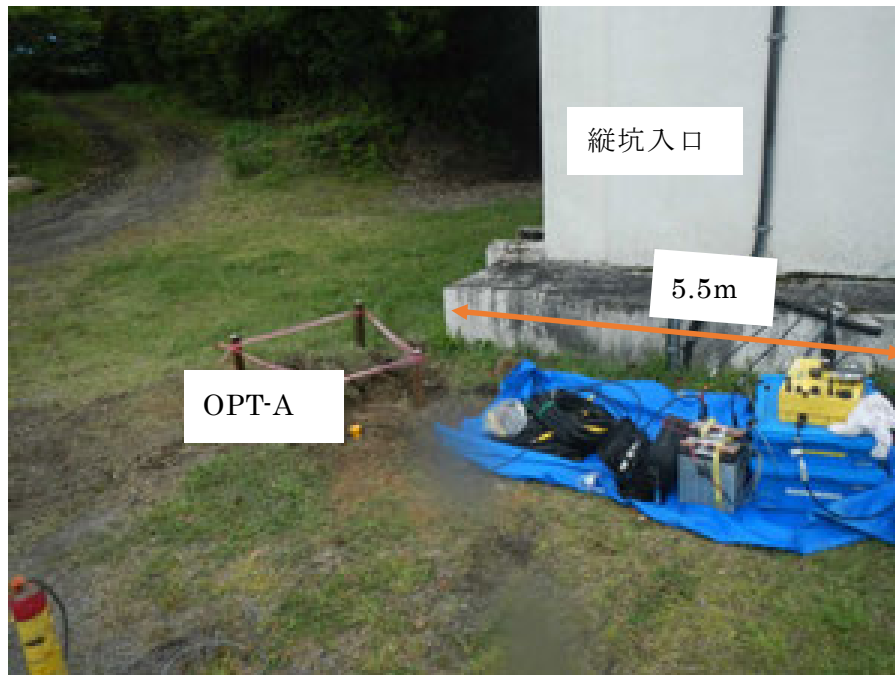


写真 3. OPT-A 点付近

写真 3 に示されるように OPT-A 点近傍に縦坑および付随するコンクリート建造物「縦坑入口」が存在していた。縦坑入口の犬走りの長さは 5.5 m であった。東京大学地震研究所 (1982) で示される設計図より、この縦坑は深さ 26m、直径 5.5m、周りを 75cm の鉄筋コンクリートで覆われている。鉄筋コンクリートは一般に 3000 から 4000 m/s で軽石より速い地震波速度を示すことから、OPT-A 点付近の高速部分はその速度の点からも縦坑関連構造物の鉄筋コンクリートの影響を受けていると考えられる。

#### 主測線深さ 20m 付近の明瞭な反射面

一方、AVO 構内の地下に広がる深さ 20m の明瞭な反射面はその深さと広がりから人工物の影響とは考えにくい。AVO は活火山である浅間火山の東山麓にあり、火山噴出物が厚く堆積している場所である。

過去の浅間火山の噴火による噴出物の堆積厚を推定する。1.8 m の厚さの天明 3 年の噴火による軽石(As-A)層を AVO 構内で実際に露頭として見る事ができた。As-A の AVO 構内における相対的な厚さを 1 として、AVO の位置における文献 16 による各テフラの層厚を As-A のそれと比較することで、各テフラの AVO における概略の堆積厚を推定した。また表 8 にこれらの主要なテフラがどの時代に噴出したか示す。

表 8. 浅間火山の主要テフラ

テフラ名	記号	年代
浅間 A(天明)	As-A	1783(天明 3)年
浅間 B(天仁)	As-B	1108(天仁元)年
浅間 C	As-C	4 世紀中葉
浅間草津	As-K	15000 年前から 16500 年前
浅間板鼻黄色	As-YP	15000 年前から 16500 年前
浅間白糸	As-Sr	15000 年前から 20000 年前

文献 16 からそれぞれの噴火におけるテフラの堆積厚をよみとった結果とともに、また、AVO における火山噴出物の堆積厚の推定値も表 9 に示す。

表 9. 層の厚さの推定値

テフラ名	よみとり値 [cm 以上]	天明の噴火と の比率	推定値 [m]	
As-A	25	1	1.8(AVO 構内露頭における実際の値)	
As-B	25	1	1.8	
As-C	15	0.6	1.1	
As-K	50	2	3.6	
As-YP	50	2	3.6	
As-Sr	50	2	3.6	
			合計	15.5

上記の考察から浅間火山観測所における火山噴出物の層の厚さの推定値は約 15.5m となった。ここに観測所構内の露頭の最上部における土の層の厚さ 0.4m を足すと約 15.9m になる。観測所構内の露頭のようにそれぞれの噴火による噴出物の間に土の層が含まれる可能性があることや、浅間火山は他にも噴火を起こしていることを考慮すると軽石層の厚さは少なくとも 15.9m はあると考えられる。

一方、文献 17 の電気探査の結果より、浅間観測所付近の地下 87m まで軽石流堆積物とされている。このことから先述の推定はもっともらしいと考えられ、さらに今回の探査で明らかにされた 50m 付近までの地下構造はすべて軽石流堆積物であると考えられる。本研究で明らかになった明瞭な地震波反射面は深さ 20m 付近にあるので小浅間噴火などによる軽石流（浅間白糸軽石層）の中の反射面と考えられる。

#### c) センサ検定

1 回目(2017 年 9 月 13 日)のセンサ検定作業で得られた波形記録を図 54 ~ 56 に示す。

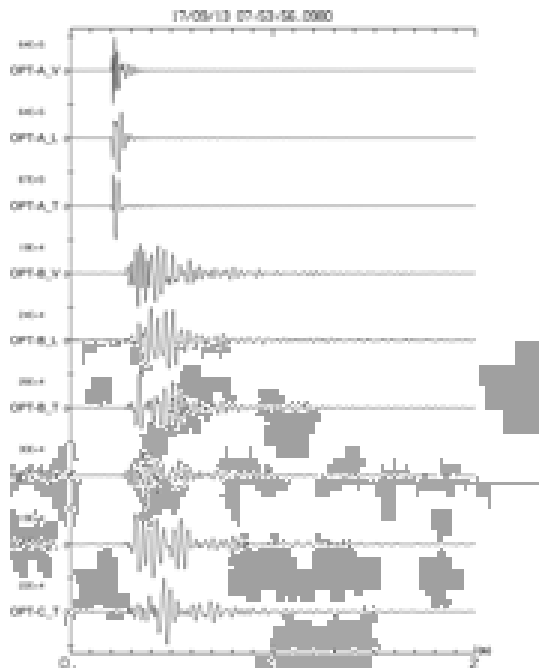


図 54. OPT-A 点近傍発震の記録. 記録左端のラベルは V: 上下動成分, L: 水平動火口方向成分, T: 水平動直交成分を示す. 数値の単位は gal である

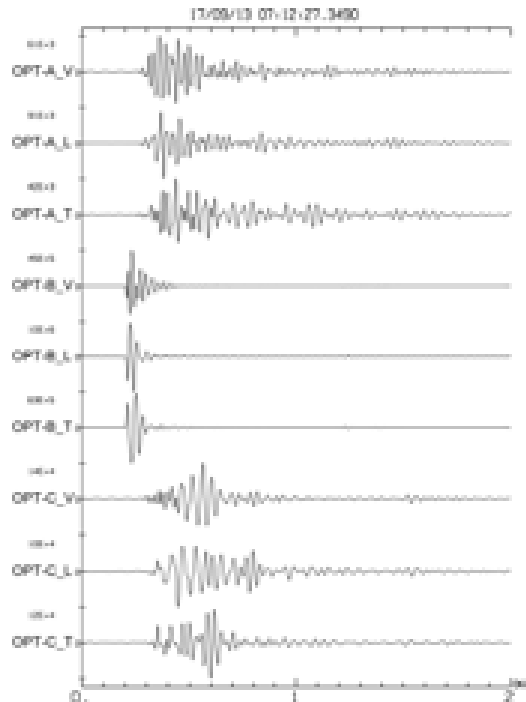


図 55. OPT-B 点近傍発震の記録. 記録左端のラベルおよび数値の表記は図 54 と同じである.

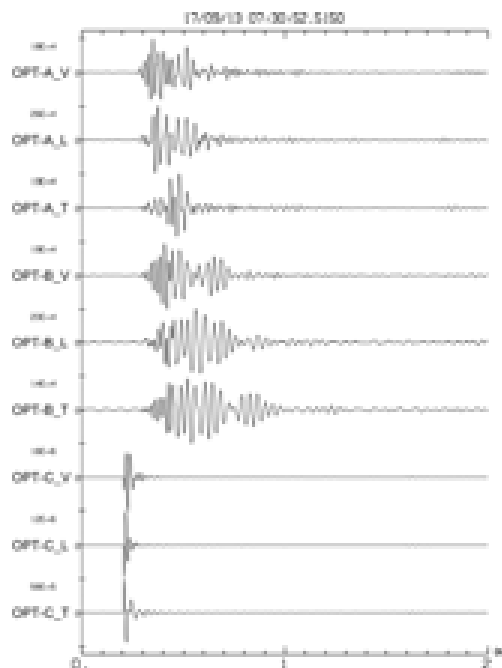


図 56 . OPT-C 点近傍発震の記録  
記録左端のラベルおよび数値の表記は図 54 と同じである.

いずれの波形記録も震源近傍では短い継続時間を示すが、離れた観測点では継続時間が延びていることと、顕著な後続相が現れていることが注目される。

第一回検定作業発震記録の時刻読み取り結果を表 10 に示す。

表 10. 初動読み取り結果. V 成分の大振幅の立ち上がりを初動として読み取った. 下線は発震時刻を表す.

	OPT-A Arrival	OPT-B Arrival	OPT-C Arrival
Shot OPT-A 1	<u>07:53:44.511</u>	07:53:44.576	07:53:44.570
Shot OPT-A 2	<u>07:53:48.257</u>	07:53:48.319	07:53:48.320
Shot OPT-A 3	<u>07:53:56.298</u>	07:53:56.369	07:53:56.358
Shot OPT-B 1	07:12:08.583	<u>07:12:08.525</u>	07:12:08.605
Shot OPT-B 2	07:12:15.099	<u>07:12:15.041</u>	07:12:15.121
Shot OPT-B 3	07:12:20.756	<u>07:12:20.696</u>	07:12:20.776
Shot OPT-B 4	07:12:27.611	<u>07:12:27.549</u>	07:12:27.632
Shot OPT-C 1	07:30:17.294	07:30:17.309	<u>07:30:17.228</u>
Shot OPT-C 2	07:30:22.648	07:30:22.656	<u>07:30:22.580</u>
Shot OPT-C 3	07:30:52.786	07:30:52.797	<u>07:30:52.715</u>

初動読み取り結果から、各光センサ間の平均走時は下記のように算出される。

OPT-A - OPT-B 間 (18 m) : 0.066 秒

OPT-A - OPT-C 間 (19 m) : 0.061 秒

OPT-B - OPT-C 間 (23 m) : 0.081 秒

上記結果から算出される光センサ間の平均速度を下記に示す。

OPT-A - OPT-B 間 (18 m) : 290 m/s

OPT-A - OPT-C 間 (19 m) : 300 m/s

OPT-B - OPT-C 間 (23 m) : 280 m/s

上記結果は別項の浅層地震探査で得られた地表付近の P 波速度の傾向と一致している。

動作検定で得られた波形データ (2 回目)

光センサ撤収直前に実施された 2 回目の動作検定作業で得られた波形記録を図 57 ~ 59 に示す。図の表記および表示方法は 1 回目の動作検定作業のそれと同じである。

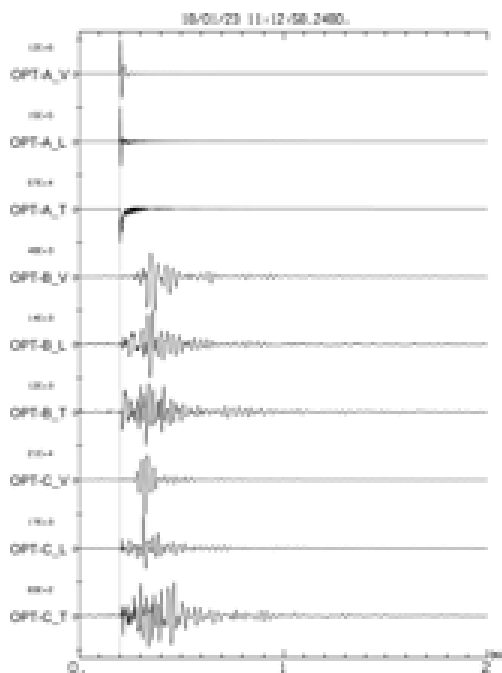


図 57. OPT-A 点近傍発震の記録. 読み取られた発震時を垂直な縦線で示す.

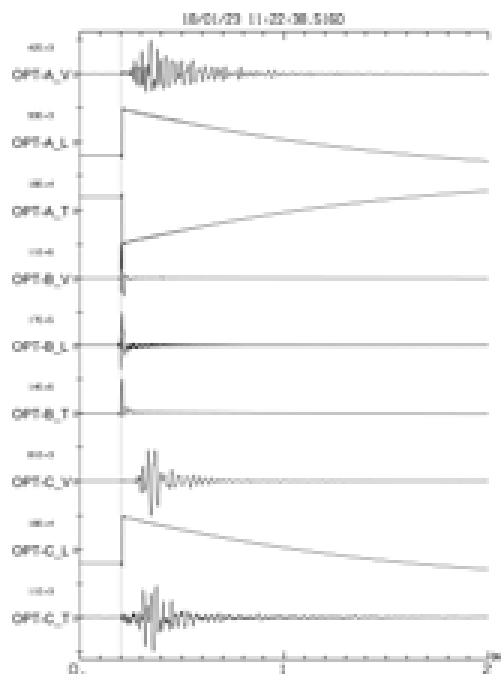


図 58. OPT-B 点近傍発震の記録. 読み取られた発震時を垂直な縦線で示す.

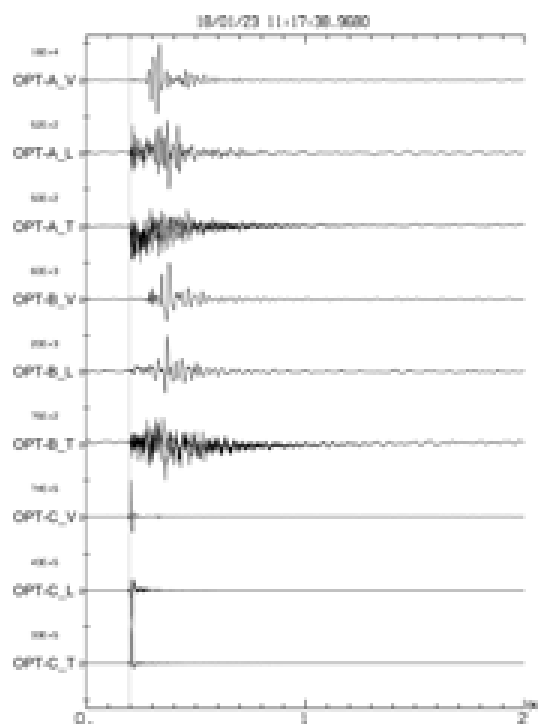


図 59. OPT-C 点近傍発震の記録. 読み取られた発震時を垂直な縦線で示す.

まず V 成分で注目されることは、図 60 に示されるように震源近傍波形の継続時間が 1 回目のそれより  $1/3 \sim 1/5$  に短くなっていることであることと、図 61 に示されるように遠

方の観測点における波形の継続時間も短く，1回目に見られたような顕著な後続相の到来が見られないことである。さらにいずれの観測記録図 K4～K6 でも L および T 成分の初動到来時刻が発振時刻にほぼ一致し，異常に早いことが認められる。V 成分では L 成分および T 成分に見られるような異常に早い到来相は顕著ではない。

以降では記録の見かけが比較的正常な V 成分を中心に述べることにする。なお，光センサシステムでは先述のように 1 月 7 日に不具合の発生が認識されて観測が停止しており，そのままの状態では検定作業前日に再起動を行った。

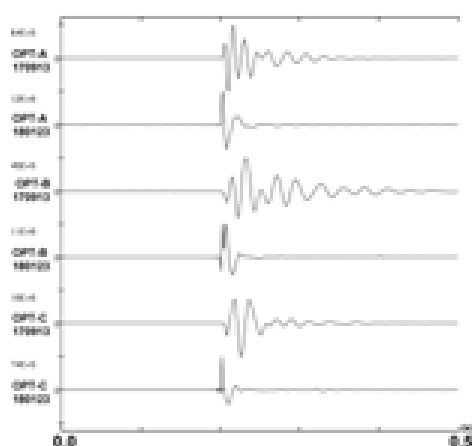


図 60. 震源近傍波形の比較

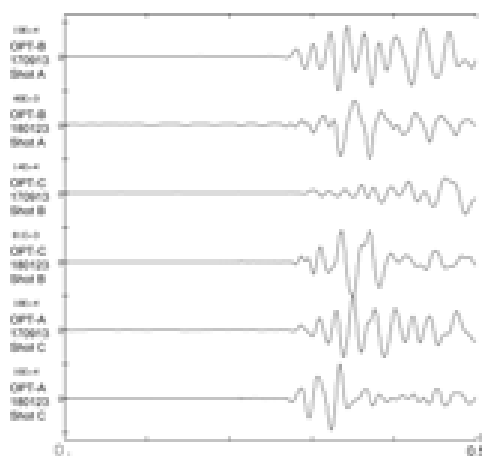


図 61. 遠方波形の比較

下表 11 に 2 回目検定作業の初動到来時刻読み取り結果を示す。

表 11. 2 回目検定作業初動読み取り結果. V 成分の大振幅の立ち上がりを初動として読み取った。下線は発振時刻を表す。

	OPT-A arrival	OPT-B arrival	OPT-C arrival
Shot OPT-A 1	<u>11:12:25.818</u>	11:12:25.880	11:12:25.880
Shot OPT-A 2	<u>11:12:44.934</u>	11:12:44.996	11:12:44.998
Shot OPT-A 3	<u>11:12:52.724</u>	11:12:52.787	11:12:52.788
Shot OPT-A 4	<u>11:12:58.448</u>	11:12:58.510	11:12:58.512
Shot OPT-B 1	11:22:27.104	<u>11:22:27.045</u>	11:22:27.120
Shot OPT-B 2	11:22:34.803	<u>11:22:34.772</u>	11:22:34.849
Shot OPT-B 3	11:22:38.770	<u>11:22:38.716</u>	11:22:38.792
Shot OPT-C 1	11:17:25.616	11:17:25.627	<u>11:17:25.547</u>
Shot OPT-C 2	11:17:32.630	11:17:32.642	<u>11:17:32.563</u>
Shot OPT-C 3	11:17:39.337	11:17:39.447	<u>11:17:39.168</u>

初動読み取り結果から、各光センサ間の平均走時は下記のように算出される。

OPT-A - OPT-B 間 (18 m) : 0.062 秒

OPT-A - OPT-C 間 (19 m) : 0.064 秒

OPT-B - OPT-C 間 (23 m) : 0.076 秒

上記結果から算出される光センサ間の平均速度を下記に示す。

OPT-A - OPT-B 間 (18 m) : 270 m/s

OPT-A - OPT-C 間 (19 m) : 310 m/s

OPT-B - OPT-C 間 (23 m) : 280 m/s

上記結果は第一回目の検定作業で得られた結果に対して系統的な差異は認められない。初動走時解析で得られるスケールでの地震波速度構造の変化は検出されなかった。

## 考察

### 2 回目の震源近傍波形の継続時間が短い現象

2018 年 1 月に実施された第二回目の検定作業の震源近傍波形は、2017 年 9 月に実施された第一回目の検定作業で得られたそれに比べて、1 回目のそれより 1/3~1/5 に短くなっている。この現象を説明するものとして 2 つの仮説が挙げられる。

1) 2 回目の検定作業時のほうが 1 回目当時に比べて打撃が作用する時間がより短くなった、

2) 2 回目の検定作業時には震源近傍観測点のセンサ内蔵の振り子が凍結固着していて正常な運動をしなかった。

一つ目の仮説を支持する証拠がある。写真 4 にそれぞれの検定作業当時の地表面の写真を示す。2 回目の検定作業時には打撃を加える地表面が硬く凍結していた (写真 4b)。これに対して 1 回目の検定作業時には地面が凍結していなかった。1 回目の検定作業時にはかけやによる打撃にともなって地面が塑性変形して打撃痕を形成していたが、2 回目の検定作業時には打撃による地面の変形はなかった。このことから 2 回目の検定作業では打撃の瞬間に地面が弾性的に振る舞っており、塑性変形する場合に比べて打撃にともなう力積の作用時間が短かったことが推察される。震源波形継続時間の短縮に伴い、遠方波形の継続時間も短縮したと考えられる。



(a) 2017/9/13



(b) 2018/1/23

写真 4. 検定作業時の地面の状況

二つ目の仮説は直接否定される根拠はない。今年度用いた光センサにはセンサ振り子のみを直接に強制的運動させる機構が備わっていないために、センサ出力信号から振り子の動きを間接的に推測せざるを得ない。光信号系が正しく働いているものとして以下の議論を進める。震源近傍波形における発震後 0.1 秒間の RMS 平均振幅を表 12 に示す。

表 12. 震源近傍波形の発震後 0.1 秒間の RMS 振幅平均値

	1 回目 検 定 (2017/9/13) (gal <sup>2</sup> )	2 回目 検 定 (2018/1/23) (gal <sup>2</sup> )
Shot A - OPT-A	$0.152 \times 10^7$	$0.158 \times 10^7$
Shot B - OPT-B	$0.157 \times 10^7$	$0.124 \times 10^7$
Shot C - OPT-C	$0.371 \times 10^7$	$0.781 \times 10^6$

表 11 では 1 回目検定と 2 回目検定との RMS 平均振幅の差は大きくても 4.75 倍 (OPT-C) であることを示しており、OPT-A と OPT-B では約 20%の差である。1 回目検定と 2 回目検定とではかけや担当者が異なっていたので個人差とも考えられる。もしセンサ振り子が凍結していた場合には振幅が 10 倍以上異なるはずなので、V 成分に関してはセンサ振り子の凍結はなかったと考えられる。

一方、水平動成分に関しては一部に凍結していたものがある可能性も考えられる。図 54～56 に示される L および T 成分では、いずれの場合も V 成分とほぼ同じオーダーの振幅を示している。しかし、2 回目の検定の図 57～59 に示される L および T 成分は全般的に V 成分よりも振幅が小さくなる傾向があり、中には OPT-A の T 成分のように最大振幅が約 30 倍も異なっているものがある。

以上の考察から、一つ目の仮説は検定実施時の状況から支持されうるものであるが、二つ目の仮説は V 成分のみに関して間接的な証拠から否定しうると考えられる。センサ振り子を直接強制的に運動させる機構があれば、L 成分及び T 成分についても二つ目の仮説の



検証ができるはずである。

## 2 回目の検定において L および T 成分の初動到来が異常に早い現象

図 57～59 において L および T 成分の初動到来が異常に早い現象を指摘した。この現象の原因については次の仮説が考えられる。

- 1) 消光比の低下によるチャンネル間の干渉,
- 2) 地表の凍結によって地表の P 波速度が増大している,

1 番目の仮説について検証してみる。文献 1 に示される「位相シフト光パルス干渉法」では、各センサからの光パルスが重ならない限り、チャンネル間混信は起こらないはずである。光センサシステムの正常な動作では光パルスが Off の状態では干渉しないように、Off 時の光電力をできるだけ抑える必要がある。したがってチャンネル間混信を起こさないためには、連続光からそれぞれのチャンネルに対応する光パルスを発生させるインテンスィティモジュレータの出力における ON/OFF 比（消光比）が 100 万倍以上であることが要求される。今回の観測では、1 月 7 日にバイアス電圧を調整しても（インテンスィティモジュレータの）消光比が正常にならず、また検定前日の 1 月 2 2 日の再起動後も消光比が小さい状態での観測であった。

光パルスの分離が十分でないときにはセンサ以外から生ずる寄生信号も抑圧されない。文献 18 に光ファイバに作用する環境要因、応力、温度等の変化によって光ファイバ内部の光路長および偏光方向に変化を生じ、干渉距離測定時に偽の信号を生ずることが報告されている。したがって今回の検定作業のように至近距離でかけやを打つなどの著しく強い振動を入力した場合、ファイバの振動による側圧による偏波状態の変化による寄生信号が発生すると考えられる。消光比が十分に大きい場合には寄生信号が抑圧されるが、消光比が小さい場合にはこのようなファイバの様々な部分で発生した環境応答が寄生信号として重畳した光パルスと、本来のセンサ信号光パルスとの干渉により、偽の信号が発生すると考えられる。

さらに波形の立ち上がりがすべてのチャンネルで同時に観測されることは、つぎのように説明できる。振り子以外の感度による Off 信号への重畳信号は、次のセンサに、時分割タイムスロットの 4 つ分 (200ns) の遅延時間で伝搬するため、1kHz サンプリング記録では、ほぼ同時に信号が観測されたように見える。

以上のように、2 回目の検定作業時のように光パルスの消光比が小さかった場合には、ショットポイント近傍の伝送系路上の光ファイバにかかる応力に由来する寄生信号が相対的に大きくなって本来のセンサからの信号と干渉していると考えられ、一つ目の仮説が支持される。

続いて 2 番目の仮説について検証する。地表が凍結した場合には速度が最大 3.8 km/s（氷の P 波速度）になるはずである（文献 19）。光センサ間の距離は最短のもので 18 m であるので、水平動の初動が P 波によるものとすれば、少なくとも発振から約 5 ms 経ってからセンサが動き始めるはずである。しかし図 57 ～ 59 に示されるように発震と同時に L 成分および T 成分のセンサが動き始めている。この動きを地動がセンサで変換されたものと解釈した場合には伝播速度  $\infty$  を意味しており、既知の氷の地震波速度を超越してしま

う。したがって、二つ目の仮説は否定される。

以上の議論から2回目の検定作業当時は消光比が正常ではなかったことによるチャンネル間混信と光ファイバの応力変化による寄生信号が生じていた可能性が指摘される。さらに、かけや打撃強制振動による検定手法の問題点が以下のように指摘される。打撃点の地面の凍結／非凍結の状態によってかけや打撃による震源波形が変化すること、かけや打撃によって発生した応力擾乱が打撃点近傍の光ファイバ内の寄生信号の発生に寄与する可能性があることである。消光比を大きくとることにより寄生信号を抑えることが可能であるが、消光比が小さくなるとかけや打撃強制振動検定記録には結果的に力学系（つまりセンサ単体）情報と光学系（この場合は伝送経路）情報が弁別困難な状態で含まれてしまう可能性が指摘される。光センサ力学系のみを強制振動させることができれば信号の弁別の困難は軽減されると考える。将来構想として送受信装置の遠方に光センサが配置される運用形態を考慮すると、かけや打撃による検定は今後のすべての場合にかならずしも実施可能な方法ではないため、センサ設置条件に応じて別の方法を考案して実装する必要がある。

### 3) 見学会の実施

今年度も教育コンソーシアムに観測実施予定期間の告知を行った。しかし先方と予定が折り合わなかったため、教育コンソーシアム関係者および参加者の見学の実施に至らなかった。

## (d) 結論ならびに今後の課題

### 1) 結論

今年度は東京大学地震研究所浅間火山観測所構内の地表にセンサを設置して火山観測を行い、浅間山および草津本白根山の火山性地震現象記録の取得に成功した。平成30年1月8日までに観測に成功した浅間山の火山性地震はA型1イベント、B型5イベントで、域外の地震は417イベントであった。また、平成30年1月23日には光センサから約30 km離れた場所で発生した草津本白根山の爆発地震の観測にも成功した。光センサアレイでは到来方向解析とホドグラム解析によってこれらの地震波の到来方向を推定することが可能であった。到来方向解析では地震波の入射方向と振動方向は概ね一致していた。さらに、入射P波の振動方向と見かけ速度の間にも系統的なずれがある傾向が明らかになった。

光センサアレイの解析精度を高めることを目的とした光センサアレイ直下の表層地下構造の調査を行った。今年度光センサを展開した東京大学地震研究所浅間火山観測所構内の深さ50 mまでの地震波速度構造と地震波反射断面を得ることができた。光センサアレイの直下の構造は水平で横方向に概ね一様な構造をしており、主に浅間火山からの降下軽石層からなっている。地表部は300 m/s程度のP波速度を示し、最深部では1000 m/s程度まで深くなるにつれて速度が大きくなっている。しかしながら、深度に対する速度増加率は一定でなく、深さによって異なっていた。これらの速度増加率の変曲点のうち、深さ約20 mの変曲点は地震波反射面を構成している。

さらに地表の工作物とその近傍の地震観測点および光センサに地震学的な走時の乱れを生じる効果が明瞭に観測された。主測線では測線中央部の側方にあるコンクリート擁壁

が長さ 10 m にわたり高速度体として解析結果に表れたほか、副測線では観測点近傍の観測縦坑とそれに関連した工作物が影響を及ぼしていることが明らかになった。

以上のことから、後年度でひきつづき光センサアレイ観測結果のより精密な解析を行うためには観測点ごとの走時補正値を考慮する必要がある。

光センサの検定を目的とした実験では、光センサ観測開始時と光センサ撤収時と 2 回にわたりかけやによる打撃の観測を実施した。第一回目の実験は地面が凍結していない状態で行われ、光センサが正常に動作していることが確認できた。一方、2 回目の実験では光センサを埋設している地面が凍結していた状態で実験が行われた。上下動成分記録では 1 回目と 2 回目との間に系統的な走時の差は見られなかった。また、2 回目の実験の水平動成分では 2 回目の実験において異常な初動走時を示す記録や異常な波形が得られた。この実験によってシステム中のデバイスの不良が起きたときの挙動についての知見を得ることができたが、かけや打撃強制振動による検定手法の問題点が次のように指摘される。打撃点の地面の凍結／非凍結の状態によってかけや打撃による震源波形が変化すること、かけや打撃によって発生した応力擾乱が光ファイバ内の寄生信号の発生に寄与する可能性があることである。このことからかけや打撃強制振動検定記録に力学系情報と光学系情報が弁別困難な状態で含まれてしまう可能性が指摘される。センサを構成する振り子を直接振動させる手段のないことは、このような現象が発生したときの原因の切り分けを難しくする。今後何らかの対策が望まれる。

## 2) 問題点と今後の課題

本事業の実施にともない、以下の問題点と課題が指摘された。

- ・耐雷性の検証は継続して行われる必要がある。
- ・2018 年 1 月 7 日にインテンシティモジュレータの劣化に伴う現象が回復困難な規模で発生した。Phase 1 試作機で使用しているインテンシティモジュレータは設計時から規格からはずれた電圧範囲内で利用していたため、劣化が進んだと考えられる。それまでデータは十分蓄積されており、平成 29 年度実施事業への大きな影響はなかったが、今後、新しいシステムの製作に取りかかるにあたり、光デバイス（インテンシティモジュレータ）の劣化対策または劣化軽減対策が必要である。
- ・ノイズ発生源や故障箇所の特を容易にするためのセンサ振り子の強制振動等の検定機構の実装が望まれる。

また本報告とは別に、本事業の評価の過程で出された意見に次のような課題の指摘があったことを以下に記す。

- ・耐熱性に留意した開発を進める必要がある。
- ・系統的なシステム故障率の推定を行う必要性がある。
- ・センサ固有周期をもっと長周期にする必要がある。

今後の事業実施においては上記指摘を考慮して取り組む必要がある。

### 3) 謝辞

本課題を遂行するにあたり、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。

また、本研究は、東京大学地震研究所共同研究プログラムの援助をうけた。このプログラムの一環として浅間火山観測所における光システムの運用の様々な面にご高配をいただいたほか、光システム観測期間中の同所縦坑内地震観測波形データのご提供もいただいた。

浅間火山観測所構内における地震探査では秋田大学国際資源学部 大胡田拓也氏が観測 QC およびその後の構造解析、さらには本報告書の関連項目の執筆を部分的に担っていた。秋田大学大学院国際資源学研究科博士前期課程の小林拓也氏には、探査の際にご協力を頂いた。

秋田大学国際資源学部事務部には本業務の遂行に多大なるご協力をいただくとともに、同会計担当 佐々木竹宏氏には現地視察のおりにご協力をいただいた。

これらの方々には特に感謝し、心から御礼を申し上げます

(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) Matsumoto, S., Shimizu, H., Matsushima, T., Uehira, K., Yamashita, Y., Nakamoto, M., Miyazaki, M., Chikura, H., Short-term spatial change in a volcanic tremor source during the 2011 Kirishima eruption, Earth, Planets and Space, 65, 323-329, 2013.05
- 3) 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
- 4) Hansen, S. M., Schmandt, B., Levander, A., Kiser, E., Vidale, J. E., Abers, G. A. & Creager, K. C. Seismic evidence for a cold serpentinized mantle wedge beneath Mount St Helens, NATURE COMMUNICATIONS, 7:13242, DOI: 10.1038/ncomms13242, 2016.
- 5) Minakami, T., Fundamental research for predicting volcanic eruptions Part 1. Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo, 38, 497-544, 1960.
- 6) Tarner, M. T., and Koehler, F., (1969) Velocity spectra - digital computer derivation and applications of velocity functions, GEOPHYSICS, 39, 859-881, 1969.
- 7) 気象庁, 気象庁震源リスト, [http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/daily\\_map/index.html](http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/daily_map/index.html), 気象庁, 2017.
- 8) Aoki, Y., Takeo, M., Aoyama, H., Fujimatsu, J., Matsumoto, S., Miyamachi, H., Nakamichi, H., Ohminato, T., Oikawa, J., Tanada, R., Tsutsui, T., Yamamoto, K., Yamamoto, M., Yamasato, T., and Yamawaki, T., P-wave velocity structure beneath Asama Volcano, Japan, inferred from active source seismic experiment", Journal of Volcanology and Geothermal Research, 187, 272-277, DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2009.09.004, 2009.
- 9) 気象庁地震火山部火山監視・警報センター, 草津白根山の火山活動解説資料(平成30年1月), 気象庁, 2018.
- 10) 防災科学技術研究所, F-net 広帯域地震計によって観測された2018年1月23日草津白根山噴火に伴う長周期地震動, 火山噴火予知連絡会拡大幹事会資料②平成30年1月26日, 2018.
- 11) 東京大学地震研究所, 東京大学地震研究所浅間火山観測所縦坑設計図. 東京大学地震研究所, 1982.
- 12) Schuster, G. T. and Quintus-Bosz, A., Wavepath Eikonal Traveltime inversion: Theory. GEOPHYSICS, 58, 1314-1323, 1993.
- 13) Cohen, J. K. and Stockwell, Jr. J. W., CWP/SU: Seismic Un\*x Release No. 36: a

- free package for seismic research and processing, Center for Wave Phenomena, Colorado Scholl of Mines, 2002.
- 14) Siegfried, R. R., The DeltatV 1D method for seismic refraction inversion: Theory. Intelligent Resources Inc Suite 142, Intelligent Resources Inc, 20pp, 2011.
  - 15) Stolt. R. H., Migration by fourier transform. GEOPHYSICS, 43, 23-48, 1978.
  - 16) 新井房夫・町田洋, 新編火山灰アトラス日本列島とその周辺. 東京大学出版会, 136-141, 2003.
  - 17) 東京大学地震研究所, 県単治山事業に伴う接地調査報告書, 東京大学地震研究所, 1992.
  - 18) Smith, R. C. G, Physical Optics Analysis of a Fiber-Delivered Displacement Interferometer, Master thesis of University of Rochester, Rochester, New York, 2013, 82pp.
  - 19) Tsutsui, T., YAMASHITA, M., MURAKAMI, H., MIYAMACHI, H., TODA, S., and Kanao, M., Reflection profiling and velocity structure beneath Mizuho traverse route, East Antarctica, Polar Geoscience, 14, 215-228, 2001.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

成果発表

著者	題名	発表先	発表年月日
平山義治, 筒井智樹, 池田敏晴, 竹内敬二, 安藤浩	位相シフト光パルス 干渉法振動観測シス テムによる火山観測 の試み	平成29年日本火山学 会秋季大会 (会場: 熊本大学)	平成29年9月23日
平山義治, 筒井智樹, 池田敏晴, 竹内敬二, 安藤浩	位相シフト光パルス 干渉法振動観測シス テムによる火山観測 の試み	光ファイバセンシン グ振興協会第9回シ ンポジウム (会場: 東京工業大学)	平成29年10月30日
平山義治, 筒井智樹, 池田敏晴, 竹内敬二, 安藤浩	位相シフト光パルス 干渉法振動観測シス テムによる火山観測 の試み	月刊地球平成30年3 月号特集「噴火現象 の現状と今後の火山 噴火予測研究の方向 性」	平成30年3月

情報発信

・白山工業 Web ページ「はくさん研究室 光センサー地震計」

URL: [http://www.hakusan.co.jp/LABO/opt\\_fiber/](http://www.hakusan.co.jp/LABO/opt_fiber/)

(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30年度の業務計画案**

課題責任機関（秋田大学）は、以下の項目を実施する。下記項目は共同実施機関（白山工業株式会社）と連携して事業を行う。

① 光センサシステムで取得されたデータの火山学的解析

a. データ解析

前年度の観測により得られた観測データに観測網内部の表層地震波速度構造を反映した解析を施し、より精密な解析を行う。具体的には波形の現象分類、見かけ速度解析を中心に、可能であれば波源推定を行う。なお、本内容の実施にあたり秋田大学現有の設備の老朽化が著しいため、本委託業務の実施にあたり新たに解析装置を調達して使用する。

#### b. 光センサによる火山観測の準備

次年度以降の光センサシステムによるデータ取得試験を実施するために東京大学地震研究所浅間観測所とその周辺において下見を行う。主な準備内容は設置予定場所の下見を行うことともに、観測点配置計画の調整等である。

#### ② 光センサシステム観測の総合評価および総括

平成 30 年度観測（試験）を総合的に評価・総括する。平成 29 年度のデータ解析結果および共同実施機関からの報告を踏まえて、光センサシステムの総合評価を行う。特に、共同実施機関によって今年度から新たに製作された汎用ファイバを使う新しいセンサの特性について総合的な評価を行う。新しい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、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、整理する。

#### ③ プロジェクト運営

火山研究運営委員会や研究集会などに参加し、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連携した取り組みを実施し、プロジェクトの推進に貢献する。

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」－サブテーマ 4：「火山内部構造・状態把握技術の開発」

本課題で行う試験観測結果を提供することと、各種委員会およびフォーラムの場に参加して他課題担当者との意見交換の機会を持ちユーザーのニーズを把握して今後の改良に反映すること、および後年度における課題 B 観測対象火山への観測運用投入によって、他課題と連携する。

##### 3) 火山研究人材育成コンソーシアム構築事業

実施期間中に、求めに応じ、火山研究人材育成コンソーシアム参加者に実際の観測を見学する機会を提供する。



### 3. 2 位相シフト光干渉法による多チャンネル火山観測方式の検討と開発（白山工業）

#### (1) 業務の内容

##### (a) 業務題目

課題 B2-2 火山観測に必要な新たな観測技術の開発

「位相シフト光干渉法による多チャンネル火山観測方式の検討と開発」

##### (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 安藤 浩	hirayama@hakusan.co.jp
白山工業株式会社 防災研究システムユニット			
秋田大学大学院国際資源学研究所	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	
東京大学地震研究所 火山噴火予知研究センター	教授	武尾 実	
	准教授・センター長	大湊隆雄	
東京大学地震研究所 技術部総合観測室	技術専門員	辻 浩	

##### (c) 業務の目的

平成 28 年度に実施した桜島の観測坑道内におけるフィージビリティスタディの成果をふまえて、平成 29 年度は火山での実際の屋外観測環境に合わせて検証することと、特に光センサシステムの原理的な特徴である耐雷等の検証を行うことと、1 ヶ月以上を長期運用の際のシステム安定性の検証を行うこと、バイアス電圧ジャンプに伴う欠測現象の低減させる改良とその検証とを目的とする。平成 29 年度の委託業務の成果をふまえて、平成 30 年度以降は光センサシステムを用いた多チャンネル観測システムの実用化に向けた要素技術の開発・組み込みと検証を行うことにする。光センサシステムを配置する予定の火山は、関東で活動的な火山である浅間山を予定している。

本委託業務で得られた成果は、光センサシステムを火山のモニタリングシステムとして実用的に使用できることになる。この光センサシステムの利点を考えれば、上記に示したように、海底火山のモニタリングへの展開が一番に考えられるし、また 200 °C 程度であれば、地中深部観測にも有効な展開ができると考えられる。このシステムが気象庁や火山研究機関などのユーザーに広く利用されるように、ニーズの調査を行い、要素技術の改良点の抽出・把握や必要に応じた改良及び転用技術の開発に向けた情報収集を行う。また、これらの機関の火山観測システムの次回更新時に導入されるように働きかけるとともに、導入する機関向けの開発研究を実施すべきか関係者と検討を行う。

#### (d) 10ヶ年の年次実施計画

##### 平成28年度：

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ュ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。

##### 平成29年度：

課題責任機関は主に以下の項目1)～5)を実施する。

- 1) 光センサシステムで取得されたデータの火山学的解析
- 2) 平成29年度光観測網内部の表層地震波速度調査
- 3) 光センサシステムのH29年度観測の総合評価および総括
- 4) プロジェクト運営

共同実施機関は火山観測とその実施準備を行い、以下の5)～7)を実施する。

- 5) 長期運用時の安定性の検証
- 6) 耐雷性の検証
- 7) バイアス電圧ジャンプによる欠測現象を低減させる改良を行うとともに検証を行う。

5)については平成28年度の見学会時に指摘のあった、長期運用時における光発生装置等の時間的な耐久性を調査する。6)は原理的な特徴の一つである雷に強いことを、活動的火山での観測を行いながら、調査検証する。7)は平成28年度の連続観測で判明した、バイアス電圧のジャンプによる欠測が起きないように改良を行う。プロジェクト運営会議等を通してユーザーニーズの把握に努める。

##### 平成30年度：

課題責任機関は以下の項目を実施する。

- 1) 平成29年度に得られたデータのより精密な火山学的解析および検討
- 2) 光センサシステムの総合評価と総括
- 3) プロジェクト運営

共同実施機関は以下の項目を実施する。

- 4) 第一次分の増設センサの製作
- 5) 光センサシステムへの増設チャンネルの試験実装

4)は新たに汎用のシングルモードファイバを使用した新センサの製作を行う。5)は多点化のプロトタイプとしての増設チャンネルの試験実装を行い、室内実証試験を行う。プロジェクト運営会議等を通してユーザーニーズの把握に努める。

#### 平成31年度：

課題責任機関は以下の項目を実施する。

- 1) 観測データの火山学的解析
- 2) 光センサシステムの総合評価と総括
- 3) 平成31年度光システム観測網の表層地震波速度調査
- 4) プロジェクト運営

共同実施機関は火山観測とその準備を行い、以下の項目を実施する。

- 5) 第二次分増設センサの製作
- 6) 長時間多点観測に関する要素技術の開発
- 7) 新しい光受信装置試作機の製作

5)は新しい方式でのセンサを平成30年度にひきつづき追加製作する。6)は汎用シングルモードファイバ伝送による火山観測を行う。7)では実証試作機を中心となる新しい光送受信装置を前倒しで作成し、JOGMECで作成したプロトタイプとの性能比較を実際の火山でアレイ観測を行うことにより、検証する。プロジェクト運営会議等を通してユーザーニーズの把握と集約に努める。

#### 平成32年度：

課題責任機関は以下の項目を実施する。

- 1) 観測データの火山学的精密解析
- 2) 光センサシステムの総合評価と総括
- 3) プロジェクト運営

共同実施機関は以下の項目を実施し、室内検証を主に行う。平成32年度以降、平成31年度で作成した送受信装置を用いた試験、観測を行うとともにセンサの追加実装を順次おこない、火山観測に適した光センサシステムを構築する。

- 4) 第三次分増設センサ製作
- 5) シングルモードファイバによるセンサシステムの安定性の改善を行う。
- 6) 増設チャンネルの本格実装を行う。

平成31年度の観測結果および、課題Bをはじめとする実際に火山観測を行って

る方々のニーズを踏まえて改良を行う。プロジェクト運営会議等を通して引き続きユーザーニーズの把握に努める。

#### 平成33年度：

課題責任機関は以下の項目を実施する。

- 1) 観測データの火山学的解析
- 2) 光センサシステムの総合評価と総括
- 3) 平成33年度光センサシステム観測網の表層地震波速度調査
- 4) プロジェクト運営

共同実施機関は火山観測とその準備を行い、以下の項目を実施する。

- 5) 第四次分増設センサ製作
- 6) 18成分の多点火山観測の実施

6)はこれまでに製作した合計18成分での火山観測を火山地帯で行い、火山観測における総合的な対環境性の検証を行う。もし開発が早まれば、課題Bと連携し、可能な限り課題B-4の対象火山に投入して観測を行う。プロジェクト運営会議等を通して引き続きユーザーニーズの把握に努める。

#### 平成34年度：

課題責任機関は以下の項目を実施する。

- 1) 観測データの火山学的精密解析
- 2) 光センサシステムの総合評価と総括
- 3) プロジェクト運営

共同実施機関は以下の項目を実施する。実証試験は室内で行う。

- 4) システムの多点化プロトタイプの改修、
- 5) 第五次分増設センサの製作を行う。

平成33年度の観測結果及び課題Bの方々の意見を踏まえた改良を行う。もし開発が早まれば、課題Bと連携し、可能な限り課題B-4の対象火山に投入して観測を行う。プロジェクト運営会議等を通してユーザーニーズの把握を継続し集約に努める。

#### 平成35年度：

課題責任機関は以下の項目を実施する。

- 1) 観測データの火山学的解析
- 2) 光センサシステムの総合評価と総括
- 3) 平成35年度光システム観測網の表層地震波速度調査
- 4) プロジェクト運営

共同実施機関は火山観測とその準備を行い、以下の項目を実施する。

5) 多点プロトタイプシステムの検証と、火山運用実績の獲得

6) 合計 24 成分でのアレイ観測の火山地帯における実施

もし開発が順調に進んでいる場合、課題 B と連携し、可能な限り課題 B-4 の対象火山に投入して実証実験を行う。プロジェクト運営会議等を通してユーザーニーズの把握を継続する。

#### 平成 36 年度：

課題責任機関は以下の項目を実施する。

1) 観測データの火山学的精密解析

2) 光センサシステムの総合評価と総括

3) プロジェクト運営

共同実施機関は以下の項目を実施し、室内検証を中心に行う。

4) 多点実用システムへの改装を行う。

5) 多点化実用システムの構築と室内検証

平成 35 年度の観測結果及び課題 B の方々の意見を踏まえた改良を行う。もし開発が想定以上に進捗した場合には、可能な限り課題 B-4 の対象火山に投入して観測運用を実施する。プロジェクト運営会議等を通してユーザーニーズの把握を継続する。

#### 平成 37 年度：

課題責任機関は以下の項目を実施する。

1) 観測データの火山学的解析

2) 光センサシステムの総合評価と総括

3) 平成 37 年度光センサシステム観測網の表層地震波速度調査

4) プロジェクト運営

共同実施機関は火山観測とその準備を行い、下記の項目を実施する。

5) 光センサシステムを適用した火山観測システムとして最終評価を確定する。

6) 課題 B-4 で実施中の火山において、24 成分のアレイ観測を行い、多点化実用システムの火山運用実績の獲得を行う。

#### (e) 平成 29 年度業務目的

共同実施機関として、本業務を推進し遂行するための準備、観測実施、観測計器の整備・管理・維持、計測、データ回収、データ整理、観測に関するノウハウのとりまとめ等を実施し、本

業務を遂行するための準備、観測実施、データ解析を総括する課題責任機関（秋田大学）と連携して事業を行う。具体的には次のような内容である。平成28年度に使用したJOGMEC-Phase1光センサ試作機をJOGMECの許認可のもとで使用し、事業開始後速やかに東京大学地震研究所浅間観測所施設内に設置して活火山における1ヶ月以上（約3ヶ月間の見込み）の長期連続運用とモニタリングを行う。その際、光センサシステムの送受信装置は東京大学地震研究所浅間観測所の建屋内を借用し設置し、個々の光センサは同観測所敷地内の屋外に設置する。また光センサシステムにはバイアス電圧ジャンプ（テア）に伴う欠測を軽減する対策（テア対策）を施して観測に投入するとともに、その挙動に応じて適宜修正を施す。この火山観測によって平成28年度の評価時に指摘された、長期間運用にともなう性能変化のモニタリングの検証と本質的に雷に強いという特徴を検証するとともに、バイアス電圧ジャンプに伴う欠測の軽減改良の効果を検証する。東京大学地震研究所を協力機関とし、浅間山の研究を担当されている武尾実教授と大湊隆雄准教授に協力者になっていただき、浅間山の火山活動とそれに伴う地震活動に対する知識提供と東京大学地震研究所浅間火山観測所で実施する観測に対する協力をお願いします。

また、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課題A「各種観測のデータの一元化」と連携し、観測の結果について、オフラインデータを提供する。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」と連携し、本課題で行う浅間山での地震観測結果を提供し、課題担当者との意見交換の機会をもち、ユーザーニーズを把握して今後の改良に反映させること、および後年度における課題Bの観測対象火山への投入によって、他課題と連携する。火山研究人材育成コンソーシアム構築事業との連携については、実施期間中にコンソーシアムの求めに応じて対応する。

## (2) 平成29年度の成果

### (a) 業務の要約

現在活動中の浅間山において、光センサシステムを投入して火山観測を行い、火山性地震および火山性微動、自然地震のデータを取得、解析した。

本計画では光センサシステムで1か月以上のシステム安定性の検証と、昨年課題として現れた、耐雷性およびバイアス電圧ジャンプにともなう欠測現象の低減の検証である。

その計画に基づいて光センサシステムで2017年9月13日から2018年1月8日まで連続観測を行った。結果、観測期間中に計52回の火山性地震および火山性微動イベントを記録することができた。連続観測の期間中、一旦機器を撤収し、雷サージ防止版の設置及びバイアスジャンプ対策を施した上で観測を再開した。雷サージ防止の効果については、浅間山の落雷シーズンを過ぎており、設置期間中に落雷現象は発生しなかったため、次年度以降引き続き検討を行うことにした。バイアスジャンプ対策については、平成28年度の桜島での観測時よりもドリフトの傾きは小さくなり、一定の効果があった。ただしこの現象は長期観測で問題となるため、引き続き調査、開発を進めていく予定である。

### (b) 業務の実施方法

平成29年度は長野県と群馬県の県境に位置する浅間火山における試験観測を中心として、課題責任機関（秋田大学）と連携して事業を行った。試験観測を行うにあたり、長野県北佐久郡軽井沢町長倉2125 東京大学地震研究所浅間火山観測所とその構内を協力機

関の一つである東京大学地震研究所の共同利用の一環として使用した。

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、共同実施機関は次項の1)実施機関と業務分担のように行われた。

#### 1) 実施機関と業務分担（共同実施機関分）

##### ①長期運用時の安定性の検証

###### a. 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。

###### b. 光センサによる火山観測の実施及び表層地震波速度構造探査の支援

平成 28 年度の桜島での見学会時に指摘のあった、光発生装置等の時間的な耐久性を調査した。光センサシステムの送受信装置の設置に当たり、東京大学地震研究所浅間火山観測所の敷地及び施設を借用する。

また、秋田大学が実施した、表層地震波速度構造探査の支援を行う。

###### c. 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、長期連続観測時の光送受信装置の性能変化をより詳細に把握をするとともに、光センサの性能に関する解析とノウハウの整理を行う。

###### d. 総括

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。報告書の製作は課題責任機関と共同で行う。

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、日変動などの長周期成分や、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、耐雷性等の耐環境性や設置作業時の作業性、長期運用時のシステムの安定性などに注目して収集と整理を行い、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及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などに関連する情報を引き出し、既存のデータを比較して評価を行い、また 4) 他課題への観測データの提供を行う。

##### ②耐雷性の検証

###### a. 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、観測実施前の光センサシステムの整備を行う。

###### b. 光センサシステムによる火山観測の実施

原理的な特徴の一つである、雷に強いことを、活動的火山での観測を行いながら、実施検証する。観測場所として東京大学浅間火山観測所を選定し、観測期間中は光センサシス

テムの維持管理を行う。①bと同じ期間に並行して実施する。

c. データ解析

観測データを回収し、観測期間中に発生するであろう雷に対する挙動を詳細に把握するとともに、光センサの性能に関する解析とノウハウの整理を行う。

d. 総括

①dの2)と同じ期間に並行して、光センサシステムにおける耐雷性の検証の総括を行う。

③バイアス電圧ジャンプによる欠測現象を低減させる改良と検証

a. 光センサシステムの修正

平成28年度の観測で明らかとなった、バイアス電圧以上による欠測への対策を施し、

①

bと同じ期間に並行して実施する。これまで指摘されていたバイアス電圧ジャンプに伴う欠測現象を低減化する対策をシステムに施すとともに、観測運用中の光センサシステムの挙動に応じてシステムを修正する、また、後年度実施を視野に入れて観測期間終了後も必要に応じてシステムの修正を行う。

b. データ解析

観測データを回収し、バイアス電圧ジャンプに伴う欠測の軽減対策を検証するとともに光センサの性能に関する解析とノウハウの整理を行う。

c. 総括

①dの2)と同じ期間に並行して、光センサシステムにおけるバイアス電圧ジャンプによる欠測改善の検証の総括を行う。

2) 観測の実施

a). 観測に用いた位相シフト光干渉システムの諸元

本事業では昨年に引き続き、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。このシステムは試作品であり、使用不能になる可能性もあることから、JOGMECからは単年ごとの許可となっている。

観測に用いた位相シフト光干渉システム(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(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

センサユニットは東京大学地震研究所浅間山火山観測所の敷地内に設置するとともに, 光送受信装置を観測所に設置し, 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.

センサユニット設置位置を図1に, 光送受信装置設置場所を図2に示す.

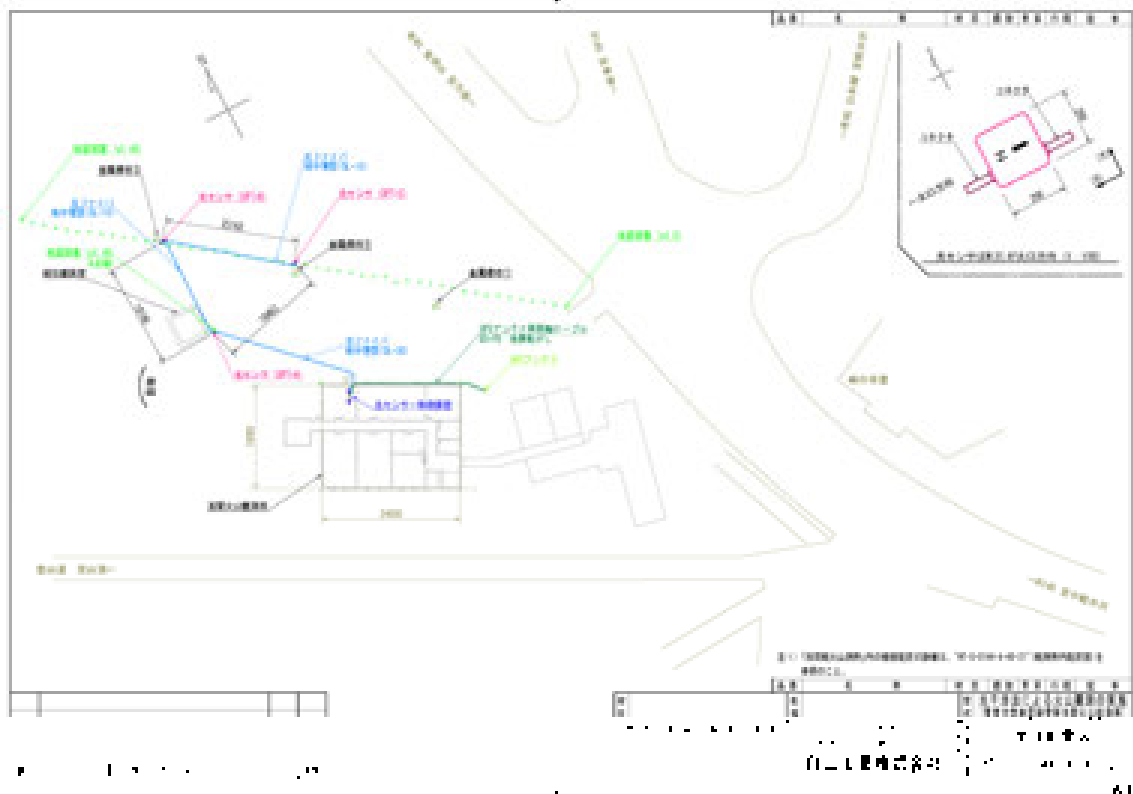


図1 光システム設置図

今回センサユニットは、地震波の到来方向も検知できることを期待して、一辺が 20m 前後の三角形に設置した。

光 A 観測点 (以後 OPT-A) は縦坑観測室角、光 B 観測点 (OPT-B) は観測所敷地内に 3 本ある金属標柱のうち一番奥の標柱脇、光 C 観測点 (OPT-C) は真ん中の金属標柱脇に設置した。

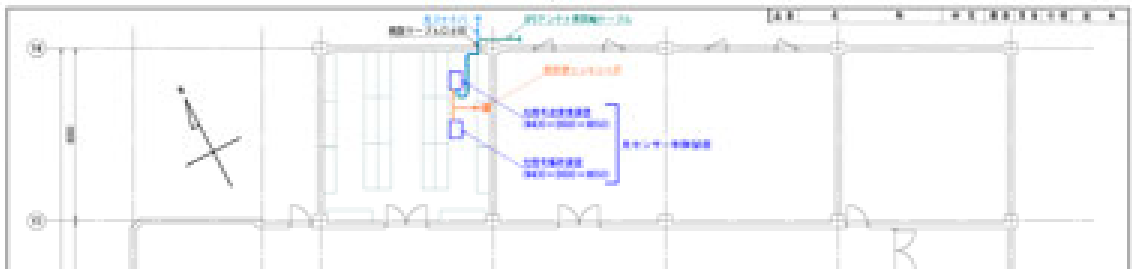


図2 光送受信装置室内設置場所

光送受信装置は、観測所観測室2の内部、図2の紫色の部分に設置した。

光送受信装置と光センサを接続するケーブルおよび時刻同期をとるためのGPSアンテナは壁面の既設ケーブル口を通して設置した。

光センサの設置状況を以下の写真1に示す。各センサは地中に埋設し、その表面に土をかぶせた。埋設後、降雪などで設置位置がわからなくなってしまうことと、誤ってセンサを踏んだりしないようにするために、木の杭とテープで四角く囲いをした。



OPT-A 観測点



OPT-B 観測点



OPT-C 観測点

写真1 光センサシステム設置状況

光送受信装置とセンサを結ぶ光ケーブルは、写真2のように深さ約10cmのみぞを掘り、そこに敷設した。



写真2 光ケーブル埋設前（左），および埋設後（右）。

光送受信装置は観測所の観測室2に設置した。（写真3）

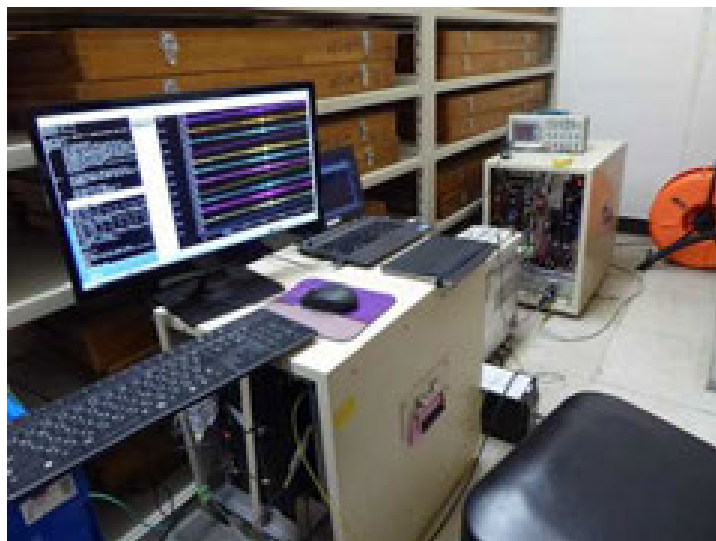


写真3 観測室内の光送受信装置の設置状況

正確な時刻が必要であるため、GPS アンテナを観測所の東側のややひらけたところに敷設し、脚部に石をのせて固定した。（写真4．設置位置は図1を参照）



写真4 GPS アンテナ設置

観測期間中、観測状況を監視するため、携帯端末による回線を確認して東京からヘルスチェック等を行った。

(c) 業務の成果

1) 光センサシステムの長期運用

ここでは浅間火山観測所に設置した光センサシステムの運用状況と、観測データについて述べる。

a). 光センサシステムの稼働実績と地震イベント観測記録

以下の表1に光センサシステムの稼働状況と検出した地震イベントをまとめて示す。

表1 光センサシステムの稼働状況と地震イベント記録回数

観測 期間	年月日	データ		備考	地震回数(※)			火山性地震記録時刻(B型、A型)
		欠落数(秒)	欠落率(%)		EQ	B型	A型	
	2017年8月29日			浅間火山観測所下見、設置場所等確認				
	2017年9月12日	2013	2.33	設置作業				
(I)	9月13日	200	0.231	0000:スタート、0604~0855:表層構造探査	1	1	2:50	
	9月14日	13	0.015		4			
	9月15日	0	0		2			
	9月16日	0	0		4			
	9月17日	0	0		9			
	9月18日	3	0.003		0			
	9月19日	25	0.029	モバイルルータ設置、遠隔監視開始	4			
	9月20日	0	0		3			
	9月21日	4209	4.872	2150~2400:OnOff比異常	6			
	9月22日	41602	48.15	0000~1157:OnOff比異常、1157:On-Off比レベル調整	1			
	9月23日	0	0	1127、1715:On-Off比レベル調整	1	1	12:07	
	9月24日	0	0		3			
	9月25日	2	0.002		3			
	9月26日	13	0.015		3			
	9月27日	0	0		3			
	9月28日	0	0		6			
	9月29日	19	0.022		1			
	9月30日	0	0		2			
	2017年10月1日	50	0.058		4			
	10月2日	56	0.065	0850、1459:On-Off比レベル調整	4	1	2:43	
	10月3日	2	0.002		8	1	3:32	
	10月4日	4	0.005		5			
	10月5日	143	0.166		1			
10月6日	0	0		3	1	0:40		
10月7日	0	0		2				
10月8日	358	0.414		2				
10月9日	16	0.019		3				
10月10日	17	0.02		0				
10月11日	60	0.069		0				
10月12日	48	0.001	1414:収録停止(送信装置改修の為に取り外し)	0				
10月13日~19日	*	100	この間、収録停止					

表1 つづき

	10月20日	129	0.004	1415:収録再開(送信装置の再設置)	1															
	10月21日	0	0		1															
	10月22日	0	0		4															
	10月23日	26	0.001	1514:収録停止(リモート操作ミスにより装置停止)	0															
	10月24日	*	100	この間、データ収録停止中(期間Ⅱに含まない)	-															
	10月25日	368	0.008	1043:装置起動、収録再開	3															
	10月26日	2583	2.99		4															
	10月27日	1352	1.565		4	1		4:25												
	10月28日	556	0.644		1															
	10月29日	760	0.88		1															
	10月30日	641	0.742		0															
	10月31日	676	0.782		4															
	2017年11月1日	4446	5.146	0850~1500:センサごとの調整、全体の送信光レベル調整	1															
	11月2日	0	0		1															
	11月3日	0	0		3															
	11月4日	0	0		5															
	11月5日	0	0		4															
	11月6日	0	0		2															
	11月7日	0	0		7	1		7:32												
	11月8日	0	0		5	4		16:42 22:29 22:31 22:54												
	11月9日	0	0		7	1		3:12												
	11月10日	0	0		5															
	11月11日	0	0		3															
	11月12日	0	0		0															
	11月13日	0	0		5	1		1:14												
	11月14日	0	0		2															
	11月15日	12	0.014	1302~1307:OnOff比レベル調整	4															
	11月16日	0	0		5															
	11月17日	0	0		3	2		8:03 19:45												
	11月18日	0	0		9															
	11月19日	0	0		8	1		7:00												
	11月20日	0	0		6															
	11月21日	0	0		3															
	11月22日	0	0		2	1		21:33												
	11月23日	0	0		3	1		21:32												
	11月24日	0	0		2	2		1:12 9:41												
	11月25日	0	0		2															
	11月26日	0	0		9															
	11月27日	0	0		6															
	11月28日	0	0		3	1		23:24												
	11月29日	0	0		6															
	11月30日	0	0		8															
(Ⅱ)	2017年12月1日	0	0		5															
	12月2日	0	0		5	1		1:18												
	12月3日	0	0		5	1		15:31(A型)												
	12月4日	0	0		3															
	12月5日	207	0.24	1358~1435:送信光レベル調整	4															
	12月6日	0	0		4															
	12月7日	0	0		5															
	12月8日	0	0		5															
	12月9日	0	0		4															
	12月10日	0	0		7															
	12月11日	0	0		1															
	12月12日	2200	2.546	1426~1545:観測所の電源設備定期点検	6															
	12月13日	0	0		2															
	12月14日	0	0		6															
	12月15日	0	0		4	2		0:22 3:20												
	12月16日	0	0		7															
	12月17日	0	0		4															
	12月18日	0	0		7															
	12月19日	0	0		3															
	12月20日	14	0.016	1338~1339:OnOff比レベル調整	9	1		22:06												
	12月21日	0	0		8	5		4:10 5:04 5:44 7:05 19:20												
	12月22日	0	0		2															
	12月23日	0	0		7	1		20:33												
	12月24日	0	0		0															
	12月25日	0	0		1															
	12月26日	0	0		3															
	12月27日	5	0.006		5	2		1:07 20:31												
	12月28日	0	0		1															
	12月29日	0	0		5															
	12月30日	0	0		0	3		18:31 19:21 19:57												
	12月31日	0	0		1	5		13:06 17:38 19:03 19:15 22:42												
	2018年1月1日	0	0		9	1		0:19												
	1月2日	0	0		3	1		11:49												
	1月3日	0	0		7															
	1月4日	0	0		10	6		6:50 20:16 20:58 21:44 22:06 22:42												
	1月5日	0	0		7															
	1月6日	0	0		8	1		1:21												
	1月7日	1487	1.721	1537~1607:装置異常	3	1		20:04												
	1月8日	26479	30.647	1534~:装置異常、2359:収録停止	1															
	1月9日~21日	*	100	この間、収録停止	-															
(Ⅲ)	1月22日	4	0.000111	1400~:復旧、1432~1437:かけや振動試験	2	2		18:06 17:27(1Hz微動)												
	1月23日	2	4.76E-05	1000:草津本白根山噴火、1140:収録終了	3	2		0:05 1:57												
	合計(Ⅰ+Ⅱ)	88781	0.95	(Ⅰ+Ⅱ)稼働日数:108日、欠測率:0.95%	417	51	1													



今回、契約締結後すぐ下見及び設置を行ったため、設置時点でモバイルルータ、および雷サージ防止板の確保ができなかった。そのため、モバイルルータは9月19日に現場設置を行ない、その後遠隔からのシステムのヘルスチェックが可能となった。

雷サージ防止板の設置及びバイアスジャンプ対策については光送受信装置を10月12日に一旦会社に持ち帰り、装着し社内動作テストを行った後10月20日に再設置を行った。

その後も適宜調整を行っていたが、1月8日にリモートで調整できないレベルの装置異常が発生し、収録を停止した。その後、撤収直前の1月22日、現場で一時復旧させたのち、23日に撤収を行った。

光システムの稼働期間は、平成29年9月13日の開始から平成30年1月8日の収録停止までの合計118日であった。このうち、送信装置改修や操作ミスによる停止期間を除くと実質の稼働日数は108日であった。そして実稼働時間中の欠測率は0.95%となった(表1)。なお、1月7日の装置異常の原因は、バイアスジャンプの現象に関係している、インテンシティモジュレータ(光強度変調器)の劣化である。インテンシティモジュレータに過電圧が印加されたなどで、劣化していた可能性がある。ちなみにその他のレーザー発振部等の劣化は見られなかった。

浅間火山観測所は国道146号に隣接しており、通行する車両のノイズが大きく、光システム単独の記録では地震火山イベントとの選別が難しい。そこで、防災科学技術研究所のV-netの小浅間観測点、気象庁震源リスト、およびHi-net連続記録などからイベントの時刻情報を得て、該時刻付近の波形記録にフィルタをかけて波形を抽出する方法により、浅間山の火山性地震、火山性微動、および自然地震を検出した(文献2, 3, 4)。その結果、稼働期間中に浅間山のA型イベント1件、B型イベント51件の記録が観測されていることを確認した。火山性地震現象以外の自然地震は417回検出した。

2018年1月23日には約30km離れた草津本白根山の爆発に伴う爆破地震をとらえることに成功した。なお、火山性地震の分類に当たっては、Minakami(1960)を参考にした(文献5)。

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

A型地震は観測期間中1回のみ、2017年12月3日に観測された。

光センサのOPT-Bと、V-net小浅間観測点の波形を図3に示す。

図3と図4がフィルタなしの生波形、図5と図6が5Hzのローパスフィルタをかけた波形である。観測点が異なるため、波形は一致していないが、ローパスフィルタをかけた波形の周波数はよく似ている。また、両者のスペクトル(図7と図8)の形状もよく似ていることがわかる。

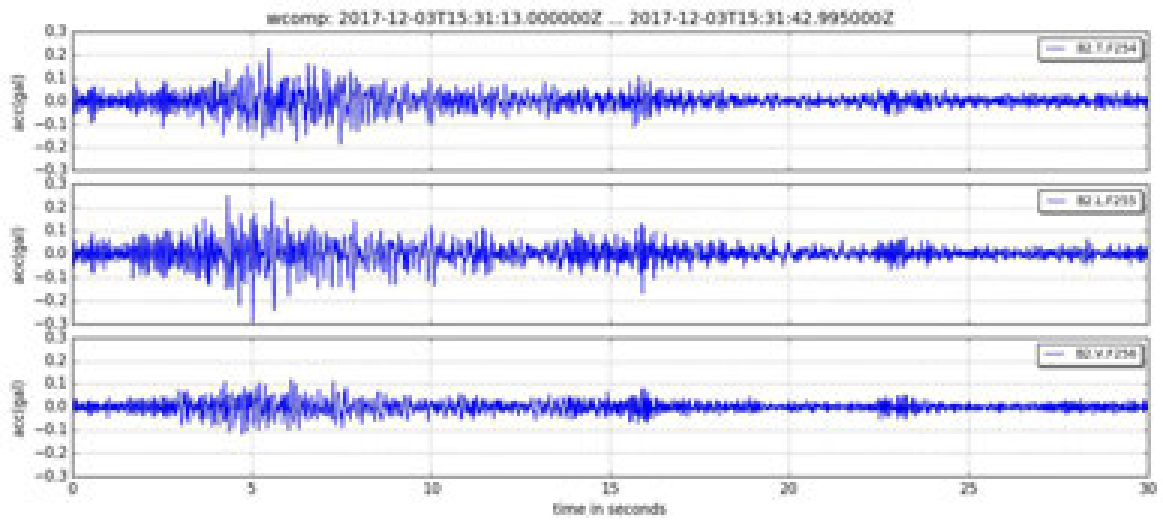


図 3 OPT-B 観測点, フィルタなし波形

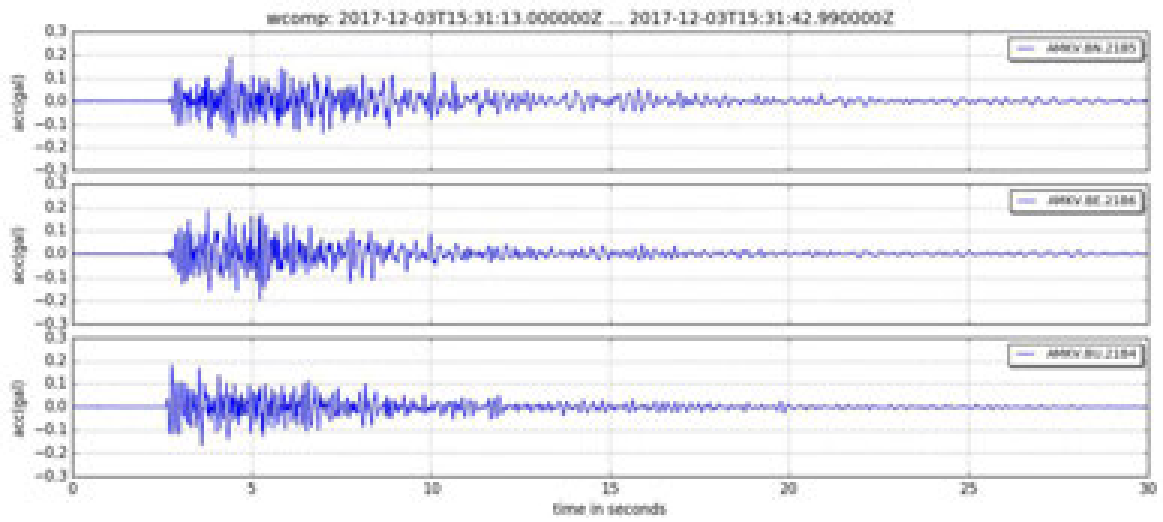


図 4 V-net 小浅間観測点 (広帯域地震計, 速度データを時間微分, フィルタなし波形)

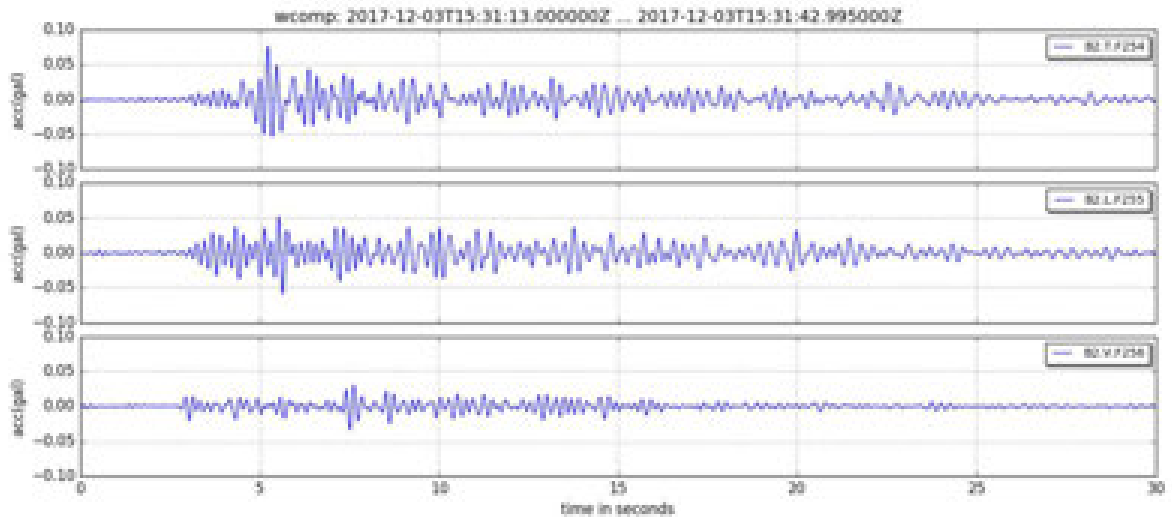


図 5 OPT-B 観測点, 5Hz のローパスフィルタ処理波形

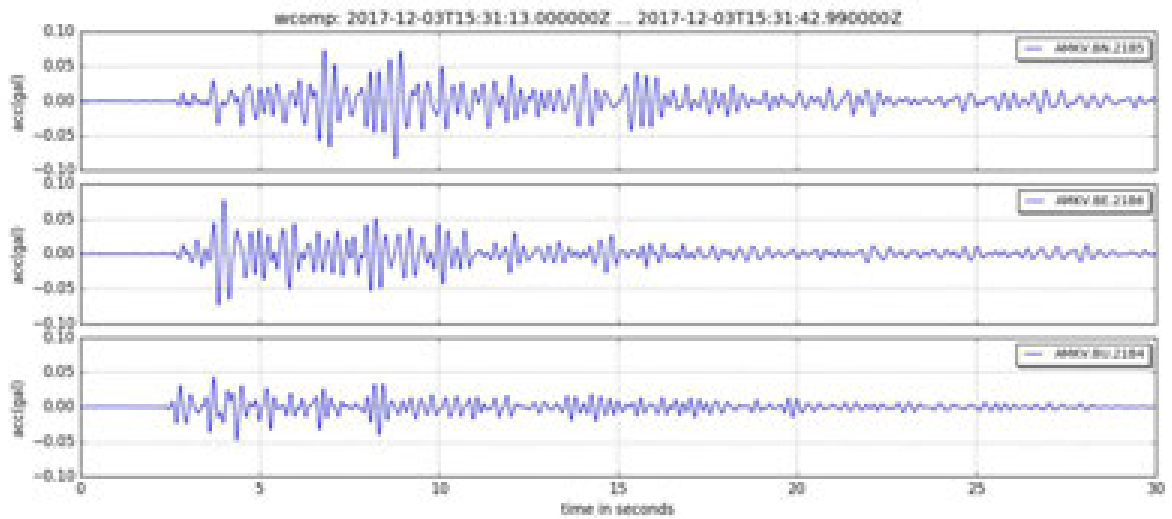


図 6 V-net 小浅間観測点 (広帯域地震計, 速度データを時間微分, 5Hz のローパスフィルタ処理波形)

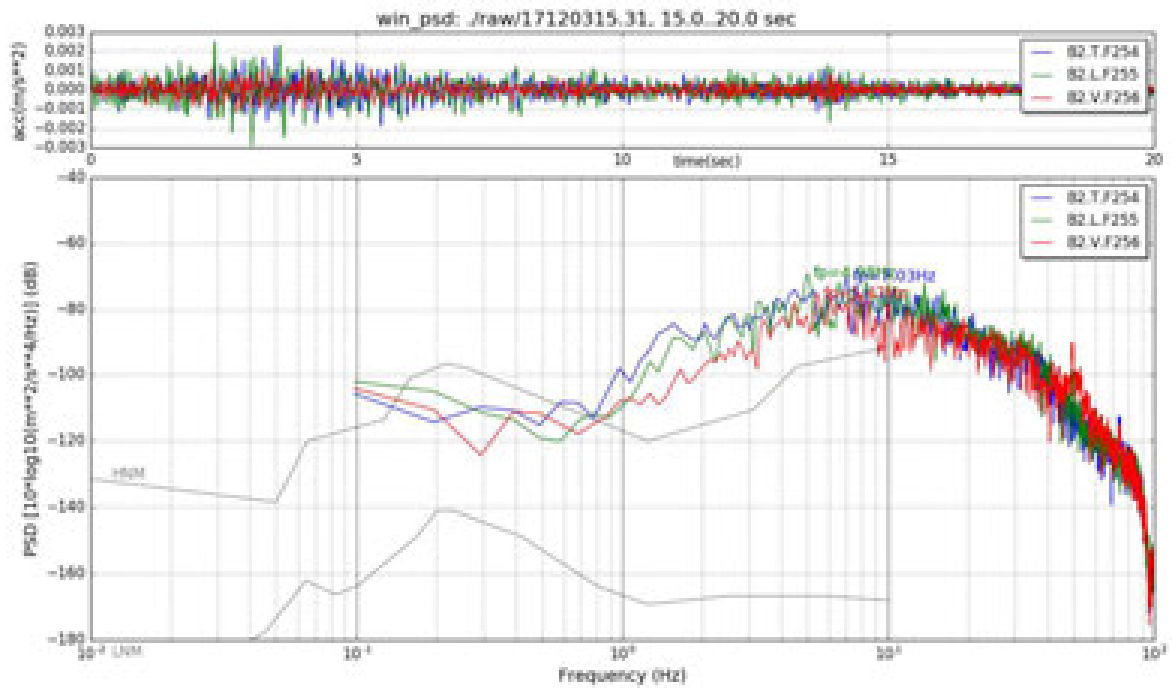


図 7 OPT-B 観測点で観測された A 型地震のスペクトル

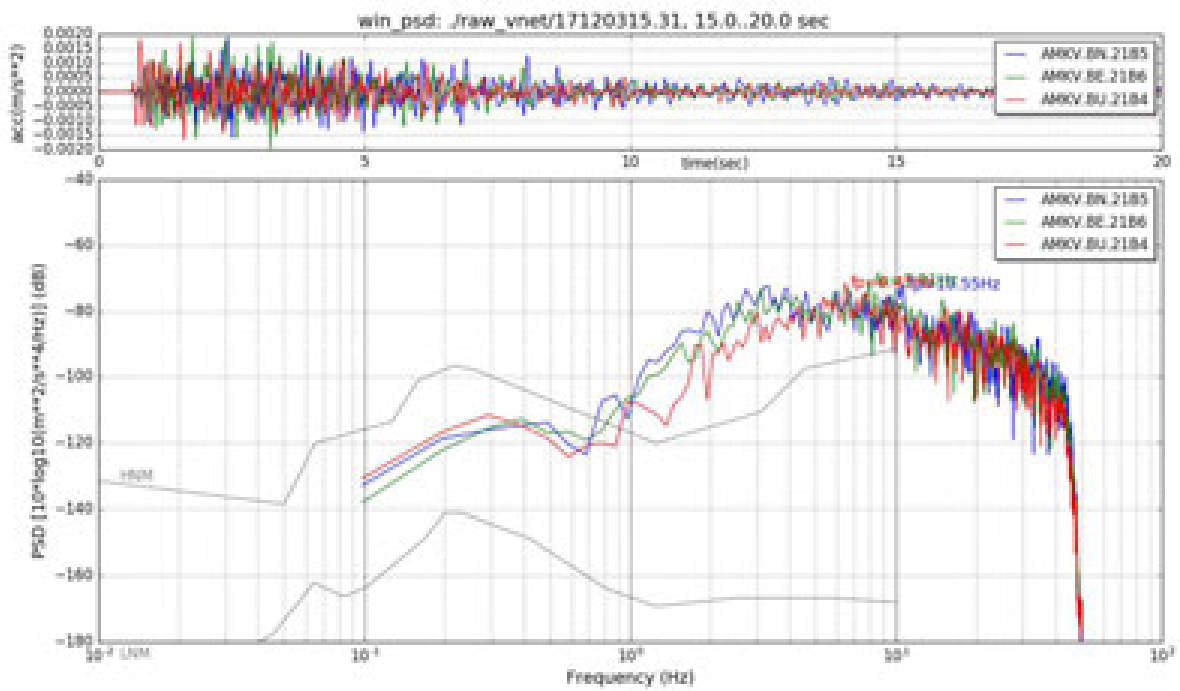


図 8 Vnet 小浅間観測点のスペクトル

B 型地震

次に B 型火山性地震の例を示す。2017 年 10 月 2 日の地震である。

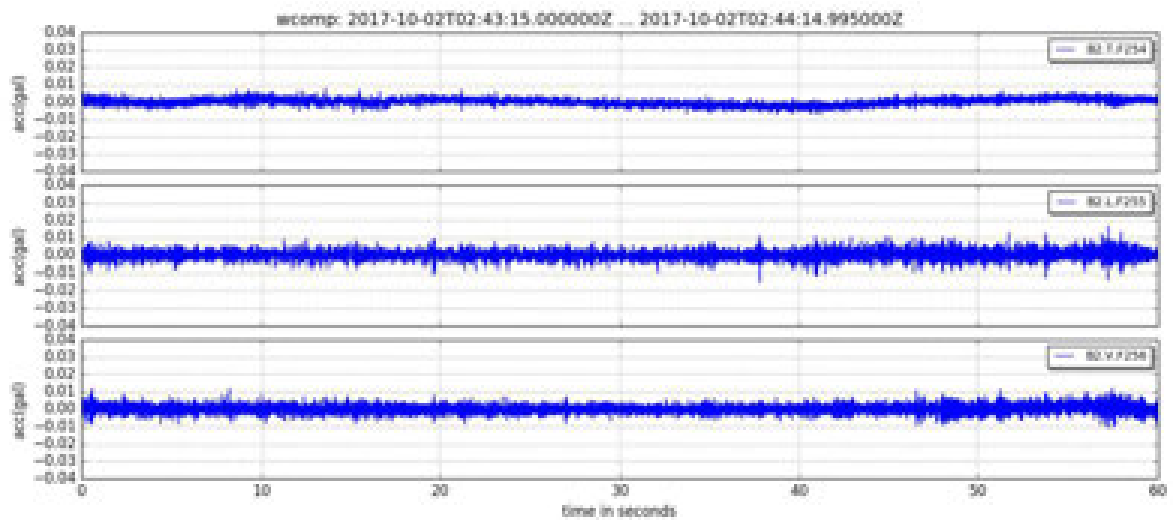


図 9 OPT-B 観測点，フィルタなし波形。

図 9 は図 10, 図 11 と比べて縦軸最大値が 20 倍であることに注意。

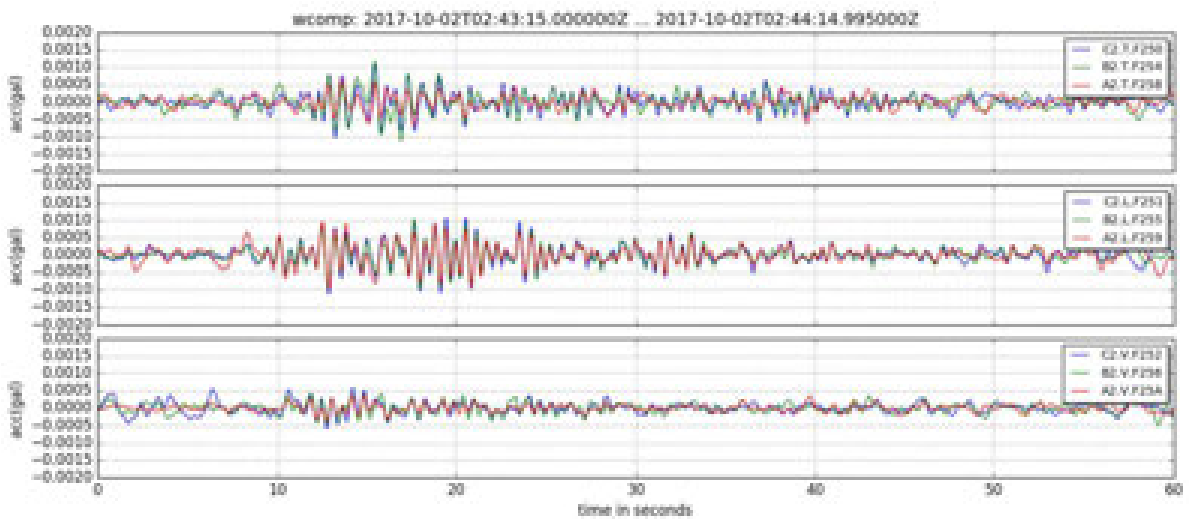


図 10 OPT-A (赤)，OPT-B (緑)，OPT-C (青) 観測点。

0.2～2Hz のバンドパスフィルタをかけた波形

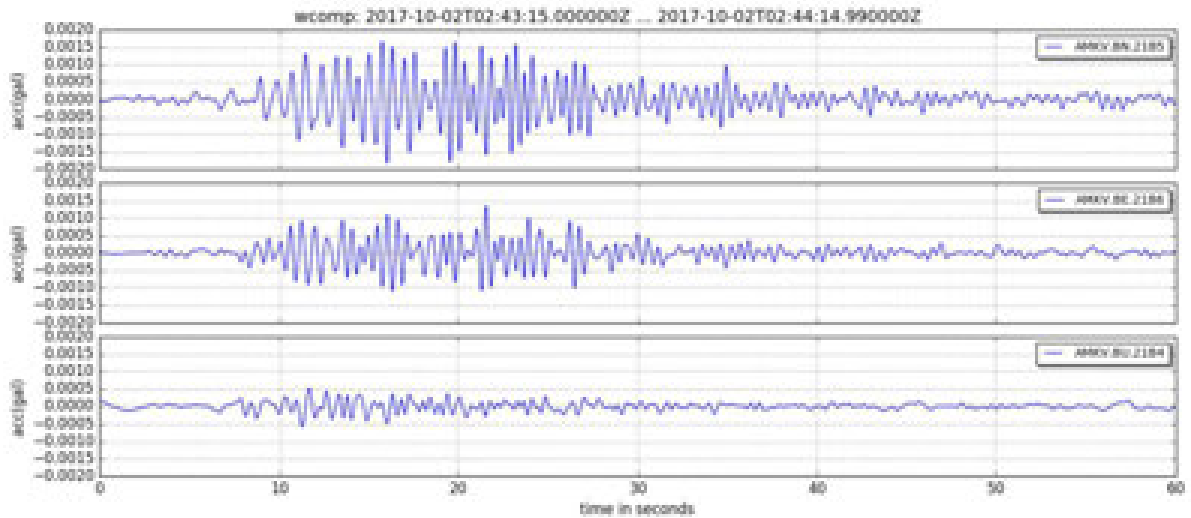


図 11 V-net 小浅間観測点（広帯域地震計，速度データを時間微分，  
2Hz のローパスフィルタをかけた波形）

図 9 の波形は観測点 OPT-B のフィルタなしの生波形である．この波形に 0.2～2Hz バンドパスフィルタをかけると図 10 の波形が抽出される．図 10 の波形の振幅及び周期は，V-net 小浅間観測点波形に 2Hz のローパスフィルタをかけた波形（図 11）のそれによく似ている．

次に，図 9 と図 11 で示したイベントの生データのスペクトルを図 12 と図 13 に示す．

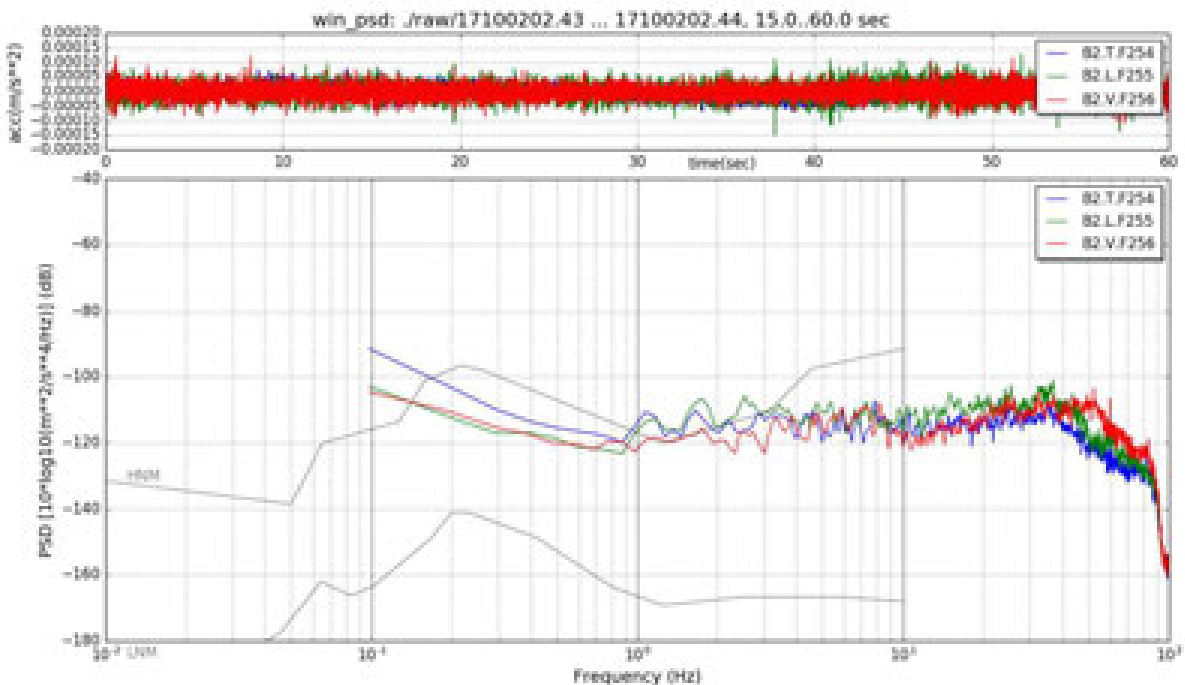


図 12 OPT-B 観測点でのスペクトル

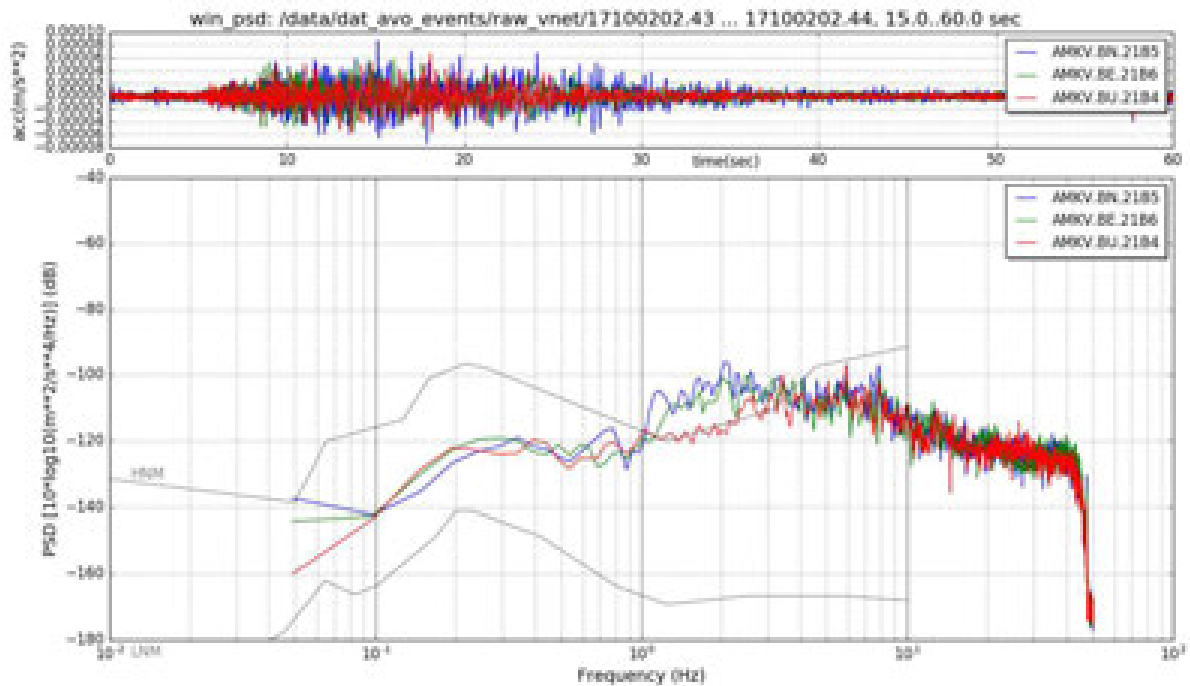


図 13 V-net 小浅間観測点でのスペクトル

図 12 のスペクトルで、1 - 10 Hz の盛り上がった部分が B 型地震のスペクトルの主要部に対応すると思われ、この帯域では図 13 と同じ傾向を示している。図 12 では 10 Hz 以上の高周波成分が大きいですが、これは V-net 観測点の孔中設置方式と光システム観測点の地表設置方式であることの差を反映していると考えられる。本イベントは前項で示した A 型地震に比べて振幅が小さいために 10 Hz 以上の帯域で両者の差が目立っている。

最後に、撤収直前の 1 月 23 日 午前に草津本白根山の噴火の波形を取得することができたので、その波形を以下に示す。

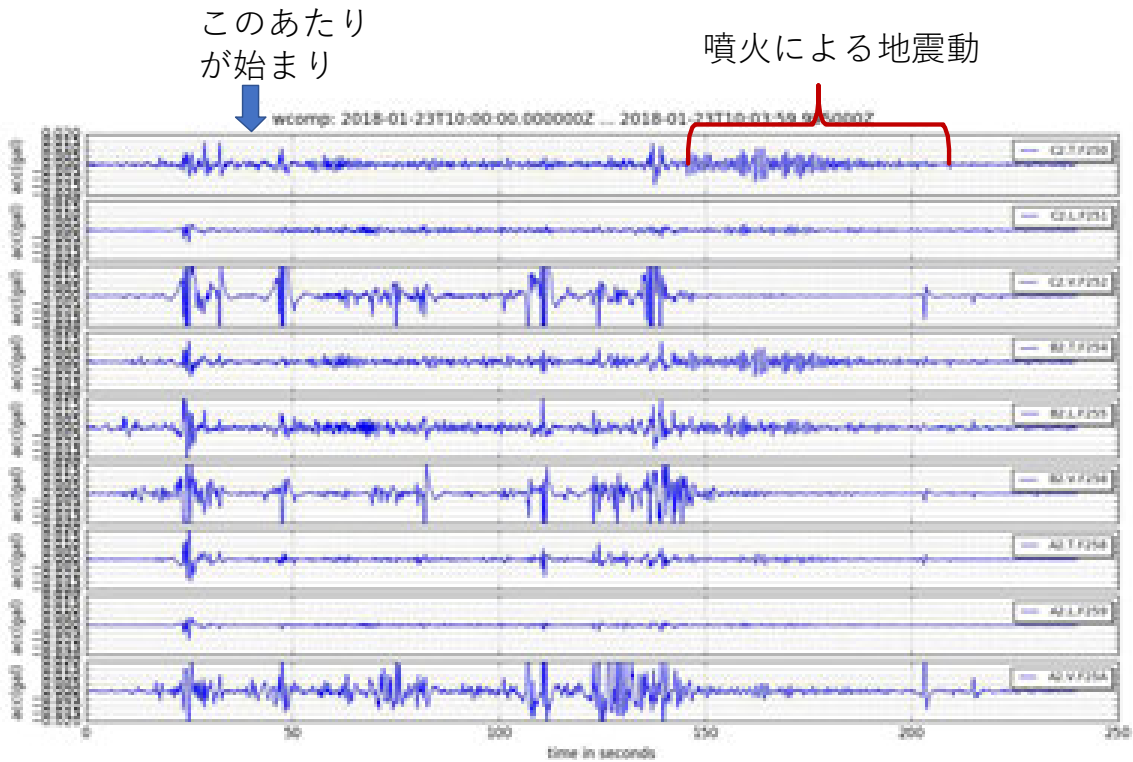


図 14 2018 年 1 月 23 日 草津本白根山噴火記録波形。図中ラベル A2 は観測点 OPT-A を、B2 は OPT-B を、C2 は観測点 OPT-C に対応している。

この観測波形では環境ノイズが大きく、2Hz のローパスフィルタをかけているが、車による振動ノイズが取りきれしていない。特に上下動成分でノイズが顕著である。



## b) 耐雷性の検証

今年度の目的の一つに、原理的に雷に強いという光センサの特徴を実証するために、雷が多い浅間山を選定し、準備を行ってきた。しかし、浅間山において 9 月 13 日から 1 月 8 日の観測期間中、落雷現象は発生しなかった。

雷については、次年度以降引き続き検討を行う。

## c) バイアスジャンプ対策の検証

バイアスジャンプは、光パルス送信部のインテンシティモジュレータ（光強度変調器）の消光比を最良に維持するために印加している直流バイアス電圧がドリフトして、装置の制御可能電圧を超えた場合に発生する。このバイアスドリフトの傾きが大きく、桜島での観測では 1 か月に 3 回のバイアスジャンプが発生した。このバイアスドリフトの傾きを小さくするために、今回はインテンシティモジュレータの RF パルス駆動側に DC オフセットを印加して RF パルスのピーク電圧を正負等しくなるような装置を追加して試験を実施した。

今回の試験期間ではバイアス電圧は自動調整するが、範囲を超えた場合に自動的にジャンプさせることは行わない設定とした。その代わりに遠隔監視を行って手動でバイアスのジャンプ処理を行った。

試験期間中 11 月 2 日から 1 月 7 日までの 2 か月間で手動での On-Off 比レベル調整を 2 回(11 月 15 日, 12 月 20 日)行った。これにより、桜島での観測に比べてバイアスドリフトの傾きは小さくなり、前述の対策は一定の効果があったと判断している。バイアスドリフトの問題は長期観測で問題となるため、引き続き改善に向けて調査、開発を進めてゆく予定である。具体的に、表 1 をもとにバイアスジャンプ対策等の改修を行うために 10 月 13 日～16 日に送受信装置を持ち帰った前後での欠測率を計算した結果を表 2 に示す。

表 2 バイアスジャンプ対策を施す前後の欠測率

	期間	全秒数	欠測秒数	欠測率(%)
対策前	2017 年 9 月 13 日～2017 年 10 月 11 日 (29 日間)	2505600	46792	1.9
対策後	2017 年 11 月 2 日～2018 年 12 月 11 日 (40 日間)	3456000	219	0.0

10 月 20 日から 11 月 1 日は、再設置後の不調があったため、測定は 11 月 2 日からとした。12 月 12 日に観測所の電源設備点検のための欠測があったので、期間を 12 月 11 日までとした。

最後に、前述のとおり、1 月 7 日にバイアス電圧を調整しても消光比を正常値にもどすことができなくなった。これらインテンシティモジュレータは開発段階から使用してきたデバイスであるため、RF パルスに過電圧が印加されたなどで、劣化していた可能性がある。

## c)-2 光レベルの変動

平成 28 年度の桜島における観測では問題とならなかったが、今回の観測期間中に光の信号レベルの調整を 2 回(11 月 1 日, 12 月 5 日)行った。光センサシステムでは受信する光パルスの干渉していない部分の立ち上がり電圧が一定以上で光パルスの取込みを開始する仕組みとなっているため、低い立ち上がり電圧ではデータの取込みができなくなる。逆に、光レベルが大きすぎると信号が飽和するため、受信される光レベルは一定の範囲にある必要がある。この光レベルが測定期間中に変動したため、光送信レベルを調整した。特に 11 月 1 日については、10 月 25 日に装置を起動し、収録再開した後に調子が悪く、遠隔での光レベル調整では修正できない状態になっていたため、現場に行き、センサを掘り起こして各センサ個別に調整をしつつ、全体のレベル調整を行って正常観測ができるようにした。

光レベルの変動は、光ケーブルおよび光センサ部分で発生していると考えている。特に偏波保持ファイバのセンサで見られる現象であるため、偏波に依存したレベル変動を生じさせる部分および部品が原因となっている可能性がある。

次に作成する観測システムでは、偏波保持ファイバではなく通常のシングルモードファイバを使う予定であるので、これは大きな問題にはならないと考えている。

さらに、受信レベルの変動が、データの取込みに大きな影響を与えるのは好ましくないので、上記の受信パルスの先頭検出の方法を変更し改善する予定である。

#### d) その他の比較

##### ノイズレベル

前述のとおり、浅間火山観測所は隣に国道 146 号が通っており、車による振動が夜中でも絶えない。その中でも、静かな時を選んで、光センサのノイズレベルを測定した。

以下の図 15～図 17 は、2017 年 11 月 7 日 午前 3 時 15 分から午前 3 時 24 分までの比較的静かな時間帯の OPT-A, OPT-B, OPT-C での 10 分間のノイズスペクトルである。

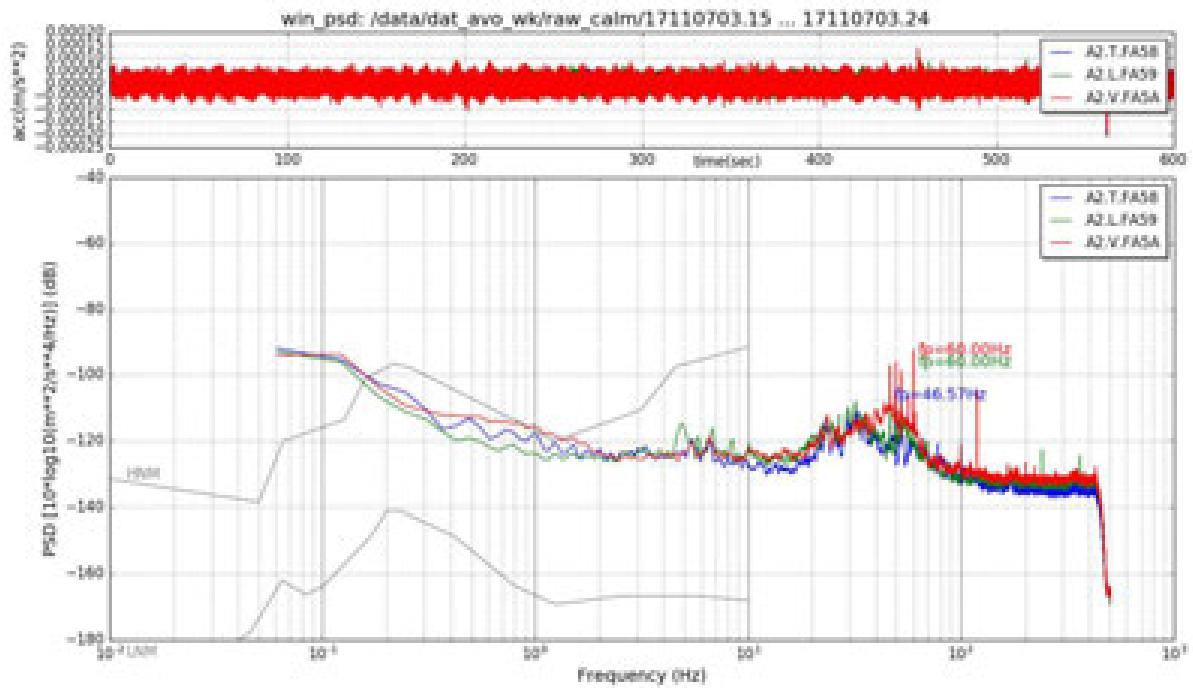


図 15 OPT-A 観測点のノイズスペクトル

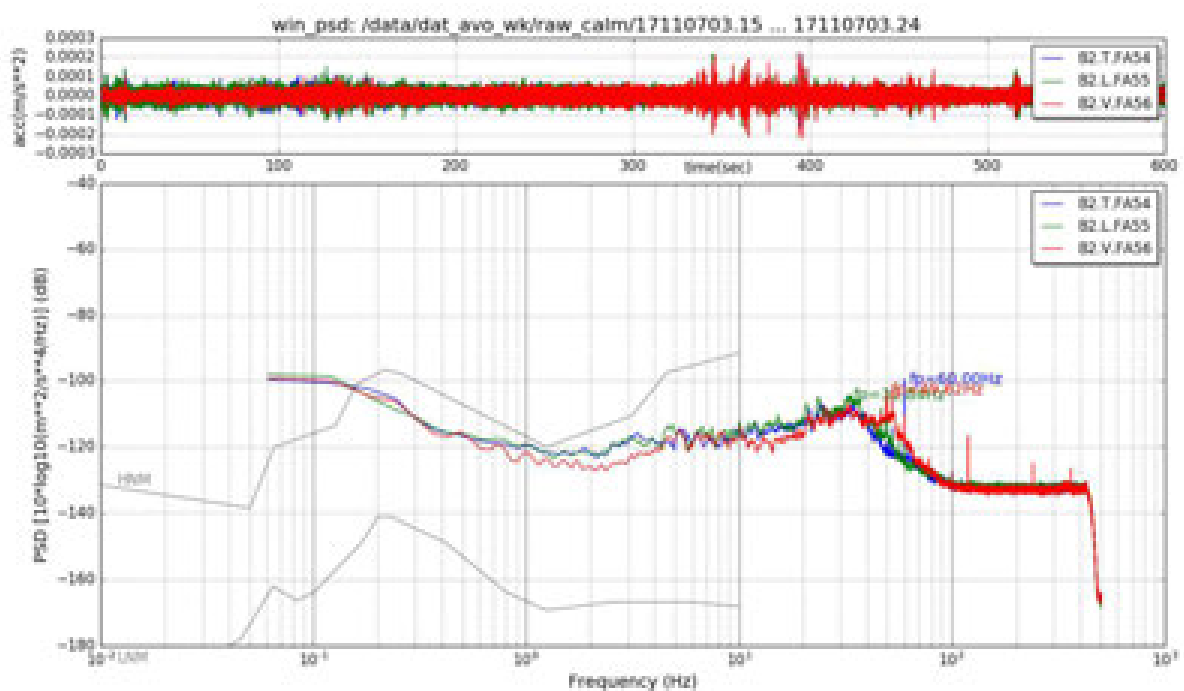


図 16 OPT-B 観測点のノイズスペクトル

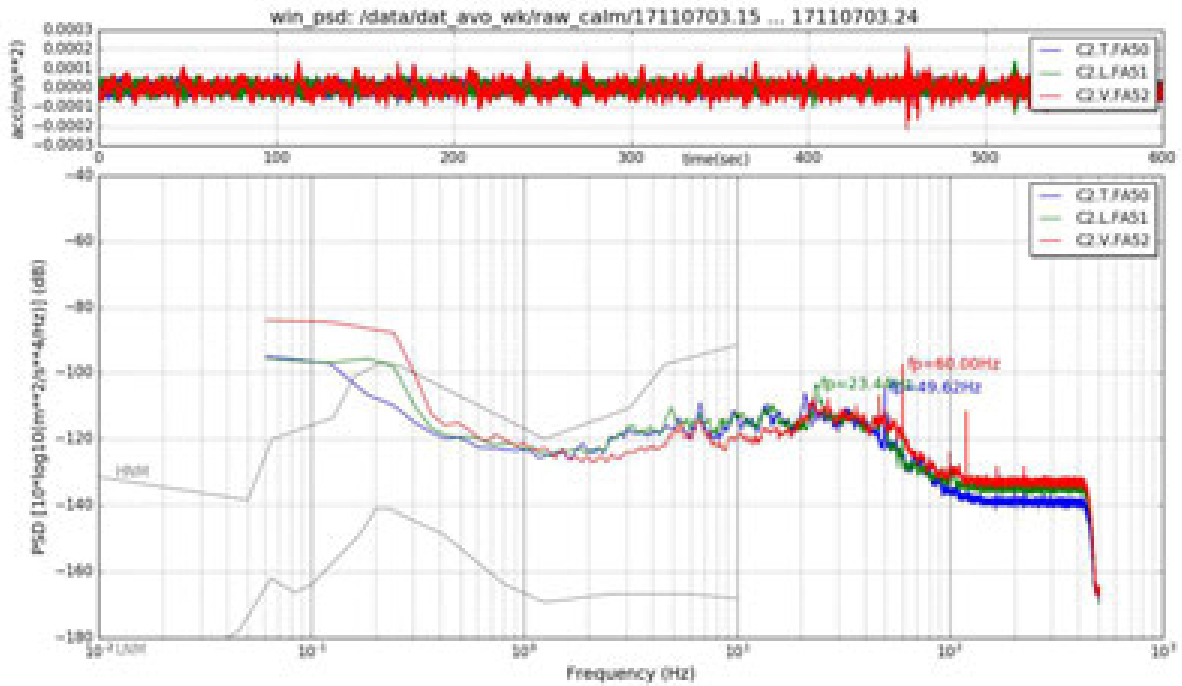
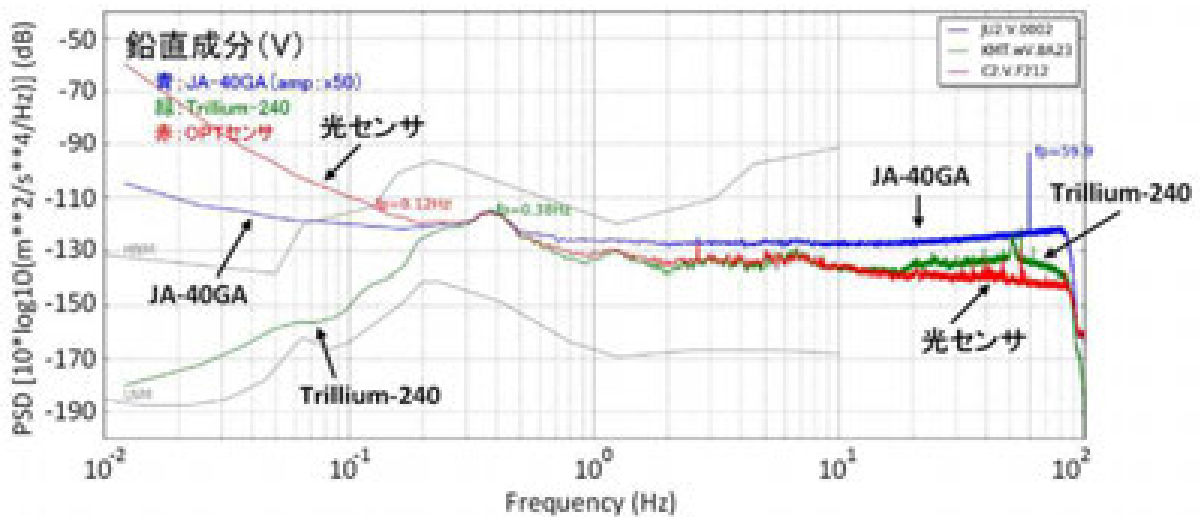


図 17 OPT-C 観測点のノイズスペクトル

図 8 比較的静かな時間帯でのパワースペクトル (2017 年 11 月 7 日 03 : 15~03 : 24)

このノイズレベルについて、昨年の桜島高免坑道でのレベルとの比較を行う。参考として、昨年度のノイズレベル測定結果を図 18 に示す。



(参考) 図 18 2016 年桜島高免坑道内で観測したノイズスペクトル

図 15~17 と図 18 を比較すると、今年度観測した浅間観測所では数 10Hz 付近のノイズレベルが高く、線スペクトル状のピークがいくつかの周波数で認められる。ちなみに今回の観測で見られる数 10Hz のノイズの盛り上がりに関しては時間が異なってもだいたい同じであるが、線スペクトル状ピークについては常時同じではなく、時間とともに変動している。

まず，図 15～17 と同じ時間帯で，各センサユニットに装備されているレファレンスの固定端のノイズレベルを調べた．図 19～21 は，横軸を 0Hz から 100Hz までのリニアスケールにした時のスペクトルである．

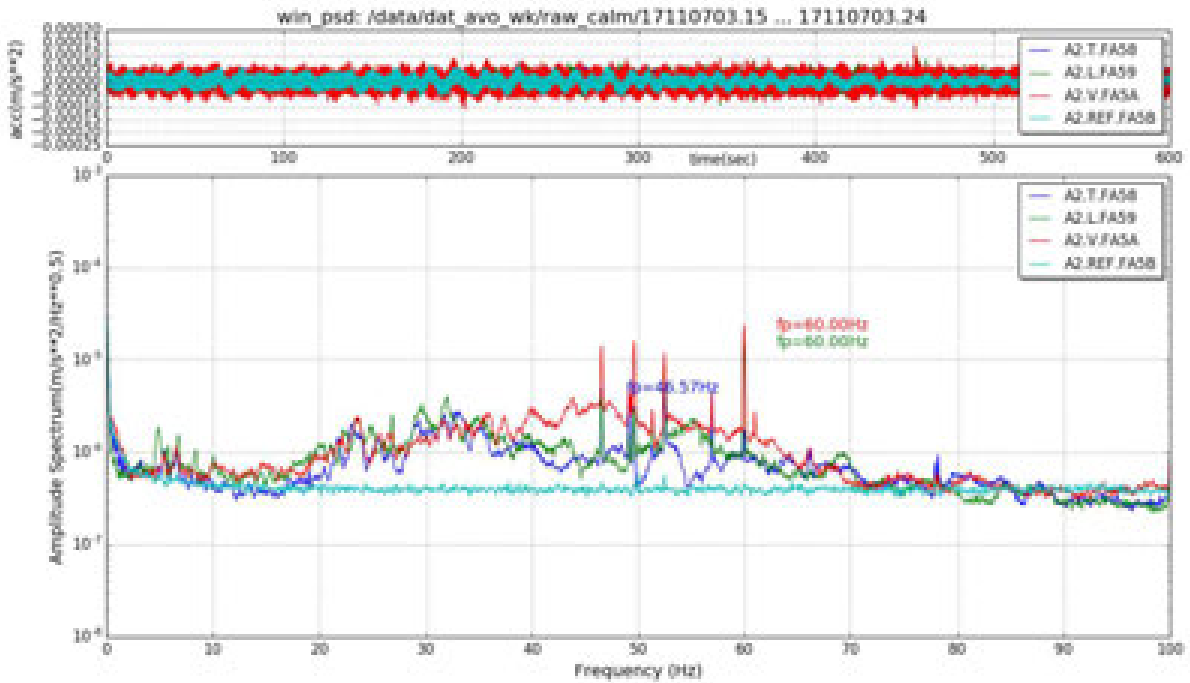


図 19 OPT-A 観測点のスペクトル．（図 15 の横軸をリニアスケールにしたもの）

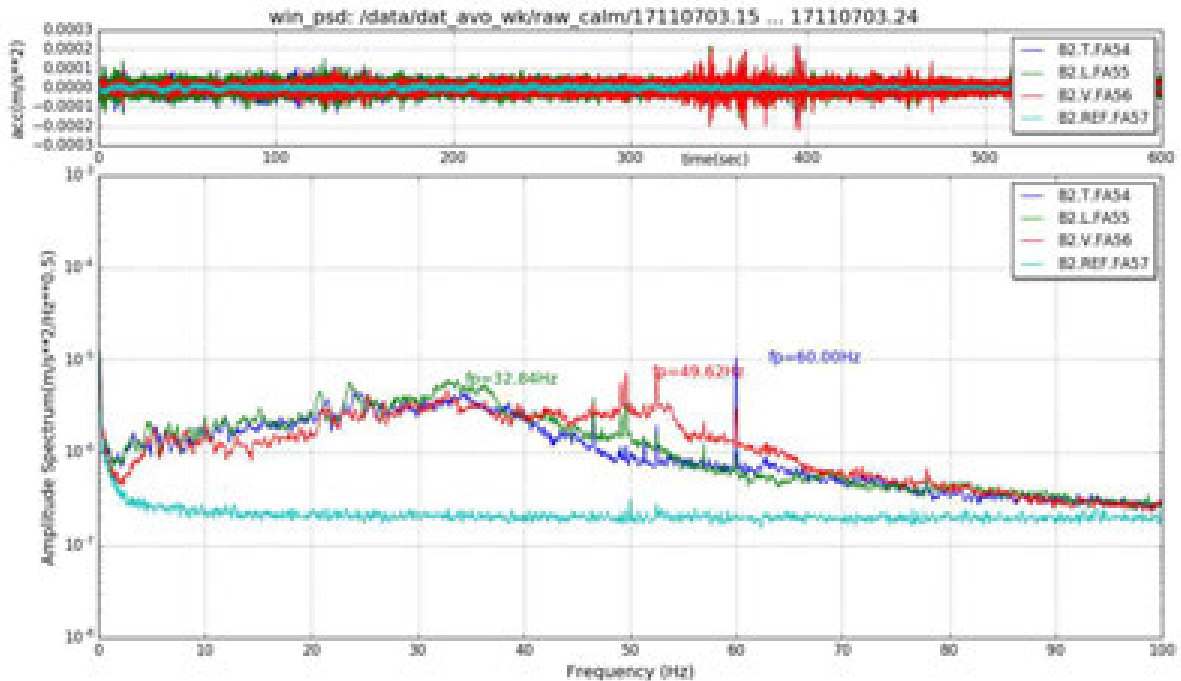


図 20 OPT-B 観測点のスペクトル．（図 16 の横軸をリニアスケールにしたもの）

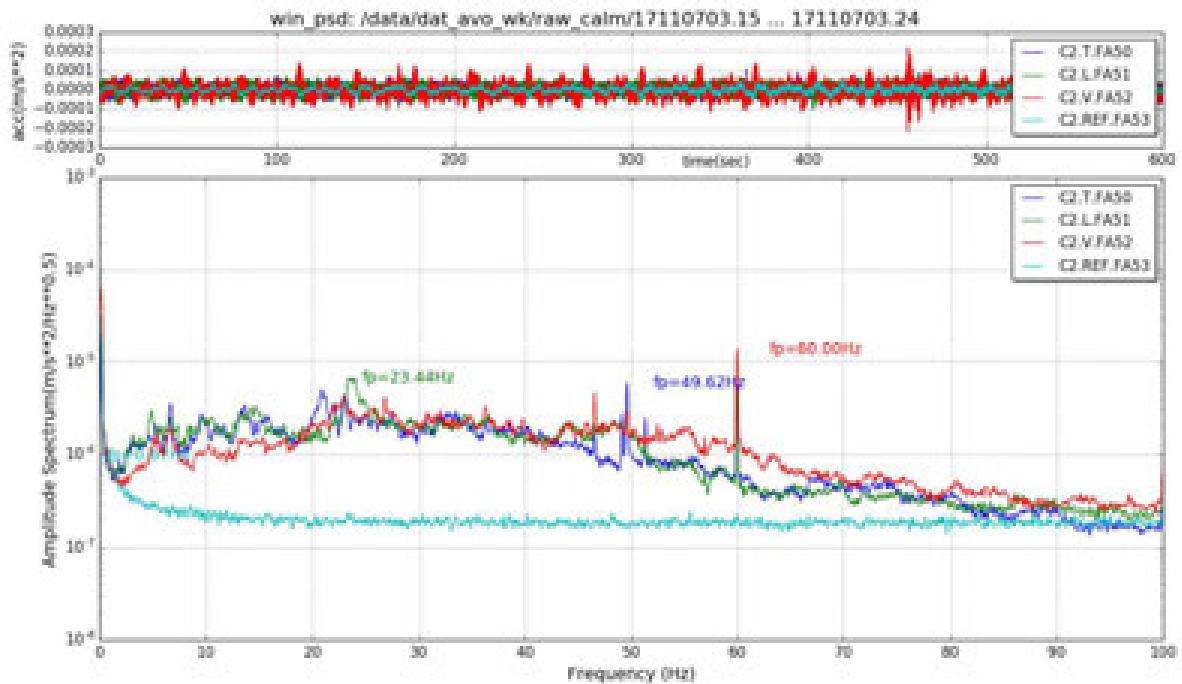


図 21 OPT-C 観測点のスペクトル。（図 17 の横軸をリニアスケールにしたもの）

図 19～21 の水色が固定端のスペクトルである。固定端のスペクトルは数 Hz から 100Hz の周波数帯域でほぼ平坦で、ノイズレベルの盛り上がりと線スペクトルが見られない。センサのチャンネルに表れているノイズレベルの数 10Hz 付近の盛り上がりと線スペクトル状のノイズは光システムのシステムノイズではなく、センサが拾っている環境ノイズであると判断できる。

次に、環境ノイズの空間分布を測定するために、白山工業製 JU410 微動計を浅間観測所構内に設置して観測をおこなった。観測した場所を図 22 に示す。

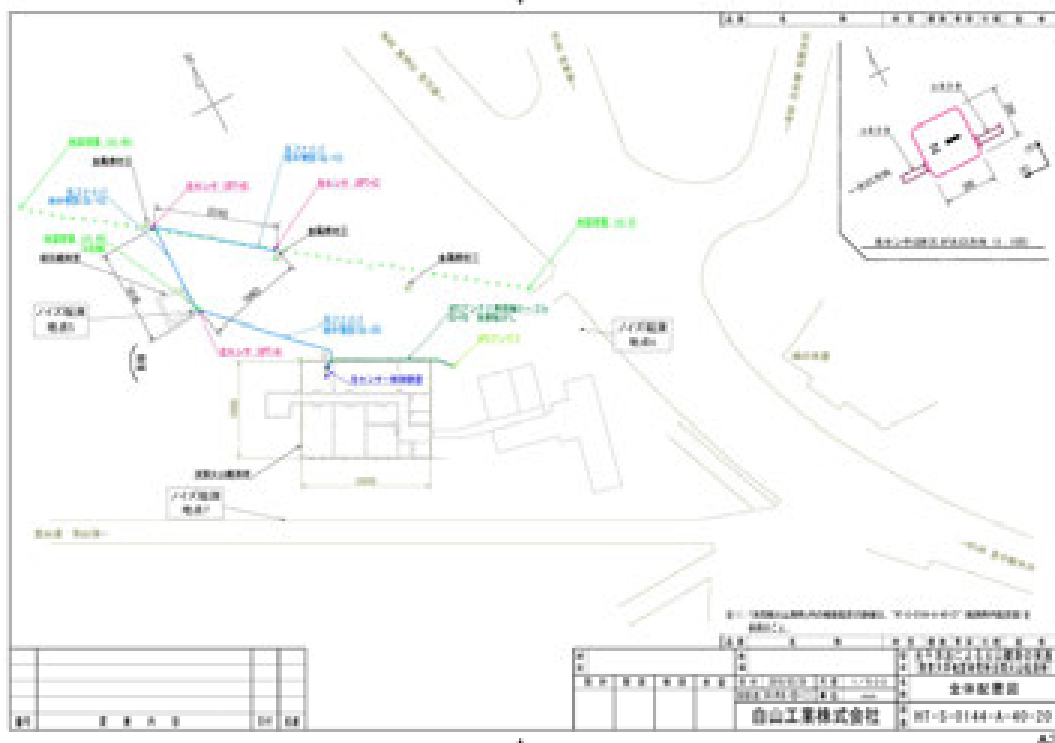
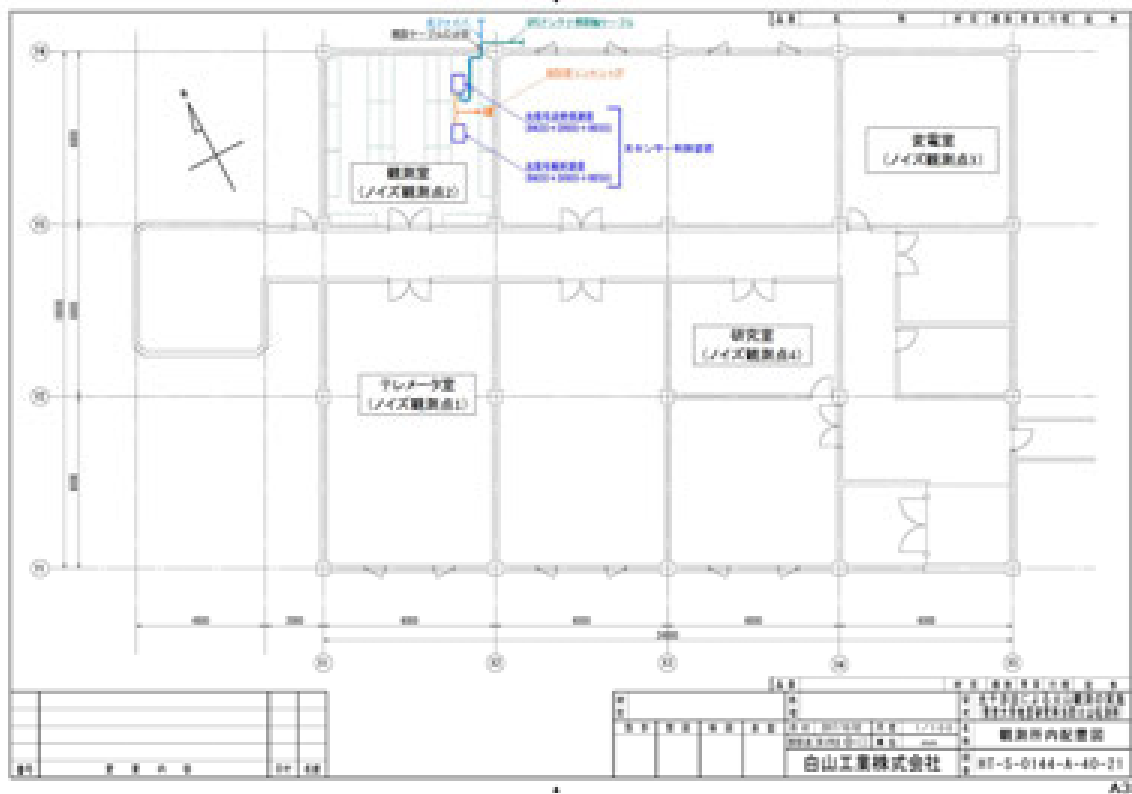


図 22 ノイズ観測地点. 地点 1 から地点 4 までは観測所本館内に、地点 5 から地点 7 までは観測所構内に位置しており、合計 7 か所で観測した.

図 23～29 に、それぞれの観測点で測定したノイズスペクトルを示す。

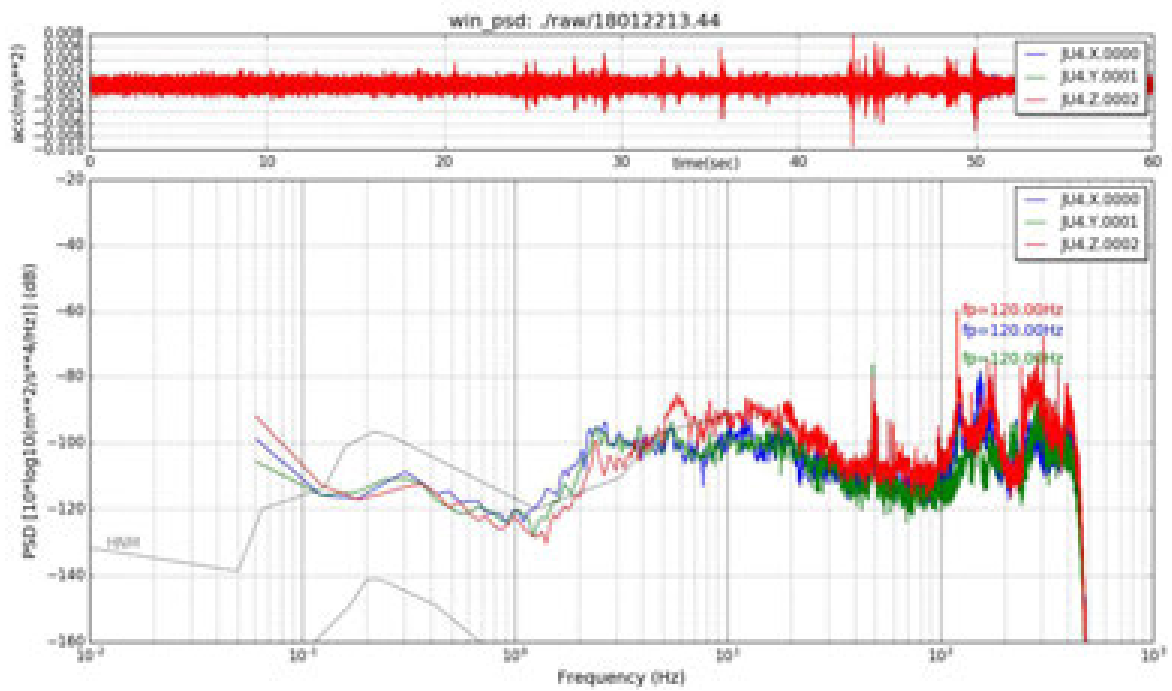


図 23 テレメータ室でのノイズスペクトル

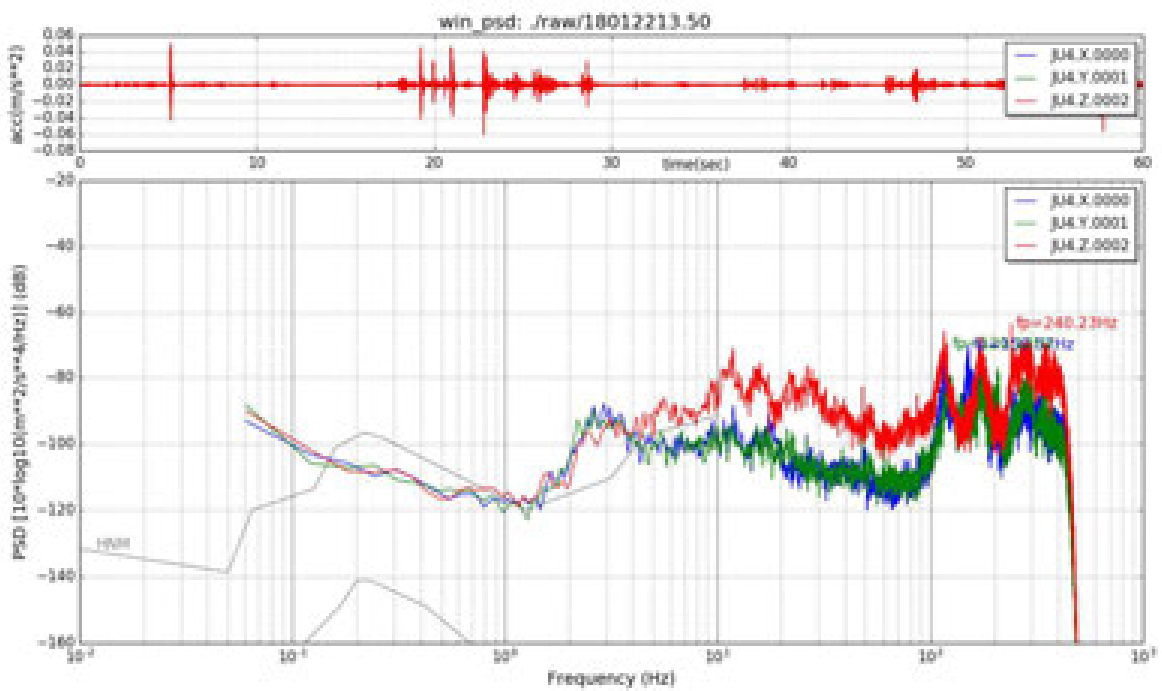


図 24 観測室でのノイズスペクトル



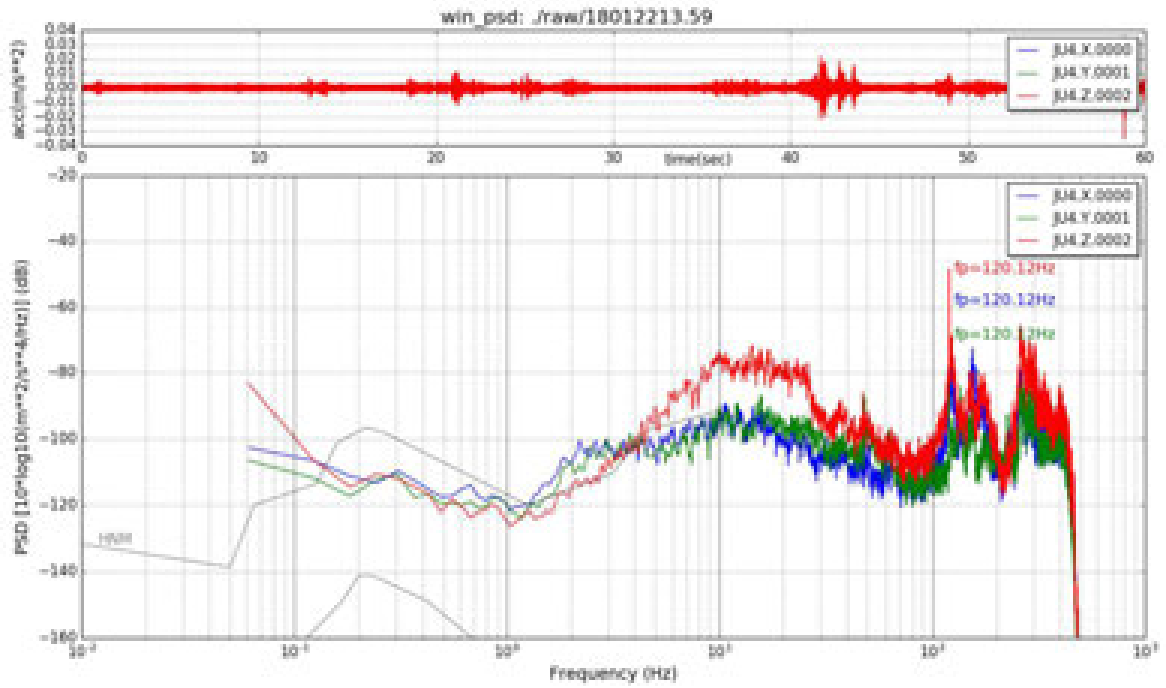


図 25 変電室でのノイズスペクトル（変電施設は未稼働）

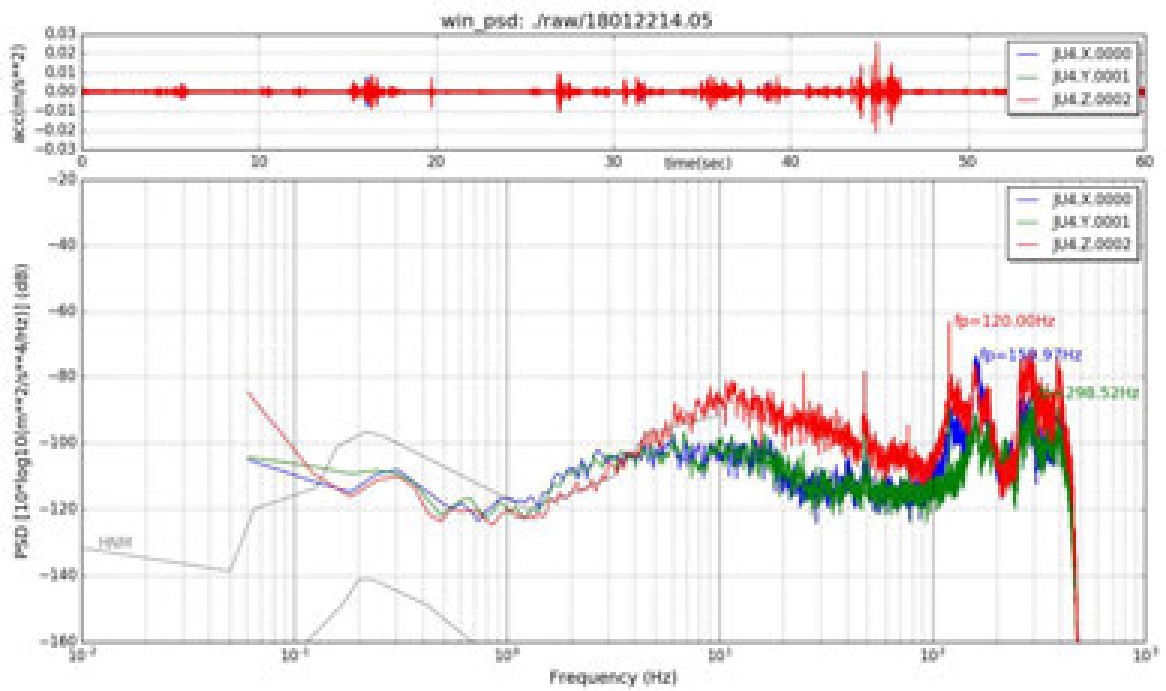


図 26 研究室でのノイズスペクトル

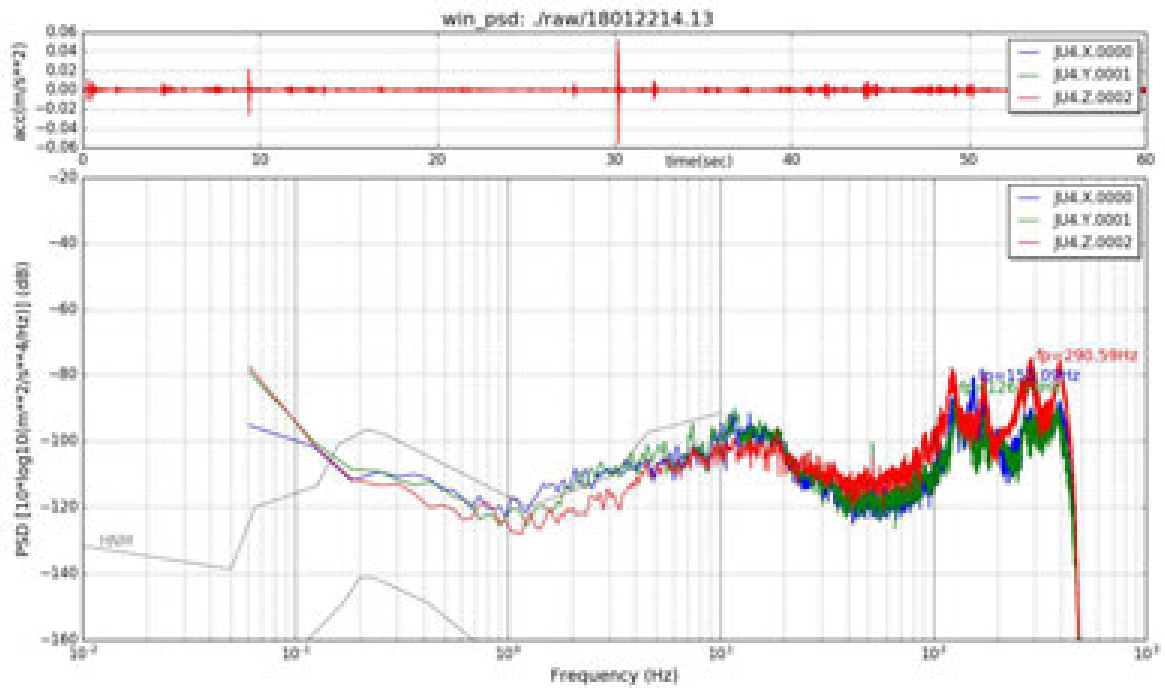


図 27 屋外, OPT-A 横の観測棟コンクリート上でのノイズスペクトル

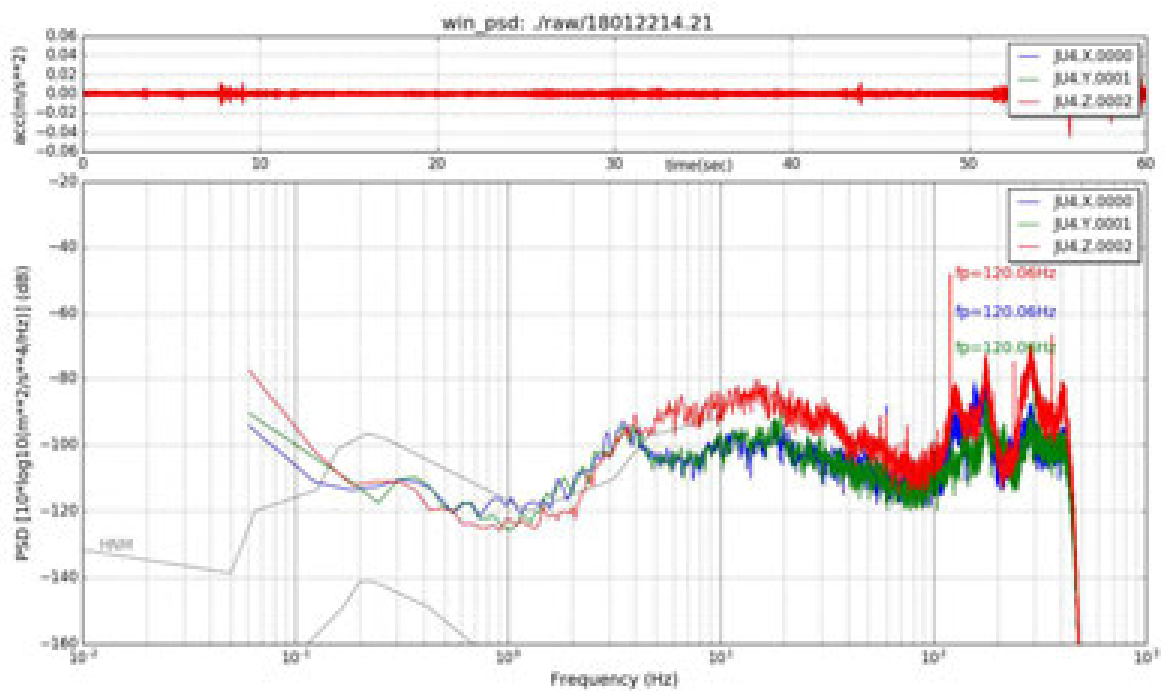


図 28 屋外, 道路そばの電柱下でのノイズスペクトル

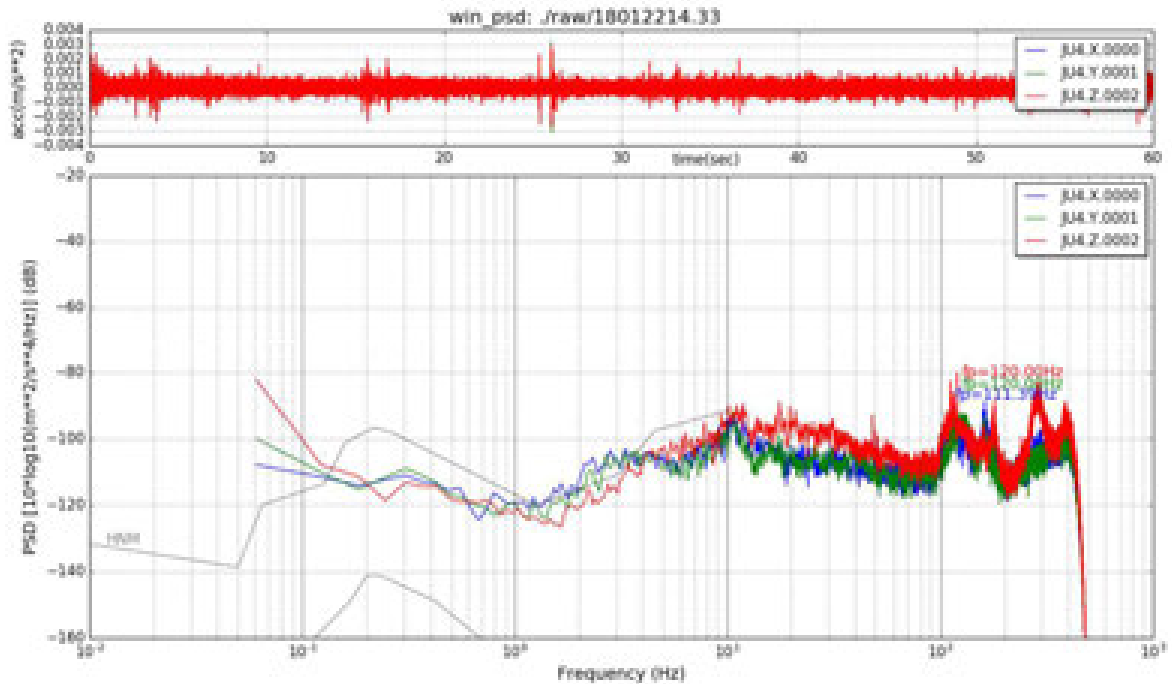


図 29 屋外，電源引込盤横でのノイズスペクトル

静穏時のノイズレベルは真夜中の静かな時のノイズレベルであり，微動計によるノイズ観測は日中の午後 2 時ごろ行われたものである．微動計のノイズレベルは静穏時のレベルと比べて 20dB ほど高いため，ほとんどの線スペクトルピークが全体のノイズに埋もれる傾向がある．それでも 60 Hz とその 2 倍の 120 Hz の成分の線スペクトルは依然として明瞭であり，本館内の地点 1 から 4 の線スペクトルのピークが屋外のそれ（地点 5, 6）に比べて大きいことが注目される．したがって光センサで観測された 60 Hz 成分および 120 Hz 成分は本館内にその源があると考えられる．したがって，これらの信号はシステムノイズではなく，浅間火山観測所に固有の環境ノイズであるということが出来る．

e) 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 サンプリングの連続データである．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．

f) 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

今回は浅間山中腹での屋外設置，かつはからずも地面が凍結する冬季を含んだ観測となった．ただ，送受信装置の調子が良くなく，1 月 8 日で観測終了となってしまった．この原因はインテンシティモジュレータの過電圧印加による経年劣化である．次回新たに作成するシステムは現方式と異なっているため，この現象は改善されることが期待される．

センサは地中に埋設した．積雪があり，地面が凍結したにもかかわらず，データを取

得することができた。

#### i. b) 運用時の作業内容

モバイルルータ設置後から回収までの約3か月間は東京で観測状況のモニタリングを行い、途中不具合発見時には迅速に現場での調整作業等を行うことができた。

#### 2) 見学会の実施

人材育成コンソーシアムに働きかけ、スケジュール調整を行ったが残念ながら折り合いがつかなかったため、見学会は実施しなかった。

#### (d) 結論ならびに今後の課題

##### 1) 結論

平成29年9月13日から平成30年1月8日の間、東京大学地震研究所浅間火山観測所構内で位相シフト干渉法を用いた振動観測装置を用いて観測を行った。途中送受信装置の改修などによる欠測があったので、実稼働期間は108日間であった。その結果、124Gbyteに及ぶ連続データを収録した。得られた連続データから火山性A型地震1回、B型地震51回に加えて、自然地震を417回記録した。

観測記録には数10Hz以上の周波数帯域で、線スペクトルノイズが多くみられた。これは光システムに組み込んでいる、レファレンスとしての固定端の記録の検討及び微動観測による測定結果から、システムノイズではなく設置場所固有の環境ノイズであることが示された。

システムの長期安定性についてはバイアスジャンプによる欠測の改善が挙げられるが、これについては昨年度約1か月の観測で3回発生していたのを、今回は約3か月間で2回の調整ですみ、改善が見られた。この安定性はシステム全体の安定性に直結するため、今後さらなる改善につとめたい。

なお、今回の連続期間中の欠測率は0.95%であった。また1月8日には調整してもデータを取得することができなくなった。光送信部のインテンシティモジュレータへの過電圧の印加などによる劣化が原因であると考えられる。撤収後の点検の結果から、この試作品は来年度以降は使用に耐えられないと判断する。来年度は新しく作成するためのセンサを製作することと、再来年度に使用するための新しい光干渉システムの作成を開始する予定である。平成31年度はこの新しいシステムで観測を行う予定である。

雷については、今年度の観測期間が雷シーズンから外れてしまったため、観測期間中には雷が発生せず、検証することができなかった。この件については引き続き検証を行う予定である。

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判明した。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

バイアスジャンプについては前年度から改善されたものの、まだ発生はするため、さらなる改善を行う必要がある。

周期 2 秒以上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。引き続き究明が必要である。

現在のシステムはもともと JOGMEC での物理探査等を想定していたこともあり、現在固有振動数が約 50Hz の振動子を使用している。火山観測をターゲットにする場合には、振動子を長周期化する必要がある。ただし、振動子に光を当てる機構やダンパの問題等もあり、試作してみないとわからない点が多いが、将来的には作成する必要がある。

雷については検証できなかつたので、引き続き検討課題である。

耐環境性としては、今回地面が凍結中でも観測することができた。一方、火山観測としては高温で観測できることが望ましい。現在の市販品でも 200°C 程度は大丈夫な光部品が存在するので、高温に強いセンサの作成も検討課題である。

#### (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。

また、東京大学地震研究所には浅間火山観測所の利用にあたり共同利用研究の一環として光システムの運用に関する様々な面でのご高配をいただいたほか、光システム観測期間中の同所縦坑内地震観測波形データのご提供もいただいた。

浅間火山観測所構内での光システムの設置、センサの埋設等に関して、秋田大学国際資源学部の大胡田拓也氏、および秋田大学大学院国際資源学研究科博士前期課程の小林拓也氏にご協力いただいた。

これらの方々には特に感謝し、心より御礼を申し上げます。

#### (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) 気 象 庁 , 気 象 庁 震 源 リ ス ト , [http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/daily\\_map/index.html](http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/daily_map/index.html), 気象庁, 2017.
- 3) 気象庁地震火山部火山監視・警報センター, 草津白根山の火山活動解説資料(平成 30 年 1 月), 気象庁, 2018.
- 4) 防災科学技術研究所, F-net 広帯域地震計によって観測された 2018 年 1 月 23 日草津白根山噴火に伴う長周期地震動 , 火山噴火予知連絡会拡大幹事会 資料② 平成 30 年 1 月 26 日, 2018.

- 5) Minakami, T., Fundamental research for predicting volcanic eruptions Part 1. Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo, 38, 497-544, 1960.

(g) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
平山義治，筒井智樹，池田敏晴，竹内敬二，安藤浩	位相シフト光パルス干渉法振動観測システムによる火山観測の試み	平成29年日本火山学会秋季大会（会場：熊本大学）	平成29年9月23日
平山義治，筒井智樹，池田敏晴，竹内敬二，安藤浩	位相シフト光パルス干渉法振動観測システムによる火山観測の試み	光ファイバセンシング振興協会第9回シンポジウム（会場：東京工業大学）	平成29年10月30日
平山義治，筒井智樹，池田敏晴，竹内敬二，安藤浩	位相シフト光パルス干渉法振動観測システムによる火山観測の試み	月刊地球平成30年3月号特集「噴火現象の現状と今後の火山噴火予測研究の方向性」	平成30年3月

(h) 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30年度の業務計画案

課題責任機関（秋田大学）と連携して，本業務を推進し遂行するための準備をするとともに，3成分センサを2セット作成し，自己共振周波数の確認及び減衰定数の調整などを行い，火山観測に適した帯域の信号を取得できるセンサを開発し，試作する。

また，H32年度から開始される秋田大学へのリース用の新しい光センサシステムの作成を開始する。

① 浅間観測所予備調査

前年度の浅間火山長期観測結果を踏まえ，次年度以降の光センサシステムによるデータ取得実験を実施するために東京大学地震研究所浅間観測所とその周辺において予備調査を行う。主な準備内容は設置予定場所の下見を行うこととともに，観測点配置計画の調整等である。

## ②3成分光センサの開発

### a. 光センサの作成

センサはバネマス系の加速度センサを想定している。火山観測に適した固有振動数と減衰定数をもった1成分光センサを作成する。なお、火山研究運営委員会が出された意見も考慮して、センサ固有周期の長周期化の試みに取り組む。

### b. 1成分光センサの性能検証

光センサの性能を検証し、修正事項があれば修正する。

### c. 3成分光センサの作成と検証

光センサを3つと、振動子部分がない固定端のレファレンスの合計4つを組み合わせで格納するセンサユニットを作成し、光センサを組み込んで3成分光センサを作成する。その後、作成した光センサの性能を検証する。

### d. 総括

新たに作成した光センサの総括を行う。

## 4. 活動報告

電子メールによる持ち回り会議のほか、数回の対面会議を行った。以下、対面会議について記す。

### 4. 1 会議録

○平成 29 年 8 月 29 日 第 1 回会議

場所：浅間火山観測所

時間：随時

出席者：筒井，平山，池田，竹内，安藤，辻 技術専門員

会議内容： 装置設置場所等の打ち合わせ

○平成 29 年 12 月 11 日 第 2 回会議

場所：白山工業株式会社（府中）

時間：随時

出席者：筒井，平山，池田，竹内

会議内容：観測記録とその解釈について

○平成 30 年 1 月 27 日 第 3 回会議

場所：火山 PJ 総合フォーラム会場（池袋）

時間：火山 PJ フォーラム開始前

出席者：筒井，平山

会議内容：観測報告

○平成 30 年 2 月 16 日 第 4 回会議

場所：霞ヶ関ビル

時間：13時～15時

会議内容：評価調査票の内容，今後の事業方針，光システムの今後の展開について

○平成30年3月20日 第5回会議

場所：秋田大学国際資源学部1号館 資源開発セミナー室

時間：9時半～13時

出席者：筒井，平山，池田，竹内，安藤

会議内容：平成29年度総括，平成29年度報告書，今後のスケジュール，平成30年度実施内容，その他。

#### 4. 2 対外的発表

成果発表

・平成29年日本火山学会秋季大会（会場：熊本大学）にて発表（発表A3-11，平成29年9月23日）

・月刊「地球」特集：「噴火現象理解の現状と今後の火山噴火予測研究の方向性」に「位相シフト光パルス干渉法振動観測システムによる火山観測の試み」を寄稿。

・光ファイバセンシング振興協会第9回シンポジウム（会場：東京工業大学）にて「位相シフト光パルス干渉法振動観測システムによる火山観測の試み」を発表（平成29年10月30日）。

情報発信

・白山工業 Web ページ「はくさん研究室 光センサー地震計」

URL: [http://www.hakusan.co.jp/LABO/opt\\_fiber/](http://www.hakusan.co.jp/LABO/opt_fiber/)

#### 5. むすび

現在活動中の浅間山において，位相シフト光干渉法を用いた観測装置（以下，「光センサシステム」という）を投入して火山観測を行い，バイアス電圧ジャンプによる欠測発生現象，システム耐久性の問題，センサ検定方法の確立等にも取り組みながら火山性地震および火山性微動のデータを取得した。また本計画の目標の一つである多点観測の高精度な実施を狙って，光センサ観測網内の浅部構造調査を実施した。

光センサシステムは2017年9月13日から2018年1月8日までの118日間のうち108日間にわたり東京大学地震研究所浅間火山観測所構内で稼働し，2018年1月23日に撤収された。稼働期間中に浅間山で発生した火山性地震はA型1イベント，B型51イベントの記録に加えて，撤収直前の一時的稼働中に1月23日午前10時頃発生した草津本白根山の爆発地震の記録も得ることができた。これらの火山性イベント記録に対して到来方向と振動軌跡の解析を行い，先行研究の内容と整合することを確認した。

さらに近傍発震による光センサの検定作業を2回にわたり実施した。設置直後と撤収



直前の2回の検定作業の実施により、応答波形の変化を得るとともにこの検定方式の問題点が明らかになった。今後はより良い検定方式の確立および実装に取り組みたい。

また、光センサシステムのバイアス電圧ジャンプによる欠測の軽減対策後の欠測率には改善が見られた。しかし、バイアス電圧を与える光デバイスの劣化の著しい進行が表面化し、稼働期間末期には所期の性能を発揮し得ない状況に陥った。これによって本年度用いた試作機は、後年度のさらなる試験観測に供することが困難な状態になった。また、事業を継続するためには引き続く平成30年度に新しい火山観測に最適化されたシステムの製作が必要となった。この現象の原因究明を通して、試作過程でのシステム構成デバイスの取り扱いに関するノウハウを得ることができ、後年度製作の新システムの実験に活かされることになる。

さらに評価会等の場で、センサ長周期化、耐熱化の意見も出されたが、この要素は火山観測には重要なものであり、センサ長周期化を手始めに段階的に後年度に製作の新システムへの適用を行ってゆくことにする。

なお、平成29年度観測の一つの目的として耐雷性の検証が挙げられていたが、諸般の事情により観測開始が遅れ現地における雷多発シーズンを逸したため、実証には至らなかった。この問題に対しては新システムで引きつづき検証の機会を作ることとする。

今後これらの課題の解決に取り組み、検証を行いつつ火山観測に最適化された光センサを用いた実用火山観測システムの構築を続けてゆきたい。