

3. 研究報告

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科	准教授	筒井智樹	tomoki@gipc.akita-u.ac.jp
	部長	平山義治	hirayama@hakusan.co.jp
白山工業株式会社 基盤開発部	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：

平成29年度は浅間火山に光センサシステムを設置して試験観測を実施し、浅間山で発生したA型地震1回、B型地震51回を記録するとともに、自然地震417回を記録した。課題責任機関は主に以下の項目を実施した。

- 1) 光センサシステムで取得されたデータを火山学的に解析し、火山性地震の識別、火山性地震の振動軌跡解析、火山性地震の到来方向解析を施した。その結果、地震波の到来方向に系統的な偏りがあることが明らかになった。
- 2) 平成29年度光観測網内部の表層地震波速度調査を実施し、地表面から約20mまでの深さの地震波速度を明らかにした。光観測網内はほぼ水平成層であるほかに、局所的に高速度体が存在していることが明らかになった。

共同実施機関は火山観測とその実施準備を行い、主に以下の項目を実施した。

- 1) 約3ヶ月にわたる観測運用を行い、長期運用時の安定性を検証した。
- 2) 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検証を行い、欠測時間が短縮した。

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す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。

令和2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。令和2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．

令和 3 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) 令和 3 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．

令和 4 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．

前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．

令和 5 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) 令和 5 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。

令和6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

前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。

令和7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)令和7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30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. 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。また共同実施機関との間で試作品の確認のためのやりとりが予想されるので、運送料を計上している。

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。関連する会議等への出席のための旅費を計上している。

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。

(2) 平成30年度の成果

(a) 業務の要約

平成30年度は3つの主要な業務を行った。

- 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 光センサシステム観測の総合評価および総括
- ③ プロジェクト運営

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では a. データ解析と b. 光センサによる火山観測の準備とを実施した。

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、より精密な解析を試みた。具体的には各点毎に表層地震波速度構造から得られた走時補正值を推定し、この値を用いた走時補正を施して火山性地震到来方向の推定を行った。その結果、光センサ観測点個別の表層地震波速度構造に基づいた走時補正值の適用は必ずしも推定の改善に結びつかず、観測値を含む周囲の大局的な構造の寄与が大きいと推察された。

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った。下見の結果、次年度以降の観測のセンサ設置地点の候補として防災科学技術研究所小浅間観測点（以下、小浅間観測点と称する）とその周辺を、光送受信装置の設置場所として東京大学地震研究所浅間火山観測所（以下、浅間火山観測所）を選定し、観測点配置計画の調整を行った。さらに小浅間観測点と浅間火山観測所間に既設の光ファイバケーブル敷設状況および接続状況の調査を行ったが、両者間に既設の光ファイバ系統には空き系統がないことが判明した。

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った。特に、共同実施機関によって平成30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った。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、整理した。

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した。

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」との連携

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ことにしてはいたが、平成 30 年度は新たな火山観測データを得なかったため、特段のデータ提供を行わなかった。

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」との連携

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把握に務めた。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、他課題と連携を模索した。

3) 火山研究人材育成コンソーシアム構築事業

平成 30 年度は火山観測を実施しなかったため、同コンソーシアムには見学可能の申し入れを実施しなかった。

(b) 業務の実施方法

平成 30 年度は、その前年度に共同実施機関（白山工業株式会社）と連携して長野県と群馬県の県境に位置する浅間火山において行った試験観測で得られたデータの解析と新しい光センサシステムの製作、次年度以降の試験観測のための下見を中心として事業を行った。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。

試験観測のための下見を行うにあたり、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にご提供いただいた。さらに下見にあたり、長野県北佐久郡軽井沢町長倉 防災科学技術研究所小浅間観測点とその構内を防災科学技術研究所にご提供いただいた。

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. データ解析

b. 光センサによる火山観測の準備

② 光センサシステム観測の総合評価および総括

③ プロジェクト運営

b) 共同実施機関

① 浅間観測所予備調査

② 3 成分光センサの開発

a. 光センサの作成

- b. 1 成分光センサの性能検証
- c. 3 成分光センサの作成と検証
- d. 総括

(c) 業務の成果

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

平成29年度に浅間火山において光センサシステムを用いて火山観測を行ったデータに表層構造から求めた走時補正を施し、解析結果の検討を行った。

a-1. 平成29年度観測の概要

平成29年度の観測では光センサシステムを東京大学地震研究所浅間火山観測所構内に設置して観測を実施し、データを取得した。光センサシステムの原理は文献1)に示され、同システムは「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。

実際に用いた光センサ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であった。この光センサシステムは光送受信機から伸ばされた1対の光ファイバの先に3つのセンサがそれぞれ直列接続されるという構成である。

平成29年度の観測では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ケーブルで接続した。本報告では観測点の総称名をAV0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。

図1に浅間火山観測所構内における光センサシステムの配置を関連する観測点とともに示す。3つのセンサユニットはいずれも地表に設置され、1辺約30mの三角形の頂点をなすように配置された。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。

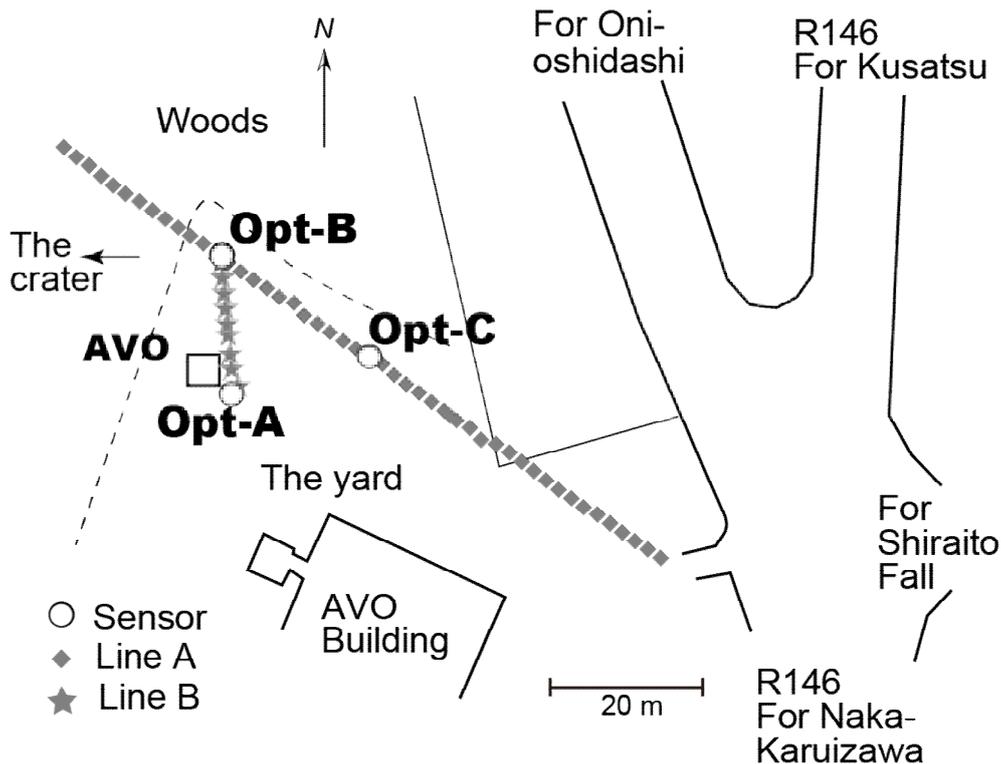


図1 光センサシステム設置図

このような観測点配置をとった理由は、本計画の到達点である多成分観測を応用した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新燃岳火口を取り囲む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。

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2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。

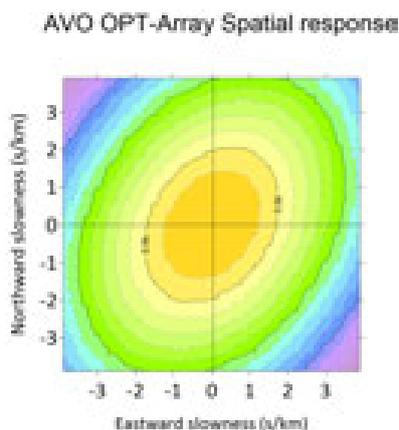


図 2. 光センサアレイの空間応答特性

図 2 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 s/km から 3.8 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。

表層構造調査

平成 29 年度は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 1 に示す。測線は主測線(Line A)と副測線(Line B)の 2 本を設定した。主測線上には Opt-B 点と Opt-C 点が位置し、副測線上には Opt-A 点と Opt-B 点が位置する。図 1 中の☆印が副測線ショットポイント、◇印が主測線受振点、○印が光センサ設置点である。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 (line B) 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。

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。

a-2. 平成 29 年度観測で得られたデータの概要

浅間火山観測所構内における観測は 2017 年 9 月 13 日から 2018 年 1 月 8 日まで 118 日間にわたり実施された。浅間山で発生した火山性地震は A 型 1 イベント, B 型 51 イベントの記録を得た。また火山性ではない自然地震は 417 イベントも観測した。

観測された火山性地震イベントの分類は 文献 5 の記述を参考にした。観測された火山性地震イベントのうち, 1 Hz のローパスフィルターを施した A 型イベントを図 3 に, B 型イベントを図 4 に示す。

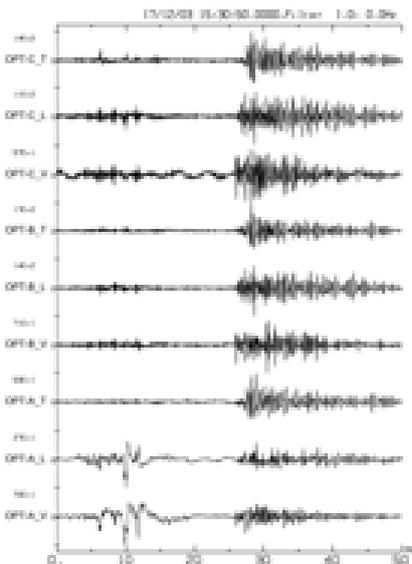


図 3. A 型地震記録

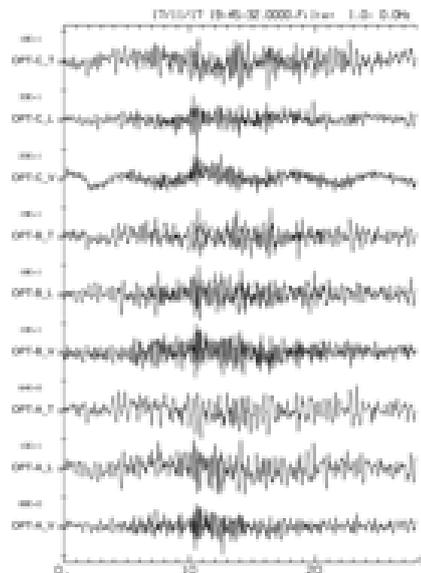


図 4. B 型地震記録

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．

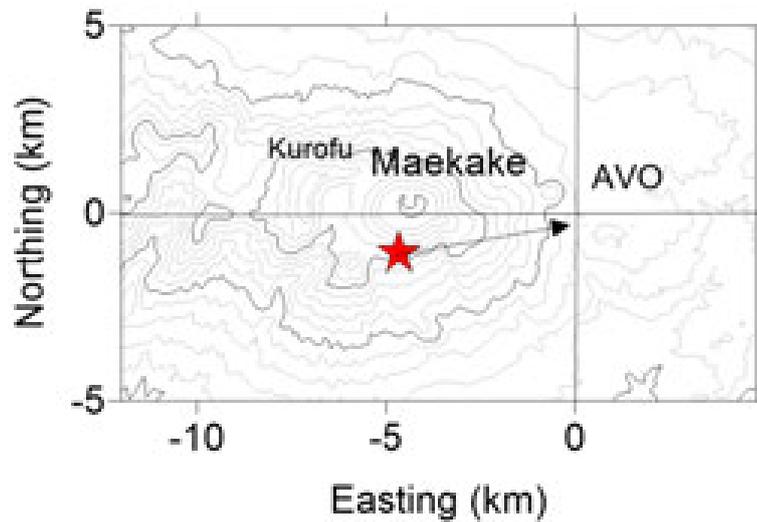


図 5. イベント 03153110. 星印は震央を示し，AVO は光センサ設置点を示す

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 5）．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 6 上段に示す．図 6 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．

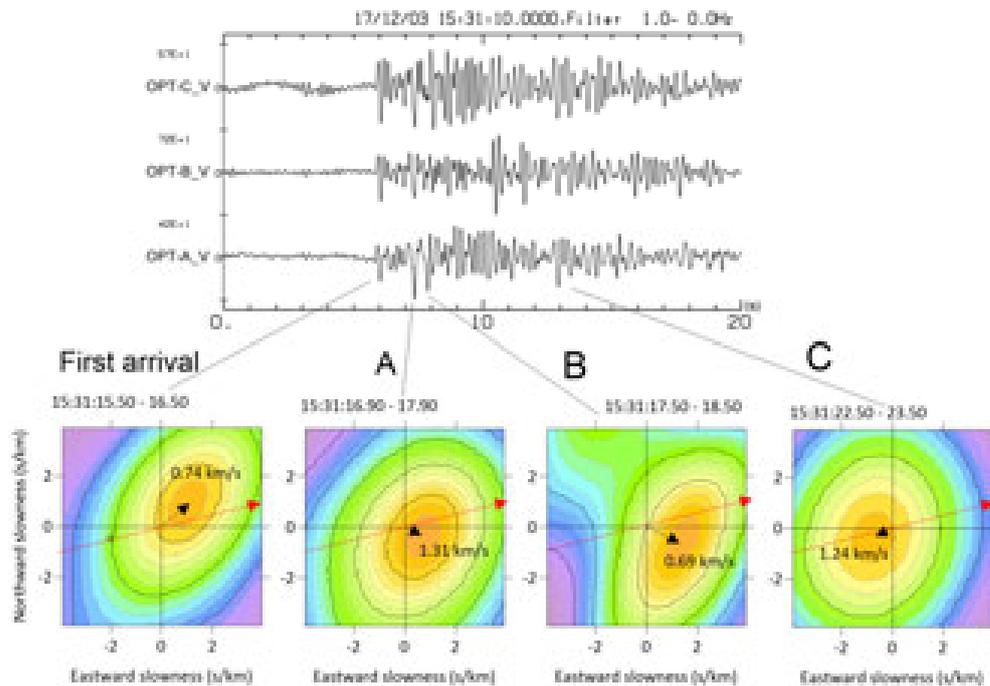


図 6. イベント 03153110 の各相の到来方向と見かけ速度．赤矢印は本来の伝播方向を示す．

到来方向解析の結果は図 6 下部に示されている．図 6 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，後続の図 7 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（ hodogram ）を図 7 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．

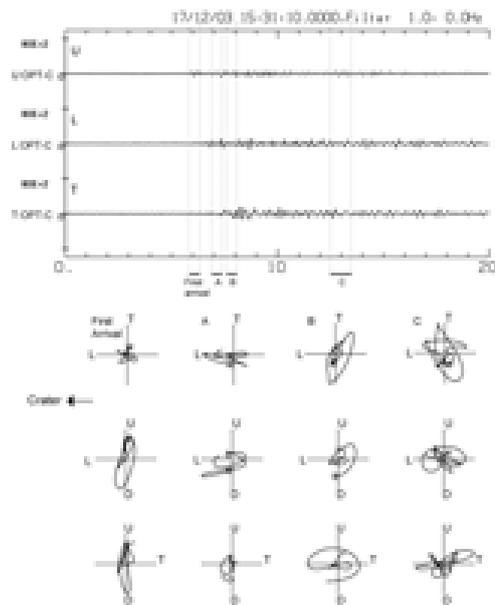


図 7. Opt-C 点のホドグラム

図 7 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．

表層構造調査

主測線(Opt-B,Opt-C 間)の観測波形例を図 8 に，解析結果を図 9 に示す．

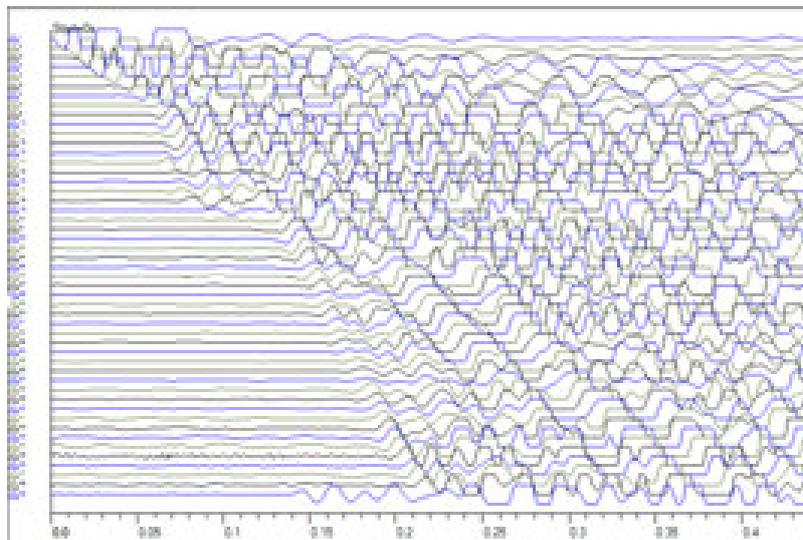


図 8 主測線観測波形例 (2m 地点におけるショット)

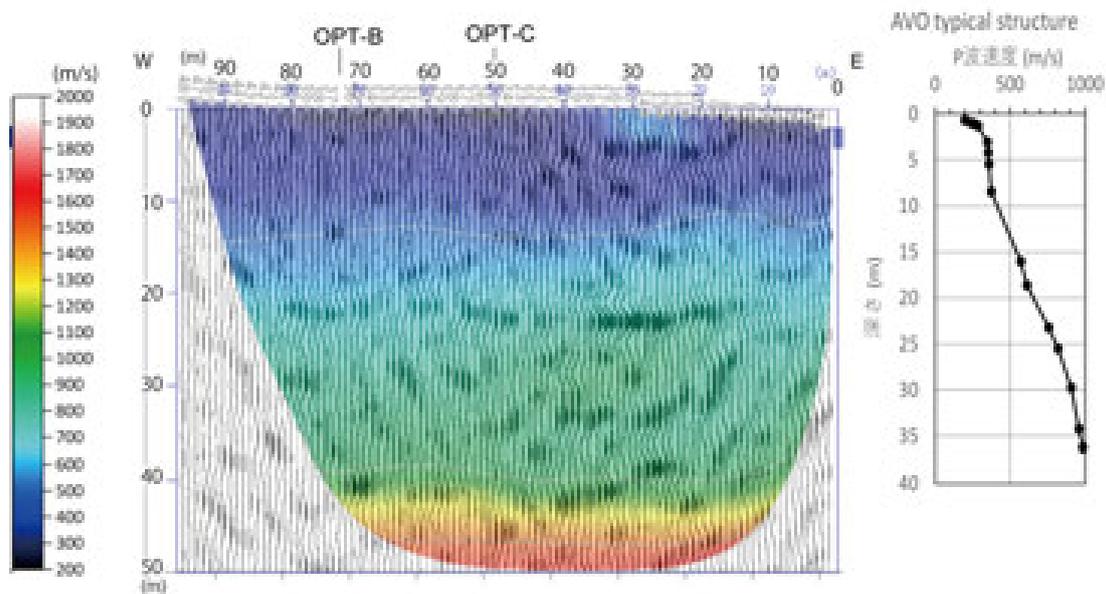


図 9. 主測線地震波断面

図 9 は、RAYFRACT の Smooth inversion (文献 8, 9) の解析結果に文献 10 のソフトウェアパッケージによる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 9 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。

文献 11 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。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。図 12 に示され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（文献 12）。

主測線 20 ～ 30 m 区間には地表付近に高速度部分が現れていることが注目される。この区間の地表付近を写真 1 に示す。

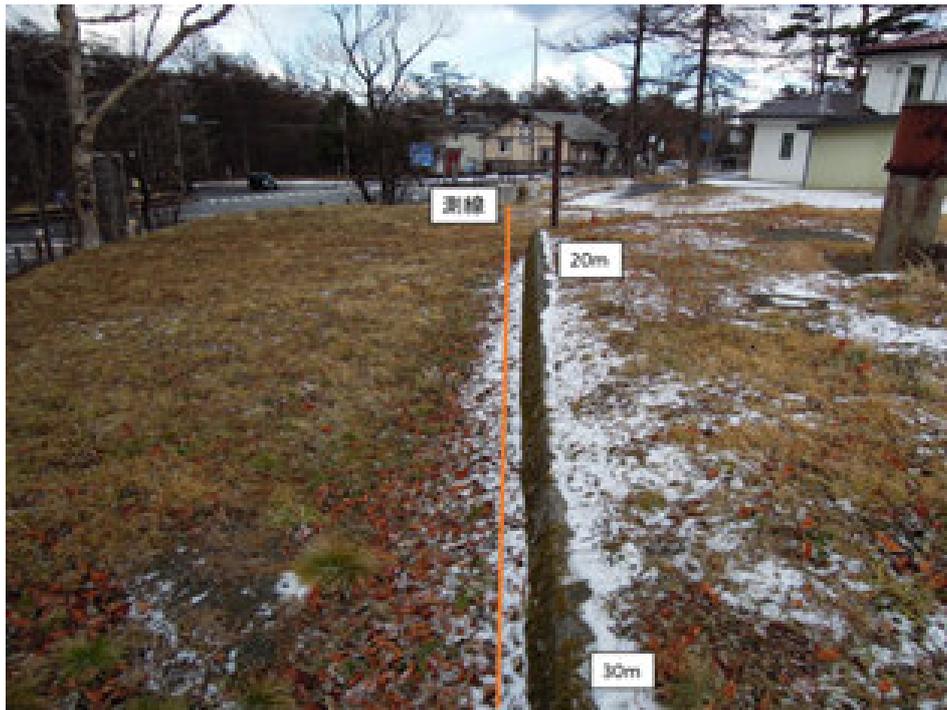


写真 1. 主測線 20 ～ 30 m 区間の地表の状況（白山工業提供：2017 年 12 月 5 日）

写真 1 には主測線 20～30 m 区間の受振器の側方 1m 以内の場所に測線と平行して高さ約 70cm のコンクリート擁壁の存在を示す。このコンクリート擁壁の測線方向の広がりには RAYFRACT の結果の高速部が存在している部分と一致している。これらのことから RAYFRACT の結果における 20 ～ 30 m 地点の高速部は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（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。ちなみに主測線の観測法を Common Shot といい、ある場所で行われた発振を多数の受振器で観測する方式である。

副測線上の発震（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 10～11 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 12 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。

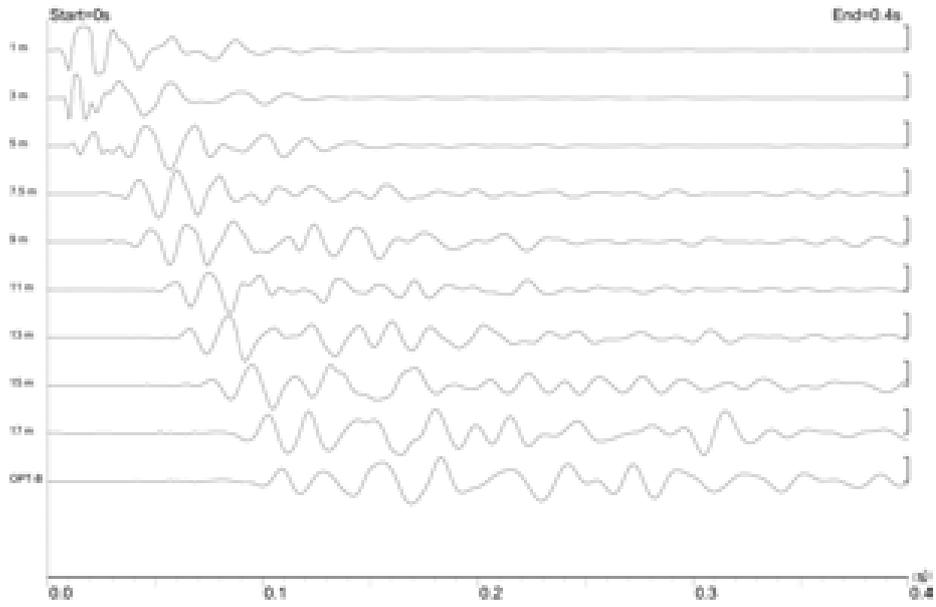


図 10. 副測線 Opt-A 点における共通受振点記録

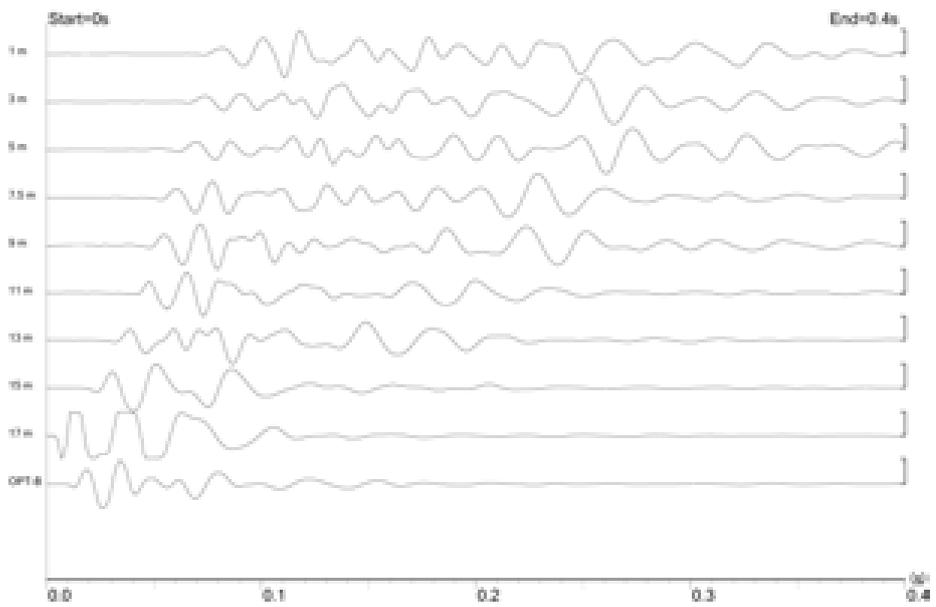


図 11. 副測線 Opt-B 点における共通受振点記録

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

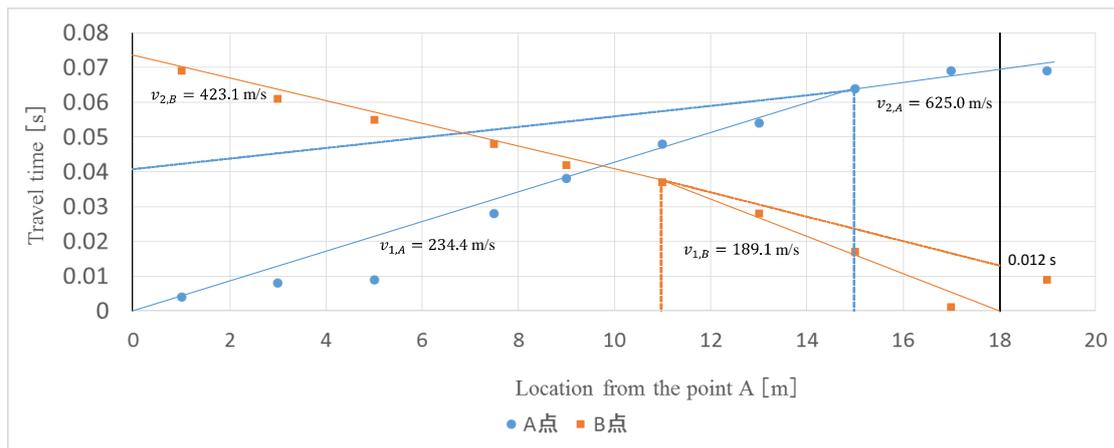


図 12. 副測線 (Opt-A - Opt-B 間) の走時曲線

予備的な情報をもたずに図 12 を見た場合、一様傾斜 2 層構造の走時曲線として解釈できる。しかし主測線の結果からは観測所構内がほぼ水平成層速度構造であ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 12 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、副測線では Opt-A 側の地表付近に主測線 20~30 m 区間と同様に高速度体が存在していると解釈してもよい。このような考察の後にあらためて図 12 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 2 に示す。

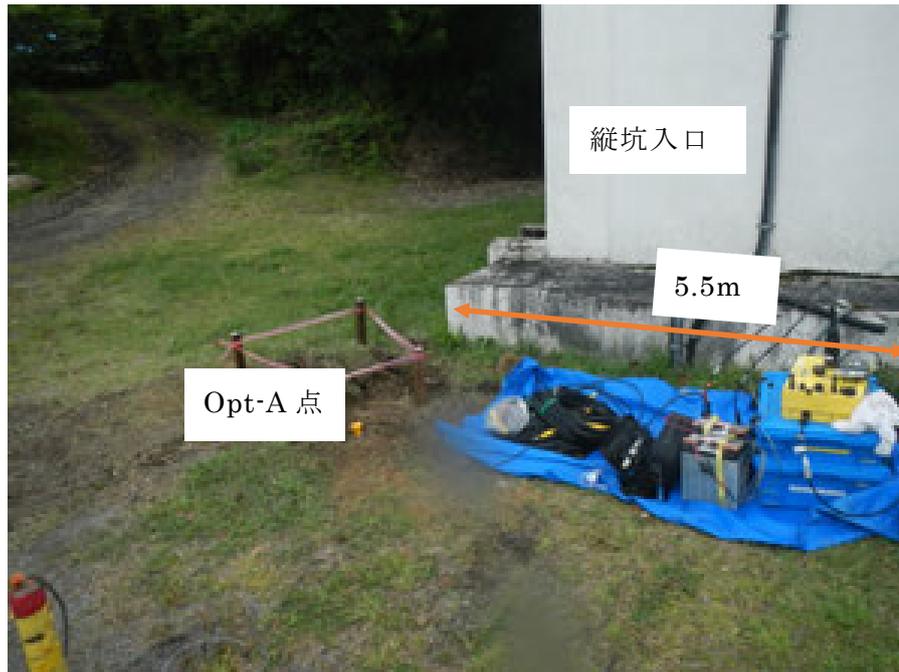


写真 2. Opt-A 点付近

写真 2 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。文献 13 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。縦坑入口の犬走りの長さは 5.5 m であった。鉄筋コンクリートの地震波速度は一般に 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 点付近の高速度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。

a-3. 観測点補正值の推定と適用

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 13 ~ 18 に示す。

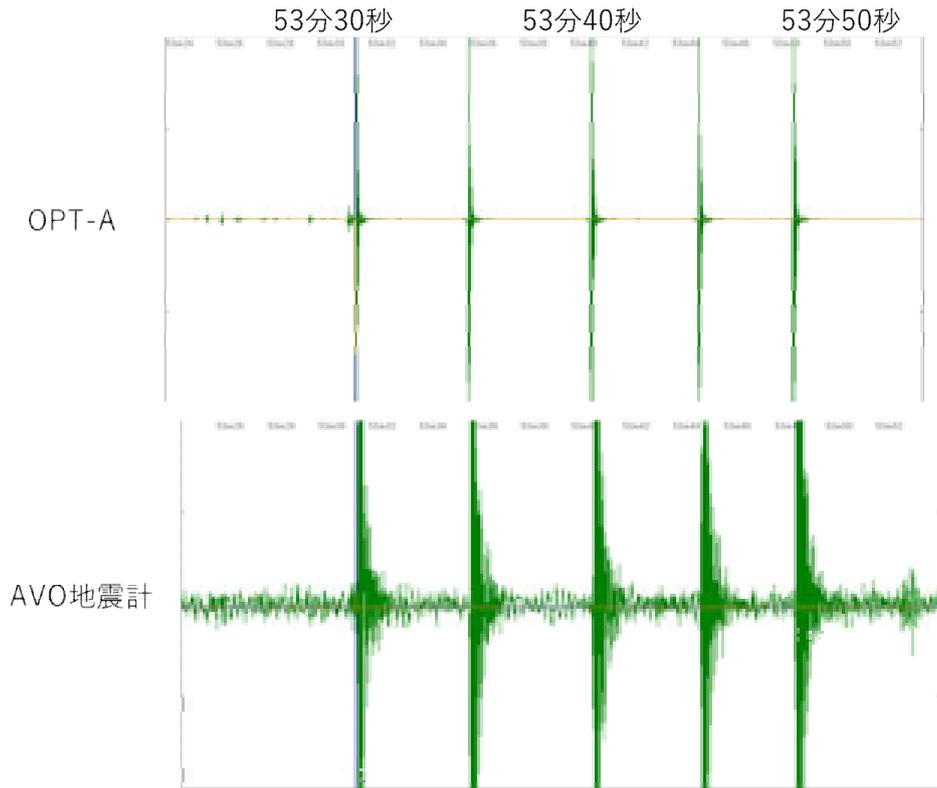


図 13. Opt-A 点ショット地震波形

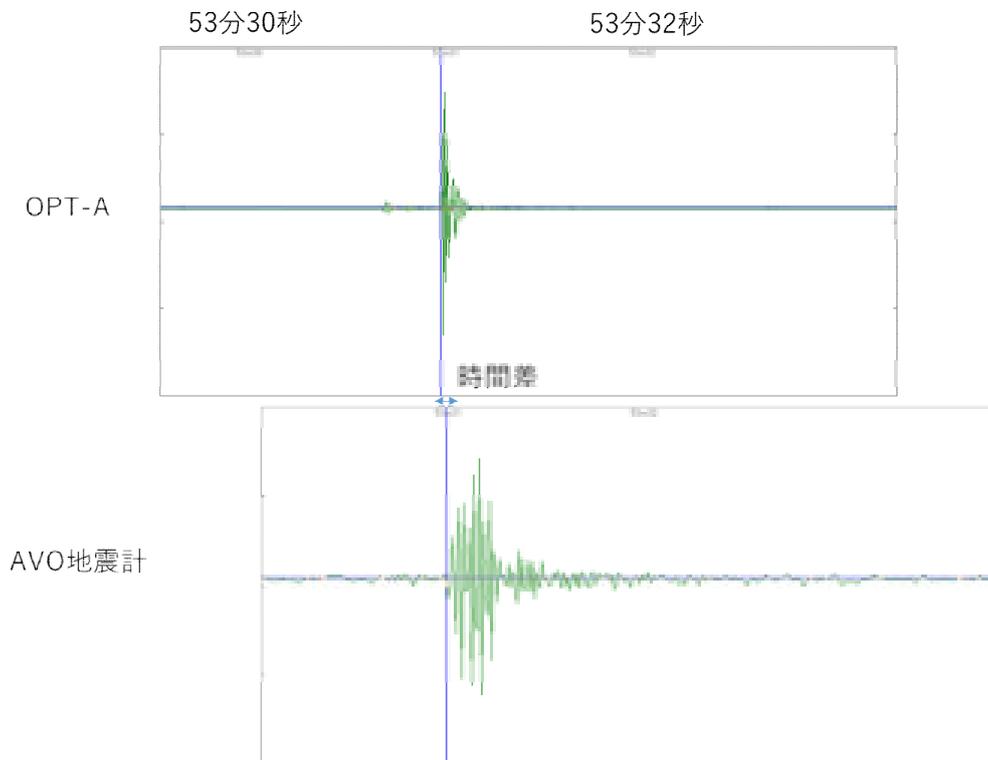


図 14. Opt-A 点ショット地震波形(拡大)

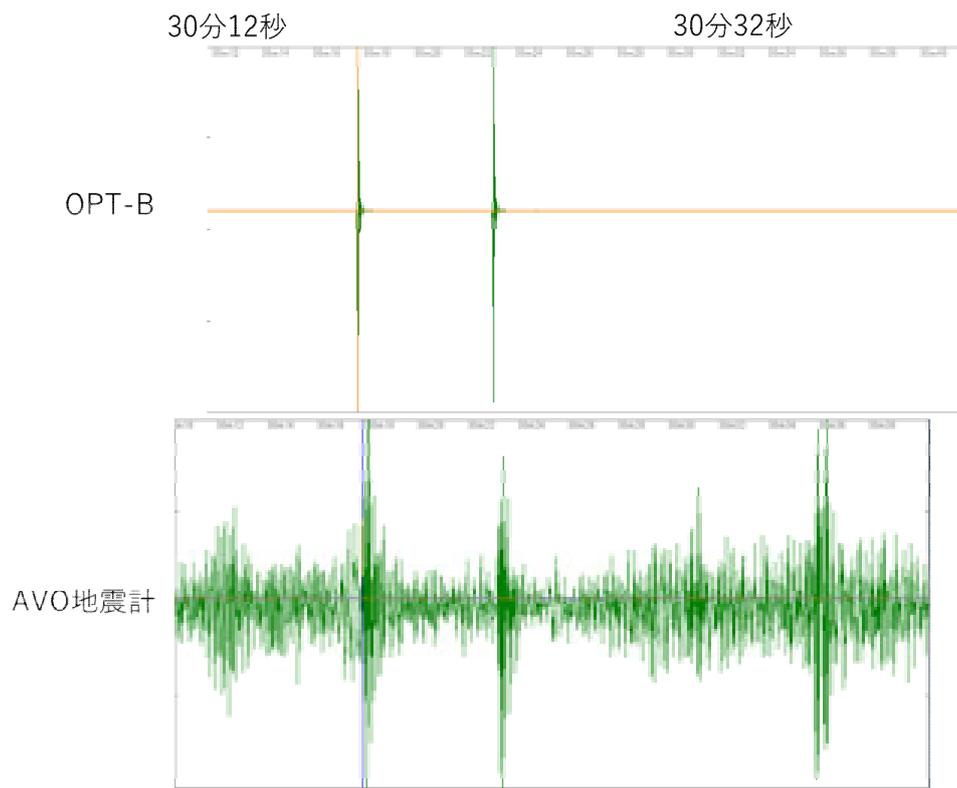


図 15. Opt-B 点ショット地震波形

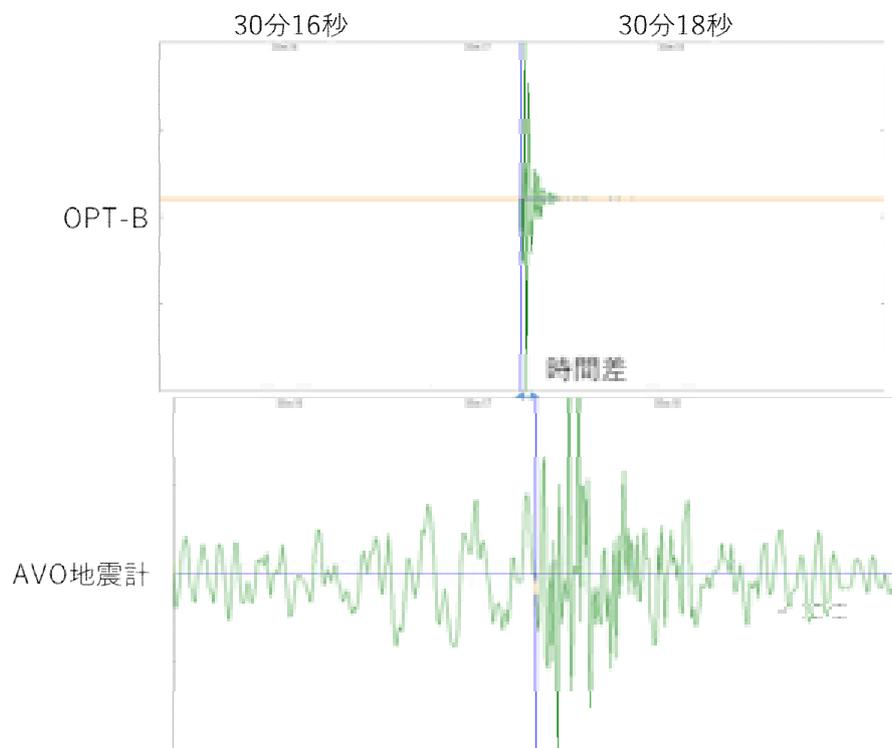


図 16. Opt-B 点ショット地震波形(拡大)

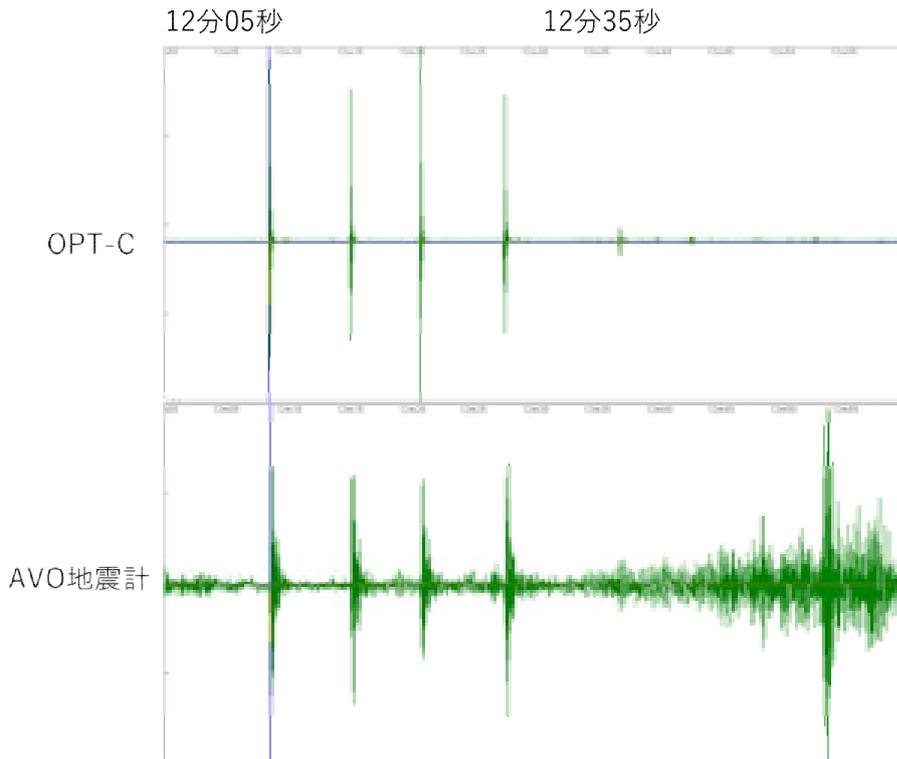


図 17. Opt-C 点ショット地震波形

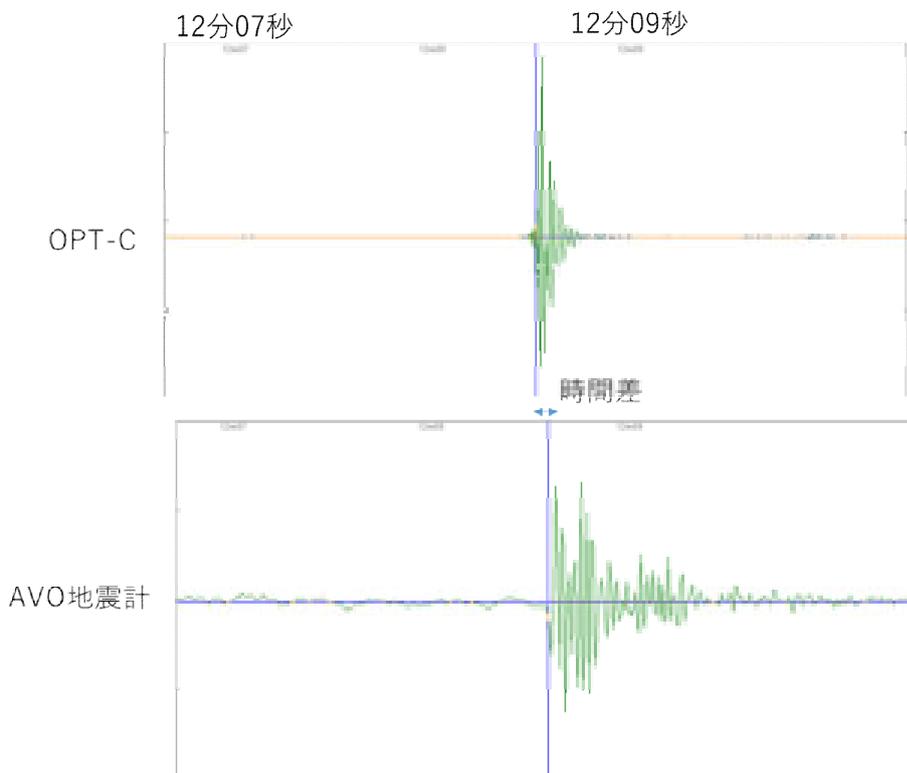


図 18. Opt-C 点ショット(拡大)

Opt-A 点近傍の深さ 26 m の縦坑底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 点ショットの初動到達時刻もそれぞれ表 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。

走時補正值の基準面を地表面から 26m の深度に設定した。各光センサ観測点でこの深度における走時を基準に、地表までの平均速度を求めて走時遅れの値を求めた結果を表 7 に示す。さらに Opt-B 点の走時遅れ量に対する各点の相対走時遅れ量も同表に示す。

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-C	374	0.070	-0.009

先にも述べたが浅間観測所構内の光センサアレイによって観測された A 型地震イベント 03153110 の地震波の P 波初動到来方向は震源方向そのものを向かず、南寄りからの入射として推定された。この A 型地震イベント 03153110 について、表 7 に示される走時補正值を採用して到来方向の推定を行った結果を図 19 中段に示す。さらに観測点補正を施さなかった結果を図 19 の下方に示す。

観測点補正を施した場合は観測点補正を施さなかった場合に比べて到来方向のずれはさらに大きくなり、逆方向に伝播しているように見える。この場合、観測点補正は明らかに逆効果である。したがって、2017 年観測では表層構造を根拠とした観測点補正は必要ないと考えられる。本観測で見受けられた到来方向のずれは 26m より浅い構造が原因ではなく、文献 14 の報告のスケールの深い構造が影響している可能性が推察される。

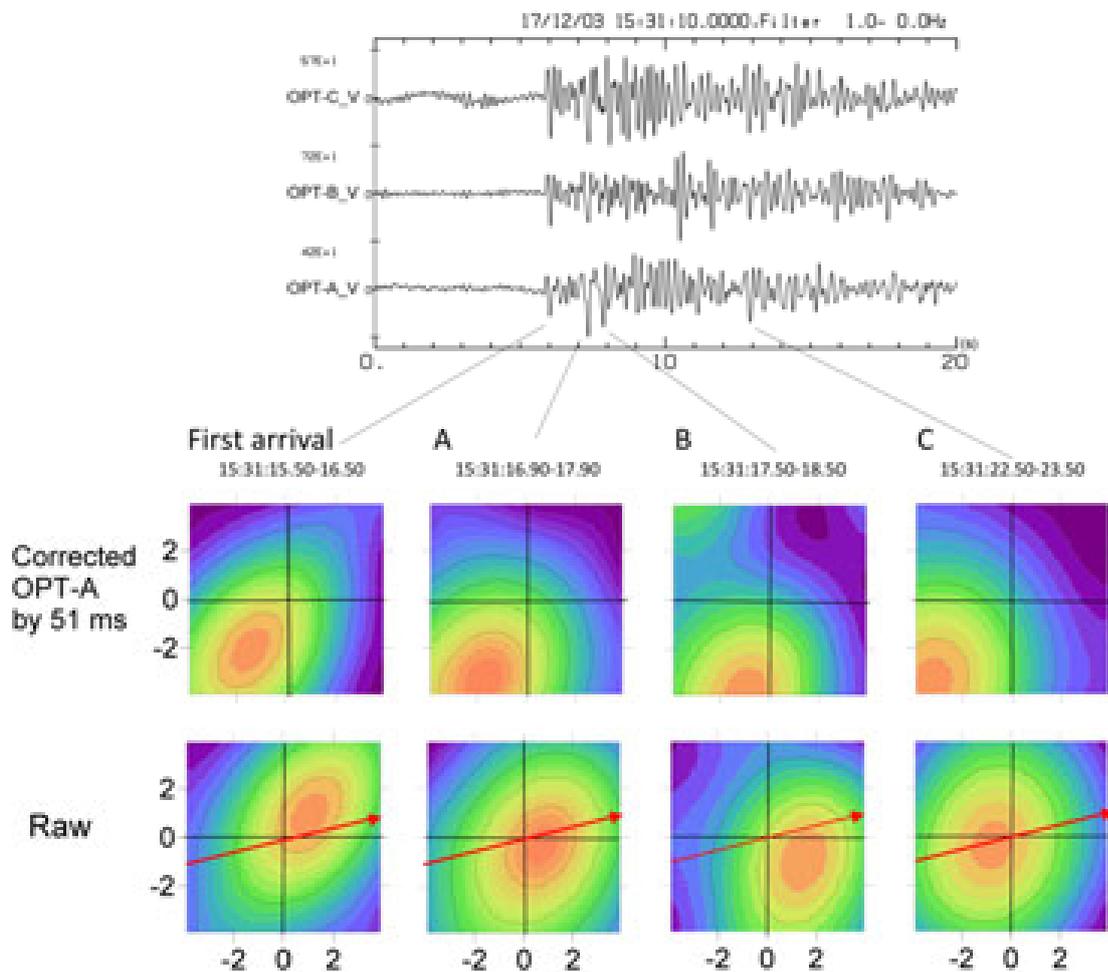


図 19 走時補正による地震波到来方向の補正．最下段 RAW は走時補正を施さない場合の結果，その上は走時補正を施した結果を示す．

b) 光センサによる火山観測の準備

平成30年7月19日に AVO 構内を，平成30年9月13日に AVO に加えて防災科学技術研究所小浅間観測点(AMKV)およびその周囲の下見を行った．9月13日の下見の際には AMKV および AMKV 周囲の現地調査と AVO-AMKV 間の光ファイバケーブルの空き末端間の光通信テストを行った．

AVO 本館内部には浅間山観測用の光ファイバの末端が配されており，東京大学浅間観測所系統と AMKV 系統からのデータを受信している．7月の AVO 下見の際にこの光ファイバケーブルには未使用の芯線の存在することが明らかになった．また，今後の設置計画について東京大学関係者と議論したところ，火山噴火警戒レベルが当時の状態（レベル2）を保持されるとするとすると，当初案として持っていた配置計画（AVO に光送受信機，山頂部に光センサ）は協力機関による設置および保守作業が不可能になることが懸念された．このことを考慮して検討を行った結果，山頂観測点群と同様に既設光ケーブルによる接続

が存在しかつ設置保守作業も随時可能な AMKV がセンサ設置の候補地として浮上した。これを受けて令和 2 年度の野外観測は AVO に光送受信機を設置して AMKV とその周辺にセンサを配置し，両地点間を既設の光ファイバケーブルの空き芯線を利用する構成で検討することになった。

9 月の下見では，東京大学地震研究所の協力による AVO の利用に加えて防災科学技術研究所の協力により AMKV の調査とその周辺の調査も行うことにした。主な調査項目は次のようなものであった。

- ・AMKV 周辺における光センサ設置予定点の簡易測量および関係機関申請用の写真撮影
- ・AMKV-AVO 間の既設光ケーブル空き芯線の通信テスト

AMKV 周辺における光センサ設置予定点と AVO の位置関係を図 20 に示す。AMKV は浅間山とその西方に位置する小浅間山との鞍部に位置しており，AVO の西北西約 1.2km の位置にある。AVO から AMKV までは浅間山の登山道を経由してアクセスする。



図 20 AMKV 位置図

AMKV とその周辺における現地調査の結果，図 21 のように 1 辺約 36 m の三角形の各頂点となるように AMKV 敷地内に 1 つのセンサをおきその周囲に 2 つのセンサを置くことを計画した。

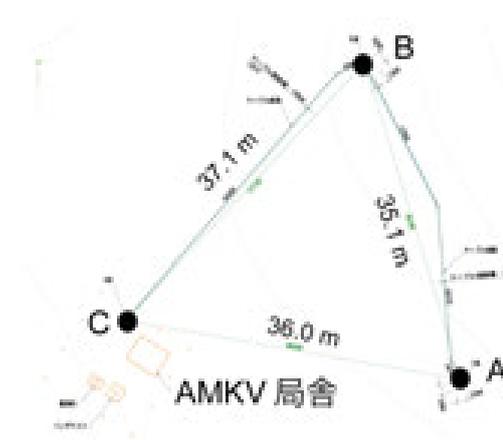


図 21 AMKV 光センサアレイ計画図

A～C 点予定地の状況を写真 3～5 に示す。各予定地は浅間山および小浅間山から噴出した軽石を主体とする砂礫地で、灌木および草がまばらに生えている。センサ設置予定点はこれらの灌木もしくは草の生育に支障を来さない裸地を選んで設定された。



写真 3 A 点予定地。遠景は B 点予定地。



写真 4 B 点予定地。遠景は AMKV 局舎。



写真 5 C 点予定地．防災科学技術研究所 AMKV 敷地内．写真中央の杭が予定地点

当該地域は中部森林管理局東信森林管理署の管轄地域であると同時に、上信越高原国立公園草津・万座・浅間地域の特別保護地区に指定されている．そのために AMKV アレイ観測を実現するためには当該森林管理署および万座自然保護官事務所への申請が必要である．

次に AVO-AMKV 間の既設光ケーブル空き芯線の通信テストを次のように行った．調査メンバーを 2 つの班に分割し、1 班を AVO 室内の光ケーブル引込口に、もう 1 班を AMKV 局舎内の光ケーブル引込口で作業を行った．人員配置が完了した後に AVO 側から LED 光を光ファイバケーブルの空き芯線に順次照射し、これを AMKV 側の受光器で確認した．AVO 側の作業風景を写真 6 に示す．



写真 6 光ケーブル空き芯線の通信テスト

光ケーブル空き芯線通信テスト時の接続を図 22 に示す。

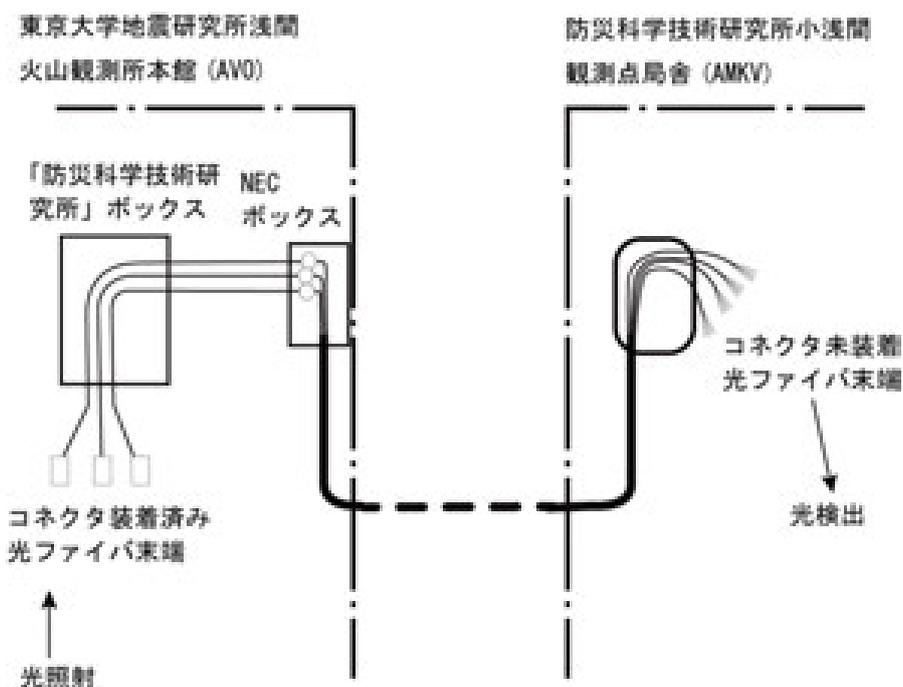


図 22 光ケーブル空き芯線通信テスト接続図

調査を行った結果、いずれの空き芯線も AVO-AMKV 間の接続がないことが明らかになった。さらに現地調査後に防災科学技術研究所の協力を仰ぎ AMKV 設置時の工事資料の提供をいただいて確認を行った結果、空き芯線の接続は行われておらず、両者からの光ケーブル接続点では AMKV 側からの空き芯線が完全に防水処理されていることが確認された。AVO および AMKV の双方に出されている空き芯線の接続利用には、あらためて光ケーブルの掘り起こしと接続工事が必要であることがわかった。

ここまで述べた調査結果を踏まえて9月の現地調査以降も平成31年度以降の野外観測の準備を進めていたが、平成30年度末に課題責任者に異動が発生するとともに、課題責任者の異動後の秋田大学では平成31年度以降本課題が実施できなくなることが判明した。これに伴い平成31年度以降の実施体制の変更とともに野外観測実施場所を変更することにした。

2) 光センサシステム観測の総合評価および総括

火山性地震の精密解析をまとめると以下のようになる。観測点補正を施した場合は観測点補正を施さなかった場合に比べて到来方向のずれはさらに大きくなり、逆方向に伝播しているように見える。この場合、観測点補正は明らかに逆効果である。したがって、2017年観測では表層構造を根拠とした観測点補正は必要ないと考えられる。本観測で見受けられた到来方向のずれは26mより浅い構造が原因ではなく、スケールの深い構造が影響している可能性が推察される。このことは今後の観測実施に有用な知見である。

次に次年度以降の観測点予定地の下見に関して述べる。観測点予定地の選定にあたり、火山噴火警戒レベルとそれに伴う立ち入り規制区域を考慮することが必要である。今回、東京大学浅間火山観測所と防災科学技術研究所小浅間観測点の両方を調査することができ、実際の既設の光回線の利用をする場合その調査法についての知見を得ることが出来た。情勢の変化により平成30年度の下見の成果を直接次年度につなげることは出来なかったが、後年の観測実施の為の経験を積むことが出来た。

平成30年度に新しい光センサの製作を行った。協力機関の手によってあたらしく製作されたセンサユニットは3成分型で、2組が製作された。

これまでの一連の試験観測ならびに関係者からの聴取の結果を総合して新しいセンサは、小型軽量化、長周期化、汎用光ファイバ対応化が必要であった。

新しい3成分センサユニット筐体の外形寸法は12×15×9 cmで、これまで試験観測に用いていたJOGMEC Phase1センサユニット(20×20×20 cm)に比べて小型に仕上がった(写真7)。



写真7 新3成分光センサユニット

新しい3成分センサユニットの中には上下動1成分および水平動2成分の3つの光センサ素子とノイズ補償のための固定端素子の合計4素子が組み付けられている。個々の光センサ素子は高さ4cm、直径約3cm（突起含まず）の円筒形で、重量は1kgである（写真8）。従来のJOGMEC Phase1 試作機センサ素子では3kgであった。



写真8 新光センサ素子

新しいセンサ素子は固有周波数23.9Hz、減衰定数0.7を実現した。図23にランダム加振振動台における試験結果を示す。図23ではランダム加振振動台そのものの動きを既存の加速度計JA-40GAで計測した結果を緑線、新センサからの相対出力を青線で示す。

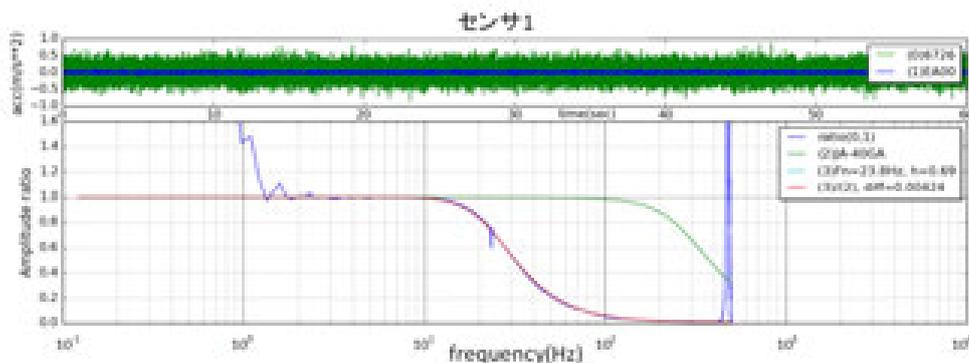


図23 新センサ素子の振動台テスト結果

また、新しいセンサ素子は光回路にファラデーローテータミラーを組み込み、汎用光ファイバによる信号伝送を可能にした。ファラデーローテータミラーは写真8にも現れており、円筒形の本体の接線方向に飛び出した棒のような形状をした部品である。

以上のように新しい光センサは旧型に比較して小型かつ軽量、長周期を実現できた。なお、旧型の光センサシステムは前年度の試験観測中に不具合を発生していたために、新しいセンサとの比較を行うことができなかった。

3) プロジェクト運営

火山研究委員会，総合協議会に出席した．今年度はフィールドにおける火山観測を実施する予定がなく，かつ新しい光センサシステムも製作の途上にあつたため，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

平成 30 年度は前年度に得られた観測データに表層構造調査結果に基づいた走時補正値を与えて解析の精密化と，後年度の課題実施のための観測候補地下見および調査を行った．

解析の精密化では，前年度に行われた表層構造調査の結果からは光センサアレイはほぼ水平成層構造の上に展開されていることが分かったが，3 点の光センサで構成される光センサアレイのうち，1 点の周囲で人工物による高速度異常が推定された．これにより該当する光センサ観測点では顕著な大きさの走時補正値が推定された．このようにして推定された走時補正値を実際の火山性地震解析に適用した．

走時補正値を適用して行った再解析では，補正値を適用しなかった解析結果に比べて波の伝播方向が正しく推定されないことが判明した．このことから当初指摘されていた波の到来方向と震源方向のずれに対する表層構造の寄与は小さく，観測地を含む周囲の大局的な構造の寄与が大きいと考えられた．

また，後年度の課題実施のための観測候補地下見および調査では，東京大学地震研究所浅間火山観測所および防災科学技術研究所小浅間観測点を対象として現地調査を実施した．浅間火山の火山活動警戒レベルの発報にともなう立ち入り規制の実施と光ファイバケーブル回線の設置済みであることを考慮して，光送受信装置を東京大学浅間火山観測所本館に置き，光センサを防災科学技術研究所小浅間観測点およびその周辺に設置する構想を得た．東京大学浅間火山観測所は交通量の多い道路に面している一方，光送受信機の稼働に必要な電力の確保が可能である．防災科学技術研究所小浅間観測点は交通量の多い道路から 1 km 以上離れた静閑な場所に位置している．両者の間には光回線が接続され，観測データ通信に供されている．両施設を利用する構想の下で光回線の通信テストを実施したが，両施設にはそれぞれ未接続の光ファイバ端子が存在しているが，小浅間観測点のデータ通信に使用している系統以外の空き系統の接続のないことが判明した．さらに両者間の光ファイバの利用を希望するのであれば，敷設経路上での光ファイバの掘り起こしと融着作業が必要であった．

さらに調査実施後には課題責任者をめぐる情勢の急変により，観測候補地の変更の必要性に迫られた．しかしながら，光回線の確保に関連する調査に対する知見をえることができた．

2) 問題点と今後の課題

これまでに指摘された問題点で検証または取り組まれていない問題点は以下のものである

る.

- ・耐雷性の検証
- ・高温に耐えるセンサ
- ・インテンシティモジュレータの耐久性の検証

このうち耐雷性の検証については、平成 31 年度に新たな観測対象として選定した桜島火山で、標高の高い場所で梅雨期の始まる前に観測を始めることで実現できると考える。

2 番目の高温に耐えるセンサについては今年度の観測を完了してから取り組みを始める考えである。3 番目のインテンシティモジュレータの耐久性については、組み立ての過程の試験実施時の配慮と実際の長期運用によって検証する必要がある。

また本報告とは別に運営会議などで複数の指摘を受けた。以下に重要なものを要約し、その対応方針とともに記載する。

平成 30 年度フォローアップ評価会では、野外観測における開発中のセンサーと既存のセンサーの比較観測の早期の実施、様々な火山性震動に対する性能評価の早期実施を期待する意見が出された。既存のセンサー(JOGMEC Phase1)は不具合のため比較観測の実施が不可能であるが、従来型のセンサーとの比較や様々な火山性震動に対する性能評価は平成 31 年度の業務で実施する予定である。

さらに平成 30 年度フォローアップ評価会と第 4 回総合協議会では、実施運営体制の変更に際して、円滑に引き継げることが重要という意見が出された。これに対しては平成 30 年度までの旧実施責任者の異動先で新たな実施責任者の確保を行った上、旧実施責任者が異動先でも協力研究者として連携をとることで平成 31 年度以降の円滑な業務実施体制を提案し総合協議会の承認を得た。

(e) 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、本研究は平成 29~30 年度にわたり東京大学地震研究所の協力を得ました。平成 29 年度に東京大学地震研究所共同研究プログラムの援助を受けました。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学生諸氏には探査の際にご協力を頂いた。平成 30 年度は浅間火山観測所構内の調査にあたり、大湊隆雄 火山噴火予知センター長・准教授、武尾 実教授 辻 浩 技術専門員には大変お世話になった。

小浅間観測点(AMKV)の調査にあたり、防災科学技術研究所 地震津波火山ネットワークセンター 火山観測管理室 上田英樹室長 には立ち入り許可をいただき、地震予知総合

研究振興会 つくば観測技術センター 山田聡治様 には調査の多岐にわたりお手をいただきました。

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

(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) 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 serpentized 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, 気象庁, 2017.
- 8) Schuster, G. T. and Quintus-Bosch, A., Wavepath Eikonal Traveltime inversion: Theory. GEOPHYSICS, 58, 1314-1323, 1993.
- 9) Siegfried, R. R., The DeltatV 1D method for seismic refraction inversion: Theory. Intelligent Resources Inc Suite 142, Intelligent Resources Inc, 20pp, 2011.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.

- 13) 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.
- 14) 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.

(g) 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	位相シフト光干渉 法振動観測システ ムによる浅間火山 観測	平成 30 年日本火山 学会秋季大会 (会 場: 秋田大学)	平成 30 年 9 月 28 日
Tomoki Tsutsui, Yoshiharu Hirayama, Toshiharu Ikeda, Keiji Takeuchi, and Hiroshi Ando	A feasibility study on multi-channeled seismometer system with Phase-Shifted Optical Interferometry for volcanological observations	Journal of Disaster Research	平成 30 年 11 月投 稿, 平成 31 年 3 月 末現在査読中.

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/

(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 31 年度の業務計画案

平成 30 年度までの課題責任者が平成 31 年度に異動することに伴い、平成 31 年度は課題責任者を変更するとともに、課題責任機関を京都大学に変更して業務を実施する。このことについては平成 31 年 2 月に総合協議会でメール審議により承認いただいている。課題責任機関（京都大学）は、以下の項目を共同実施機関（白山工業株式会社）と連携して事業を行う。なお、実施責任機関の京都大学への変更に伴い、一部の実施内容を京都大学で実施可能なものに差し替えを行っている。

① 観測データの火山学的解釈

共同実施機関の観測により得られた観測データを、他の観測データとともに火山学見地から解釈を行い、試験観測が行われた期間中の火山活動について総括する。

② 光センサシステムの総合評価と総括

共同実施機関の観測により得られた試験結果から、平成 31 年度観測および光センサシステムを総合的に評価し総括する。

③ リアルタイムデータ処理の検討

多成分光センサシステムを火山研究に最適なものにすることを狙い、リアルタイム処理システムサーバを導入しリアルタイム処理システムの検討を始める。最終的には光センサシステムの一部としてアレイ解析およびデータ表示等の必要な機能を組み込むことを到達点とする。これは他課題担当者との意見交換およびこれまでの情報収集の結果を反映し、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ためにシステムの完成度をより高める取り組みである。

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し、プロジェクトの推進に貢献する。関連する会議等への出席のための旅費を計上している。

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、各種委員会等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．