

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

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

令和4年度
成果報告書

令和5年5月
文部科学省研究開発局
国立大学法人京都大学

本報告書は、文部科学省の令和4年度科学技術試験研究委託事業による委託業務として、京都大学が実施した令和4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



令和4年7月下旬に分散型音響センシングシステム（DAS）と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（光センサシステム）の比較観測を行った。左右の写真はそれぞれ DAS と光センサシステムの信号処理装置の操作風景である。

はじめに

位相シフト光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し実用化に向けての改良点を洗い出すことを目的として本課題をひきつづき実施し、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」を常に働かせていち早く情報を検知する必要がある。

火山地帯で「耳」を常に働かせいち早く情報を検知するために、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。

令和4年度の本事業では令和3年度に深井戸に設置したボアホール型の耐熱耐圧光センサによる観測を継続した。そして、深井戸における地震記録と長期間において地震観測の安定性を評価した。これらの取り組みによって、今後の課題遂行の基礎が形成された。

目次

1. 研究概要の説明	1
(1) 研究者別の概要	1
(2) 研究実施日程（京都大学）	1
(3) 研究実施日程（白山工業）	1
2. 研究成果の説明	2
2. 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（京都大学）	2
(1) 業務の内容	2
(a) 業務題目	2
(b) 担当者	2
(c) 業務の目的	2
(d) 10か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）	3
(e) 令和4年度における業務の方法	6
(2) 令和4年度の成果	7
(a) 業務の要約	7
(b) 業務の成果	7
(c) 結論	11
(d) 引用文献	12
(e) 成果の論文発表・口頭発表等	12
(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	12
(3) 令和5年度の業務計画案	12
(a) 光センサシステムの評価と総括	12
(b) プロジェクト運営	12
2. 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）	13
(1) 業務の内容	13
(a) 業務題目	13
(b) 担当者	13
(c) 業務の目的	13
(d) 10か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）	13
(e) 令和4年度における業務の方法	17
(2) 令和4年度の成果	17
(a) 業務の要約	17
(b) 業務の成果	17
(a) 高温対応用光センサシステムの連続観測	17
(b) 総括	22
(c) 結論	22

(d) 引用文献	22
(e) 成果の論文発表・口頭発表等	22
(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	22
(3) 令和5年度の業務計画案	23
(a) 高温実証試験	23
(b) 三成分光センサの作成	23
(c) 総括	23
3. 会議録	23
4. むすび	25

別添1 学会等発表実績

1. 研究概要の説明

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。）を火山観測に実際に投入して運用し実用化するにあたり、耐圧耐熱容器の光センサによる深井戸における長期間の地震観測を行い、長期間運用の安定性を評価した。

(1) 研究者別の概要

所属機関・部局・職名	氏名	分担した研究項目及び研究成果の概要	研究実施期間	配分を受けた研究費	左記のうち、間接経費
京都大学・防災研究所・准教授	中道治久	光センサシステムの総合評価と総括とプロジェクト運営を担当した。	R4. 4. 1～ R5. 3. 31	1, 018, 999	235, 153
白山工業 基盤開発部 部長 副部長 防災システム事業部 公共防災グループ	平山義治 池田敏晴 安藤 浩	①高温対応用センサの設置観測 以上の業務を行い、新潟工科大観測井の地下 1978m にセンサを設置して観測を行い、100℃以上の高温環境下でも地動を測定できていることを示した。	R4. 4. 1～ R5. 3. 31	3, 604, 998	831, 922

(2) 研究実施日程（京都大学）

研究実施内容	実 施 日 程											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
①光センサシステムの総合評価と総括	←											→
②プロジェクト運営	←											→

(3) 研究実施日程（白山工業）

研究実施内容	実 施 日 程											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
①高温実証試験	←											→

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 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 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。

2) 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 5 1 回を記録するとともに、自然地震 4 1 7 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 2 0 m 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。

3) 平成 30 年度 :

課題責任機関は以下の項目を実施した。

- 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した。

- 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

1)は観測データに表層構造探査結果に基づいた走時補正值を与えることにより精密化された解析を行った。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を2組製作した。これにより、これまでの試験観測で用いてきたセンサに比べて小型化に成功した。また、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た。

4) 平成 31 年度 (令和元年度) :

課題責任機関は以下の項目を実施した。

- 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) リアルタイムデータ処理の検討
- 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、以下の項目を実施した。

- 5) 3成分光センサの作成
- 6) 新しい光センサによる活火山の観測

共同実施機関は課題責任機関と連携して、本業務を推進し遂行するための準備をするとともに、項目5)にあるように平成30年度に作成したものと同様の3成分センサを1セット作成し、平成30年度に作成した3成分センサユニット2式と合わせて、日本で最も活発な活火山である桜島で三角形アレイを構築して火山観測を行った(項目6)。なお、光送受信装置については、共同実施機関所有の装置を使用した。また、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た。

5) 令和2年度 :

課題責任機関は以下の項目を実施した。

- 1) 観測データの評価による光センサシステムの火山性地震観測性能評価
- 2) 観測データの評価による光センサシステムの耐雷性能評価
- 3) 光センサシステムの試験観測候補地選定
- 4) プロジェクト運営

共同実施機関は以下の項目を実施し、火山観測に適した高温対応用センサ作成と室内検証を行った。

- 5) 高温対応3成分光センサの試作

6) 高温対応光センサの検証

7) ボアホール用高温対応筐体の作成

光センサシステムの本質的な利点の一つである高温対応に関するセンサの作成と、室内高温環境試験を行い、火山観測により適したセンサシステムを構築した。さらに課題責任機関とともに翌年度の屋外での高温実証実験を行う場所を決定し、その観測点で使用可能なボアホール用高温対応筐体を試作し、室内の高温環境で検証を行った。また、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た。

6) 令和3年度：

課題責任機関は以下の項目を実施した。

1) 光センサシステムの総合評価と総括

共同実施機関とともに光センサシステムの実地観測の準備を令和3年度前半に行い、実地観測を令和3年度後半に実施した。そして、観測から得られた試験結果から、令和3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した。

2) 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。

共同研究機関は令和2年度に作成した高温対応用センサ及びボアホール用筐体を実フィールドに設置して連続観測を行い、光センサシステムの高温環境における有効性を検証した。具体的には新潟工科大学所有の観測井で、地下約2000mにあるボアホールのケーシングの段差（ライナーハンガー）部分を利用してセンサを設置し、連続観測を開始した。

7) 令和4年度：

課題責任機関は以下の項目を実施した。

1) 光センサシステムの評価と総括

共同実施機関とともに新潟工科大学の敷地内の深井戸に設置した光センサシステムの連続観測を行い、高温環境下における長期安定性と有効性を評価した。そのうえで、光センサシステムを総合的に評価し総括した。

2) プロジェクト運営

火山研究運営委員会や研究集会に参加した。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以下の取り組みを実施し、プロジェクトの推進に貢献した。

8) 令和5年度：

課題責任機関は以下の項目を実施する。

3) 光センサシステムの評価と総括

共同実施機関とともに新潟工科大学の敷地内の深井戸に設置した光センサシステムの連続観測を継続し、高温環境下における長期安定性と有効性を評価する。そのうえで、光センサシステムを総合的に評価し総括する。

4) プロジェクト運営

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と連携した以下の取り組みを実施し、プロジェクトの推進に貢献する。

共同実施機関は、翌令和6年度からの課題B-4との連携にむけて、フィールドにおける多点の機動観測をするために地上設置型の3成分光センサー式を作成する。

9) 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を室内検証

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。

10) 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お火山運用実績の獲得を行う。

(e) 令和4年度における業務の方法

以下の項目を共同実施機関と連携して該当年度の事業を行う。

1) 光センサシステムの総合評価と総括

共同実施機関とともに新潟工科大学の敷地内の深井戸に設置した光センサシステムの連続観測を行い、高温環境下における長期安定性と有効性を評価する。その上で、光センサシステムを総合的に評価し総括する。

2) 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。

a) 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。

b) 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によって他課題と連携する。

c) 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) 令和 4 年度の成果

(a) 業務の要約

令和 4 年度は以下の 2 つの主要な業務をおこなった。

①光センサシステムの総合評価と総括

共同実施機関とともに新潟工科大学の敷地内の深井戸に設置した光センサシステムの連続観測を行い、高温環境下における長期安定性と有効性を評価した。そのうえで、光センサシステムを総合的に評価し総括した。

②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。以下の連携を目指した。

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」

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した。

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」 -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によって他課題と連携した。

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 2022 年 7 月 29 日に設けた。

(b) 業務の成果

1) 光センサシステムの総合評価と総括

2022年2月22日に開始された新潟工科大学の深井戸における高温対応光センサシステムによる地震観測を継続した。そして、システムの総合評価と総括を行った。

a) 大深度観測井における高温対応光センサシステムによる地震観測の評価

2022年2月22日に開始された高温対応光センサシステムによる地震観測は、本報告書執筆時（2023年4月）においても観測を継続している。本報告書では、観測開始から2023年1月29日までのデータを用いて評価を行った。

i) データ欠測について

2022年8月9日12時から8月24日12時と、同年9月22日17時から9月26日12時までは観測を一時中断した。観測の一時中断の詳細は共同実施機関の報告書の（2）令和4年度の成果（b）業務の成果 1）高温対応光センサシステムの連続観測 a）連続観測に譲るが、観測の一時中断は両期間ともにシステムそのものの問題ではなく、外的要因によるものであった。

ii) 光センサシステムの長期安定性と有効性の評価

2022年2月22日の観測開始から2023年1月29日までの1年弱の期間について、大深度観測井と地表に設置された光センサの地震記録から長期安定性の評価を行った。連続地震波形は1kHz サンプリングデータとして光送受信装置に保存されている。光送受信装置に外付け HDD を接続して随時データコピーを行ってきた。そして、連続波形データをリサンプリングして、包絡線（エンベロープ）波形を求めた。図1は観測開始から2023年1月29日までの連続地震波形からエンベロープ波形を計算して示した図である。なおリサンプリング処理後のサンプリング間隔は1秒である。前述の観測の一時中断期間（図の灰色）を除いて、地表設置型光センサと大深度観測井に設置された光センサのエンベロープ波形を見比べる。エンベロープ波形において縦棒状に見える時間において地震が観測されているが、地表設置と大深度観測井の両方の光センサにて地震が確認されている（図1）。地表設置と大深度観測井の地震振幅を比べると、地表設置が2倍以上大きく、3倍程度大きい場合もある。地表では自由表面の効果により、地震振幅は2倍になるが、地下と地表近傍では地質が大きくことなり、一般に地表は軟弱地盤のため、地下での振幅は2倍以上に増幅される。ここでは地質について詳しく述べることは、目的から逸脱するため、振幅の違いについてこれ以上の詳細は述べない。なお、地震が観測されていない時間は地動ノイズが観測されている。エンベロープ波形で見ると、地表設置型光センサの地動ノイズレベルは5 mgal 程度であるのに対し、大深度観測井の光センサの地動ノイズレベルは0.5mgal 程度である（図1）。そして、時間経過とともにノイズレベルが高くなるといった長期的な不安定性は見られなかった。光センサにて地震が安定して観測されており、そして大深度観測井ノイズレベルの上昇が見られなかったことから、高温条件下において光センサシステムは1年弱の期間においては安定していると評価出来る。また、前述のとおり地震が観測されており、大深度観測井ではノイズレベルが低いことから光センサシステムの有効性が確認できた。

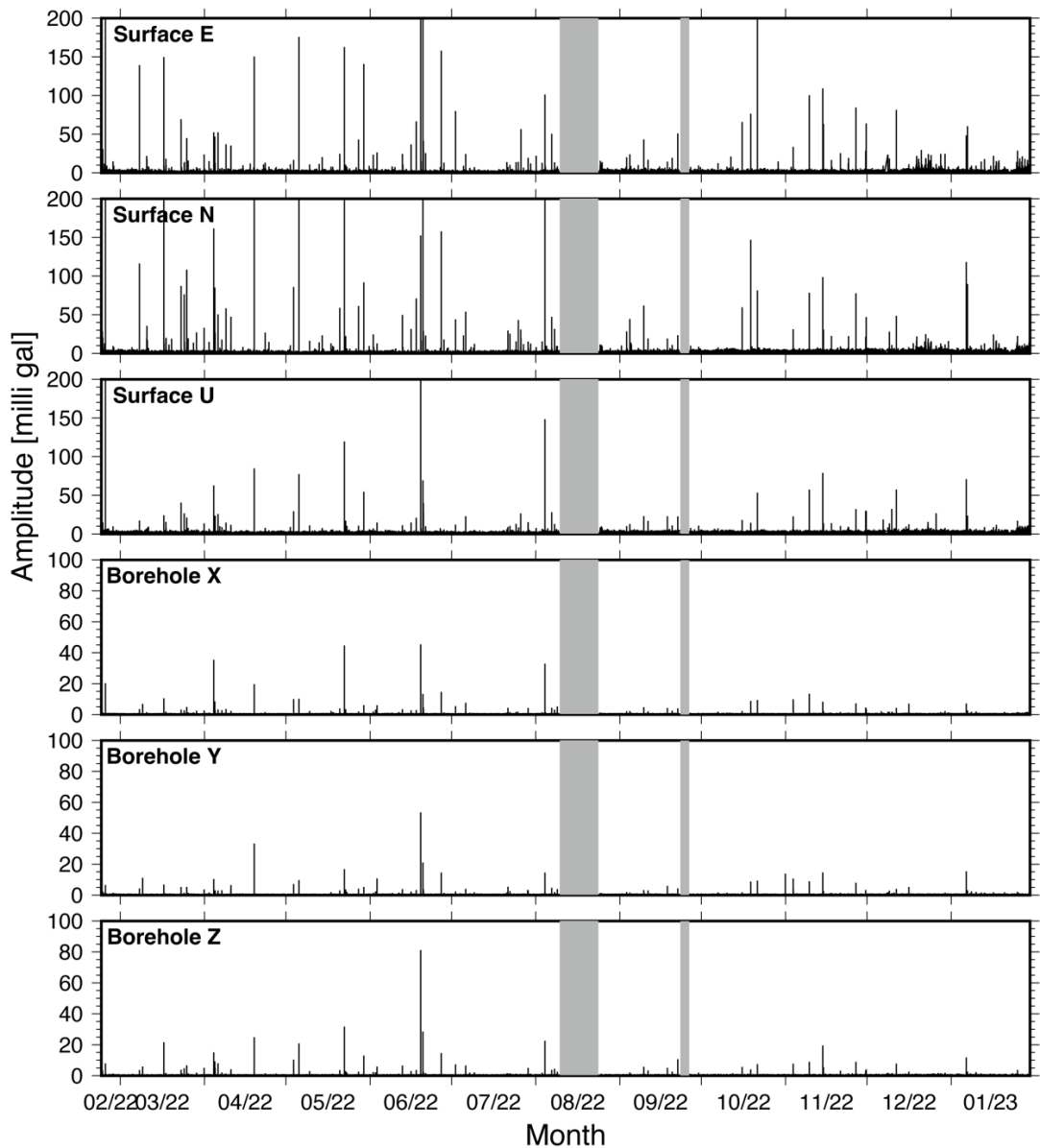


図1 光センサシステムによるエンベロープ地震波形（2022年2月22日～2023年1月29日）。Surfaceと記載の上の3段は地表設置型の光センサで、Boreholeと記載されている下の3段は大深度観測井に設置された光センサの波形を示す。UとZは上下動成分，NとEはそれぞれ南北と東西の水平動成分を示す。XとYは共に水平動成分で，Xは来たから時計回りに234°の方向，Yは北から時計回りに144°の方向を向いている。図中の灰色ハッチは観測の一時中断期間を示す。

b) 光センサシステムの総括

2022年8月中旬の15日間と9月下旬の4日間の光センサシステム自体ではなく外的要因による観測中断を除外すれば、安定して地震観測が行われており、大深度観測井に設置された光センサの記録から、光センサシステムの1年弱の観測期間における長期安定性が実証された。しかし、火山観測は1年といった期間では終わらず、火山活動のバックグラウンドを把握し、そして活動の活発化を評価するには、複数年の観

測を行うのが普通である。したがって、複数年の期間での光センサシステムの安定性と有効性の評価が必要である。

2) 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。なお、本業務遂行において会議および現地調査に担当者が出席した（3. 会議録を参照のこと）。

a) 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」

課題 A の課題責任機関の代表者と課題 B2-2 による観測データの JVDN システムへの収録についての打ち合わせを行った。そして、2022 年 6 月 30 日までに課題 B2-2 の観測データの JVDN システムへの取り込みが完了した（3. 会議録参照）。そして、2023 年 1 月 11 日 JVDN システム (<https://jvdn.bosai.go.jp/portal/ja/>) からの課題 B2-2 のデータ公開が開始された。JVDN システムに収録されているデータは 2016 年度実施の桜島観測と 2017 年度実施の浅間山観測、そして 2019 年度実施の桜島観測である。なお、2016 年度と 2017 年度の観測、および 2019 年度の観測結果は、Tsutsui et al. (2019) および Nakamichi et al. (2022) にて論文出版されている。

b) 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」

各種委員会等（3. 会議録参照）に参加して他課題担当者と意見交換の機会を持った。そして、本課題で行ってきた試験観測結果を提供した。過年度からの意見交換において、固体地球科学への応用が急速に進んでいる分散型音響センシングシステム（DAS）と光センサシステムとの共通点や違いについての理解不足が浮き彫りになった。そこで、2022 年 7 月下旬から 8 月上旬に大深度観測井による光センサシステムの観測の実施と合わせて、DAS と光センサシステムの比較観測を行った（図 2）。7 月 27 日と 28 日に DAS を設置・調整し、そして 8 月 4 日と 5 日で DAS を撤収した。この観測のために地表に敷設した光ファイバー 1 本と、大深度観測井にある未使用の光ファイバー 1 本を DAS に接続して観測が行われた。そして、観測期間中に 8 月 4 日 9:48 発生の M5.6 の福島県沖地震などの地震が観測された（詳細は共同実施機関の報告書を参照のこと）。



図2 分散型音響センシングシステム（DAS）と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（光センサシステム）の比較観測を行った。左右の写真はそれぞれ DAS と光センサシステムの信号処理装置の操作風景である。

c) 火山研究人材育成コンソーシアム構築事業

DAS と光センサシステムの比較観測実施期間中である 2022 年 7 月 29 日に新潟工科大学にて、火山研究人材育成コンソーシアム構築事業（コンソ）の火山学実習・火山学特別実習にて光センサシステムの仕組み及び火山観測の成果についての講義（図 3）と、上記の DAS と光センサシステムの比較観測の解説を行った。コンソの受講生は 6 名であった。



図3 火山学実習・火山学特別実習における講義（人材育成コンソーシアム WEB ページより引用）

(c) 結論

本年度は前年度の 2022 年 2 月に新潟工科大学の大深度観測井に設置した高温対応用光センサによる観測を継続してきた。光センサは地下 1978 m にあり、約 105℃ の高温環境下にある。約 1 年間の連続観測により、高温環境下における長期安定性の評価ができた。

その一方で、火山活動把握のためには複数年の地震観測が行われるのが一般的であるため、複数年における長期安定性の評価が必要である。したがって、次年度は観測を継続し、光センサシステムの複数年の長期安定性と有効性の評価を行う。

(d) 引用文献

Nakamichi, H., Y. Hirayama, T. Ikeda, H. Ando and K. Takeuchi (2022) A half-year long observation at Sakurajima volcano, Japan using a multi-channeled seismometer system with phase-shifted optical interferometry, Journal of Disaster Research, 17, 5, 670-682, doi:10.20965/jdr.2022.p0670.

Tsutsui, T., Y. Hirayama, T. Ikeda, K. Takeuchi and H. Ando (2019) A feasibility study on multi-channeled seismometer system with phase-shifted optical interferometry for volcanological observations, Journal of Disaster Research, 14, 4, 592-603, doi:10.20965/jdr.2019.p0592.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

別添「学会等発表実績」のとおり。

(f) 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) 令和5年度の業務計画案

以下の項目を共同実施機関（白山工業株式会社）と連携して該当年度の事業を行う。

(a) 光センサシステムの評価と総括

共同実施機関とともに新潟工科大学の敷地内の大深度観測井に設置した光センサシステムの連続観測を継続し、高温環境下における長期安定性と有効性を評価する。そのうえで、光センサシステムを総合的に評価し総括する。

(b) プロジェクト運営

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、各種委員会等に参加して他課題の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によって他課題と連携する。

2. 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B 2-2 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	機関種別	役職	氏名
白山工業株式会社 基盤開発部	共同実施機関	部長	平山 義治
		副部長	池田 敏晴
白山工業株式会社 防災システム事業部 公共防災グループ			安藤 浩

(c) 業務の目的

令和3年度に新潟工科大が所有する3000m級観測井の1978mに設置した光地震計について、100℃を超える高温環境下での連続観測を行い、システムの長期安定性、有効性を検証するとともに、引き続きユーザーニーズの把握に努める。

本委託業務で獲得した成果は、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℃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、必要に応じたシステムの次回更新時におけるこのシステムの導入に向けて、導入される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か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 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、火山性地震及び火山性微動、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、運用することを通じてフェ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平成 28 年 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。

2) 平成 29 年度：

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、火山性地震及び火山性微動、自然地震のデータを取得した。

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、耐雷性及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のため、光センサシステムで平成 29 年 9 月 13 日から平成 30 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 回の火山性地震及び火山性微動イベントを記録することができた。途中、雷サージ防止板の設置およびバイアスジャンプ対策のために、10 月 12 日に一旦会社に持ち帰り、社内動作確認後 10 月 20 日に再設置させた。雷サージ防止の欧化については、浅間山の落雷シーズンを過ぎており、設置期間中に落雷減少が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・開発を進めていくこととした。

3) 平成 30 年度：

平成 28 年度、平成 29 年度の評価で指摘のあった、火山観測に適した、固有振動数がより低いセンサを開発し、その固有振動数の確認及び減衰定数の調整を行った。その結果、作成した 6 つのセンサの固有振動数は約 23.8～24.9Hz、減衰定数が 0.68～0.72 に収まることを確認した。その後、3 成分センサユニットとして筐体を作成して組み込んだ。新しいセンサユニット格納筐体は平成 28、29 年度に使用した JOGMEC Phase 1 のサイズよりもかなりの小型化が達成された。

また、次年度以降の光センサシステムによる屋外観測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った。浅間火山観測所は生活道路に隣接しており、より静穏な環境である、防災科研 V-net 小浅間観測点付近を選定した。浅間火山観測所と小浅間観測点間にはデータ伝送用に光ケーブルが敷設されているため、その予備回線があれば既設の光回線を使用した観測テストもできると考えたが、調査した結果、予備回線はなく、経路途中でつながっていないことが判明した。

なお、平成 30 年度末に課題責任者に異動が発生し、課題責任者異動後の秋田大学では平成 31 年度以降の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 年度以降は課題責任機関を京都大学とし、屋外観測実施場所を桜島に変更することとした。

4) 平成 31 年度（令和元年度）：

本年度から新たに課題責任機関となった京都大学と連携し、本業務を推進し遂行するための準備をするとともに、平成 30 年度に作成したものと同様の 3 成分センサを 1 セット作成し、平成 30 年度に作成した 3 成分ユニット 2 式と合わせて、日本で最も活発な活火山である桜島で、三角形アレイを構築して火山観測を行った。観測期間は桜島で雷が多い梅雨時である 6 月上旬を入れる必要があるため、令和元年 6 月 3 日から 6 月 5 日にかけて設置を行って観測を開始し、12 月 5 日までの約 6 か月間連続観測を行った。光送受信装置については、平成 29 年度に JOGMEC の試作機が故障したため、新たに社内で作成したものを使用した。設置して安定稼働したのは、途中 9 月の台風時の停電による UPS の不具合以外は順調に連続観測をすることができた。

5) 令和 2 年度：

本システムは光ファイバおよびセンサ部に電源が必要ないことから、原理的に高温環境での観測に有利であるが、現時点ではそれがまだ実証されていない。そのため、本年度は高温対応用の部品を使用したセンサを試作するとともに、室内で恒温槽などを使用して高温実験を行い、その有効性の検証を行う。また、翌年度観測を予定している新潟工科大の 3000m 級観測井に設置できるように高温環境用ボアホール筐体を 2 式作成した。圧力については、筐体を 30MPa の圧力環境下において試験を行い、問題ないことを確認した。また、高温環境については、高温対応用センサの高温特性検証を行うために筐体ごと 150℃30 分間を維持して動作確認を行い、この条件でも信号が取れていることを確認した。

6) 令和 3 年度：

本年度は昨年度に作成した高温対応用センサ及びボアホール用筐体を実フィールドに設置して連続観測を行い、光センサシステムの高温環境における有効性を検証した。具体的には新潟工科大所有の観測性で、地下約 2000m にあるボアホールのケーシングの段差（ライアーハンガー）部分を利用してセンサを設置し、連続観測を開始した。設置した位置である地下 1978m 付近の温度は約 105℃である。来年度はこの温度環境下での連続観測を行う。

7) 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。

共同実施機関は、令和 3 年度に設置した高温対応用センサを継続して連続観測を行い、高温下での長期安定性を実フィールドで検証する。

8) 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。

9) 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。

10) 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) 令和 4 年度における業務の方法

以下の項目を課題責任機関と連携して該当年度の事業を行う。

1) 高温実証試験

新潟工科大学の敷地内の深井戸に設置した光センサシステムの連続観測を行い、高温環境下での長期安定性、有効性を検証する。

2) 観測結果についての総括

高温での観測結果について総括を行う。

(2) 令和 4 年度の成果

(a) 業務の要約

昨年度新潟工科大 3000m 級観測井の地下 1978m、温度 105℃の環境下に設置した光センサシステムで連続観測を行った。途中夏場に観測室のエアコン不良で PC 内のログが 70 度を記録する高温状態となり、光送受信装置の熱による故障が懸念されたためエアコンが復旧するまでの 15 日間の欠測があった、この期間及び計画停電による欠測を除いて、連続稼働していることを確認した。観測期間中、気象庁一元化震源リストにはない、地上設置観測点ではノイズに埋もれてわからないような、震源距離が短くて小さい地震を観測することができた。また、福島沖などの遠地地震記録も取得することができ、順調に観測ができていたことを検証した。

(b) 業務の成果

(a) 高温対応用光センサシステムの連続観測

1) 連続観測

本年度は昨年度 2 月に新潟工科大に設置した光センサシステムを、本年度中連続して稼働させた。光センサシステムの動作状態は、モバイル回線を引き、遠隔で状況の監視を行った。また、顕著な地震があった場合はモバイル回線を通じて該当時刻の地震記録ファイルを取得して確認した。連続記録データについては容量が大きいので、東京パワーテクノロジーにお願いして、定期的に現場を訪問してデータ回収をしていただいた。

観測期間中の欠測は以下の通りであった。

表 1 欠測機関とその原因

	欠測期間	理由
--	------	----

(1)	8月9日12時～8月24日12時	機器温度情報のため
(2)	9月22日17時～9月26日12時	計画停電

観測小屋にはエアコンが設置してあったが、故障していた。(1)は、観測小屋内の温度をモニタリングしたところ、外気温が40度、PC内のログが70度を記録したことから、光送受信装置が熱による故障の懸念が生じたために、一旦光送受信装置の電源をOFFにして観測を中止し、エアコン復旧後に観測を再開させた。

上記表以外でのデータ欠測はなく、順調に観測を行うことができた。

2) 観測記録例

新潟工科大付近で発生した近地地震や、2022年9月5日に発生した四川地震などの遠地地震記録の他には、地下約2000mの静かな環境で、地表ではノイズに埋もれてしまうような微小地震も観測できた。ここでは、観測された地震波形の例を示す。

a) 近地地震

気象庁震源リストによると、震央が新潟工科大の近傍にある地震があったので、その例を示す。

2022年4月20日20時4分20秒、N37.34500 E138.57833 深さ24km M1.5

この地震の震央は、図4にあるように新潟工科大から数百メートルのところであり、深さが24kmであるので、ほぼ直下に震源がある。



図4 2022年4月20日20時4分の地震の震央

この時光センサシステムで観測された地震波形を図5に示す。

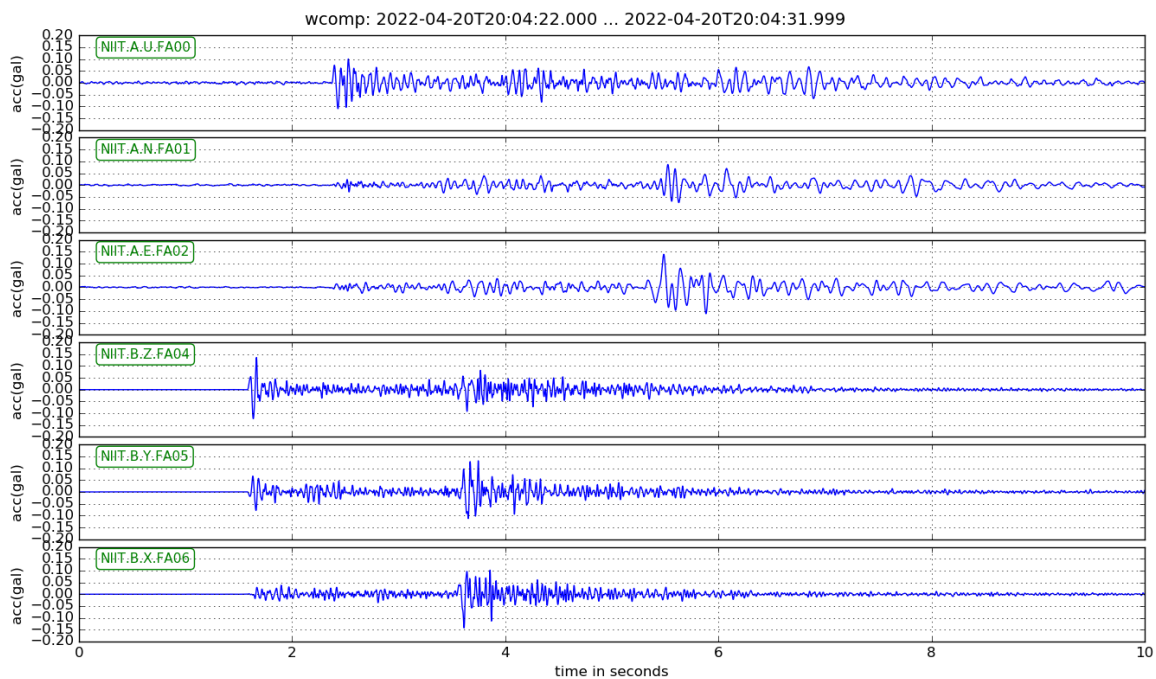


図5 2022年4月20日20時4分の地震で観測された波形

上3つの波形が地上に設置した地震計、下3つの波形が地下に埋設した波形である。P波の到達時刻は、地下20時4分23.6秒、地上24.4秒で時間差が0.8秒、S波の到達時刻は25.6秒、地上27.3秒で時間差が1.7秒であった。

b) 遠地震

2022年9月5日に発生した四川地震の記録

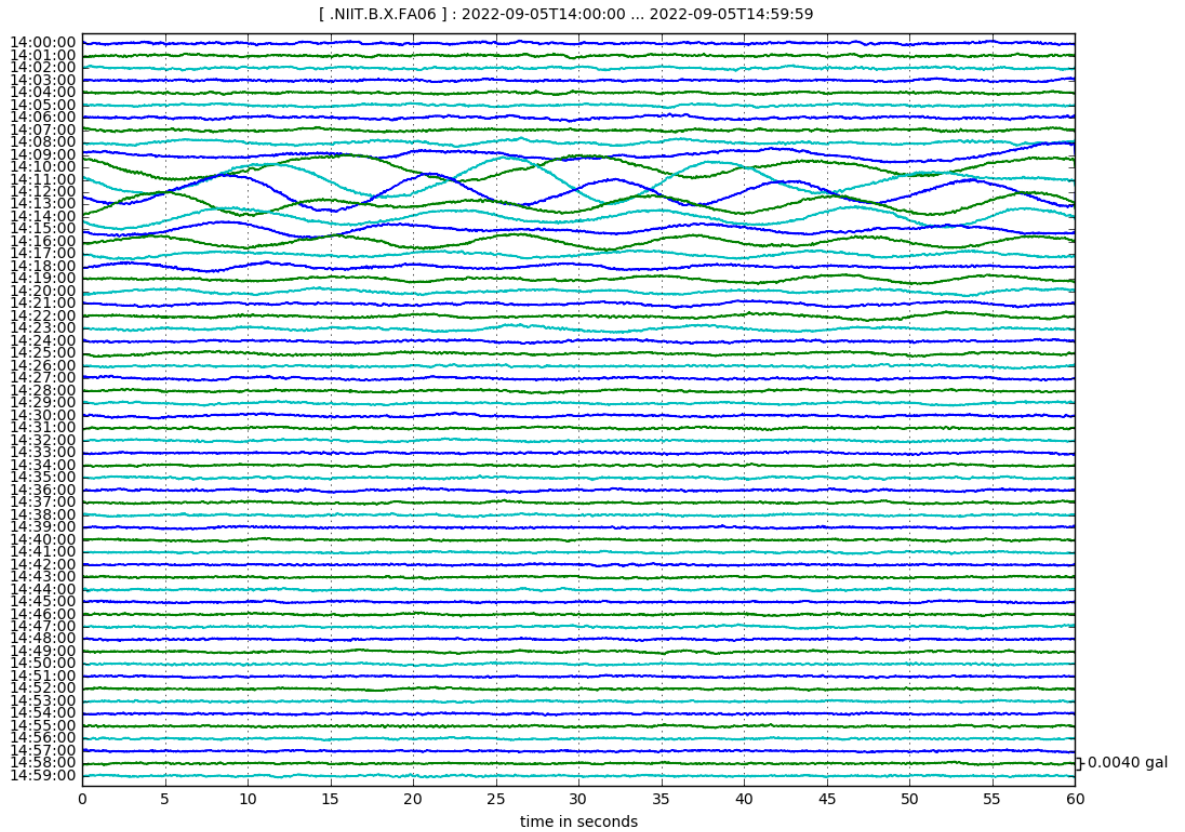


図6 坑中埋設地震計の水平動成分の地震波形

横軸スケールが1分で、14時0分0秒から14時59分59秒までの1時間の記録。左下に、波形の振幅スケールがあり、表示幅で4ミリガルである。

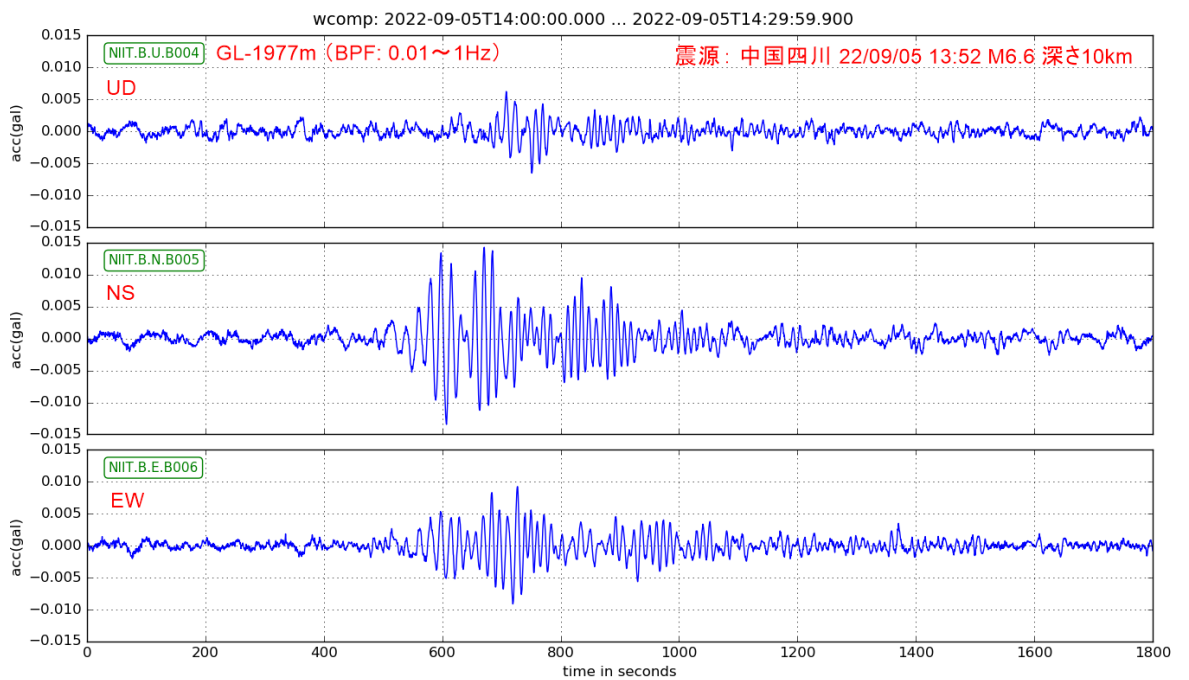


図7 図3の中の地震波形部分を、横軸1800秒(30分)で描いたもの

光センサシステムでは、周期 10 秒程度、振幅 5 ミリガル程度の波形も取得できていることを示している。

また 8 月 4 日 9 時 48 分に発生した福島県沖地震の記録も取得することができた。

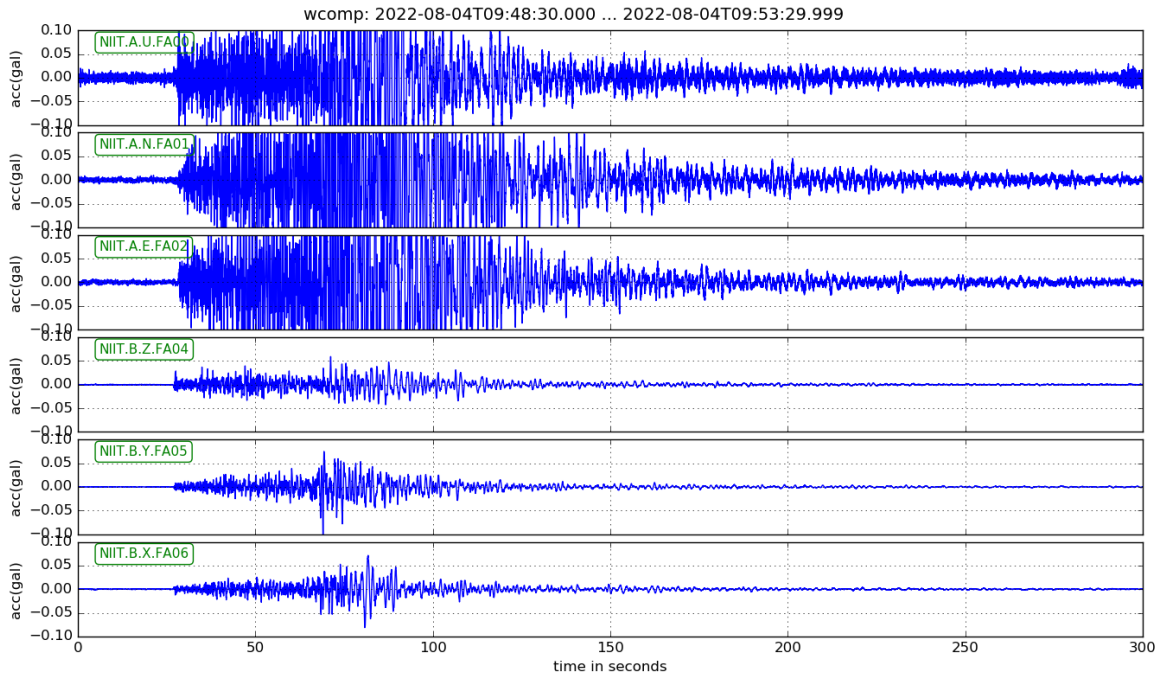


図 8 8 月 4 日 9 時 48 分福島県沖地震 M5.6 の地震記録

上 3 つの波形が地表地震計、下 3 つの波形が地下地震計の記録。この地震の場合、地表の地震波が増幅されている。

c) 微小地震

地下の環境はノイズが小さいので、気象庁一元化震源のリストにない小さい地震も観測できている。

2022.07.01 PS時間差が数秒以内

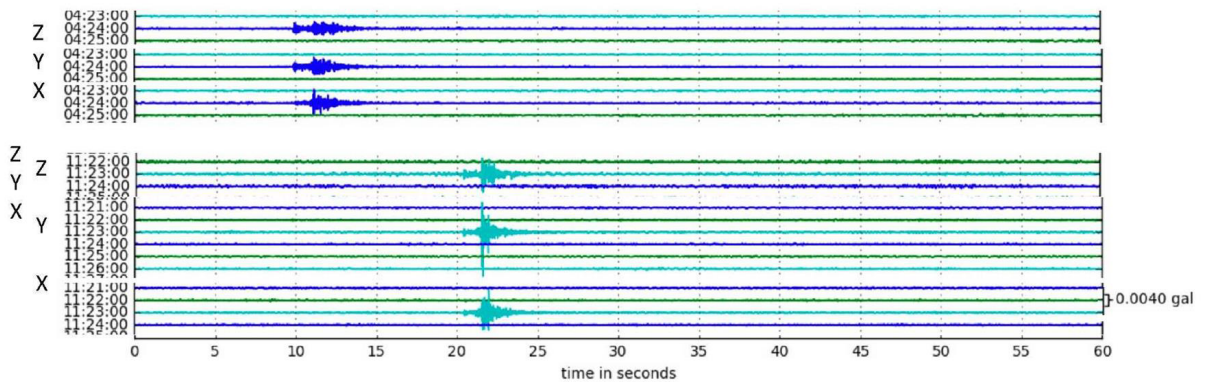


図 9 2022 年 7 月 1 日に地下埋設地震計観測された微小地震

これらの地震は、地上ではノイズに埋もれて検出できていない。また、いずれも P-S 時間が 1 秒程度と短く、近傍で発生した微小地震だと考えられる。

(b) 総括

令和 4 年度は、令和 3 年度に新潟工科大 3000m 級坑井の地下 1978m に埋設した地震計での連続観測を行い、約 105°C での高温環境下での光センサシステムでの安定性を検証した。観測期間中、真夏の時期に光送受信装置内が 70 度を記録したため、熱による故障を懸念して観測を停止させたこと以外は、順調に連続観測をすることができた。観測期間中は観測点ほぼ直下を震源とする地震や、四川地震などの遠地地震、気象庁一元化震源リストには乗らない観測点近傍の微小地震などを観測することができた。

来年度は新潟工科大における高温環境下での観測を継続するとともに、課題 B-4 との連携にむけて、フィールドによる、より多点の機動観測をすべく、新しい光地震計 1 式を作成する。

(c) 結論

本年度は昨年度 2 月に新潟工科大に設置した光センサシステムによる観測を継続して行い、地下 1978m、温度約 105°C の環境下で、ほぼ 1 年間連続して観測することができたことを確認した。今後の課題としては、課題 B-4 における機動地震観測の手段として本システムの活用を進めていくことが必要である。そのため、より多点の観測ができるよう、来年度は地上設置型の光センサを一式作成する。

なお、このプロジェクトに関して、東京パワーテクノロジー（株）地震グループの方々には現地からのデータ回収、観測室内のエアコンの改修、新潟工科大との折衝等、非常に多岐にわたってご尽力をいただきました。ここに記して感謝いたします。

(d) 引用文献

なし

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

別添「学会等発表実績」のとおり。

(f) 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) 令和5年度の業務計画案

(a) 高温実証試験

新潟工科大学の敷地内の深井戸に設置した光センサシステムについて、継続して連続観測を行い、高温環境下での長期安定性、有効性を検証する。

(b) 三成分光センサの作成

翌令和6年度からの課題B-4との連携にむけて、フィールドによるより多点の機動観測をすべく、地上設置型の3成分光センサー式を作成する。

(c) 総括

観測結果および作成した光センサについて総括する。

3. 会議録

本業務遂行において以下の会議および現地調査に担当者が出席した。

令和4年4月2日～5月9日 投稿論文の査読結果を受けての論文改定の打ち合わせ
場所：メール
出席者：中道，平山

令和4年6月4日～6月13日 投稿論文の査読結果を受けての論文改定の打ち合わせ
場所：メール
出席者：中道，平山

令和4年6月22日～6月30日 JDVNシステムへのデータの取り込みの打ち合わせとデータ取り込み作業
場所：メール
出席者：中道

令和4年7月18日～7月19日 中間評価の調査票の記入のための打ち合わせ
場所：メール
出席者：中道，平山

令和4年7月25日 第10回火山研究運営委員会
場所：オンライン会議
時間：15時30分～17時30分
出席者：中道

令和4年7月25日～8月5日 分散型音響センシングシステム（DAS）と光センサシステムとの比較観測

場所：新潟工科大学

出席者：中道，平山，池田

令和4年7月29日 火山学実習・火山学特別実習

場所：新潟工科大学

出席者：中道，平山

令和4年8月18日～8月22日 中間評価会の当日説明資料の作成の打ち合わせ

場所：メール

出席者：中道，平山

令和4年8月31日 中間評価会

場所：オンライン会議

時間：9時～9時30分

出席者：中道，平山

令和4年9月27日 成果の普及に向けた打ち合わせ

場所：オンライン会議

時間：13時～15時30分

出席者：中道，平山

令和4年12月2日 第11回火山研究運営委員会

場所：オンライン会議

時間：10時～12時

出席者：中道

令和4年12月16日 第9回総合協議会

場所：オンライン会議

時間：13時30分～16時30分

出席者：中道，平山

令和5年1月18日 科学技術・学術審議会測地学分科会第5回火山研究推進委員会

場所：オンライン会議

時間：10時～12時

出席者：中道

4. むすび

令和3年度に開始した大深度観測井における光センサシステムによる地震観測を令和4年度は継続した。そして、1年間の連続地震観測データから高温環境下における光センサシステムの長期間の安定性と有効性を評価した。一方、火山活動の評価のためには地震観測を複数年行うことが必要であるため、令和5年度も引き続き観測を継続し、複数年における光センサシステムの長期間の安定性と有効性を評価する予定である。

様式第 2 1

学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目「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
機関名 京都大学防災研究所

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表 題目、口頭・ポ スター発表の別）	発表者氏名	発表した場所 (学会等名)	発表した時期	国内・外の別

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表 題目）	発表者氏名	発表した場所 (学会誌・雑誌等 名)	発表した時期	国内・外の別
A Half-Year Long Observation at Sakurajima Volcano, Japan Using a Multi- Channeled Seismometer System with Phase-Shifted Optical Interferometry	Haruhisa Nakamichi, Yoshiharu Hirayama, Toshiharu Ikeda, Hiroshi Ando, Keiji Takeuchi	Journal of Disaster Re	2022/8/1	国外

(注 1) 発表者氏名は、連名による発表の場合には、筆頭者を先頭にして全員を記載すること。
(注 2) 本様式はexcel形式にて作成し、甲が求める場合は別途電子データを納入すること。