

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 5 年度
成果報告書

令和 6 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5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5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



新潟工科大学の敷地内に設置されている光センサシステム（2024年3月27日撮影）。深井戸の1,978 m深に耐圧筐体に収納されている光センサが設置されており、管理棟からの光ファイバーが光センサに接続されている（左写真）。管理棟に設置されている光送受信装置（右写真）。

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ー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5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

グラビア

はじめに

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）.....	2
(3) 研究実施日程（白山工業）.....	2
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 5 年度における業務の方法.....	7
(2) 令和 5 年度の成果.....	7
(a) 業務の要約.....	7
(b) 業務の成果.....	8
(c) 結論.....	12
(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.....	13
(3) 令和 6 年度の業務計画案.....	13
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）	14
(1) 業務の内容.....	14
(a) 業務題目.....	14
(b) 担当者.....	14
(c) 業務の目的.....	14
(d) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）.....	14
(e) 令和 5 年度における業務の方法.....	17
(2) 令和 5 年度の成果.....	18
(a) 業務の要約.....	18
(b) 業務の成果.....	18
(c) 結論.....	27
(d) 引用文献.....	27
(e) 成果の論文発表・口頭発表等.....	27

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	28
(3) 令和6年度の業務計画案	28
3. 会議録	28
4. むすび	30

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。	R5. 4. 1～ R6. 3. 31	650,000	150,000
白山工業 基盤開発部 部長 副部長	平山義治 池田敏晴	①高温実証実験 昨年度に引き続き新潟工科大 の地下 1,978 m、温度 105 °C の環境に設置したセンサによ る連続観測を行ったところ、 2023 年 7 月ごろに上下動成分 が不調になり、観測できなくな った。この原因を調査した ところ、地震計筐体内の水分 が高温により水蒸気になり、 機材と反応して脆化したことが 主な原因と思われることが判 明した。 ②高温実証試験による地震計 の不調原因は、地上設置型の 3 成分光センサとして使用す ることは問題ないことから、 フィールドでの、より多点観 測を目的とした地上設置型の 3 成分光センサー式を作成し た。	R5. 4. 1～ R6. 3. 31	3,961,440	914,178

(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高温実証実験	←											→
②3成分光センサの作成										←		→
③総括											←	→

2. 研究成果の説明

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）

(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	機関種別	役職	氏名
京都大学防災研究所	課題責任機関	准教授	中道 治久

(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、平成 30 年度以前は、関東で活動的な火山であり雷が多い（＝雷の影響調査に適した）浅間山に光センサシステムを配置して検証を行うこととし、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してきた。委託業務遂行にあたっての環境の変化のため、平成 31 年度以降は光センサ配置場所を、九州で活動が非常に活発な火山である桜島火山に変更するとともに、一部業務内容を書き換えて実施することとする。変更した業務内容によっても本来の業務目的は達成される見込みであり、また本変更は平成 30 年度総合協議会にて了承済である。

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℃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 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 20 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ー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所有の観測深井戸で、地下約 1,980 m 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継続し、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、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した。

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した。

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の火山運用実績の獲得を行う。

(e) 令和 5 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 5 年度の成果

(a) 業務の要約

令和 5 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継続し、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。

(b) 業務の成果

1) 光センサシステムの総合評価と総括

光センサシステムを用いて、これまでに複数の火山において振動観測を行い、火山性地震および噴火に伴う地震の観測におけるシステムの有用性が示された (Tsutsui et al., 2019; Nakamichi et al., 2022)。その次のステップとして、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) 深井戸における高温対応用光センサシステムによる地震観測の評価

高温対応用光センサシステムによる地震観測は 2022 年 2 月 22 日に開始された。令和 4 年度は観測開始から 2023 年 1 月 29 日までのデータにて評価を行った。そこで、令和 5 年度は 2023 年 1 月 30 日から 2024 年 3 月 31 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

2023 年 12 月 28 日 16 時から 12 月 29 日 13 時までと 2023 年 12 月 30 日 20 時から 2024 年 1 月 8 日 13 時まで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 5 年度の成果** (b) 業務の成果 1) 高温対応用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、新潟工科大学の停電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 日に観測を開始して、2023 年 1 月 29 日までのデータを使って長期安定性と有効性の評価を令和 4 年度に行った。そこで、今年度は 2023 年 1 月 30 日から 2024 年 3 月 31 日までの 427 日間の期間について、深井戸と地表に設置され

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 1 kHz 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 2023 年 1 月 30 日から 2024 年 3 月 31 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深井戸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、地表設置と深井戸の両方の光センサにて地震が確認されている（図 1）。地表設置と深井戸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、地下と地表面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、深井戸の光センサの地動ノイズレベルは 0.5 mgal 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 2023 年 6 月上旬までは見られなかった。深井戸では地下 1,978 m に 3 成分地震計が設置されている。そのうちの上下動成分の波形に 2023 年 6 月中旬から連続的なノイズが現れるようになり、2023 年 7 月以降は大振幅のノイズが断続的に入るようになった。深井戸に設置の地震計の上下動成分以外は昨年度報告と同様に安定して震動観測が行えている。例えば、停電からの復旧後である 2024 年 1 月 8 日から 1 月中旬において連続的な振幅の震動が見られるが、これは 2024 年 1 月 1 日に発生した 2024 年能登半島地震（Mj7.6）の活発な余震による地震動である（図 1）。一方、2024 年 2 月中旬から深井戸の地震計の水平動 X 成分に間欠的なノイズが見られる（図 1）。このノイズについてより詳しく評価するために、2024 年 1 月 8 日から 2024 年 3 月 31 日のエンベロープ波形を図 2 に示す。地表設置型地震計の上下動成分（U）、東西成分（E）、南北成分（N）と深井戸の地震計の水平動 Y 成分と比較して、深井戸の地震計の水平動 X 成分は、1 月 8 日から 2 月 18 日の期間において波形に特段の異常はなく、正常な地動を反映している。一方、2 月 19 日以降は既に異常が認められている深井戸の地震計の上下動（Z）成分と同様な間欠的な大振幅ノイズが認められる。したがって、2 月 19 日以降にて水平動 X 成分は上下動成分と同様の原因による障害が生じている可能性が高い。

これらの当該成分を除いては光センサにて地震が安定して観測されており、そして深井戸の地震計にノイズレベルの上昇が見られなかった。

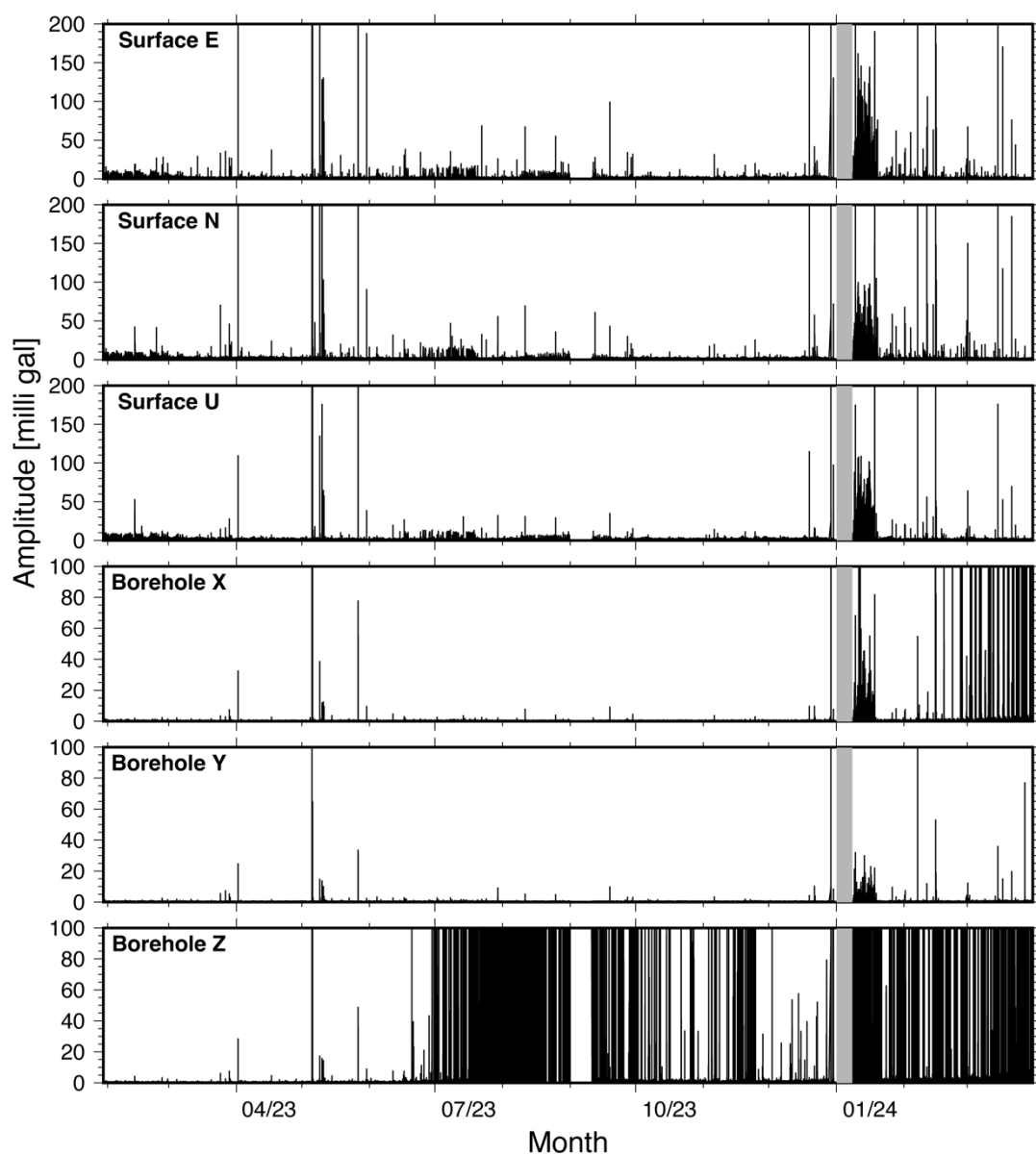


図1 光センサシステムによるエンベロープ地震波形（2023年1月30日～2024年3月31日）。Surfaceと記載の上の3段は地表設置型の光センサで、Boreholeと記載されている下の3段は大深度観測井に設置された光センサの波形を示す。UとZは上下動成分、NとEはそれぞれ南北と東西の水平動成分を示す。XとYは共に水平動成分で、Xは北から時計回りに234°の方向、Yは北から時計回りに144°の方向を向いている。図中の灰色ハッチは観測の停電による一時中断期間を示す。

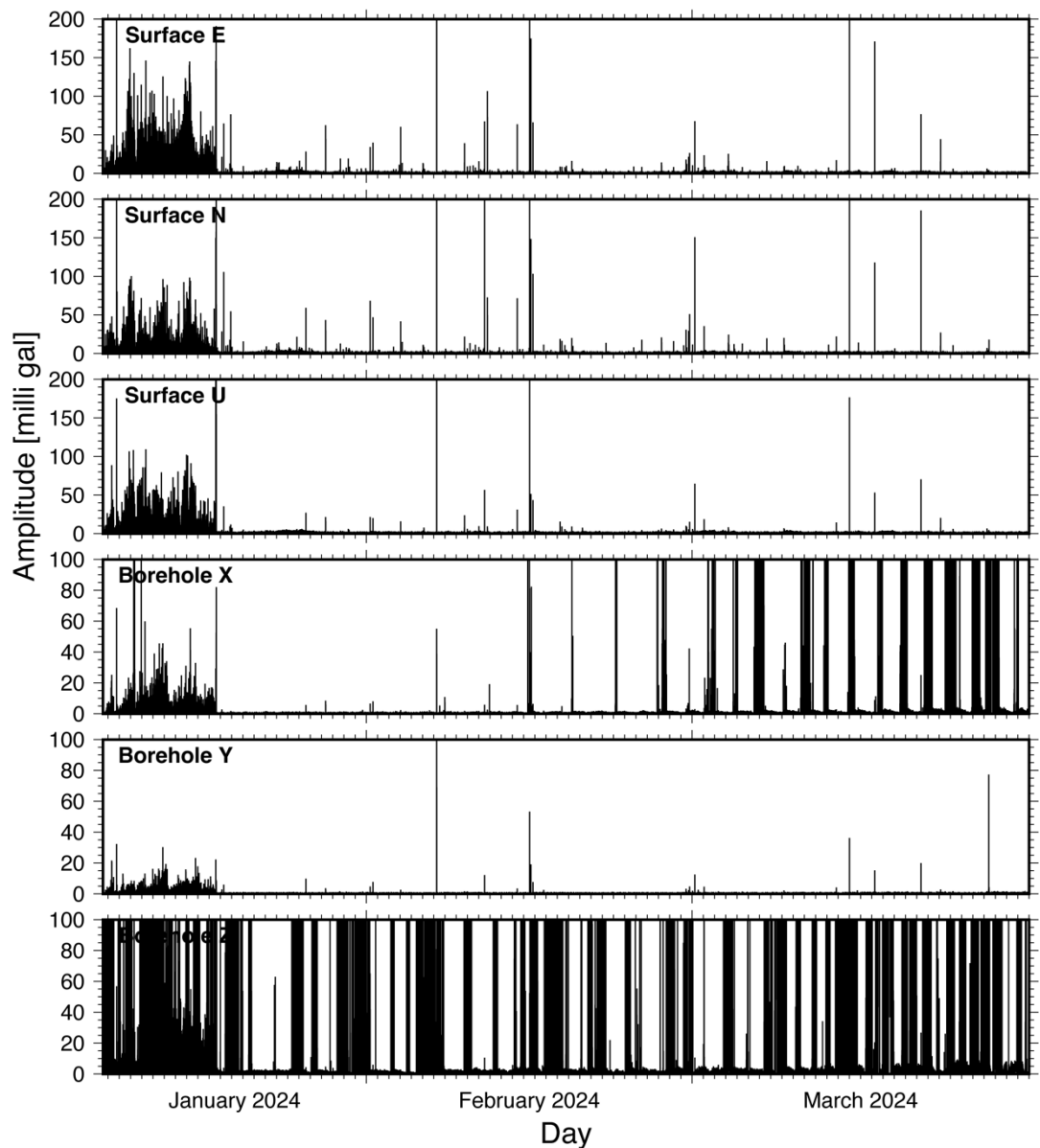


図2 光センサシステムによるエンベロープ地震波形（2024年1月8日13時～2024年3月31日）。地震計成分の説明は図1と同様。

b) 光センサシステムの総括

2023年年末から年始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、深井戸に設置された光センサの記録から、光センサシステムの2年を超える観測期間における長期安定性の評価を行えた。観測開始から1年半の期間においては深井戸に設置された光センサの記録は安定していた。しかし、2023年6月中旬から深井戸の光センサの上下動成分に異常が見られた。また、2024年2月19日からは深井戸の光センサの水平動の1成分においても同様の異常が見られた。共同実施機関によって、記録異常の原因の特定がなされているが、対策を施した光センサに交換しての観測が今後必要と言える。その上で、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

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。これはこのプロジェクト終了後の取り組みに期待したい。

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）。そして、本課題終了にあたっての今後の光センサシステムの開発や観測についての意見交換を行った。

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 システムへの収録が 2022 年 6 月 30 日までに完了し、2023 年 1 月 11 日から JVDN システム (<https://jvdn.bosai.go.jp/portal/ja/>) において課題 B2-2 のデータが公開されている。

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。

(c) 結論

本年度は前年度の 2022 年 2 月に新潟工科大学の深井戸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 1,978 m にあり、約 105 °C の高温環境下にある。2 年間を超える連続観測により、高温環境下における長期安定性の評価ができた。そして、高温下における光センサの課題が見つかった。対策を施した光センサの再設置が望まれるが、このプロジェクト終了後の取り組みに期待したい。

(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 6 年度の業務計画案

本課題は令和 5 年度で終了した。

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 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	機関種別	役職	氏名
白山工業株式会社	共同実施機関	部長 副部長	平山 義治 池田 敏晴

(c) 業務の目的

令和 5 年度も継続して、令和 3 年度に新潟工科大が所有する 3,000 m 級観測井の深さ 1,978 m に設置した光地震計について、100 °C 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。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。また、地上での多点観測を行うための地上設置型センサセットを作成する。

(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ィージビリティスタディを行い、光センサシステムを用いた火山観測の実用化に向けたノウハウを蓄積した。

光センサシステムは平成 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23.8~24.9 Hz、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ー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、令和 2 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 3,000 m 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 30 MPa 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 °C、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：

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所有の観測井で、地下約 2,000 m 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。設置した位置である地下 1,978 m 付近の温度は約 105 °C であった。令和 4 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：

令和 3 年度新潟工科大 3,000 m 級観測井の地下 1,978 m、温度 105 °C 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 °C 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が、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。

8) 令和 5 年度：

令和 4 年度に引き続き新潟工科大 3,000 m 級観測井の地下 1,978 m、温度 105 °C 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ところ、令和 5 年 6 月後半ごろから地下埋設地震計の上下動成分のノイズが大きくなり、7 月末時点で計測不能となった。連続観測ができたのは、令和 4 年 2 月に観測を開始してから約 1 年半であった。新潟工科大とほぼ同じ観測環境（地下 2,500 m、温度 108 °C）で、同じ機材を用いた別の観測点でも、同じく約 1 年半の観測期間後に同様の現象が発生したことから、こちらを回収して地震計筐体内部を検証した。その結果、150 °C まで動作可能な

高温対応光部品が劣化していることを確認した。また、筐体内に水滴は見られなかったものの、筐体を封入している耐熱用オーリングがもろくなっていること、筐体内部の地震計の部品の一部が変質して加水分解していることから、地震計筐体内部の水が水蒸気となって内部の機材と反応したことが分かった。一方、室内での恒温槽による連続試験では、高温対応用光センサは 110℃～120℃の環境で 2 年近く劣化していないことも確認できていることから、水分（水蒸気）を含んだ高温環境が地震計機材に悪影響を及ぼした可能性が高い。

なお、本課題は今年度で終了することとなった。ただし、光センサシステムとしての高温環境下の安定性の課題は残っている。例えば高温対応用光部品および構成の見直し、ボアホールにおける任意の位置に地震計を固定する技術についての開発、100℃を超える環境下で長期にわたり水分が侵入しない方法の開発検討などがある。これらは白山工業として継続的に改良開発を行っていく予定である。

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 5 年度における業務の方法

①高温実証実験

新潟工科大学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。

②3成分光センサの作成

翌令和6年度からの課題B-4との連携に向けて、フィールドによるより多点の起動観測をすべく、地上設置型の3成分光センサ一式を作成する。

③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。

(2) 令和5年度の成果

(a) 業務の要約

令和3年度に新潟工科大3,000 m級観測井の地下1,978 m、温度105℃の環境下に設置した光センサシステムで引き続き連続観測を行い、実証試験を行った。その結果、令和5年6月後半あたりから上下動成分のノイズが大きくなり、7月末時点で計測不能となった。検証したところ、光センサのコリメータ部分で光の損失が大きくなっていることを確認した。また、筐体を封入している耐熱用オーリングがもろくなっていること、筐体内部の部品の一部が加水分解していることが確認された。一方、室内での恒温槽による連続試験では、110℃～120℃の環境で2年近く全く劣化していないことも確認できていることから、高温に加え、水分（水蒸気）を含んだ環境が地震計機材に悪影響を及ぼした可能性が高い。

上記検証の結果は地上置きセンサ作成には問題ないと判断し、フィールド用の3成分光センサ一式を作成した。

(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

本年度は令和4年2月に新潟工科大に設置した光センサシステムについて、本年も継続して連続観測を行った。光センサシステムの動作状態は、モバイル回線を引き、東京から遠隔で監視を行った。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。

今年度の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)	令和5年12月28日16時～ 令和5年12月29日13時	大学の計画停電

(2)	令和 5 年 12 月 30 日 20 時～ 令和 6 年 1 月 8 日 13 時	大学の停電に伴う欠測
-----	---	------------

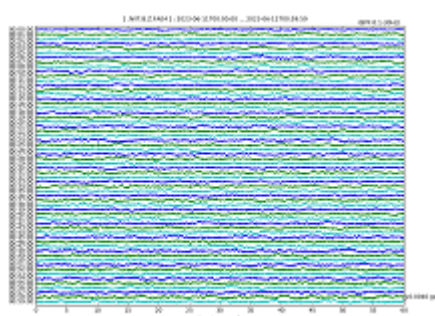
年末に大学の計画停電があり、予定通り復旧したものの、翌 30 日に大学で再び停電となった（表 1）。その後令和 6 年 1 月 1 日に能登半島地震が発生し、新潟工科大もその地震の影響を受けて大学開始が 1 月 8 日となったことから、停電の復旧は 1 月 8 日の午後であった。そのため、その間は欠測となり、1 月 1 日の能登地震の記録は取得できなかった。

b) 地下埋設地震計不具合

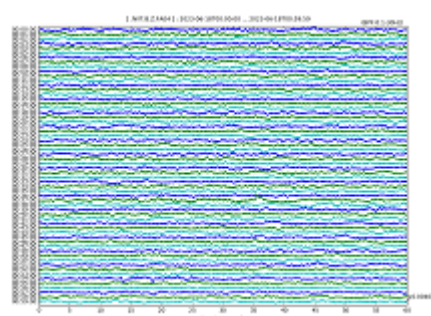
i) 波形異常

地下 1,978 m に埋設した地震計のうち、上下動の波形のノイズが次第に大きくなり、7 月後半に観測不能となった。これに対し、水平動のセンサは 2 成分とも観測ができています。

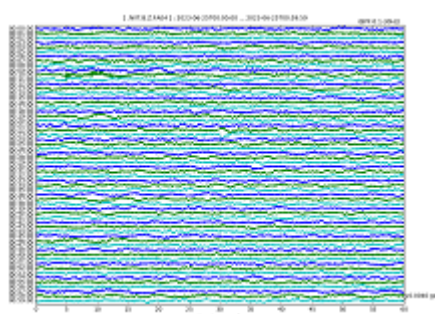
以下に、深井戸に設置した地震計の上下動成分について、6 月 11 日から 7 月 30 日までの毎日曜日午前 0 時から 1 時までの波形を示す（図 1）。



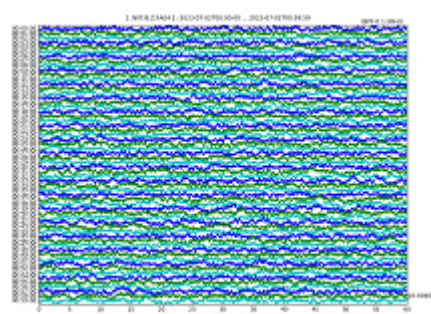
6 月 11 日



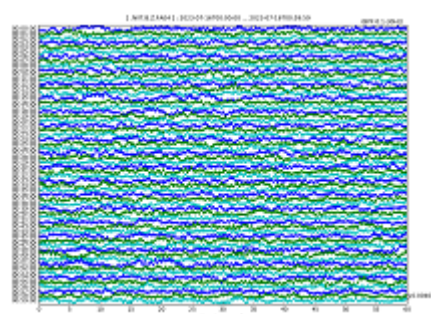
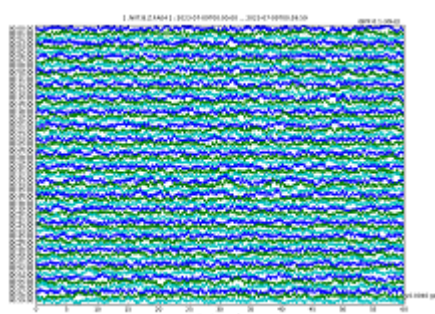
6 月 18 日



6 月 25 日



7 月 2 日



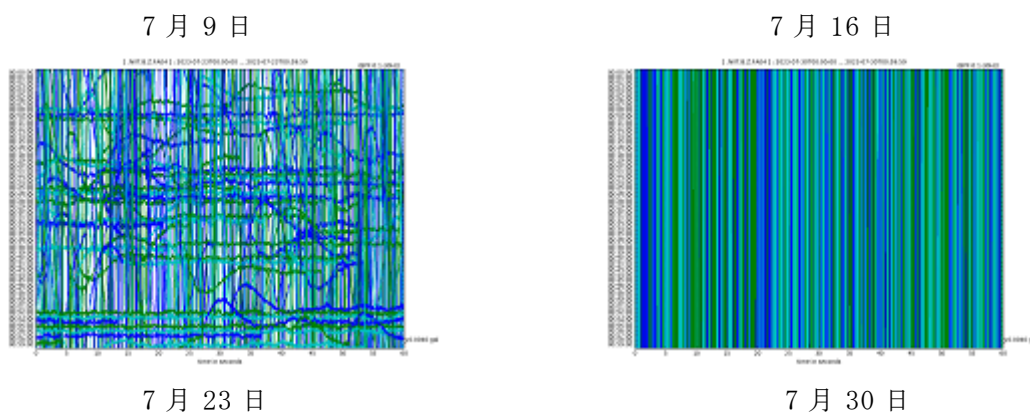


図1 6月11日から7月30日までの、午前0時から1時間の上下動成分の波形

7月に入ってから波形のノイズが顕著に見え始め、7月23日には波形を表示できていない状態となった。

ii) 地震計異常の原因

この原因は、センサに入力して干渉させるためのRとSのレベルが下がり、干渉させたI1とI2による位相の演算が不安定になったためにノイズが大きくなったことにある。下図2は、7月19日の干渉信号である。なお、干渉信号については、引用文献1)、2)を参照のこと。

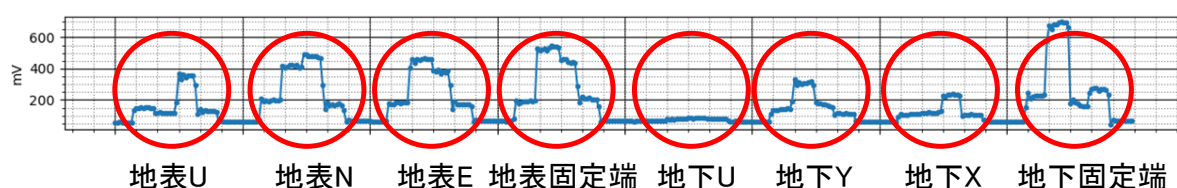


図2 7月19日10時の干渉信号。横軸は時間。

図2の階段状の段差一つが5 nsである。U、N、Eは各上下、南北、東西成分であり、地下地震計の水平動は真北を指していないのでX成分、Y成分としてあらわしている。図2を見ると、地下のU成分は信号レベルが低くなっていることがわかる。

なお、図2にあるように地下の上下動成分だけレベルが下がっており、地下水平動2成分はこの時点で問題ないように見える。したがって、地上の光送受信装置ではなく、埋設したセンサ側に問題があると推定される。

図3は新潟工科大に設置した光センサシステムの構成である。故障箇所が地下埋設地震計の上下動成分のみということから、図3の赤い部分のどこか（カプラ、センサ、カプラとセンサをつなぐファイバー）に異常が発生したと推定される。

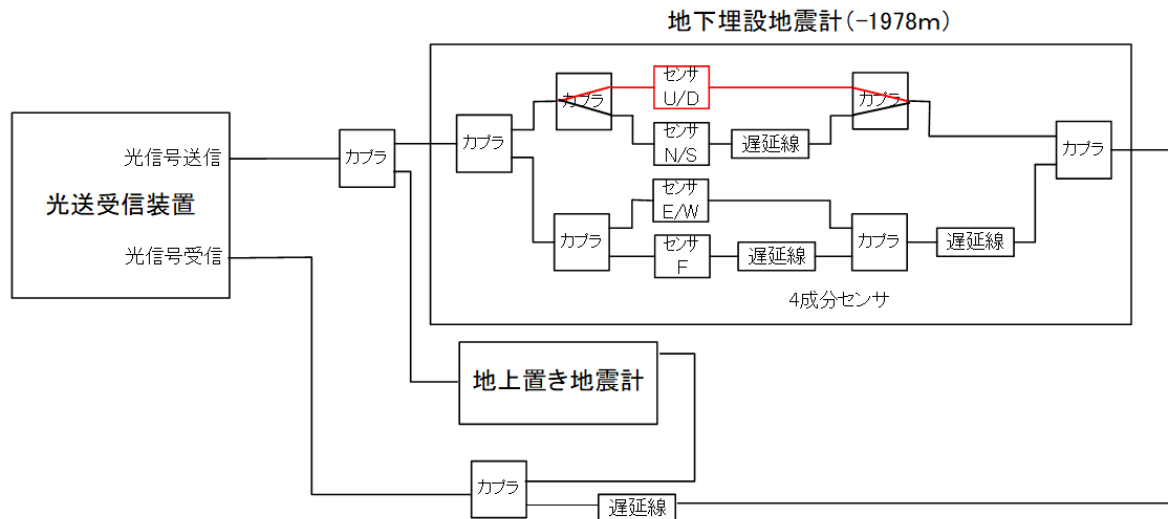


図3 新潟工科大の光センサシステム構成

iii) 地震計内部検証

原因調査のため、地震計内部の検証を行う必要がある。地下埋設地震計の不調が発覚したのち、12月の総合協議会では、不具合のあった光センサの引き上げと状況確認を行う予定をたて、その旨を発表した。しかし、結局新潟工科大でのセンサ引き上げと調査は本年度中には実現できず、令和6年度前半に東京パワーテクノロジーおよび白山工業などが協力して行うこととなった。他方、青森県内で新潟工科大で使用した地下埋設地震計と全く同じ筐体、高温対応用部品を使用し、観測環境も地下約2,500 m、温度約108℃と、新潟工科大深井戸とよく似た条件で連続観測を行っているところがあり、この観測点も連続観測開始から約1年半で新潟工科大と同様、センサ故障が発生していた。そのため、こちらの地震計を引き上げ、内部の検証を行った。

筐体から光回路を取り出し、各部品での光の通過損失を測定したところ、回路内のカプラ、センサ内部のFRM（ファラデーローターミラー）には異常が見られなかった。一方、光センサ内部のコリメータの通過損失が大きいことから、コリメータが故障の原因であることが判明した。センサ内部で使用しているコリメータは、振動している錘（振動子）に光を当て、その反射した光を光ファイバー内に戻す役割をしている。このコリメータを固定している接着剤が軟化し、コリメータの軸が動いたことにより、光損失が大きくなったと考えられる。

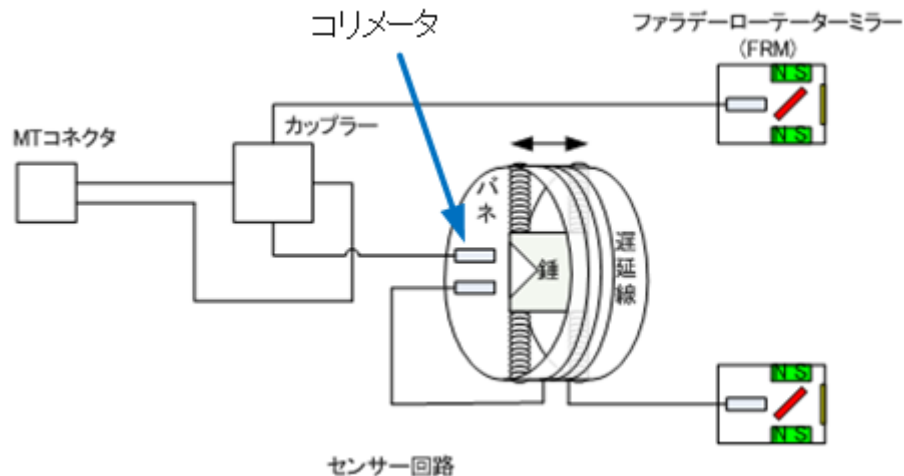


図 4 光センサ内部概略図

iv) 地震計筐体内部の状況

地震計筐体内部を観察すると、コネクタを接続している部分に使用している黒い樹脂部品に白い付着物があることが確認された（図 5）。

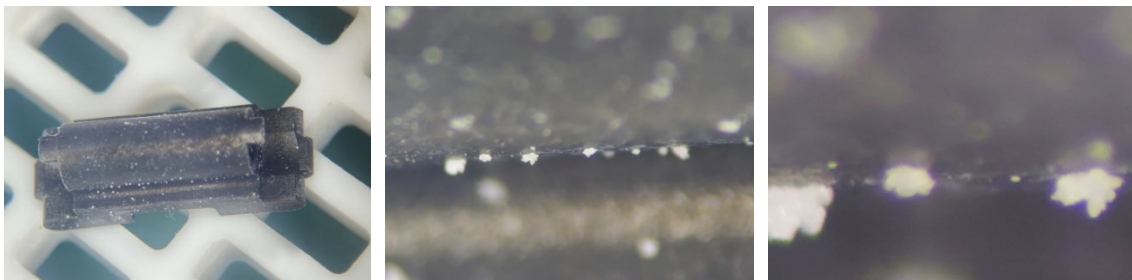


図 5 地震計筐体内に使用していた部品

この素材は PBT-GF20%（ポリブチレンテレフタレート グラスファイバー20%充填）である。PBT は通常 150 ℃程度までの耐熱性があるが、高温多湿環境下では加水分解を起こす可能性があるとしてされている。PBT-GF20%に付着していた白い物体を FT-IR で分析したところ、テレフタル酸であることが確認された。テレフタル酸は PBT が加水分解したときに生じる成分であることから、高温の水分の存在下で加水分解が起こり、樹脂表面に析出した可能性が高い。

また、筐体内の光ファイバーを保護しているチューブである、熱可塑性ポリエステル・エラストマ（ハイトレル 7273F、耐熱～140 ℃）が脆化していたため、こちらも FT-IR で分析を行った。その結果、エステルに含まれる C-O-C が減り、カルボン酸に含まれる C=O や O-H が増えていることから、エステル結合が加水分解でカルボン酸とヒドロキシ基に分解し、物性劣化した可能性が高い（図 6）。

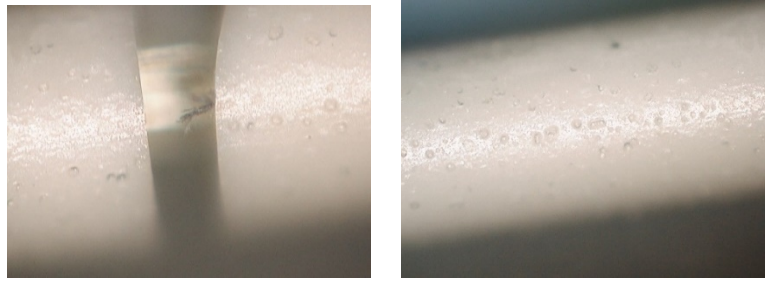


図6 ハイトレル 7273F の破断面と表面

地震計筐体内部の部品の加水分解生成物が発生していることから、地震計筐体内部に水が存在していたことが示唆される。

ただし、地震計は封入後に内部の空気を真空ポンプで引いて代わりに乾燥窒素ガスを充填していることから、埋設時には筐体内に水分はほとんど入っていなかったと思われる。

次に、筐体を封入しているオーリング付近を調査した。

地震計筐体の外観図と、オーリングが入っている場所（赤い縦線）を図7に示す。

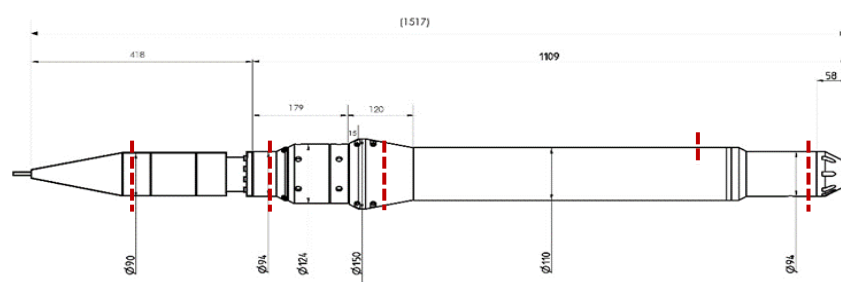


図7 地震計筐体の外観図

筐体にオーリングが入っている場所は5か所である。右から2つめの短いオーリングは封入後の乾燥窒素置換用の穴を封止するためのものである。

地震計筐体はケーブルヘッドと筐体からなる。ケーブルヘッドはケーブルと一体になっているので、まずは図7の左から2つめのオーリングで切り離し、左から3つ目のオーリングの部分を外して内部に格納した地震計を取り出している。その地震計を水密にしているオーリングの状態を図8に示す。

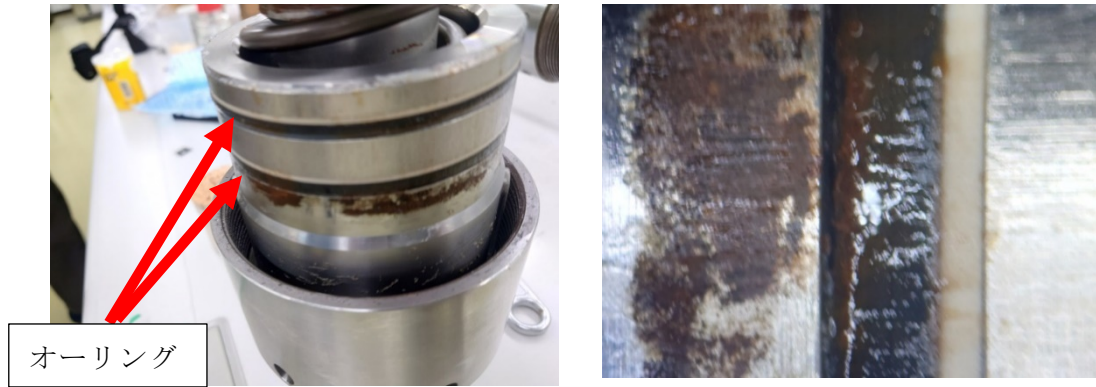


図 8 地震計筐体を水密にしているオーリングの状態

図 7 の右から 2 つ目の、ガス交換穴封止用のオーリングの状態を図 9 に示す。

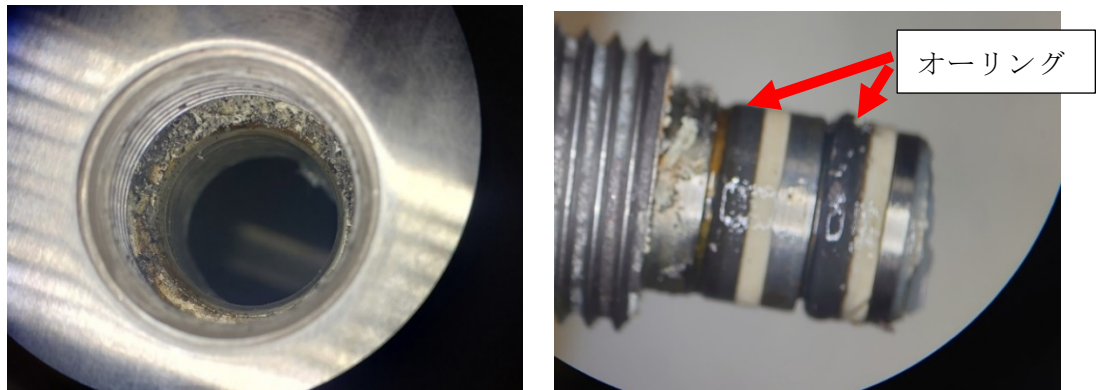


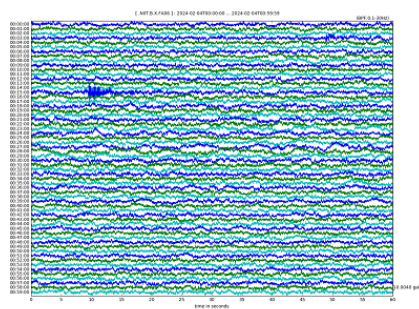
図 9 ガス交換穴封止用オーリングの状態

図 8 も図 9 も、1 段目のオーリングの表面が平らになり、断面形状が丸から長方形になり、体積も収縮していることが確認できる。ただし、取り出した筐体内部の回路には水滴は確認できなかったことから、水は入ったとしても機材と反応する程度の少量であったと推定される。

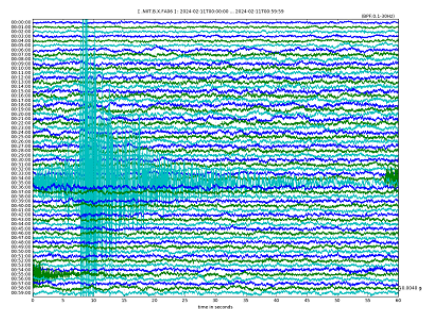
以上の検証の結果、高温高圧環境下での長期連続観測中に、筐体のオーリングが劣化し、少量の水分が筐体内に入り、その水が 100 °C を超える環境下で筐体内部の機材と反応し、コリメータを固定している接着剤を軟化させてコリメータが動いたことにより光損失が大きくなり、光センサが故障した可能性が高いと推定される。

v) 水平動成分の波形異常

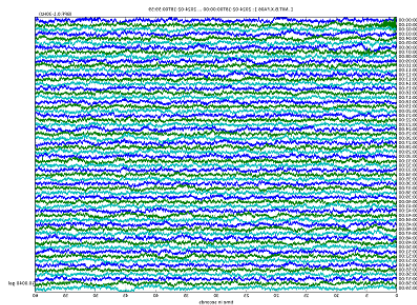
地下 1,978 m に埋設した地震計のうち、令和 6 年 2 月半ばから水平動 X 成分も同様な異常がみられるようになった。その傾向を図 10 に示す。



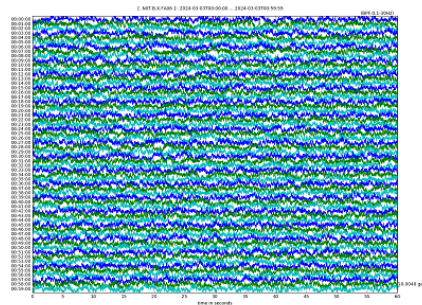
2月4日



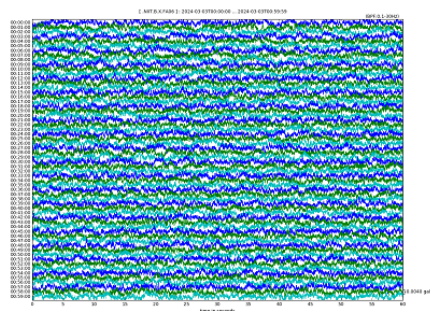
2月11日



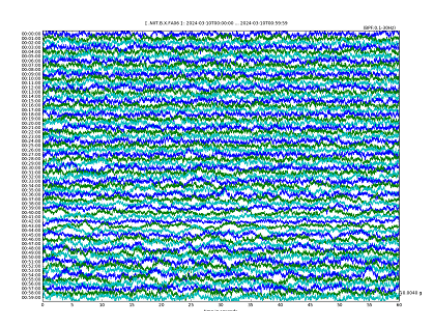
2月18日



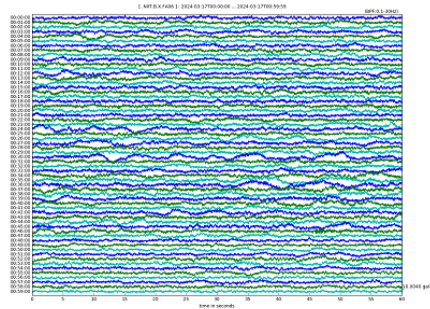
2月25日



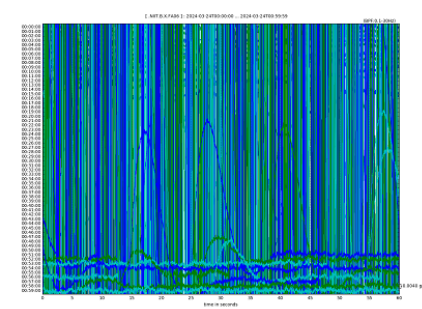
3月3日



3月10日



3月17日



3月24日

図10 2月4日から3月24日までの、午前0時から1時間のX成分の波形

傾向は図1と同じであり、水平X成分も上下動成分と同様に故障したと考えらえる。

vi) 今後の対策

100℃程度の環境で、かつ微量ながら反応するのに十分な水が存在している場合、長期観測下で不具合が生じることが分かった。また、高压でも数十℃程度であ

れば過去の観測結果から問題はないし、100℃を超えていても水分がなければ問題ないことが確認できた。現時点では高温高压に耐えられる筐体の作成、特にオーリング部分に問題があった可能性が高い。今後は、筐体を溶接するなど外部からできるだけ水が入らないようにすること、筐体内部が乾燥状態になるように乾燥剤を入れるなどの改良を行いたい。ただし、課題 B2-2 としては今年度で終了のため、来年度からは主に東京パワーテクノロジーと白山工業で開発改良を進める予定である。

2) フィールド観測用光センサの作成

新潟工科大地下 1,978 m に埋設した地震計の不具合は、筐体内の温湿度環境が原因である。一方、フィールド用加速度計については、観測環境が 100℃になることもなく、光ファイバーとの接続は防水コネクタを使用していることや、2019 年の火山 PJ において桜島ハルタ山観測点の屋外で梅雨や雷雨の時期を含む約 6 か月間の連続観測を行っても問題なかったことから、今までと同じくフィールド用の光センサー式を作成し(図 11)、動作確認をおこなった(図 12)。

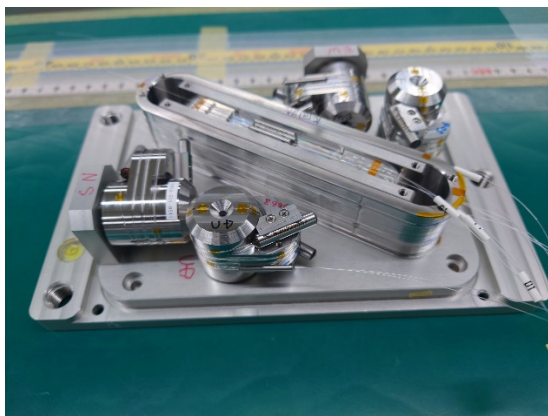
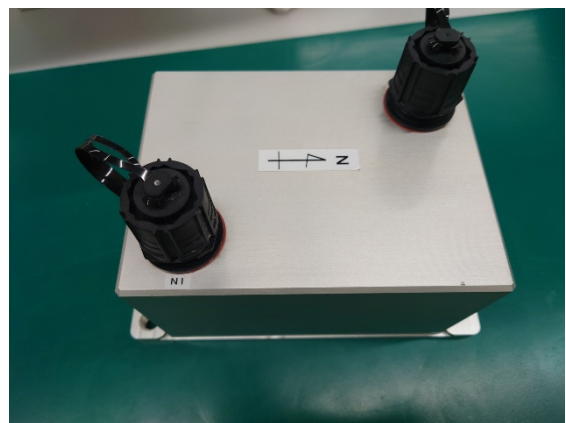


図 11 (左) 地上置きセンサ内部



(右) 組みあがった筐体

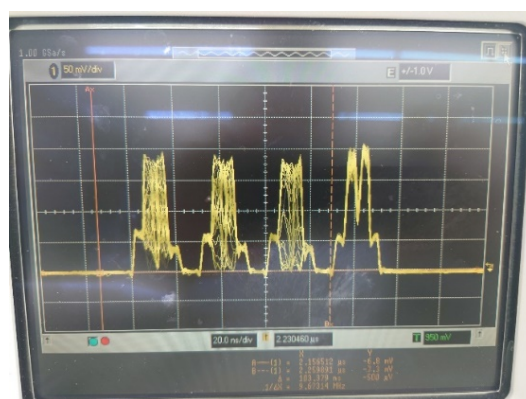


図 12 3 成分光センサの干渉信号

3) 総括

令和5年度は、令和3年度に新潟工科大3,000 m級坑井の地下1,978 mに埋設した地震計の連続観測を継続し、高温高圧下での安定性の検証を行った。連続観測の途中7月後半から地下埋設地震計の上下動成分が不調となり、観測ができなくなった。調査したところ、高温環境下で筐体内の水分が反応し、加水分解物を生成するとともに、光センサのコリメータの接着剤の脆化によりコリメータの軸がずれてしまった可能性が高いことが判明した。検証の結果、100℃程度の高温環境だけでは問題ないと思われることから、今後は地下埋設筐体内に水ができるだけ存在しないようにし、かつ観測中に水が入ってこないように筐体の設計を変更することで対処する予定である。フィールド用地震計は、従前より防水コネクタを使用するなど密封したつくりとなっていることと、以前この課題において京都大学桜島火山観測所ハルタ山観測点において、梅雨や雷の時期を含む長期屋外観測の実績があるものである。

課題B2-2は今年度で終了するため、引き続いての開発改良や高温環境での連続観測による実証試験は、東京パワーテクノロジーや白山工業が主体となって継続する予定である。また、火山のフィールドでの光センサの観測についても、同じく継続して行っていきたい。

(c) 結論

令和4年2月から新潟工科大の観測井を使用させていただき、-1,978 m、温度105℃の環境下で連続観測を行ったところ、本年度の7月に上下動成分が振動波形を記録しなくなり、測定不能となった。この原因を検証したところ、センサを構成しているコリメータがずれたことによって損失が大きくなったことが原因と想定された。一方、室内の恒温槽での高温連続試験では同じセンサによる故障が見られないことと、筐体内部の部品に加水分解反応が見られたことや、筐体を封入しているオリングなどに変形等が見られたことから、筐体内部に存在していた、もしくは外部から少量の水が入ったことによって、コリメータをとめている接着剤が脆化した可能性が高いことがわかった。今後の対策としては、地下埋設筐体内に水が入らないようにするとともに、観測環境において外部から水が入らないように筐体の設計を変更することを予定している。この高温多湿環境は火山観測には普通に存在する環境であるため、この環境で長期にわたる観測を可能にさせることは非常に重要である。課題B2-2は今年度で終了するが、白山工業は東京パワーテクノロジーと協力して改良を続ける予定である。

(d) 引用文献

- 1) Yoshida et al. Real-time displacement measurement system using phase-shifted optical pulse interferometry: Application to a seismic observation system, Jpn. J. Appl. Phys., 55 (2016) 022701.
- 2) 平山他 移送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 Vol.40, No.3, p139-148, 2018.

(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 6 年度の業務計画案

課題 B2-2 は本年度で終了である。

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 5 年 4 月 13 日～4 月 25 日 令和 4 年度成果報告書作成のための打ち合わせ

場所：メール

出席者：中道、平山

令和 5 年 4 月 28 日～5 月 1 日 日本地球惑星科学連合 2023 年大会への次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトのブース展示のポスター作成

場所：メール

出席者：中道、平山

令和 5 年 5 月 15 日～5 月 18 日 日本地球惑星科学連合 2023 年大会における発表ポスター作成

場所：メール

出席者：中道、平山

令和 5 年 7 月 14 日～7 月 18 日 AOGS2023 における発表ポスター作成

場所：メール

出席者：中道、平山

令和 5 年 7 月 27 日 火山プロジェクトホームページコンテンツ更新への対応の打ち合わせ

場所：メール

出席者：中道、平山

令和 5 年 8 月 2 日 新潟工科大学の深井戸の光センサの上下動成分の不調についての
状況把握と原因についての議論

場所：メール

出席者：中道、平山

令和 5 年 11 月 10 日～12 月 4 日 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト合同研究
集会への事前提出スライドの作成

場所：メール

出席者：中道、平山

令和 5 年 12 月 5 日～12 月 7 日 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト合同研究
集会への出席と発表

場所：東京大学弥生講堂一条ホール

出席者：中道、平山

令和 5 年 12 月 11 日～12 月 12 日 第 10 回総合協議会発表資料作成

場所：メール

出席者：中道、平山

令和 5 年 12 月 18 日 第 10 回総合協議会への出席と発表

場所：オンライン Zoom

出席者：中道、平山

令和 5 年 12 月 26 日 新潟工科大学における作業検討

場所：メール

出席者：中道、平山

令和 6 年 1 月 23 日 新潟工科大学における作業検討

場所：メール

出席者：中道、平山

令和 6 年 3 月 27 日 新潟工科大学における光センサシステム稼働状況確認

場所：新潟工科大学

出席者：中道、平山、四ツ田、谷口

令和 6 年 3 月 28 日 光センサシステムの今後について打ち合わせ

場所：白山工業株式会社

出席者：中道、平山、吉田稔

4. むすび

令和3年度に開始した深井戸における光センサシステムによる地震観測を令和5年度まで継続し、2年間を超える期間にて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。本課題は令和5年度で終了であるが、新潟工科大学における深井戸の観測は、共同実施機関が不具合のあった光センサを交換することで、観測を継続し、光センサシステムの長期間の安定性と有効性を評価していく予定である。また、光センサシステムとDASを組み合わせた新しいシステム開発が別途進められているので、今後の展開に期待したい。

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方式の検討と開発」

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
大深観測井を使用した、高温環境下における位相シフト光干渉法による振動観測ポスター	平山義治、中道治久、中島由雄、内藤陽一郎、池田敏晴、安藤浩、竹内敬二	JpGU2023	令和5年5月	国内
位シフト光干渉法を用いた火山環境に適した地震観測システムと事例ポスター	中道治久、平山義治、池田敏晴、竹内敬二、安藤浩、堀内茂木	JpGU2023	令和5年5月	国内
Development and Implementation of a Multi-channel Seismometer System with Phase-shifted Optical Interferometry for Volcanological Observations, ポスター	Haruhisa Nakamichi, Yoshiharu Hirayama	AOGS2023	令和5年8月	国外
位相シフト光干渉法を用いた振動システムを用いた火山観測	中道治久、平山義治	令和5年度京都大学防災研究所研究発表講演会	令和6年2月	国内

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
なし				

（注）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。