

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 基盤開発部	共同実施機関	部長	平山 義治
		副部長	池田 敏晴
東京工業大学大学院理工学研究科	協力機関	准教授	水谷 義弘

(c) 業務の目的

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する。さらに課題責任機関（京都大学）と連携して翌年度の屋外での高温実証実験を行う場所を決定するとともに、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う。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℃ 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か年の年次実施計画

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

光センサシステムは11月11日から12月8日までの26日間連続運用され、その間に70回の地震イベント（火山性地震および火山性微動を含む）と14回の人工地震を記録することができた。これらの記録はこれまで火山観測で用いられてきた地震観測システムと同等の質を示し、基礎的な火山学的解析にも用いることが可能であることが本事業で検証された。

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、火山性地震および火山性微動、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のため、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。途中、雷サージ防止版の設置及びバイアスジャンプ対策のために10月12日にいったん会社に持ち帰り、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、一定の効果があつた。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。

平成30年度：

平成28年、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およ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23.8~24.0Hz、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。

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) 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

共同研究機関は課題責任機関（京都大学）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、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う（項目6）。なお、光送受信装置については、共同責任機関提供の装置を使用する。また、ユーザーニーズの把握と集約に関しては、プロジェクト運営会議等を通して努める。

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解釈
- 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

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主に行う。

- 4) 高温対応3成分光センサの試作
- 5) 高温対応光センサの検証
- 6) ボアホール用高温対応筐体の試作

令和2年度は、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する。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う。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。

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する。

①高温対応用センサの設置観測

課題責任機関とともに、令和3年度中に高温対応用センサを設置して実施観測を行い、光センサシステムの実高温環境における有効性を検証する。

②総括

観測結果についての総括を行う。

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。

(2) 令和2年度の成果

(a) 業務の要約

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、課題責任機関を協力してフィールドで検証ができる高温のボアホールを選定し、その観測のための高温対応ボアホール筐体を2式作成する。

(b) 業務の実施方法

課題責任機関（京都大学）と共同実施機関（白山工業株式会社）との分担のうち、共同実施機関は以下の事項を実施した。

①高温対応3成分光センサの試作

高温対応の光センサ3つと、振動子部分がないレファレンスの合計4つを組み合わせて格納するセンサユニットを2式作成する。

②高温対応光センサの高温特性検証

高温対応光センサユニットを室内の高温環境で行い、その特性を検証する。

③ボアホール用高温対応筐体の試作と検証

高温対応のボアホール用筐体を2式試作し、室内の高温環境で検証を行う。

④総括

恒温対応センサ及び筐体の開発とその試験結果についての総括を行う。

(c) 業務の成果

1) 高温対応 3 成分光センサの試作

光センサシステムはケーブルとセンサ部に電源が必要ないことから高温に強いことが想定されるが、まだ実証はされていない。

光センサの構成として、図 41 にあるように、光ファイバ、光を分岐させるカプラー、振動子上で光を反射させるプリズム、および光の偏光を回転させて反射させる FRM(ファラデーローテータミラー)がある。このうち、FRM 内のレーザー光の偏光を回転させる部分が熱膨張により厚さが変化することにより、温度環境が変化したときの精度が悪くなるため、精度の良い観測を行うためには、使用想定温度で最適になるように作成する必要がある。今回は 100℃から 150℃の環境での使用時に最適になるように作成した。

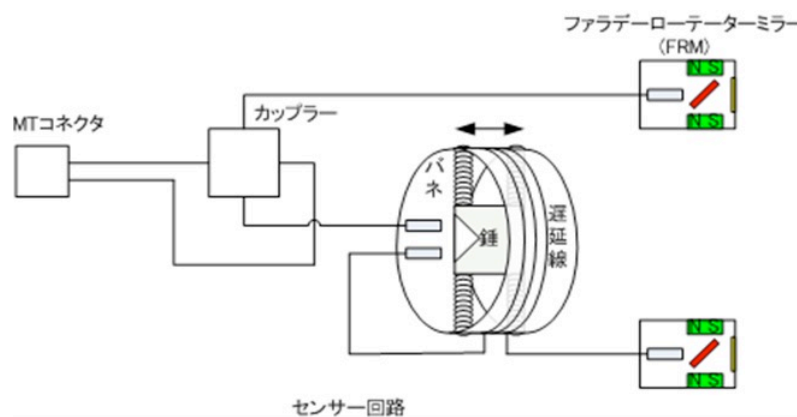


図 41 センサ回路図

小型化したセンサは光ファイバを小さく曲げている部分が多く、また光ファイバを融着させている部分がある。小型センサ作成時において、曲半径が小さくて光ファイバが折れるケースがたまに見受けられたことから、今回特に弱いと思われる部分に曲げ応力がかからないようにガイドをつけるなどの改良を施した（写真 1 右）。



写真1 左：平成30年度に試作した光センサ（平成30年度報告書掲載）
右：改良したセンサ

今回の高温用センサはすべて固有振動数約 30Hz，減衰定数約 0.7 で統一した。

2) 高温対応光センサの高温特性検証については，3) のボアホール用高温対応筐体内に組み込み，まとめて恒温槽に入れて試験を行ったので，まず 3) から説明する。

3) ボアホール用高温対応筐体の試作と検証

来年度実フィールドでの観測を予定している地点は，新潟工科大が所有する 3000m 級の観測井である。この観測井は，新潟工科大学原子力耐震・構造研究センター資料によると，2007 年新潟県中越沖地震において地震動の増幅要因として明らかとなった深部地盤の減衰特性と不整形性の影響を評価する手法を整備するために作成されたものであり，2012 年から観測が開始された。ただし，現在は使用されていない。

この観測井に関して，令和 2 年 11 月 27 日に課題責任機関とともに新潟工科大を訪問し，打合せを行うとともに，現場視察おこなった。この時の状況は課題責任機関の報告書を参照のこと。

観測井の温度プロファイルは図 42 のようになっており，井戸の底では約 140℃程度であるため，高温環境試験に適している．

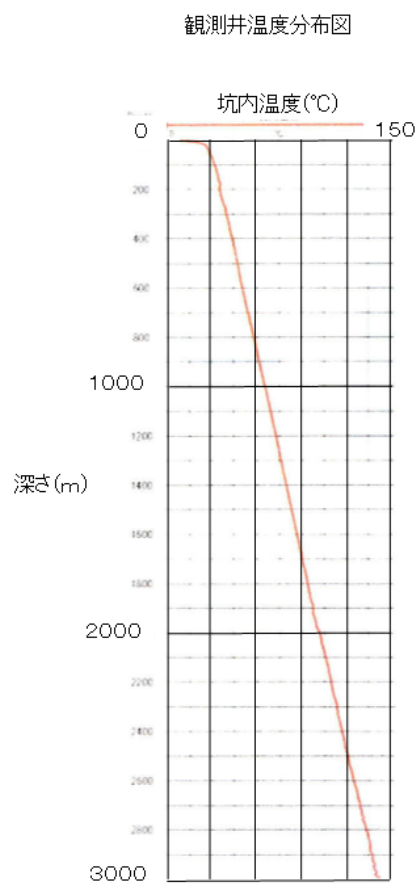


図 42 新潟工科大学 3000m観測井の温度プロファイル

次に，井戸の形状を図 43 に示す。

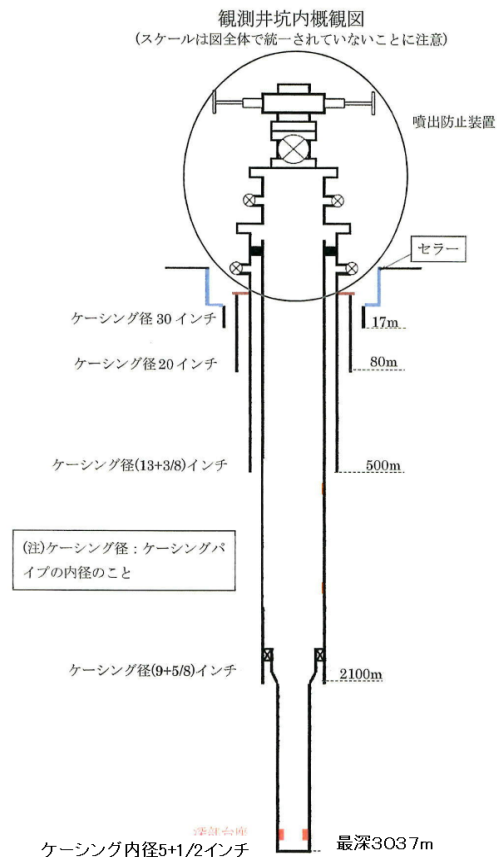


図 43 新潟工科大学 3000m級ボアホールのサイズ

この井戸の底に設置することを想定し、センサを格納するための内径と圧力保持のための肉厚を考え、筐体の外径を 110mm とした。この筐体は設置時に 30MPa もの圧力がかかることから、筐体の圧力試験も行った。筐体内部には高圧がかからないため、圧力試験は筐体のみとした。

その時の試験記録を図 44 に示す。

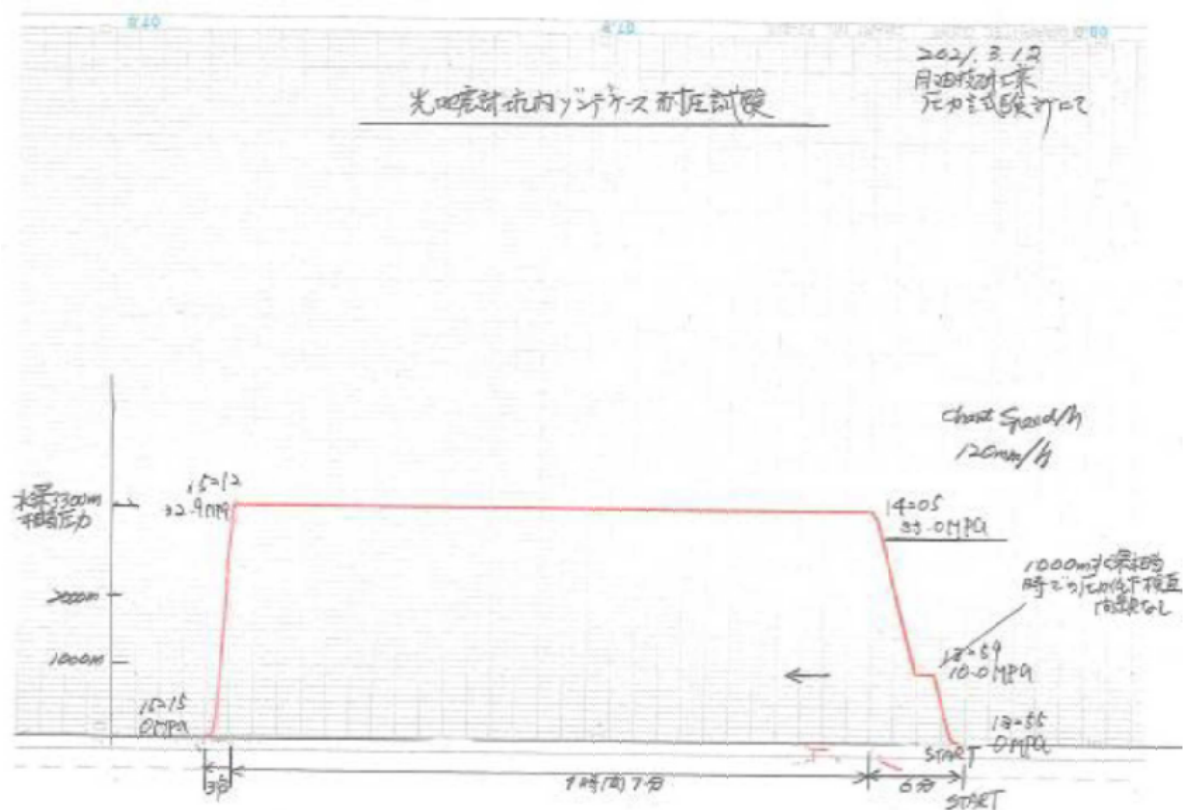


図 44 圧力試験時の水圧変化記録

加圧スケジュールは以下の通りである．まず圧力開始後数分で 10MPa まで加圧し，10 分間維持したのち，33MPa まで再加圧して約 1 時間維持した．筐体内に水が入るなど異常が発生した場合，水圧が下がることで確認ができるが，図 44 で示されているように，加圧中では水圧の現象は見られず，圧力降下が発生していないことが確認された．以上より，作成した筐体は深さ 3000m の圧力にも耐えられることが検証できた．試験後の写真，および筐体の写真を写真 2 および写真 3 に示す．



写真2 筐体の圧力試験時，実験後圧力試験容器から取り出すところ



写真3 圧力試験筐体．右端はダミーヘッド．

2) 高温対応光センサの高温特性検証

高温対応光センサの高温特性検証は，1) で作成した高温対応用光センサを 3) の筐体に組み込んだ形で検証を行った．筐体内にセンサを組み込んだ写真を以下に示す（写真4）．



写真 4 筐体内部，センサ組み込み状況

センサ 3 成分（上下動、水平 2 成分）と，レファレンスとしての固定端（右端）.

これを写真 5 のようにまとめて恒温槽に入れ，150℃の高温を 30 分間維持して動作確認を行った.



写真 5 高温試験

図 45 に示す通り、恒温槽の稼働時の振動が取れており、高温時でもデータが取得できていることを確認した。

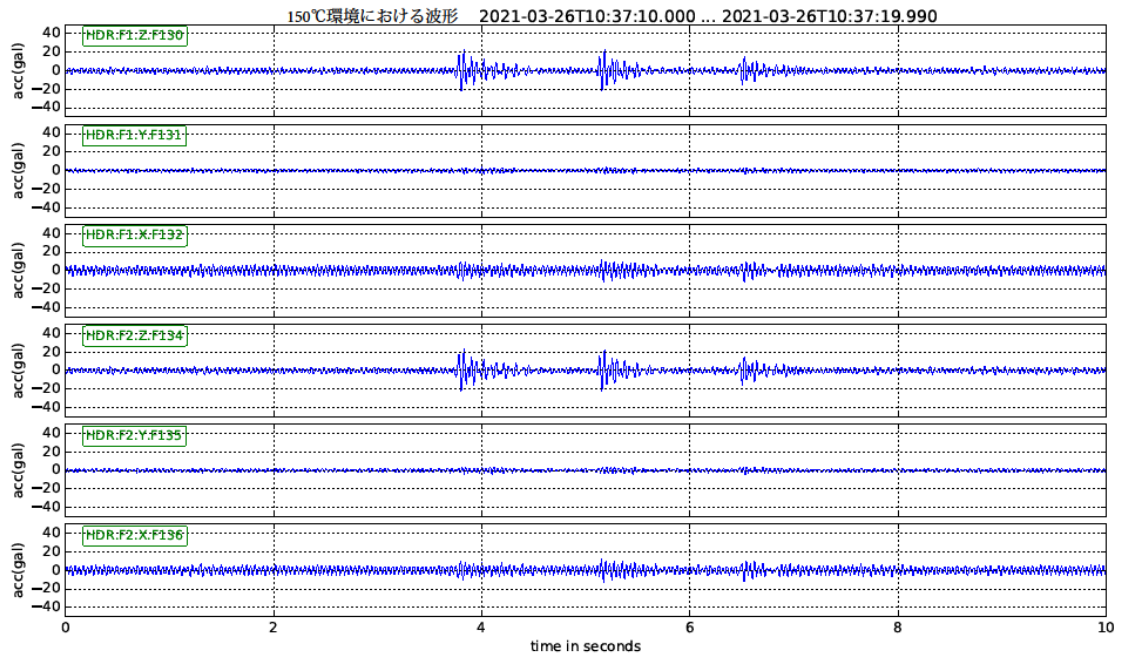


図 45 150℃環境での恒温槽の横をコンコンたたいたときの各センサの波形

図 45 の図で表示されている、上の 3 組と下の 3 組のセンサセットのそれぞれ対応する波形がよく似ている。

4) 総括

令和 2 年度は、次年度での実フィールドでの高温検証を行うため、高温対応センサ及び高温対応筐体を作成し、室内試験を行った。結果、筐体は設置が想定される 3000m 深の圧力に耐えることを確認した。センサは想定温度である 150℃の条件でも信号が取れることを確認した。来年度はこれらを実フィールドに展開し、高温高圧環境下での試験を行う予定である。

(d) 結論ならびに今後の課題

1) 結論

本年度は高温対応センサ及び高温対応筐体を作成した。その後室内試験を行い、来年度想定される環境（30MPa、150℃）で十分測定できることを示した。

2) 問題点と今後の課題

高圧試験及び高温試験は室内で短時間であったため、長期安定性の検証はできていない。これは来年度での実フィールドでの検証で行われる。

(e) 謝辞

東京パワーテクノロジー（株）地震グループの方々には，新潟工科大学との接点を作
っていただき，新潟工科大の観測井の使用許可などの折衝および調整に関しまして，大
変ご尽力をいただきました．

圧力試験は日油技研工業（株）の圧力試験場の施設，高温試験は（株）物理計測コン
サルタントの恒温槽施設を使用させていただきました．ここに記して感謝いたします．

(f) 引用文献

なし

(g) 成果の論文発表・口頭発表等

なし

(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) 令和 3 年度の業務計画案

令和 3 年度は令和 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
証する．

① 高温対応用センサの設置観測

課題責任機関とともに，令和 3 年度中に高温対応用センサを設置して実施観測を
行い，光センサシステムの実高温環境における有効性を検証する．

② 総括

観測結果についての総括を行う．