

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。

## 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
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		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	安藤 浩
			水谷 義弘

#### (c) 業務の目的

屋外での高温実証試験を行う場所を新潟工科大が所有する 3000m 級の観測井に決定し、昨年度作成した高温対応用センサ、およびボアホール用センサ筐体を設置して連続観測を開始する。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、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、必要に応じた改良および転用技術の開発に向けた情報収集を行う。また、これらの期間の火山観測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。

## 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、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。

## 4) 平成 31 年度（令和元年度）：

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。

5) 令和 2 年度：

共同実施機関は 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。具体的には、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（項目 4）と、室内高温環境試験（項目 5）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（項目 6）し、室内的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。

6) 令和 3 年度：

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（項目 1）。具体的には新潟工科大所有の観測井で、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する。

- 6) 観測データの火山学的精密解析
- 7) 光センサシステムの総合評価と総括
- 8) 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。

- 9) システムの多点化プロトタイプの改修、
- 10) 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。

- 7) 観測データの火山学的解析
- 8) 光センサシステムの総合評価と総括
- 9) 令和 5 年度光センサシステム観測網の表層地震波速度調査
- 10) 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。

- 11) 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
- 12) 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。

- 4) 観測データの火山学的精密解析
- 5) 光センサシステムの総合評価と総括
- 6) 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裝を行う。
- 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。

- 7) 観測データの火山学的解析
- 8) 光センサシステムの総合評価と総括
- 9) 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
- 10) 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。

- 11) 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。
- 12) 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 3 年度における成果の目標及び業務の方法

昨年度作成した高温対応用センサ及びボアホール用筐体をフィールドに設置し連続観測を行い、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 年度前半に光センサシステムの実地観測の準備を、令和 3 年度後半に高温対応用センサを設置して実地観測を行い、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。

②観測結果についての総括を行う。

(2) 令和 3 年度の成果

(a) 業務の要約

昨年度作成した高温対応用センサ及び高温対応用ボアホール筐体を設置し観測する場所として、新潟工科大が所有する 3000m 級の観測井を選定した。その観測井に関する資料や現地調査をもとに実施観測の準備を行い、その後埋設を行った。実際の埋設深度は結果的に地下約 1980m となった。まずセンサ筐体を埋設する前に温度検層を行って温度プロファイルを測定し、埋設予定箇所が 100°C を超えていることを確認した。次に地震計が入っていないダミー筐体を観測井に挿入し、筐体を固定する予定の、坑井の径が変わる段差部分に実際に固定できることを確認し、その深さが埋設予定箇所と一致していることを確認した。最後にセンサ入り筐体を埋設し、ダミー筐体で固定された深さで固定したことを確認した。現在、この状態で連続観測が行われており、光システムの高温環境における有効性を検証している。

(b) 業務の成果

1) 高温対応用センサの設置観測

a) 現場設置・調査

現場で設置を行う前に、令和 3 年 10 月 7 日に現地調査を行い、ケーブルの引き回しや、地上センサ及び光送受信装置の設置位置についての確認を行った。

新潟工科大学は柏崎市にある私立大学である（図 6）。

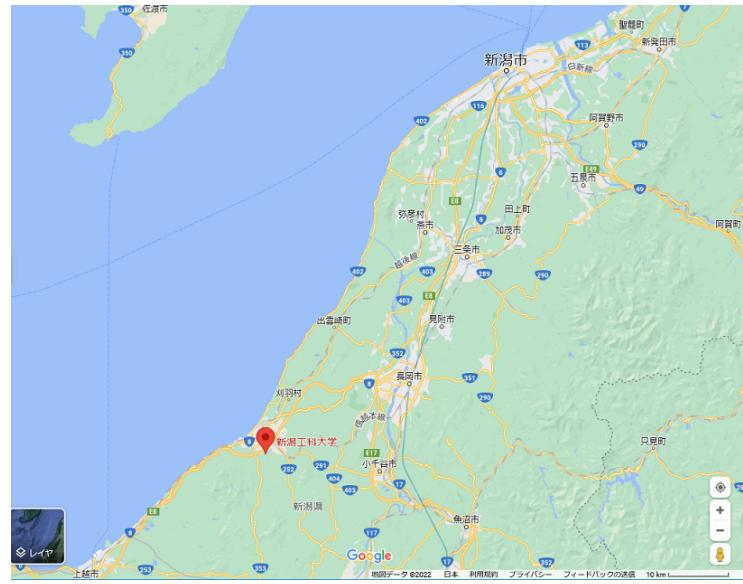


図 6 新潟工科大の位置（グーグルマップより）

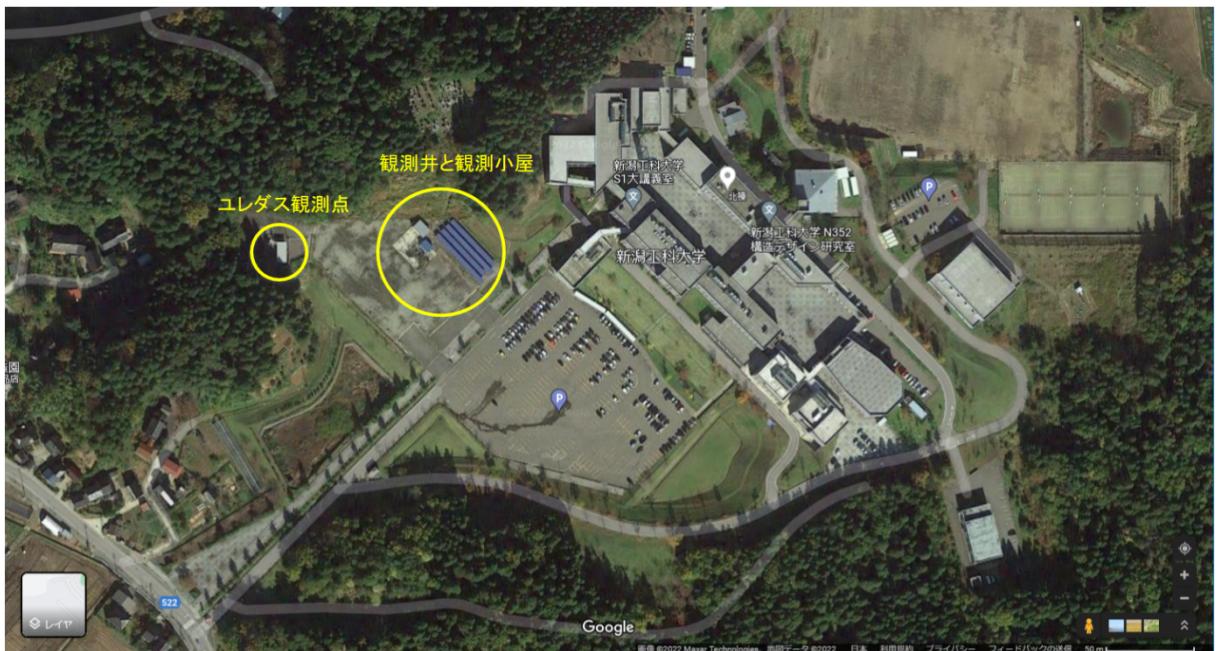


図 7 新潟工科大航空写真（グーグルマップより）

図 7 の写真で示されるように、観測井の至近距離にユレダス観測点がある。大学側より、作業時に大きな振動を出すとユレダス観測点が反応する恐れがあるので、慎重に作業するようにとの話があった。

現地では観測井と観測小屋の位置関係や観測小屋内のケーブル導入口などを確認し、地表でのケーブル配線には問題ないことを確認した。

観測小屋内に供給されている電力も、光送受信装置が必要とする量を十分供給できることを確認した。

立坑の状態に関しては、長い間触れられていないため、バルブを敷設した業者に状況を確認し、バルブの開け方などの操作方法を問い合わせることとなった。なお、敷設時に実際にバルブの操作を行う時は必ずその業者が作業することとした。



図 8 観測井と観測点

現場で寸法等を測定し、図面を作成した。観測点と観測井の写真を図 8、図面を図 9 に示す。

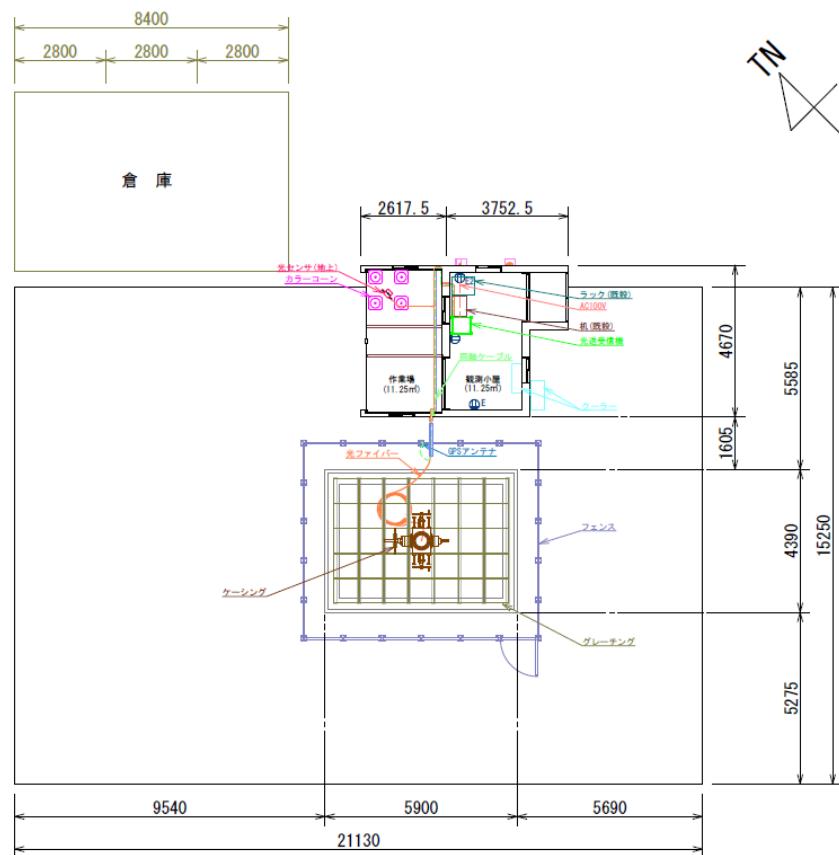


図 9 観測井と観測小屋の図面

立坑から引かれる光ケーブルを観測小屋の壁にあるケーブル導入口を通して観測小屋内に配線する。光ケーブルはアーマードであり、現場では簡単には切断してコネクタをつけることができないので、図 9 のように、立坑付近でケーブルの余剰分を丸めておくこととする（橙色の部分）。また、地上設置用センサは、観測小屋内の作業場奥（ピンクの場所）に、真北を北にして設置することとした。

#### b) 高温対応用センサシステムの設置

当初 2021 年内に設置を行う予定であったが、予定が延期され、結局 2022 年 2 月 15 日から 23 日にかけての設置となった。なお、大深度へのセンサ設置のためには、昨年度までに作成したセンサと筐体の他にも、埋設用ケーブルの用意や、クレーン等を使用しての設置作業が必要である。これらについては、東京パワーテクノロジー株式会社のご協力をいただいている。

##### i) 設置位置の確定

筐体を設置する個所については、当初観測坑の最深部付近を想定していた（図 10）。しかし、最深部付近に残されている、過去に地震計を設置した時の固定具の状態が不明であり、使用しない方が良いと判断したことや、図面の寸法と実際の坑井の状況が異なっていて、作成した筐体の外径が最深部のケーシング内径とほぼ同じサイズであり、最深部のケーシング内にセンサを入れることが難しいことが判明した。その代わりとして、深さ 2000m 付近にある、ケーシング径が  $9+5/8$  インチから  $5+1/2$  インチに変化する段差を利用してセンサを設置することとなった（図 10）。

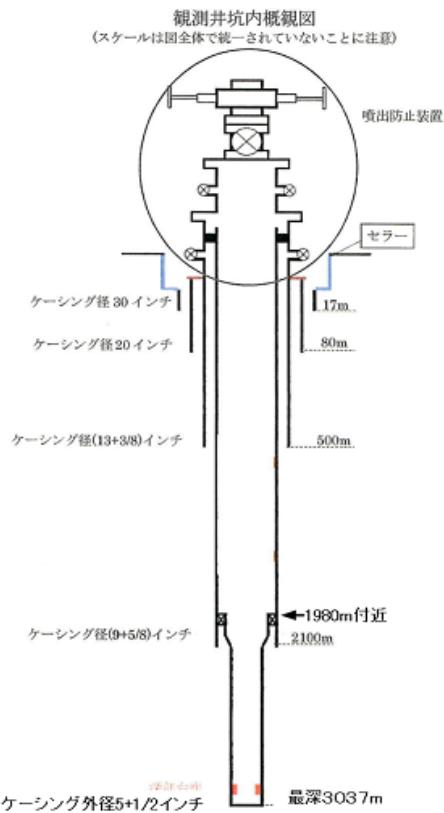


図 10：観測井坑内概観図

### ii) 温度検層

設置する観測井は長年使用されていなかったので、新潟工科大から資料としていただいたい温度プロファイルが変化している可能性がある。そのため、センサを設置する前の令和4年2月16日に、まず温度検層を行った。

結果は下の図11右の通りである。図11の左には比較のために以前の温度プロファイルを掲載した。

観測井温度分布図

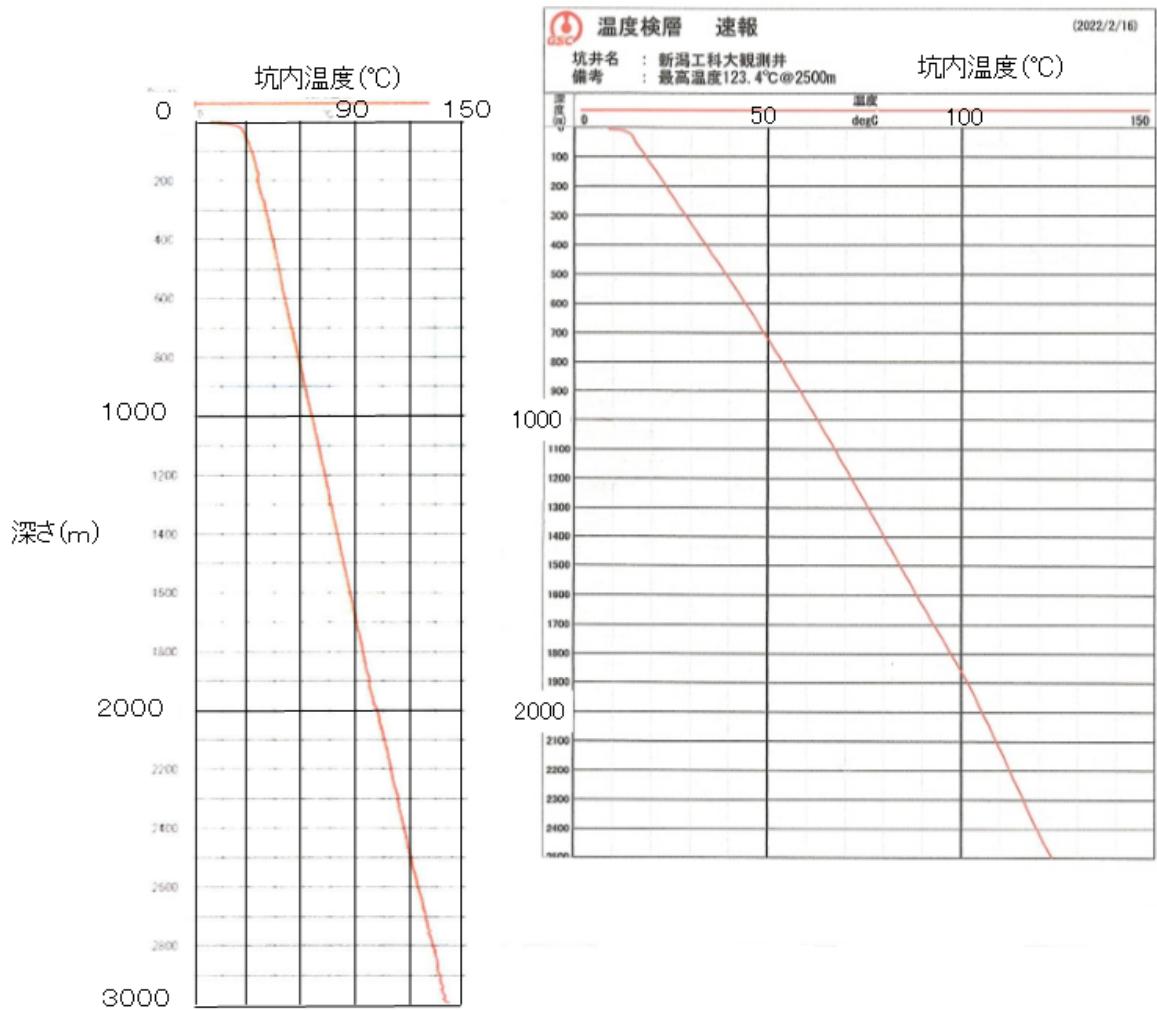


図 1 1 観測井の温度分布図。左が以前の記録、右が今回の記録。  
紙面での記録を、縦軸（深さ）のスケールを合わせて調整。

温度分布図を比較すると、設置直前の井戸の温度分布は以前のものとほとんど変化していないことがわかる。設置ターゲットの深度（1980m付近）は100°Cを超えて、105°C前後である。

### iii) ダミー筐体投入試験

次に、温度検層を行った翌2月17日に、昨年度耐圧試験時に使用したダミー筐体を観測坑に入れ、予定の箇所で固定されるかどうかを確認した。このダミー筐体は実際の地震計の筐体と全く同じであり、ただセンサが入っていないだけである。



図 1 2 : ダミー地震計投入直前写真。

図 1 2 にダミー地震計を投入する前の写真を示す。ダミー地震計の真ん中少し上についている太い部分が、ケーシング径が変化する場所に固定する装置である。

この地震計を坑井内に入れたところ、深さ 1977.8m の所で停止した。この値は図 1 0 の 1980m 付近の位置と大体一致する。これにより、設置予定の場所で予定通り筐体が停止することが確認された。

#### iv) 光センサの埋設

上記までの事前テストを経たのち、光センサが入った筐体を埋設した。埋設は、2 月 18 日と 19 日の 2 日間かけて行った。



図 1 3 本地震計設置直前の写真

図 8 の写真の左部に見える赤い装置は、抗井内からのガス噴出を防止する装置であり、その下に坑井がある。このガス噴出防止装置の穴の径が小さく、センサ固定器をつけた筐体が中を通らないので、まずセンサ固定器を外して筐体のみの状態で噴出防止装置の中を通し、その後センサ固定器を装着した。次に、図 1 3 のように固定器をつけたセンサと噴出防止装置を別々のワイヤーで釣り、センサを坑井内に入れて固定器が坑井に入った状態で噴出防止装置を坑口に固定し、その後光センサを坑井深部に埋設した。

本地震計埋設時にも埋設しているケーブルの長さを測定することで埋設深度を測定している。その結果、1970.99mで固定されたことが確認された。この値はダミー地震計埋設時の 1977.8m に比べて 7m ほど短い結果となっている。これは、ダミー筐体埋設時は何回も埋設に使用しているワイヤーを使用したのに対して、本番の筐体は新品のワイヤーを使用したことから、埋設時に筐体の重さやワイヤーの自重により多少伸びたためと推定される。従って、実際に埋設した深度は、1977.8m (1980m弱) であると判断する。

埋設後、噴出防止装置の上でワイヤーをクランプし、ケーブルがキンクしないよう Rをつけたガイドに光ケーブルを添わせた (図 1 4)。



図 14 坑口の状況。左：全体図 右：ケーブルクランプ部拡大

#### v) 地表地震計設置

2月20日に、埋設地震計の比較も兼ねて、地上置きの光センサを図4のピンク色の部分、観測小屋の作業場奥に設置した（図15左）。コンクリートの地面の上にエアコンパテで固定した。方位は真北に合わせた（図15右）。



図 15 地上センサ。右は真上からの写真。

#### vi) 光送受信装置

地下および地表の光センサを接続する光送受信装置は、図9の観測小屋内、黄緑色の場所に設置した（図16）。光送受信装置は2月16日に立ち上げ、光センサシステムの埋設前後の動作確認も行っている。

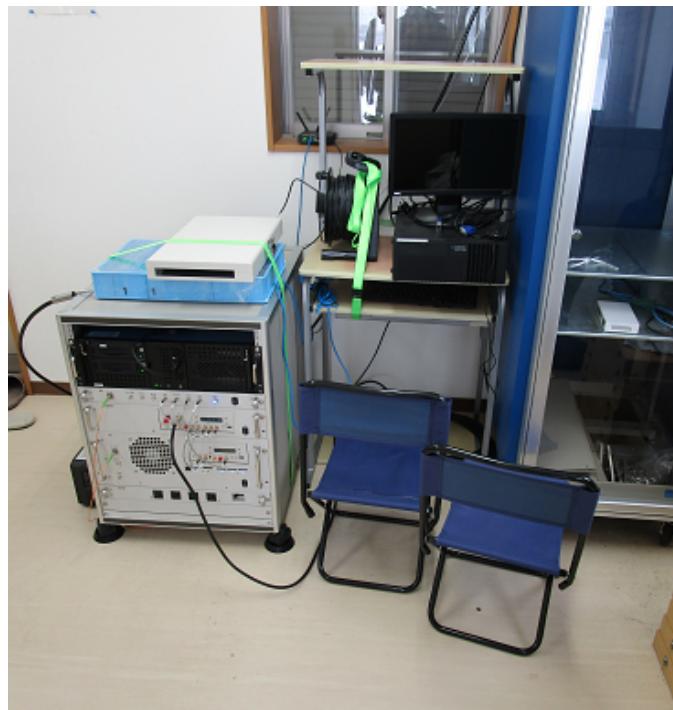


図 1 6 光送受信装置。右側は小屋内にあった既設のラック。

設置が完了し、連続観測を開始したのは 2 月 22 日である。

### c) 観測記録

観測を始めてから約 1 か月後の 3 月 16 日 23 時 36 分ごろ、福島県沖で M7.4 の地震が発生した。この地震は新潟でも観測され、柏崎市で震度 3 が観測された。この地震の波形を図 1 7 に示す。

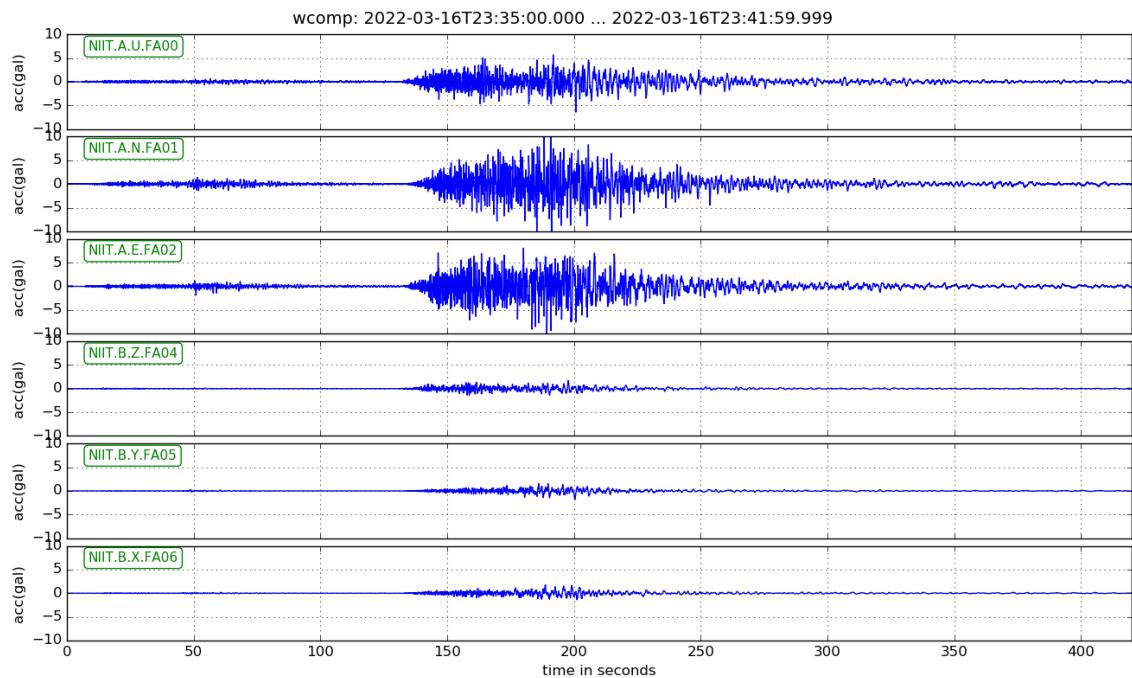


図 1 7 2022 年 3 月 16 日福島県沖地震の記録

図17の上3つが地表地震計による記録で、上から順番にU、N、E成分である。下3つが地下約1978mに埋設した地震計で、上から順番にU(Z)成分と水平2成分である。この時点ではまだ地下埋設地震計の方位補正をしていないので、この標記としている。

地表の最大加速度が10gal程度であるので、のことからも、現場での地表の揺れが震度3相当であったことが推測される。一方、地下約1978mに設置した地震計の振幅はかなり小さい。地表で観測される地震動の振幅は大きく増幅されていることがわかる。

なお、データ全般に対しては、課題責任機関の報告書を参照されたい。

## 2) 総括

令和3年度は、令和2年度に作成した高温対応用センサ、および高温対応用ボアホール筐体を、新潟工科大学所有の3000m級坑井に埋設した。この坑井の温度分布は、昔の記録とほぼ変化が無かった。設置する位置である地下1978m付近の温度は約105°Cである。また、地表設置用光センサ1台を観測小屋の作業場内に設置し、観測小屋内に設置した光送受信装置で連続観測を始めた。観測開始からしばらくして福島県沖で発生したM7.4の地震による地震動を観測した。来年度は観測井内、地下深く100°Cを超える環境下での連続観測を行う。

### (c) 結論

本年度は昨年度作成した高温対応用センサ及び高温対応用ボアホール筐体を実フィールドである新潟工科大観測井に設置し、観測を開始した。福島県沖の大地震の記録も取得するなど、順調に測定できることを確認した。

今後の課題としては、設置時期が諸般の事情で年度も迫ってきた2月になったことから、まだ観測を開始してからあまり時間がたっていない。来年度は観測を継続し、長期安定性を検証する予定である。

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、新潟工科大学との折衝、および埋設に必要なケーブルの準備及び設置作業の手配、さらには防災科学技術研究所藤原先生からのアドバイスをいただくための場を作っていたいたいたことなど、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4年度の業務計画案

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の総括を行う。

### 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3年5月6日 課題B2-2 打合せ

場所：オンライン会議

時間：10時～11時

出席者：中道、平山

令和3年7月9日 第8回火山研究運営委員会

場所：オンライン会議

時間：9時30分～12時

出席者：中道

令和3年7月14日 科学技術・学術審議会測地学分科会第4回火山研究推進委員会

場所：オンライン会議

時間：15時～17時

出席者：中道

令和3年10月20日～22日 日本火山学会秋季大会

場所：オンライン会議

出席者：中道、平山