

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 2 年度

成果報告書

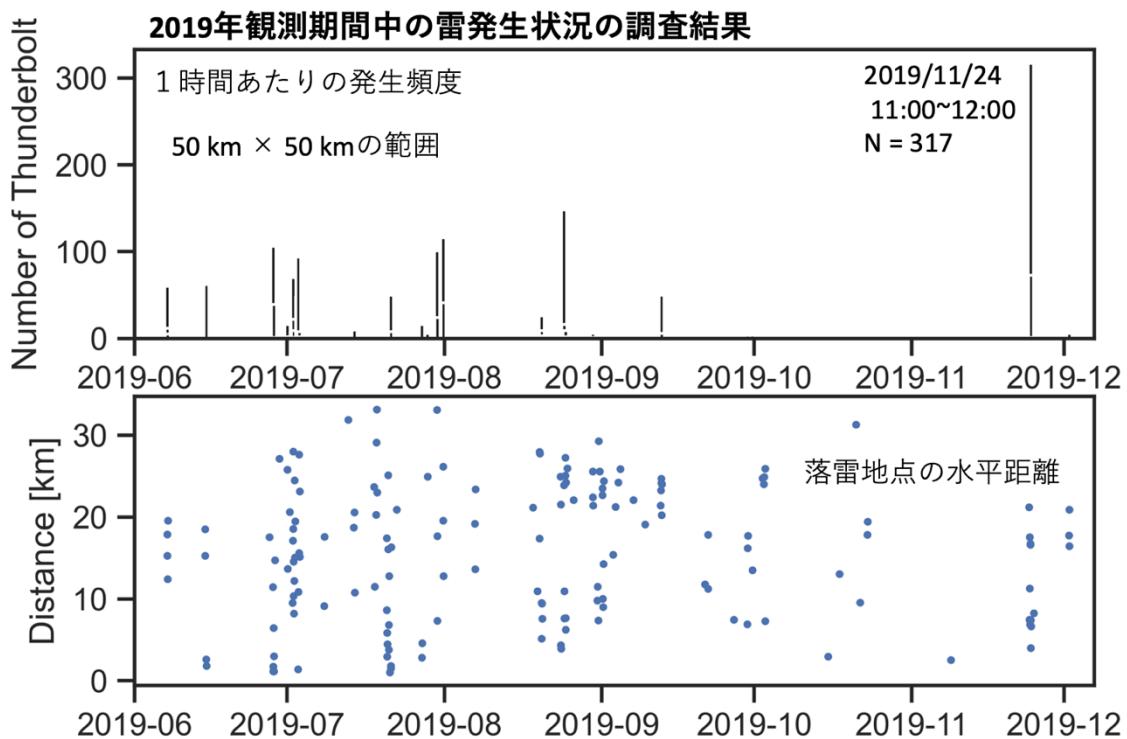
令和 3 年 5 月

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2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



令和元年 6 月 3 日から 12 月 5 日まで行った観測実施期間における桜島火山付近 (50 km × 50 km の範囲) における落雷発生状況.

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れば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、絶縁破壊などの電気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。

令和元年度の本事業では前年度構築した新しい光システムにて桜島火山において半年間の実地観測を行った。そして、噴火に伴う地震および人工地震の観測に成功した。また、中地震および遠地地震を観測してシステム性能の評価を行った。さらにリアルタイムのデータ処理システムの検討を行った。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	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ヶ年の年度実施計画	3
(2) 令和2年度の成果	7
(a) 業務の要約	7
(b) 業務の実施方法	8
1) 実施機関と業務分担	9
(c) 業務の成果	9
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の評価	9
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	25
3) 光センサシステムの試験観測候補地選定	49
4) プロジェクト運営	50
(d) 結論ならびに今後の課題	50
1) 結論	50
2) 問題点と今後の課題	51
(e) 謝辞	51
(f) 引用文献	52
(g) 成果の論文発表・口頭発表等	52
(h) 特許出願, ソフトウェア開発, 仕様・標準等の策定	52
(3) 令和3年度の業務計画案	53
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）	54
(1) 業務の内容	54

(a) 業務題目	54
(b) 担当者	54
(c) 業務の目的	54
(d) 10ヶ年の年度実施計画	54
(2) 令和2年度の成果	59
(a) 業務の要約	59
(b) 業務の実施方法	59
(c) 業務の成果	60
1) 高温対応3成分光センサの試作	60
2) 高温対応光センサの高温特性検証	61
3) ボアホール用高温対応筐体の試作と検証	61
4) 総括	67
(d) 結論ならびに今後の課題	67
1) 結論	67
2) 問題点と今後の課題	67
(e) 謝辞	68
(f) 引用文献	68
(g) 成果の論文発表・口頭発表等	68
(h) 特許出願, ソフトウェア開発, 仕様・標準等の策定	68
(3) 令和3年度の業務計画案	68
 3. 活動報告	69
 4. むすび	71

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、原理的に耐雷性を有する光センサシステムの観測データから火山性地震観測能力と耐雷性能を評価した。

（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	間接経費
京都大学・防災研究所・准教授	中道 治久	研究総括、火山性地震観測能力および耐雷性能評価を行ふことに加えて、共同実施機関とともに、次年度観測の候補地選定をした。	R2. 4. 1～R3. 3. 31	1, 498, 997	345, 922
白山工業・基盤開発部 部長 副部長	平山 義治 池田 敏晴	①高温対応3成分センサの試作 ②高温対応光センサの検証 ③ボアホール用高温対応筐体の試作 以上の業務を行い、次年度観測予定のボアホールで観測可能なシステムであることを確認した。	R2. 4. 1～R3. 3. 31	17, 360, 471	4, 006, 262
東京工業大学・工学院・准教授	水谷 義弘	圧力筐体に関する構造等のアドバイスを行った。	R2. 4. 1～R3. 3. 31	—	—

（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	↖											↗

(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高温対応3成分光センサの試作	◀								▶			
②高温対応3成分光センサの高温特性検証											↔	
③ボアホール用高温対応筐体の試作						◀				▶		
④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 東京工業大学工学院	課題責任機関 協力機関	准教授 准教授	中道 治久 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つ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ヶ年の年度実施計画

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 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。

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

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。

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) 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う（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する。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なう。

- 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

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。

令和 3 年度：

課題責任機関は以下の項目を実施する。

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 年度前半に行ない、実地観測を令和 3 年度後半に実施する。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。

共同実施機関は令和 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。

3) 高温対応用センサの設置観測

課題責任機関とともに、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実高温環境における有効性を検証する。

4) 総括

観測結果についての総括を行う。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 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。

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

令和 2 年度は 4 つの主要な業務を行った。

- 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

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

試験観測が行われた期間中（令和元年 6 月～12 月）に発生した噴火に伴う地震や微動について、共同実施機関の観測により得られた観測データを課題責任機関により取得された観測データと比較することにより光センサシステムの火山性地震および微動の観測性能を評価した。

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

試験観測が行われた期間中（令和元年6月～12月）の桜島周辺の落雷情報をもとにして、共同実施機関の観測により得られた観測データをもとに光センサシステムの耐雷性評価を行った。

③ 光センサシステムの試験観測候補地選定

令和2年度に共同実施機関が開発する耐熱性能を強化した光センサシステムによる実地観測を令和3年度に予定している。耐熱性能を検証するための候補地として新潟工科大学敷地内の深井戸を選定して、現地調査により試験観測への適性を評価した。

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、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

令和元年度実施の試験観測で得られたデータの課題Aに対する提供方法を検討した。

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」との連携

新型コロナウイルス感染症への対応のため他課題担当者との意見交換や共同観測の機会が十分に得られなかつたが、①火山性地震観測性能評価および②耐雷性能評価の結果からサブテーマ4にて行われているアレイ地震観測に利用するに十分な性能を有していることが分かった。

3) 火山研究人材育成コンソーシアム構築事業

令和元年度実施の観測データ解析および令和3年度実施予定の観測に用いるセンサの作成を行ったため、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つた。一方、令和3年度実施予定の観測において観測場所提供者である新潟工科大学に同コンソーシアムによる見学を行う予定である旨を伝え内諾を得た。また、課題責任者は火山研究人材育成コンソーシアム構築事業の運営委員会に出席して連携をおこなった。

(b) 業務の実施方法

令和2年度は、共同実施機関（白山工業株式会社）と連携して令和元年度の実施の観測データ解析を進めた。また、令和3年度実施の試験観測の候補地の選定を行った。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）との分担は以下の項のように行われた。

1) 実施機関と業務分担

a) 課題責任機関

- 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

b) 共同実施機関

- ① 高温対応 3 成分光センサの作成
- ② 高温対応光センサの検証

(c) 業務の成果

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の評価

共同実施機関（白山工業株式会社）が開発した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）にて 2019 年 6 月 5 日 16 時から同年 12 月 5 日 9 時まで京都大学防災研究所ハルタ山観測室構内にて観測が行われた。ハルタ山観測室は噴火が日本で最も頻繁に発生している桜島火山にあり、噴火火口のある南岳から北西に約 2.7 km の位置にある。この光センサシステムは光送受信装置から伸ばされた 1 対の光ファイバーの先に 3 つのセンサ（地震計）がそれぞれ直列接続される構成で、光送受信装置はハルタ山観測室の 2 階の観測室に設置され、光センサは光送受信装置から光ファイバーの接続順に地点 A（岩石試料保管室）、地点 B（地震計室）、地点 C（GNSS 用ピラー）の 3箇所に設置されていた。地点 A, B, C の光センサをそれぞれ、Opt. A, Opt. B, Opt. C とする。また、地点 A に比較のため従来型加速度計（微動計 JU210）が設置されていた。JU210 は加速度センサ部分とデータ収録部から構成されそれらが合わさって一体の筐体に収められている。そのため、信号線といったアナログ部分の長さが短い特徴がある。図 1 にハルタ山観測室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。表 1 にセンサユニットの座標を示す。3 つのセンサユニットはいずれも地表もしくは建物 1 地階のコンクリート面上に設置され、1 辺が約 40m～70m の三角形の頂点をなすように設置された。センサユニットの設置方向は、X 成分を N（北）方向に向け、Y 成分を E（東）方向に、Z 成分を U（上）方向に向けて設置し、以降それぞれ N 成分、E 成分、U 成分と称する。観測データはサンプリング周波数 200Hz の WIN 形式にて 1 分連続ファイルとして光センサシステムと微動計 JU210 のファイルに分けて光送受信装置内のサーバーに格納された。光センサシステムでは 1kHz サンプリングデータも同様に保存されているが、以降の解析では 200Hz サンプリングデータのみ使用する。

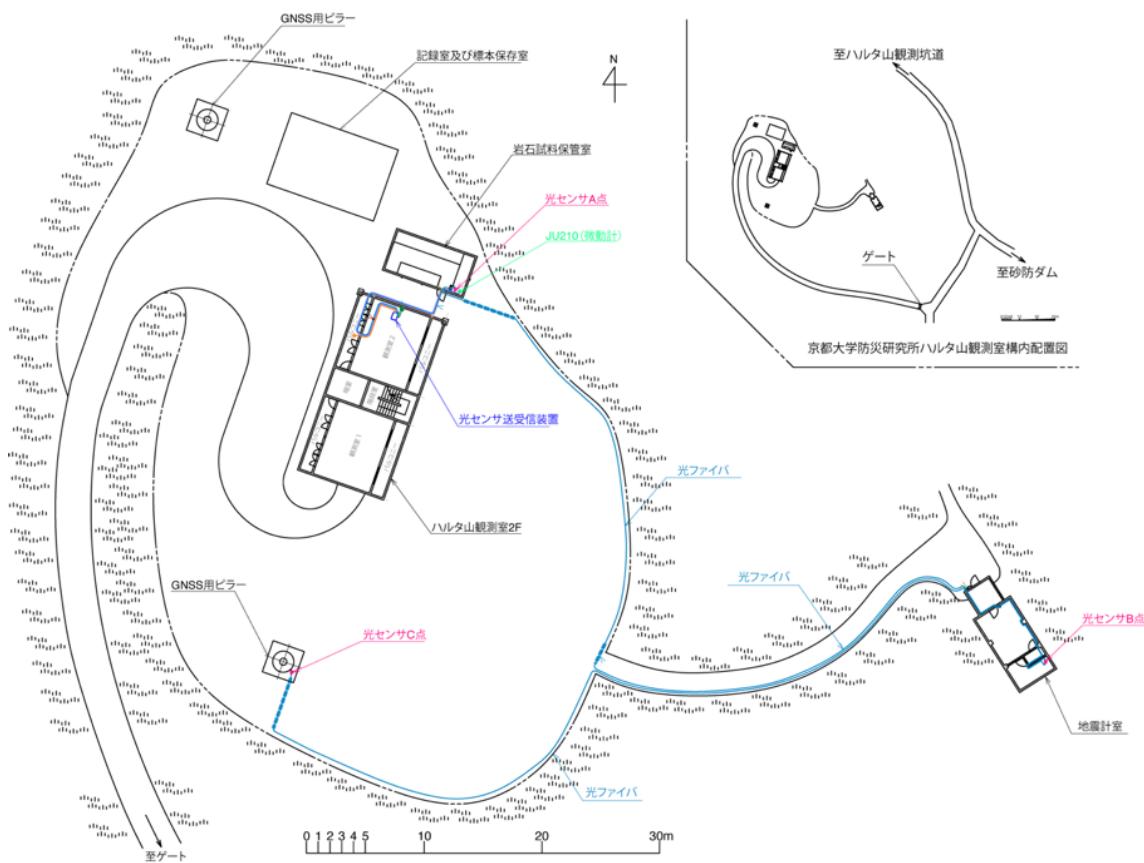


図 1. 京都大学防災研究所ハルタ山観測室敷地内にて 2019 年 6 月～12 月実施の地震観測における光センサシステムの装置の配置.

表 1. 光センサユニット（地震計）の位置座標

センサ位置名	緯度（北緯）	経度（東経）	標高（m）
Opt. A (JU210)	31° 35' 37.37"	130° 38' 2.10"	402.9
Opt. B	31° 35' 36.27"	130° 38' 4.09"	398.1
Opt. C	31° 35' 36.24"	130° 38' 1.53"	402.0

光センサシステムによる観測期間における桜島の火山活動については前年度の成果報告書に記載済みのためここでは省略する。なお、観測期間における桜島の噴火リストを表 2 に再掲する。

表 2. 桜島の噴火リスト（2019 年 6 月 5 日～2019 年 12 月 5 日）

噴火発生時刻	噴火種別 (Ex or Er)	噴煙高度	空振 (Pa)	図番号
2019-06-	Ex	2200	80.1	2
2019-06-	Er	1500	1.5	
2019-06-	Ex	X	12.9	
2019-06-	Er	1600	1.7	

2019-06-	Er	1300	1	
2019-07-	Ex	3200	24	
2019-07-	Ex	600	22.7	
2019-07-	Ex	600	6.9	
2019-07-	Ex	>1500	32.7	
2019-07-	Er	1500	15.6	3
2019-07-	Er	2000	19.6	
2019-07-	Er	1100	0.3	
2019-07-	Ex	3800	28.2	
2019-07-	Er	3500	5.7	
2019-09-	Ex	1900	19.9	
2019-09-	Er	2800	10	
2019-09-	Er	1200 X		
2019-09-	Ex	1000	90.1	4
2019-09-	Er	1600 X		
2019-09-	Er	1300 X		
2019-09-	Er	1500 X		
2019-09-	Ex	1400	81.5	
2019-09-	Er	1400	1.5	
2019-09-	Er	1200 X		
2019-09-	Ex	1800	83.8	
2019-09-	Ex	>600	68.2	
2019-09-	Er	1300 X		
2019-09-	Er	1700	0.3	
2019-09-	Ex	1800	36.7	
2019-09-	Ex	2600	61.8	5
2019-09-	Ex	2300	14	
2019-09-	Er	1800 X		
2019-09-	Er	1400 X		
2019-09-	Er	2000 X		
2019-09-	Er	>1600	3.2	
2019-09-	Er	>1200 X		
2019-09-	Er	1500	1.3	
2019-09-	Er	1200 X		
2019-09-	Er	1200 X		
2019-09-	Er	2000	6.7	
2019-09-	Er	1300	4.2	
2019-09-	Ex	500	23.8	
2019-09-	Ex	>3400	39.6	
2019-09-	Er	1400 X		
2019-09-	Ex	1600	24.6	
2019-09-	Er	1000	1.4	
2019-10-	Ex	X	53.5	
2019-10-	Ex	2400	50.4	
2019-10-	Ex	>600	18.5	
2019-10-	Ex	2600	46.4	

2019-10-	Er	1300	X	
2019-10-	Ex	2700	39. 7	
2019-10-	Ex	2000	130. 7	
2019-10-	Ex	1400	X	6
2019-10-	Er	2200	14. 8	
2019-10-	Er	1400	16	
2019-10-	Ex	2100	118. 6	
2019-10-	Er	1200	16. 9	
2019-10-	Er	1200	6	
2019-10-	Er	1300	X	
2019-10-	Ex	>700	25. 4	7
2019-10-	Ex	>300	84. 2	8
2019-10-	Er	2100	X	
2019-10-	Ex	1200	29. 3	
2019-10-	Er	1600	1. 4	
2019-10-	Ex	2100	32. 6	
2019-10-	Ex	>600	21. 7	
2019-10-	Er	1200	X	
2019-10-	Ex	2000	26. 8	
2019-10-	Ex	2300	41. 7	
2019-10-	Ex	3000	57. 4	
2019-10-	Ex	2600	22. 5	
2019-10-	Er	1200	5	
2019-10-	Er	>1500	4. 6	
2019-10-	Ex	400	23. 3	
2019-10-	Er	>1200	4. 1	
2019-10-	Ex	1000	7. 1	
2019-10-	Ex	>1800	25. 5	
2019-10-	Er	>1400	X	
2019-10-	Ex	3000	55. 7	
2019-10-	Ex	1500	25. 4	
2019-10-	Ex	3000	44. 6	
2019-10-	Er	>1200	1. 5	
2019-10-	Er	>1500	X	
2019-10-	Er	1300	X	
2019-10-	Ex	>800	46. 4	
2019-10-	Ex	2200	77	
2019-10-	Er	1200	X	
2019-10-	Ex	X	41. 7	
2019-10-	Ex	2800	58. 5	
2019-10-	Ex	2300	44. 5	
2019-10-	Ex	2500	53. 9	
2019-10-	Er	1200	2. 8	
2019-10-	Er	1200	1. 9	
2019-10-	Ex	1000	24. 6	
2019-10-	Ex	1500	26. 4	9

2019-10-	Ex	2300	38. 2	
2019-10-	Ex	1200	43. 4	
2019-10-	Ex	1000	46. 1	
2019-10-	Er	1200	8. 1	10
2019-10-	Ex	1300	27. 3	
2019-10-	Ex	2800	129. 3	
2019-10-	Ex	1000	38. 5	
2019-10-	Ex	1400	48. 9	
2019-10-	Ex	1600	15. 3	
2019-10-	Ex	700	6	
2019-10-	Er	2100	0. 3	
2019-10-	Ex	2100	71. 8	
2019-11-	Ex	2300	101. 5	
2019-11-	Er	1500 X		
2019-11-	Er	1400 X		
2019-11-	Ex	1800	55. 8	
2019-11-	Ex	1400	38	
2019-11-	Ex	400	26. 3	
2019-11-	Ex	2000	100. 6	
2019-11-	Er	1200 X		
2019-11-	Ex	1500	34. 1	
2019-11-	Er	1500 X		
2019-11-	Ex	1800	25. 4	
2019-11-	Ex	>1500	53. 7	
2019-11-	Ex	>800	40. 2	
2019-11-	Er	1500 X		
2019-11-	Er	1300 X		
2019-11-	Er	1500 X		
2019-11-	Er	1500 X		
2019-11-	Ex	1600	28. 5	11
2019-11-	Ex	2000	43. 3	
2019-11-	Er	1500	0. 8	
2019-11-	Er	1400	0. 8	
2019-11-	Er	1600 X		
2019-11-	Er	1700 X		
2019-11-	Ex	2000 X		
2019-11-	Er	2100	2. 4	
2019-11-	Er	1500	3. 7	
2019-11-	Er	1300	0. 5	
2019-11-	Er	1300 X		
2019-11-	Ex	2000	34. 6	
2019-11-	Ex	2200	18. 2	
2019-11-	Ex	2200	69. 9	
2019-11-	Ex	2400	40. 2	
2019-11-	Er	1300	5. 2	
2019-11-	Er	1800	17. 7	

2019-11-	Er	1900	14. 7	
2019-11-	Ex	2500	47. 7	
2019-11-	Ex	2800	24. 6	
2019-11-	Er	1600	4. 3	
2019-11-	Er	2100	1. 4	
2019-11-	Er	1600	0. 5	
2019-11-	Er	1900	1. 4	
2019-11-	Ex	>100	4. 9	
2019-11-	Er	1800	4. 7	
2019-11-	Ex	2000	10. 2	
2019-11-	Ex	2200	27. 3	
2019-11-	Er	1400	X	
2019-11-	Er	1700	0. 9	
2019-11-	Er	1200	0. 4	
2019-11-	Ex	2000	X	
2019-11-	Er	1500	1	
2019-11-	Ex	3000	80	
2019-11-	Er	1200	X	
2019-11-	Er	2500	3. 6	
2019-11-	Ex	2400	43. 5	
2019-11-	Ex	2000	10	
2019-11-	Ex	2600	39. 9	12
2019-11-	Er	2300	6. 9	
2019-11-	Er	1500	X	
2019-11-	Ex	>3800	45. 8	
2019-11-	Ex	3500	16. 3	
2019-11-	Er	2200	3. 8	
2019-11-	Er	1900	2. 1	
2019-11-	Er	2000	2. 1	
2019-11-	Er	1300	X	
2019-11-	Er	1300	X	
2019-11-	Ex	5500	36. 6	
2019-11-	Er	1200	1. 6	
2019-11-	Er	1500	3. 2	
2019-11-	Er	1300	1. 6	
2019-11-	Er	1100	X	
2019-11-	Er	1100	X	
2019-11-	Ex	3300	X	13
2019-11-	Ex	1500	X	
2019-11-	Er	1100	X	
2019-11-	Ex	3000	X	
2019-11-	Er	1200	X	
2019-11-	Ex	1200	X	
2019-11-	Ex	3600	X	
2019-11-	Ex	700	X	
2019-11-	Ex	400	X	

2019-11-	Ex	600	X	
2019-11-	Ex	900		62. 2
2019-11-	Ex	500		8
2019-11-	Ex	400		60
2019-11-	Ex	1500		52. 4
2019-11-	Ex	1500		44. 8
2019-11-	Er	1100		0. 9
2019-11-	Er	1200		1
2019-11-	Er	1200		0. 8
2019-11-	Er	1200		0. 3
2019-11-	Er	1400	X	
2019-11-	Er	1200		0. 5
2019-11-	Er	1100	X	
2019-11-	Ex	1200		31. 1
2019-11-	Ex	1500		7. 6
2019-11-	Ex	1500		14. 1
2019-11-	Er	1000		3. 6
2019-11-	Er	1300		6. 3
2019-11-	Er	1900		0. 5
2019-11-	Ex	1200		20. 4
2019-11-	Er	1400		0. 3
2019-11-	Er	1300		0. 2
2019-11-	Er	1200	X	
2019-11-	Er	1200		0. 2
2019-11-	Er	1400	X	
2019-11-	Er	1300	X	
2019-11-	Er	1200		0. 3
2019-11-	Ex	1500		53. 8
2019-11-	Ex	1500		29
2019-11-	Ex	1500		37. 5
2019-11-	Er	1400		0. 3
2019-11-	Ex	2500		48. 4
2019-11-	Ex	2200		68. 8
2019-11-	Ex	800		12. 2
2019-11-	Ex	1000		14. 1
2019-11-	Ex	1500		144. 1
2019-11-	Ex	>1300		21. 4
2019-11-	Ex	1900		121. 1
2019-11-	Ex	1800	X	
2019-11-	Er	1200	X	
2019-11-	Ex	1300	X	
2019-11-	Er	1000	X	
2019-11-	Ex	2700	X	
2019-11-	Ex	1200	X	
2019-11-	Ex	2600	X	
2019-11-	Ex	1800	X	16

2019-11-	Ex	1300	X	
2019-11-	Ex	1200	X	
2019-11-	Ex	1700	X	
2019-11-	Er	1100	X	
2019-11-	Ex	1900	X	
2019-11-	Ex	1400	X	
2019-11-	Ex	1500	X	
2019-11-	Ex	2300	X	
2019-11-	Er	1400	X	
2019-11-	Ex	2500	X	
2019-11-	Ex	2600	X	
2019-11-	Ex	>200	X	
2019-11-	Ex	2400	X	
2019-11-	Ex	3300	X	
2019-11-	Ex	2600	X	17
2019-11-	Ex	1500	X	
2019-11-	Ex	2300	X	
2019-12-	Ex	1800	X	
2019-12-	Ex	1500	X	
2019-12-	Ex	2700	X	
2019-12-	Ex	2000	X	
2019-12-	Er	1100	X	
2019-12-	Ex	>1400	X	
2019-12-	Ex	1500	X	18
2019-12-	Er	>1600	X	
2019-12-	Ex	1600	X	
2019-12-	Ex	2300	X	
2019-12-	Ex	2300	X	
2019-12-	Ex	2300	X	
2019-12-	Er	1000	X	
2019-12-	Ex	2000	X	
2019-12-	Ex	1800	X	19

噴煙高度について、Xは「不明」、>は「以上」を意味し、火口縁からの高度である。空振は国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所の有村観測坑道における値である。

観測期間中に発生した噴火に伴う地震や微動について、共同実施機関の観測により得られた観測データを課題責任機関により取得された観測データと比較することにより光センサシステムの火山性地震および微動の観測性能を評価の方法を以下に示す。地点Aに設置されている光センサOpt. Aと微動計JU210はともに加速度計である。一方、比較対象とするのはハルタ山観測室に近接して設置されているボアホール型速度型地震計（速度計）である。ボアホールの深さは約300 mである。比較のために表2に示す噴火に対応する地震記録を用いる。加速度計Opt. AとJU210の噴火時の波形データを抽出し、積分することで速度波形に変換する。速度計の噴火時の波形データと同じ時間で抽出する。これにより3種類

の地震計の記録は速度波形となる。なお、波形を抽出する際に用いた時間窓の長さは80秒である。抽出した波形にたいしてファースト・フーリエ変換の処理を行うことで速度のパワースペクトル密度を計算する。速度記録にした地点Aの地震計Opt. AとJU210と、ボアホール速度計の波形記録とそれらのスペクトルを図2から図19に示す。また、図と噴火リストとの対応を表2に示す。

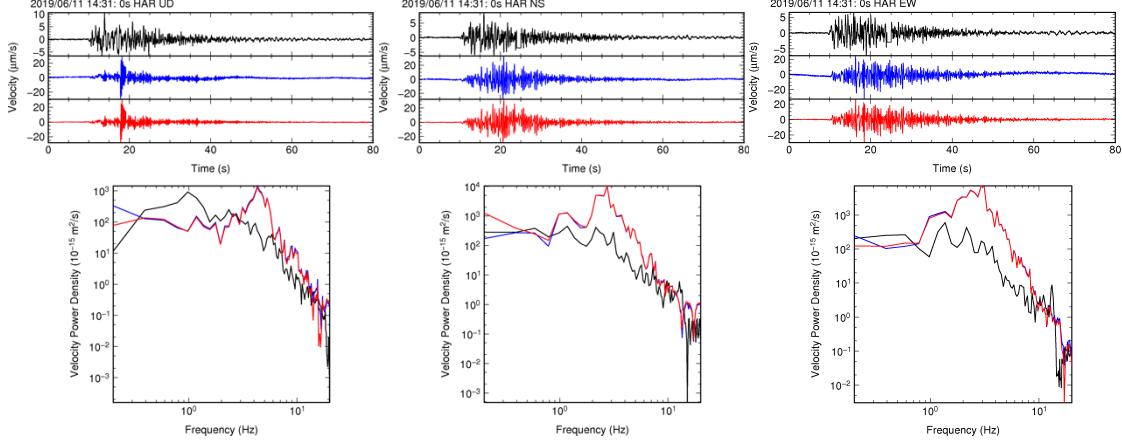


図2. 2019年6月11日14:31の噴火に伴う地震記録と対応するパワースペクトル密度。パワースペクトル密度の表示周波数帯は0.2~20Hzである。左から右へ上下動成分、南北動成分、東西動成分である。線の色は地震計の種類に対応し、黒線はボアホール速度計、青線はJU210、赤線はOpt. Aである。

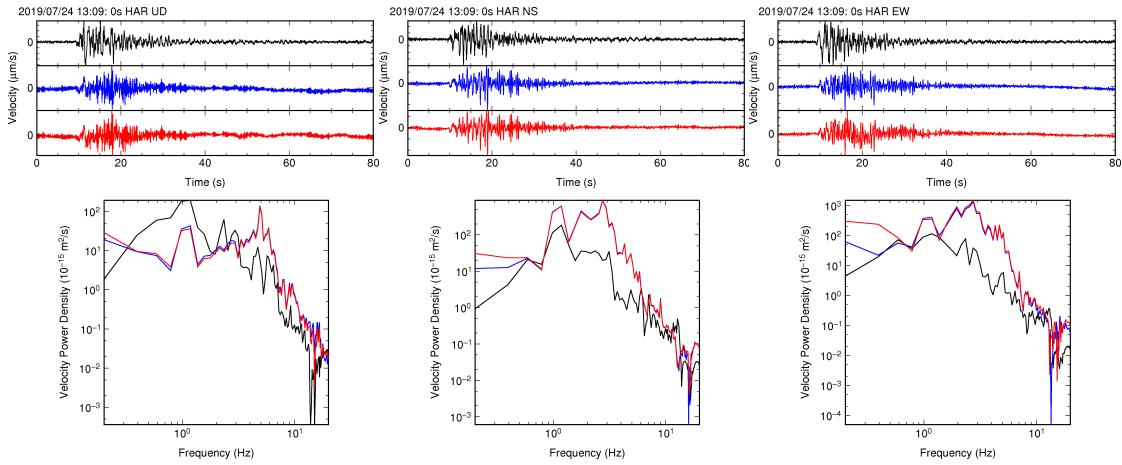


図3. 2019年7月24日13:09の噴火に伴う地震記録とスペクトル。図のならび及び線の色の意味は図2と同様である。

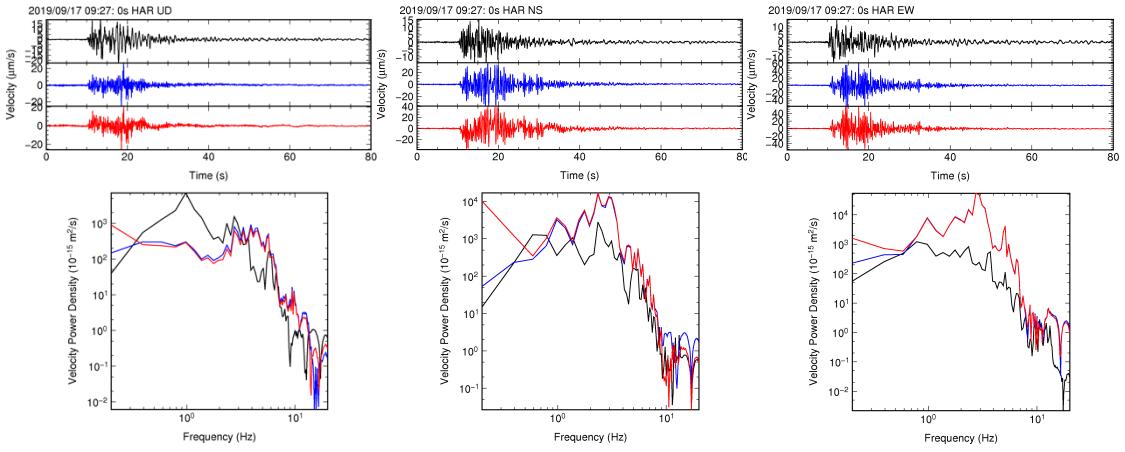


図 4. 2019 年 9 月 17 日 09:27 の噴火に伴う地震記録とスペクトル. 図のならび及び線の色の意味は図 2 と同様である.

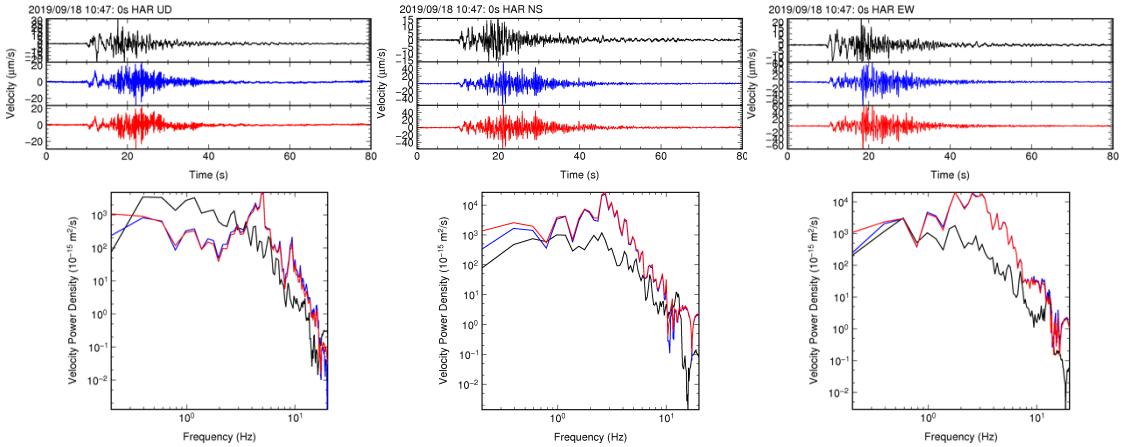


図 5. 2019 年 9 月 18 日 10:47 の噴火に伴う地震記録とスペクトル. 図のならび及び線の色の意味は図 2 と同様である.

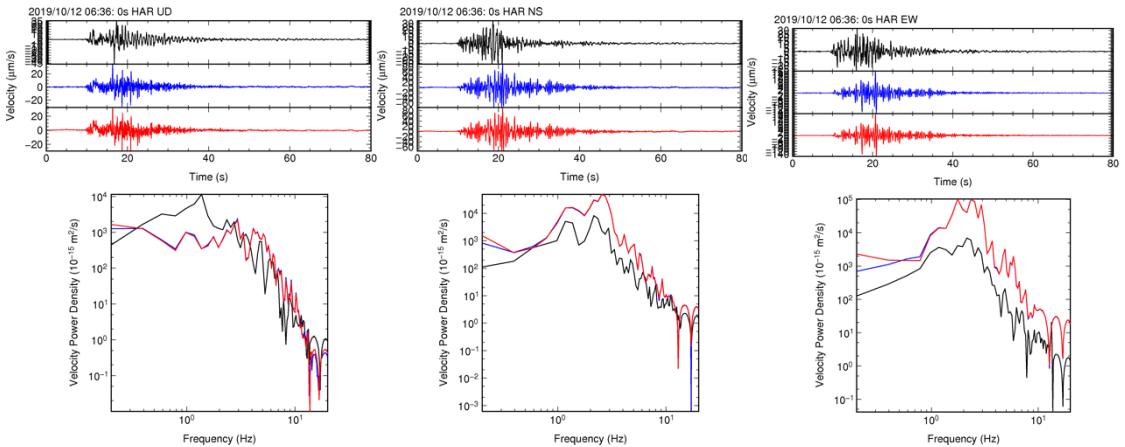


図 6. 2019 年 10 月 12 日 06:36 の噴火に伴う地震記録とスペクトル. 図のならび及び線の色の意味は図 2 と同様である.

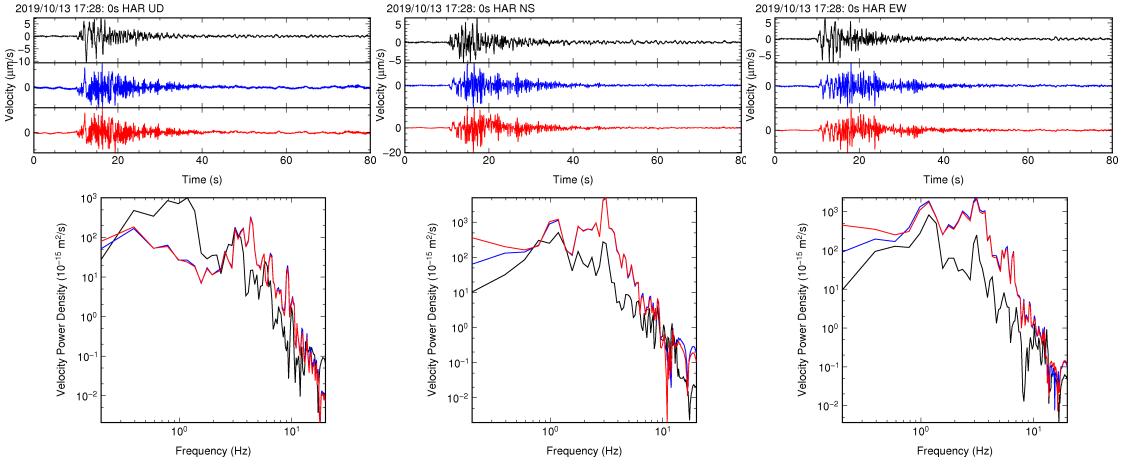


図 7. 2019 年 10 月 13 日 17:28 の噴火に伴う地震記録とスペクトル. 図のならび及び線の色の意味は図 2 と同様である.

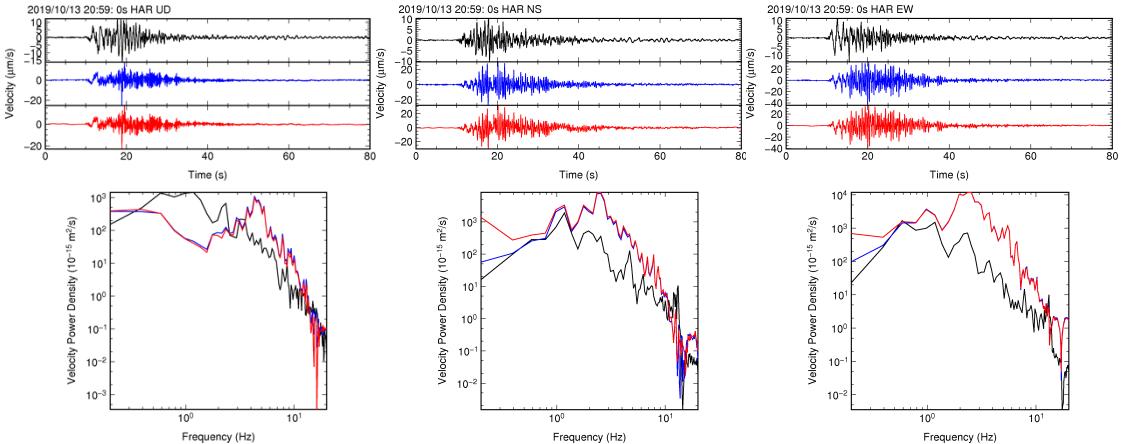


図 8. 2019 年 10 月 13 日 20:59 の噴火に伴う地震記録とスペクトル. 図のならび及び線の色の意味は図 2 と同様である.

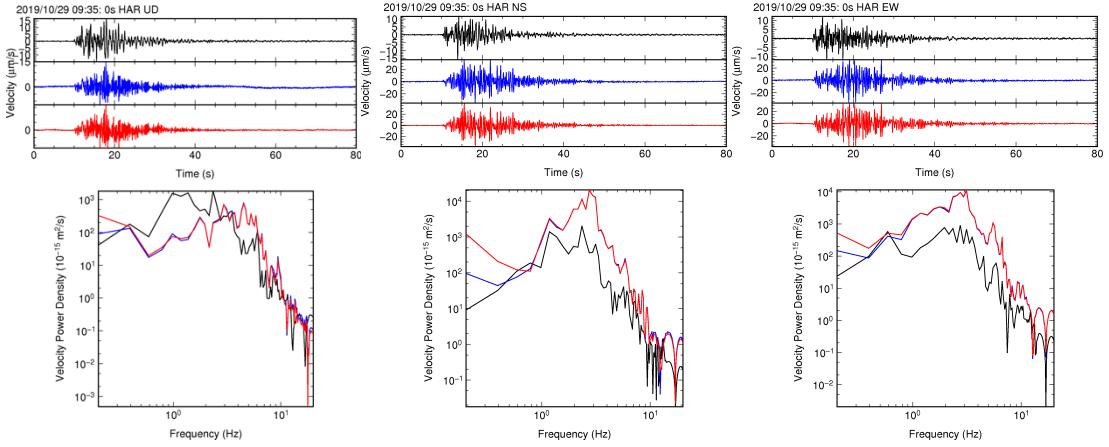


図 9. 2019 年 10 月 29 日 09:35 の噴火に伴う地震記録とスペクトル. 図のならび及び線の色の意味は図 2 と同様である.

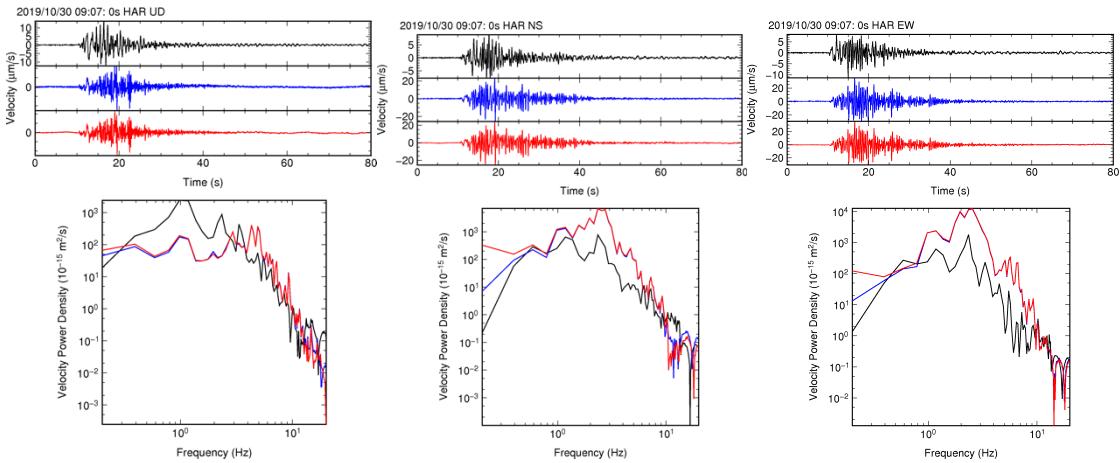


図 10. 2019 年 10 月 30 日 09:07 の噴火に伴う地震記録とスペクトル. 図のならび及び線の色の意味は図 2 と同様である.

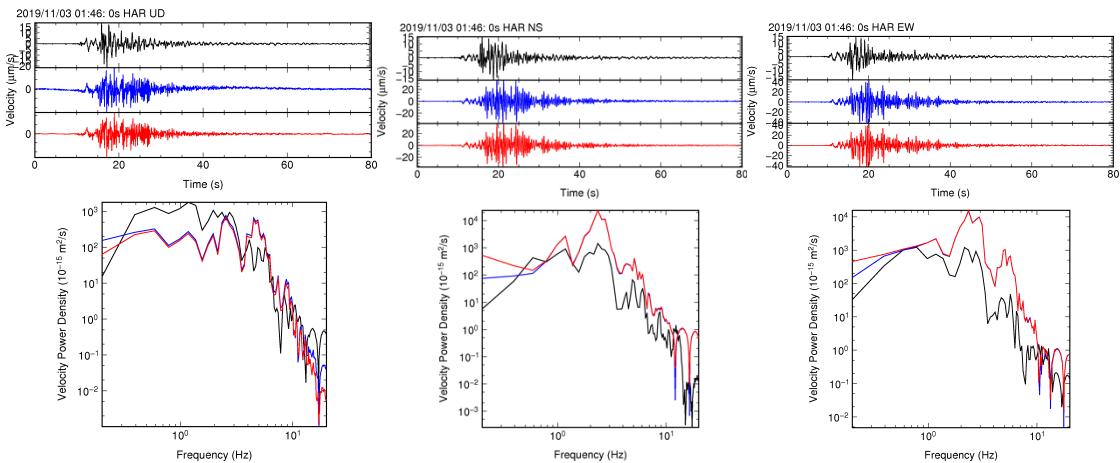


図 11. 2019 年 11 月 3 日 01:46 の噴火に伴う地震記録とスペクトル. 図のならび及び線の色の意味は図 2 と同様である.

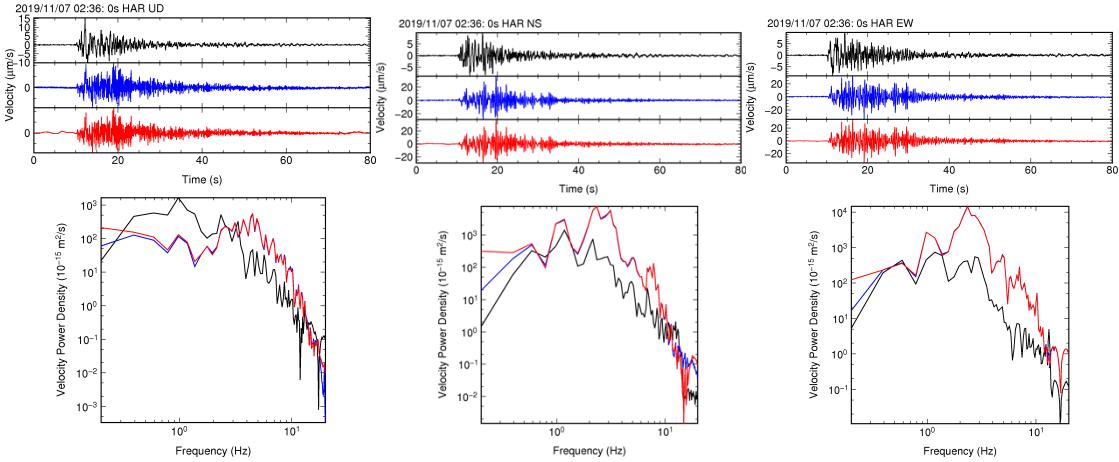


図 12. 2019 年 11 月 7 日 02:36 の噴火に伴う地震記録とスペクトル. 図のならび及び線の色の意味は図 2 と同様である.

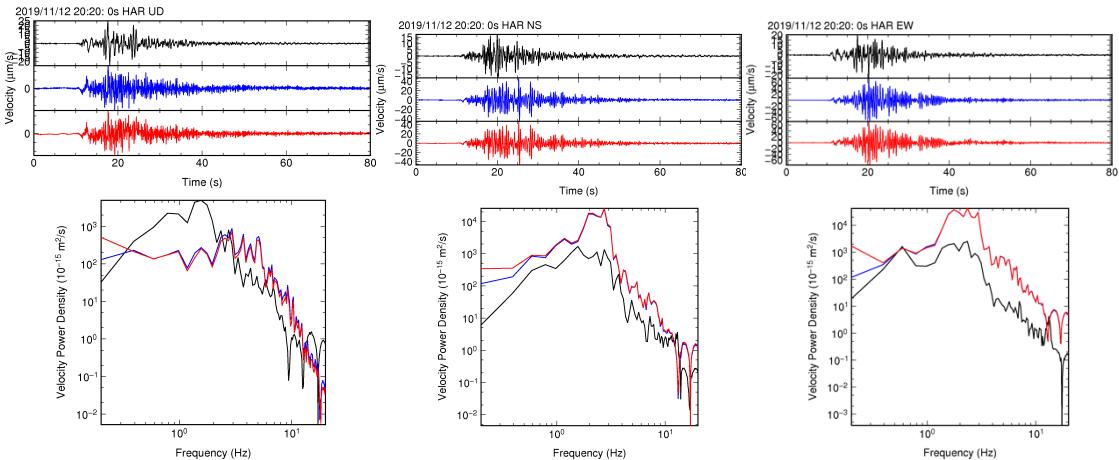


図 13. 2019 年 11 月 12 日 20:20 の噴火に伴う地震記録とスペクトル. 図のならび及び線の色の意味は図 2 と同様である.

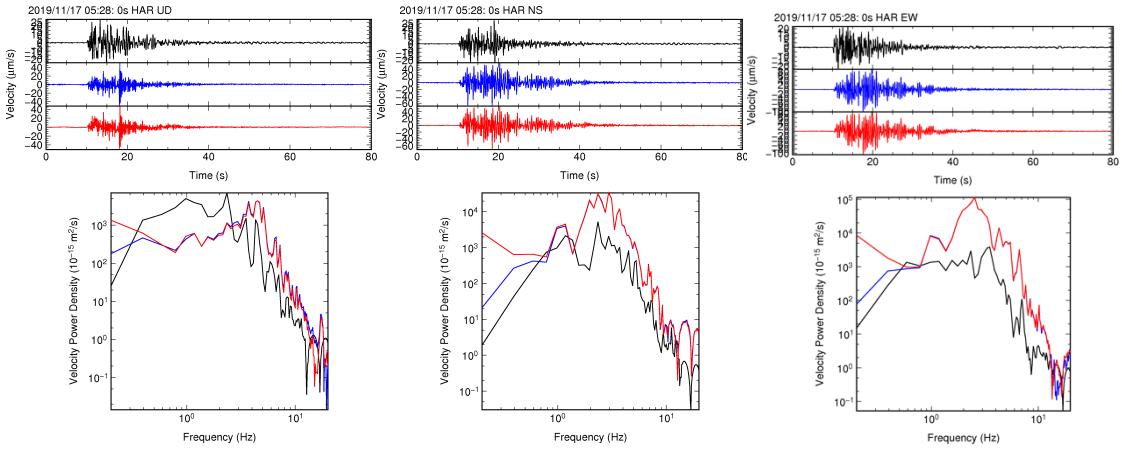


図 14. 2019 年 11 月 17 日 05:28 の噴火に伴う地震記録とスペクトル. 図のならび及び線の色の意味は図 2 と同様である.

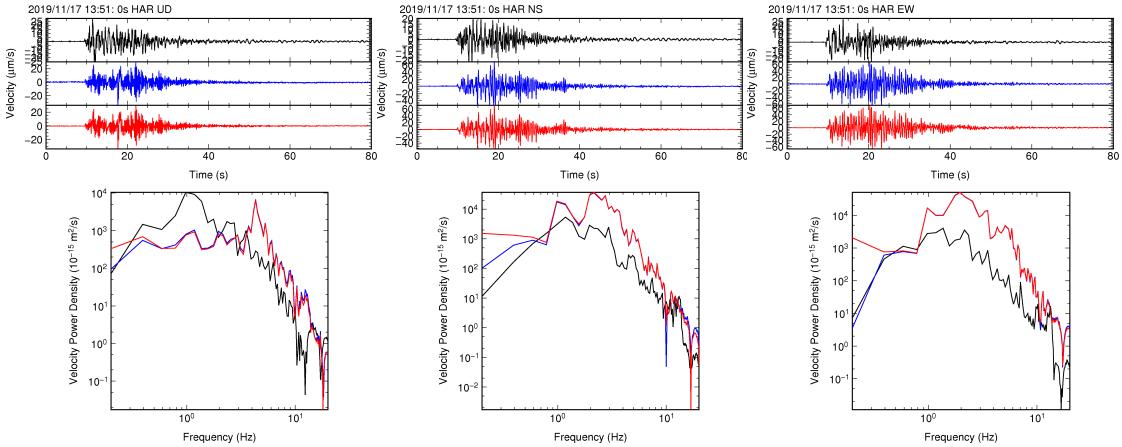


図 15. 2019 年 11 月 17 日 13:51 の噴火に伴う地震記録とスペクトル. 図のならび及び線の色の意味は図 2 と同様である.

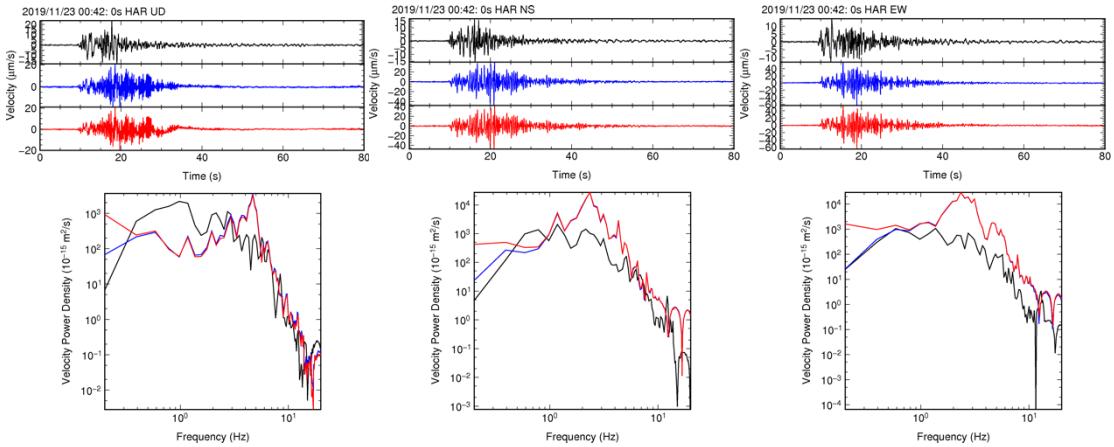


図 16. 2019 年 11 月 23 日 00:42 の噴火に伴う地震記録とスペクトル. 図のならび及び線の色の意味は図 2 と同様である.

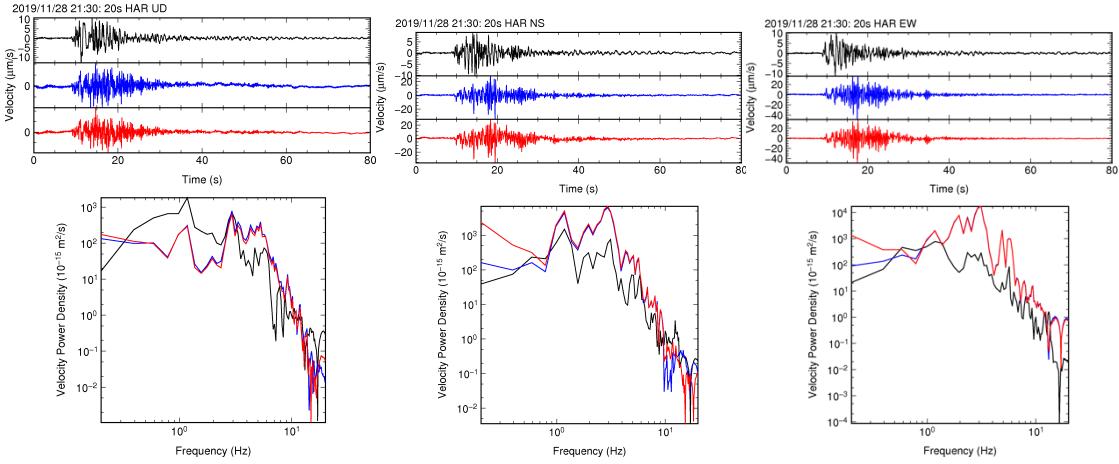


図 17. 2019 年 11 月 28 日 21:30 の噴火に伴う地震記録とスペクトル. 図のならび及び線の色の意味は図 2 と同様である.

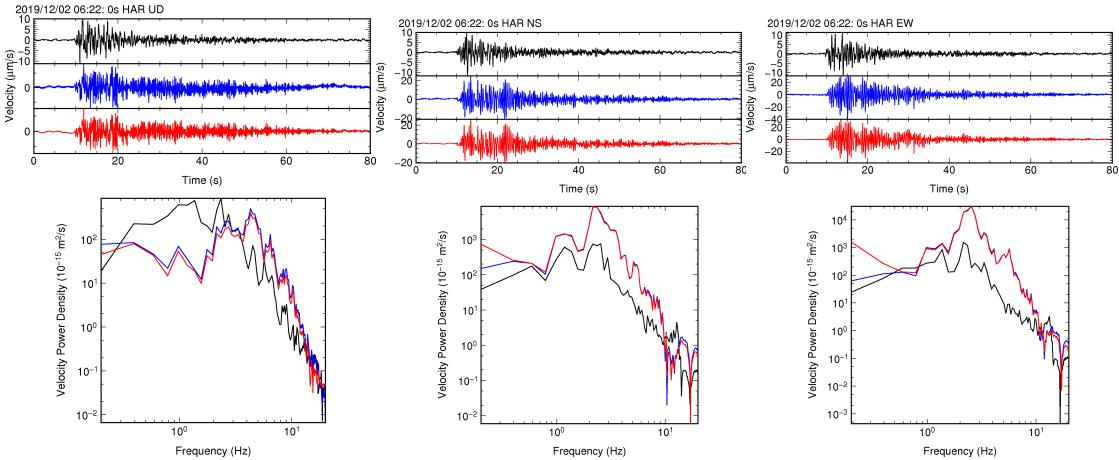


図 18. 2019 年 12 月 2 日 06:22 の噴火に伴う地震記録とスペクトル. 図のならび及び線の色の意味は図 2 と同様である.

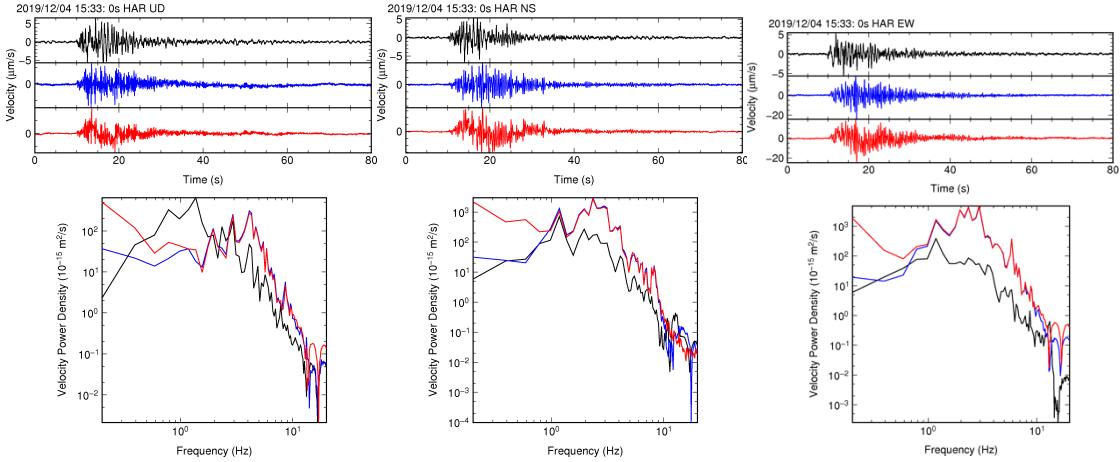


図 19. 2019 年 12 月 4 日 15:33 の噴火に伴う地震記録とスペクトル. 図のならび及び線の色の意味は図 2 と同様である.

ここでまず、図 2, 図 4, 図 8, 図 14, 図 15 の上下動において P 波初動到達から 8 秒後ぐらいに急激に振幅が大きくなる位相が Opt. A と JU210 に見られるが、ボアホール速度計には見られないことを指摘しておく. 図 2, 図 4, 図 8, 図 14, 図 15 に対応する噴火は表 2 に示す通り空振が概ね 60~90Pa であり、噴火種別は Ex (爆発) である. 空振の伝搬速度を 0.34 km/s とすると、南岳とハルタ山の直線距離 2.7 km なので P 波初動とこの位相の時刻差 8 秒に対応する. これらの図の上下動成分のみに見られる急激に振幅が大きくなる位相は空振が地面をたたくことで発生した地震動であると理解できる. ボアホール速度計は地中深くに地震計が存在するため、この地震動の影響はほとんどないから理解できる. ここでは、Opt. A と JU210 とボアホール速度計の波形を比較にあたっては空振の影響による地震動の影響はこれ以上議論しない. この理由により図 2, 図 4, 図 8, 図 14, 図 15 の上下動成分については地震計間の比較の議論を以降行わない. 同じ加速度計であり設置場所がほぼ同じで地表に設置されている Opt. A と JU210 の波形は 3 成分とも極めて似通っているが、スペクトルについては 0.2~0.5Hz の周波数帯にて 3 成分ともに JU210 に比べ Opt. A のパワーが大きいが、0.5Hz~20Hz において両者は完全に一致している. さらに、5Hz 以上の高周波数成分は 3 種類のセンサーにて 3 成分ともにスペクトルの周波数に対するパワーの変化がおおよそ一致していることが分かる. 逆に低周波側である 0.2~0.5Hz においては、3 種類の地震計のパワースペクトルの乖離が大きく、3 成分ともにボアホール速度計のパワーが小さい. これはボアホール速度計の固有周波数が 1Hz であるためである. 一方、0.5Hz~5Hz の周波数帯域においては Opt. A や JU210 とボアホール速度計との違いが明瞭である. この帯域の上下動は Opt. A や JU210 に比べてボアホール速度計のパワーが大きいが、水平動はその逆でパワーが小さい. 以上のことから、火山地震観測で一般的に用いられている固有周波数 1Hz の短周期地震計と比べて光センサシステムや地表置加速度計による観測は 0.5Hz 以下の低周波帯において有利であり、5Hz 以上の高周波数帯における観測は遜色ない

と言える。一方、低周波地震や火山性微動の卓越周波数帯に該当する 0.5~5Hzにおいては注意が必要である。既に述べた通り、上下動についてはボアホール速度計に比べて加速度計の 0pt. A と JU210 はパワーが小さいが、水平動はその逆で加速度計の方がパワーは大きい。とは言え、結論として光センサシステムは火山性地震の観測に対して十分な性能を有しており、0.5Hz 未満といった低周波帯は超低周波地震や超長周期地震といった火山においてしばしば発生する地震の周波数帯に該当し、この帯域に光センサシステムが十分な感度を有している。

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

桜島火山において 2019 年 6 月から半年間実施した光センサシステムによる地震観測における落雷に対する安定性を調査するためには、当該地震観測期間における桜島火山周辺の落雷発生についてのデータが必要である。そこで、2019 年 6 月 4 日午前 0 時から 2019 年 12 月 6 日午前 0 時の期間について落雷発生調査を行った。ハルタ山観測室の座標である北緯 $31^{\circ} 35' 39''$ 、東経 $130^{\circ} 37' 55''$ を中心地点とした $50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$ の範囲を落雷の調査範囲とした。そして、調査期間において時間帯毎に落雷の有無、落雷発生数、中心地点（ハルタ山観測所）からの最短水平距離（km）を調べた。図 20 に調査結果を示す。表 3 には落雷による地震波形記録への影響の評価のために用いるデータの時間帯における落雷発生数、最短水平距離、それぞれの時間帯の開始時における降水量と風速を示す。

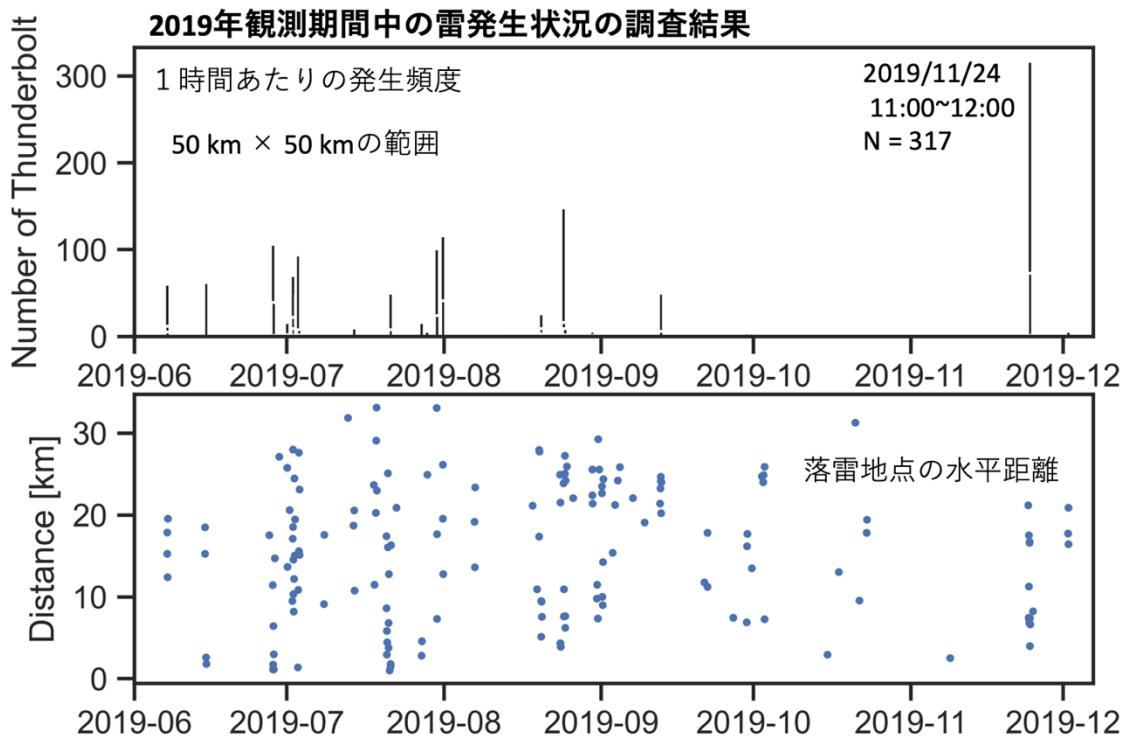


図 20. 桜島周辺における雷発生状況。上図：1 時間あたりの発生頻度。下図：ハルタ山観測室から落雷地点までの水平距離。

表 3. 落雷発生日, 時間帯, 発生数, 落雷地点までの水平距離, 降水量, 風速

年月日	時間帯	発生数	水平距離 (k)	降水量 (mm)	風速 (m/s)
2019-06-28	5:00 - 6:00	5	11.5	0.5	3.9
2019-06-28	6:00 - 7:00	60	1.1	10.5	2.1
2019-07-21	6:00 - 7:00	9	1.0	1.5	5.1
2019-07-21	10:00 -	34	1.5	9.5	2.9
2019-07-21	11:00 -	50	1.8	20.0	3.3
2019-11-24	8:00 - 9:00	17	16.8	2.5	2.1
2019-11-24	9:00 - 10:00	13	16.8	1.5	2.0
2019-11-24	10:00 -	34	7.4	0.5	5.6
2019-11-24	11:00 -	317	4.0	2.5	7.9
2019-11-24	12:00 -	73	6.6	19.0	4.7

2019 年は桜島火山が位置する九州南部において 5 月 31 日頃に梅雨入りし, 7 月 24 日頃に梅雨明けした. 梅雨の期間である 2019 年 6 月と 7 月において落雷数が多い (図 20 上図). また, それ以外の時期では落雷が無かった日が多いが 8 月下旬や 11 月 24 日に落雷数が多い. 特に, 11 月 24 日は 11 時台に 317 回と高頻度にて雷が発生した. この時の最短距離は 4.0 km であった (図 20 下図). 該当時間帯における地震波形記録を図 21 に示す. 該当時間帯において噴火は発生していないことを確認した. また, 火山構造性地震も発生していない. 一方, 低周波地震や火山性微動は発生しており, 光センサシステム Opt. A と微動計 JU210 の両方にて観測されている. しかし, 光センサシステムの地震記録では見られないが, 微動計において振動が見られる場合がありその時間を図 21 の赤逆三角形にて示した. 電気的な落雷ノイズに対応していると思われる.

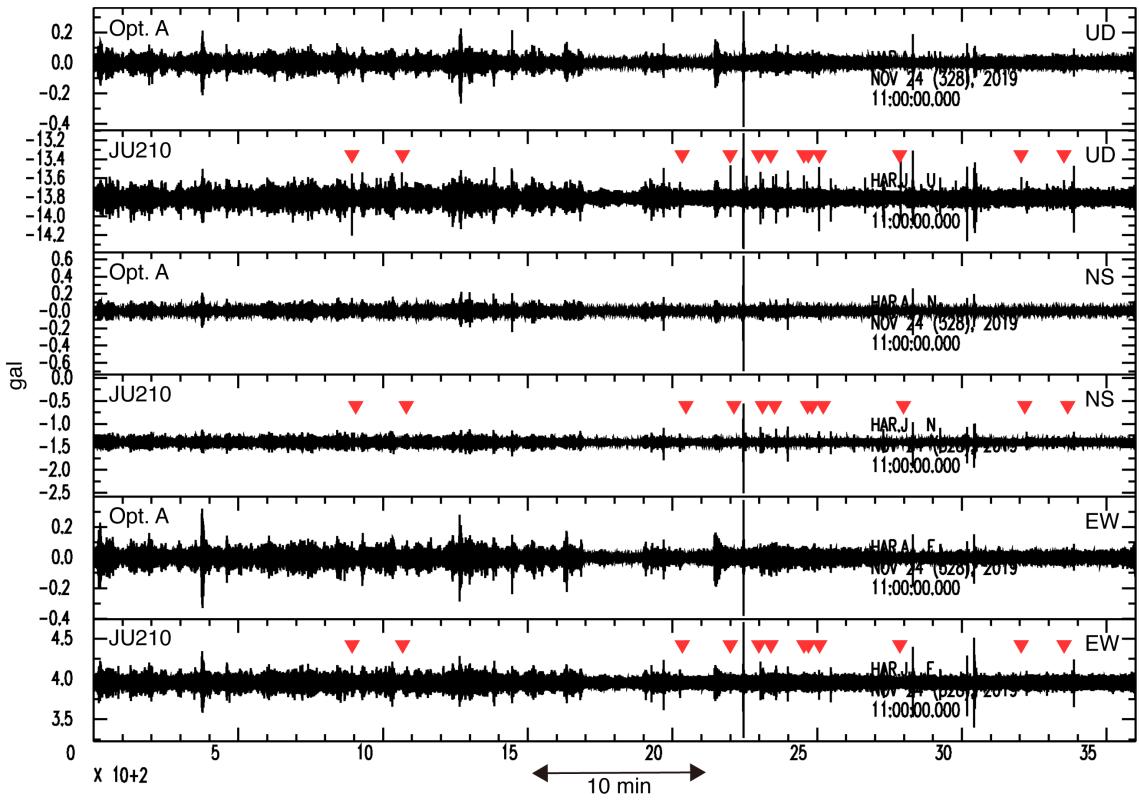


図 21. 2019 年 11 月 24 日 11 時 0 分から 12 時 0 分の地震波形記録. 各地震トレースの左上に記載の Opt. A および JU210 はそれぞれ光センサシステムの地震計および微動計（加速度地震計）である. 各地震トレースの右上に記載の UD, NS および EW はそれぞれ上下動成分, 南北動成分および東西動成分である. 赤逆三角は雷の影響と思われる時間を示す.

雷の影響についてより長い時間にて検討を進めるにあたって, 前節の火山性地震観測性能の評価で比較として用いたボアホール速度計の波形データは用いない. 一般的な地震計では信号線が長ければ長いほど雷の影響を受けるため, 300 m 深のボアホール速度計の記録と光センサシステムの記録を雷性能評価で比較するのは適切と言えない. そこで, 同じ場所に設置されている光センサシステムの Opt. A と微動計 JU210 の上下動成分について表 3 に示す落雷発生時間帯のランニングスペクトルを作成して比較する. ランニングスペクトル作成にあたっては, 時間窓長さを 5 秒にして, 2 秒毎にパワースペクトル値をカラーにて表示した. 図 22, は Opt. A に対応し, 図 23, は JU210 に対応している. 2019 年 6 月 28 日 5:00 ~ 6:00 の時間帯においては, 図 22 と図 23 を比較すると 3Hz から 30Hz にパワーのある地震に対応する部分については Opt. A と JU210 はおおよそ同じパワーである. 一方, 5:50 ~ 6:00 の時間帯では JU210 では図 23 に示すとおり 30~50Hz の高周波数帯に継続したパワーが見られるのに対し, 図 22 に示す Opt. A では見られない. これは雷ノイズの影響が JU210 にあるが, Opt. A にはない可能性がある. 30~50Hz 帯の継続したパワーは図 25, 27, 29, 31, 33, 35, 37, 39 に示す他の時間帯の微動計 JU210 に見られる. 一方, 30~50Hz 帯の継

続したパワーは図 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38 に示す他の時間帯の光センサ 0pt. A に見られない。なお、落雷発生は当然のことながら悪天候時に発生することが多いため、雨量と風速が大きい時間帯に対応することが多い。光センサ 0pt. A と微動計 JU210 は前述の通りハルタ山観測室敷地内の岩石試料保管室内に設置されているため、建物への雨や風の影響が震動ノイズ源となっていると思われる。また、桜島は高頻度で噴火をしており比較的長時間噴火が継続することもあり噴火に伴う震動も長時間継続する場合がある。いずれの震動も同じ場所に設置した 0pt. A と JU210 では同じ震動を記録するはずである。実際に、前節の火山性地震観測性能の評価において噴火に伴う震動は 0pt. A と JU210 では同一であることを示している。したがって、30~50Hz の高周波数帯における JU210 に見られたノイズが 0pt. A に見られないのは雷ノイズの影響が JU210 には有意にあるが 0pt. A には無いことを示している。よって、光センサシステムは雷ノイズを拾わない特性、つまり耐雷性能を有していると結論できる。JU210 は前述のとおり信号線といったアナログ部は短いため電気的ノイズを拾いにくいはずである。一般的な地震観測では地震計からデータ収録部までの地震計信号ケーブルの長さは数メートルから長い場合は数百メートル。信号ケーブルはシールド線で電気ノイズを拾いにくいものが使われているが、当然ながらケーブル長に比例して電気的ノイズの影響を受けやすくなる。雷といった顕著な電気的ノイズの影響は受け、実際にここで示した通りアナログ部が短い JU210 においても電気的ノイズのパワーを検出出来ている。火山における地震観測では、低周波地震や火山性微動に代表されるように数 Hz 帯をメインターゲットとされてきたが、また広帯域地震観測により 0.01~0.5Hz 帯の超長周期地震にも対象が広がってきた。これらの地震については従来型の地震計による観測で問題はない。しかし、火山における地震観測で対象とされてこなかった数 10Hz の震動について研究をするうえでは光センサシステムは有用であると言えよう。実際に、火山にてこのような高周波数の震動があるかどうかであろうが、Gas Jet と呼ばれる周波数が 10Hz 以上の空気振動が世界中で観測されている（例えば、Matoza et al. 2009）。したがって、地震動の観測からも Gas Jet を捉える試みをすることに意義があり、観測手段として光センサシステムの活用が考えられる。

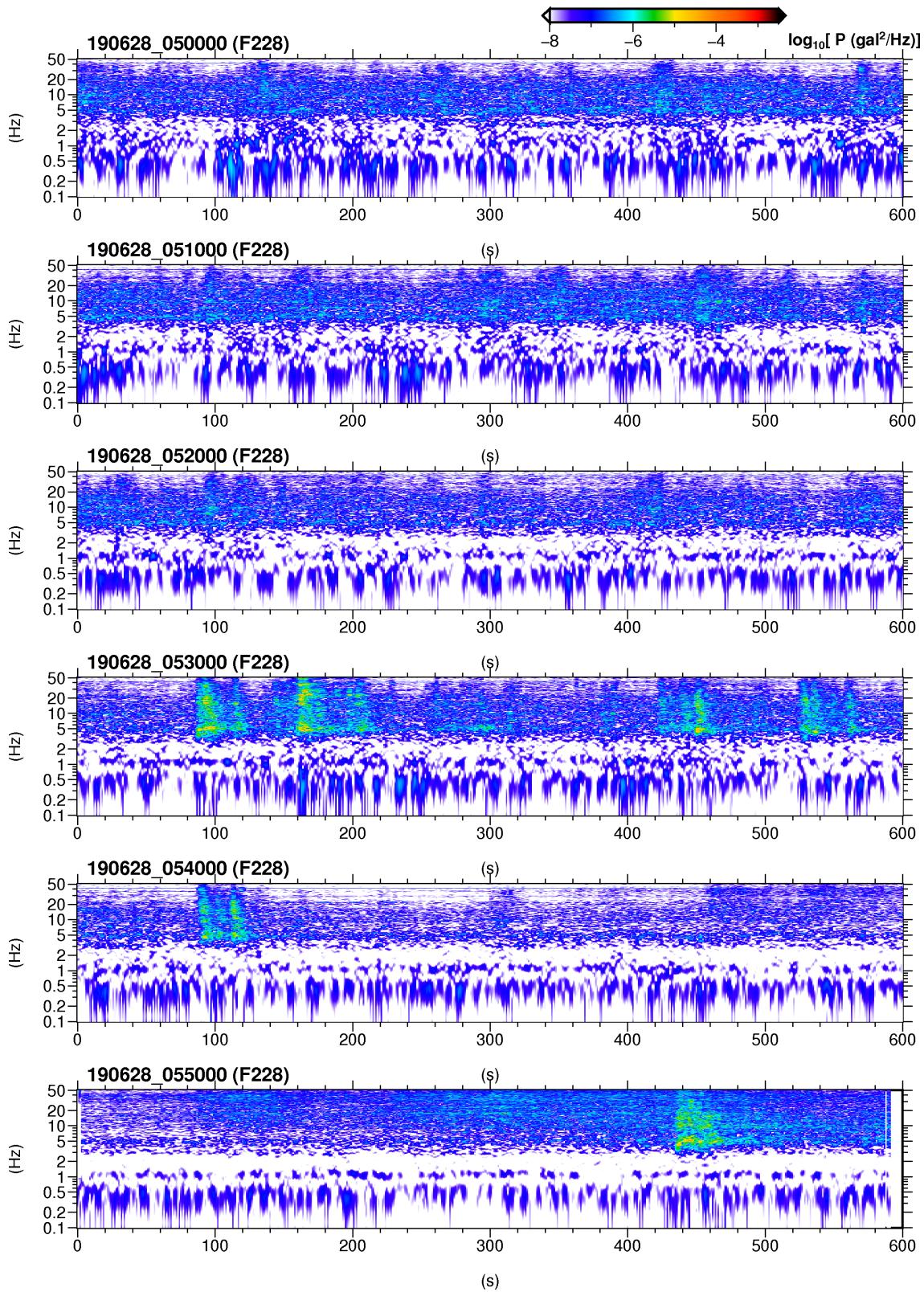


図 22. 2019 年 6 月 28 日 5:00~6:00 の光センサ 0pt. A 地震計のランニングスペクトル。上下動成分の加速度のパワースペクトル密度をカラースケールにて示している。

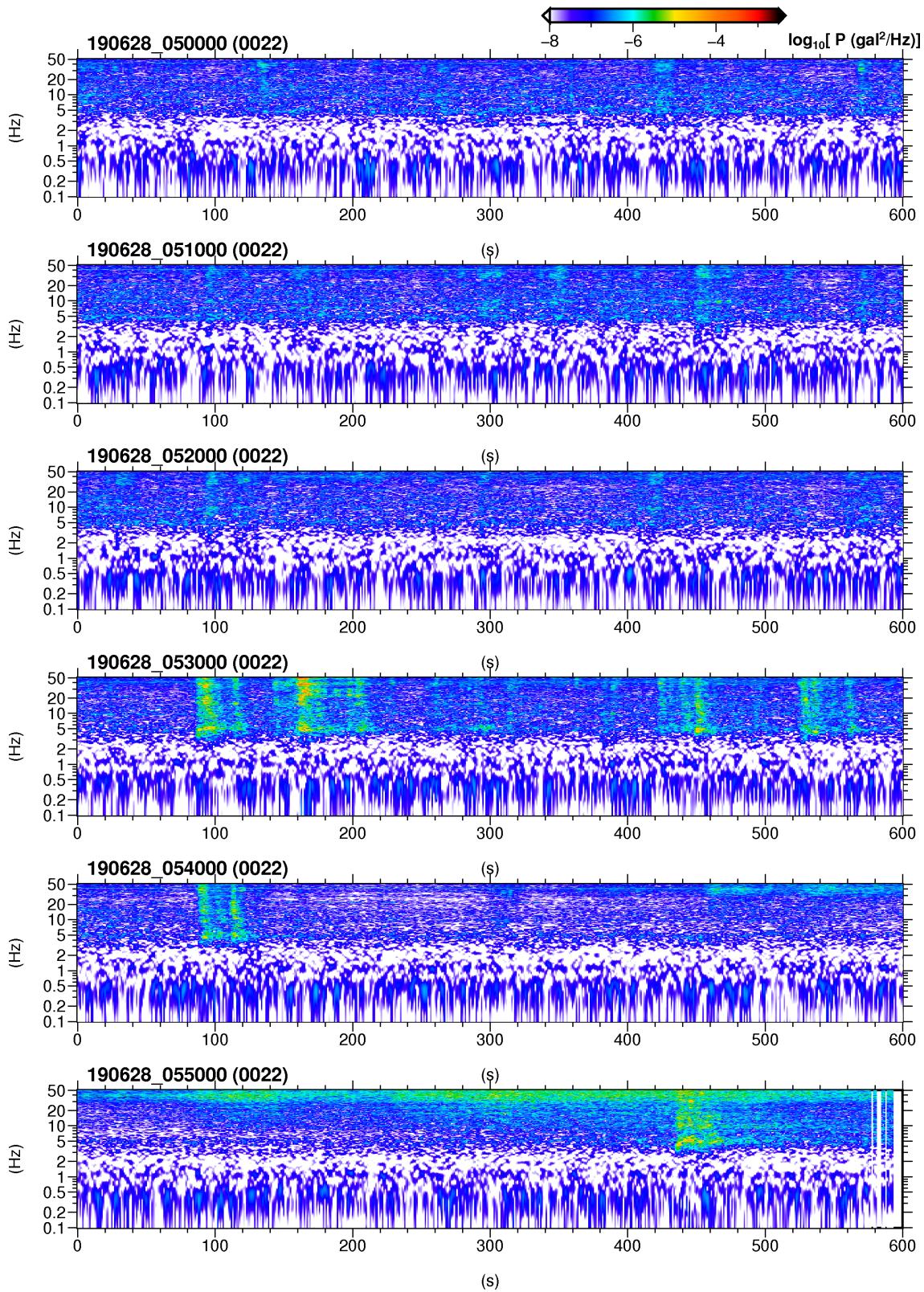


図 23. 2019 年 6 月 28 日 5:00～6:00 の微動計 JU210 のランニングスペクトル. 他は図 22 と同様.

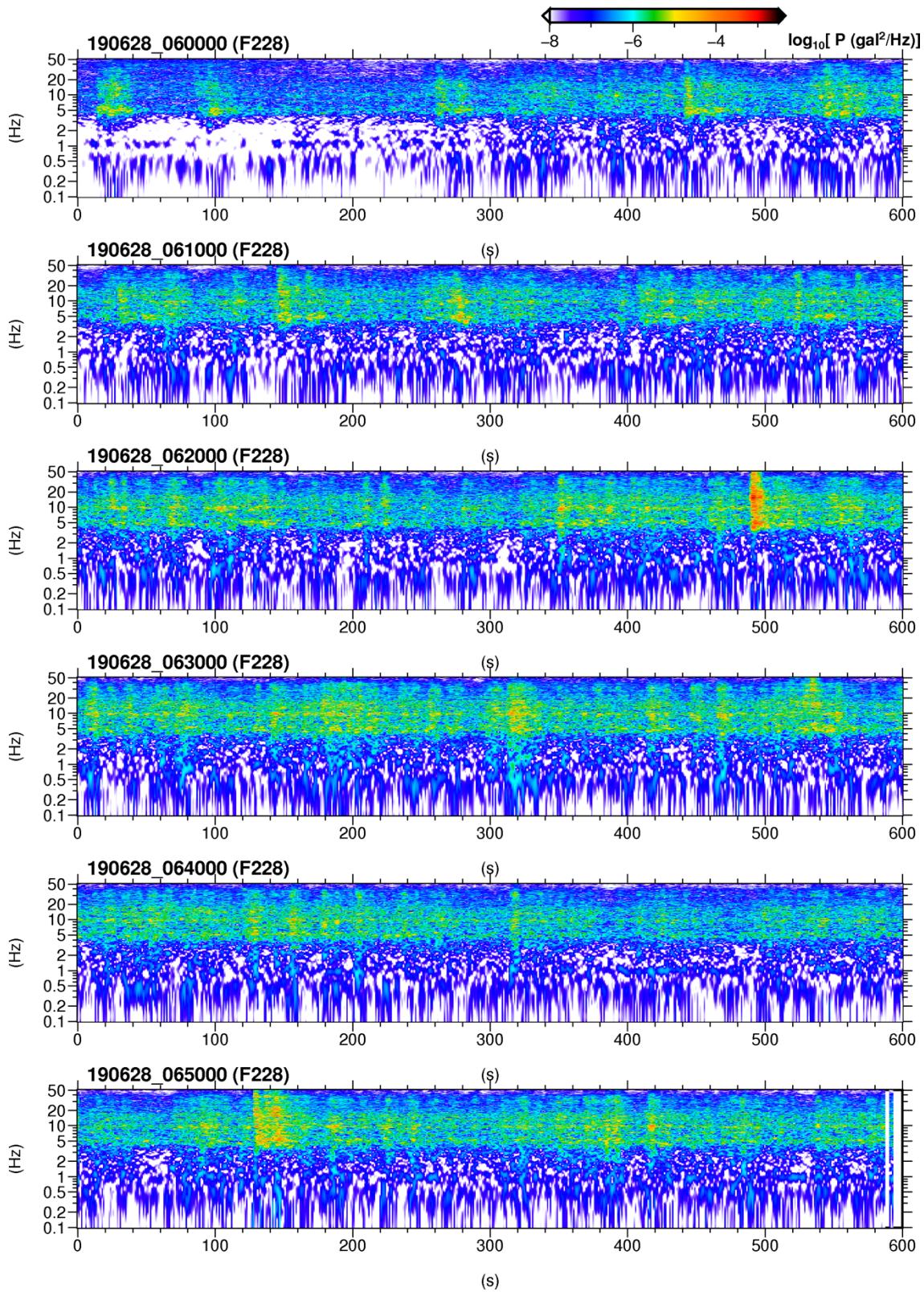


図 24. 2019 年 6 月 28 日 6:00~7:00 の光センサ 0pt. A 地震計のランニングスペクトル.
他は図 22 と同様.

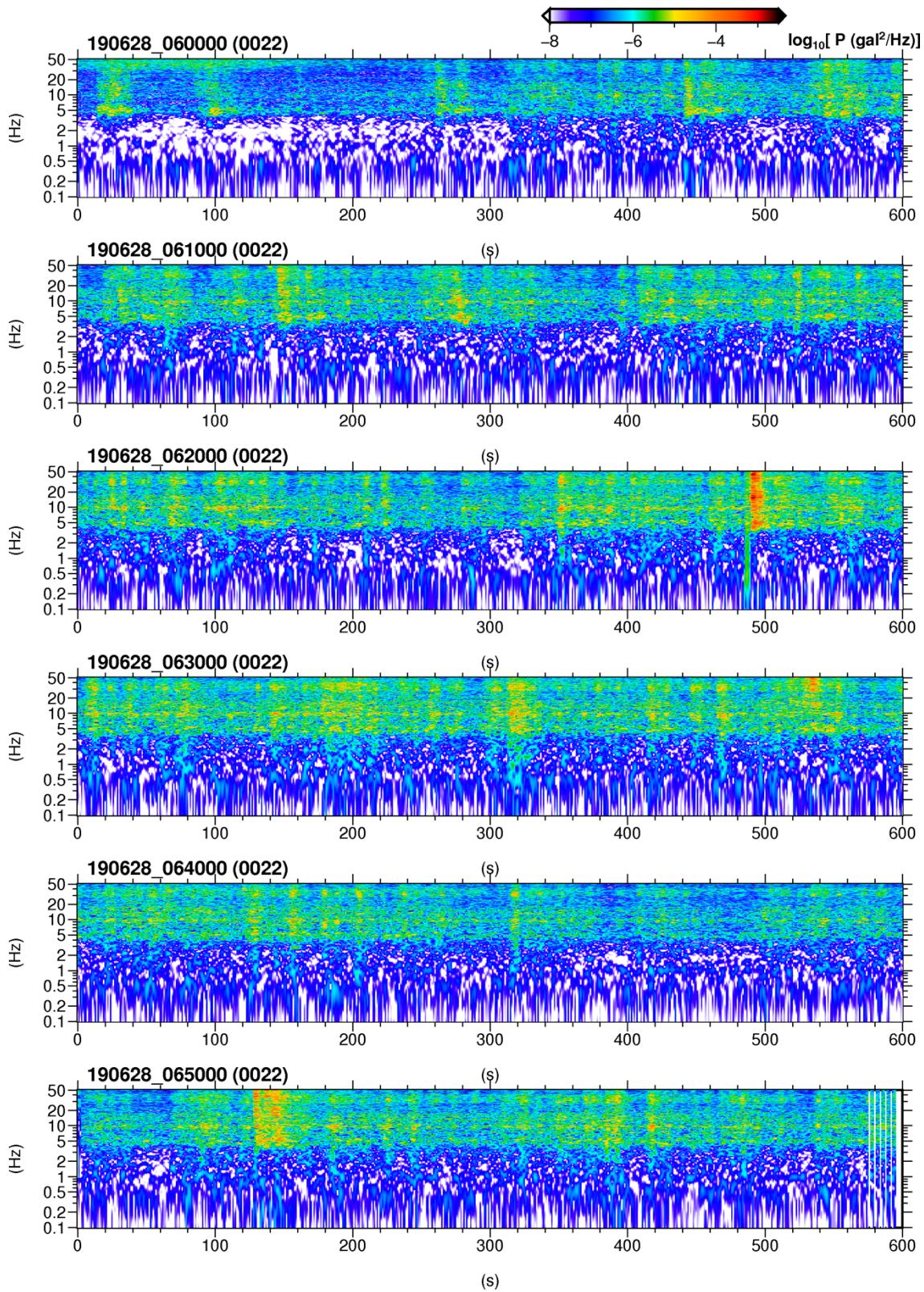


図 25. 2019 年 6 月 28 日 6:00～7:00 の微動計 JU210 のランニングスペクトル. 他は図 22 と同様.

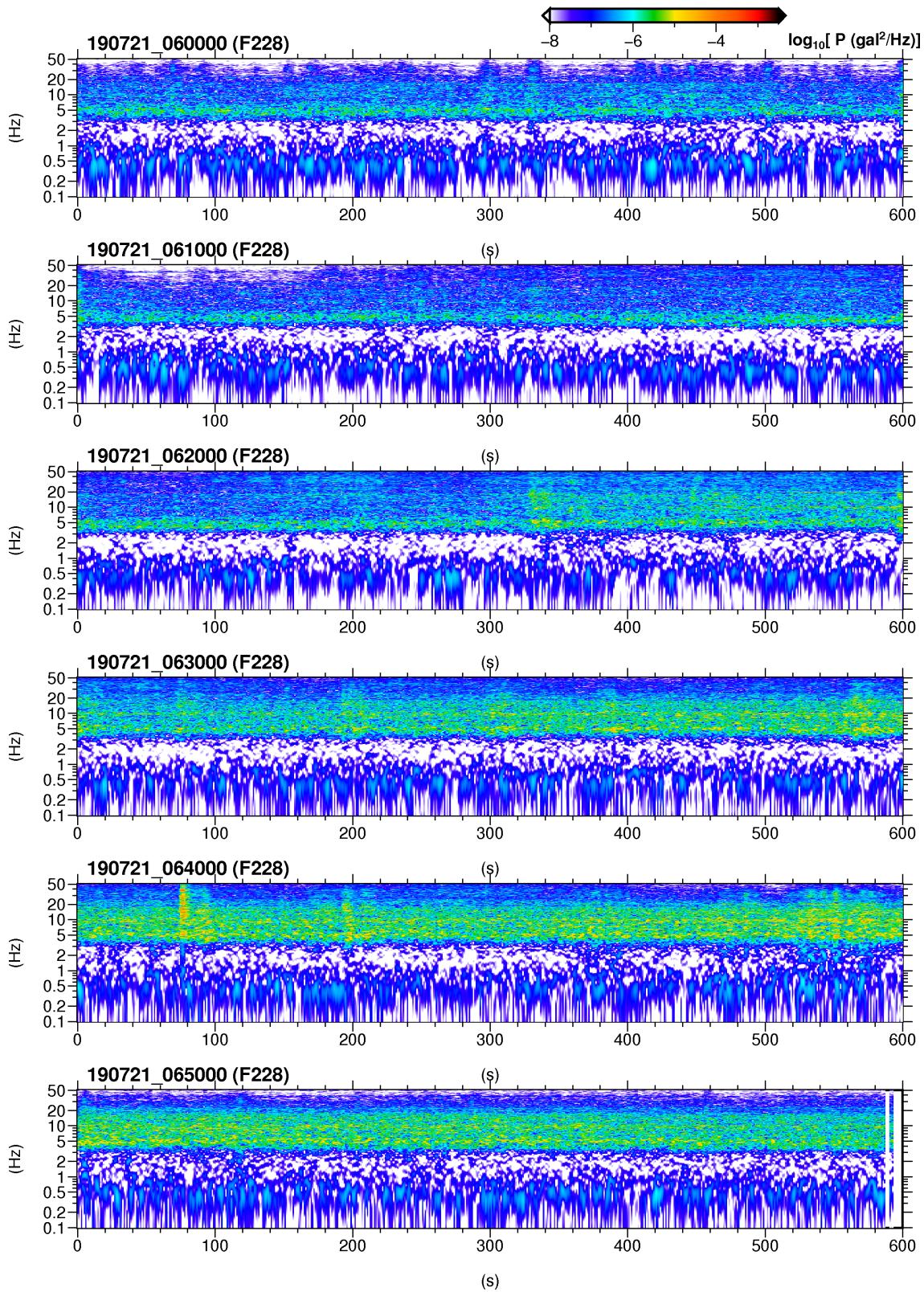


図 26. 2019 年 7 月 21 日 6:00~7:00 の光センサ 0pt. A 地震計のランニングスペクトル.
他は図 22 と同様.

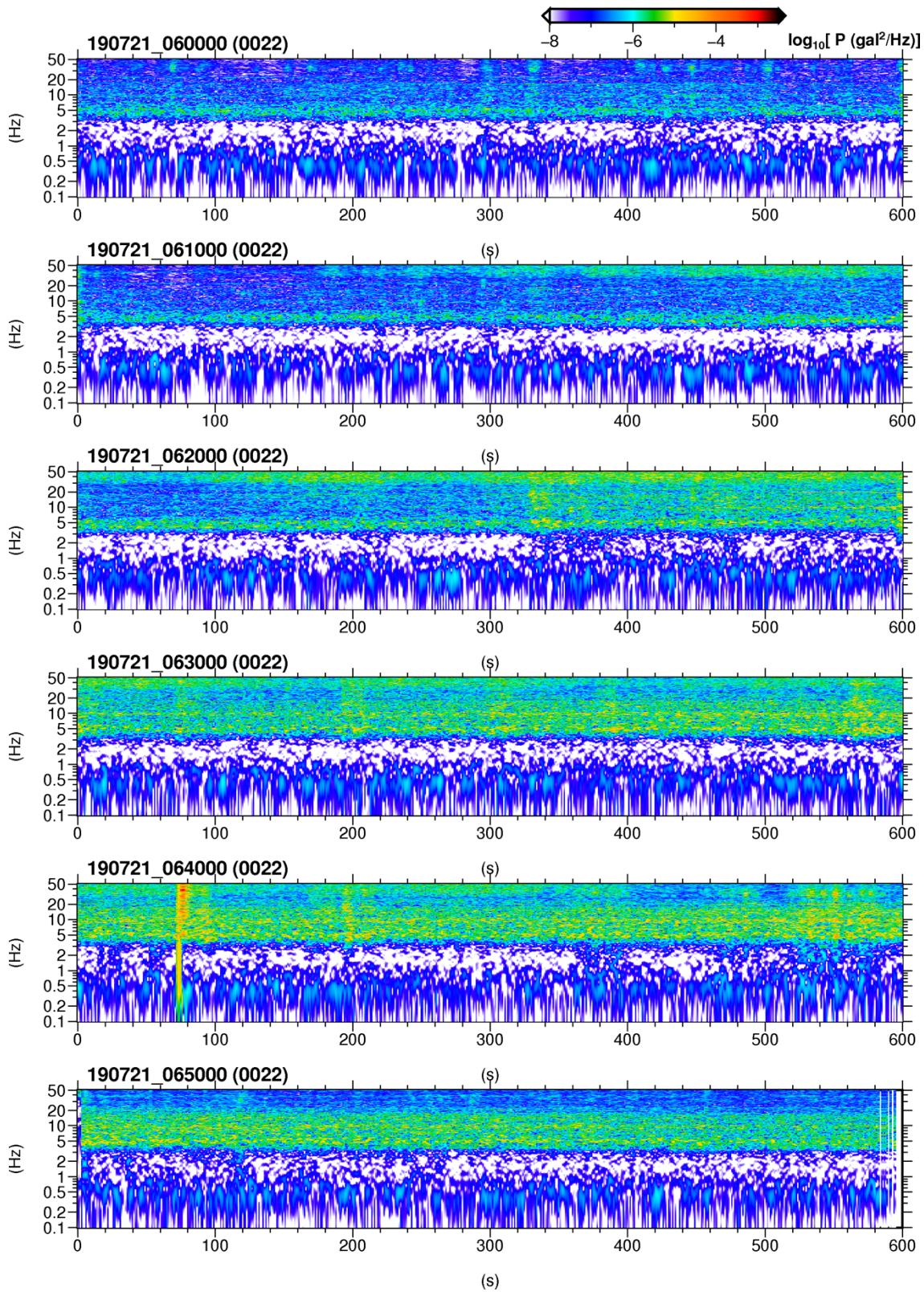


図 27. 2019 年 7 月 21 日 6:00~7:00 の微動計 JU210 のランニングスペクトル. 他は図 22 と同様.

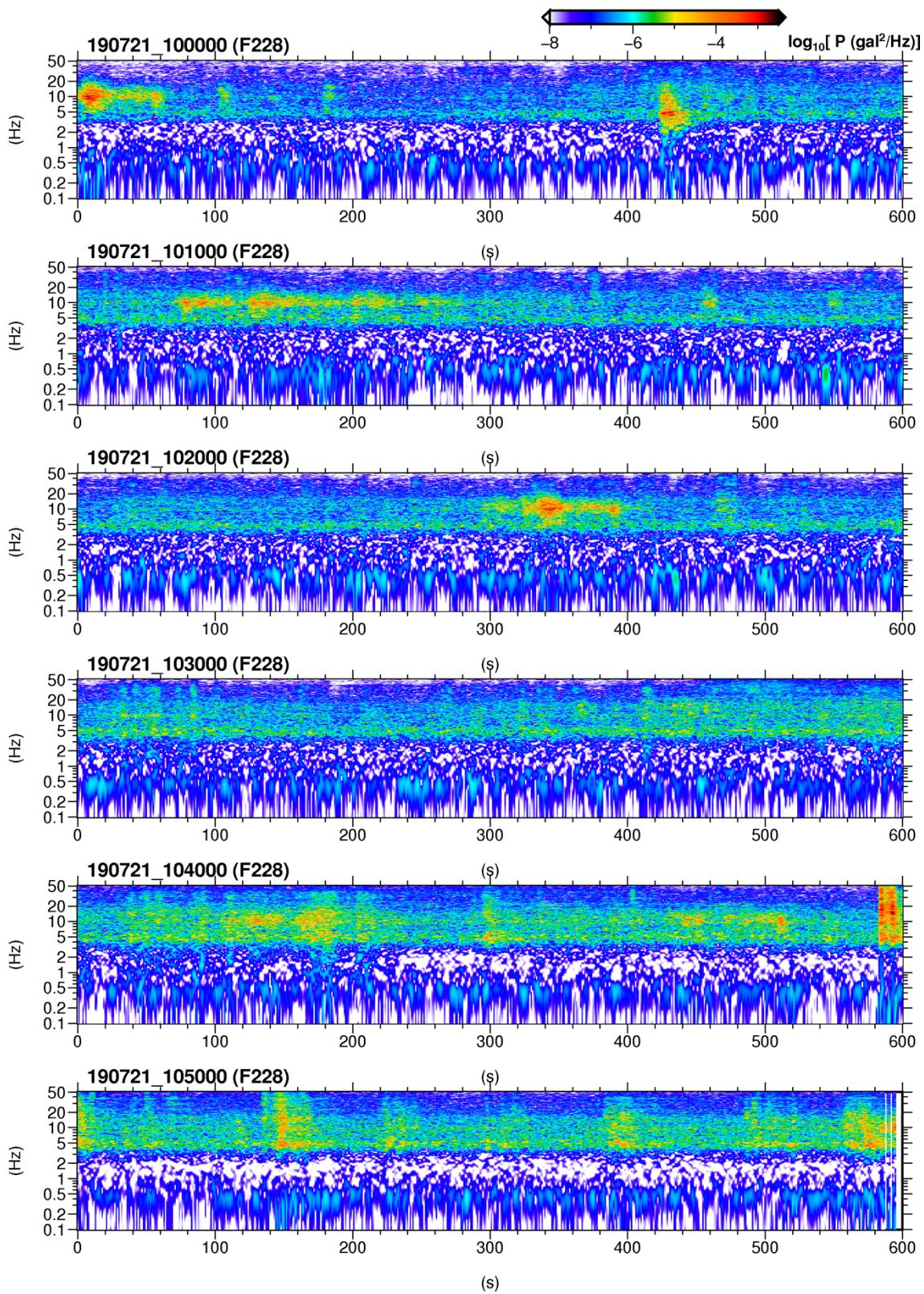


図 28. 2019 年 7 月 21 日 10:00~11:00 の光センサ 0pt. A 地震計のランニングスペクトル.
他は図 22 と同様.

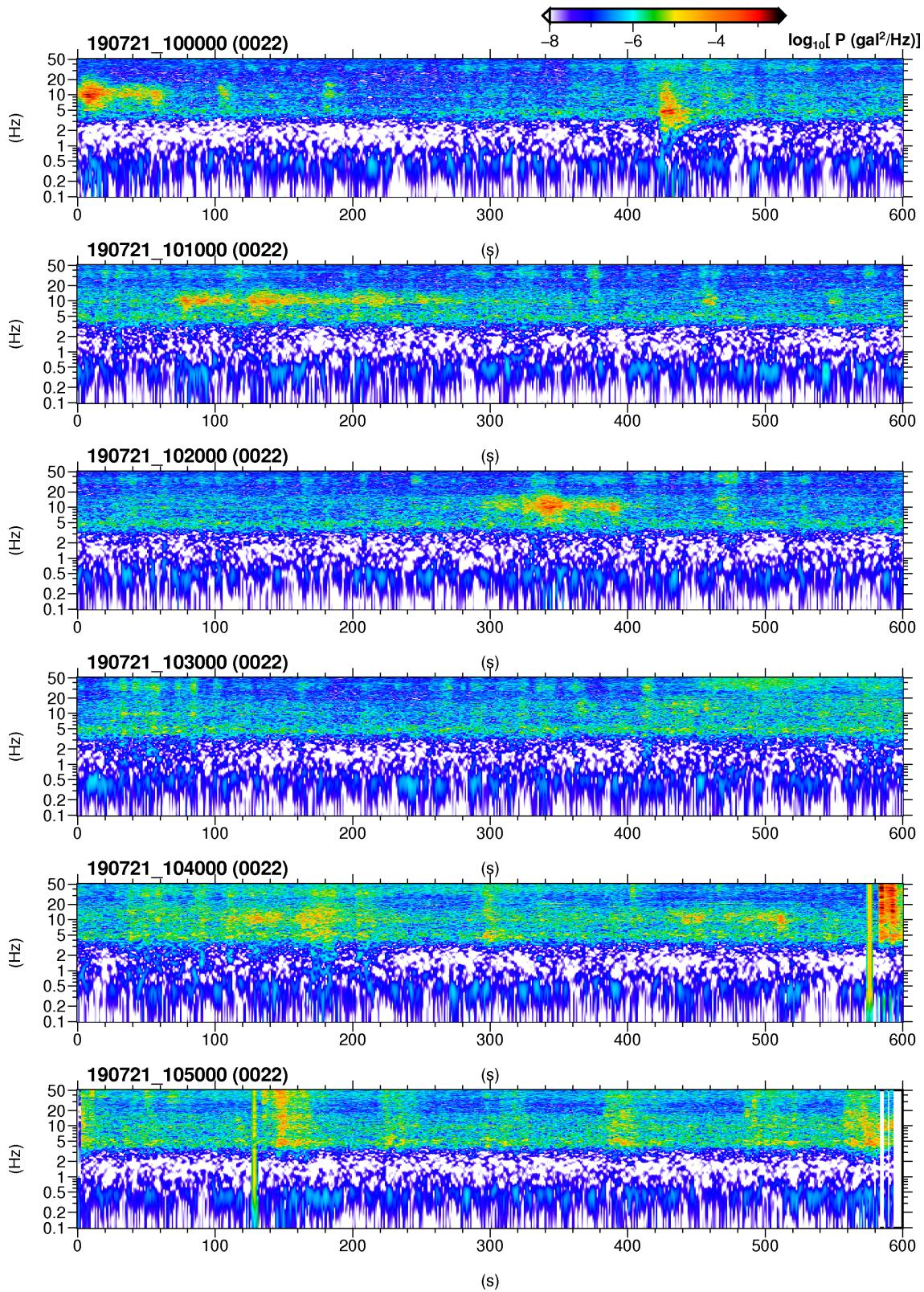


図 29. 2019 年 7 月 21 日 10:00~11:00 の微動計 JU210 のランニングスペクトル. 他は図 22 と同様.

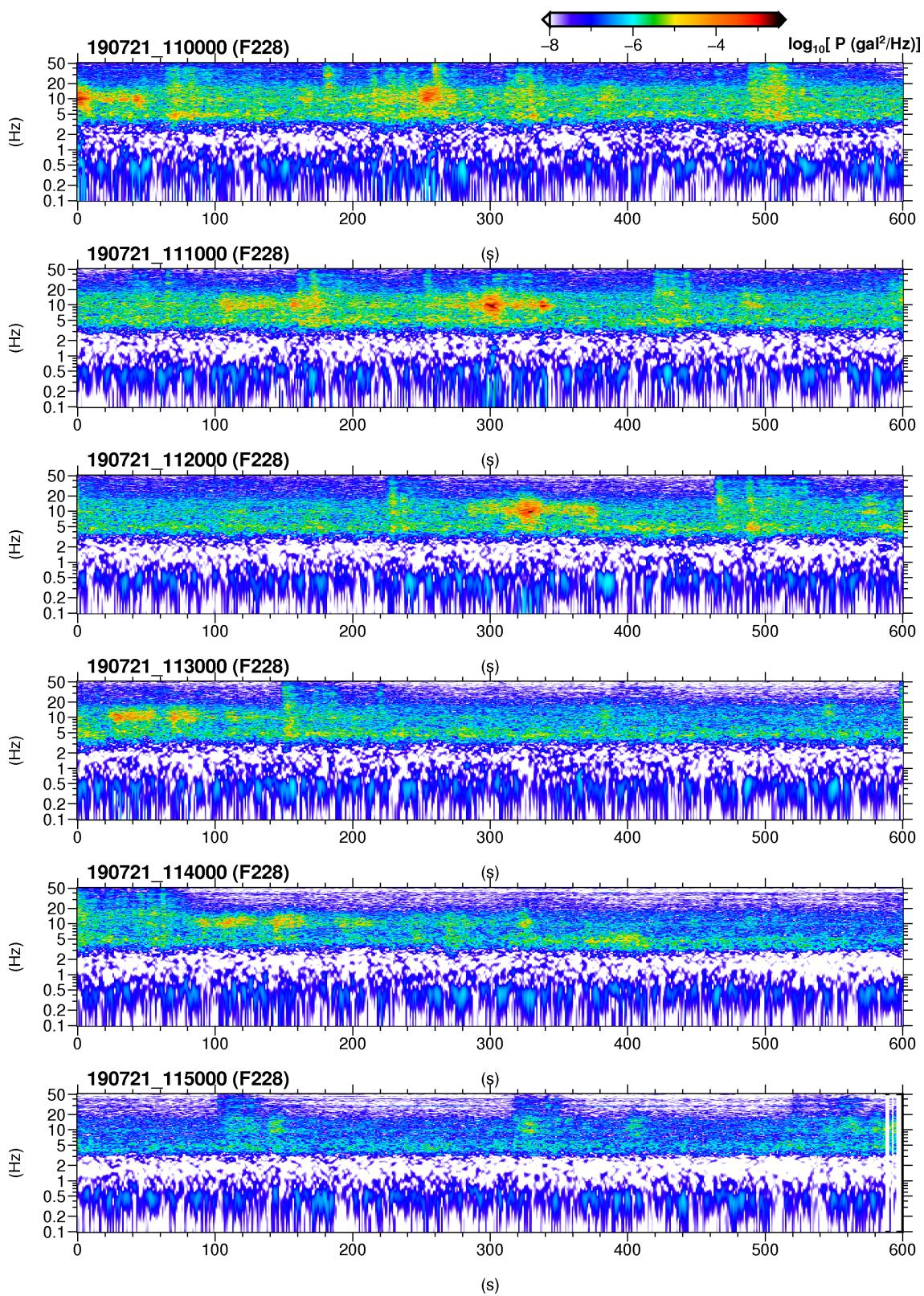


図 30. 2019 年 7 月 21 日 11:00~12:00 の光センサ 0pt. A 地震計のランニングスペクトル.
他は図 22 と同様.

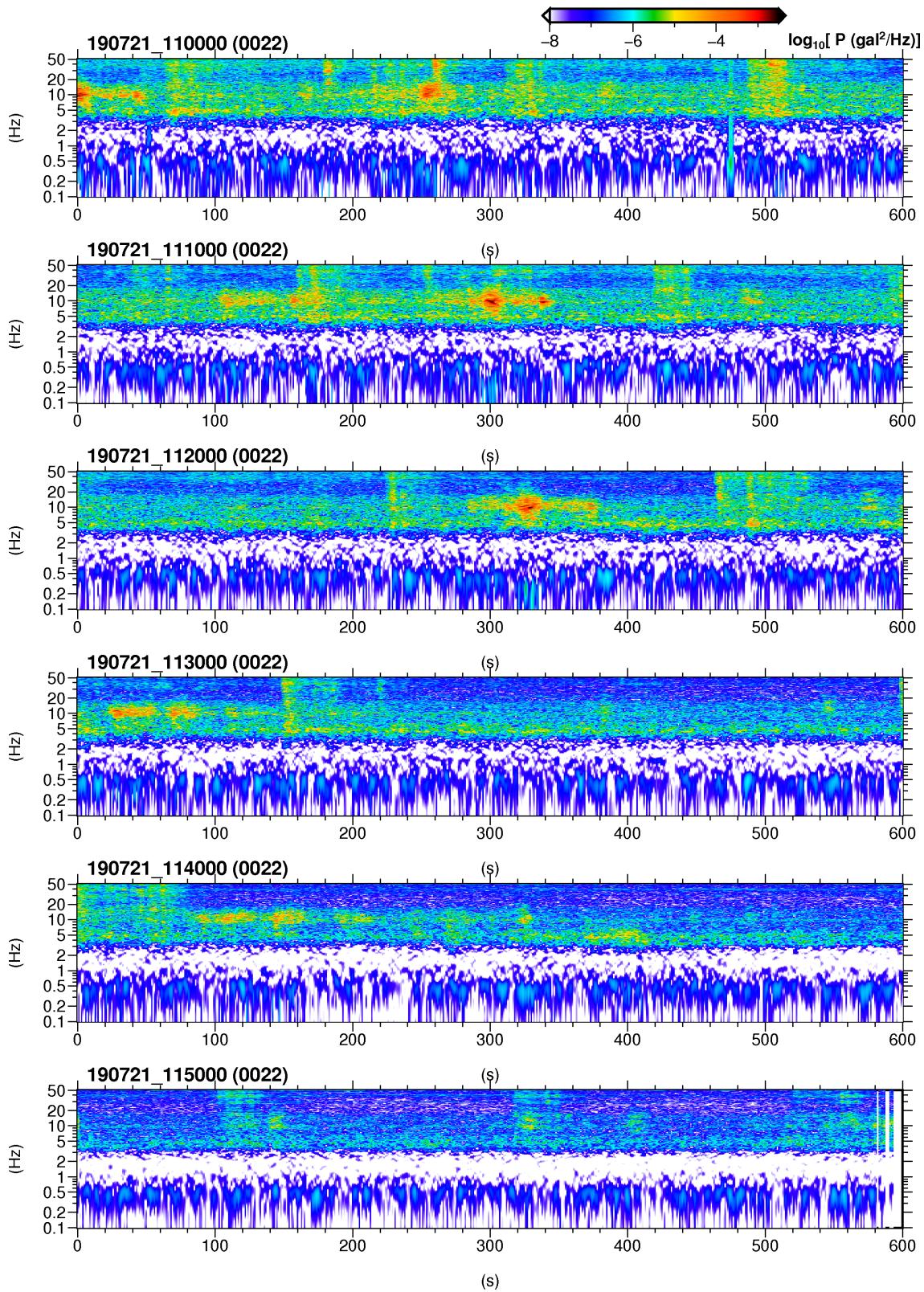


図 31. 2019 年 7 月 21 日 11:00~12:00 の微動計 JU210 のランニングスペクトル. 他は図 22 と同様.

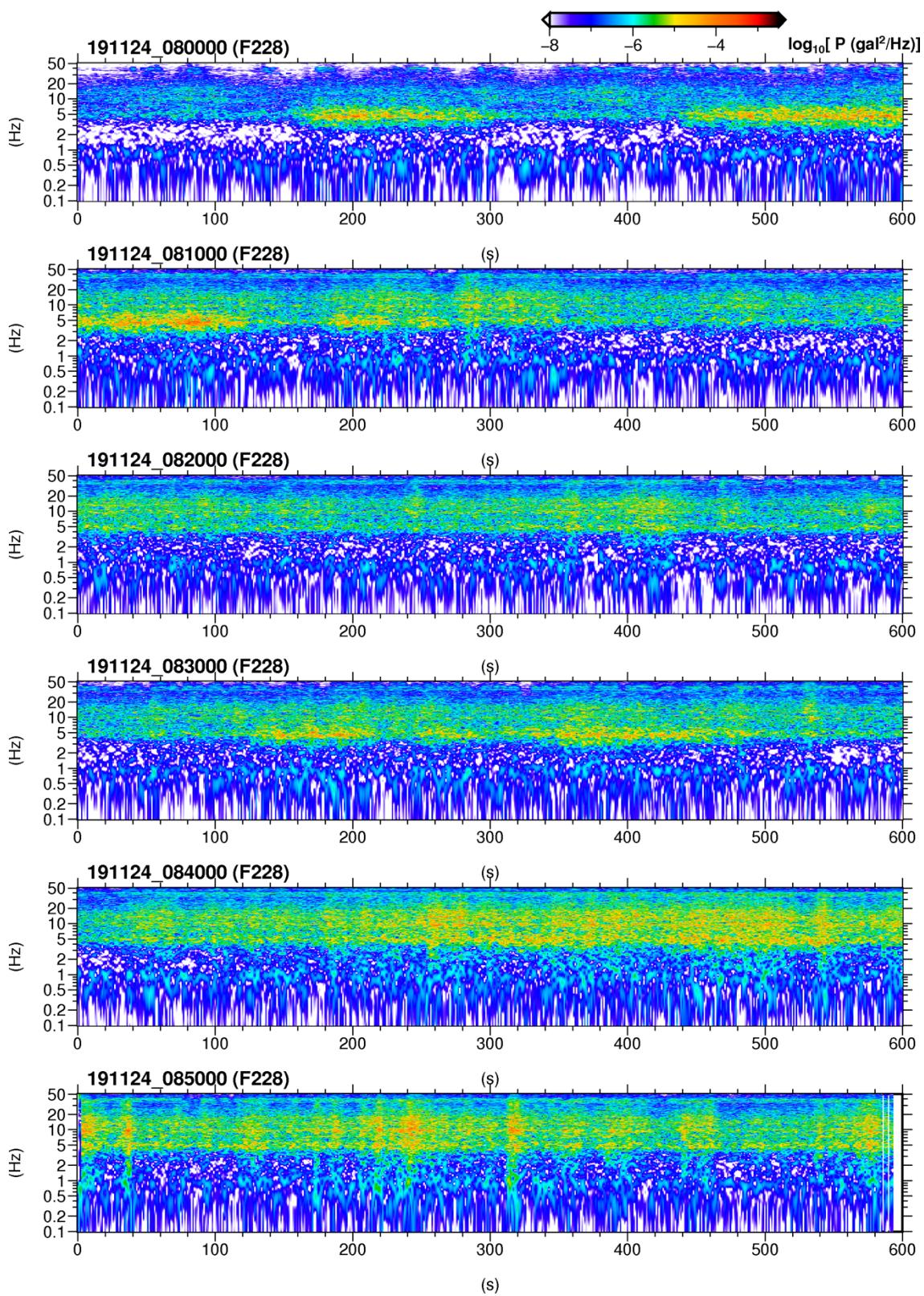


図 32. 2019 年 11 月 24 日 8:00~9:00 の光センサ Opt. A 地震計のランニングスペクトル。他は図 22 と同様。

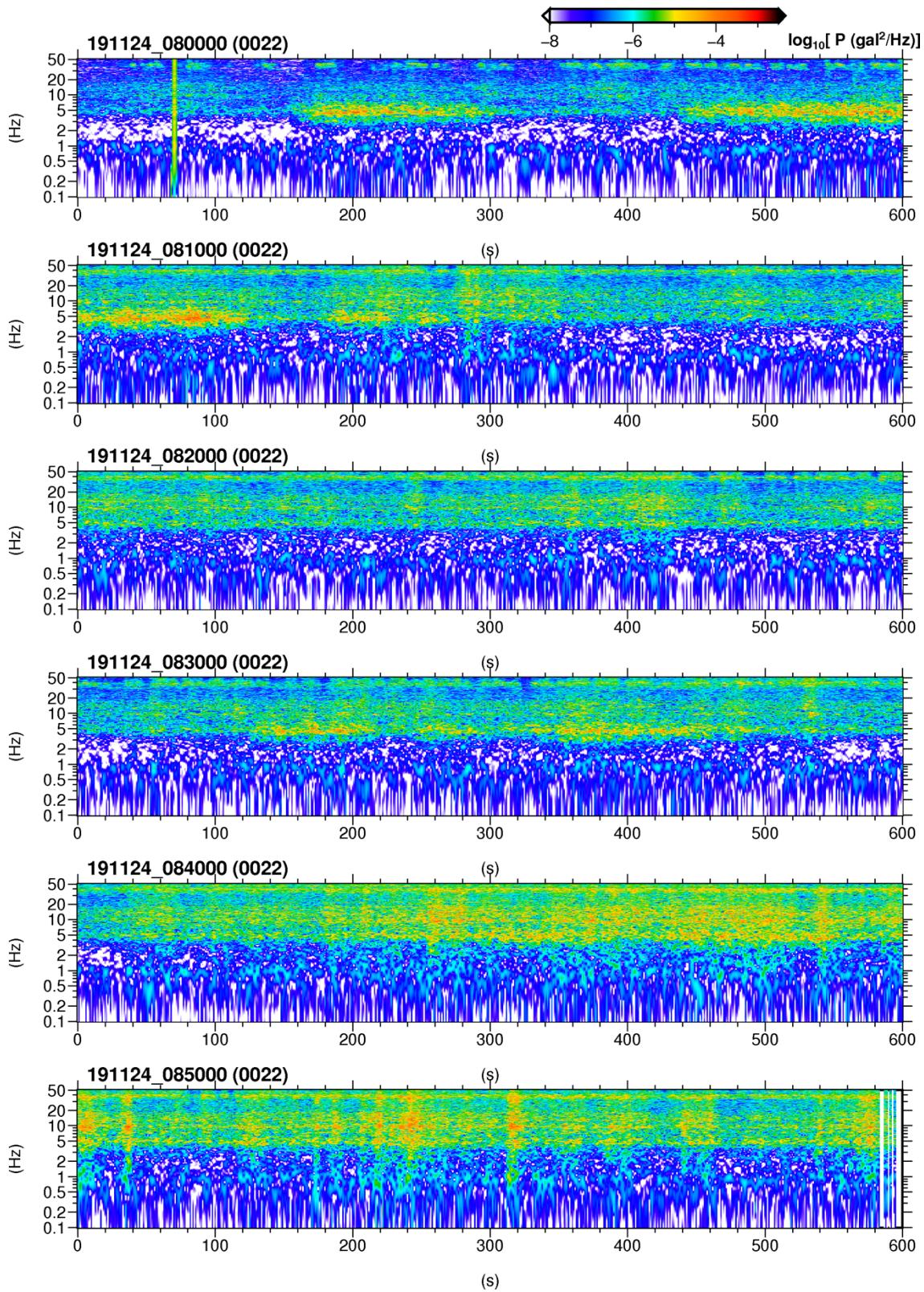


図 33. 2019 年 11 月 24 日 8:00~9:00 の微動計 JU210 のランニングスペクトル. 他は図 22 と同様.

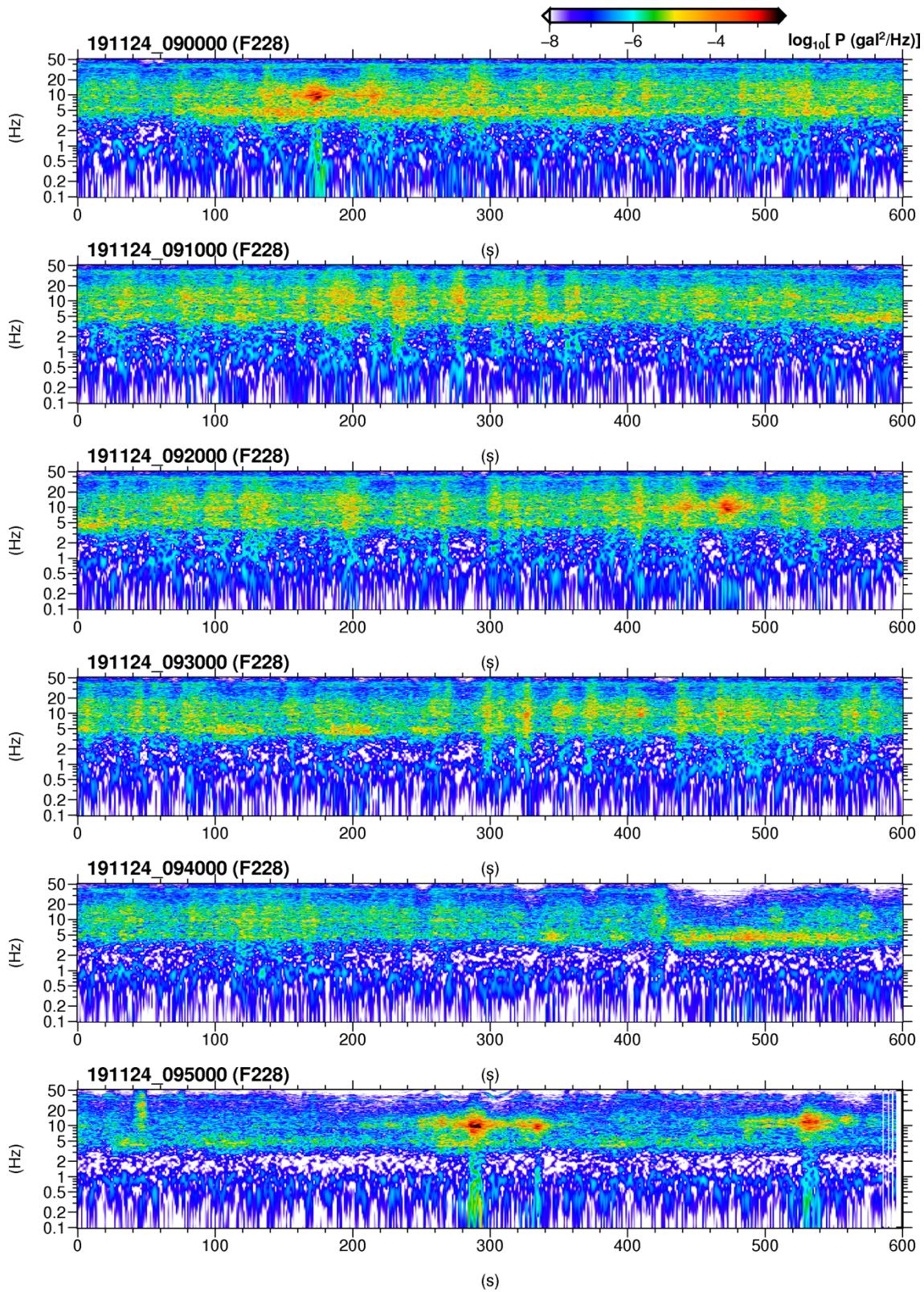


図 34. 2019 年 11 月 24 日 9:00~10:00 の光センサ 0pt. A 地震計のランニングスペクトル.
他は図 22 と同様.

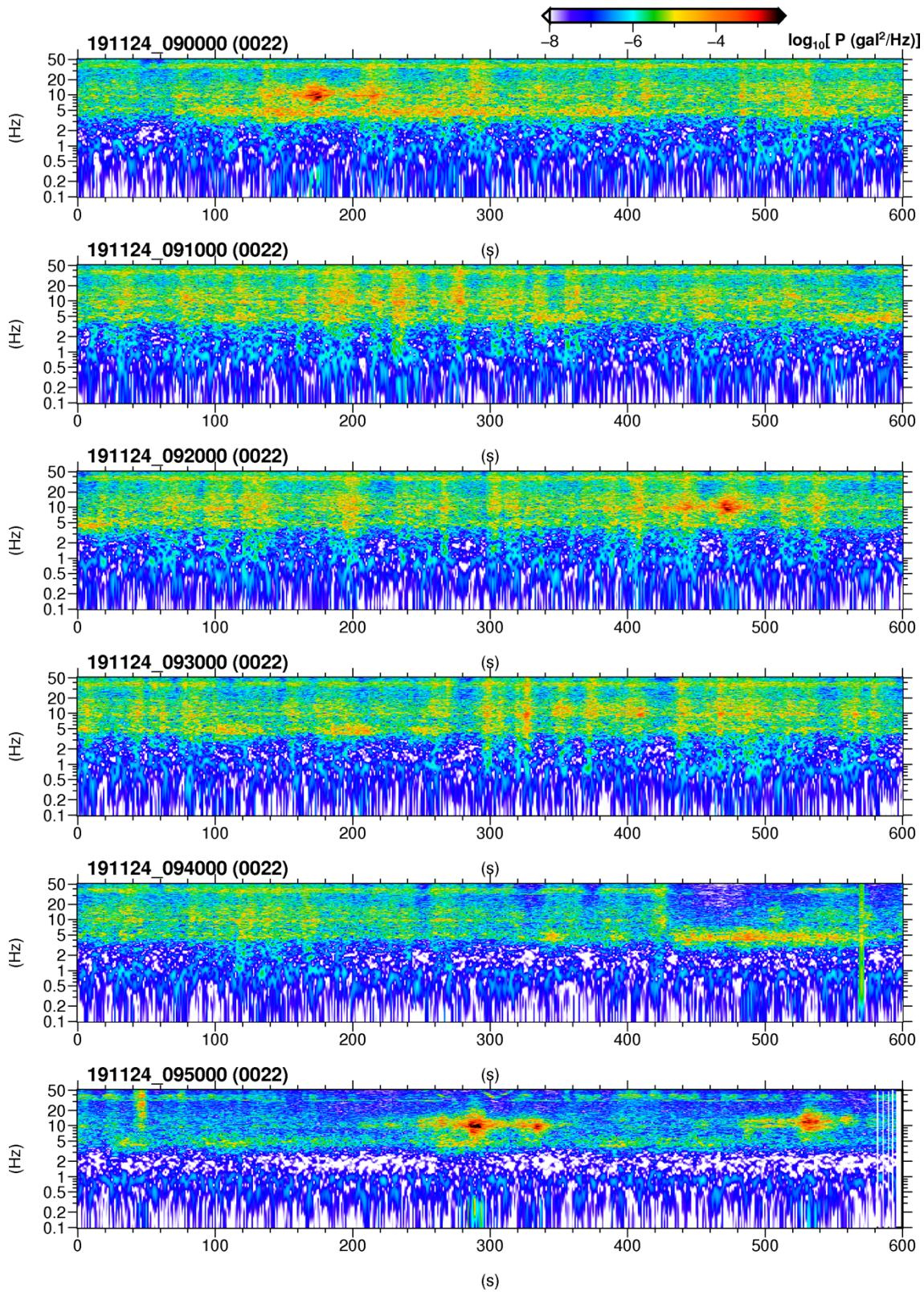


図 35. 2019 年 11 月 24 日 9:00~10:00 の微動計 JU210 のランニングスペクトル. 他は図 22 と同様.

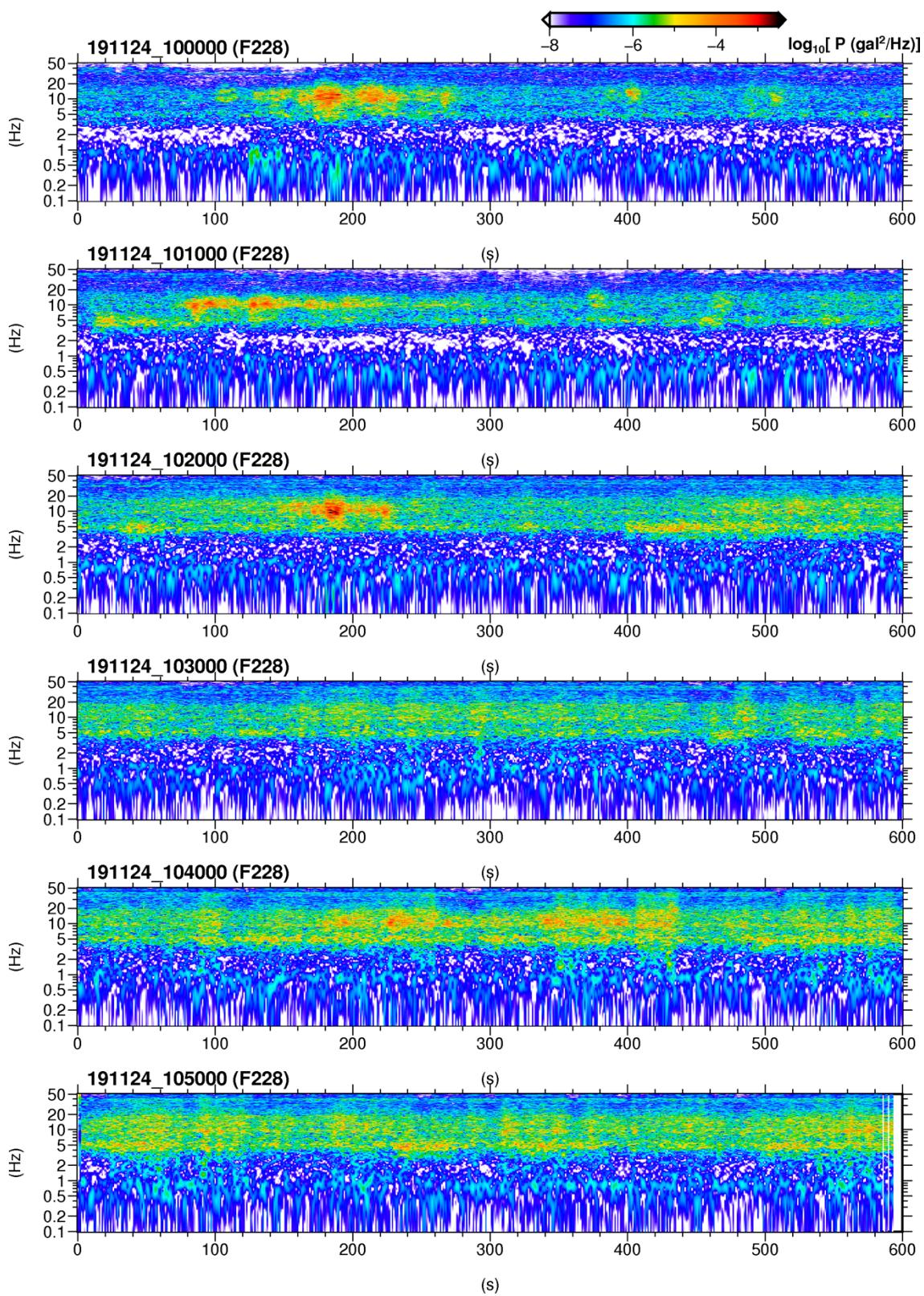


図 34. 2019 年 11 月 24 日 10:00～11:00 の光センサ Opt. A 地震計のランニングスペクトル. 他は図 22 と同様.

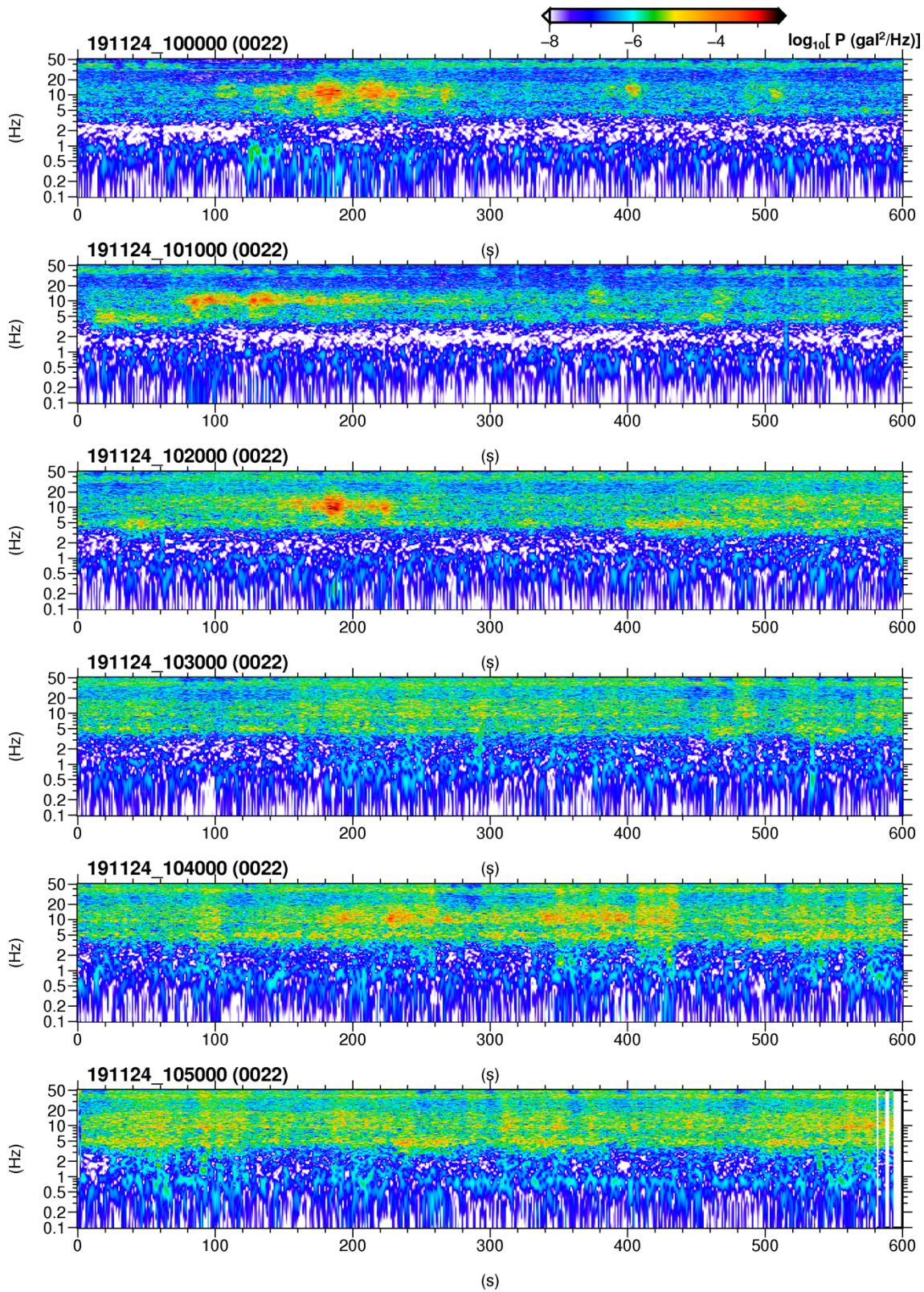


図 35. 2019 年 11 月 24 日 10:00～11:00 の微動計 JU210 のランニングスペクトル. 他は図 22 と同様.

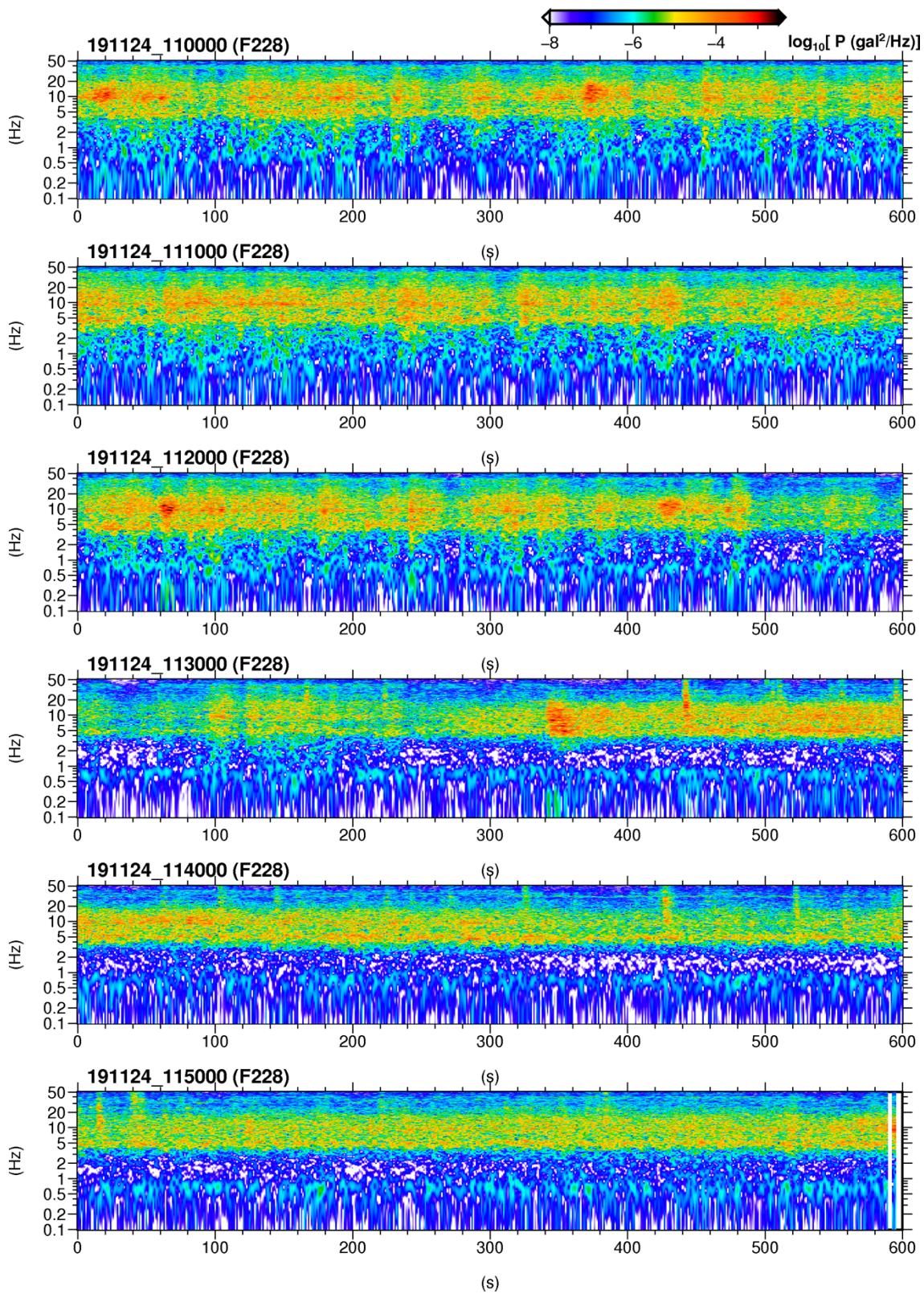


図 36. 2019 年 11 月 24 日 11:00～12:00 の光センサ Opt. A 地震計のランニングスペクトル. 他は図 22 と同様.

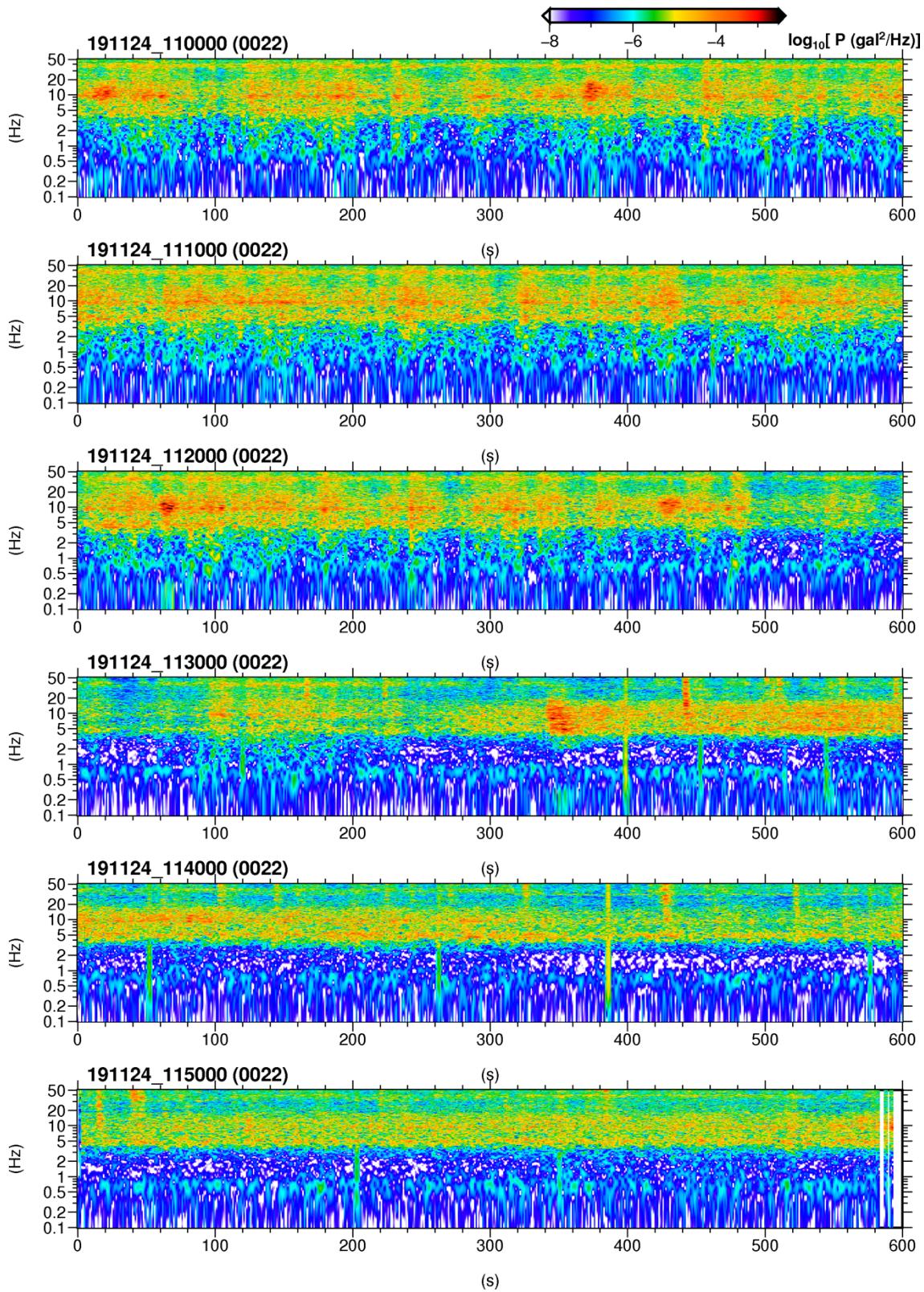


図 37. 2019 年 11 月 24 日 11:00～12:00 の微動計 JU210 のランニングスペクトル。他は図 22 と同様。

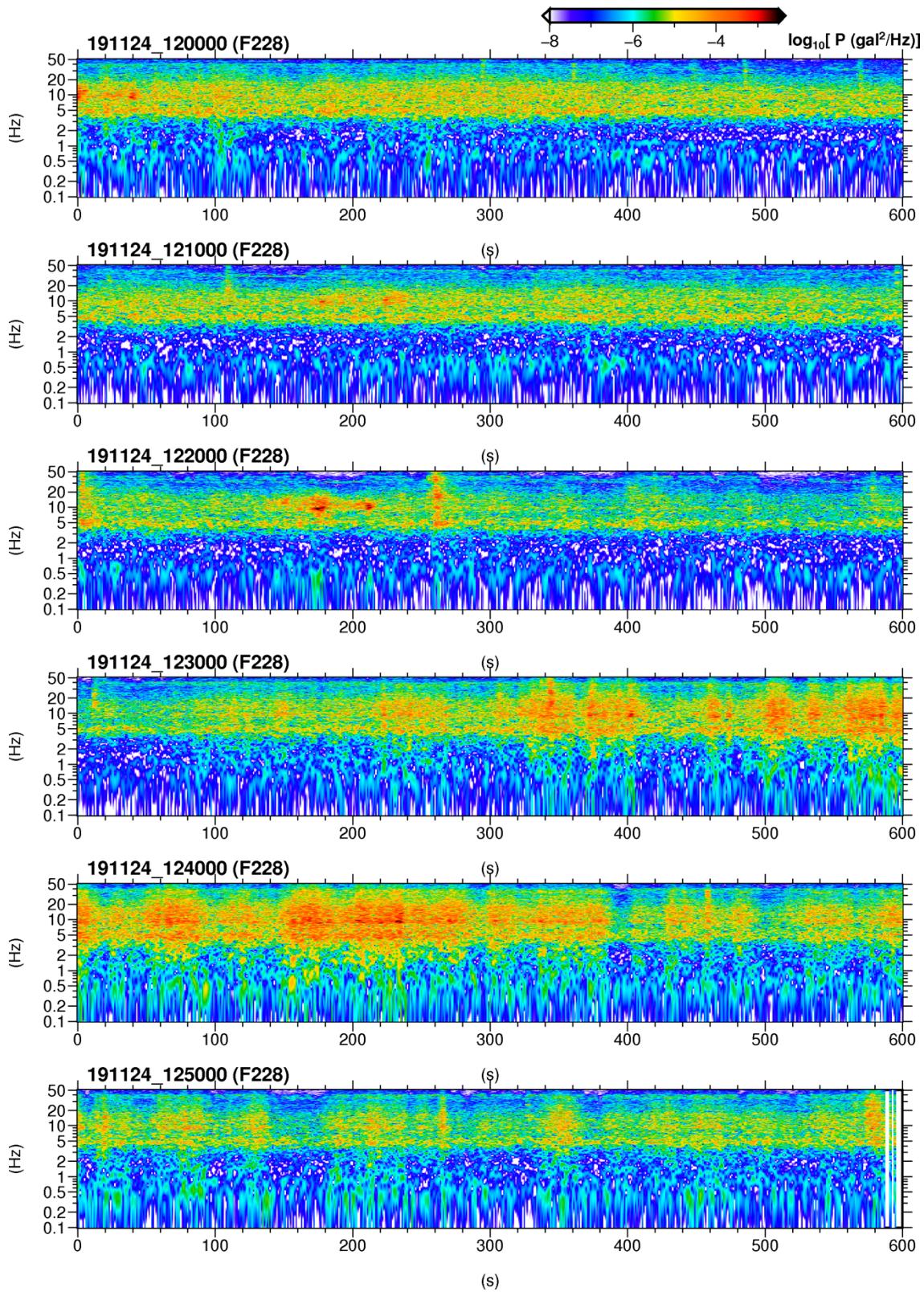


図 38. 2019 年 11 月 24 日 12:00～13:00 の光センサ Opt. A 地震計のランニングスペクトル. 他は図 22 と同様.

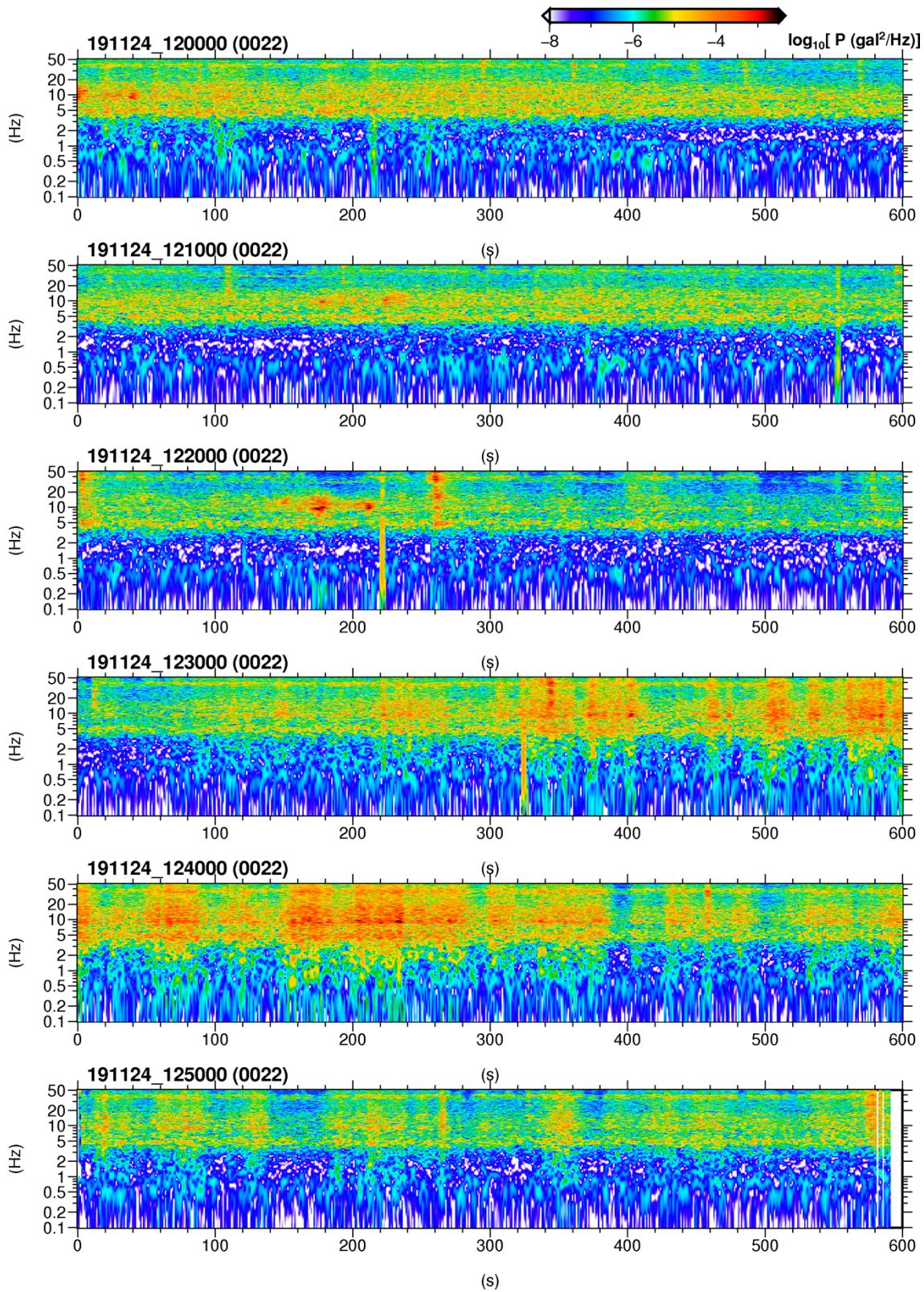


図 39. 2019 年 11 月 24 日 12:00～13:00 の微動計 JU210 のランニングスペクトル. 他は図 22 と同様.

3) 光センサシステムの試験観測候補地選定

令和 2 年度に共同実施機関が開発する耐熱性能を強化した光センサシステムによる実地試験観測を令和 3 年度に予定している。そこで、令和 2 年度に実地試験観測の候補地選定を行った。当初、アクセスが比較的容易で高温下での試験観測の実施が見込まれる火山フィールドを候補としていたが、年度当初の緊急事態宣言およびその後継続しているコロナ禍の状況において候補にしていた火山の現地調査を実施出来なかつた。その後、光センサを構成する部品において腐食性能について不明な部分があり、火山地帯といった耐熱性能と火山ガスによる影響などへの耐腐食性能の両方が求められるフィールドにて試験観測を行うのは適切ではないと判断した。そこで、耐高温性と耐腐食性を分離して検証するために、令和 3 年度の実地試験観測の目的を耐熱性能の検証に絞ることにした。そして、適切な試験観測地候補として新潟工科大学（所在地：新潟県柏崎市藤橋 1719）の観測井を選定し、現地調査を実施した。なお、深井戸の外部機関の利用については新潟工科大学が利用規程を検討しているため、現地調査では深井戸における臨時地震観測を行わなかつた。

新潟工科大学における現地調査は 2020 年 11 月 27 日に実施した。まず、新潟工科大学の事務方との打合せを行い、作成中の観測井の利用要領（案）が提示され、要領にしたがって観測井を利用する事が両者で確認された。次に、観測井の下見を行つた。図 40 に大学キャンパス内における観測井の位置と、観測井および関連設備の配置写真を示す。観測井は深さ 3000 m の深井戸で、2007 年新潟中越沖地震において地震動の增幅要因として明らかとなつ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られ、2012 年から観測が開始された。しかし、報告書作成時点では使用されていない。



図 40. 観測井および関連設備の配置写真と観測井が位置する新潟工科大学多目的広場。

観測井内部の温度分布測定が行われており、非公開資料によると坑底の温度が140°C程度である（課題B2-2共同実施機関による令和2年度報告書参照）。したがって、高温環境となっており本試験観測の目的である耐熱性能の検証に有用であると言える。

4) プロジェクト運営

課題責任機関と共同実施機関との打合せを行った（後述、3.活動報告参照）。また、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、プロジェクトの推進に貢献した。

・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

令和元年度実施の試験観測で得られたデータの課題Aに対する提供方法を検討した。

・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」との連携

新型コロナウイルス感染症への対応のため他課題担当者との意見交換や共同観測の機会が十分に得られなかつたが、①火山性地震観測性能評価および②耐雷性能評価の結果からサブテーマ4にて行われているアレイ地震観測に利用するに十分な性能を有していることが分かつた。

・火山研究人材育成コンソーシアム構築事業

令和元年度実施の観測データ解析および令和3年度実施予定の観測に用いるセンサの作成を行ったため、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つた。一方、令和3年度実施予定の観測において観測場所提供者である新潟工科大学に同コンソーシアムによる見学を行う予定である旨を伝え内諾を得た。また、課題責任者は火山研究人材育成コンソーシアム構築事業の運営委員会に出席して連携をおこなつた。

(d) 結論ならびに今後の課題

1) 結論

令和元年度に半年間実施した桜島における光センサシステムによる地震観測データから、火山性地震観測性能および耐雷性能評価を行つた。

火山性地震観測性能の評価は噴火に伴う地震を用いて行った。光センサシステムと微動計は加速度計であり、課題責任機関の既設のボアホール地震計は速度計である。光センサシステムと微動計の加速度記録を積分することで、速度記録に変換し、既設のボアホール速度計の記録と比較するとともに、パワースペクトル密度にて比較を行つた。光センサシステムと微動計が地表設置のため噴火に伴う空振が励起した地震動が上下動成分に見られるのを除けば、地震波形には光センサシステムと微動計とボアホール速度計に大きな差は見られなかつた。しかし、周波数帯毎のパワースペクトルに着目して比較することにより差が明ら

かになった。0.2～0.5Hz の低周波側ではボアホール速度計のパワーが小さいのに対し、光センサシステムおよび微動計のパワーは大きい。特に光センサシステムは微動計に比べてパワーが大きいため、光センサシステムは低周波側に感度があることが分かった。0.5～5Hz の周波数帯域は低周波地震などの火山性地震の卓越周波数の帯域であるが、上下動成分と水平動成分でパワーの大小が異なり、上下動成分の場合はボアホール速度計のパワー大きいのに対し、水平動成分では光センサシステムおよび微動計のパワーが大きいことが分かった。一方、5Hz 以上の周波数帯域では光センサシステム、微動計、ボアホール地震計でパワーに差は見られなかった。よって、光センサシステムは火山性地震の観測を行うにあたって十分な性能を有するが、既存の地震計との違いは知っておく必要がある。

耐雷性能評価は光センサシステムと微動計の加速度記録のランニングパワースペクトルを作成することで行った。そして、落雷頻発した時間帯において 30～50Hz の高周波帯域において微動計に見られたパワーが光センサシステムには見られなかった。火山性地震観測においてこのような高周波数帯域は対象としてきていないが、Gas Jet など高周波数の帯域の現象もあることから、地震観測からも Gas Jet を捉える試みに対して光センサシステムは有用である。

2) 問題点と今後の課題

光センサシステムは既存の地震観測システムとは異なり電線を使わないと原理的に落雷に強く、高温に強く、腐食性ガスに強いと言えよう。ただし、原理的に利点があるとされていても、実際のシステムにおいてこれらの性能があるかどうかは別問題である。そこで、以下の性能についての開発と検証を今後進める必要がある。

- ・耐雷性の検証
- ・耐熱性能を持つセンサの開発
- ・耐腐食性能を持つセンサの開発

このうち耐雷性の検証に必要な実地データについては、令和元年度に実施した桜島のハルタ山観測室敷地に設置したシステムにて標高の高い場所で梅雨期の始まる前に観測開始し、台風シーズンを含めた半年間の観測から得られ。そして、令和2年度にデータのスペクトル解析から耐雷性能を評価した。2番目の高温に耐えるセンサの開発については、耐熱性能の高い光ファイバーの選定に目処がつき、令和2年度にセンサの開発を行った。3番目の耐腐食性能を持つセンサの開発については来年度以降に検討を開始する。光ファイバー自体には金属部分が無いため耐腐食性能を有しているが、ケーブル被膜やセンサ筐体などの光センサシステムのパーツの耐腐食性能は不明である。そこで、例えば活発な火口周辺に光ファイバーが既に敷設されている火山にて実地調査が必要である。

(e) 謝辞

京都大学防災研究所火山活動研究センターの教職員の方々に多大なるご支援を頂いた。

(f) 引用文献

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 令和元年度成果報告書 令和2年5月 文部科学省研究開発局 国立大学法人京都大学

鹿児島地方気象台 (2020) 鹿児島地方気象台ホームページ, 県内の火山資料,

URL:https://www.jma-net.go.jp/kagoshima/vol/kazan_top.html

Matoza, R. S., Fee, D., Garces, M. A., Seiner, J. M., Ramon, P. A. and Hedlin, M. A. H. (2009) Infrasonic jet noise from volcanic eruptions, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L08303, doi:10.1029/2008GL036486.

(g) 成果の論文発表・口頭発表等

成果発表

なし

情報発信

・白山工業 Web ページ「位相シフト光干渉法による光センサ地震計測システム」

URL: https://www.hakusan.co.jp/solution/optical_sensor/

・白山工業 Web ページ「極限環境で利用可能なセンシング技術への挑戦」

URL: https://www.hakusan.co.jp/research_and_development/optical_sensor.html

(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

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。

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年度後半に実施する。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。

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

実地観測の実施期間中に、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. 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 副部長	平山 義治 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。

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 °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。

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行なう。

- 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) ポ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。

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用ボアホール筐体を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、光を分岐させるカップラー、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°C から 150°C の環境での使用時に最適になるように作成した。

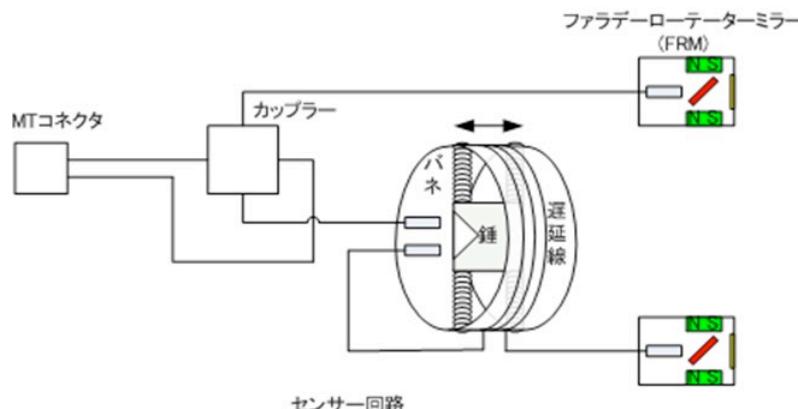


図 41 センサ回路図

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增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、現場観察おこなった。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°C 程度であるため、高温環境試験に適している。

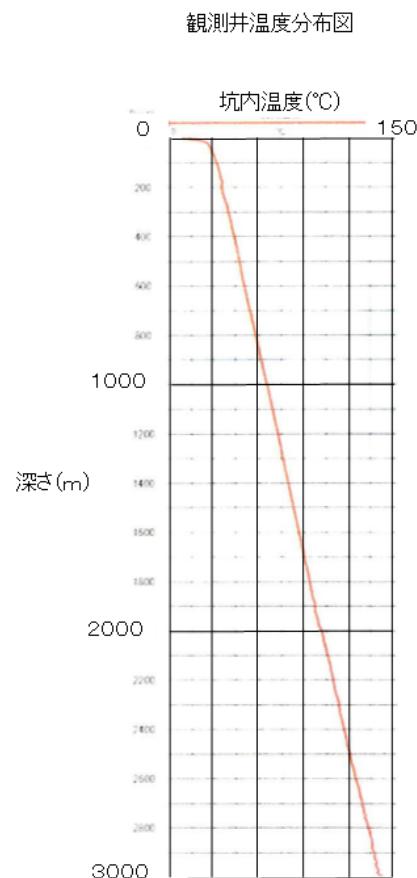


図 42 新潟工科大学 3000m 観測井の温度プロファイル

次に、井戸の形状を図 43 に示す。

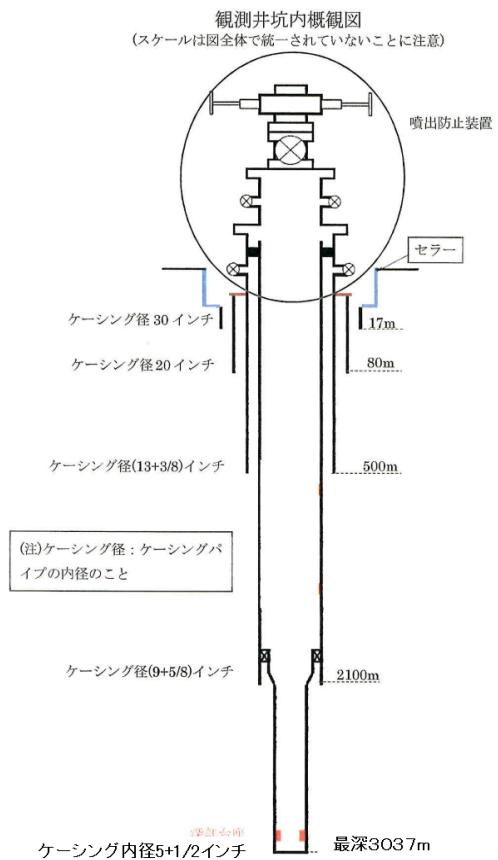


図 43 新潟工科大学 3000m級ボアホールのサイズ

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.

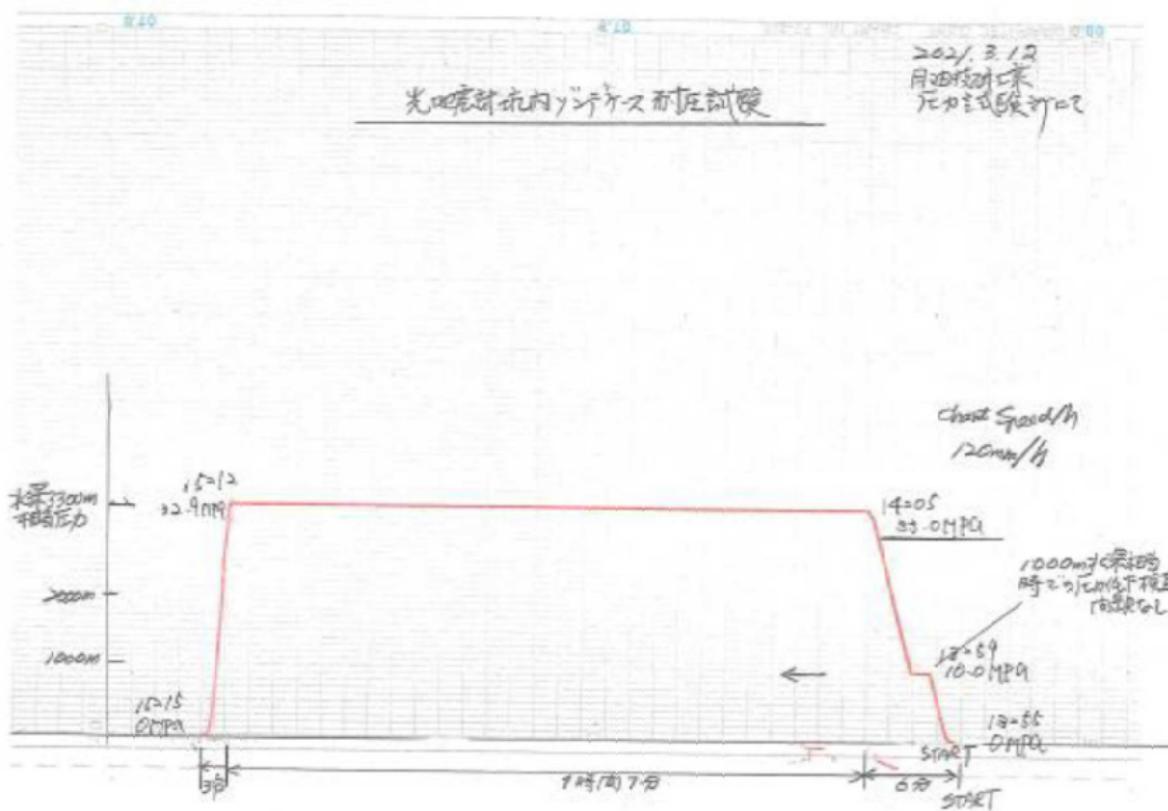


図 44 圧力試験時の水圧変化記録

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 壺体の圧力試験時、実験後圧力試験容器から取り出すところ



写真3 圧力試験壺体。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) の壺体に組み込んだ形で検証を行った。壺体内にセンサを組み込こ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°C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。

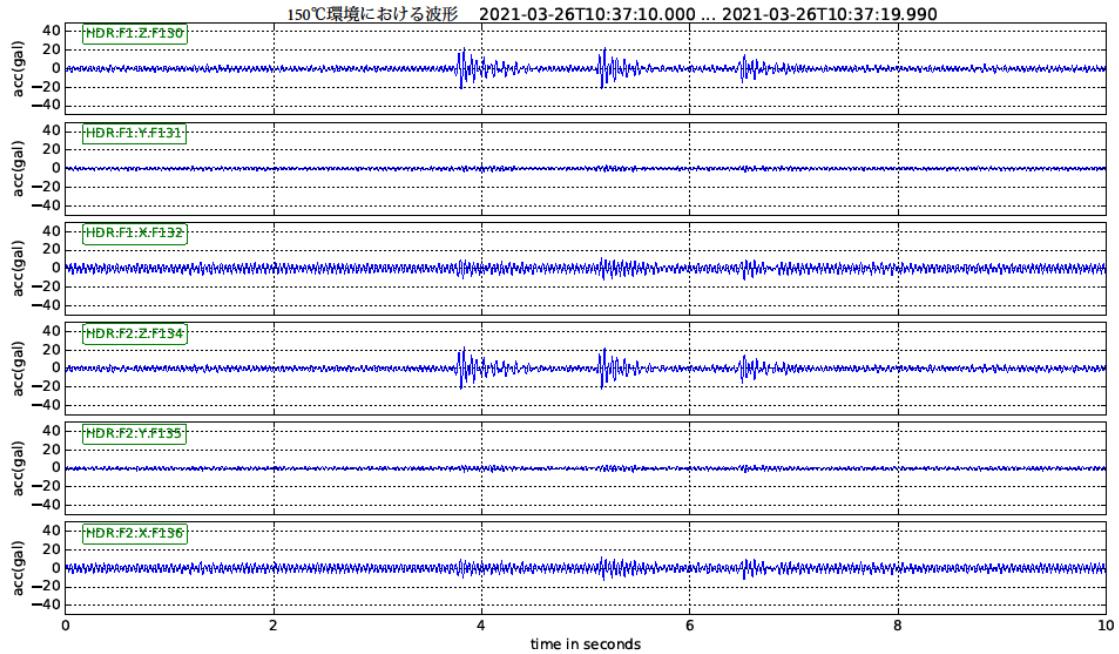


図 45 150°C環境での恒温槽の横をコンコンたたいたときの各センサの波形

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°C 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

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

2) 問題点と今後の課題

高压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。

3. 活動報告

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2年5月12日 課題B2-2 打合せ

場所：オンライン会議

時間：17時30分～18時30分

出席者：中道、平山、池田、安藤

令和2年5月21日 科学技術・学術審議会測地学分科会第1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

令和2年6月29日 科学技術・学術審議会測地学分科会第2回火山研究推進委員会

場所：オンライン会議

時間：16時～18時

出席者：中道

令和2年7月21日 科学技術・学術審議会測地学分科会第3回火山研究推進委員会

場所：オンライン会議

時間：13時30分～15時30分

出席者：中道

令和2年7月22日 課題B2-2 打合せ

場所：オンライン会議

時間：10時～12時

出席者：中道、平山、池田、安藤

令和2年11月27日 次年度実地試験観測候補地視察

場所：新潟工科大学

時間：10時～17時

出席者：中道、平山

令和2年12月2日 第7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 2 年 12 月 15 日 第 7 回総合協議会

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 3 年 1 月 19 日 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト評価会(フォローアップ)

場所：オンライン会議

時間：14 時 40 分～15 時

出席者：中道，平山

令和 3 年 3 月 2 日 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト令和 2 年度研究集会

場所：オンライン会議

時間：13 時 30 分～16 時

出席者：中道，平山

4. むすび

本邦において新型コロナウイルス感染症の影響が年度通して継続した。そのため、本課題においても影響があり、高温対応用センサの作成に必要な部品の調達が遅延した。また、次年度に実施予定の高温対応用センサの設置のための観測候補地を変更した。このような状況であったが、光センサシステムの火山性地震観測性能および耐雷性能を実観測データから確認し、高温対応用センサの作成、高温特性検証およびセンサ収納筐体の作成を行うことが出来たことで、業務内容を大きく変更することなく目的を達成することが出来た。次年度は高温対応性能の評価のための深井戸における実地試験観測を予定している。感染症の影響は継続するという前提で試験観測の準備および実施を行いたい。

樣式第 21

学 会 等 発 表 表 実 績

委託業務題目「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

1. 学会等における口頭・ポスター発表

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

(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。