

3. 研究報告

3.1 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	役職	氏名	メールアドレス
京都大学防災研究所	准教授	中道 治久	nakamiti@svo.dpri.kyoto-u.ac.jp
白山工業株式会社基盤開発部	部長	平山 義治	hirayama@hakusan.co.jp
白山工業株式会社基盤開発部	副部長	池田 敏晴	
白山工業株式会社防災ソリューション部		安藤 浩	
東京工業大学工学院	准教授	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た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ヶ年の年度計画実施

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 5 1 回を記録するとともに、自然地震 4 1 7 回を記録した。課題責任機関は主に以下の項目を実施した。

- 1) 光センサシステムで取得されたデータを火山学的に解析し、火山性地震の識別、火山性地震の振動軌跡解析、火山性地震の到来方向解析を施した。その結果、地震波の到来方向に系統的な偏りがあることが明らかになった。
- 2) 平成 29 年度光観測網内部の表層地震波速度調査を実施し、地表面から約 2 0 m までの深さの地震波速度を明らかにした。光観測網内はほぼ水平成層であるほかに、局所的に高速度体が存在していることが明らかになった。

共同実施機関は火山観測とその実施準備を行い、主に以下の項目を実施した。

- 1) 約 3 ヶ月にわたる観測運用を行い、長期運用時の安定性を検証した。
- 2) バイアス電圧ジャンプによる欠測現象を低減させる改良を施し検証を行い、欠

測時間が短縮した。

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) 第二次分増設センサの製作
- 6) 長時間多点観測に関する要素技術の開発

5)は新しい方式でのセンサを平成30年度にひきつづき追加製作する。6)は汎用シングルモードファイバ伝送による火山観測を行う。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、室内検証を主に行う。令和2年度以降、平成30年度および令和元年度で作成した送受信装置を用いた試験、観測を行うとともにセンサの追加実装を順次おこない、火山観測に適した光センサシステムを構築する。

- 4) 第三次分増設センサ製作
- 5) シングルモードファイバによるセンサシステムの安定性の改善を行う。
- 6) 増設チャンネルの本格実装を行う。

令和元年度の観測結果および、課題 B をはじめとする実際に火山観測を行っている方々のニーズを踏まえて改良を行う。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。

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。

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) 平成 31 年度（令和元年度）の成果

(a) 業務の要約

令和元年度は 3 つの主要な業務を行った。

- ① 観測データの火山学的解析
- ② 光センサシステム観測の総合評価および総括
- ③ リアルタイムデータ処理の検討
- ④ プロジェクト運営

① 観測データの火山学的解析

共同実施機関の観測により得られた観測データを、他の観測データとともに火山学的見地から解釈を行い、観測実施期間中の火山活動について総括する。

② 光センサシステム観測の総合評価および総括

共同実施期間の観測により得られた観測結果から、令和元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。

③ リアルタイムデータ処理の検討

光センサシステムを火山研究に最適なものにすることを狙い、リアルタイム処理システムサーバを導入しリアルタイム処理システムの検討を始める。

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する。

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

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ことにしており、観測データセットを作りポータブルハードディスクに格納し、随時提供可能な状態にした。

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」ーサブテーマ 4：「火山内部構造・状態把握技術の開発」との連携

本課題で行う試験観測結果を提供することと、各種委員会およびフォーラムの場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把握に務めた。

3) 火山研究人材育成コンソーシアム構築事業

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った。

(b) 業務の実施方法

令和元年度は、共同実施機関（白山工業株式会社）と連携して桜島火山の京都大学防災研究所ハルタ山観測室敷地内にて平成 30 年度に作成した 3 成分センサユニットと合わせて観測を半年間行った。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 観測データの火山学的解析
- ② 光センサシステム観測の総合評価および総括
- ③ リアルタイムデータ処理の検討
- ④ プロジェクト運営

b) 共同実施機関

- ① 3 成分光センサの作成
- ② 新しい光センサによる活火山の観測

a. 3成分光センサによるアレイ観測

b. 観測の総括

(c) 業務の成果

1) 観測データの火山学的解析

1-1) 桜島火山のハルタ山観測室における観測

平成30年度に共同実施機関(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)を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設置して観測を実施した。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2.7km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箇所に設置された。地点A, B, Cの光センサをそれぞれ, Opt.A, Opt.B, Opt.Cと呼ぶ。また、地点Aに比較のため従来型加速度計(微動計JU210)を設置した。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。

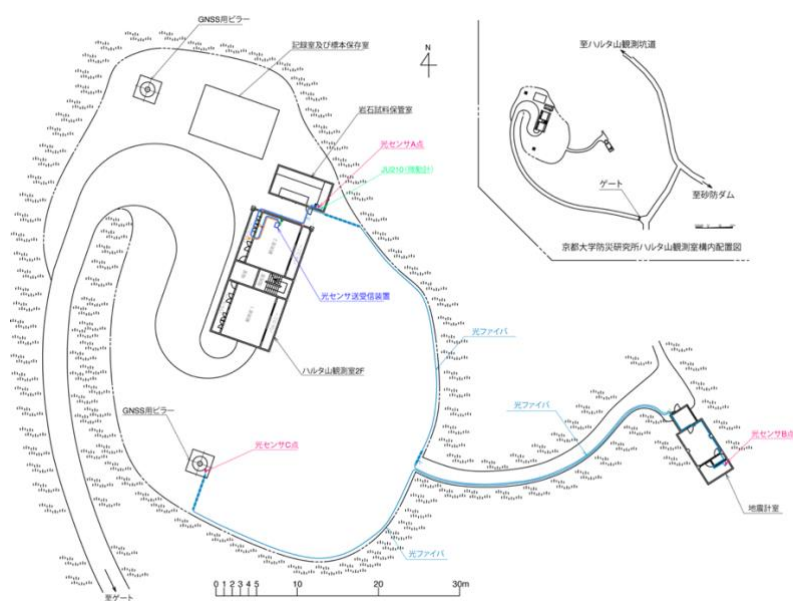


図 1. 京都大学防災研究所ハルタ山観測室敷地内にて 2019 年 6 月～12 月実施の地震観測における光センサシステムの装置の配置.

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	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

1-2) 観測期間における桜島の火山活動

光センサシステムによる観測が実施された時期の桜島の火山活動について述べる．図 2 に 1955 年～2019 年までの年間の桜島の爆発的噴火回数と年間の降下火山灰量を示す．噴火回数および火山灰量は京都大学防災研究所附属火山活動研究センターによるものを用いた．桜島の噴火は南岳もしくは昭和火口にて発生してきた．ハルタ山観測室には機械式変位型地震計と志田式微気圧計が 1995 年当時から現在も稼働しており，噴火時の地震の最大振幅が $10\ \mu\text{m}$ ，空気振動が 10Pa 以上の噴火を南岳の爆発的噴火と判定している（井口・他，2010）．一方，2008 年以降の昭和火口の噴火については，昭和火口から南に 2.4km にある有村観測坑道送信室に設置されている空振計が 10Pa を超える空気震動が観測された場合に昭和火口の爆発的噴火としている（井口・他，2010）．1955 年から 2005 年までは南岳の爆発的噴火が卓越していたが，2008 年から 2017 年は昭和火口の爆発的噴火が卓越した．そして，2018 年と 2019 年は南岳の爆発的噴火が卓越した．2019 年の年間の爆発的噴火の回数は 228 でありすべて南岳の噴火である．光センサシステムによる観測期間の 2019 年 6 月 5 日から 12 月 5 日までの半年間の爆発的噴火の回数は 149 であった．したがって，光センサシステムの観測期間中は比較的爆発的噴火が多かった時期だと言える．

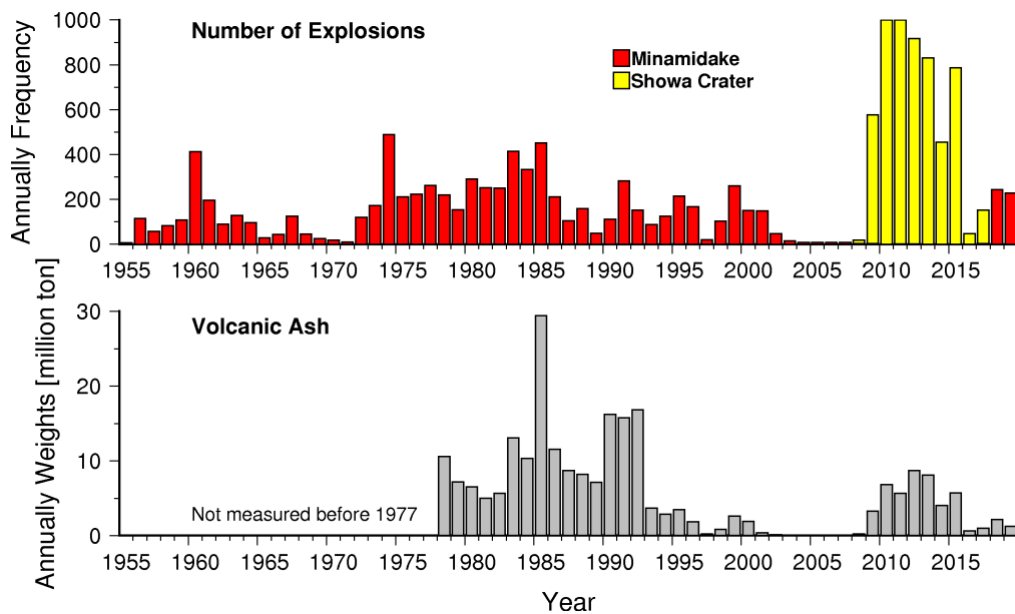


図 2. 上段：桜島火山の南岳（赤）および昭和火口（黄）における爆発的噴火の年間回数．
下段：年間降下火山灰量

鹿児島県危機管理防災局は 1978 年以降、県内の約 60 箇所（2011 年 4 月以降は 62 箇所）に観測点を設けて降下火山灰量の調査をしており、各観測点における月毎の面積あたりの積灰重量を公表している（鹿児島県，2020）．そして、各地点の月毎の面積あたりの積灰重量から、江頭・石原（1979）および Eto（1989, 2001）の方法にて推定された桜島から放出され降下した月毎の火山灰量が図 2 に示されている．2019 年の火山灰量は 122 万トンであり、光センサシステムによる観測実施期間の 2019 年 6 月から 12 月の火山灰量は 95 万トンであった．よって、光センサシステムの観測期間中は比較的火山灰量が多かった時期だと言える．

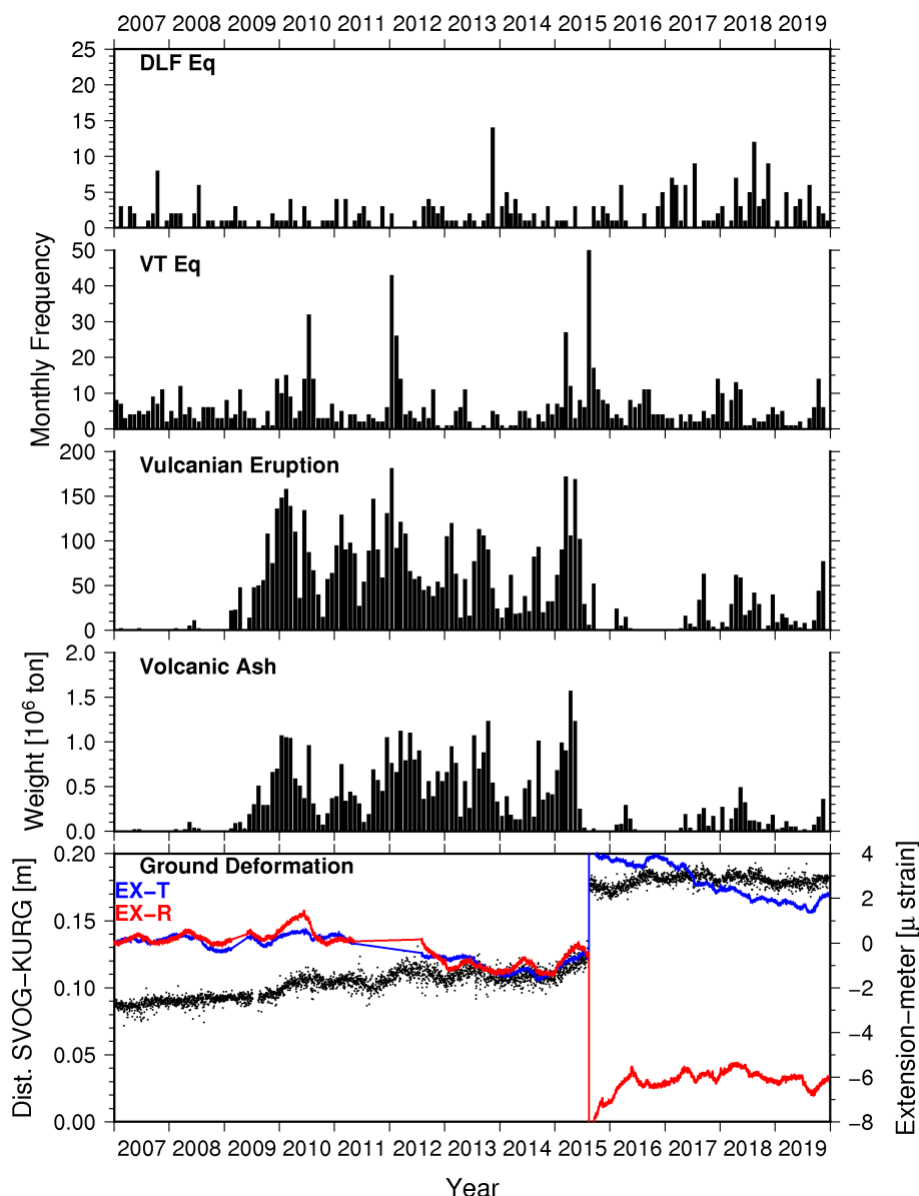


図 3. 桜島の 2007 年から 2017 年の上から順に月毎の深部低周波地震数，火山構造的な地震数，爆発的噴火数，火山灰量．最下段の図は同期間の地殻変動を示し，黒点が GNSS による桜島火山観測所（SVOG）と黒神観測室（KURG）の間の距離を示す．ハルタ山観測坑道に設置されている伸縮計の火口方向成分を赤線で示し，直交方向成分を青線で示す．

図 3 には上段から下に 2007 年から 2019 年の桜島の月毎の深部低周波地震発生数，火山構造的な地震数，爆発的噴火発生数，火山灰量を示し，最下段はこの期間の地盤変動を示す．深部低周波地震は気象庁一元化震源リストより桜島周辺の領域（経度：130.5 - 130.9°，緯度：31.4 - 31.8°）を選択して取得したものを使った．火山構造的な地震数，爆発的噴火発生数，火山灰量，地盤変動は京都大学防災研究所附属火山活動研究センターのデータベースのものをを用いた．地盤変動は桜島火山観測所と黒神観測室の間の GNSS 基線長とハルタ山観測坑道の伸縮計（火口方向成分，直交方向成分）を示す．2009 年から 2015 年前半の昭和火口の噴火頻発期と 2015 年 8 月 15 日に発生した顕著な地盤変動を伴った群発火山

構造性地震の活動，そして 2016 年の静穏期，2017 年後半以降の南岳噴火期に分けられる．光センサシステムの観測期間である 2019 年 6 月から同年 12 月の時期は深部低周波地震，火山構造性地震の頻度は平均的ではあるが，地盤変動において膨張が認められる．また，この時期は前述の通り 2019 年前半に比べ噴火頻度と火山灰量が多くなっている．図 4 は 2007 年から 2019 年の桜島における二酸化硫黄放出率測定結果を示す．昭和火口から南岳に噴火の活動が移った 2018 年から 2019 年は二酸化硫黄ガス放出率が 1 日当たり 1000 トンから 5000 トンと多く，昭和火口での噴火頻度が高かった 2012 年から 2014 年の時の放出率と遜色ない．一方，図 2 および図 3 に示した火山灰量では 2012 年から 2014 年に比べて 2018 年から 2019 年は 4 分の 1 程度とかなり少ない．よって，2018 年と 2019 年の南岳火口はガス放出が卓越している時期と言えよう．

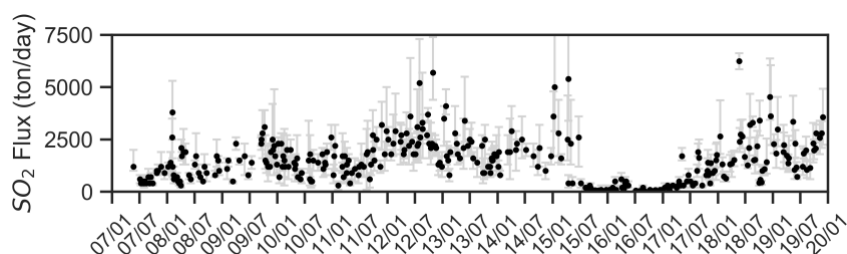


図 4. 2007 年～2019 年における二酸化硫黄放出率測定結果．1 測定における最大値と最小値を誤差バーにて，平均値を黒丸にて示す．

表 2 に光センサシステムによる地震観測実施期間の桜島の噴火リストを示す．観測実施期間において 260 回噴火が発生した．桜島の噴火リストは鹿児島地方気象台が作成してホームページに掲載している 2019 年桜島噴火観測表から抽出して作成した．桜島は噴火活動が活発で，微弱な地震および空気振動をとまなう噴煙が数時間以上連続することもある．そのため，鹿児島地方気象台は噴火の発生数を数えるために，一定の噴煙量以上の噴火についてのみ記載している．そして，爆発地震を伴い，爆発音，体感空振，噴石の火口外への飛散，または気象台や島内の空振計で一定基準以上の空振のいずれかを観測した噴火を爆発（Ex）とし，爆発を除く噴煙量が中量以上の噴火を噴火（Er）としている．

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 (m)	火口	空振 (Pa)
2019-06-11T14:31:00	Ex	2200	M	80.1
2019-06-13T09:21:00	Er	1500	M	1.5
2019-06-24T00:34:00	Ex	X	M	12.9
2019-06-24T11:27:00	Er		M	1.7
2019-06-24T12:58:00	Er	1300	M	1
2019-07-04T10:44:00	Ex	3200	M	24

2019-07-19T03:56:00	Ex		600	M		22.7
2019-07-20T02:10:00	Ex		600	M		6.9
2019-07-22T09:47:00	Ex	>1500		M		32.7
2019-07-24T13:09:00	Er		1500	M		15.6
2019-07-27T05:50:00	Er		2000	M		19.6
2019-07-27T06:58:00	Er		1100	M		0.3
2019-07-28T17:25:00	Ex		3800	M		28.2
2019-07-28T17:54:00	Er		3500	M		5.7
2019-09-03T15:49:00	Ex		1900	M		19.9
2019-09-16T07:46:00	Er		2800	M		10
2019-09-16T08:30:00	Er		1200	M	X	
2019-09-17T09:27:00	Ex		1000	M		90.1
2019-09-17T12:34:00	Er		1600	M	X	
2019-09-17T13:27:00	Er		1300	M	X	
2019-09-17T16:06:00	Er		1500	M	X	
2019-09-17T17:44:00	Ex		1400	M		81.5
2019-09-17T18:54:00	Er		1400	M		1.5
2019-09-18T00:09:00	Er		1200	M	X	
2019-09-18T02:07:00	Ex		1800	M		83.8
2019-09-18T04:35:00	Ex	>600		M		68.2
2019-09-18T06:15:00	Er		1300	M	X	
2019-09-18T07:55:00	Er		1700	M		0.3
2019-09-18T09:46:00	Ex		1800	M		36.7
2019-09-18T10:48:00	Ex		2600	M		61.8
2019-09-18T11:31:00	Ex		2300	M		14
2019-09-18T12:35:00	Er		1800	M	X	
2019-09-18T13:32:00	Er		1400	M	X	
2019-09-18T14:27:00	Er		2000	M	X	
2019-09-18T15:09:00	Er	>1600		M		3.2
2019-09-18T15:57:00	Er	>1200		M	X	
2019-09-18T19:30:00	Er		1500	M		1.3
2019-09-18T21:50:00	Er		1200	M	X	
2019-09-19T14:14:00	Er		1200	M	X	
2019-09-19T15:00:00	Er		2000	M		6.7
2019-09-19T16:03:00	Er		1300	M		4.2
2019-09-20T05:20:00	Ex		500	M		23.8
2019-09-20T16:04:00	Ex	>3400		M		39.6
2019-09-20T16:43:00	Er		1400	M	X	
2019-09-21T06:09:00	Ex		1600	M		24.6
2019-09-23T13:02:00	Er		1000	M		1.4
2019-10-03T00:55:00	Ex	X		M		53.5
2019-10-06T05:18:00	Ex		2400	M		50.4
2019-10-07T14:01:00	Ex	>600		M		18.5
2019-10-09T01:31:00	Ex		2600	M		46.4
2019-10-09T17:54:00	Er		1300	M	X	
2019-10-10T02:48:00	Ex		2700	M		39.7
2019-10-12T00:50:00	Ex		2000	M		130.7
2019-10-12T06:36:00	Ex		1400	M	X	

2019-10-12T16:43:00	Er		2200	M		14.8
2019-10-12T17:16:00	Er		1400	M		16
2019-10-13T07:40:00	Ex		2100	M		118.6
2019-10-13T09:42:00	Er		1200	M		16.9
2019-10-13T12:00:00	Er		1200	M		6
2019-10-13T13:19:00	Er		1300	M	X	
2019-10-13T17:29:00	Ex	>700		M		25.4
2019-10-13T21:00:00	Ex	>300		M		84.2
2019-10-14T09:32:00	Er		2100	M	X	
2019-10-14T09:41:00	Ex		1200	M		29.3
2019-10-14T14:29:00	Er		1600	M		1.4
2019-10-14T17:26:00	Ex		2100	M		32.6
2019-10-14T19:44:00	Ex	>600		M		21.7
2019-10-14T20:25:00	Er		1200	M	X	
2019-10-15T09:44:00	Ex		2000	M		26.8
2019-10-15T13:04:00	Ex		2300	M		41.7
2019-10-16T05:46:00	Ex		3000	M		57.4
2019-10-16T12:55:00	Ex		2600	M		22.5
2019-10-17T08:38:00	Er		1200	M		5
2019-10-17T22:18:00	Er	>1500		M		4.6
2019-10-18T01:14:00	Ex		400	M		23.3
2019-10-18T02:23:00	Er	>1200		M		4.1
2019-10-18T04:48:00	Ex		1000	M		7.1
2019-10-18T14:25:00	Ex	>1800		M		25.5
2019-10-18T20:29:00	Er	>1400		M	X	
2019-10-19T10:29:00	Ex		3000	M		55.7
2019-10-19T13:54:00	Ex		1500	M		25.4
2019-10-19T19:05:00	Ex		3000	M		44.6
2019-10-20T00:42:00	Er	>1200		M		1.5
2019-10-20T04:56:00	Er	>1500		M	X	
2019-10-20T07:10:00	Er		1300	M	X	
2019-10-20T17:59:00	Ex	>800		M		46.4
2019-10-22T02:32:00	Ex		2200	M		77
2019-10-22T10:47:00	Er		1200	M	X	
2019-10-22T21:46:00	Ex	X		M		41.7
2019-10-23T04:04:00	Ex		2800	M		58.5
2019-10-23T07:56:00	Ex		2300	M		44.5
2019-10-24T18:27:00	Ex		2500	M		53.9
2019-10-27T13:35:00	Er		1200	M		2.8
2019-10-27T15:50:00	Er		1200	M		1.9
2019-10-28T19:51:00	Ex		1000	M		24.6
2019-10-29T09:35:00	Ex		1500	M		26.4
2019-10-29T19:50:00	Ex		2300	M		38.2
2019-10-30T02:06:00	Ex		1200	M		43.4
2019-10-30T07:09:00	Ex		1000	M		46.1
2019-10-30T09:08:00	Er		1200	M		8.1
2019-10-30T14:02:00	Ex		1300	M		27.3
2019-10-30T15:27:00	Ex		2800	M		129.3

2019-10-30T20:53:00	Ex		1000	M		38.5
2019-10-30T22:03:00	Ex		1400	M		48.9
2019-10-31T02:03:00	Ex		1600	M		15.3
2019-10-31T02:46:00	Ex		700	M		6
2019-10-31T07:41:00	Er		2100	M		0.3
2019-10-31T09:31:00	Ex		2100	M		71.8
2019-11-01T02:08:00	Ex		2300	M		101.5
2019-11-01T06:55:00	Er		1500	M	X	
2019-11-01T07:28:00	Er		1400	M	X	
2019-11-01T10:31:00	Ex		1800	M		55.8
2019-11-01T20:59:00	Ex		1400	M		38
2019-11-02T03:46:00	Ex		400	M		26.3
2019-11-02T07:19:00	Ex		2000	M		100.6
2019-11-02T08:46:00	Er		1200	M	X	
2019-11-02T10:56:00	Ex		1500	M		34.1
2019-11-02T13:45:00	Er		1500	M	X	
2019-11-02T17:11:00	Ex		1800	M		25.4
2019-11-02T17:51:00	Ex	>1500		M		53.7
2019-11-02T18:28:00	Ex	>800		M		40.2
2019-11-02T20:34:00	Er		1500	M	X	
2019-11-02T21:38:00	Er		1300	M	X	
2019-11-02T21:55:00	Er		1500	M	X	
2019-11-02T22:55:00	Er		1500	M	X	
2019-11-03T01:46:00	Ex		1600	M		28.5
2019-11-03T19:39:00	Ex		2000	M		43.3
2019-11-03T20:09:00	Er		1500	M		0.8
2019-11-03T21:04:00	Er		1400	M		0.8
2019-11-04T00:43:00	Er		1600	M	X	
2019-11-04T02:08:00	Er		1700	M	X	
2019-11-04T02:52:00	Ex		2000	M	X	
2019-11-04T03:29:00	Er		2100	M		2.4
2019-11-04T03:56:00	Er		1500	M		3.7
2019-11-04T05:49:00	Er		1300	M		0.5
2019-11-04T07:16:00	Er		1300	M	X	
2019-11-04T08:00:00	Ex		2000	M		34.6
2019-11-04T16:50:00	Ex		2200	M		18.2
2019-11-04T17:29:00	Ex		2200	M		69.9
2019-11-04T17:58:00	Ex		2400	M		40.2
2019-11-05T06:10:00	Er		1300	M		5.2
2019-11-05T11:34:00	Er		1800	M		17.7
2019-11-05T12:41:00	Er		1900	M		14.7
2019-11-05T13:44:00	Ex		2500	M		47.7
2019-11-05T14:32:00	Ex		2800	M		24.6
2019-11-05T15:17:00	Er		1600	M		4.3
2019-11-05T15:48:00	Er		2100	M		1.4
2019-11-05T16:35:00	Er		1600	M		0.5
2019-11-05T18:52:00	Er		1900	M		1.4
2019-11-05T20:24:00	Ex	>100		M		4.9

2019-11-06T00:11:00	Er		1800	M		4.7
2019-11-06T01:41:00	Ex		2000	M		10.2
2019-11-06T02:28:00	Ex		2200	M		27.3
2019-11-06T07:02:00	Er		1400	M	X	
2019-11-06T07:48:00	Er		1700	M		0.9
2019-11-06T08:20:00	Er		1200	M		0.4
2019-11-06T10:57:00	Ex		2000	M	X	
2019-11-06T15:09:00	Er		1500	M		1
2019-11-06T15:38:00	Ex		3000	M		80
2019-11-06T16:24:00	Er		1200	M	X	
2019-11-06T21:39:00	Er		2500	M		3.6
2019-11-06T23:00:00	Ex		2400	M		43.5
2019-11-07T01:19:00	Ex		2000	M		10
2019-11-07T02:36:00	Ex		2600	M		39.9
2019-11-07T10:01:00	Er		2300	M		6.9
2019-11-07T11:50:00	Er		1500	M	X	
2019-11-07T15:57:00	Ex	>3800		M		45.8
2019-11-07T16:15:00	Ex		3500	M		16.3
2019-11-07T18:14:00	Er		2200	M		3.8
2019-11-07T18:48:00	Er		1900	M		2.1
2019-11-07T19:14:00	Er		2000	M		2.1
2019-11-08T07:40:00	Er		1300	M	X	
2019-11-08T16:12:00	Er		1300	M	X	
2019-11-08T17:24:00	Ex		5500	M		36.6
2019-11-09T13:15:00	Er		1200	M		1.6
2019-11-09T15:32:00	Er		1500	M		3.2
2019-11-09T17:24:00	Er		1300	M		1.6
2019-11-12T15:13:00	Er		1100	M	X	
2019-11-12T16:00:00	Er		1100	M	X	
2019-11-12T20:20:00	Ex		3300	M	X	
2019-11-12T21:10:00	Ex		1500	M	X	
2019-11-12T21:59:00	Er		1100	M	X	
2019-11-12T23:07:00	Ex		3000	M	X	
2019-11-13T00:03:00	Er		1200	M	X	
2019-11-13T00:35:00	Ex		1200	M	X	
2019-11-13T02:00:00	Ex		3600	M	X	
2019-11-13T07:52:00	Ex		700	M	X	
2019-11-13T09:01:00	Ex		400	M	X	
2019-11-13T14:11:00	Ex		600	M	X	
2019-11-13T15:41:00	Ex		900	M		62.2
2019-11-13T19:22:00	Ex		500	M		8
2019-11-14T04:28:00	Ex		400	M		60
2019-11-14T06:42:00	Ex		1500	M		52.4
2019-11-14T20:44:00	Ex		1500	M		44.8
2019-11-15T00:21:00	Er		1100	M		0.9
2019-11-15T01:08:00	Er		1200	M		1
2019-11-15T03:32:00	Er		1200	M		0.8
2019-11-15T04:48:00	Er		1200	M		0.3

2019-11-15T06:15:00	Er		1400	M	X	
2019-11-15T08:13:00	Er		1200	M		0.5
2019-11-15T09:23:00	Er		1100	M	X	
2019-11-15T10:05:00	Ex		1200	M		31.1
2019-11-15T12:46:00	Ex		1500	M		7.6
2019-11-15T14:28:00	Ex		1500	M		14.1
2019-11-15T15:30:00	Er		1000	M		3.6
2019-11-15T17:09:00	Er		1300	M		6.3
2019-11-15T17:36:00	Er		1900	M		0.5
2019-11-15T21:49:00	Ex		1200	M		20.4
2019-11-16T00:05:00	Er		1400	M		0.3
2019-11-16T00:48:00	Er		1300	M		0.2
2019-11-16T01:49:00	Er		1200	M	X	
2019-11-16T03:18:00	Er		1200	M		0.2
2019-11-16T05:35:00	Er		1400	M	X	
2019-11-16T08:45:00	Er		1300	M	X	
2019-11-16T19:03:00	Er		1200	M		0.3
2019-11-17T04:16:00	Ex		1500	M		53.8
2019-11-17T05:29:00	Ex		1500	M		29
2019-11-17T06:30:00	Ex		1500	M		37.5
2019-11-17T06:58:00	Er		1400	M		0.3
2019-11-17T10:13:00	Ex		2500	M		48.4
2019-11-17T13:51:00	Ex		2200	M		68.8
2019-11-17T19:13:00	Ex		800	M		12.2
2019-11-17T19:52:00	Ex		1000	M		14.1
2019-11-18T17:33:00	Ex		1500	M		144.1
2019-11-18T23:31:00	Ex	>1300		M		21.4
2019-11-19T05:27:00	Ex		1900	M		121.1
2019-11-20T18:26:00	Ex		1800	M	X	
2019-11-20T19:00:00	Er		1200	M	X	
2019-11-21T00:23:00	Ex		1300	M	X	
2019-11-21T15:00:00	Er		1000	M	X	
2019-11-21T17:45:00	Ex		2700	M	X	
2019-11-21T18:58:00	Ex		1200	M	X	
2019-11-22T02:40:00	Ex		2600	M	X	
2019-11-23T00:43:00	Ex		1800	M	X	
2019-11-23T05:41:00	Ex		1300	M	X	
2019-11-23T08:33:00	Ex		1200	M	X	
2019-11-23T08:55:00	Ex		1700	M	X	
2019-11-23T16:09:00	Er		1100	M	X	
2019-11-23T22:17:00	Ex		1900	M	X	
2019-11-24T14:48:00	Ex		1400	M	X	
2019-11-25T08:47:00	Ex		1500	M	X	
2019-11-25T10:15:00	Ex		2300	M	X	
2019-11-25T14:33:00	Er		1400	M	X	
2019-11-25T19:50:00	Ex		2500	M	X	
2019-11-26T14:24:00	Ex		2600	M	X	
2019-11-28T03:46:00	Ex	>200		M	X	

2019-11-28T11:04:00	Ex		2400	M	X
2019-11-28T20:10:00	Ex		3300	M	X
2019-11-28T21:30:00	Ex		2600	M	X
2019-11-29T15:21:00	Ex		1500	M	X
2019-11-30T11:59:00	Ex		2300	M	X
2019-12-01T01:55:00	Ex		1800	M	X
2019-12-01T03:01:00	Ex		1500	M	X
2019-12-01T10:43:00	Ex		2700	M	X
2019-12-01T15:42:00	Ex		2000	M	X
2019-12-01T16:43:00	Er		1100	M	X
2019-12-02T04:40:00	Ex	>1400		M	X
2019-12-02T06:22:00	Ex		1500	M	X
2019-12-02T10:05:00	Er	>1600		M	X
2019-12-03T12:48:00	Ex		1600	M	X
2019-12-03T15:19:00	Ex		2300	M	X
2019-12-03T17:59:00	Ex		2300	M	X
2019-12-04T09:57:00	Ex		2300	M	X
2019-12-04T11:25:00	Er		1000	M	X
2019-12-04T14:19:00	Ex		2000	M	X
2019-12-04T15:33:00	Ex		1800	M	X
2019-12-05T17:56:00	Ex		2200	M	X

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。桜島南岳山頂火口は「M」、昭和火口は「S」で表記。空振は有村観測坑道における値である。

1-3) 光センサシステムによる観測記録と噴火との比較

光センサシステムによる地震観測実施期間における地震動振幅の変化を概観する。まず、期間全体において光センサ Opt. A, Opt. B, Opt. C および微動計 JU210 の 200Hz サンプルングの連続波形データに対して通過帯域 0.5Hz~20Hz のバンドパスフィルタを施し、サンプルリング周波数 5Hz にリサンプルリングした。そして、ヒルベルト変換して信号包絡線（エンベロープ）波形を作成した。さらに、エンベロープ波形をサンプルリング周波数 1Hz にリサンプルリングした。観測期間全体におけるエンベロープ波形を図 5 に示す。噴火が多い 10 月と 11 月が他の時期にくらべて特段に振幅が大きい傾向は見取れない。光センサ Opt. A, B, C を比較すると場所によって若干の振幅の大小は見受けられるが、全体的に振幅の傾向は一致している。光センサ Opt. A と微動計 JU210 を比較すると、Opt. A で振幅が 5 ミリ gal 未満の場合は JU210 とほぼ一致している。JU210 で振幅が 5 ミリ gal から 15 ミリ gal の場合は、Opt. A は JU210 の振幅より小さい。この原因を調べるには震動が大きいときの地震計レスポンスを調べる必要があり、後述の人工震源（かけや）を用いた実験にて検証する。

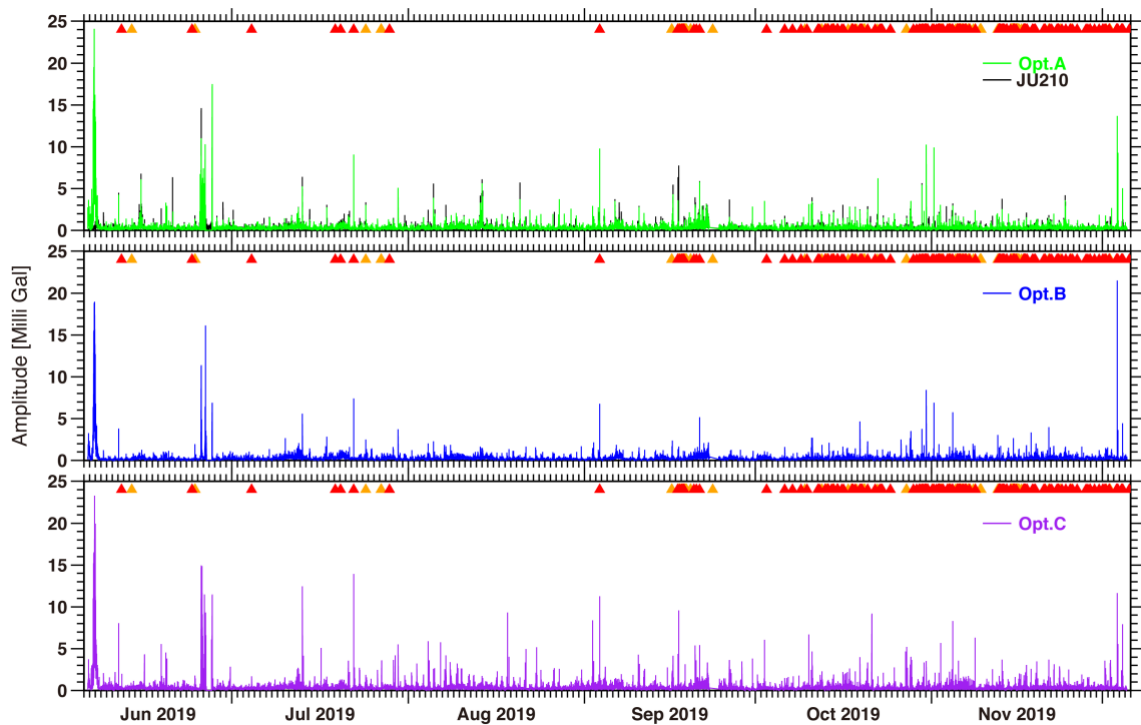


図 5. 観測期間の光センサシステムの上下動成分のエンベロープ波形. 三角は桜島の噴火時刻で赤三角が爆発 (Ex) で橙三角が噴火 (Er) を示す. (a) 光センサ Opt. A (緑線) と微動計 JU210 (黒線). (b) 光センサ Opt. B (青線). (c) 光センサ Opt. C (紫線).

次に、光センサシステムのエンベロープ波形を 1 トレース 1 日として 6 月から 12 月まで月毎にそれぞれ図 6, 図 7, 図 8, 図 9, 図 10, 図 11, 図 12 に示す. 観測期間内において、光センサシステムの不具合と調整が行われている. 6 月 5 日 16 時に観測開始したが、ノイズが徐々に大きくなる波形異常が確認されており、波形異常は 1Hz パルスノイズの重畳によるものである (詳細は、白山工業による報告書参照のこと). 6 月 7 日 10:21-10:25 に光センサシステムの調整が行われ、以降パルスノイズが無くなった. しかし、6 月 8 日から 6 月 26 日は光センサシステムの光受信レベルの不具合があった. 6 月 27 日 12 時から 16 時に光アンプの交換が行われ、16 時から正常な状態になった. その後、3 ヶ月間は正常な状態で観測は継続されていたが、9 月 22 日の 19:22 から 20:22 の間に台風 17 号により停電が 8 回 (それぞれ 30 秒から 8 分間の停電) あった. その後、9 月 24 日 13:55 まで停止しており、再起動にて復旧した (詳細は、白山工業による報告書参照のこと).

システムの不具合のあった時間帯を除けば、光センサシステムはほとんどの噴火の時間帯において稼働しており、噴火に対応して振幅が大きくなっている. 一方、6 月から 12 月に共通して 1 日トレースを見ると 8 時頃から 17 時頃は振幅レベルが大きい. これは日中の時間帯であることから、桜島島内における人工ノイズによるものと推察される.

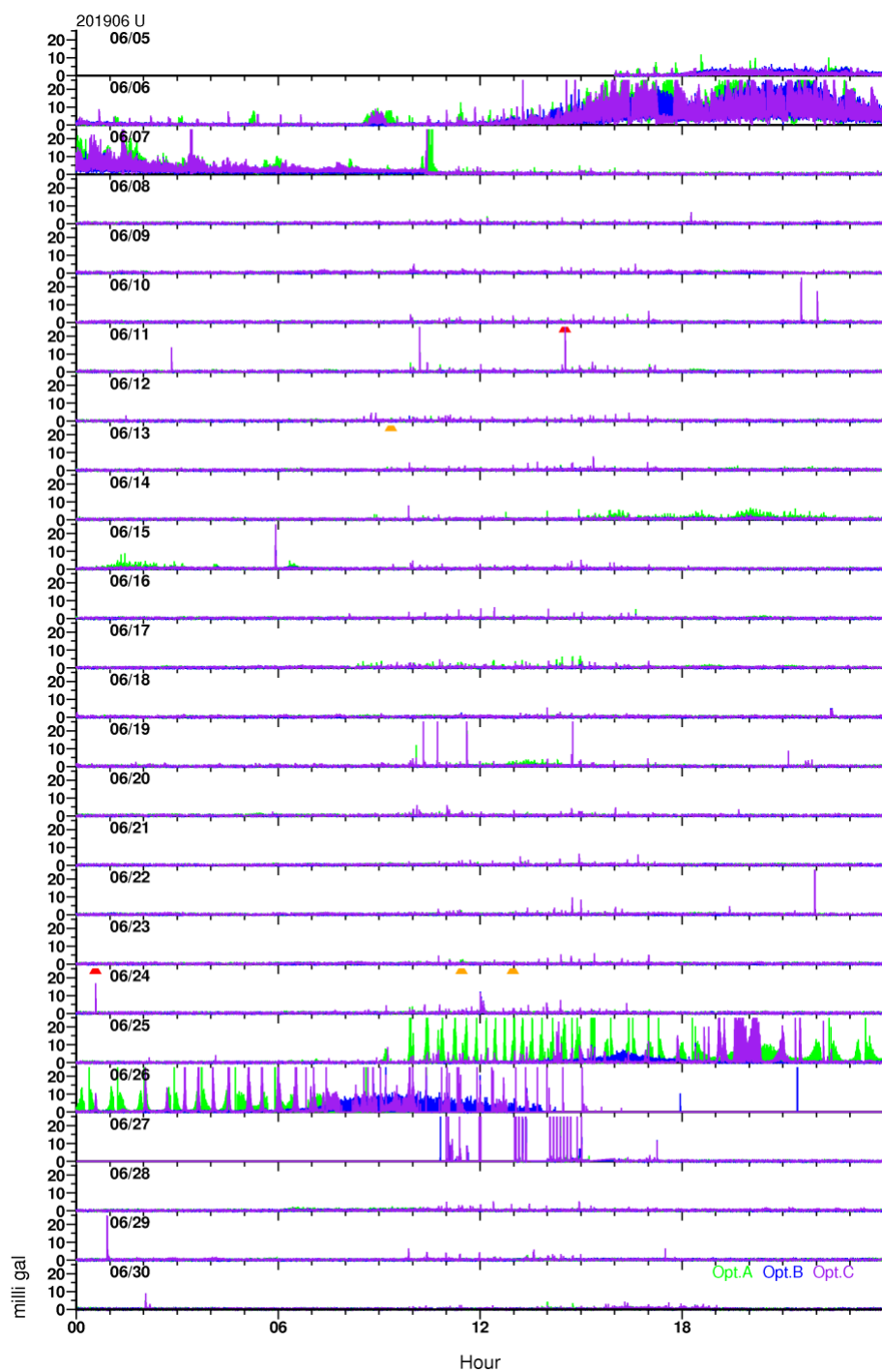


図 6. 6 月の 1 日毎の上下動成分のエンベロープ波形．三角は桜島の噴火時刻で赤三角が爆発（Ex）で橙三角が噴火（Er）を示す．光センサ Opt. A, Opt. B, Opt. C それぞれエンベロープ波形は緑，青，紫にて示す．

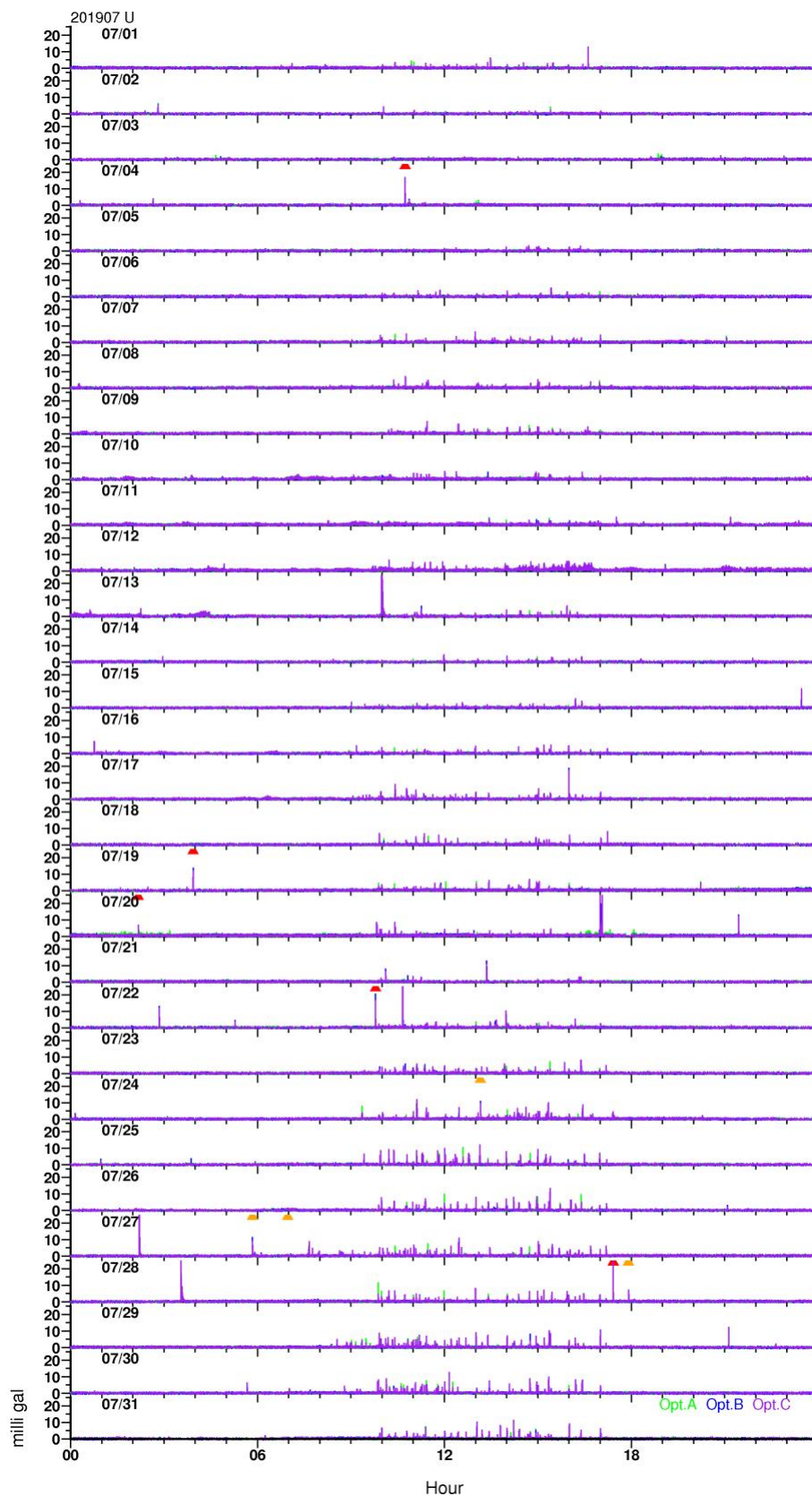


図 7. 7 月の 1 日毎の上下動成分のエンベロープ波形. 三角は桜島の噴火時刻で赤三角が爆発 (Ex) で橙三角が噴火 (Er) を示す. 光センサ Opt. A, Opt. B, Opt. C それぞれエンベロープ波形は緑, 青, 紫にて示す.

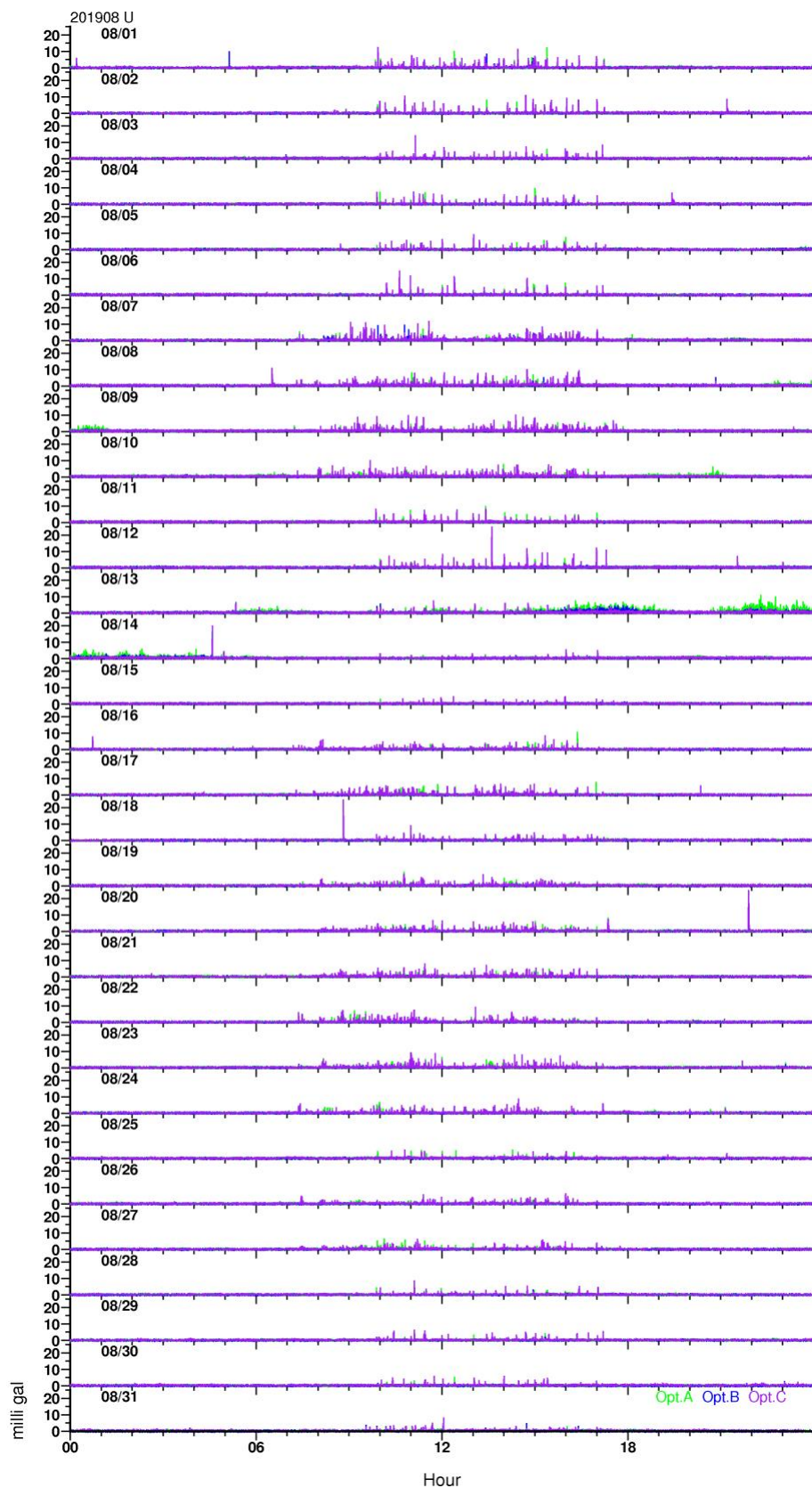


図 8. 8 月の 1 日毎の上下動成分のエンベロープ波形. 三角は桜島の噴火時刻で赤三角が爆発 (Ex) で橙三角が噴火 (Er) を示す. 光センサ Opt. A, Opt. B, Opt. C それぞれエンベロープ波形は緑, 青, 紫にて示す.

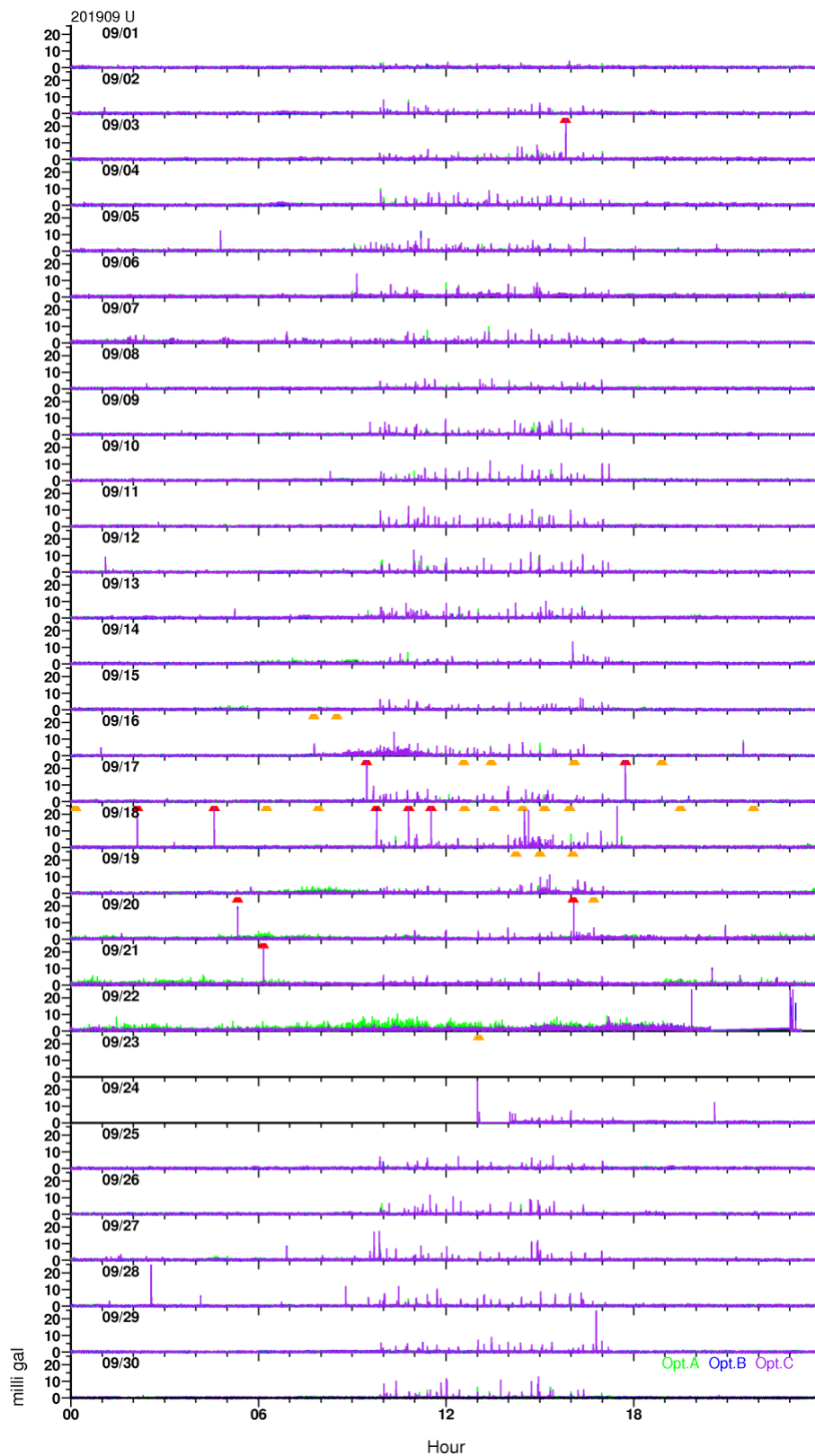


図 9. 9 月の 1 日毎の上下動成分のエンベロープ波形. 三角は桜島の噴火時刻で赤三角が爆発 (Ex) で橙三角が噴火 (Er) を示す. 光センサ Opt. A, Opt. B, Opt. C それぞれエンベ

ロープ波形は緑，青，紫にて示す．

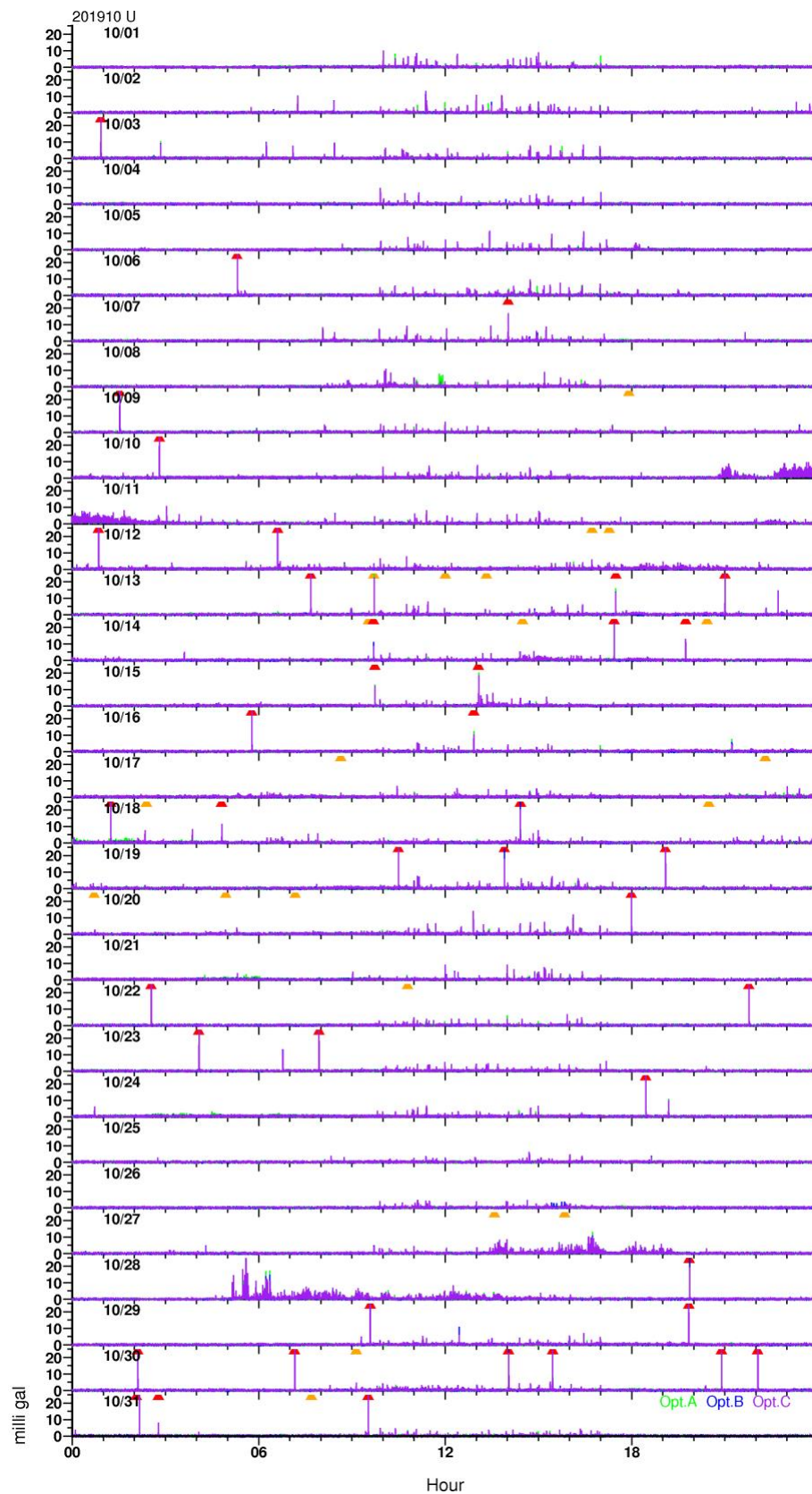


図 10. 10 月の 1 日毎の上下動成分のエンベロープ波形．三角は桜島の噴火時刻で赤三角が爆発 (Ex) で橙三角が噴火 (Er) を示す．光センサ Opt.A, Opt.B, Opt.C それぞれエン

ベロープ波形は緑，青，紫にて示す．

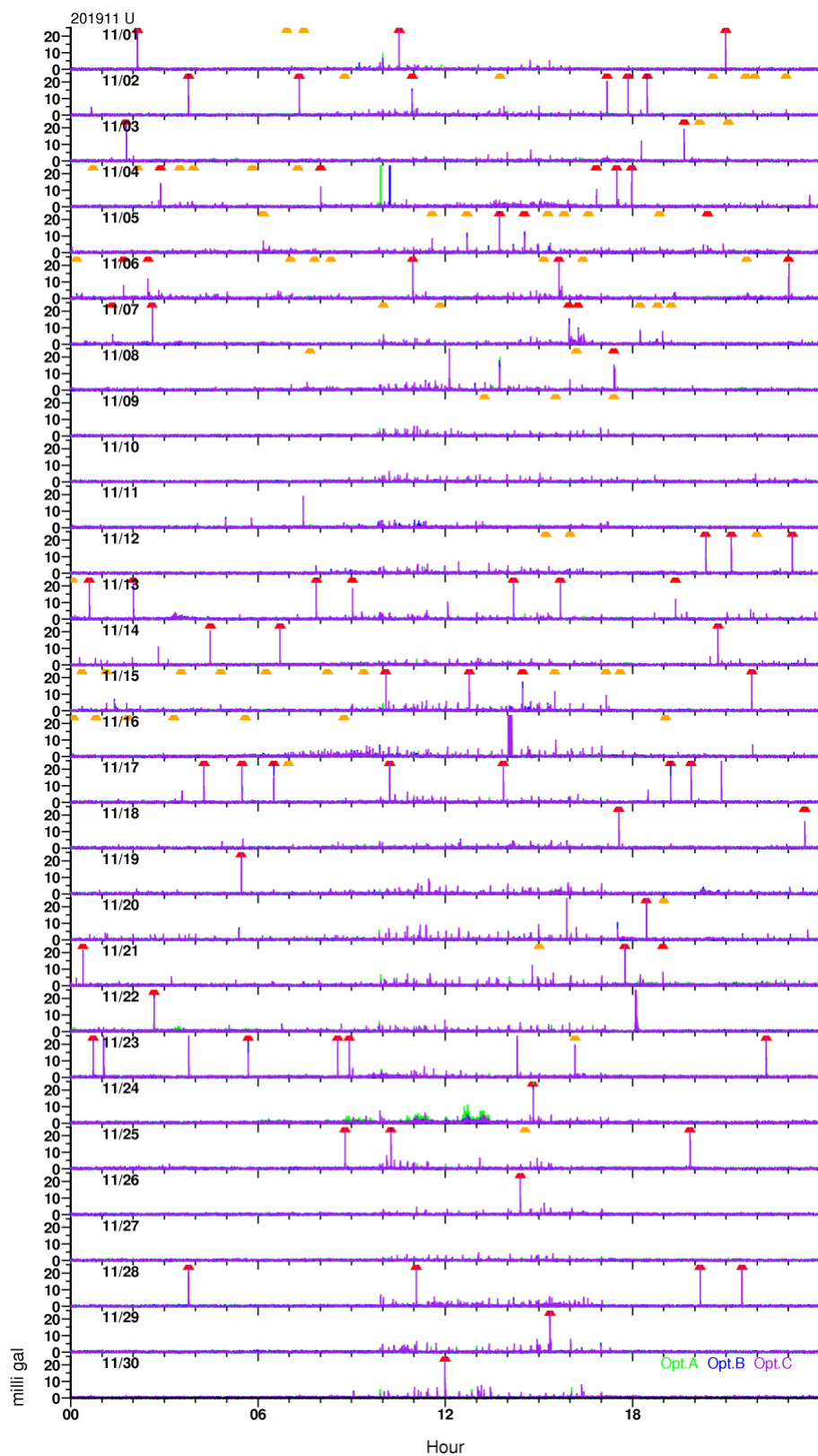


図 11. 11 月の 1 日毎の上下動成分のエンベロープ波形．三角は桜島の噴火時刻で赤三角

が爆発（Ex）で橙三角が噴火（Er）を示す．光センサ Opt. A, Opt. B, Opt. C それぞれエンベロープ波形は緑，青，紫にて示す．

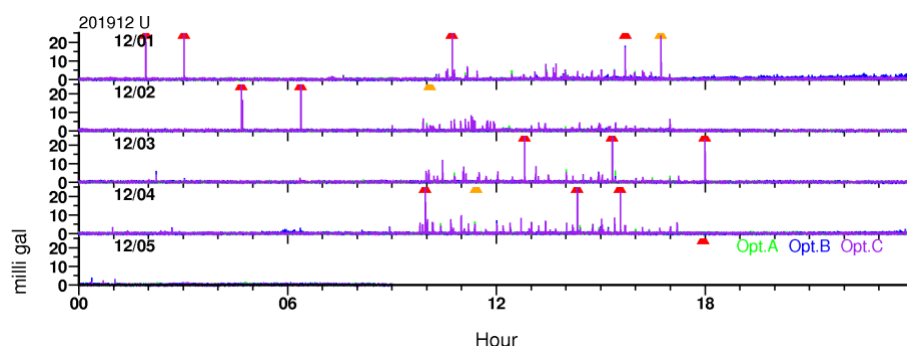


図 12. 12 月の 1 日毎の上下動成分のエンベロープ波形．三角は桜島の噴火時刻で赤三角が爆発（Ex）で橙三角が噴火（Er）を示す．光センサ Opt. A, Opt. B, Opt. C それぞれエンベロープ波形は緑，青，紫にて示す．

光センサシステムによる地震観測にて収録されている個々の噴火時の波形を本報告書にてすべて示すのは現実的ではない．そこで，噴煙高度が 5500m と観測期間中で最高であった 2019 年 11 月 8 日 17:24 の爆発の際の地震波形を図 13 に示す．Opt. A, Opt. B, Opt. C の 3 成分とも噴火に伴う地震波形が十分な SN にて観測されたことが確認できる．また，微動計 JU210 の記録と比較して光センサシステムの方が SN 比が高いことが分かる．この理由として，既存地震計である微動計ではハムといった電氣的なノイズを拾いやすいことが考えられる．

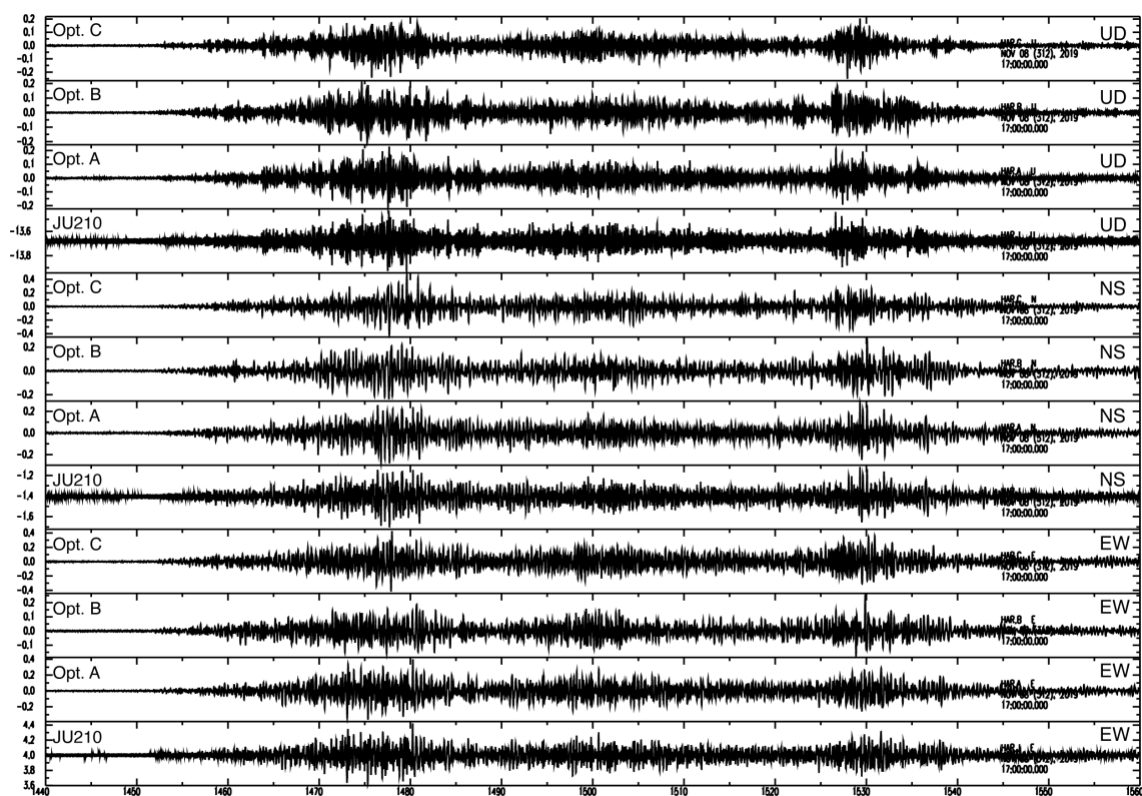


図 13. 2019 年 11 月 8 日 17:24 の噴火の 3 成分地震波形．横軸は時間で 17:00 からの経過時間（秒）．縦軸は加速度（gal）．Opt.A, Opt.B, Opt.C は光センサシステムのそれぞれ地点 A, B, C のセンサに対応する．JU210 は地点 A の微動計に対応する．

空振振幅が 144Pa と観測期間中で最大であった 2019 年 11 月 18 日 17:33 の爆発の際の地震波形を図 14 に示す．2019 年 11 月 8 日の噴火（図 13）と同様に、微動計 JU210 の記録と比較して光センサシステムの方が SN が良いことが分かる．南岳火口からハルタ山観測室までの直線距離は 2.8 km である．P 波速度を 2.5 km/s とすれば、火口から 1.1 秒で観測点に P 波が到達する．一方、音速を 0.34 km/s とすれば、火口から 8.2 秒で観測点に空振が到達する．図 14 より P 波初動は 2030 秒（17:33:50）付近にあるが、その 7 秒後にあたる 2037 秒（17:33:57）付近を見ると高周波が卓越した急に振幅が大きな波形が見られる．これは空振が観測点付近まで届き、地面にて震動をおこすとともに地震計を直接揺らした影響であると考えられる．

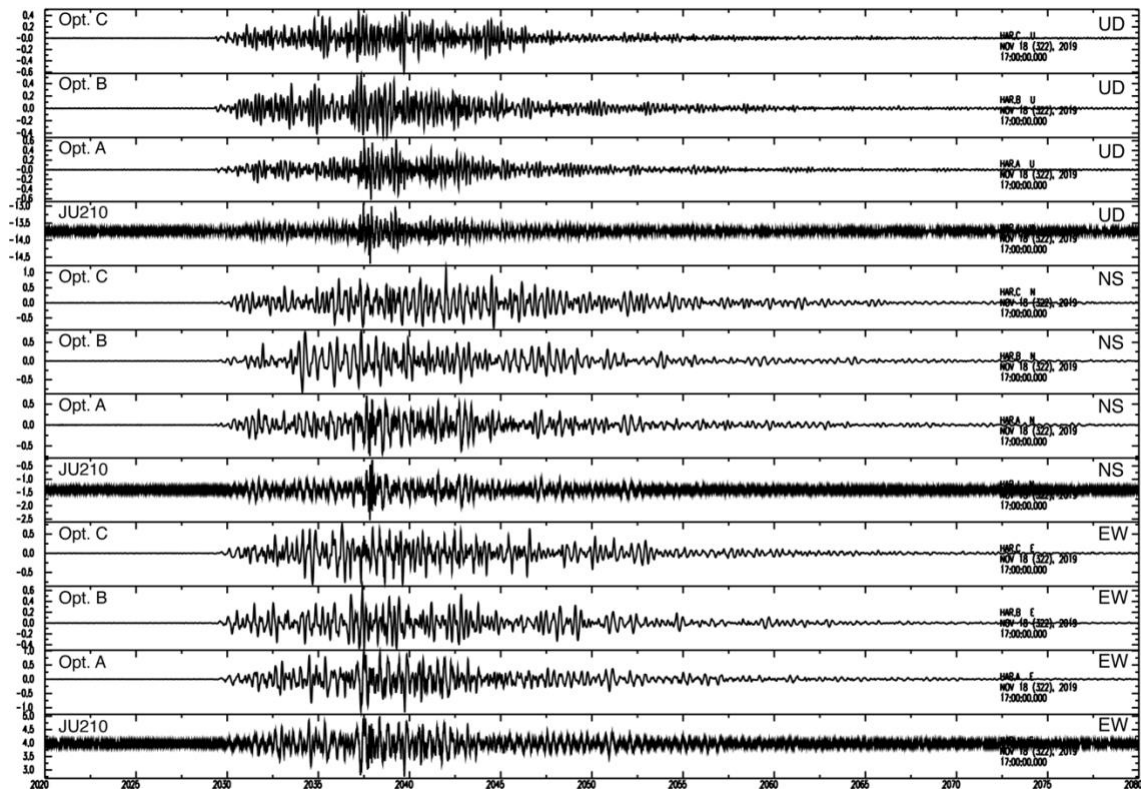


図 14. 2019 年 11 月 18 日 17:33 の噴火の 3 成分地震波形．横軸は時間で 17:00 からの経過時間（秒）．縦軸は加速度（gal）．Opt. A, Opt. B, Opt. C は光センサシステムのそれぞれ地点 A, B, C のセンサに対応する．JU210 は地点 A の微動計に対応する．

1-4) 光センサシステムによる人工地震の観測

最後に、2019 年実施の人工地震探査における地震波形について述べる．人工地震探査にて 2019 年 12 月 5 日未明に桜島の 10 箇所にて火薬量 20kg もしくは 100kg も発破が行われた．桜島の 150 箇所にて臨時観測点を設置して発破に伴う地震波を観測した．表 3 に発破時刻、発破座標、薬量、ハルタ山観測室からの震央距離を示す．

表 3. 人工地震探査における発破時刻、座標、薬量、震央距離

Shot point	Shot time		Latitude			Longitude			Altitude (m)	Charge (kg)	Distance (km)
	Day	Time	Deg	Min	Sec	Deg	Min	Sec			
KURE	2019/12/5	00:07:00.031	31	35	0.197049	130	42	05.20986	67.1	20	6.50
AR2E	2019/12/5	00:02:00.373	31	32	52.48001	130	40	48.51469	14.8	100	6.72
NJRE	2019/12/5	01:02:00.558	31	34	10.36484	130	37	30.81526	65.6	100	2.80
NABE	2019/12/5	02:11:59.778	31	34	56.67036	130	41	27.05555	140.6	20	5.55
KOME	2019/12/5	01:12:00.878	31	36	44.8173	130	41	0.41403	145.9	20	5.15
UR2E	2019/12/5	01:07:00.101	31	36	13.38816	130	42	26.27235	37.0	20	7.06
URNE	2019/12/5	01:36:59.734	31	36	24.34803	130	41	43.6311	92.3	20	6.02
SHRE	2019/12/5	00:12:00.903	31	36	31.01718	130	39	54.62376	315.8	20	3.41
FTME	2019/12/5	01:17:00.346	31	36	25.83198	130	39	28.21256	329.1	20	2.73
KBNE	2019/12/5	00:22:00.323	31	36	17.86896	130	38	18.22518	369.1	20	1.34

人工地震（発破）により観測された地震波形を発破時間の順序（AR2E, KURE, SHRE, KBNE, NJRE, UR2E, KOME, FTME, URNE, NABE）にて図 15, 図 16, 図 17, 図 18, 図 19, 図 20, 図 21, 図 22, 図 23, 図 24 に示す．発破の薬量が 100kg と大きい発破点 AR2E（図 15）と NJRE（図 19）については良好な SN 比にて観測出来たことが分かった．また，発破の薬量が 20kg と小さい発破点については，震央距離が 1.3 から 3.4 km にある発破点 SHRE（図 17），KBNE（図 18），FTME（図 22）については良好な SN 比にて観測出来たと言えるが，震央距離が 5.2 から 7.1 km にある発破点 UR2E（図 20），KOME（図 21）， URNE（図 23），NABE（図 24）についてはフィルタ処理をしない波形では発破によるシグナルが認識出来なかった．一方，震央距離が 6.5 km と離れているが発破点 KURE については発破によるシグナルが認識できた（図 16）．

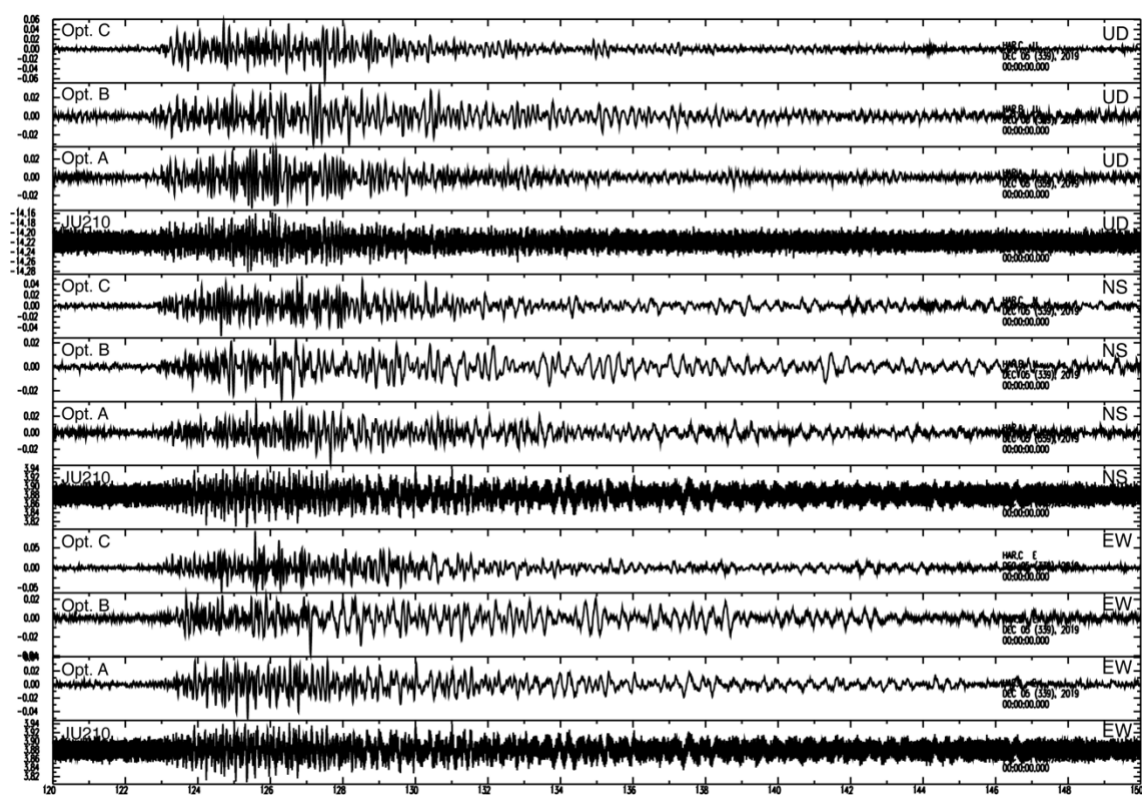


図 15. 人工地震（発破点 AR2E）による 3 成分地震波形．横軸は時間で 0:00 からの経過時間（秒）．縦軸は加速度（gal）．Opt. A, Opt. B, Opt. C は光センサシステムのそれぞれ地点 A, B, C のセンサに対応する．JU210 は地点 A の微動計に対応する．

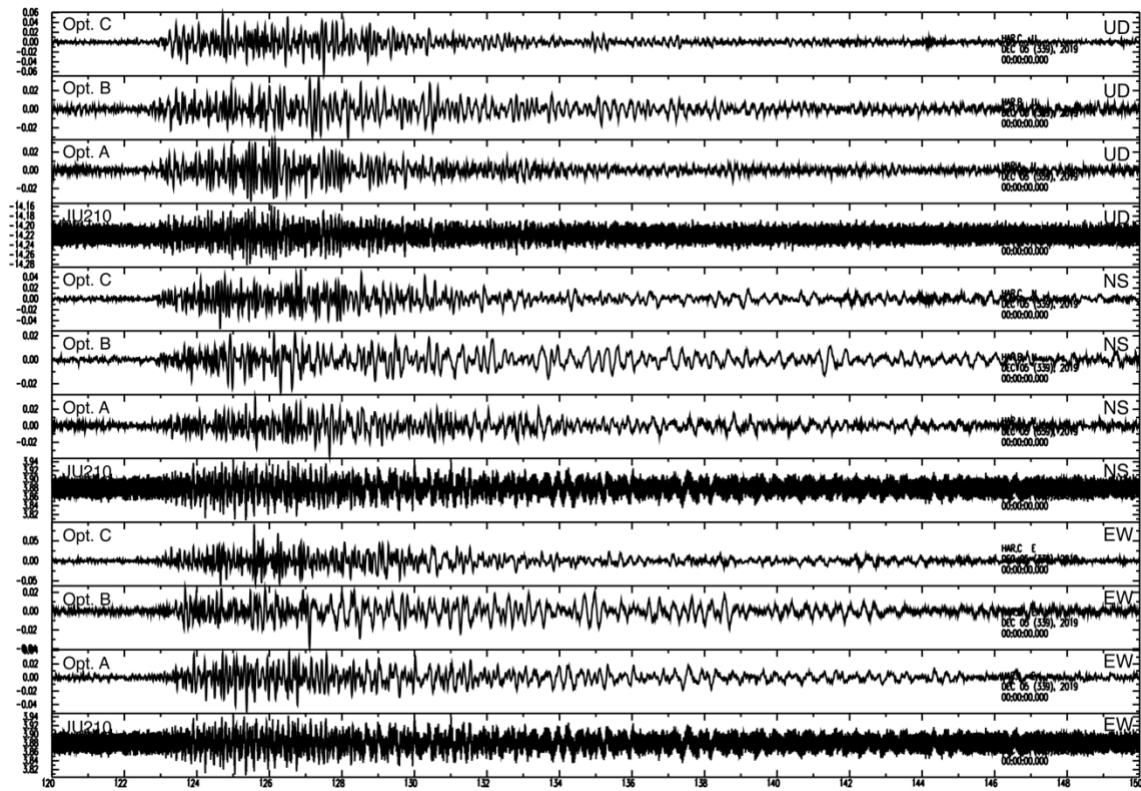


図 16. 人工地震（発破点 KURE）による 3 成分地震波形．横軸は時間で 0:00 からの経過時間（秒）．縦軸は加速度（gal）．Opt. A, Opt. B, Opt. C は光センサシステムのそれぞれ地点 A, B, C のセンサに対応する．JU210 は地点 A の微動計に対応する．

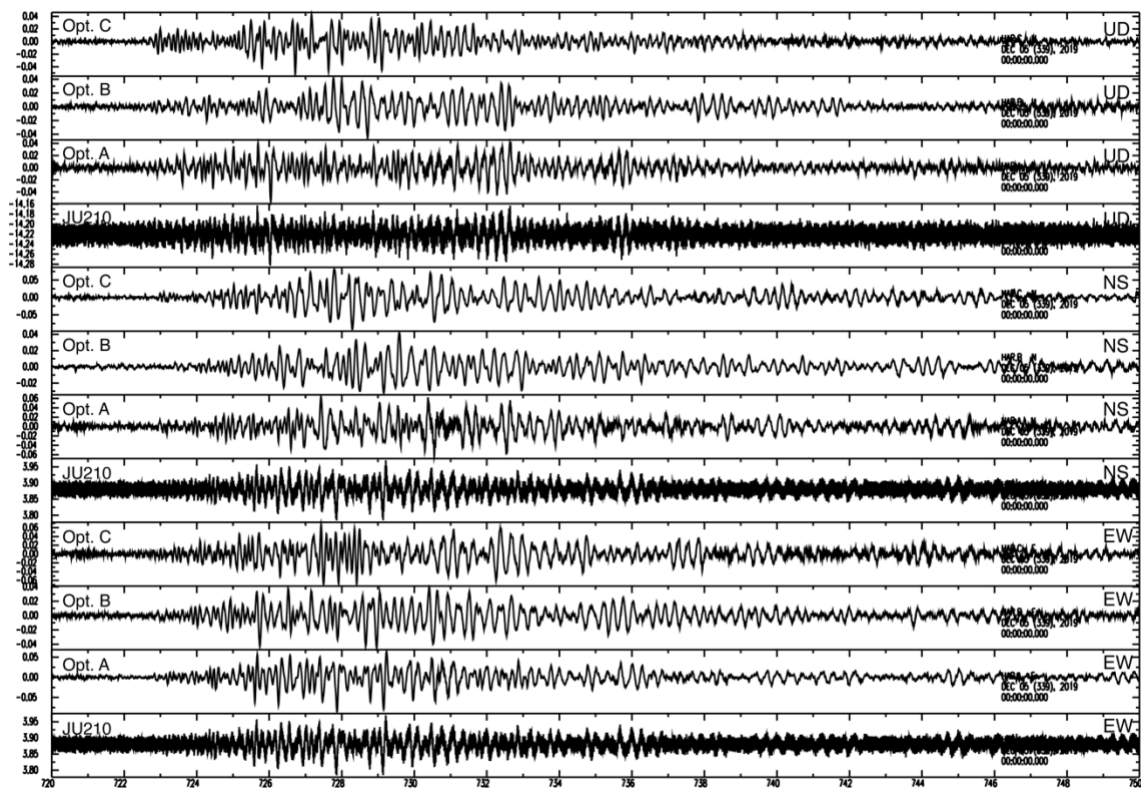


図 17. 人工地震（発破点 SHRE）による 3 成分地震波形．横軸は時間で 0:00 からの経過時間（秒）．縦軸は加速度（gal）．Opt. A, Opt. B, Opt. C は光センサシステムのそれぞれ地点 A, B, C のセンサに対応する．JU210 は地点 A の微動計に対応する．

間 (秒). 縦軸は加速度 (gal). Opt. A, Opt. B, Opt. C は光センサシステムのそれぞれ地点 A, B, C のセンサに対応する. JU210 は地点 A の微動計に対応する.

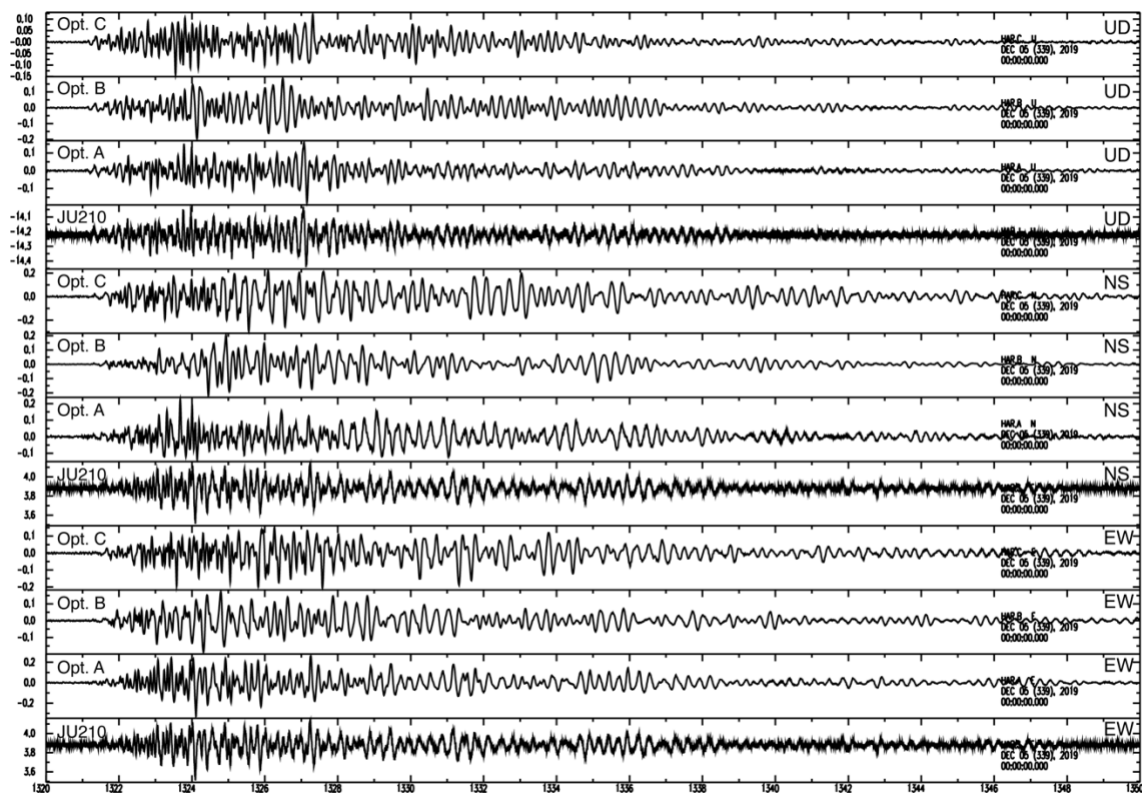


図 18. 人工地震 (発破点 KBNE) による 3 成分地震波形. 横軸は時間で 0:00 からの経過時間 (秒). 縦軸は加速度 (gal). Opt. A, Opt. B, Opt. C は光センサシステムのそれぞれ地点 A, B, C のセンサに対応する. JU210 は地点 A の微動計に対応する.

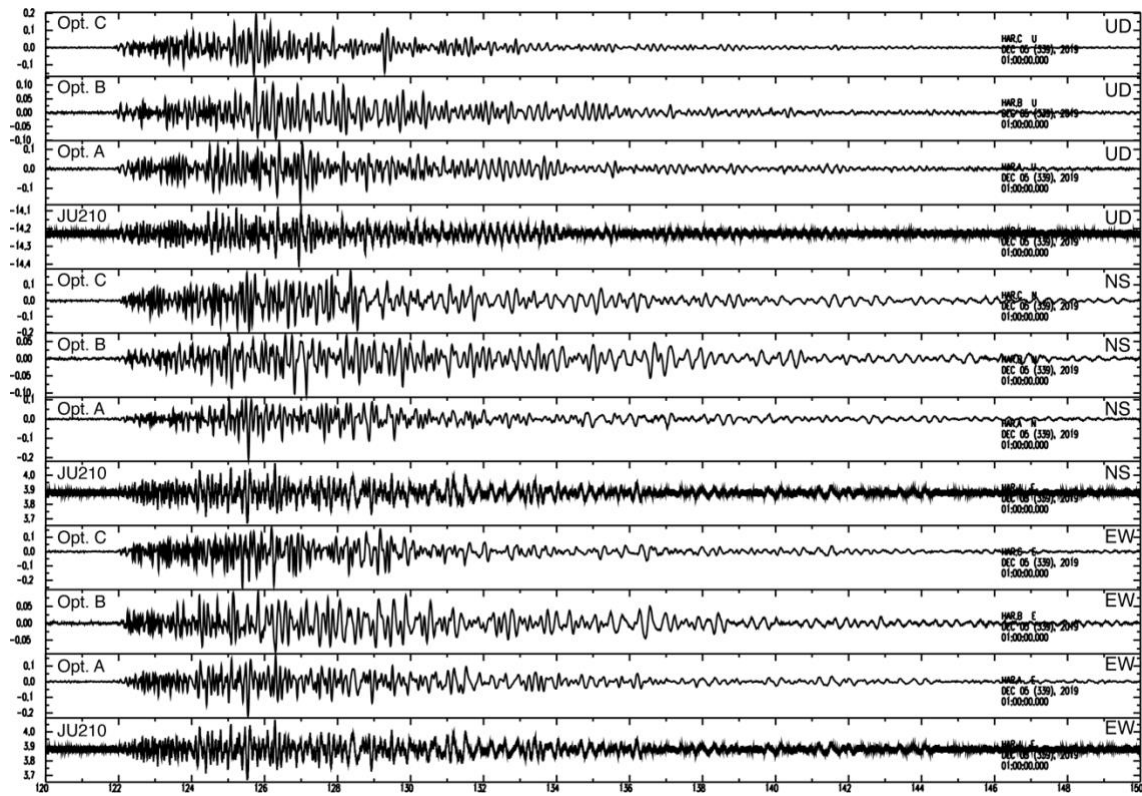


図 19. 人工地震（発破点 NJRE）による 3 成分地震波形．横軸は時間で 1:00 からの経過時間（秒）．縦軸は加速度（gal）．Opt. A, Opt. B, Opt. C は光センサシステムのそれぞれ地点 A, B, C のセンサに対応する．JU210 は地点 A の微動計に対応する．

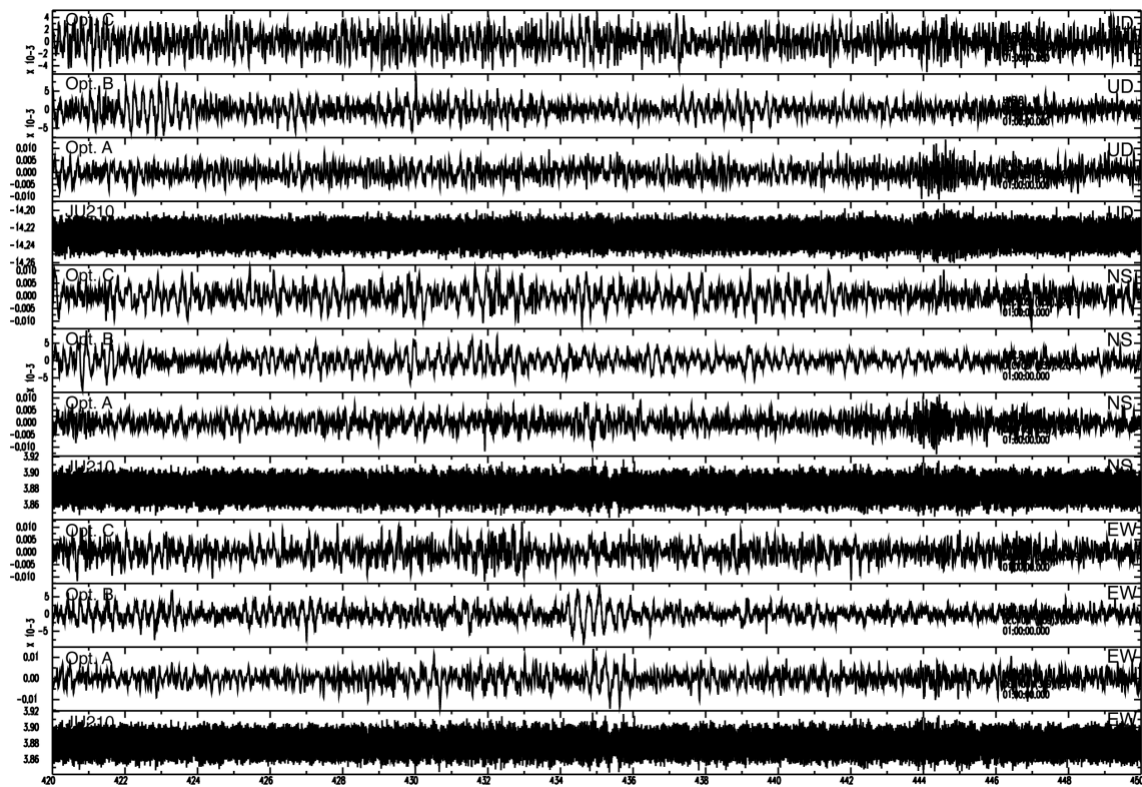


図 20. 人工地震（発破点 UR2E）による 3 成分地震波形．横軸は時間で 1:00 からの経過時間（秒）．縦軸は加速度（gal）．Opt. A, Opt. B, Opt. C は光センサシステムのそれぞれ地点 A, B, C のセンサに対応する．JU210 は地点 A の微動計に対応する．

間（秒）．縦軸は加速度（gal）．Opt.A, Opt.B, Opt.Cは光センサシステムのそれぞれ地点 A, B, C のセンサに対応する．JU210 は地点 A の微動計に対応する．

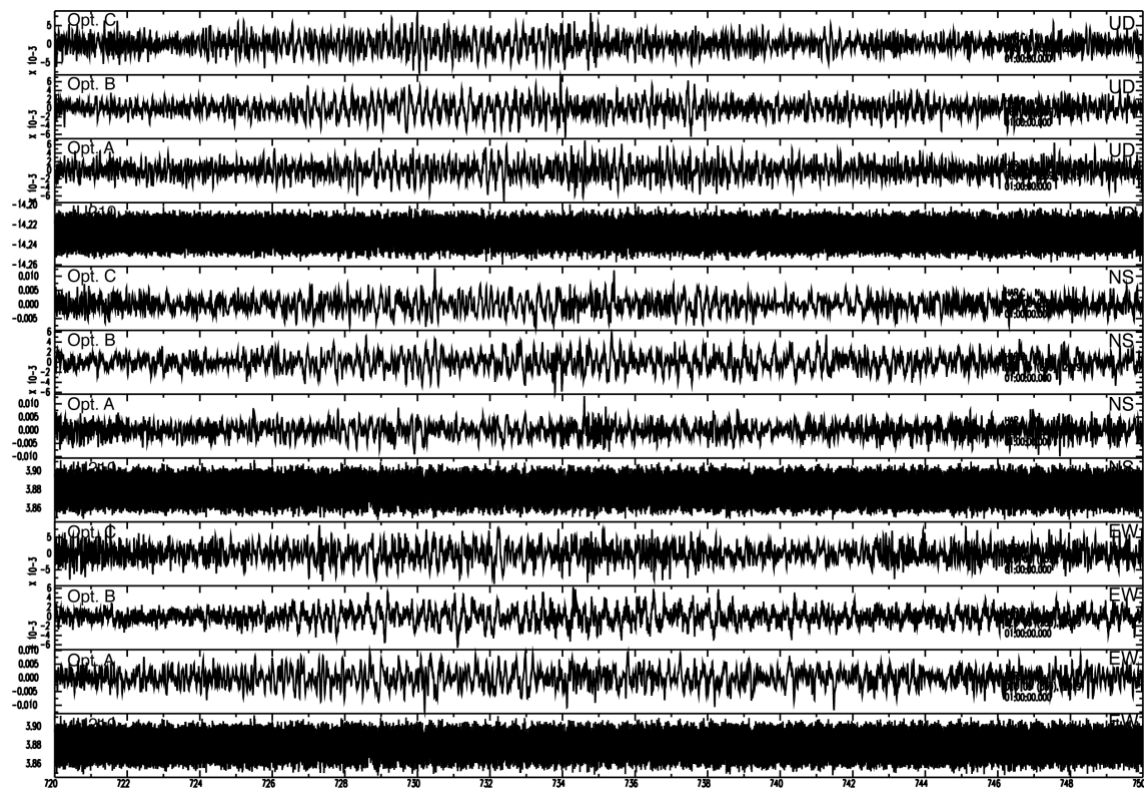


図 21. 人工地震（発破点 KOME）による 3 成分地震波形．横軸は時間で 1:00 からの経過時間（秒）．縦軸は加速度（gal）．Opt.A, Opt.B, Opt.C は光センサシステムのそれぞれ地点 A, B, C のセンサに対応する．JU210 は地点 A の微動計に対応する．

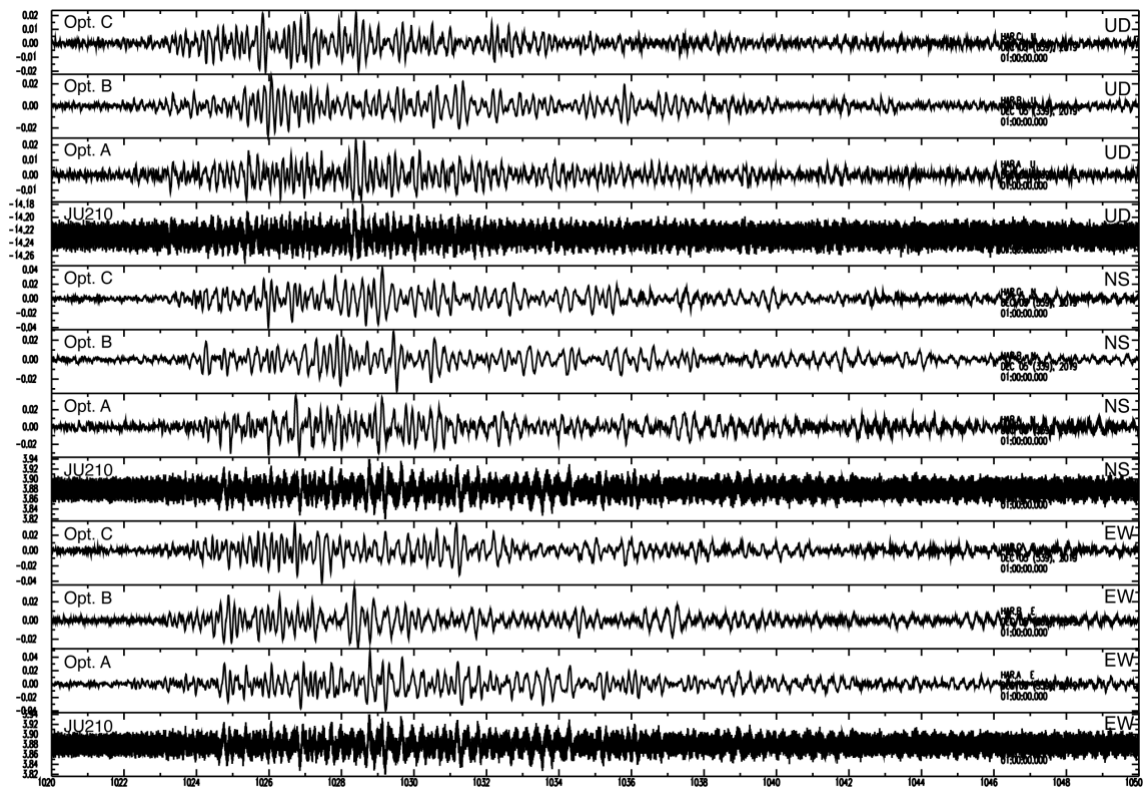


図 22. 人工地震（発破点 FTME）による 3 成分地震波形．横軸は時間で 1:00 からの経過時間（秒）．縦軸は加速度（gal）．Opt. A, Opt. B, Opt. C は光センサシステムのそれぞれ地点 A, B, C のセンサに対応する．JU210 は地点 A の微動計に対応する．

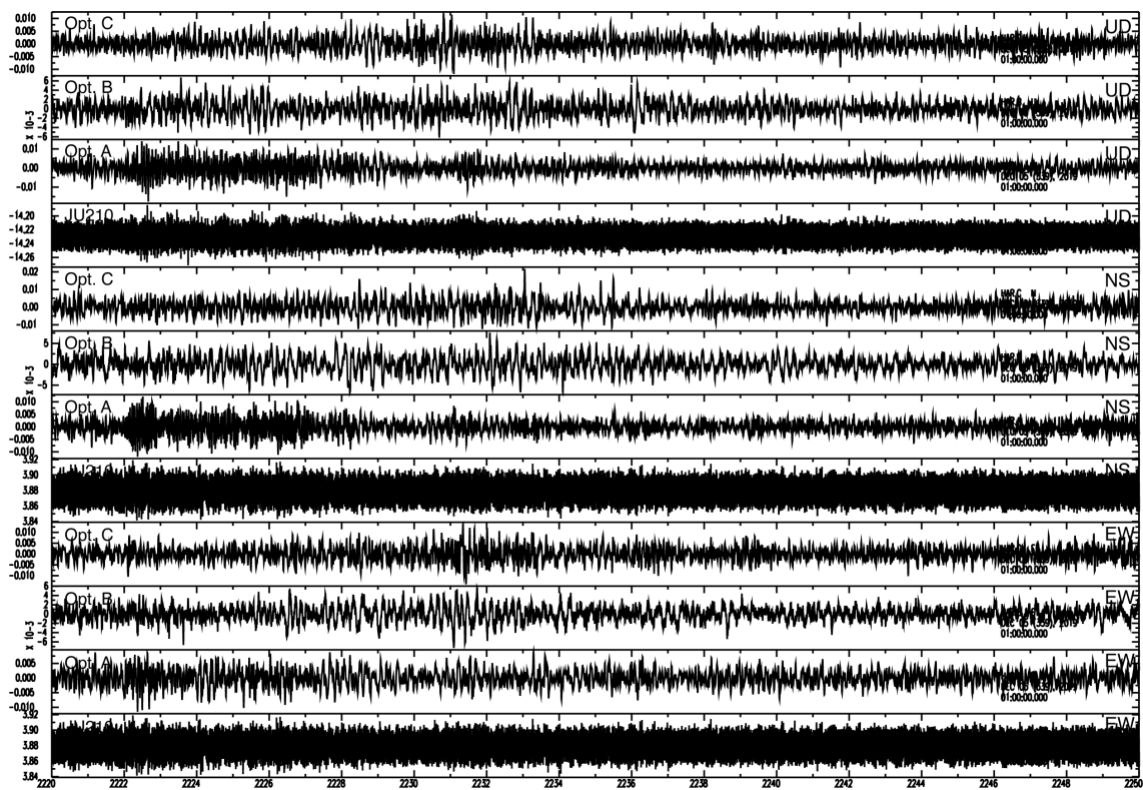


図 23. 人工地震（発破点 URNE）による 3 成分地震波形．横軸は時間で 1:00 からの経過時間（秒）．縦軸は加速度（gal）．Opt. A, Opt. B, Opt. C は光センサシステムのそれぞれ地点 A, B, C のセンサに対応する．JU210 は地点 A の微動計に対応する．

間（秒）．縦軸は加速度（gal）．Opt.A, Opt.B, Opt.C は光センサシステムのそれぞれ地点 A, B, C のセンサに対応する．JU210 は地点 A の微動計に対応する．

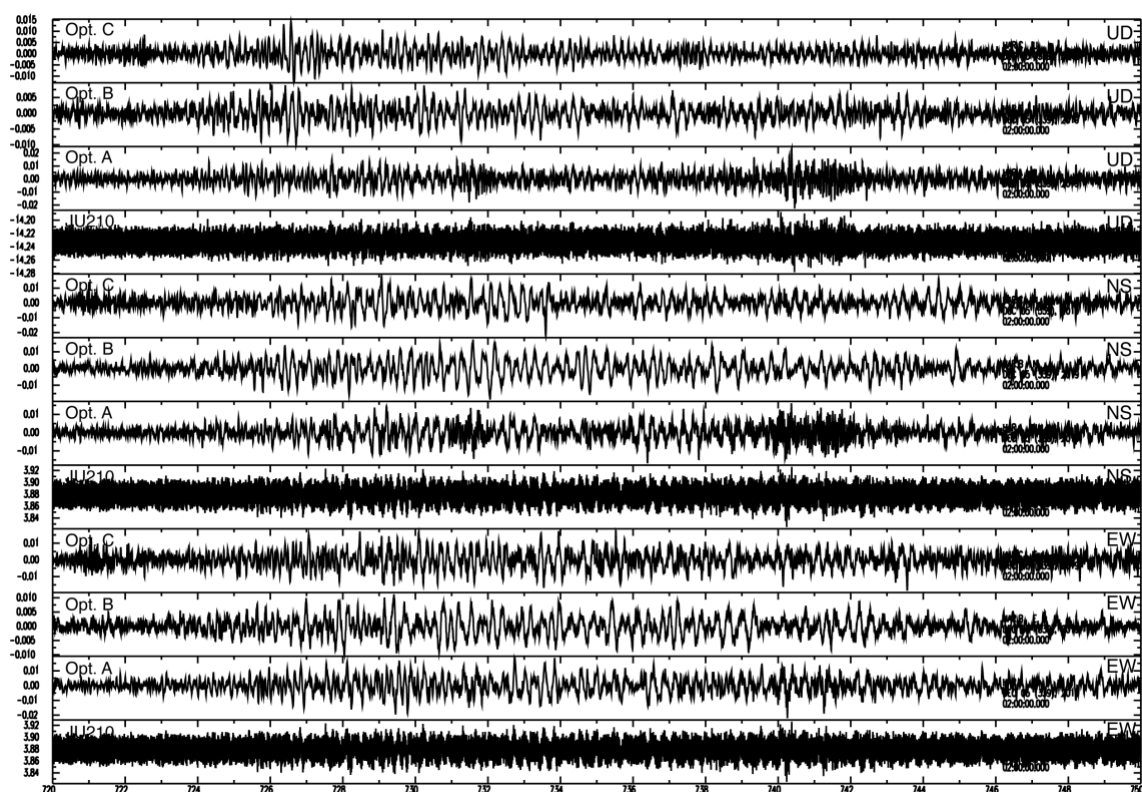


図 24. 人工地震（発破点 NABE）による 3 成分地震波形．横軸は時間で 1:00 からの経過時間（秒）．縦軸は加速度（gal）．Opt.A, Opt.B, Opt.C は光センサシステムのそれぞれ地点 A, B, C のセンサに対応する．JU210 は地点 A の微動計に対応する．

2) 光センサシステム観測の総合評価および総括

2-1) 自然地震を用いた光センサシステムの評価

光センサシステムは火山性地震の観測に活用を前提としているシステムではあるが，幅広く地震観測に活用されるシステムであることが望ましい．光センサシステムによる地震観測について火山研究運営委員会，研究集会，評価会などで意見を伺ってきた．その中の意見から，火山性微動や低周波地震の観測を想定しての地震計固有周波数の低周波化と数 Hz 帯における必要な地震計感度が光センサシステムに求められた．光センサシステムの地震計固有周波数の低周波化対応のセンサ作成は昨年度完了し，今年度は本報告書の火山における実地観測を実施した．実地観測データから，非火山性地震の観測にあたって既存地震計に比べて SN 比が同等以上かつ，周波数特性に問題がないことを確認する必要がある．特に，数 Hz 以下の低周波側における地震計感度が十分であるか検証する必要がある．そこで，ここでは，比較的近地（100 km から 200 km の水平距離）にある中地震（マグニチュード 5 以上 7 未満）の地震波形と遠地（30° から 90° の震央距離）にある大地震（マグニチュード 7 以上）の地震波形にて光センサシステムを評価する．

2-1-1) 中地震を用いた光センサシステムと従来型加速度地震計との比較

光センサシステムの観測期間の 2019 年 6 月 5 日から同年 12 月 5 日に発生した地震について表 4 に示す条件に当てはまる地震を気象庁一元化震源リストから検索した。検索結果を表 5 に示す。この地震は日向灘にて発生したマグニチュード 5.2 の地震であり、図 25 に震源を図示した。

表 4. 震源検索条件

検索条件	最小値	最大値
経度（東経，°単位）	128.3	133.3
緯度（北緯，°単位）	29.0	34.0
深さ（km 単位）	0.0	600.0
マグニチュード	5.0	9.9

表 5. 気象庁一元化震源リストからの検索結果

発震時刻	経度（東経，°）	緯度（北緯，°）	深さ（km）	マグニチュード
2019/11/22 18:05:08.17s	131.912	31.937	23.92	5.2

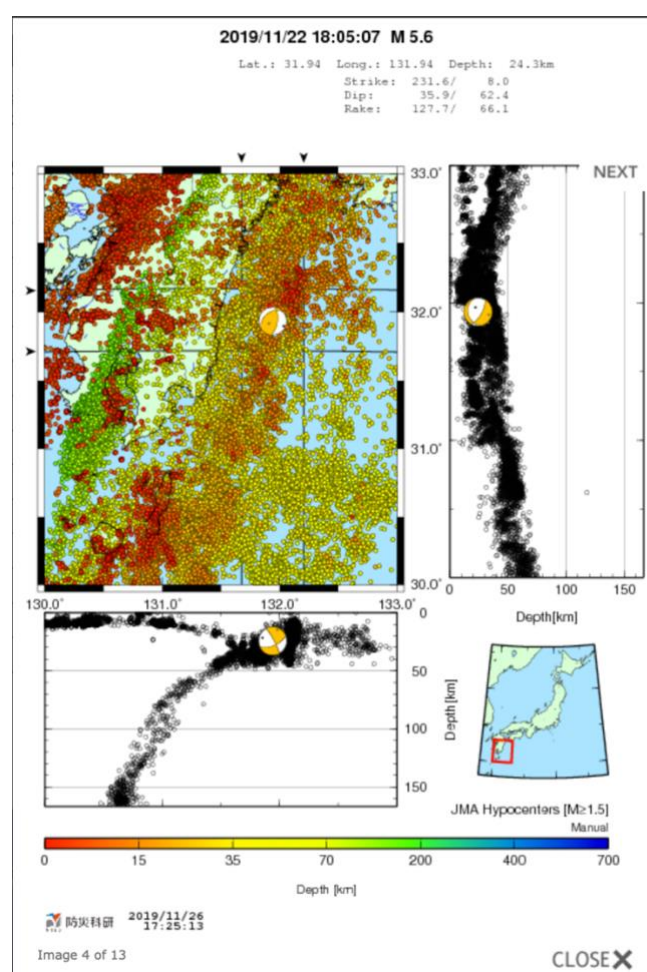


図 25. 2019 年 11 月 22 日に日向灘にて発生した地震の震源位置とメカニズム解（防災科

図 26 に光センサシステムと既存地震計の日向灘の地震 (M5.2) の上下動地震波形を示す。既存地震計は地点 A に併設の微動計 (JU210) と光センサシステムから最も近い位置にあるボアホール型短周期速度型地震計である。ボアホール地震計は地表から 290 m 地下にあり、ハルタ山観測室との高度差は 350 m 程度である。18:00 からの経過時間で 329 秒 (6 分 29 秒) から 330 秒 (6 分 30 秒) 付近が P 波初動に該当する。初動部分の波形は卓越周波数がおおよそ 4Hz であり、光センサシステム、微動計、ボアホール地震計ともにほぼ同じ震動波形であることがわかる。また、拡大すると初動の立ち上がり部分はアップ (押し) の極性であることが分かる (図 27)。ただし、微動計は高周波数のノイズが重なっていることが見て取れる。ボアホール地震記録の P 波初動の到達時刻は光センサシステムおよび微動計の地震記録の P 波初動の到達時刻より 0.2 秒程度早く、これは高度差で説明できる。なお、光センサシステムと微動計の地震振幅がボアホール地震計の地震振幅の 3 倍程度になっているのは、ボアホール地震計が地表から十分遠い地中に設置されているのに対して、光センサシステムと微動計は地表に設置されており、地表の効果により地震動が増幅されるからである。

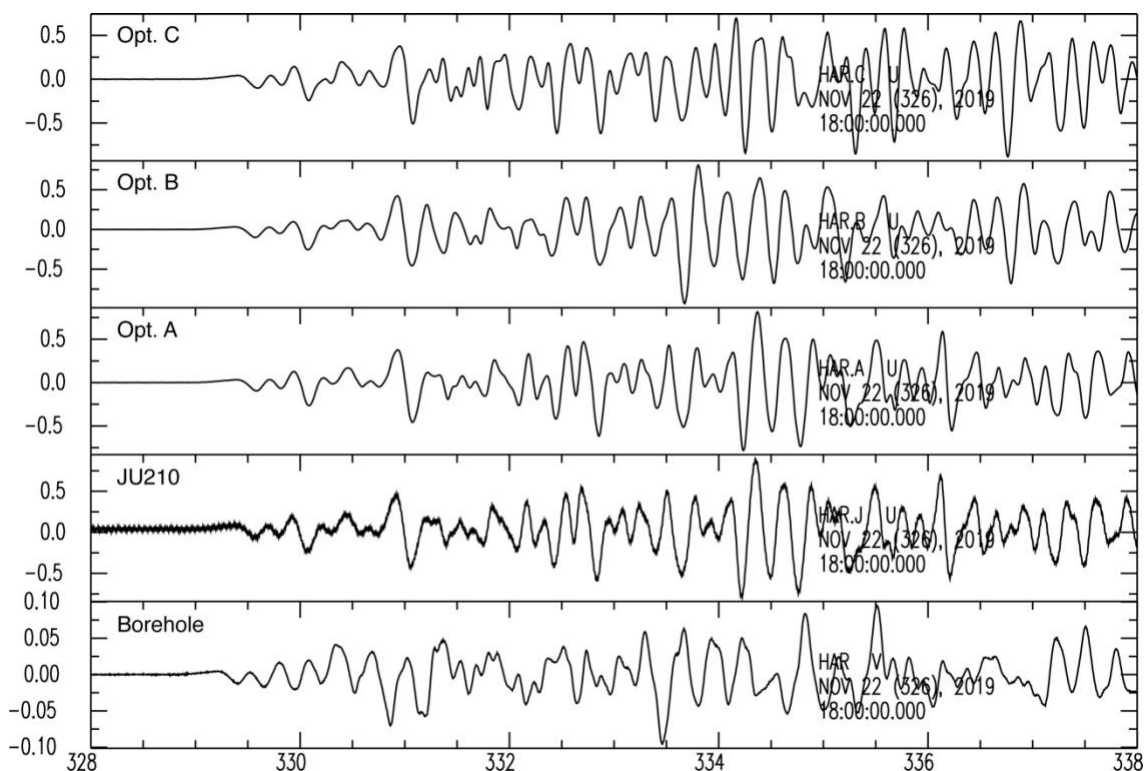


図 26. 日向灘の地震 (M5.2) の上下成分地震波形。横軸は時間で 18:00:00 からの経過時間 (秒)。縦軸は加速度 (gal)。Opt. A, Opt. B, Opt. C は光センサシステムのそれぞれ地点 A, B, C のセンサに対応する。JU210 は地点 A の微動計に対応する。Borehole は光センサシステムが設置されているハルタ山観測室から最も近い位置にあるボアホール型短周期速

度型地震計の微分波形記録.

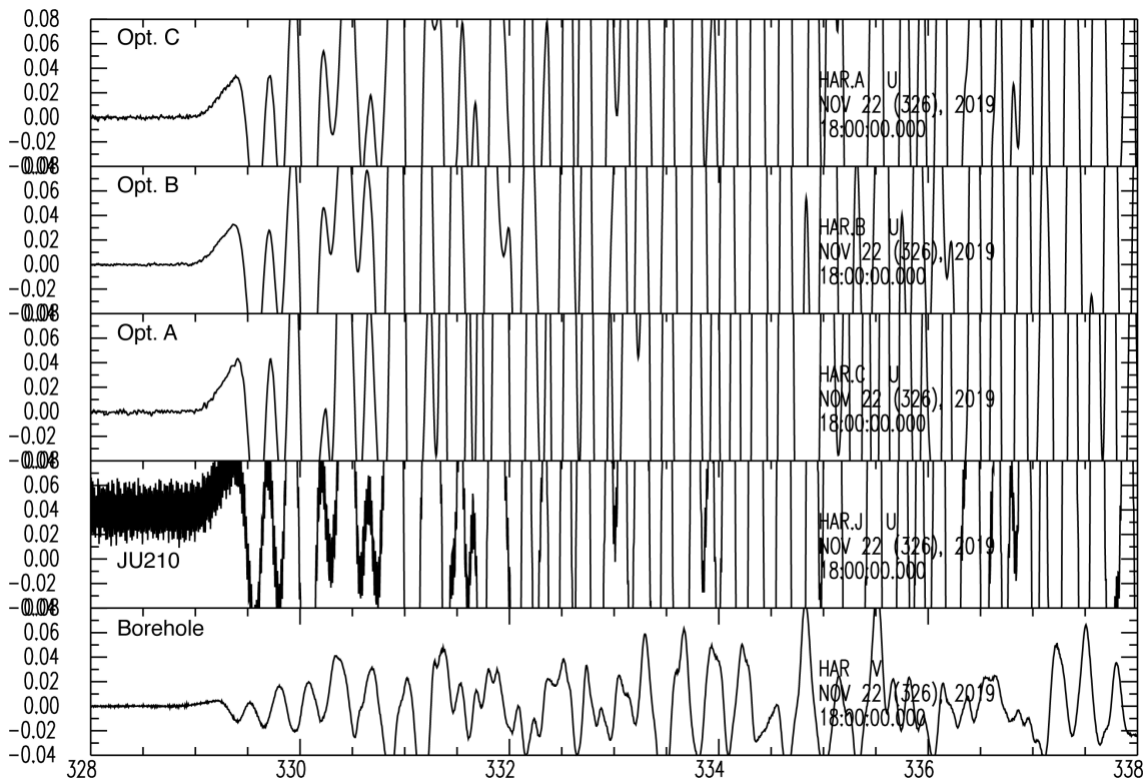


図 27. 日向灘の地震 (M5.2) の上下成分地震波形. 横軸は時間で 18:00:00 からの経過時間 (秒). 縦軸は加速度 (gal). 図 2 とは縦軸の加速度振幅幅が異なる.

図 28 と図 29 に光センサシステムと微動計の日向灘の地震 (M5.2) の水平 2 成分のそれぞれ南北成分と東西成分の地震波形を示す. 上下動成分と同様に水平成分について光センサシステムと微動計の P 波初動付近の地震波形は似ている. 上下動と水平動ともに 331 秒 (6 分 31 秒) 以降の波形は同じ場所に置いてある地点 A を除いて, 波形は地点が変われば異なる. これは, P 波の初動から後ろの後続波が地下の不均質構造のため反射や散乱して地震計に到達するためである. 光センサシステムと微動計の波形をより正確に比較するために, 図 30 に地点 A における上下動と水平動 2 成分について同じ図にプロットして比較をした. 上下動成分については高周波数ノイズが見える微動計の波形と高周波数ノイズの見られない光センサシステムの波形はオフセットを除けば一致している. 水平動成分については完全に重なっており差が見られない.

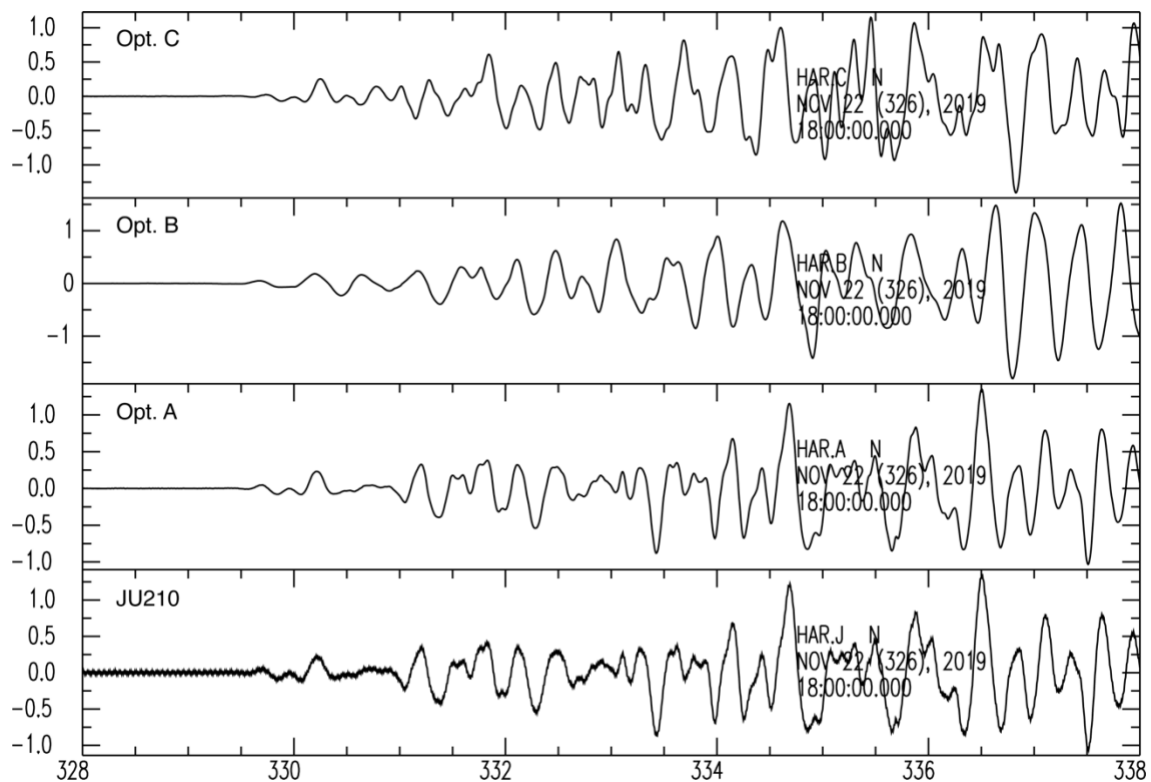


図 28. 日向灘の地震 (M5.2) の南北成分地震波形. 横軸は時間で 18:00:00 からの経過時間 (秒). 縦軸は加速度 (gal). Opt. A, Opt. B, Opt. C は光センサシステムのそれぞれ地点 A, B, C のセンサに対応する. JU210 は地点 A の微動計に対応する.

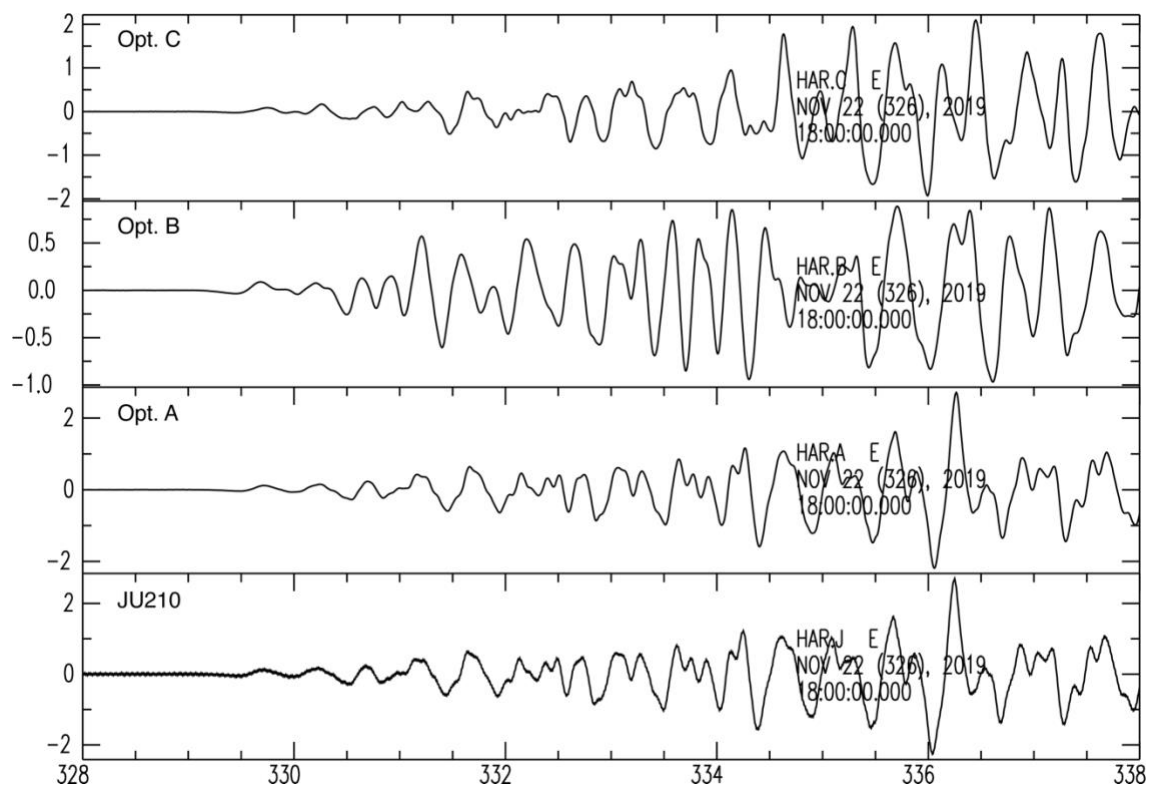


図 29. 日向灘の地震 (M5.2) の東西成分地震波形. 横軸は時間で 18:00:00 からの経過時間 (秒). 縦軸は加速度 (gal). Opt. A, Opt. B, Opt. C は光センサシステムのそれぞれ地点 A, B, C のセンサに対応する. JU210 は地点 A の微動計に対応する.

間（秒）．縦軸は加速度（gal）．Opt.A, Opt.B, Opt.C は光センサシステムのそれぞれ地点 A, B, C のセンサに対応する．JU210 は地点 A の微動計に対応する．

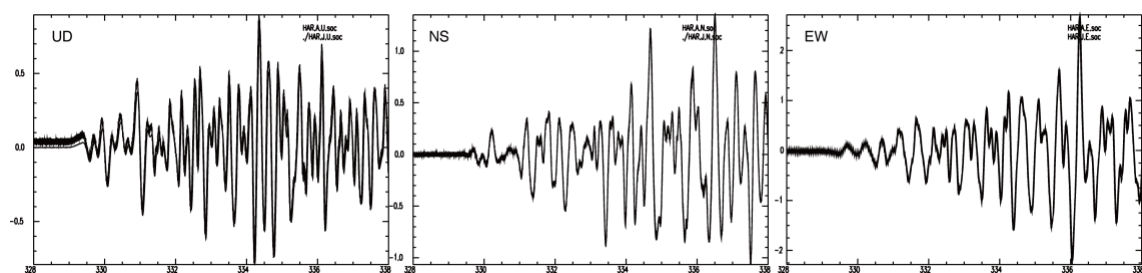


図 30. 日向灘の地震（M5.2）の地点 A における光センサシステムと微動計の波形の比較．左図，中図，右図はそれぞれ上下，南北，東西成分である．横軸は時間で 18:00:00 からの経過時間（秒）．縦軸は加速度（gal）．

2-1-2）大地震を用いた光センサシステムと従来型加速度地震計との比較

光センサシステムの観測期間の 2019 年 6 月 5 日から同年 12 月 5 日に発生した世界中の大地震（マグニチュード 7 以上）について米国地質調査所 Earthquake Hazards Program のサイトにて検索して，表 6 に示す 5 つの大地震が該当することが分かった．これらの地震の桜島からの震央距離，方位，P 波到達時刻を計算した（表 6）．なお，速度構造 IASP91 (Kennett and Engdahl, 1991) を用いて P 波到達走時を計算した．

表 6. 光センサシステム観測期間中の大地震

Time (UTC)	Latitude (deg)	Longitude (deg)	Depth (km)	Mw	Delta (deg)	Back-azimuth (deg)	Travel time of P (mm:ss)
2019-06-15T22:55:04.130	-30.6441	-178.0995	46	7.3	79	137	11:59
2019-06-24T02:53:39.830	-6.4078	129.1692	212	7.3	38	182	06:38
2019-07-06T03:19:53.04	35.7695	-117.5993	8	7.1	87	311	12:46
2019-07-14T09:10:51.523	-0.5858	128.034	18.98	7.2	32	185	06:27
2019-11-14T16:17:40.578	1.6213	126.4156	33	7.1	30	188	06:08

表 6 に示した 5 つの大地震について光センサシステムの地震波形を確認した．このうちフィルターなど施さない生の地震波形において地震を確認できたのは UTC で 2019/11/14 16:17 (JST 2019/11/15 1:17) の地震のみであり，インドネシアの北スラウェシの東方沖の地震（M7.1）である．光センサシステムと微動計の地震波形を図 3 1，3 2，3 3 に示

し、それぞれ上下，南北，東西成分である．3つの成分に共通して微動計に比べて光センサシステムが地震波形の SN 比が高いことが確認できた．これは光センサシステムの高周波数側のノイズレベルが微動計のノイズレベルより低いためである．

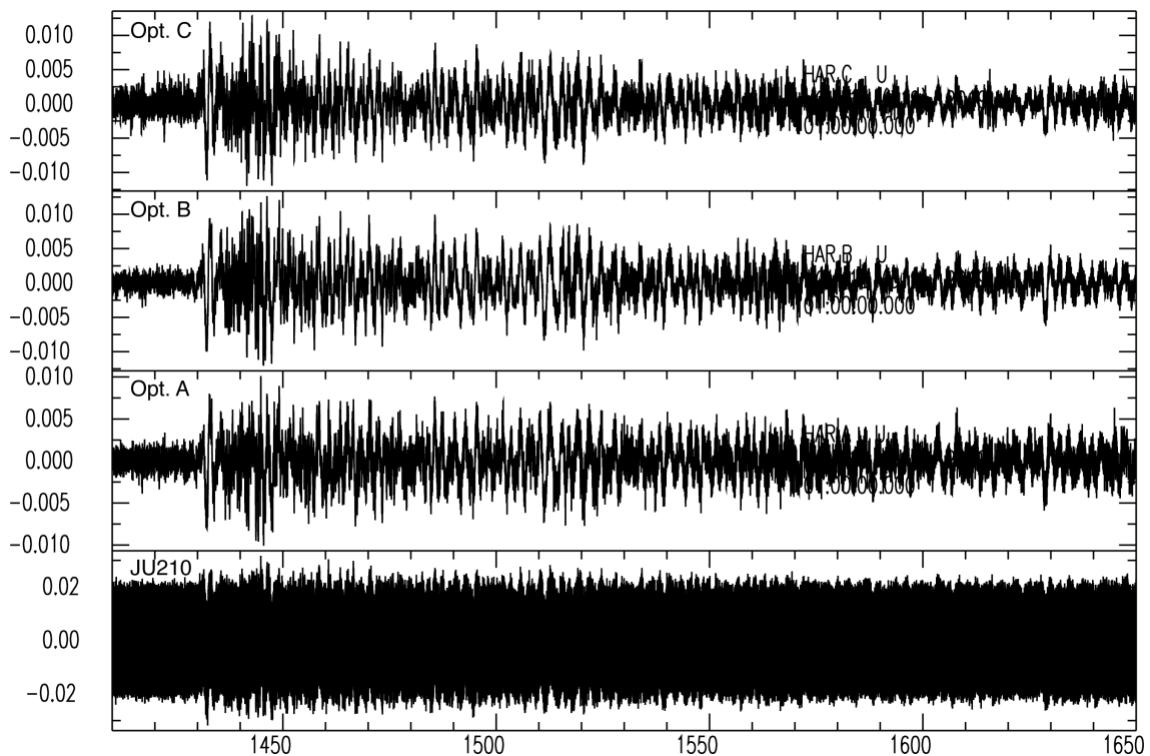


図 31. インドネシアの北スラウェシの東方沖の地震 (M7.1) の上下成分地震波形．横軸は時間で 2019/11/15 01:00 からの経過時間 (秒)．縦軸は加速度 (gal)．Opt. A, Opt. B, Opt. C は光センサシステムのそれぞれ地点 A, B, C のセンサに対応する．JU210 は地点 A の微動計に対応する．

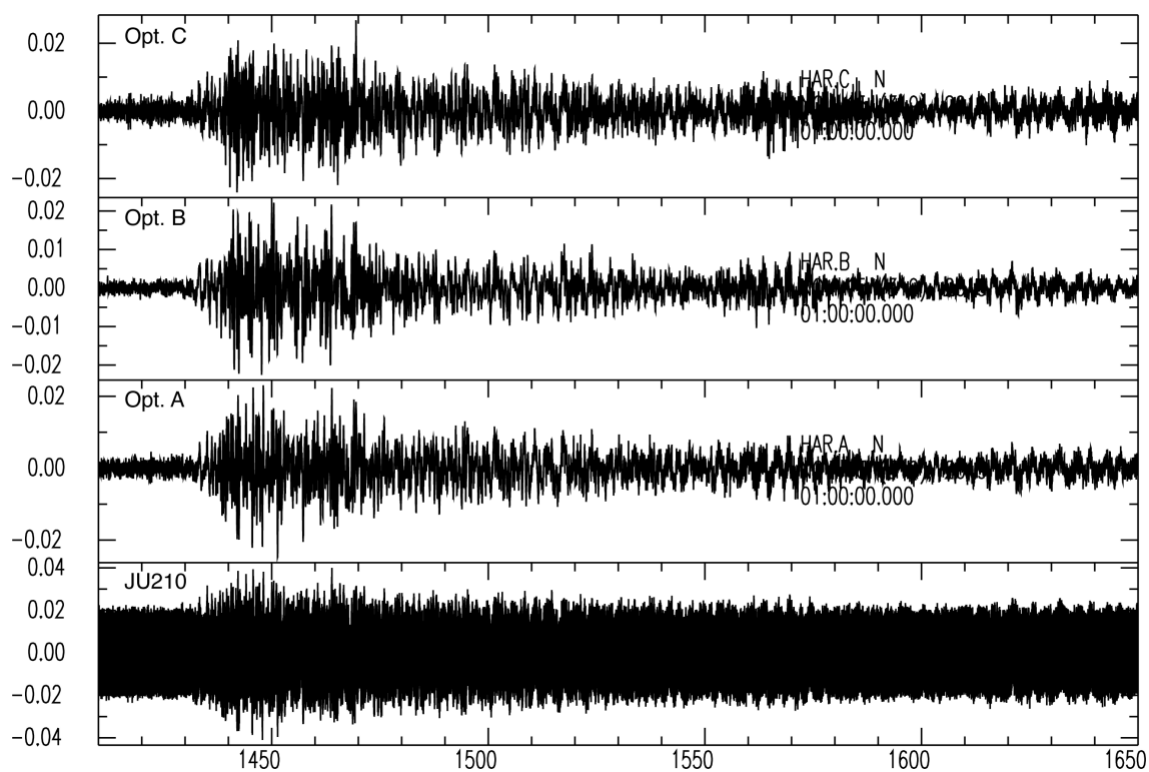


図 32. インドネシアの北スラウェシの東方沖の地震 (M7.1) の南北成分地震波形. 横軸は時間で 2019/11/15 01:00 からの経過時間 (秒). 縦軸は加速度 (gal). Opt. A, Opt. B, Opt. C は光センサシステムのそれぞれ地点 A, B, C のセンサに対応する. JU210 は地点 A の微動計に対応する.

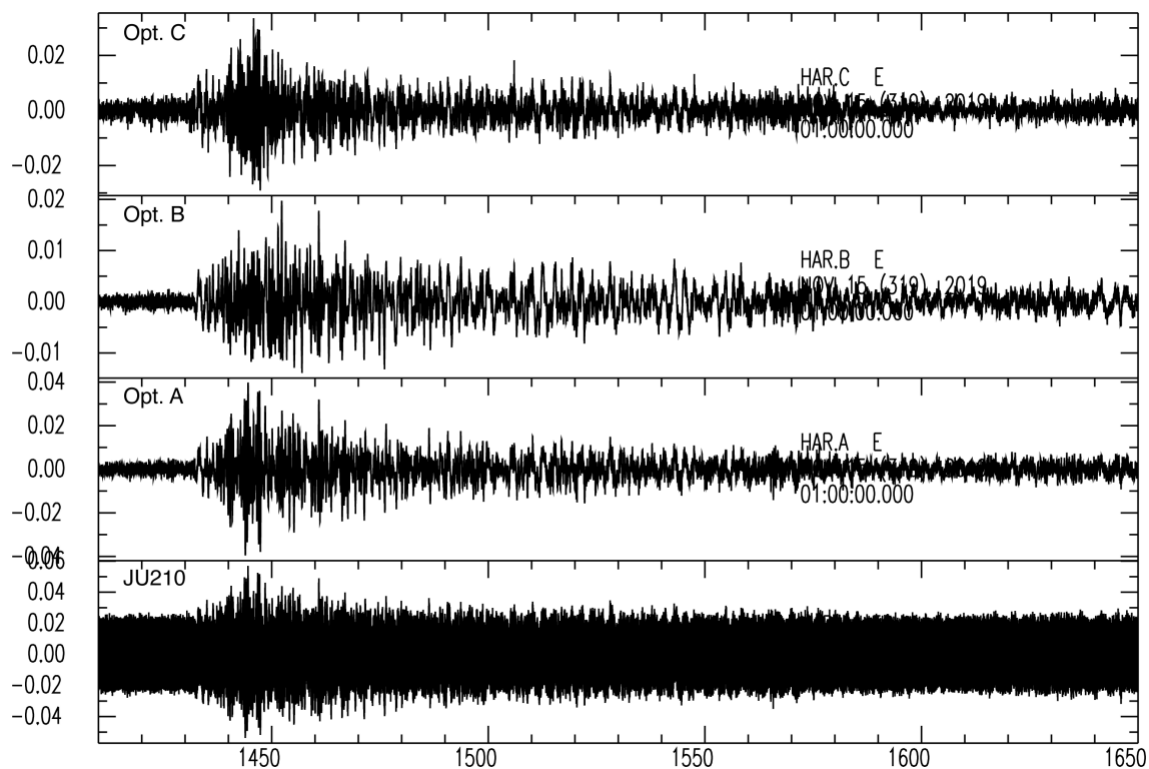


図 33. インドネシアの北スラウェシの東方沖の地震 (M7.1) の東西成分地震波形. 横軸は時間で 2019/11/15 01:00 からの経過時間 (秒). 縦軸は加速度 (gal). Opt. A, Opt. B, Opt. C は光センサシステムのそれぞれ地点 A, B, C のセンサに対応する. JU210 は地点 A の微動計に対応する.

遠地の大地震は実体波 (P 波, S 波) と表面波ともに低周波成分が卓越する. そのため, 地震計の低周波側の特性を把握するために格好の現象である. そこで, 観測波形に遮断周期 2 秒のローパスフィルタを施して地震波形を図 3 4, 3 5, 3 6 に示す. それぞれ, 上下, 南北, 東西成分である. 光センサシステムおよび微動計ともに明瞭に地震波形が確認された. また, 地点 A について光センサシステムと微動計の記録を比較すると前述の日向灘の地震 (M5.2) と同様に両者の振幅と位相が合っている. さらにいえば, 光センサシステムの地点 A, B, C の波形は前述の日向灘の地震 (M5.2) と比べて振幅と位相の一致度が高い. これは対象とする周期が 2 秒以下と低いため波長が 5 km 以上となり, アレイの水平サイズである 70 m よりも十分に波長が長いからである. 以上のことから, 光センサシステムは火山性の超長周期地震の観測や解析 (Nakamichi et al. 2009; Waite and Lanza 2016; Maeda et al. 2019) に活用出来る可能性が見いだせた.

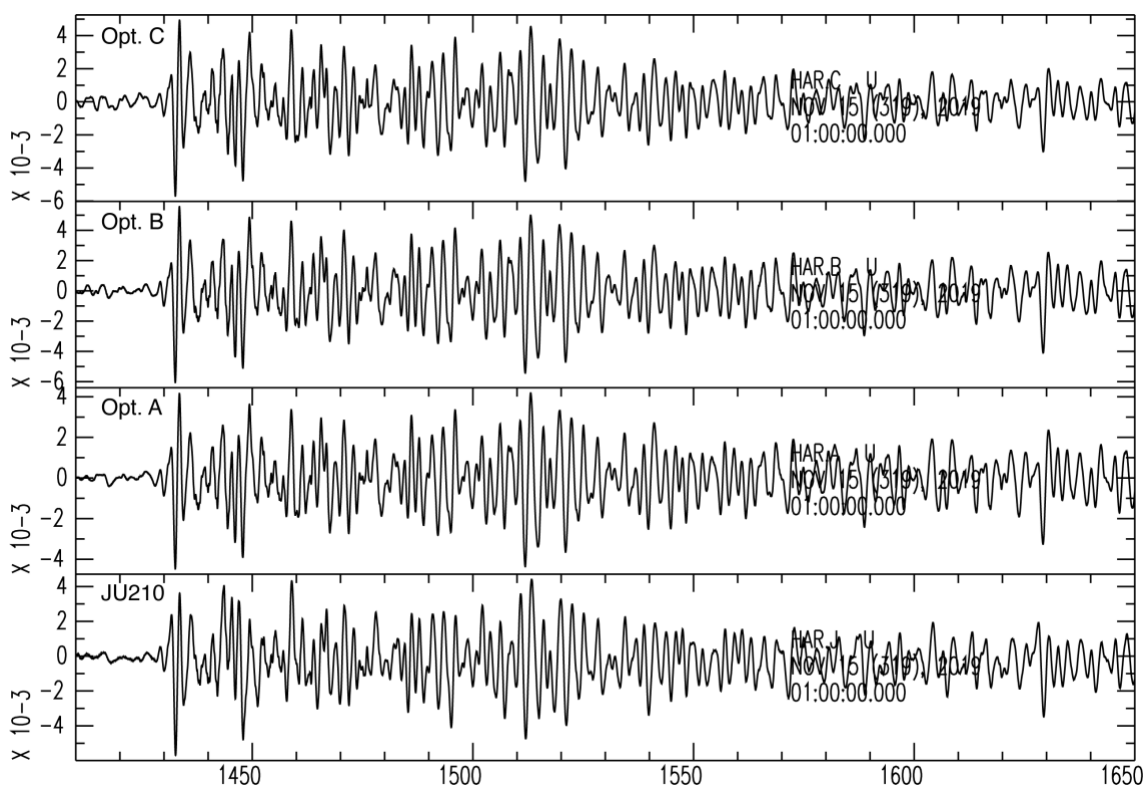


図 34. 遮断周期 2 秒のローパスフィルタを施したインドネシアの北スラウェシの東方沖の地震 (M7.1) の上下成分地震波形. 横軸は時間で 2019/11/15 01:00 からの経過時間 (秒). 縦軸は加速度 (gal). Opt. A, Opt. B, Opt. C は光センサシステムのそれぞれ地点 A, B, C のセンサに対応する. JU210 は地点 A の微動計に対応する.

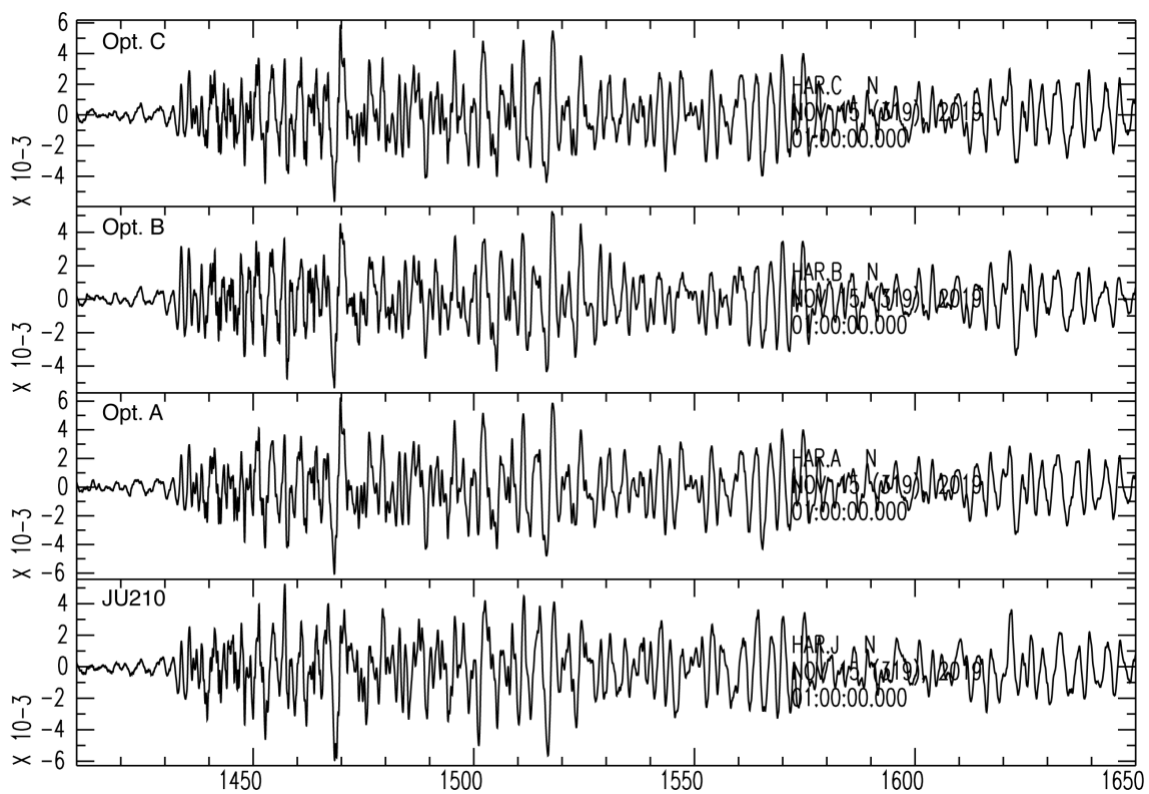


図 35. 遮断周期 2 秒のローパスフィルターを施したインドネシアの北スラウェシの東方沖の地震 (M7. 1) の南北成分地震波形. 横軸は時間で 2019/11/15 01:00 からの経過時間 (秒). 縦軸は加速度 (gal). Opt. A, Opt. B, Opt. C は光センサシステムのそれぞれ地点 A, B, C のセンサに対応する. JU210 は地点 A の微動計に対応する.

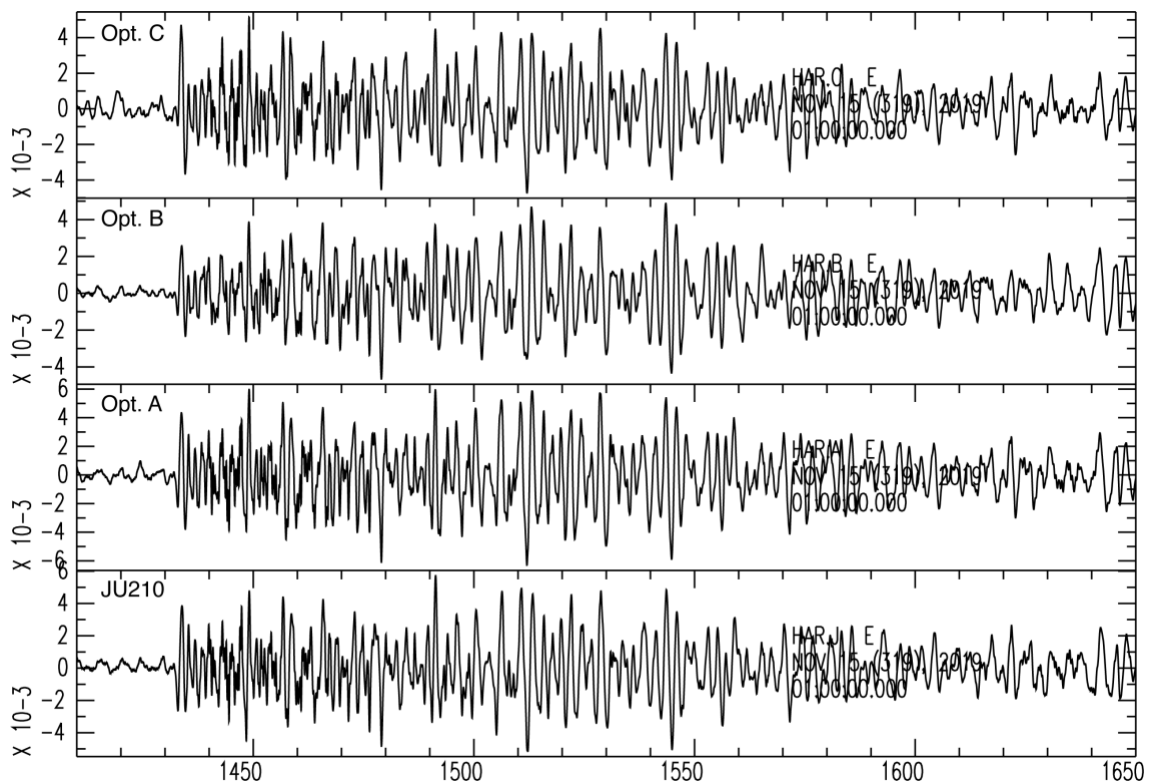


図 36. 遮断周期 2 秒のローパスフィルターを施したインドネシアの北スラウェシの東方沖の地震 (M7. 1) の東西成分地震波形. 横軸は時間で 2019/11/15 01:00 からの経過時間 (秒). 縦軸は加速度 (gal). Opt. A, Opt. B, Opt. C は光センサシステムのそれぞれ地点 A, B, C のセンサに対応する. JU210 は地点 A の微動計に対応する.

2-2) 人工震源を用いた従来型加速度地震計との比較による光センサシステムの評価
光センサシステムのインパルスの強震動に対する挙動を調べるために 2019 年 11 月 4 日に近接人工震源を用いた光センサシステムと従来型加速度地震計との比較実験を行った. 人工地震は震源に「かけや」(質量 6 kg) を用いて, 地点 A, B, C において, 地震計から 1.8 m 離れた位置 (図 3 7 ~ 3 9) にて手動より地震動を発生させた. なお, 地点 A のみ従来型加速度計 (微動計 JU210) が設置されている. 人工地震発生位置 (震源) と光センサシステムの地震計および従来型加速度地震計の配置を地点 A, B, C についてそれぞれ図 3 7, 3 8, 3 9 に示す.

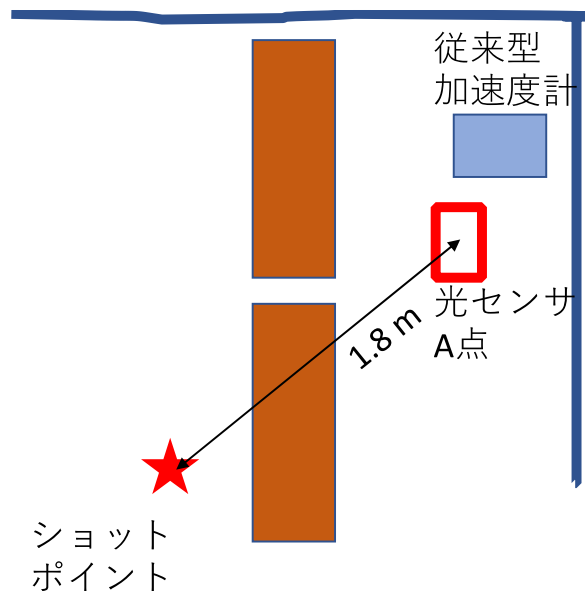
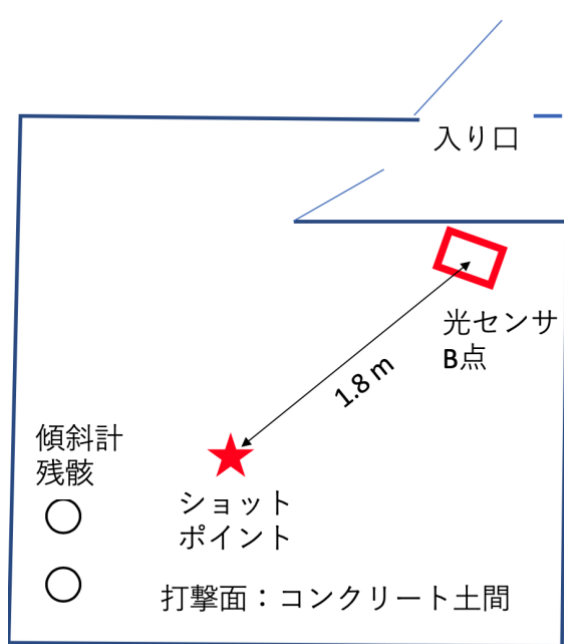


図 37. 地点 A における起震位置と地震計位置との関係



最奥の傾斜計室

図 38. 地点 B における起震位置と地震計位置との関係

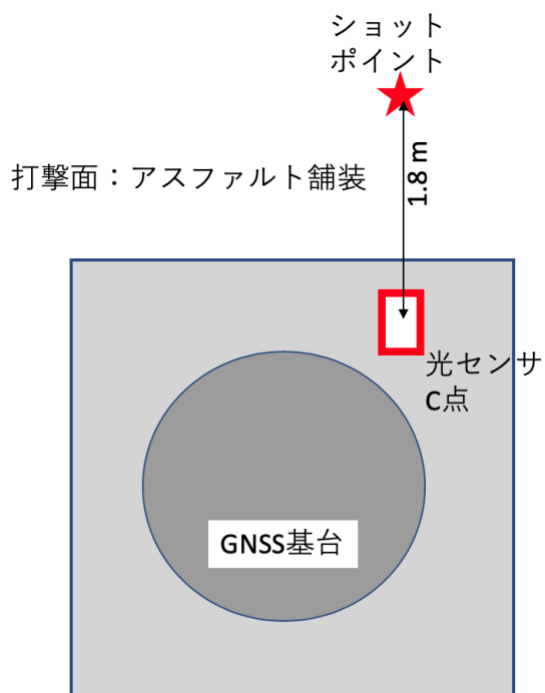


図 39. 地点 C における起震位置と地震計位置との関係

それぞれの地点における起震の様子を図 40 に示す.



図 40. かけやによる起震作業．(a) 地点 A, (b)地点 B, (c)地点 C.

各地点における起震時刻を表 1 に示す．各地点において約 1 分間の間に 3 回起震させた．それぞれの地点において起震時刻時刻に対応させて起震時刻コードを表 7 に示す．起震は 1 箇所あたり 3 回実施した．

表 7. 各地点における起震時刻

地点名	起震時刻	年/月/日	時:分: 秒	起震時刻コード 名
A	2019/11/4	9:55:20	A-1	
A	2019/11/4	9:55:39	A-2	
A	2019/11/4	9:56:00	A-3	
B	2019/11/4	10:13:00	B-1	
B	2019/11/4	10:13:30	B-2	
B	2019/11/4	10:14:00	B-3	
C	2019/11/4	10:19:20	C-1	
C	2019/11/4	10:20:00	C-2	
C	2019/11/4	10:20:20	C-3	

地点 A, B, C における起震時刻 A-1, A-2, A-3, B-1, B-2, B-3, C-1, C-2, C-3 にて光センサシステムおよび従来型加速度計（地点 A の起震時刻 A-1, A-2, A-3 のみ）の地震波形をそれぞれ図 4 1, 4 2, 4 3, 4 4, 4 5, 4 6, 4 7, 4 8, 4 9 に示す．地点 A について起震時刻 A-1, A-2, A-3 の波形（図 4 1, 4 2, 4 3）を比較すると，本実験の最初の起震の A-1 に比べて 2 回目以降の方が明らかに振幅は小さい．これは初回の起震時に

実験者がかけやを思いっきり振ったためである．2回目以降は疲労により若干のかけやの振りが押さえられている．地点 B と C については，実験者がかけやの振りの要領を得ているため，ほぼ一定の力でかけやの振りが行われているため起震が安定していて，起震時刻毎に波形の振幅に大差はない．

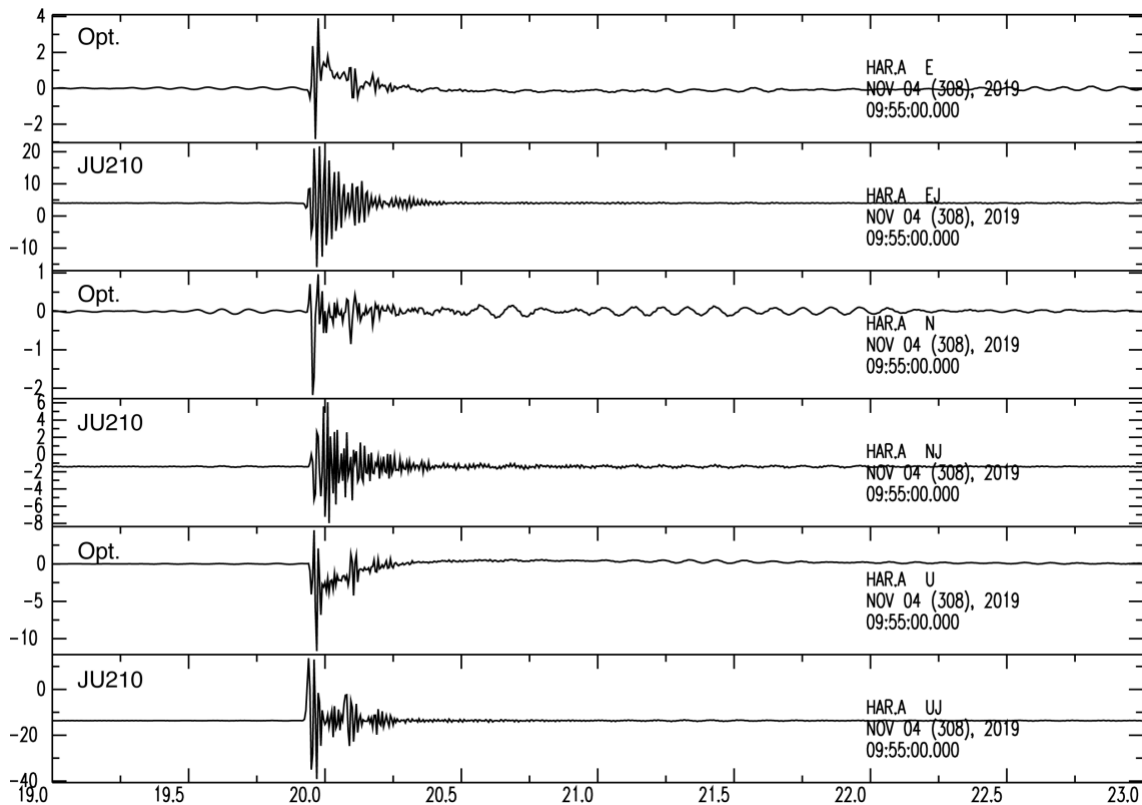


図 41. 起震時刻 A-1 の時の地点 A における波形．横軸は時間で 9:55:00 からの経過時間（秒）．縦軸は加速度（gal）．Opt. は光センサシステムの地震計で，JU210 は微動計による地震波形を表す．

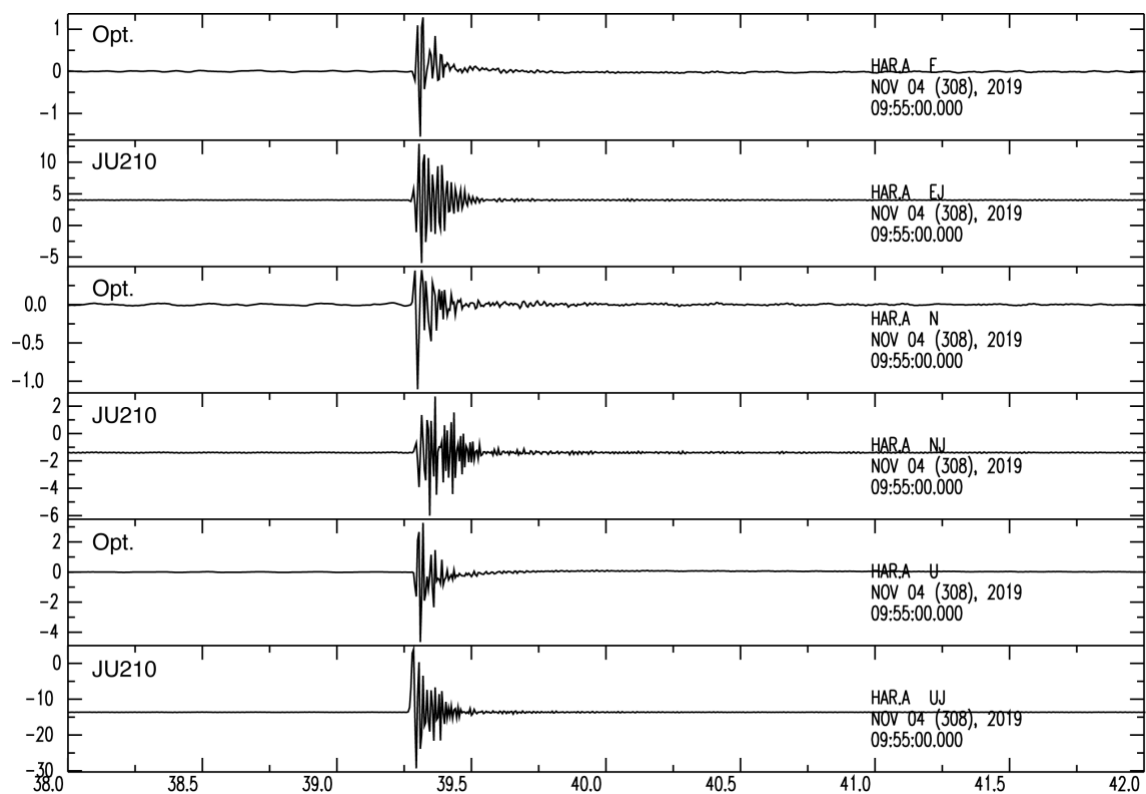


図 42. 起震時刻 A-2 の時の地点 A における波形．横軸は時間で 9:55:00 からの経過時間（秒）．縦軸は加速度（gal）．Opt. は光センサシステムの地震計で，JU210 は微動計による地震波形を表す．

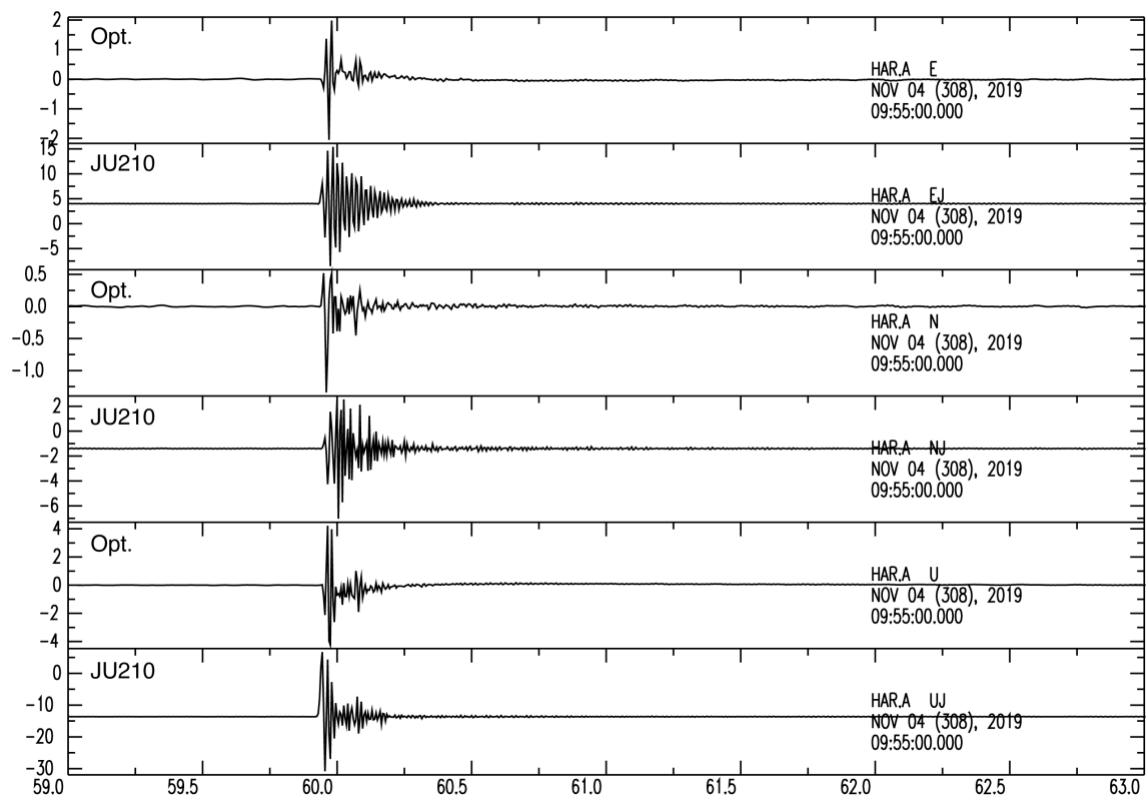


図 43. 起震時刻 A-3 の時の地点 A における波形．横軸は時間で 9:55:00 からの経過時間

(秒). 縦軸は加速度 (gal). Opt. は光センサシステムの地震計で, JU210 は微動計による地震波形を表す.

地点 A における起震時刻 A-1, A-2, A-3 について光センサシステムと微動計の波形を比較する. 光センサシステムの地震計と微動計は近接した場所にあるため, 振幅は同じであると期待されるが, 実際は異なり, 光センサシステムの震動の振幅はピーク to ピーク振幅において微動系の約 5 分の 1 である. 地震計の比較的近傍でかけやを振り下ろすことにより, かけやが地面に当たった時には地面が沈むので, 上下動地震計において震動波形の初動はダウン (引き) にて観測されるはずである. 実際に, 光センサシステムの上下動波形 (図 4 1, 4 2, 4 3) を見ると初動はダウン (引き) となっている. 一方, 微動計の上下動波形では初動はアップ (押し) となっており, 光センサシステムとは逆である. 光センサシステムの波形では振幅が大きな起震時刻 A-1 の場合で顕著であるが, 片ぶれ状の波形が見られるが, 微動計では見られない.

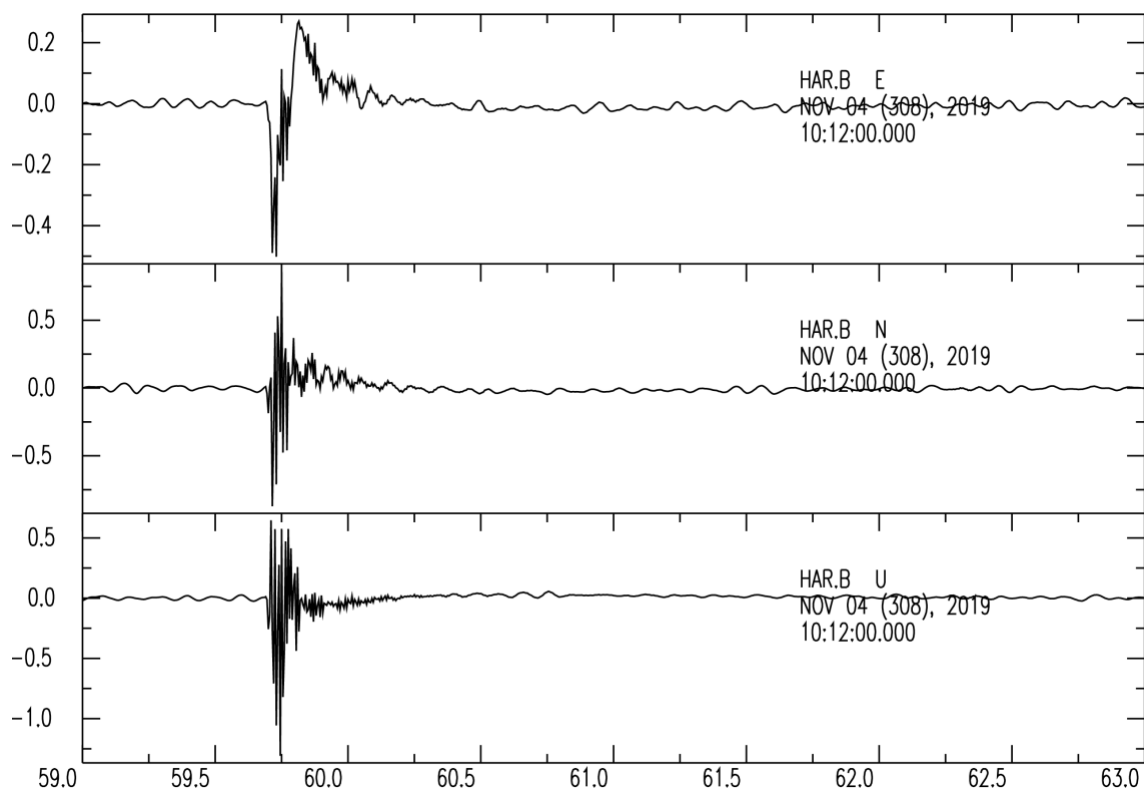


図 44. 起震時刻 B-1 の時の地点 B における波形. 横軸は時間で 10:12:00 からの経過時間 (秒). 縦軸は加速度 (gal).

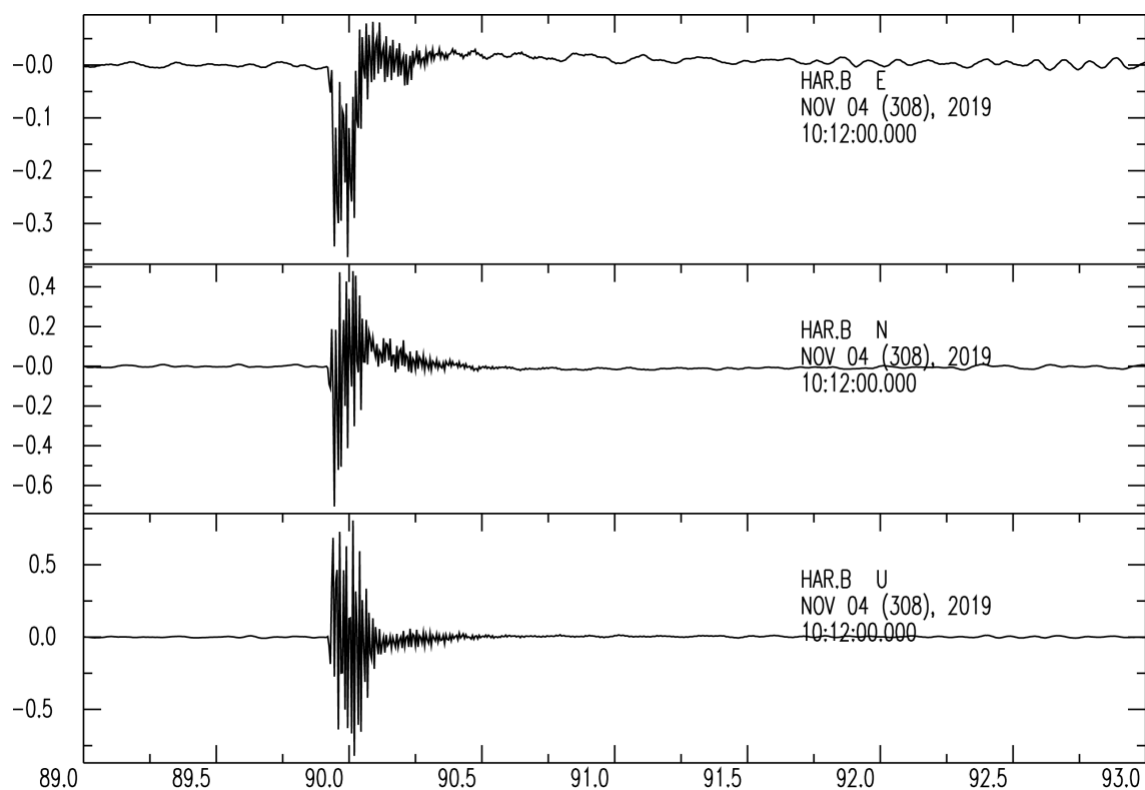


図 45. 起震時刻 B-2 の時の地点 B における波形．横軸は時間で 10:12:00 からの経過時間（秒）．縦軸は加速度（gal）．

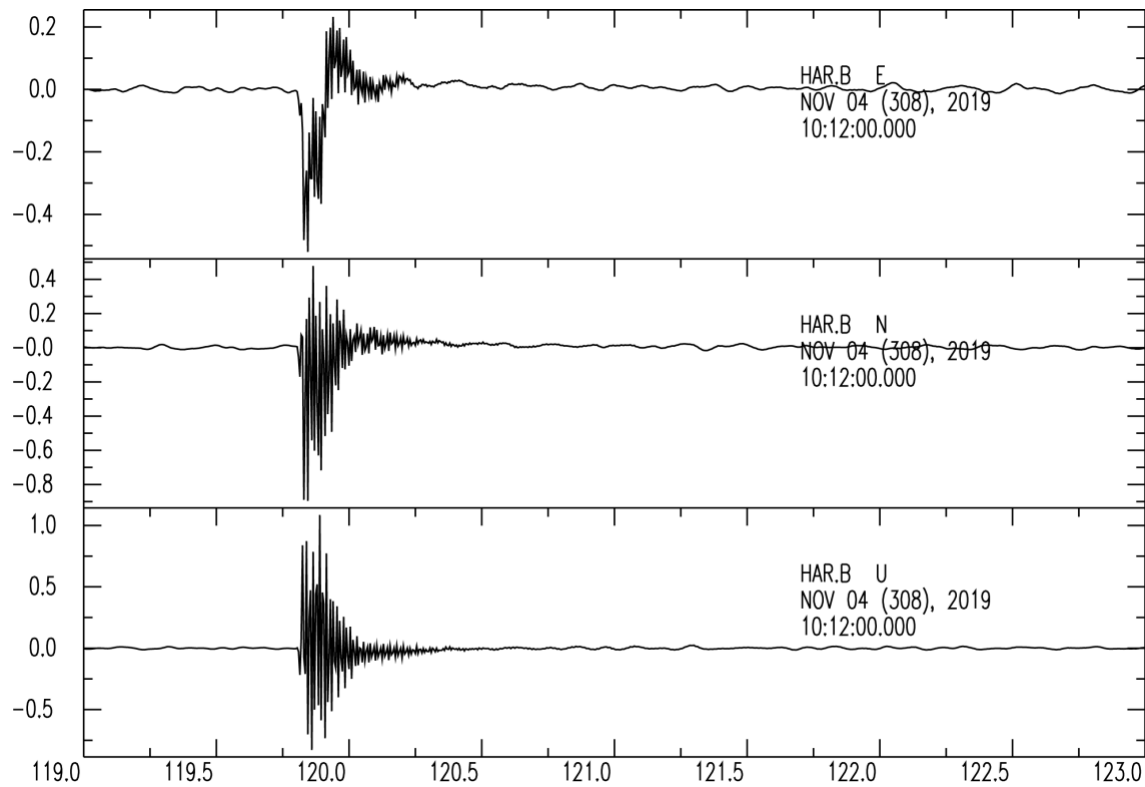


図 46. 起震時刻 B-3 の時の地点 B における波形．横軸は時間で 10:12:00 からの経過時間（秒）．縦軸は加速度（gal）．

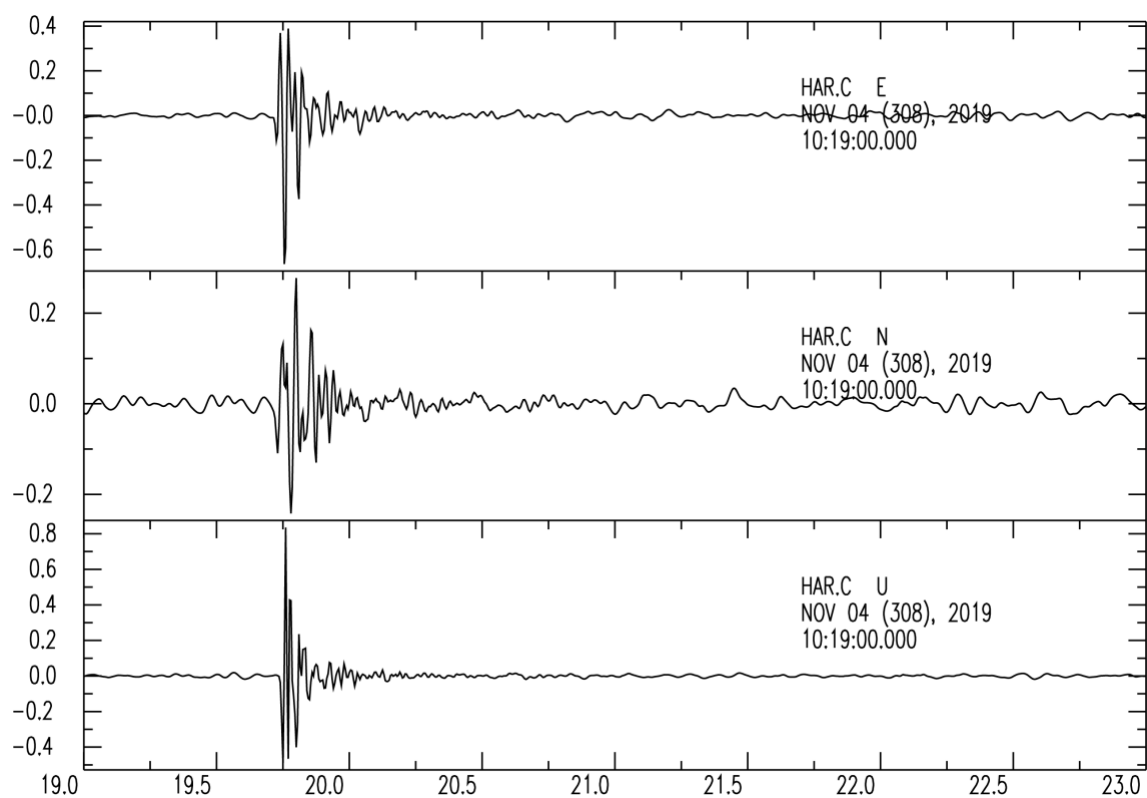


図 47. 起震時刻 C-1 の時の地点 C における波形．横軸は時間で 10:19:00 からの経過時間 (秒)．縦軸は加速度 (gal)．

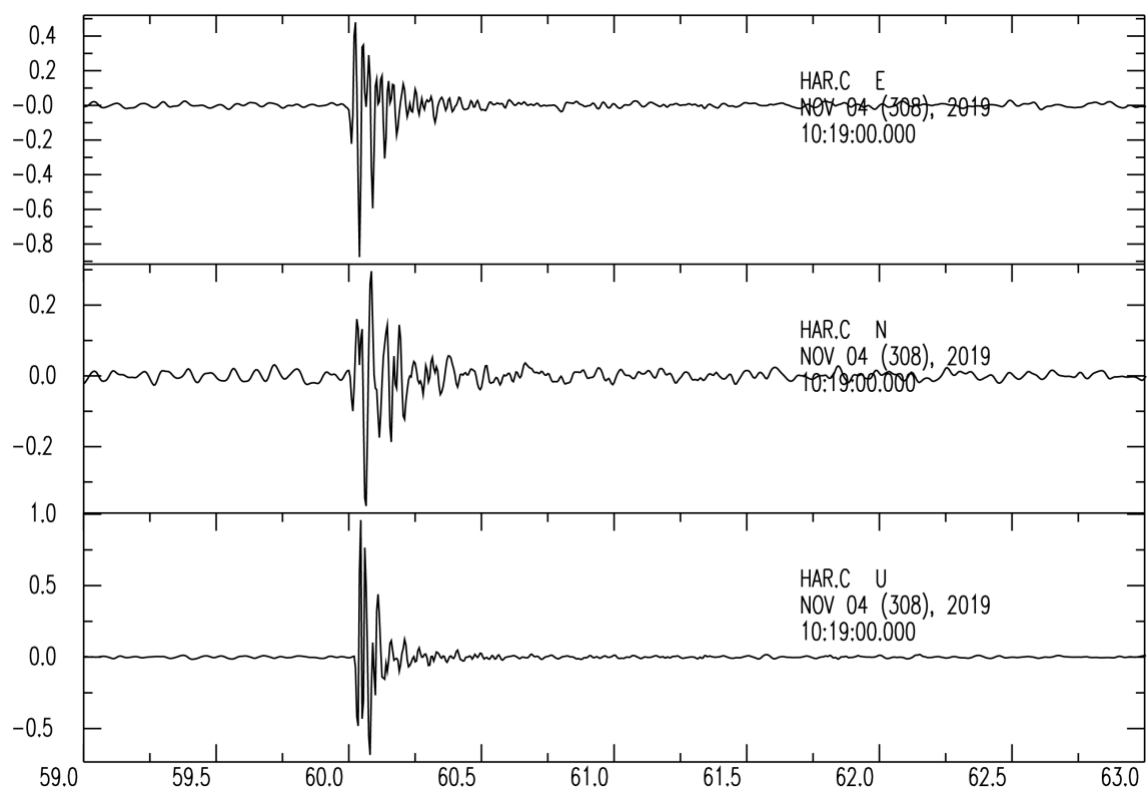


図 48. 起震時刻 C-2 の時の地点 C における波形．横軸は時間で 10:19:00 からの経過時間

(秒). 縦軸は加速度 (gal).

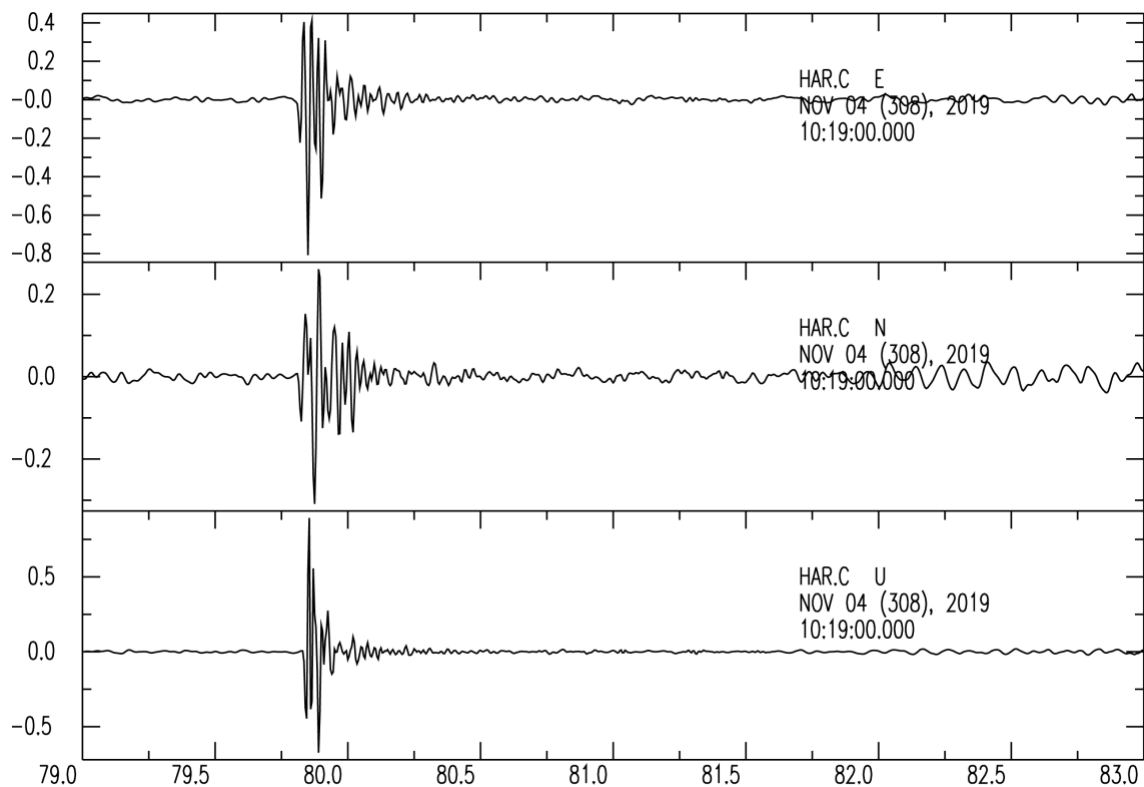


図 49. 起震時刻 C-3 の時の地点 C における波形. 横軸は時間で 10:19:00 からの経過時間 (秒). 縦軸は加速度 (gal).

前述の通り, 近地の比較的大きな地震 (日向灘の M5.2 地震) と遠地地震の波形の比較から光センサシステムと微動計では振幅および位相に大きな違いが見られない. 一方, A 地点における波形 (図 4 1, 4 2, 4 3) に示した通り近接人工地震による波形では振幅と位相に違いが生じている. また, 前述の通り上下動における初動極性は光センサシステムの地震波形はダウン (引き) となり正しい. 地震計の近傍にてかけやを打ち付けることにより, インパルスの強震動が地震計にて観測された. インパルスの強震動にたいするレスポンスが光センサシステムと微動計では明らかに異なると思われる. 特にインパルス震動であれば広帯域にわたって震動振幅があるため, 高周波数側もしくは低周波側そしてその両方の帯域においてレスポンスに光センサシステムと微動計に乖離があると思われる. ランダム加振振台を用いた試験結果 (本課題平成 30 年度成果報告書) によると, 日本航空電子製サーボ型加速度計 JA-40GA と比べて 10Hz 以上では周波数が高くなるにつれて光センサの振幅が小さくなっている. JA-40GA は微動計 JU210 に内蔵されている加速度計である. したがって, 前述の振幅の違いはインパルスの強震動の高周波側で光センサシステムと微動計で振幅特性の差によるものと考えられる. 光センサシステムの地震計は 1000 g で微動計 JU210 は 4500 g と光センサシステムの地震計の方が軽い. また, 両者ともアンカーボルトなどによる地震計のコンクリート面への固定を行っておらず, 光センサシステムはパテでコンクリート面との接触を保ち, 微動計は自重のみにてコンクリート面との接

触を保っていた。したがって、インパルス的な強震動が起こった場合には、地震計とコンクリート面とのカップリングが瞬間的に失われていた可能性があり、特に軽い光センサシステムの地震計において顕著であった可能性がある。したがって、強震動観測をするためには今回は行わなかったアンカーボルトなどによる地面（もしくはコンクリート面）とセンサの固定が必須であろう。

3) リアルタイム処理システムの検討

多成分光センサシステムを火山研究に最適なものにすることを狙い、リアルタイム処理システムサーバを導入しリアルタイム処理システムの検討を始めた。光センサシステムの一部としてアレイ解析およびデータ表示等の必要な機能を組み込むことを最終的な到達点としたが、今年度はその前段階として光センサシステムによる地震観測データをリアルタイムにて地震振幅の Root-Mean-Square (RMS) 値とランニングスペクトルを計算して、画面表示するシステムを導入した。これは、次世代火山研究推進事業の課題 D-2「リアルタイムの火山灰ハザード評価手法の開発」において導入されている地震動からの火山灰放出量の計算にて地震振幅とスペクトルが用いられているソフトをオペレーティングシステム Windows にて稼働するソフトにしたものである。

リアルタイム処理システムの検討にあたって 2019 年 9 月 18 日に産業用 PC の一つである Neousys 製 Nuvo-5002LP（以下、PC）を、光センサシステムの光送受信装置の筐体の上に設置し、光送受信装置と同一のネットワーク内に入れた（写真 1）。なお、このシステムは観測終了の 2019 年 12 月 5 日に撤去した。PC のスペックを表 8 に示す。



写真 1. リアルタイム処理システムの PC 筐体（写真中の黄色四角）。光送受信装置のラックの天井面の上に PC がある。

表 8. リアルタイム処理システム用 PC のスペック

項目	スペック
OS	Windows 10 Enterprise 2016 LTSC
.Net	.Net Framework4.5
Java	Version 1.8
CPU	Intel Core i7-6700
メモリ容量	32GB
HDD 容量	500GB

光センサシステムの光送受信装置にはサーバーが内蔵されており、地震波形は連続データとして 1 分毎に WIN 形式のバイナリファイルにて内蔵 HDD に保存される。光送受信装置のサーバーは WIN パケットデータをネットワーク内の他の PC に送信する機能を有している。そこで、光伝送装置のサーバーから WIN パケットデータをリアルタイム処理システム用 PC の指定の IP アドレス、指定のポート番号にユニキャストにて送信設定をした。リアルタイム処理システムの PC の指定ポートにて WIN パケットデータを受けることにより、リアルタイムにてデータを取得した。そして、表 9 のチャンネルの WIN データをリアルタイム処理システム用 PC では指定ポートの WIN パケットデータをソフトにて 1 分毎の RMS 振幅、最大振幅、スペクトルを計算した。計算結果は、CSV 形式にて 1 日 1 ファイルにて 1 行に 1 分での計算結果として記録させた。リアルタイム処理の結果は、1 分更新にて画面表示させていた (図 5 0)。なお、リモートデスクトップソフト TeamViewer にて、研究室の PC から接続してリアルタイム処理結果画面を確認していた。これにより、光センサシステムからのデータをリアルタイム処理するシステムの構築の足がかりが出来た。

表 9. 光センサシステムの WIN チャンネル (座標は省略, HAR. A, HAR. B, HRA. C はそれぞれ地点 A, B, C)

アドレス	コード	成分	感度 (V/gal)	固有周期 (s)	V/LSB
F220	HAR.C	U	1.0	0.042017	6.7698×10^{-6}
F221	HAR.C	N	1.0	0.042017	6.7698×10^{-6}
F222	HAR.C	E	1.0	0.042017	6.7698×10^{-6}
F224	HAR.B	U	1.0	0.042017	6.7698×10^{-6}
F225	HAR.B	N	1.0	0.042017	6.7698×10^{-6}
F226	HAR.B	E	1.0	0.042017	6.7698×10^{-6}
F228	HAR.A	U	1.0	0.042017	6.7698×10^{-6}
F229	HAR.A	N	1.0	0.042017	6.7698×10^{-6}
F22A	HAR.A	E	1.0	0.042017	6.7698×10^{-6}

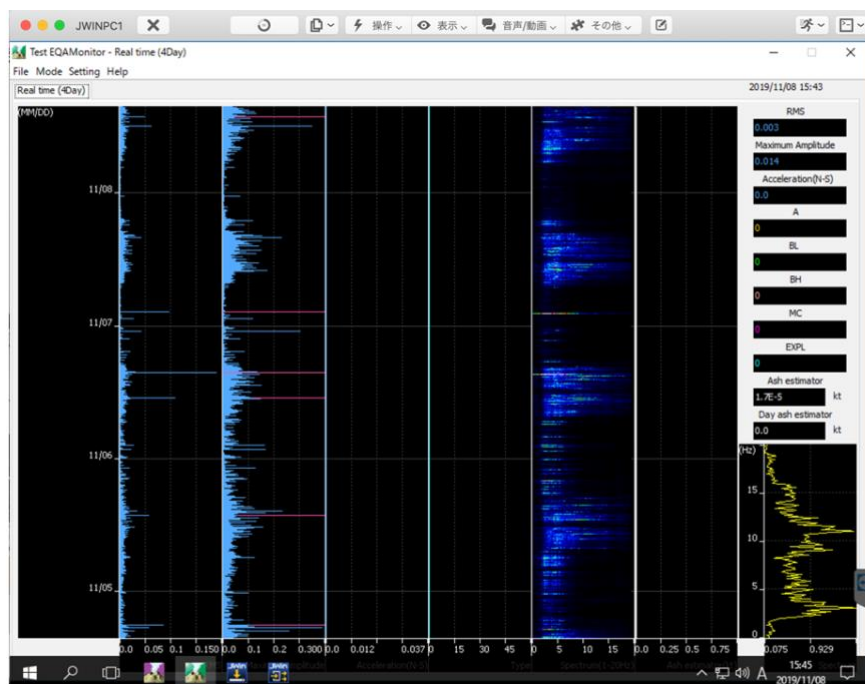


図 50. リアルタイム処理システムの結果表示画面．2019 年 11 月 5 日から 11 月 8 日のデータの例．リモートデスクトップソフト TeamViewer 画面内にある．

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．

(d) 結論ならびに今後の課題

1) 結論

令和元年度は日本で最も噴火をしている桜島にて光センサシステムによる地震観測を 6 月から 12 月の 6 ヶ月間実施した．6 月の設置直後の約 1 ヶ月弱の間システムに不具合があったが，6 月末以降は 9 月の台風に伴う停電を除いて光センサシステムを安定的に運用できた．この間，噴煙高度 5500m の 11 月 8 日の噴火に伴う地震など 260 の噴火に伴う地震を観測した．比較的近地の中地震と遠地の大地震を観測した．12 月 5 日には桜島にて行われた人工地震探査の発破による地震を観測した．既存地震計（微動計）を併設しての観測から，光センサシステムは既存地震計による観測と遜色なく，さらに言うと電氣的ノイズを拾いにくいことも分かった．また，フィルタ処理を施せば遠地地震の波形が明瞭に観測出来ていることが確認できたことから，通常地震観測よりも低周波（もしくは長周期）側の観測が重視される火山地震観測に光センサシステムは有用であることが分かった．一方，かけやによる近接人工地震実験からインパルス的強震動に対するレスポンスが光センサシステムと微動計では異なることが分かったが，強震動の観測においては今回の観測では行わなかったアンカーボルトなどを使ったセンサと地面（コンクリート面）との固定が必要であろう．次世代火山研究推進事業の課題 D-2 にて火山灰放出量推定のために導入

されている地震振幅とスペクトルをリアルタイムに計算するソフトを導入した。このシステムにて光センサシステムからの WIN パケットデータをリアルタイムにて処理して、1 分毎に連続的に振幅、スペクトルを計算させ、9 月 18 日から観測終了の 12 月 5 日まで継続的に運用した。

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ため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た。また、次年度以降に模擬雷をセンサに当てての実験をする予定である。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つつあるため、次年度に着手する。3 番目の耐腐食性能を持つセンサの開発については再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、活発な火口周辺に光ファイバーが敷設されている火山にて実地調査が必要である。

(e) 謝辞

秋田大学大学院国際資源学研究科博士前期課程の竹井瑠一氏にかけやによる実験において起震作業をしていただいた。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。特に、前年度まで課題責任者であった筒井智樹教授には光センサシステムによる観測実施から本報告書とりまとめまで有益なアドバイスを頂いた。元白山工業株式会社の竹内敬二氏には光センサシステムの設置ならびに、システムのソフトウェアのメンテナンスにご支援いただいた。記して感謝いたします。

(f) 引用文献

- 米国地質調査所(2020) Earthquake Hazards Program, Search Earthquake Catalog,
<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>
- Eto, T. (1989) An estimation of the amount and the dispersal of volcanic ash-falls ejected by summit eruptions at Sakurajima Volcano, Proceedings, Kagoshima International Conference on Volcanoes 1988, 448-4451
- Eto, T. (2001) Estimation of the amount and dispersal of volcanic ash-fall deposits ejected by vulcanian type eruption, Report of Faculty of Science,

- Kagoshima University, 34, 35-46
- 江頭庸夫・石原和弘 (1979) 桜島火山周辺における火山灰の降下堆積状態, 火山, 24, 88
- 井口正人・横尾亮彦・為栗健 (2010) 桜島昭和火口噴火の規模について, 京都大学防災研究所年報, 53B, 233-4240
- 鹿児島県 (2020) 鹿児島県ホームページ, URL:
<http://www.pref.kagoshima.jp/bosai/sonae/sakurajima/index.html>
- 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
- 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 平成 30 年度成果報告書 令和元年 5 月 文部科学省研究開発局 国立大学法人秋田大学
- Kennett, B.L.N. and Engdahl, E.R. (1991) Travel times for global earthquake location and phase association, *Geophysical Journal International*, 105, 429-465, doi:10.17611/DP/9991809
- Maeda, Y., Takeo, M., and Kazahaya, R. (2019) Comparison of high- and low-frequency signal sources for very-long-period seismic events at Asama volcano, Japan, *Geophysical Journal International*, 217, 389-404, doi:10.1093/gji/ggz021
- Nakamichi, H., Kumagai, H., Nakano, M., Okubo, M., Kimata, F., Ito, Y. and Obara, K. (2009) Source mechanism of a very-long-period event at Mt Ontake, central Japan: Response of a hydrothermal system to magma intrusion beneath the summit, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 187, 167-177, doi:10.1016/j.jvolgeores.2009.09.006
- Nakamichi, H., Iguchi, M., Triastuty, H., Kuswandarto, H., Mulyana, I., Rosadi, U., Gunawan, H., Suantika, G., Aisyah, N., Budi-Santoso, A., Agung Nandaka, M. (2019) A Newly Installed Seismic and Geodetic Observational System at Five Indonesian Volcanoes as Part of the SATREPS Project, *Journal of Disaster Research*, 14, 1, 6-17, doi:10.20965/jdr.2019.p0006
- Waite, G.P. and Lanza, F. (2016) Nonlinear inversion of tilt-affected very long period records of explosive eruptions at Fuego volcano, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121, 7284-7297, doi:10.1002/2026JB013287

(g) 成果の論文発表・口頭発表等

成果発表

著者	題名	発表先	発表年月日
Tomoki Tsutsui, Yoshiharu Hirayama, Toshiharu Ikeda, Keiji Takeuchi, and Hiroshi Ando	A feasibility study on multi- channeled seismometer system with Phase-Shifted Optical Interferometry for volcanological observations	Journal of Disaster Research	2019 年 6 月

情報発信

- ・ 白山工業 Web ページ「はくさん研究室 光センサー地震計」

URL: http://www.hakusan.co.jp/LAB0/opt_fiber/

(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2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 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評価をする。

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

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、課題責任機関により取得された地震観測データと比較することにより、光センサシステムの耐雷性評価を行う。

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適切な候補地として草津白根山などを想定している。候補地において既存地震観測システムで短期間の地震観測を実施することにより、光センサシステムの試験観測候補地として適切かどうか判断する。

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た取り組みを実施し、プロジェクトの推進に貢献する。関連する会議等への出席のための旅費を計上している。

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」ーサブテーマ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、および後年度における課題B観測対象火山への観測運用投入によって、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。