

(1) 実施機関名：

東北大学理学研究科

(2) 研究課題（または観測項目）名：

繰り返し地震再来特性の理解に基づく地殻活動モニタリング

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

ア. 地震発生機構の解明

イ. 地震断層滑りのモデル化

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

イ. 内陸地震

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生の新たな長期予測

ア. 海溝型巨大地震の長期予測

(3) 先行現象に基づく地震発生の確率予測

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

イ. 首都直下地震

ウ. 千島海溝沿いの巨大地震

(3) 研究基盤の開発・整備

エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

首都直下地震

千島海溝沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

繰り返し地震を用いて断層面の固着状態の時間・空間的变化をモニタリングする手法を高精度化し、地殻活動の理解を進め、地震発生予測の高度化に資する。そのため、プレート境界および内陸地域で発生する繰り返し地震のカタログを整備する。さらに、繰り返し地震の再来特性を理解し、大地震の発生モデルの構築に寄与することで、将来発生する大地震の地震像およびその変動範囲の推定に役立てることを目指す。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

1. 繰り返し地震カタログの更新

前計画で作成した日本の小～中規模の繰り返し地震カタログをアップデートし繰り返し地震活動のモニタリングを行う(2019-2023)。地震の震源再決定、発震機構解の推定および地震波速度構造の時間変化の推定を行い、同一場所での地震の再来を検証する(2020-2023)。また、日本のHi-net以前の大学観測データやS-netやDONET等の新規データの活用も検討し、より長期間および小規模の繰り返し地震の活動を把握する(2020-2023)。また、世界の繰り返し地震活動についても調べ、テクトニクスの違いによる繰り返し地震の特徴の共通点・相違点についての知見を新たに得る(2020-2022)。

2. 断層面固着状態の推定

沈み込むプレート境界および内陸活断層における固着状態の時間・空間的变化をモニタリングする手法を高精度化する。特に、すべりレートの推定に用いるスケーリング則の検討を行う(2019-2023)。震源過程解析や地震波形のシミュレーション、繰り返し地震以外の地震等を用い、すべり推定手法の検討を行う(2019-2023)。さらに、繰り返し地震と通常地震やスロー地震の関係を調査する(2019-2020)。

また、南アフリカ大深度金鉱山において見つかっている、破壊サイズ数十mmという超微小繰り返し地震についても解析を行う(2019-2023)。同観測では14ヶ月の期間に最大50回もの繰り返しを確認されており、活動パターンや震源特性の時間変化を短い時間で検出できると期待される。

3. 地震再来特性の解明

繰り返し地震に見られる再来間隔・規模の揺らぎの特徴や原因を、地震の震源過程解析、統計解析および数値シミュレーションにより明らかにする(2019-2023)。また、中小の繰り返し地震の特性を解明することが大地震の地震像の推定に役立つかどうか調べるために、規模の異なる繰り返し地震の性質を比較検討する(2022-2023)。

4. 重点地域における地震観測

島嶼部地震観測空白域での地震カタログの構築および沿岸・内陸地域において小規模繰り返し地震群発生の特徴を詳細に調べるため、小笠原諸島伊豆鳥島・房総半島・釜石地域など重要な既存の臨時観測点を維持するとともに内陸の地震活動をターゲットとした調査観測も行う(2019-2023)。伊豆鳥島の観測では、この地域の繰り返し地震は、数年程度という比較的長い発生間隔を持つと期待されるため、今期の観測の継続・定期的な保守によりこの地域の繰り返し地震の有無が調査できる。釜石地域においては、計画期間中にM5程度の地震の発生が予測される。この地震の近傍に構築したオフライン観測の継続により、微小地震活動を通じM5程度繰り返し地震の1サイクルにおける準備過程を調べる。

(8) 令和4年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

[繰り返し地震カタログの更新]

・日本全国の定常観測網で観測された地震波形データを蓄積し、日本列島周辺及び世界で発生した繰り返し地震活動の検出を行った。また、繰り返し地震とその周辺で発生する地震活動を用いてすべり速度変化の短期的・局所的な時空間変化を推定することを試みた。2011年東北地方太平洋沖地震の大すべり域周辺において、巨大地震発生後のすべり状況変化について調べたところ、宮城県北部では現在も余効すべりの継続が見られた。一方、その他の地域では数年の間にほぼ収束していること、2021年から2022年にかけて発生したM6、M7クラスの地震発生に伴い非地震性すべりが発生したことを確認した。

・東北沖において、ケーブル式の海底地震観測網であるS-netの活用し、小さな地震まで繰り返し地震の解析に用いるため、深層学習モデル(PhaseNet)による地震の検知に着手した。

・波形相関に基づく類似波形探索は、ノイズに埋もれた微小なイベントの抽出を可能とし、地震活動解析において重要な役割を果たしているが、計算コストが大きく大規模なデータセットへの適用は簡単ではない。これを解決するため、波形の特徴を64bit程度のコンパクトなバイナリコードに圧縮するハッシュ関数を深層学習を用いて作成し、室内水圧破碎実験で得られた10MHzサンプリング連続収録データに対して類似波形探索を試みた。地表観測で典型的な100Hzサンプルに換算すると、5.8年分に相当するサンプル数の連続データ16ch分に対して、この深層ハッシングの技術を用いてテンプレート波形なしに各窓間の類似度を総当りで探索する演算実施したところ、120スレッド並列化のもと

で、15.5時間で実現できることが確認できた。

[断層面固着状態の推定]

・2021年3月と5月に宮城沖で発生した Mw7.0と Mw6.7のプレート境界型地震の破壊過程と周辺の地震の震源分布を調べた。その結果、2021年3月 Mw7.0の地震が、東北沖地震後に出現した Mw5-6の準繰返し地震の震源から開始したことが分かった。更に Mw5-6準繰返し地震の震源域の内部で更に小さい繰返し地震が複数発生していたことが分かった(図1)。

・2015年5月に宮城気仙沼沖で発生した Mw6.8の地震の破壊過程と周辺の震源分布を調べた。その結果、2015年 Mw6.8の地震が、2002年、2011年3月、2011年5月、2012年、2020年に Mw6.0-6.4の地震と同じ地震性パッチを破壊していたことが分かった。

[地震再来特性の解明]

・これまでに開発した小～中規模の繰返し地震活動に対する非定常更新過程モデルを拡張し、相対的な応力蓄積率の時空間変化を時間域の自然3次スプライン関数と空間域の薄板スプライン関数とのテンソル積表現により推定した上で、その将来推移を短期的に予測して繰返し地震の将来発生確率を評価する手法を開発した。提案手法を東北地方太平洋沖に存在する小～中規模の繰返し地震群の2014～2020年の発生データへと適用し、2020年中の四半期毎の繰返し地震発生確率を評価した上で発生実績との比較検証を行った結果、ポアソン過程に比べて十分に高い予測性能が示された(図2)。

・背景地震と繰返し地震の関係を引き続き検討し、繰返し地震活動が意味することの検討を継続した。

・スロー地震の連鎖破壊モデルに速度状態依存摩擦構成則を適用することで、継続時間の長い破壊過程を説明することに成功した。これにより、観測された伝播速度から摩擦特性を推定した。

[重点地域における地震観測]

・釜石市周辺では2018年より岩手県釜石市周辺に13点の臨時観測点を設置し、小さな地震まで含めた地震活動を調査してきた(図3)。地震計は主に固有周期2Hzの地震計を用い、バッテリー(一部ソーラーパネル併用)による電源を用い低消費電力型のデータロガーでCFカードに収録した(図3)。データの回収およびバッテリーの交換は、東北大学遠野地震観測所から3ヶ月に1回程度の頻度で行った(図3)。この観測網に関して東北沖地震から10年が経ち十分なデータが得られたことから撤収を行なった。観測網の効果を調べるために、2018年8月1日から10日の10日間について、臨時観測点のデータ使用前後の釜石沖地震周辺の地震の震源分布を比較した。鈴木(2022)が東北地方の地震波形データを用いて作成した深層学習モデルを用い、P波・S波の到着時刻を自動で読み取った。この深層学習モデルは、Zhan and Beroza (2019)により開発されたPhaseNetというプログラムについて、東北地方の地震データ約90万個を学習させたものである。その後REAL (Zhang et al., 2019)と呼ばれるプログラムで、地震ごとに読み取り値をまとめ、さらにWINと呼ばれるプログラム (Hirata and Matsu'ura, 1987)で震源の決定を行った。2018年8月時点で収録を開始していた6点の観測点を使用した場合とそうでない場合を比較すると、およそ1.7倍の個数の地震が検知できるようになった(図4)

・鳥島においては、衛星携帯電話を使ったオンデマンド型テレメータ装置を設置しているが、2022年度も順調に稼働中である(図5)。低速の衛星電話回線を使用しているため、連続データを取得できないが、日時分を指定すれば、翌日の接続時に回収可能な状態にある。山階鳥研職員に依頼して連続データが含まれているCFカードを2022年11月に回収した。2023年3月にも回収予定である。電源としているソーラーパネルの枠の腐食が激しく、近い将来本格的な補修が必要になっている。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

・プレート境界滑りの時空間変化の把握能力の向上に向け、基礎的な解析手法の改良、応用、解釈の面で進展している。

・M7クラスの地震の地震破壊の開始と完了の特徴を調べることにより「地震発生過程の解明とモデル化」に貢献した。

・相対的な応力蓄積率の時空間変化があるという現実的な状況においても確率的地震予測を行えるスキームを構築し、その性能評価を行なった。

・プレート固着剥がれ過程に大きな影響を与える特徴的すべり量について、岩石実験とは独立に推定することにより、地震サイクル数値モデルの入力値を絞り込み、地震発生過程の定量的評価の精度が向上する。

(9) 令和4年度の成果に関連の深いもので、令和4年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Yoshida, K., T. Matsuzawa, N. Uchida, 2022, The 2011 Mw7.0 and Mw6.7 Miyagi-Oki earthquakes nucleated in a deep seismic/aseismic transition zone: Possible effects of transient instability due to the 2011 Tohoku earthquake, *J. Geophys. Res.*, 127, 8, 10.1029/2022JB024887, 査読有, 謝辞無
Yoshida, K., 2023, The Mw 6.0-6.8 quasi-repeating earthquakes off Miyagi, Japan with variable moment release patterns due to a hidden adjacent slip patch, *J. Geophys. Res.*, 10.1029/2022JB025654, 査読有, 謝辞無
Ariyoshi, K., 2022, Extension of aseismic slip propagation theory to slow earthquake migration, *J. Geophys. Res.*, 127, 7, 10.1029/2021JB023800, 査読有, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

Igarashi, T. and A. Kato., 2022, Spatiotemporal Changes of Inter-plate Aseismic Slip before and after Megathrust Earthquakes Determined from Repeating Earthquakes Recorded by the Japanese Seismic Network, AGU Fall meeting, S22C-0183
野村俊一・内田直希・尾形良彦, 2022, レート間非地震性すべり速度の時空間変化を考慮した繰り返し地震の短期予測, 日本地震学会2022年度秋季大会, S23-03
吉田 圭佑・松澤 暢・内田 直希, 2022, The 2011 Mw7.0 and Mw6.7 Miyagi-Oki earthquakes, northeastern Japan, nucleated at a seismic/aseismic transition zone in the postseismic period of the 2011 M9 Tohoku earthquake, 日本地球惑星科学連合2022年大会
吉田 圭佑・内田 直希, 2022, 地震の破壊過程の複雑性の決定要因：繰り返し地震と他の地震の比較からの示唆, 日本地球惑星科学連合2022年大会
吉田 圭佑, 2022, 同一アスぺリティで発生する地震破壊の多様性と共通点：2015年宮城沖の Mw6.8地震と Mw6.0-6.4の準繰り返し地震, 日本地震学会2022年度秋季大会, S08P-03

(10) 令和4年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

項目：ソフトウェア開発（解析）：シミュレーション

概要：Ariyoshi (2022 JGR)で用いられたソースコードと結果。

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：

調査・観測期間：

公開状況：公開中（データベース・データリポジトリ・Web）

<https://doi.org/10.5281/zenodo.6651635>

(11) 令和5年度実施計画の概要：

引き続き繰り返し地震活動のモニタリングを行う。また、スロースリップイベント発生域周辺における地震活動を調査し、短期的なすべり速度変化の検出可能性を検討する。

・本年度の研究によって、深層ハッシング技術は演算速度及びメモリ消費量の観点から、数十Chの数年間の連続データに対して、類似度の総当たり計算が実現できることが確認できた。本技術においては、ハッシュ関数の改善によって類似波形の検出パフォーマンスを向上させられると考えられ、令和5年度は損失関数や訓練データセットの改善によるパフォーマンス向上を試みる。また、自然地震の観測データへの適用も始める予定である。

・提案手法のスプライン関数の線形補外による予測はやや安定性に欠けるため、スプライン関数の代わりにガウス過程を用いた相対的蓄積率の推定・予測手法を開発し試行する。

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

内田直希（東北大学）, 松澤暢（東北大学）, 吉田圭佑（東北大学）

他機関との共同研究の有無：有

五十嵐俊博（東京大学地震研究所）,加藤愛太郎（東京大学地震研究所）,加藤尚之（東京大学地震研究所）,前田拓人（弘前大学）,直井誠（京都大学防災研究所）,山下裕亮（京都大学防災研究所）,松島健（九州大学）,木村尚紀（防災科学技術研究所）,松原誠（防災科学技術研究所）,有吉慶介（海洋研究開発機構）,鹿児島大学,金沢大学,横浜市立大学,首都大学東京,統計数理研究所,気象研究所,UC Berkeley,早稲田大学の研究者とも連携して実施

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東北大学大学院理学研究科

電話：022-225-1950

e-mail：

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：内田直希

所属：東北大学理学研究科・東京大学地震研究所

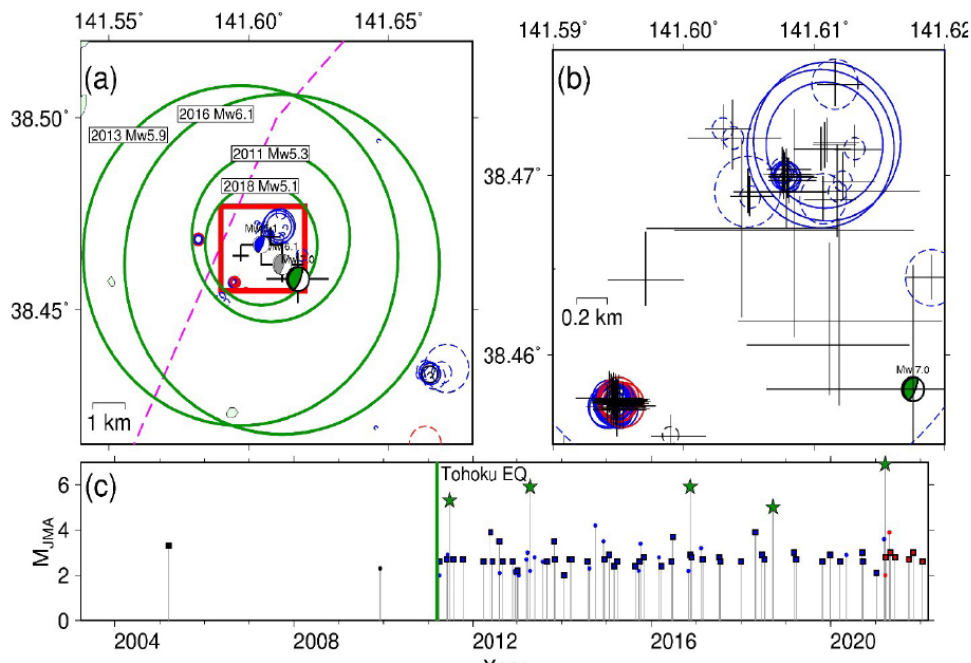


図1. 2021年3月 Mw7.0地震震源周辺の地震活動。

地震の規模を応力降下量 3MPaに相当する丸のサイズで表す。(b)は (a)の領域の赤枠部分の拡大図。(c) 地震の発生時とマグニチュードの関係。星は Mw5-6の準繰り返し地震と 2021年3月 Mw7.0地震。

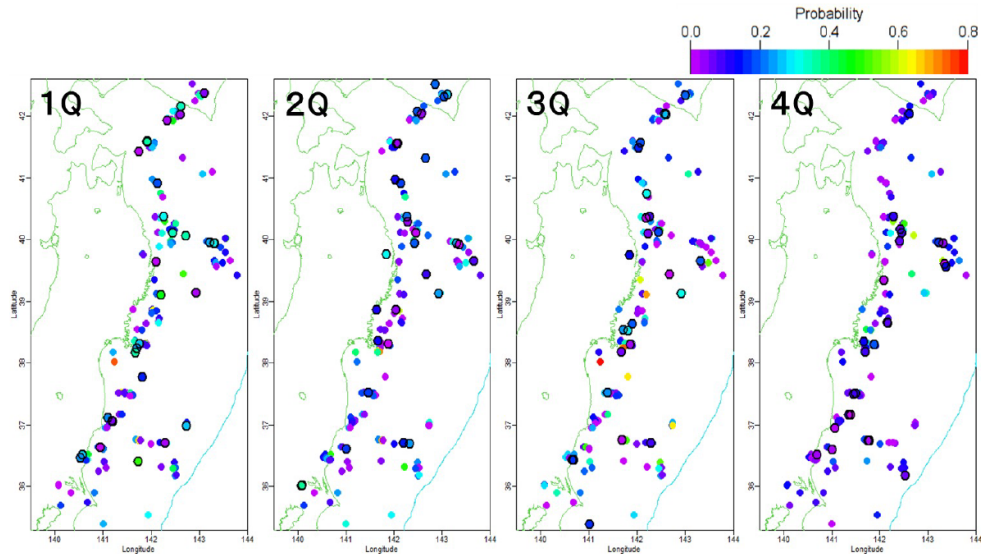


図2. 2020年の各四半期を予測期間として、直前までの発生状況から評価した繰り返し系列毎の地震発生確率。黒囲みは予測期間内に実際に発生した繰り返し系列。

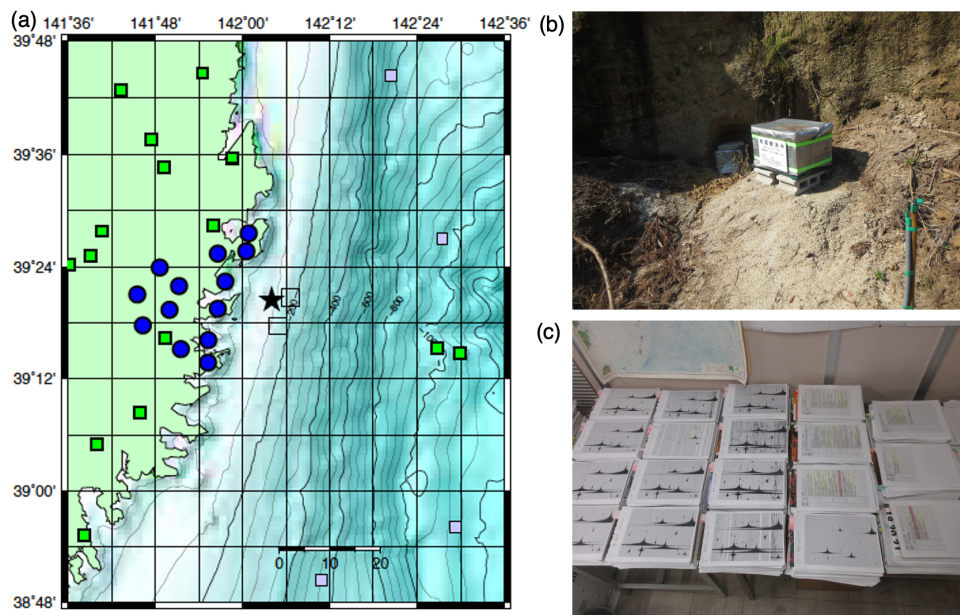


図3. 岩手県釜石市付近での観測状況

(a)釜石沖地震（星印）周辺の地震観測点。緑四角は既存の定常観測点，灰色四角はケーブル式の海底観測点で，今回設置した観測点は青丸。星印の右の大きい四角は，臨時の海底観測点。(b) 観測点の例（箱崎観測点）。まん中が収録装置等を収めた箱で，左奥が地震計。(c) チェック用にプリントアウトされた観測点ごとの地震波形と保守記録。

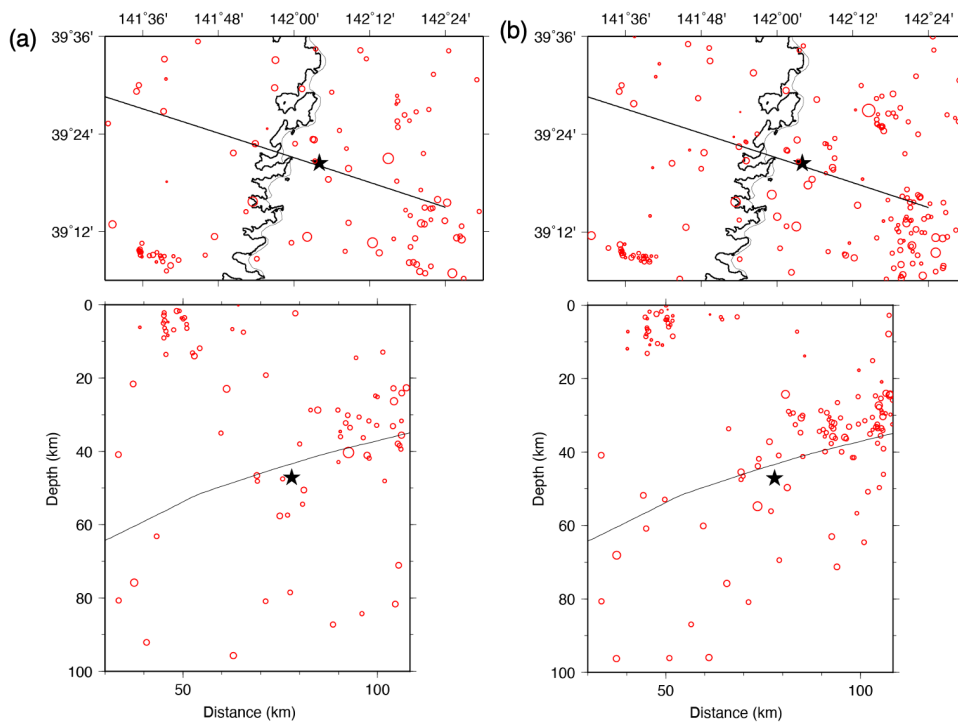


図4. 臨時観測点使用前後の震源分布の比較

(a)は臨時観測点を未使用、(b)は臨時観測点を使用したもので、2018年8月1日から8月10までの震源分布を示す。黒丸は2018年の釜石沖地震の震源。上は平面図、下は断面図を示す。臨時観測点使用前後でそれぞれ、104個、175個の地震が決定された。

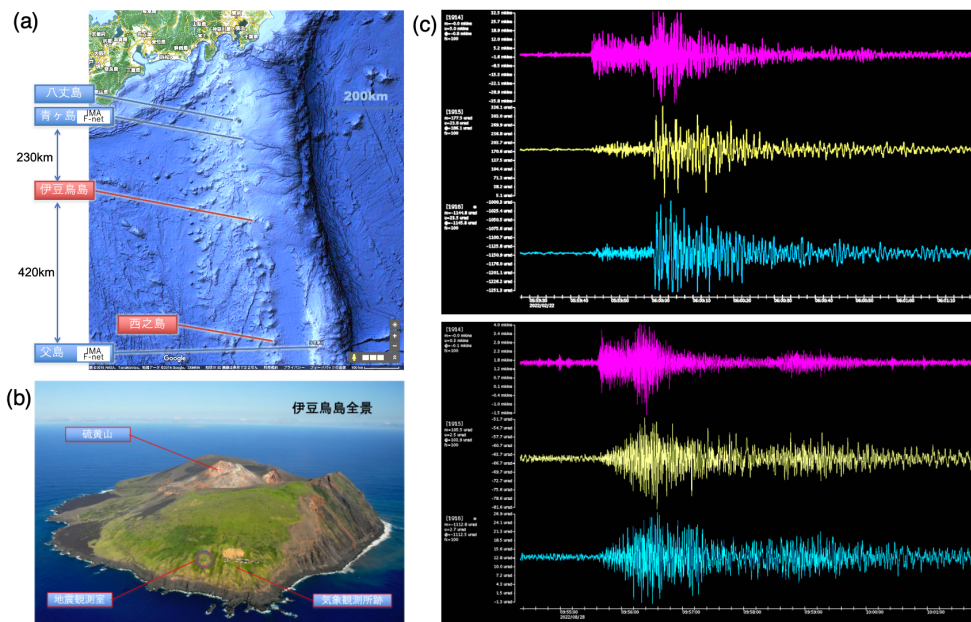


図5. 伊豆島における地震観測状況

(a) 伊豆島島の位置 (b) 伊豆島島全景と観測点の位置 (c) 最近の波形例。上下の地震の震源要素は、それぞれM 5.0 - Izu Islands, Japan, 2022-02-21 20:59:23 (UTC), 29.541°N 140.814°E, 98.1 km depth およびM 5.2 - Izu Islands, Japan

2022-08-28 00:54:51 (UTC) 32.501°N 142.438°E 10.0 km depth.