

3. 3 強震動予測のための調査研究

3. 3. 1 地下構造等のモデル化

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 強震動予測のための調査研究：地下構造等のモデル化

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人東京大学地震研究所	准教授	三宅 弘恵
国立大学法人東京大学地震研究所	教授	古村 孝志
国立研究開発法人防災科学技術研究所	主任専門研究員	先名 重樹
国立大学法人東京工業大学環境・社会理工学院	教授	山中 浩明

(c) 業務の目的

断層帯周辺において臨時強震観測と微動観測を行い、サブテーマ1の構造探査等やサブテーマ2の地殻構造と整合する地下構造モデルを構築する。特に、関東平野と基盤速度、断層帯を境に変化する地下構造、相模湾からメガスラストに至る地下構造を把握することを目的とする。また、強震動予測において近年重要視されている非線形応答計算について、試算を行った後、面的展開できる手法を検討・開発し、高震度の強震動予測の高度化に資する。

(d) 3か年の年次実施業務の要約

1) 令和5年度：

断層帯を中心に、臨時強震観測を行い、地盤震動特性を把握した。また、サブテーマ1の反射法探査等やサブテーマ2の地殻構造と整合する地下構造モデル構築のため、資料収集を行った。特に、関東平野と基盤速度、断層帯を境に変化する地下構造、相模湾からメガスラストに至る地下構造を把握するための資料収集を重点的に行った。

2) 令和6年度：

断層帯周辺において臨時強震観測を引き続き行うと共に、微動観測を併用し、平坦地から丘陵地に至る地盤震動特性を定量化する。特に、関東平野の基盤速度、断層帯を境に変化する地下構造、相模湾からメガスラストに至る地下構造を把握する。また、強震動予測において近年重要視されている非線形応答計算について、断層帯周辺の既存強震観測点を対象に試算を行う。

3) 令和7年度：

断層帯を中心とする、臨時強震観測と微動観測を併用した地下構造モデルを構築する。また、高震度を対象に、非線形応答計算を面的展開できる手法を検討・開発し、サブテーマ3.2の強震動予測結果と比較すると共に、高震度の強震動予測の高度化に資する。

(2) 令和 5 年度の成果

(a) 業務の要約

断層帯を中心に、臨時強震観測点を 14 点設置し、2024 年能登半島地震を含む複数の観測記録に基づき、地盤震動特性の把握を進めた。また、サブテーマ 1 の反射法探査等やサブテーマ 2 の地殻構造と整合する地下構造モデル構築のため、既存の微動アレイ探査を含め、必要となる情報収集を行った。また、強震動予測において必要となる非線形応答計算に向けて、既往の強震観測記録を用いた非線形特性の特性を試算した。これら一連の業務より、当該地域においては、地質区分を意識した強震動予測のための地下構造のモデル化が必要であることがわかった。

(b) 業務の成果

1) 既存の地下構造モデル化に関する情報収集

三浦半島を含む南関東地域を対象に、これまでの既存の地下構造モデル、およびこれらの地下構造モデル化に使用されたデータに関する情報収集を行った。

当該地域は相模湾を含み、様々なデータに基づく地下構造モデルが提案されているため、その変遷を収集した。図 1 に示す通り、地震基盤の深さがモデルに拠って大きく異なることを確認した。

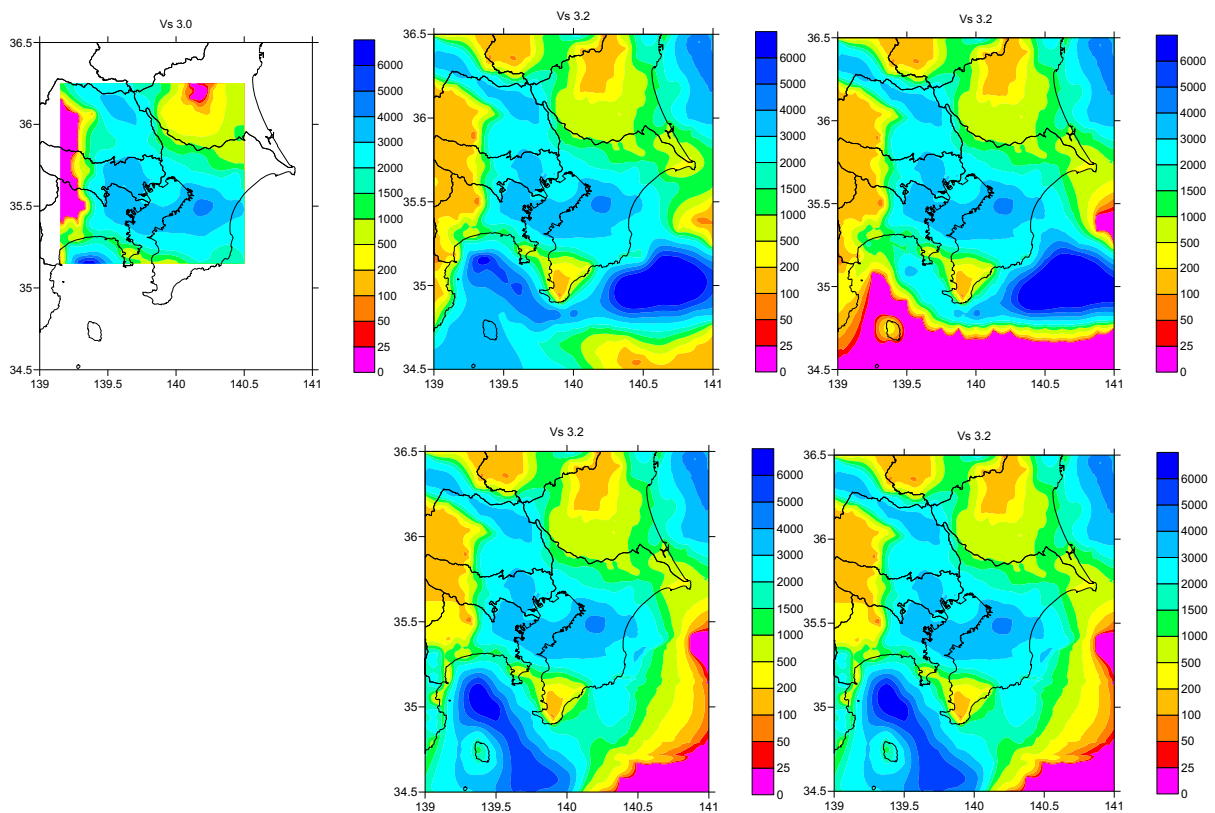


図 1 関東地域の地下構造モデルにおける地震基盤の深さ (m) の変遷。

上段左：2004 年、上段中：2005 年、上段右：2006 年、下段中：2007 年、下段右：

2008 年。

続いて、これらの地下構造モデル化に使用されたデータに関する情報収集を行った。具体的には、関東地方の浅部・深部統合地盤モデル（J-SHIS V3.2 および J-SHIS V4）、主に浅部地盤作成に使用されたボーリングデータ、微動アレイ探査（小アレイ・大アレイ）の分散曲線および H/V スペクトル比、統合化地下構造データベースに収録されている微動アレイや地震波探査（反射法・屈折法）などを対象とした。特に、神奈川県においては、図 2 に示すように、小アレイは 1960 地点、大アレイ（アレイ半径が 400m 以上）は 27 地点の微動アレイ探査のデータが確認された。これらの情報は、次年度からの地下構造のモデル化に活用される。

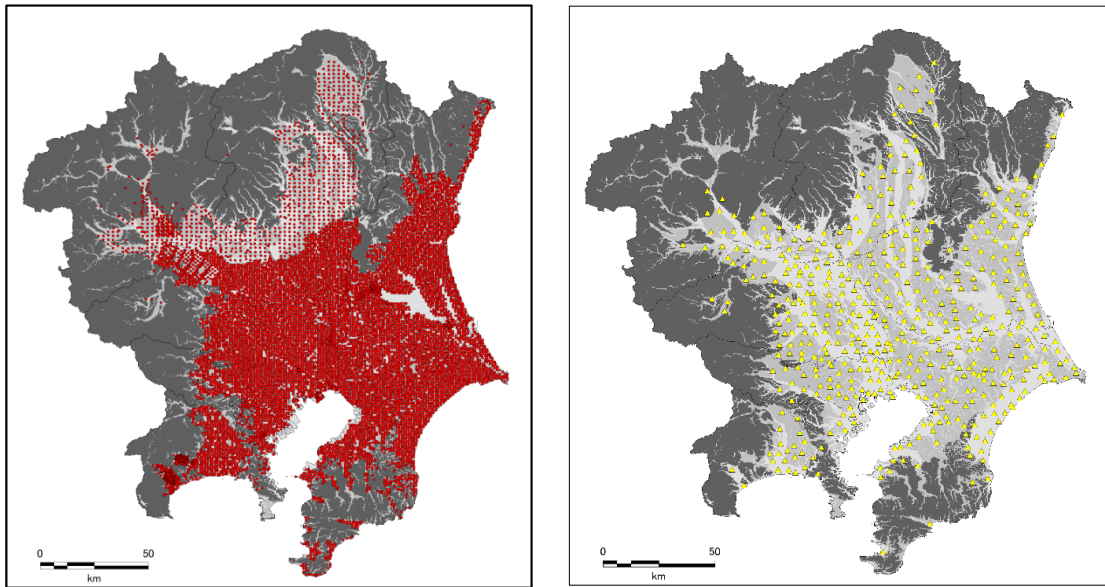


図 2 微動アレイ探査の実施状況に関する調査例（左：小アレイ、右：大アレイ）。

2) 臨時強震観測

三浦半島の想定断層周辺において、下記の臨時観測点を設置し、観測を開始した。

a) 臨時観測の概要

対象地域での地震動予測高度化のために、同地域での地震動特性を明らかにし、地盤構造のモデル化するための基礎的な資料を取得することを目的として、強震動の臨時観測を実施した。

図 3 には、本業務において設置した臨時強震観測点の位置を示している。この三浦半島の既存の強震観測点の位置も黒丸で示されている。既存の強震観測点は、同半島の北部に集中し、南部では少ない。こうした点を考慮して、本臨時強震観測では図 2 の 14 地点（赤三角）を選定した。特に、断層帯の走向にほぼ直交するような 3 つの線上に並ぶように観測点を配置した。表 1 には、観測点の詳細が示されている。

図 4 には、三梨・矢崎（1968）を参考に作成したこの地域の表層地質を示す。表層地質は複雑であり、大きく 4 つの地質に区分できる。主要な地質区分は、第三紀の三浦層群であり、三浦半島の北部と南部で認められる。半島中央部では、より古い地

層である葉山層群の隆起帯（葉山-嶺岡隆起帯）が存在する。この隆起帯は、重力異常の分布からも確認されている（地質調査総合センター，2013；江戸ほか, 2018）。また、横須賀や久里浜などの海岸沿い地域では沖積層や埋立地盤も認められる。さらに、上記の隆起帯の南には、更新世の礫や砂岩から成る地層が広く分布している。これらのうち、観測点 1、3、5、10 の表層地質は、海岸沿いや谷の完新世の軟弱な地層であり、観測点 11、12 では更新世砂岩である。観測点 2、4 と南部の観測点 13、14 の地質は、第三紀三浦層群であり、その他の観測点（6～9）では、この地域で最も古い地層である葉山層群となっている。

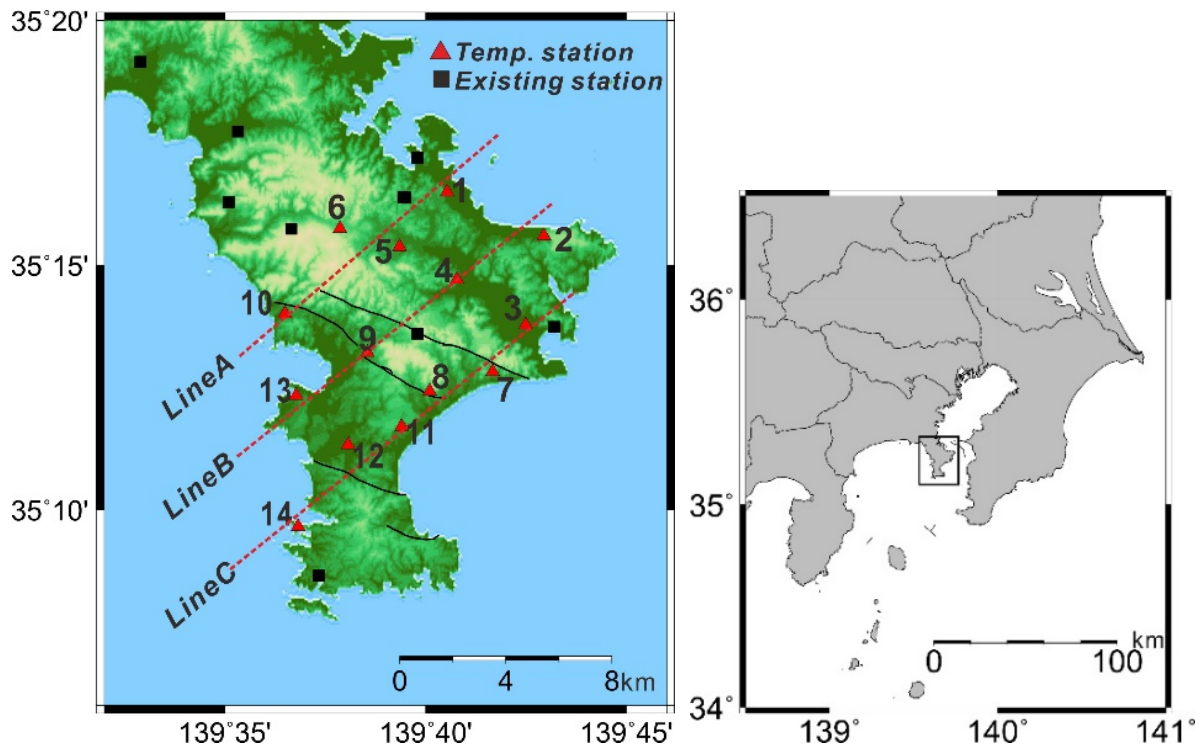


図3 臨時強震強震観測点（▲）と既存の強震観測点（■）の位置。
黒線は、主要な活断層を示す。

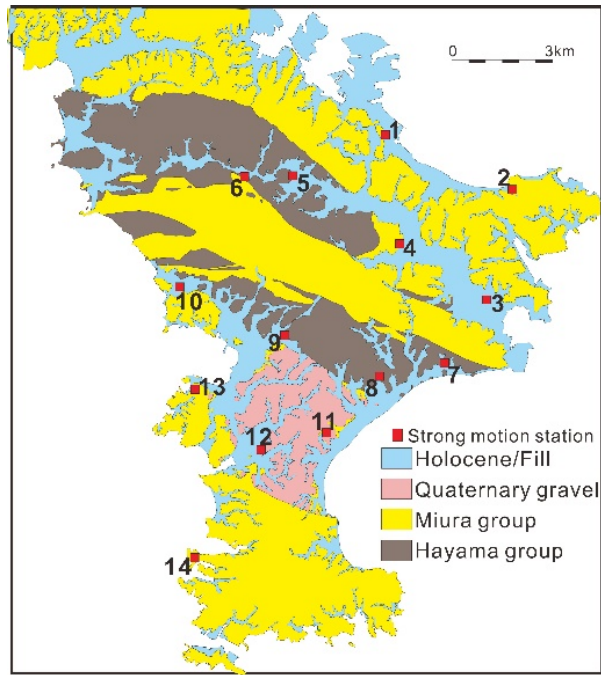


図4 三浦半島の表層地質区分と臨時強震観測点。

表1 臨時強震観測点の位置と表層地質。

番号	観測点	所在地	緯度	経度	表層地質区分
1	田戸小学校	横須賀市	35.27497	139.67554	完新世
2	馬堀小学校	横須賀市	35.26005	139.71577	三浦層群
3	久里浜小学校	横須賀市	35.22968	139.70821	完新世
4	森崎小学校	横須賀市	35.24520	139.67961	三浦層群
5	城北小学校	横須賀市	35.25624	139.65584	完新世
6	あおぞら幼稚園	葉山町	35.26258	139.63119	葉山層群
7	野比東小学校	横須賀市	35.21383	139.69452	葉山層群
8	津久井小学校	横須賀市	35.20713	139.66831	葉山層群
9	富士見小学校	横須賀市	35.22027	139.64255	葉山層群
10	大楠小学校	横須賀市	35.23349	139.60827	完新世
11	旭小学校	三浦市	35.19502	139.65660	更新世
12	初声中学校	三浦市	35.18880	139.63447	更新世
13	長井小学校	横須賀市	35.20555	139.61291	三浦層群
14	東大三崎	三浦市	35.16101	139.61381	三浦層群

b) 観測機器の設置

図3に示した各臨時強震観測点では、地震計（日本システム工業，JEP-6A3）とデータロガー（白山工業，LS8800）で構成される観測機器を設置した。図5に、設置した機器の写真を示す。地震計は、過減衰タイプのムービングコイル形式の加速度波形を出力する強震計であり（例えば，津野・工藤，2008）、その中でも高い感度（約10V/g）のタイプを採用した。図の地震計には、金属とプラスチックのケースに入った2種類が使われているが、両者の内部には同じ仕様の地震計が内蔵されている。デ

ータロガーには、連続記録を取得できるタイプの記録器を採用し、加速度レベルが小さい遠地の地震による長周期地震動も観測できるようにした。これらの観測機器を稼働させるために、各地点では一般車両用バッテリーを2個用意した。バッテリーとデータロガーは、プラスチックのコンテナ箱に収納した。



図5 臨時強震観測点に設置した観測機器の例。

図6には、各臨時強震観測点の設置状況の写真を示す。各観測点では、学校などの敷地内の建物の屋外のコンクリートのたたき部に機器を設置した。図4や図5に示すように、設置した主な建物は、RC造の低層の校舎や体育館である。できるだけ人の往来の少ない建物の裏側に機器を設置した地点が多い。

観測は、2023年9月から開始され、現在も継続中である。バッテリーやメモリーカードの交換を3か月程度ごとに実施した。



図6 各臨時強震観測点で観測機器の設置状況の例（矢印は設置した地震計）。

c) 地震観測記録の例

本業務の臨時強震観測によって図7に示す地震の記録が得られている。これらは、M3以上の地震であり、震央距離が大きい2024年1月1日の能登半島地震（M7.6）等による地震動も観測されている。

得られた記録の例として、2024年能登半島地震の本震（Mj7.6、深さ16km）の記録について説明する。図8には、加速度波形が示されている。ハムノイズが大きい地点もあり、周期0.1～20秒のバンドパスフィルター処理を行っている。波形は、図3に示す3つの線上の観測点毎にまとめて表示し、横軸は発震時からの走時に対応する。上下成分と南北成分では、長周期の後続位相の振幅や到着時間の変化が大きいが、東西成分では160秒付近の顕著な長周期成分は、すべての観測点で明瞭に認められる。図9には、数値積分した速度波形が示されている。長周期成分が3成分とも明瞭である。これらの長周期成分では走時差も確認でき、表面波の伝播によるものと考えられる。160～200秒までの時間帯では、この長周期成分の観測点毎の差異は少なく、震源で生じ、共通の経路を伝播した表面波と考えられる。しかし、200秒以降では、

各地点で差異が大きくなっており、深部地盤構造がより複雑になっている可能性が高いと考えられる。

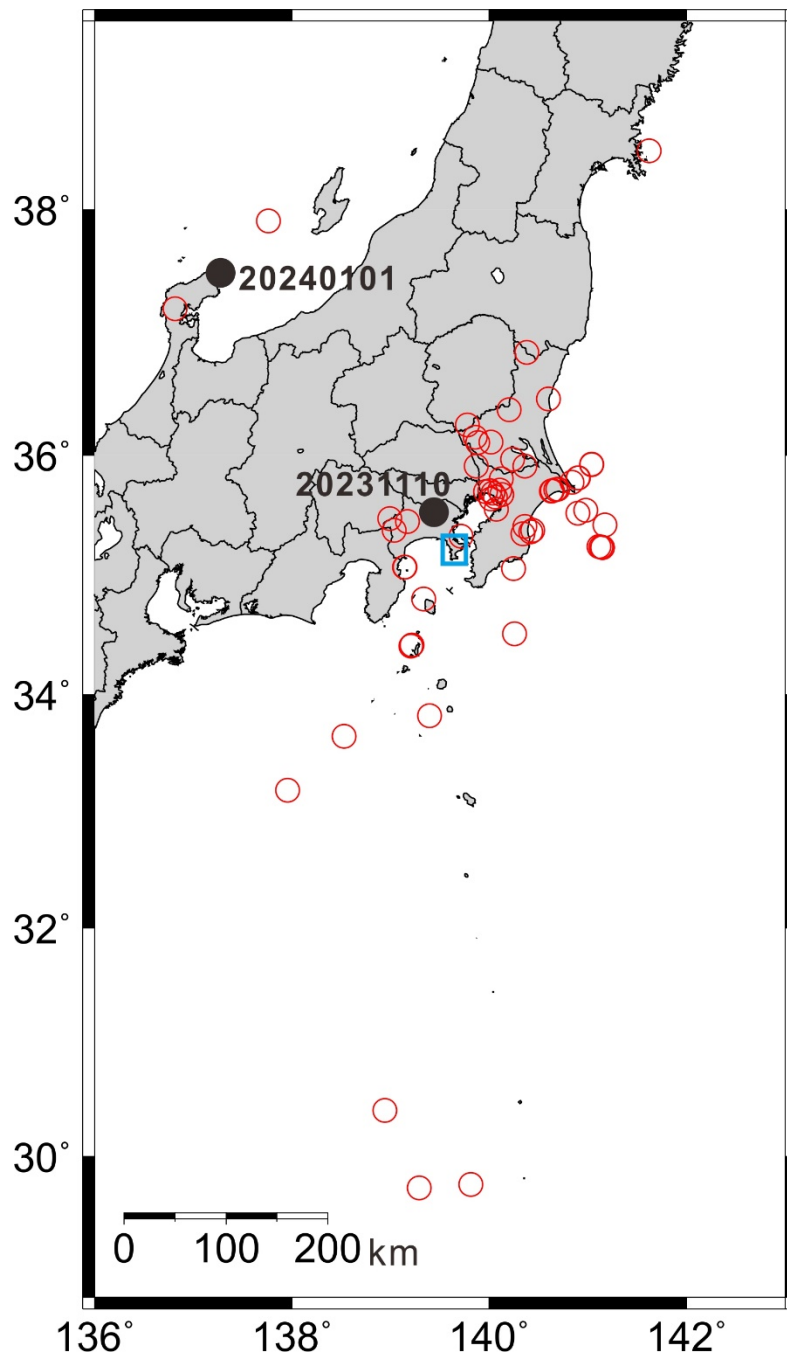


図7 臨時強震観測点で地震記録が得られた地震の震央。

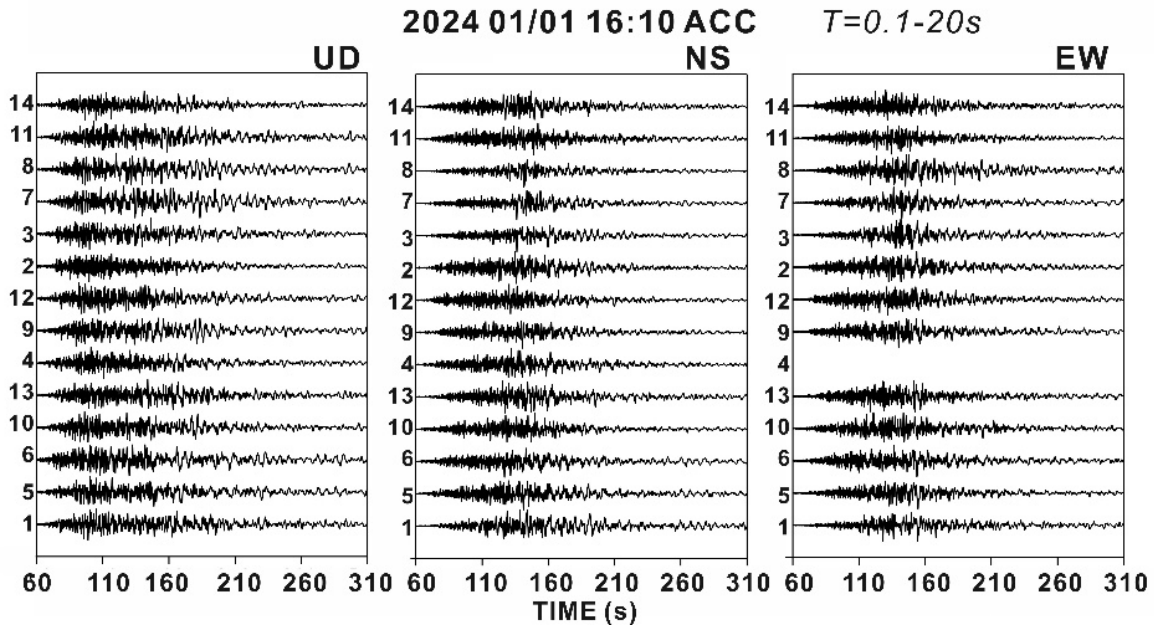


図8 2024年能登半島地震の加速度波形。

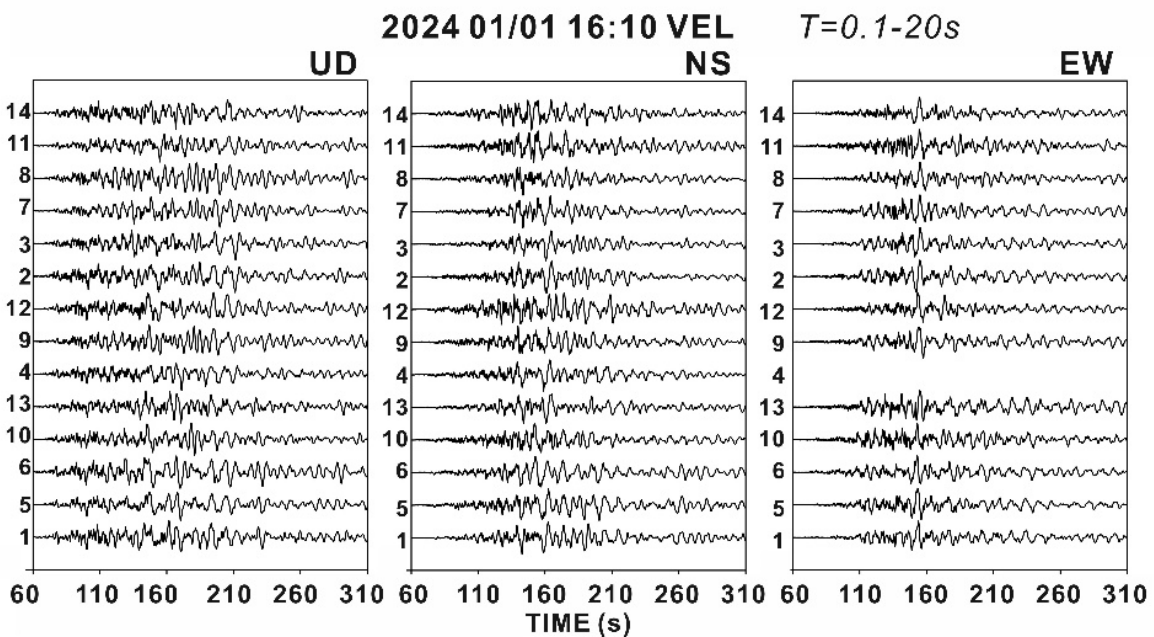


図9 2024年能登半島地震の速度波形。

図10には、南北方向の記録の減衰5%の疑似速度応答スペクトルが示されている。周期6秒付近には、多くの観測点に共通したピークが認められる。各地点とも周期0.5～3秒の帯域で振幅が大きくなっているが、この周期帯域での振幅については、観測点毎の変化が著しい。特に、観測点6でのこの周期帯域のスペクトル振幅は、観測点のなかで最も小さくなっている。この観測点の表層地質は、図4に示すように葉山層群となっており、深部地盤での増幅効果が小さいと考えられる。

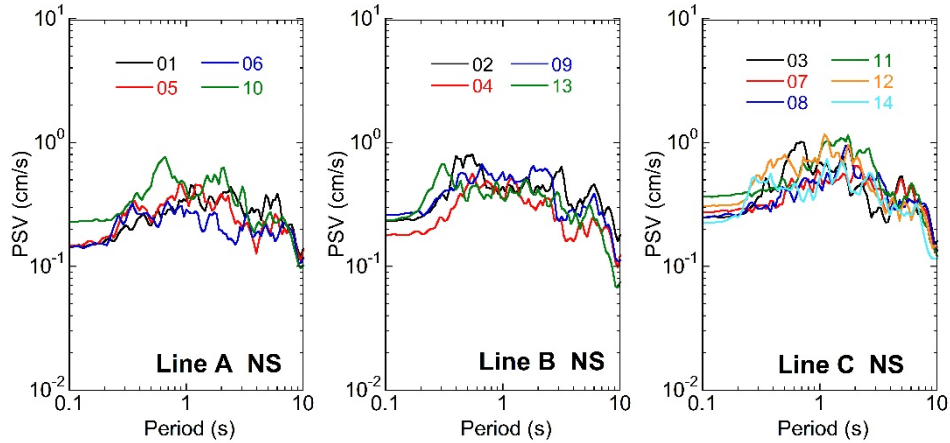


図 10 2024 年能登半島地震の南北方向の加速度記録の疑似速度応答スペクトル（減衰 5%）。

次に、短周期成分が卓越した地震記録の例として、2023 年 11 月 10 日の神奈川県西部の地震（Mj4.2，深さ 105km）の例を説明する。この地震の震源は深く、対象地域の観測点では、地盤に入射する波動は、ほぼ鉛直に伝播すると考えられる。図 11 と図 12 には、この地震による加速度および速度波形を示す。上述の理由で周期 0.1～20 秒のフィルター処理をしている。S 波の主要動部では、短周期成分が卓越し、観測点毎の差異が大きい。速度波形では、S 波初動後の 5～10 秒間の後続位相の形状が異なり、地盤構造の著しい変化を示唆している。南北方向の加速度記録の疑似速度応答スペクトルが図 13 に示されている。周期 0.2～0.5 秒の帯域で振幅の変化が大きい。図 4 に示す地質との関連は明確ではない。これらの短周期成分の振幅変化の理解には極表層の地盤の情報が重要であり、今後、臨時観測点での浅部地盤を対象とした微動探査などの実施が必要である。

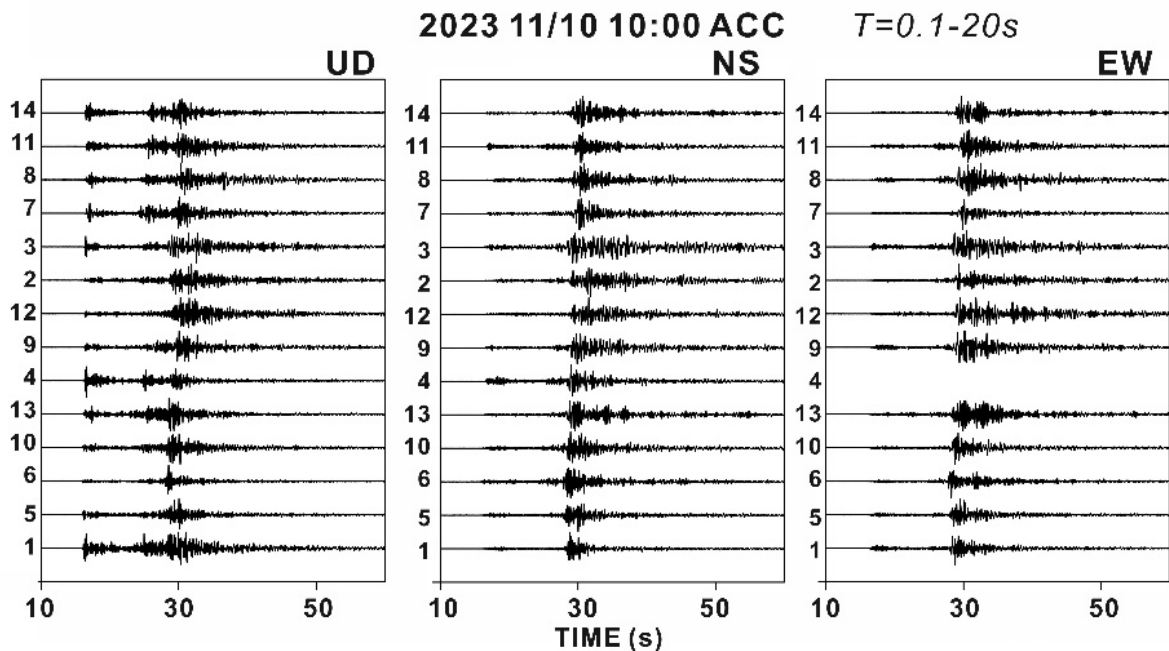


図 11 2023 年 11 月 10 日神奈川県西部の地震の加速度波形。

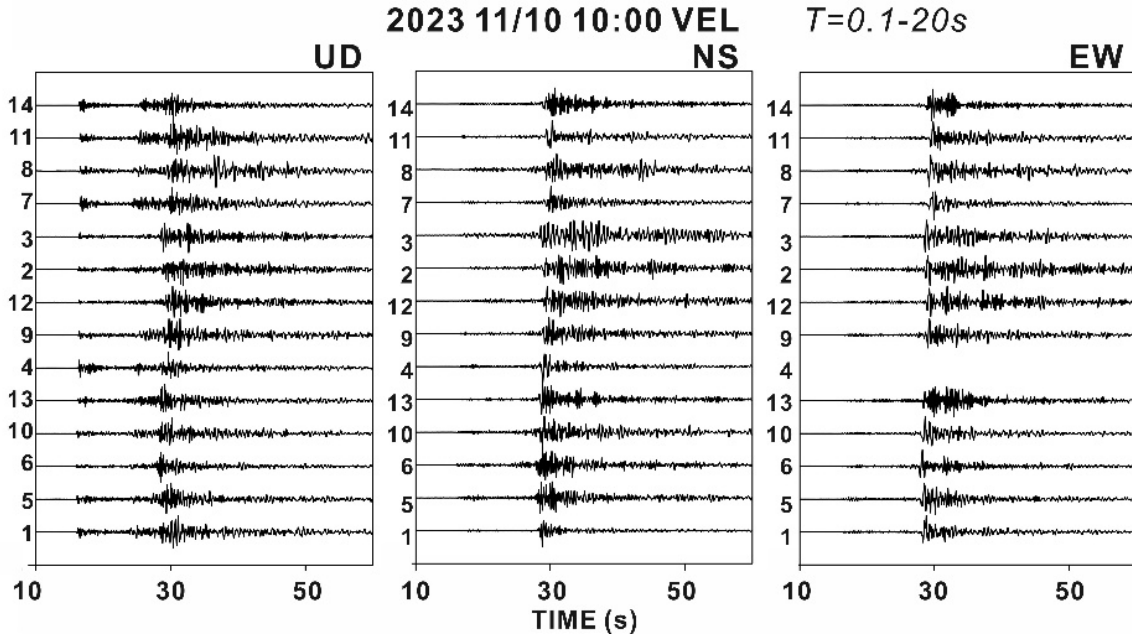


図 12 2023 年 11 月 10 日神奈川県西部の地震の速度波形。

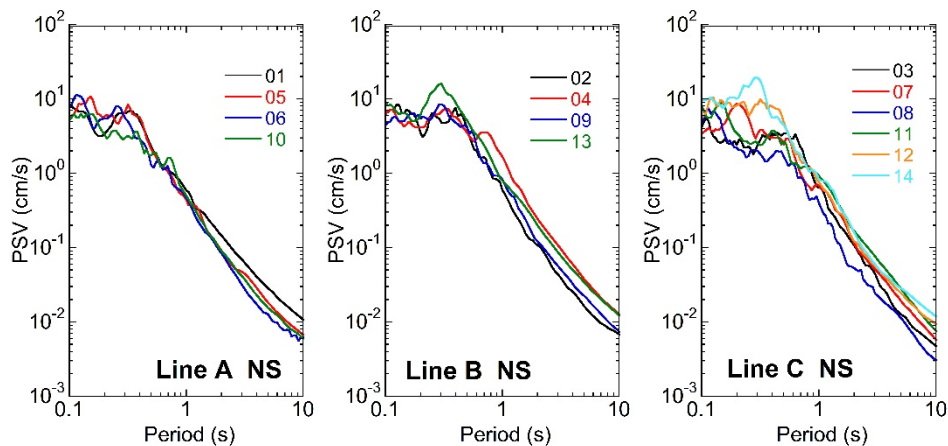


図 13 2023 年 11 月 10 日神奈川県西部の地震の南北方向の加速度記録の疑似速度応答スペクトル（減衰 5%）。

本業務で実施した三浦半島での臨時強震観測によって中小地震による強震記録の取得を開始した。周期 0.2 秒から 6 秒程度までの周期帯域で地震動の振幅は空間的な変動が大きいことから、これらの伝播性状の分析によって浅部地盤および深部地盤モデルに関する詳細な知見が得られると期待される。そのためにも、今後、強震記録をさらに蓄積する必要がある。

以上のように、三浦半島中部から南部に存在する三浦半島断層群の周辺地域の 14 地点において臨時強震観測を実施した。観測では、感度の高い強震計を用いて、連続記録を取得しており、比較的震央距離が大きい地震による地震動も含めて観測可能とし、強震記録の蓄積を目指している。約 5 か月間の観測により、長周期地震動が多く含まれる強震記録を観測することができた。2024 年能登半島地震の強震記録から、

対象地域内では長周期地震動特性の変動が大きく、地下構造の影響が強いことがわかった。また、中規模の地震記録から、周期 0.5 秒以下の成分も観測点毎の差異があることを示した。今後、強震記録を蓄積し、既存の観測点の強震記録も併せて対象地域の地下構造のモデル化や地盤震動特性の解明へ取り組んでいく予定である。

3) 強震観測点の非線形特性の調査

三浦半島の想定断層周辺の強震観測点において、観測記録に見られる非線形特性の調査を行った。堆積層の厚い横浜や厚木では、入力地震動の大きさに拠らず、ほぼ一定の周期で卓越が確認されたが、堆積層が薄く、今回の調査の主対象である KiK-net 葉山では、入力地震動レベルに拠って、卓越周期が大きく変化することが確認された。地中の入力に対する地表の応答の増減も、観測点によって傾向が異なるため、より多くの観測点を対象とした調査を進める必要がある。これらの状況を踏まえ、次年度から、これらの非線形特性を再現する手法の検討を開始する。

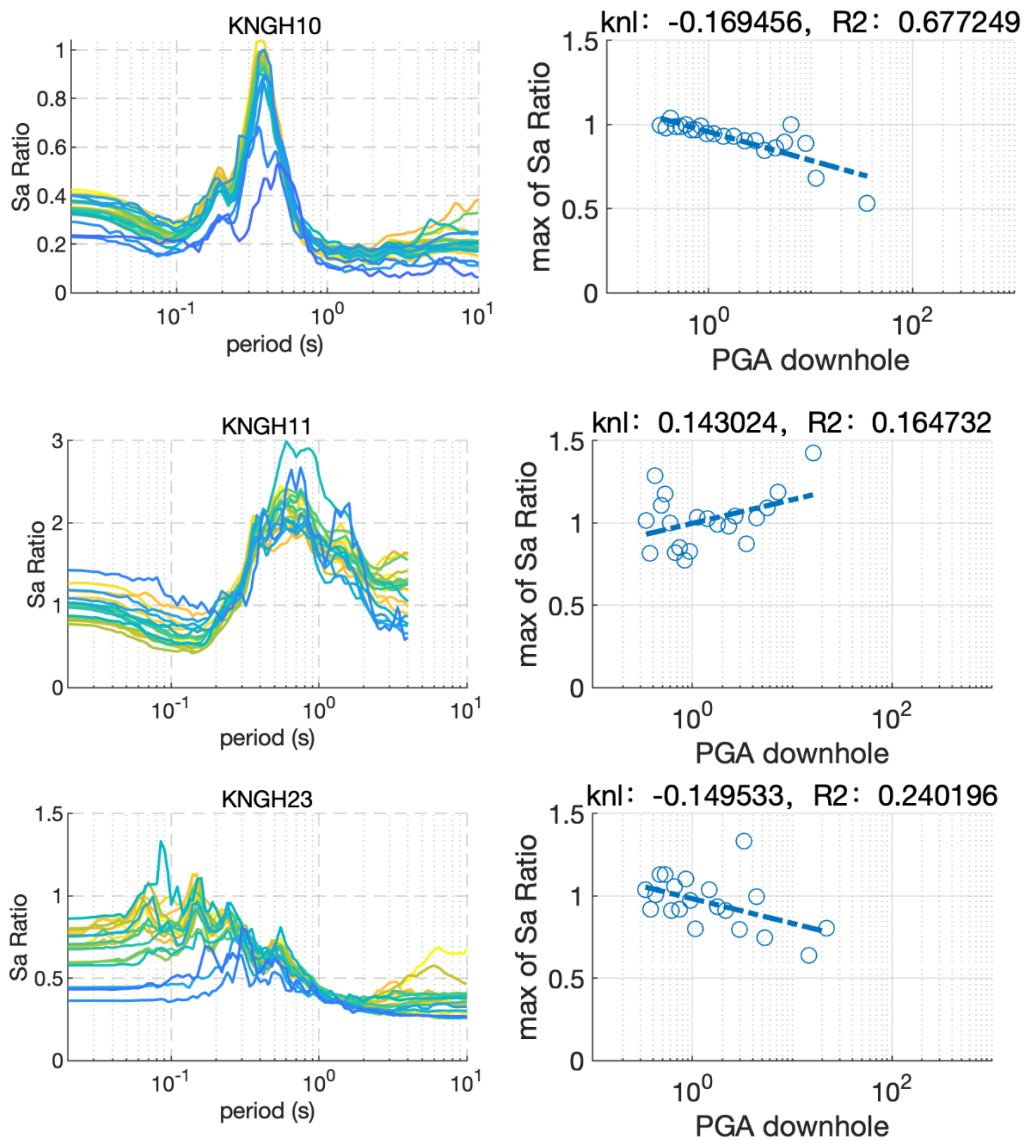


図 14 KiK-net 横浜 (KNGH10)・KiK-net 厚木 (KNGH11)・KiK-net 葉山 (KNGH23) の

と地中の強震観測記録の応答スペクトル比（左）と地中の入力地震動の関係（右）。

(c) 結論並びに今後の課題

対象断層帯を含む三浦半島周辺の地下構造モデル化を目指し、既往文献の収集、臨時強震観測の実施、既存の強震観測点で得られた非線形特性の調査を行った。地質区分に応じた様々な地震動特性が確認されたため、これらを活用した強震動時の地盤応答を考える必要がある。

今後は、他のサブテーマから得られる知見を取り込んで地下構造モデルを構築することが重要である。特に、浅部地盤や深部地下構造からプレート形状を考慮した地殻構造までを総合的に検討することが必要となる。

(d) 引用文献

- 三梨昂・矢崎清貫，三浦半島 2.5 万地質図，層序断面図，地質調査所，1968.
地質調査総合センター，日本重力データベース DVD 版，数値地質図 P-2，産業技術総合研究所地質調査総合センター，2013.
江戸将寿・馬場久紀・大熊茂雄・住田達哉・宮川歩夢，横須賀市南部地域における重力探査，地質調査総合センター速報，76，73-80，2018.
津野靖士・工藤一嘉，長周期のアレー微動データおよび強震記録の解析による静岡県南部の S 波速度構造の推定，物理探査，61，499-510，2008.