

3. 5 強震動予測

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 強震動予測

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人東京工業大学	教授	山中 浩明
国立大学法人東京工業大学	助教	地元 孝輔
国立大学法人東京大学地震研究所	准教授	三宅 弘恵
国立研究開発法人防災科学研究所	主幹研究員	先名 重樹
公益財団法人鉄道総合技術研究所	副主任研究員	津野 靖士
公益財団法人鉄道総合技術研究所	副主任研究員	是永 将宏
公益財団法人鉄道総合技術研究所	副主任研究員	野田 俊太
国立大学法人東京工業大学	修士2年	中條 良亮
国立大学法人東京工業大学	修士2年	宮永 隼太郎
国立大学法人東京工業大学	修士1年	河合 亮太
国立大学法人東京工業大学	学部4年	重原 悠太郎
国立大学法人東京工業大学	学部4年	渡辺 雅紀

(c) 業務の目的

富士川河口断層帯周辺地域での既存の地下構造構築に関するデータを収集する。さらに、新たに強震観測や微動観測などを実施し、地下構造データの蓄積を図る。これらの地下構造データを統合し、強震動評価のための浅部および深部地盤の構造モデルの精度を向上させる。他のサブテーマの成果も含め震源断層モデルを構築し、対象地域での強震動予測の高度化を目指す。

(d) 3ヵ年の年次実施業務の要約

1) 平成29年度：

富士川河口断層帯周辺地域において実施されている物理探査やボーリングなどの地下構造データの収集を行った。同様に、既設の強震観測点での強震観測記録も収集および整理した。これらの蓄積状況を踏まえて、新たに強震観測および微動観測を実施し、対象地域での地下構造に関するデータを取得した。これらのデータから地下構造のP波およびS波速度構造情報を抽出し、既存の地下構造モデルとの比較を行った。

2) 平成30年度：

平成29年度に引き続き、強震観測および微動観測などを実施する。観測されたデータから地下構造情報を抽出し、既存の三次元地下構造モデルの試行的な修正を行

う。さらに、強震観測による連続記録に地震波干渉法を適用して、駿河湾を含む海域部の地下構造モデルに関する情報を得る。収集した強震記録の長周期地震動成分のシミュレーションを実施し、試行的に修正した地下構造モデルの強震動説明能力を明らかにする。平成29年度に得られた対象断層帯に関する知見を踏まえて、強震動評価のための震源モデルの構築に関する検討を行う。

3) 平成31年度：

強震観測および微動観測などを継続し、地下構造データを蓄積する。これらのデータの分析による地下構造情報を用いて、三次元地下構造モデルの再修正し、地下構造モデルの精度を向上させる。収集した強震記録の長周期地震動成分のシミュレーションを実施し、修正した地下構造モデルおよび既存のモデルの強震動説明能力の差異を明らかにする。平成31年度までに得られた対象断層帯に関する知見を踏まえて、強震動評価のための震源モデルの構築し、上記の地下構造モデルを用いた強震動の評価を行う。

(2) 平成29年度の成果

(a) 業務の要約

富士川河口断層帯周辺地域において実施されている既往の微動アレイ観測による表面波位相速度データおよび地下構造モデルの収集を行った。既往の微動アレイ観測が実施されていない地域において微動観測を実施し、周波数0.7から30 Hzの間でレイリー波の位相速度を得た。既往の地下構造モデルから微動観測地点での1次元P波およびS波速度構造情報を抽出した。このモデルに対するレイリー波の理論位相速度は観測結果と一部の周波数で異なっており、地下構造モデルの修正の必要性を示した。既設の強震観測点で得られている強震観測記録を収集し、地下構造のモデル化のために用いるデータの選別を行った。さらに、富士市および富士宮市において強震観測点を設け、強震動予測および地盤モデルの高度化のための強震観測の蓄積を図った。

(b) 業務の成果

1) 既往の地下構造データの収集

本研究で強震動評価の対象になると考えられる富士川河口断層帯周辺地域を図1に示す。この地域では、強震動評価のためにいくつかの3次元地下構造モデルが提案されてきた（地震調査研究推進本部, 2009；内閣府, 2015；静岡県, 2013）。しかし、ほとんどのモデルは、防災科学技術研究所による3次元深部地盤構造モデルに修正を加えたものである。そこで、本研究においても防災科学技術研究所のJ-SHISによる深部地盤構造モデルを参考にすることにした。以下では、このモデルをJ-SHIS (2017) と呼ぶ。

防災科学技術研究所のJ-SHISによるモデルの地震基盤（S波速度3.2km/s）上面の深度分布を図1に示す。地震基盤深度は、伊豆半島側で浅く、対象地域の西側で急に深くなっている。地震基盤よりも浅い中間層（S波速度2 km/s）上面の深度も図1には示されている。この層の深度分布図には、地震基盤深度分布のような急激な変

化は認められないが、東西での地層面の深度の差異は、この層でも認められる。しかし、S波速度 1.5 km/s 層上面は、駿河湾北部および山梨県南西部で深さ 1 km 程度と深くなる。さらに、S波速度 0.9km/s 層上面は、陸域では浅くなり、駿河湾南部で 0.3 km となっている。このように浅い部分の地層は、地震基盤面と異なる傾向を持っている。

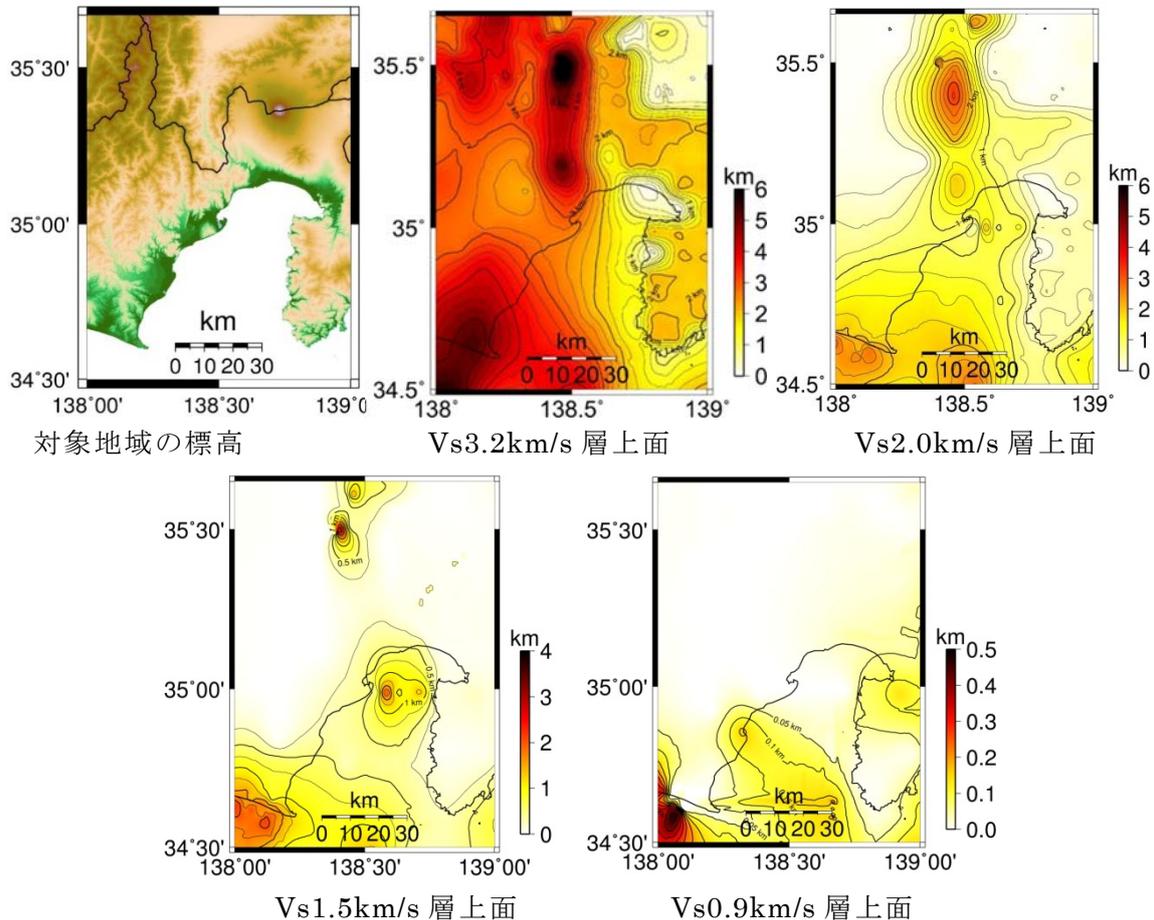


図1 対象地域の標高と J-SHIS (2017) による深部地盤モデル。

2) 微動アレイ観測

強震動予測での地盤増幅特性の評価では、地盤の S 波速度構造情報が重要である。地盤の S 波速度構造は、地震探査、微動探査（微動アレイ観測）、地震記録の分析などを用いて研究されている。とくに、微動アレイ観測は、堆積平野部の S 波速度構造探査として実績がある。対象地域においても、微動アレイ観測がいくつか行われており、それらの観測点位置を図 2 に示す。図中の白丸（先名・他, 2017）と赤四角（津野・工藤, 2008；大石・他, 2011；山中・山田, 2006）は、深部地盤の S 波速度構造の探査に着目した規模の大きいアレイでの微動観測である。一方、表層地盤を対象にした微動アレイ観測は、図 2 の青三角の位置で実施されている。これらは、表層地盤を対象にしていることから、小規模なアレイでの微動観測が主体である（先名・他, 2017）。そのために、小規模なアレイ観測は、多くの地点で調査が実施されている。

ここでは、深部地盤のモデル化のために実施されている既往の微動アレイ観測の結果について説明する。図2の赤四角の観測点での位相速度を図3に示す。駿河湾の東側のMSM、NMZ、SMDでは、0.8 Hz以下の周波数で位相速度が1.5 km/s以上となっている。一方、同湾西側のFJK、SHZ、SGR、OMZでは、位相速度が1.5 km/s以上になるのは、0.4 Hz以下の周波数帯域となっている。こうした位相速度の地域性は、図1に示した地震基盤が駿河湾の西側で深くなっていることに対応すると考えられる。

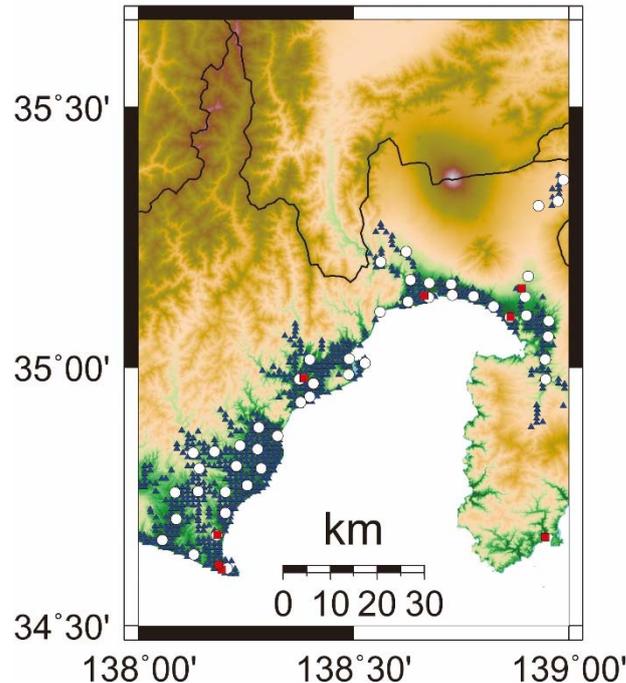


図2 既往の微動アレイ観測の位置。

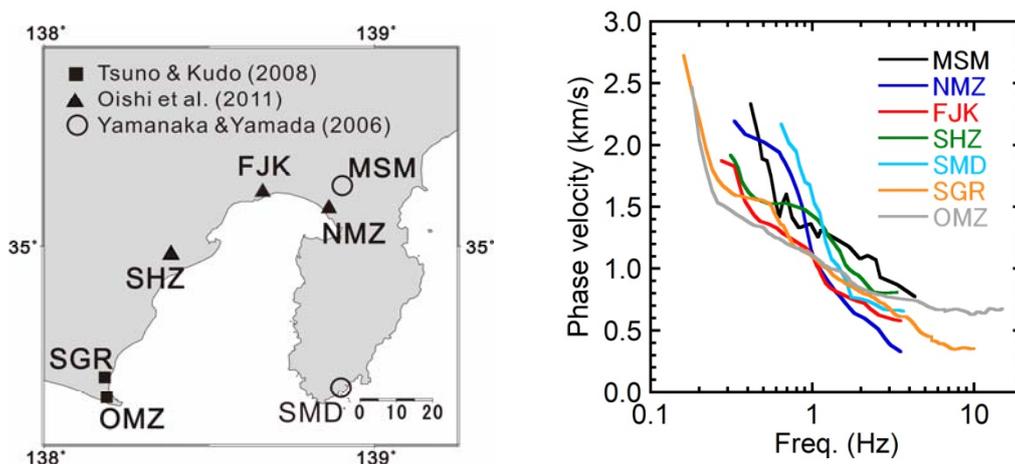


図3 既往の微動アレイ観測による位相速度。

図4に示す微動アレイ観測（先名・他，2017）で得られている位相速度の例が図5に示されている。この観測では、周波数1Hz以下で1.5 km/s程度までの位相速度が得られている。図3で示した既往の観測と比べて、位相速度が小さい範囲が対象とな

っている。なお、図1に示した J-SHIS (2017) のモデルと異なる既往の地下構造モデルとの比較が行われ、一部の周波数帯域で既存のモデルでは説明できないことから、1次元 S 波速度モデルの修正も行われている。



図4 先名・他 (2017) による微動アレイ観測点位置。

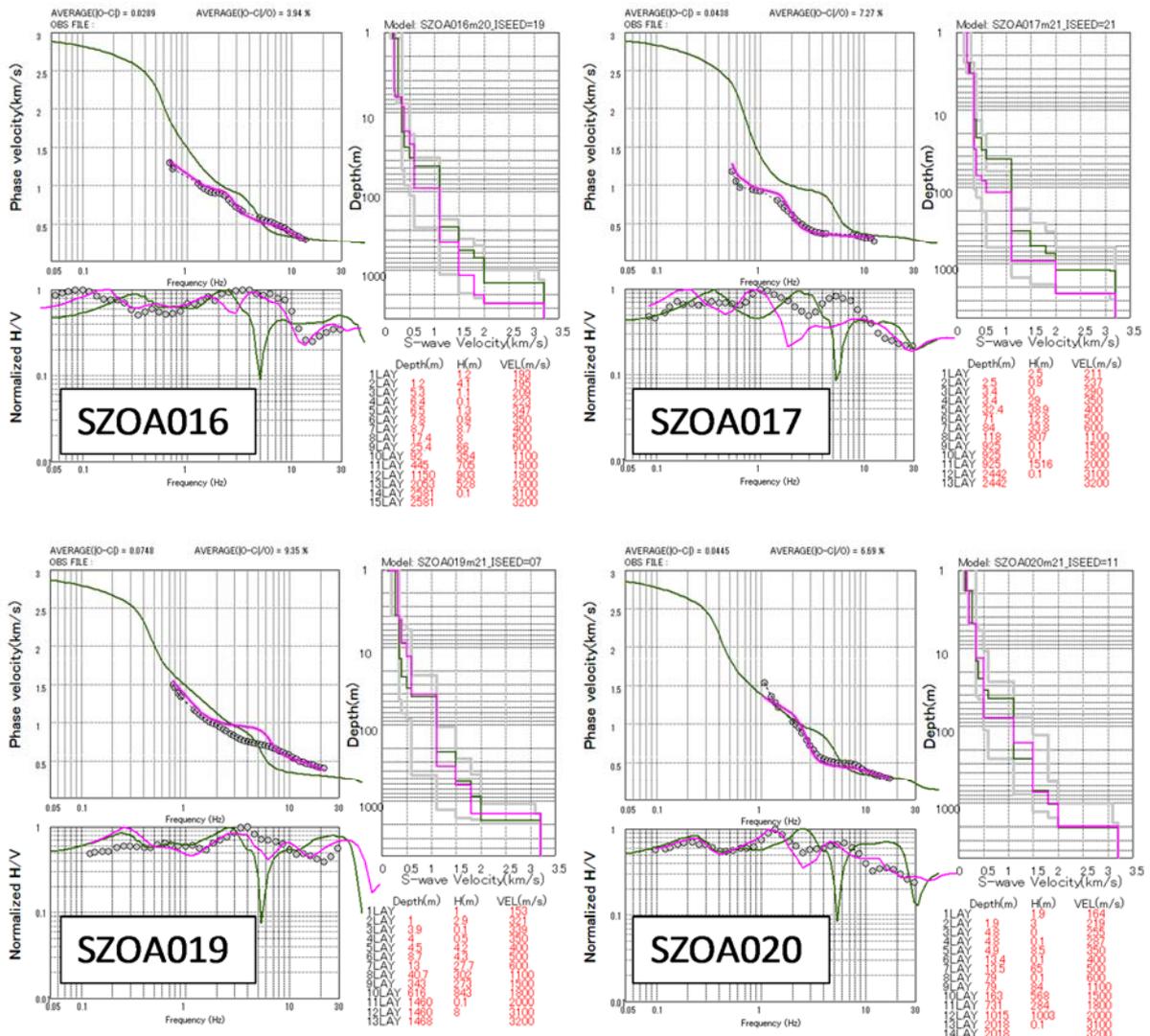


図5 先名・他 (2017) による位相速度とモデル修正の例。

緑とピンクのモデルは、既往のモデルと修正モデルを示し、グレーは探索範囲を示す。また、丸は、観測値である。

図 2 に示すように、深部地盤の探査を対象にした微動アレイ観測点は、富士市の内陸部、富士宮市、山梨県南部、伊豆半島西側地域では十分に実施されていないことがわかる。そこで、本研究では富士市と富士宮市において微動アレイ観測を実施した。微動アレイ観測の位置が図 6 の赤い丸で示されている。また、表 1 には、アレイ観測の位置とアレイサイズがまとめられている。各地点では、7 組の機器（図 7）を用いて 2 重三角形のアレイが設けられた。アレイ半径を変えて 2 回の観測が行われ、各観測で 60 分間の上下成分の微動記録を得た。なお、富士宮市の大アレイの位置では、表層地盤探査のためにサイズの小さいアレイでの微動観測も実施された。得られた記録は、SPAC 法もしくは FK 法によって解析され、図 8 のように 0.7~30 Hz の間で位相速度が得られた。富士市大アレイ 1 の位相速度が、そのほかの 2 点の結果よりも周波数 1 Hz 付近で大きくなっており、深部地盤構造が変化していると考えられる。図 1 の地下構造モデルから得られる各観測点直下の 1 次元構造モデルに対するレイリー波の理論位相速度も図 9 に示されている。全体的には、観測位相速度は、理論位相速度と類似している。しかし、一部の周波数で両者の差異が大きくなっており、図 5 の場合と同様に地下構造モデルの修正が必要であると考えられる。さらに、観測位相速度は、低周波数でばらつきが大きく、解析する記録の品質の検討やより大きいアレイサイズでの観測も実施する必要があると考えられる。



図 6 本研究による微動探査（赤丸）と既往の研究による微動探査（白丸）の位置。

表 1 微動アレイ観測点の観測諸元。

地点	Lat.	Long.	アレイ半径(m)
富士宮市大アレイ 1	35.24343	138.60103	500, 250, 17, 8.5, 3.5, 1.7
富士市大アレイ 1	35.14546	138.63627	500, 250, 29, 14.5
富士市大アレイ 2	35.18850	138.66396	500, 250, 29, 14.5



図7 本研究による微動アレイ観測の様子（左）と観測機器（右）。

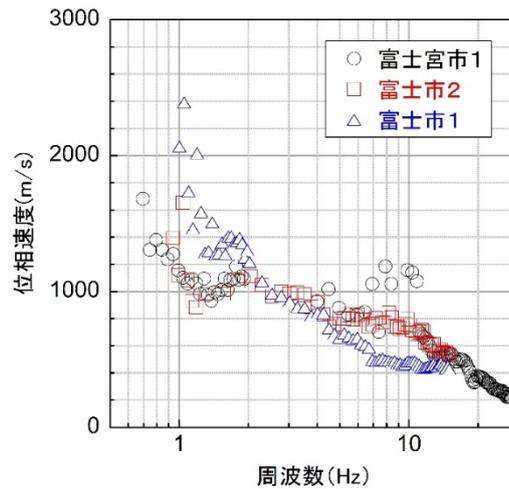


図8 微動探査によるレイリー波の位相速度。

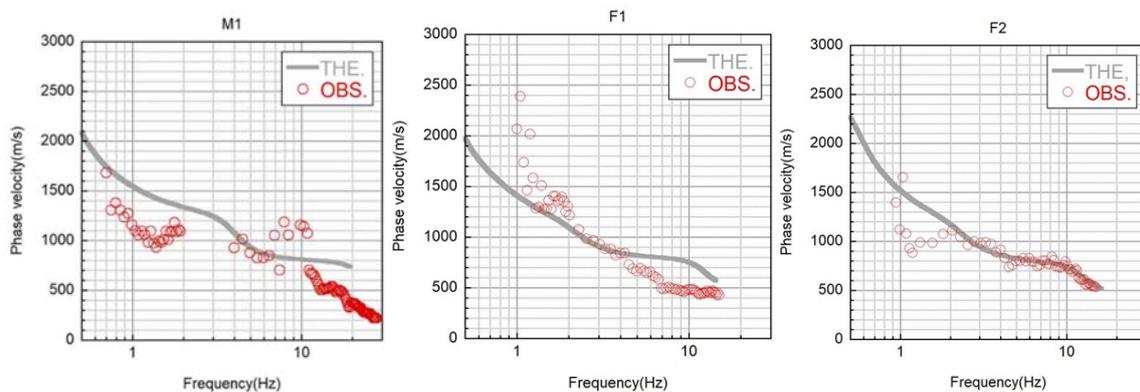


図9 観測位相速度と既往のモデル（図1）による理論位相速度の比較。左から富士宮市大アレイ、富士市大アレイ1、富士市大アレイ2での結果を示し、各図のグレーの線は理論位相速度、赤丸は観測位相速度を示す。

3) 強震観測

対象地域における既存の強震観測点の位置を図10に示す。これらの観測点での地震記録は、それぞれの観測機関（防災科学技術研究所、東大地震研究所、気象庁）もしくはデータネットワークシステムSK-net（自治体震度計）で公開されている。これらの記録から地盤構造モデルを構築もしくは修正するための地震記録を抽出した。そ

のためには、対象地域外の地下構造の影響が含まれないように、震央位置が北緯 34.5～35.5 度、東経 138.25～139 度で、M が 3～6 の地震を選択した。その結果、図 10 に示す 55 地震による 4 千以上の地震記録が使用可能であると判断した。収集した地震記録の例が図 11 に示されている。自治体の震度計による地震記録のいくつかは、記録の時刻精度が十分ではなく、P 波や S 波の初動の走時がほかの観測点に比べて著しく異なっている。これらの観測点の記録を用いた走時についての検討がやや難しいと考えられるため、スペクトル特性に着目した地盤のモデル化を中心に検討することが適切であると考えられる。

図 10 の既存の強震観測点の分布をみると、富士川河口断層帯周辺地域の近傍では、10 点程度の強震観測点しかなく、地下構造モデルの検証などのためには、十分ではないと考えられる。そこで、本研究では、図 12 および表 2 に示すように、富士宮市及び富士市の 13 地点において新たに強震観測を開始した。強震観測では、図 12 に示すように、強震計（JPE6A3）とデータロガー（LS8800）を 2～4 階建ての学校建物の基礎の上に設置し、バッテリーでデータロガーを稼働させた。データロガーには、加速度の連続記録が収録されている。

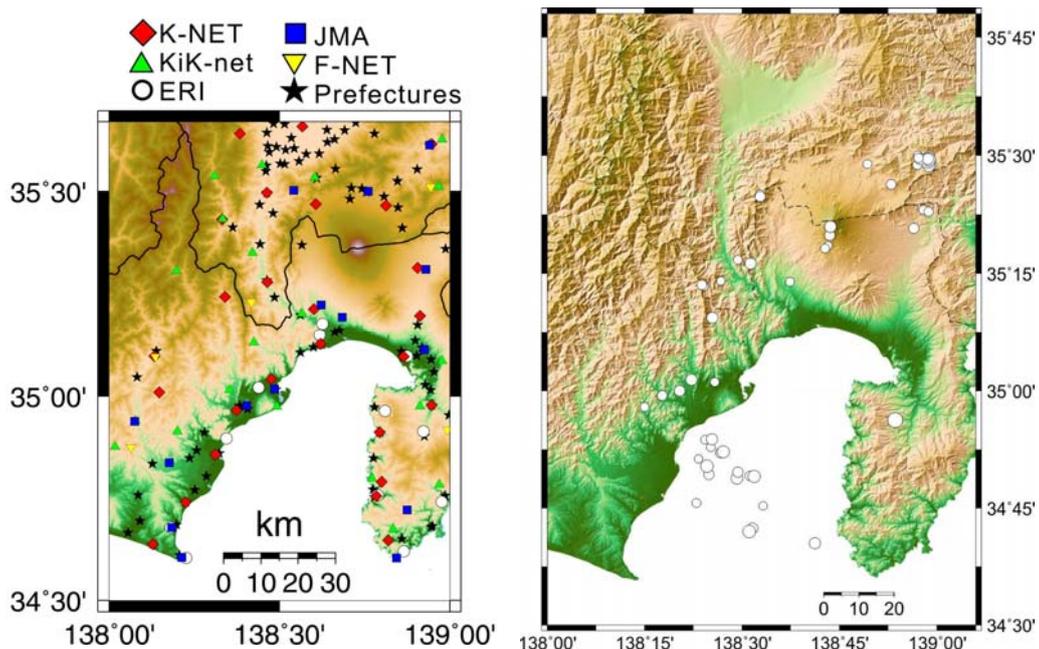


図 10 既存の強震観測点の位置（左）と記録を抽出した地震の震央の位置（右）。

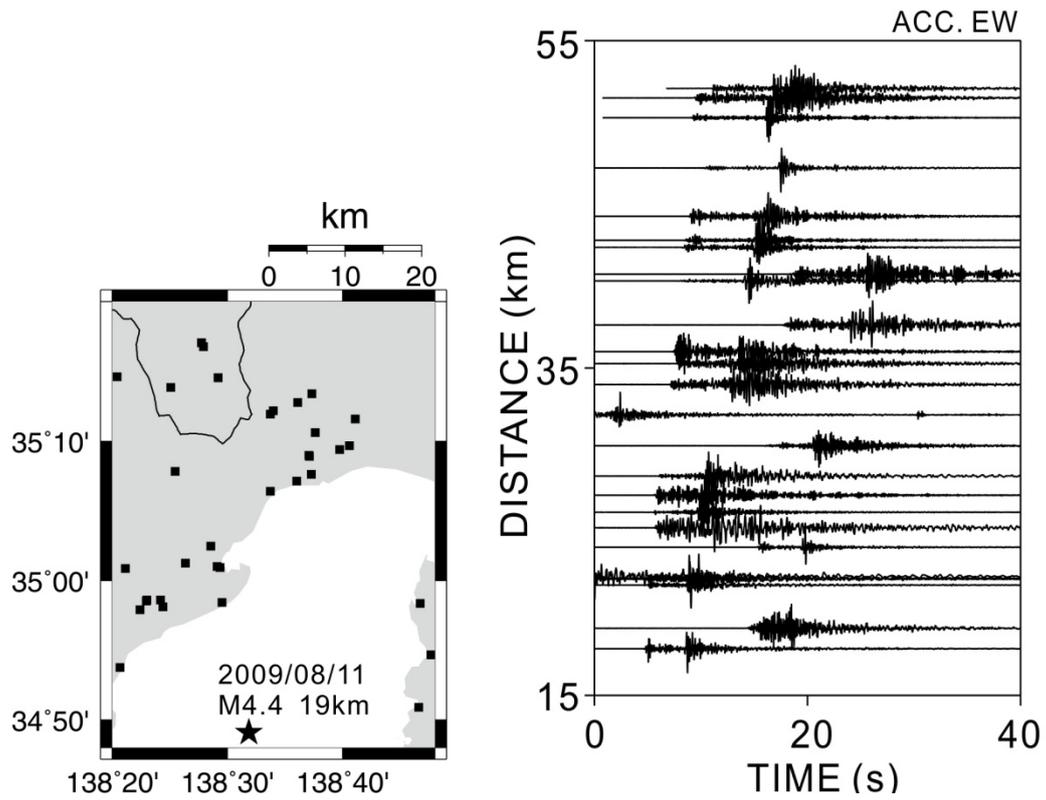


図 11 2009 年 8 月 11 日 18:09 の静岡沖の地震の記録の例。
 左図の四角と星は、強震観測点と震央の位置を示す。右図の波形は、左図の観測点での東西方向の加速度記録を示す。

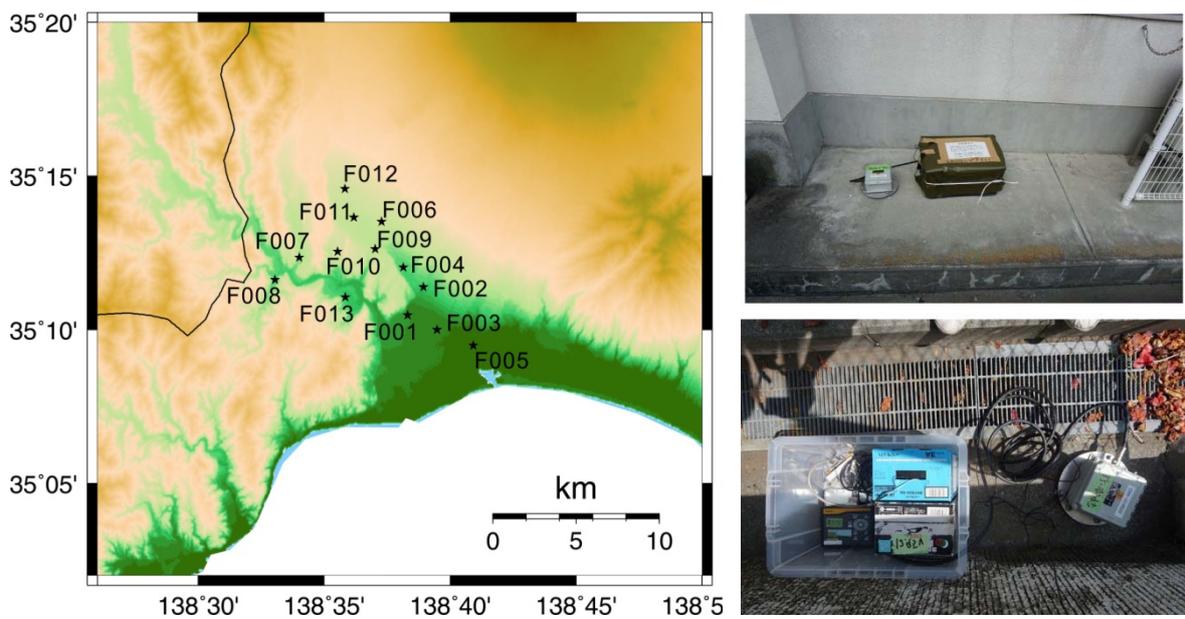


図 12 本研究で設置した強震観測点の位置（左）と観測機器（右の上下）。

表2 本研究で設置した強震観測点リスト。

観測点名	緯度	経度
F001	35.17456	138.63863
F002	35.18992	138.64892
F003	35.16665	138.65810
F004	35.20054	138.63580
F005	35.15813	138.68196
F006	35.22530	138.62117
F007	35.20584	138.56693
F008	35.19379	138.55087
F009	35.21039	138.61709
F010	35.20906	138.59222
F011	35.22760	138.60299
F012	35.24317	138.59698
F013	35.18436	138.59738

(c) 結論ならびに今後の課題

富士川河口断層帯周辺地域において、既存の地下構造情報および微動アレイ観測の結果を収集した。既存の微動アレイ観測によるレイリー波の位相速度には地域性が認められ、それが既存の深部地盤モデルの変化に対応することがわかった。さらに、既存の微動アレイ観測点が少ない地域があり、今後の微動アレイ観測が必要となる地域を指摘した。既往の微動アレイ観測が少ない地域において微動アレイ観測を実施し、周波数0.7～30 Hzの間でレイリー波の位相速度を得た。既存の地下構造モデルによる理論位相速度と観測値を比較し、観測位相速度は、モデルによる理論値と類似しているが、両者の差異が大きい周波数帯域もあることがわかり、地下構造モデルに修正が必要であると考えられる。地下構造モデルの妥当性の検討のために、既設の強震観測点での強震記録から検討に用いる地震記録を収集した。さらに、既存の強震観測点の密度が低い地域において、地震計を設置し、中小地震を対象にした強震観測を実施した。今後、地震観測記録の蓄積を待って、地盤モデルの検証および強震動予測の高度化を進めていくことが期待される。

(d) 引用文献

地震調査研究推進本部,想定東海地震、東南海地震、宮城県沖地震を想定した長周期地震動計算に用いたモデル, 2009.

内閣府, 南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告, 2015.

大石真梨子・山中浩明・地元孝輔・山田伸之・津野靖士・坂上実・瀧澤一, 微動探査お

よび地震波干渉法による駿河湾周辺地域における S 波速度構造の推定, 物理探査学会第 125 回学術講演会, 10, 2011.

静岡県, 第 4 次地震被害想定 (第一次報告) 第 2 編, 2013.

先名重樹・若井 淳・神 薫・前田宜浩・松山尚典・藤原広行, 地震被害推定のための浅部・深部統合地盤構造モデルの構築, 物理探査学会第 137 回学術講演会, 67, 2017.

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.

山中浩明・山田伸之, 強震動評価のための関東平野の 3 次元 S 波速度構造モデルの構築, 物理探査, 59, 549-560, 2006.