

3. 3 地震活動から見たプレート構造

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 地震活動から見たプレート構造

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立研究開発法人 防災科学技術研究所 地震津波防災研究部門	主任研究員	松原 誠
	副部門長	汐見 勝彦
	主任研究員	木村 武志
	特別研究員	ヤノ トモコ エリザベス

(c) 業務の目的

Hi-netなどの定常観測点、本事業で実施する海底地震観測などの地震観測データをもとに、地震波トモグラフィによる速度構造解析、震源の高精度決定、繰り返し地震の抽出、発震機構解の検討、レシーバー関数解析などの総合的な検討により、より高い精度でフィリピン海プレート上面境界モデルを構築する。

(d) 3ヵ年の年次実施業務の要約

1) 平成29年度：より精度が高いプレート境界を明らかにするために、防災科学技術研究所（防災科研）高感度地震観測網（Hi-net）で検出した東海地域における地震を精密震源再決定法により決め直した。同時に、プレート境界特有の低角逆断層型の繰り返し発生する地震の抽出システムを構築した。

2) 平成30年度：平成29年度に構築したシステムを用いて、波形相関に基づくプレート境界特有の低角逆断層型の繰り返し発生する地震を抽出した。海底観測データの地震波到達時刻を活用した三次元地震波速度構造解析に向けた準備として、防災科研 Hi-net による到達時刻データとの統合手法などを開発し、地震波速度構造解析の試行をし、浅部構造の解像度の向上可能性を検討した。

3) 令和元年度：Hi-netなどの定常観測点、本事業で実施する海底地震観測などの地震観測データをもとに、地震波トモグラフィによる速度構造解析、震源の高精度決定、繰り返し地震の抽出、発震機構解の検討、レシーバー関数解析などの総合的な検討により、より高い精度でフィリピン海プレート上面境界モデルを構築した。さらに、地震活動や地震波速度構造から富士川河口断層帯における地震発生層の下限を求めた。

(2) 令和元年度の成果

(a) 業務の要約

Hi-netなどの定常観測点や本事業で実施した海底地震観測などの地震観測データを統合して地震波トモグラフィ法を用いた速度構造解析、三次元速度構造を用いた震源の高精度

再決定、小繰り返し地震の抽出、発震機構解の検討、レシーバー関数解析などの結果を総合的に検討したうえで、高精度なフィリピン海プレート上面境界モデルを構築した。さらに、地震活動や地震波速度構造をもとに、富士川河口断層帯における地震発生層の下限を求めた。

(b) 業務の実施方法

1) フィリピン海プレート上面境界モデルの構築

本事業により、東海大学などにより実施された海底地震観測により得られた微小地震のデータをもとに、防災科研 Hi-net 等の定常観測点の連続データから波形データを切り出し編集することにより、駿河湾から陸域にかけての地震波速度構造解析を実施した。平成 29 年度と平成 30 年度の海底地震観測から得られた震源分布と防災科研 Hi-net 等の定常観測網のデータを統合し、再検測して震源決定した結果をそれぞれ図 1 および 2 に示す。これらに、平成 30 年 10 月に実施された陸域における発破探査のデータを加えて、トモグラフィ解析を実施した。トモグラフィ解析に用いた震源分布を図 3 に示す。

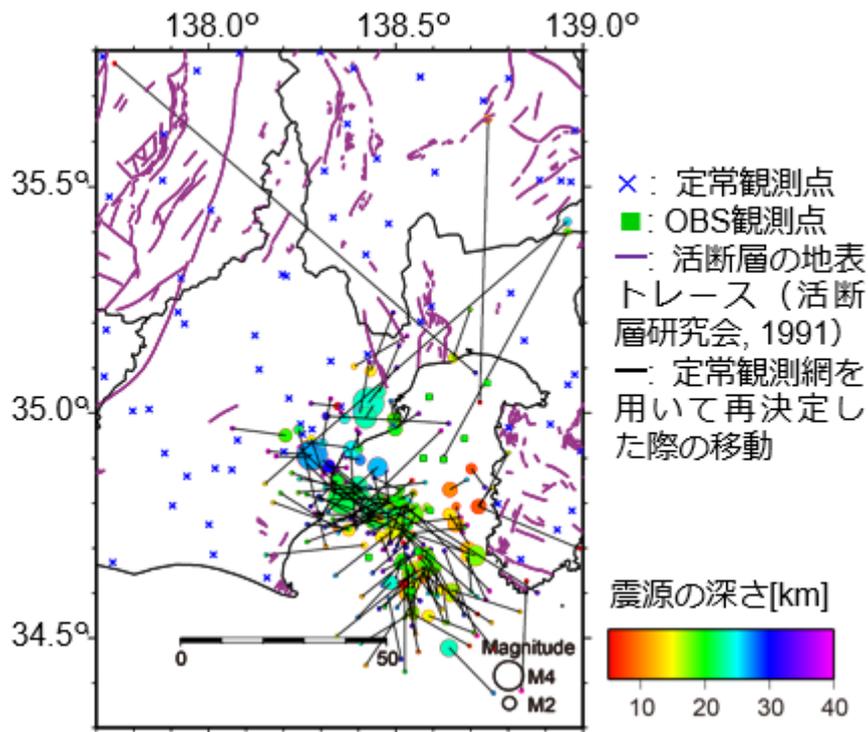


図 1 平成 29 年度海底地震観測から得られた震源分布と定常観測網データを統合した震源分布

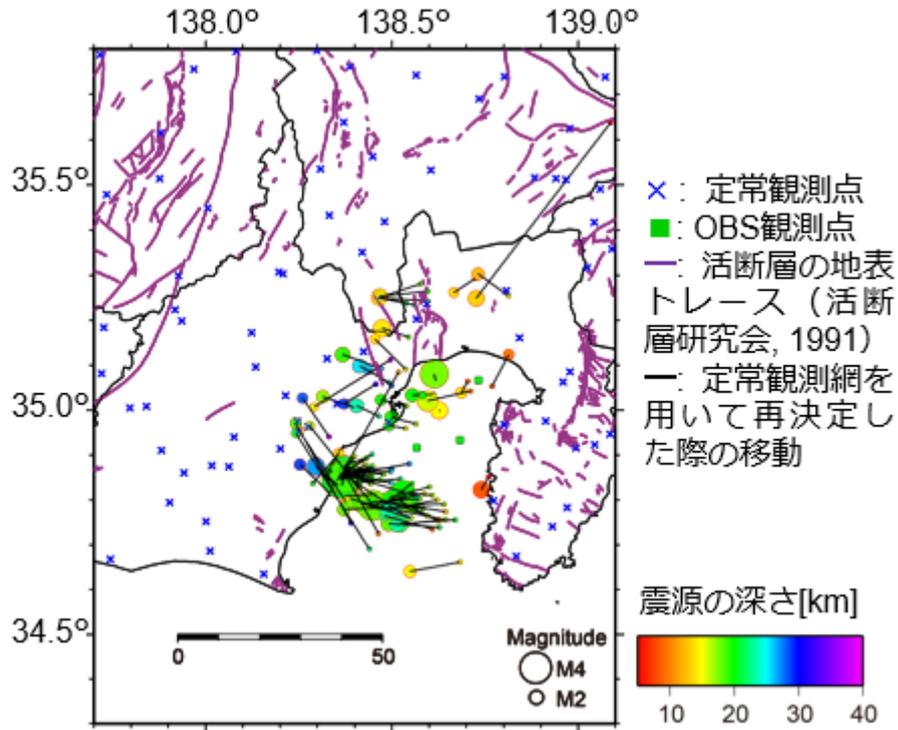


図2 平成30年度海底地震観測から得られた震源分布と定常観測網データを統合した震源分布

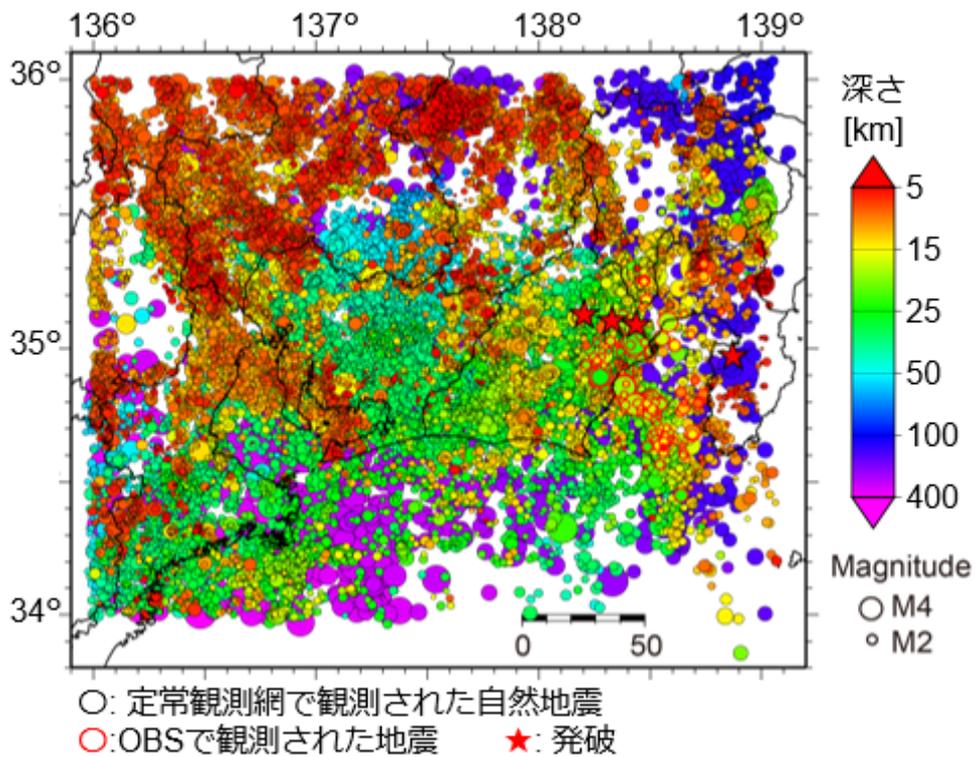


図3 トモグラフィ解析に用いた震源分布

解析領域は東経 136~139°、北緯 34~36°であり、38009 個の地震や発破からの 1577144

個の P 波、1537139 個の S 波の読取値を用いた。波線追跡法は Koketsu and Sekine (1998) のシュードベンディング法を用い、Zhao et al. (1992) のトモグラフィ法に観測点補正值とスムージングを導入した手法 (Matsubara et al., 2004; Matsubara et al., 2005a; Matsubara et al., 2008) を用いた。初期速度構造は鶴川・他 (1984) を用いた。既往のトモグラフィ解析よりも細かく高精度な構造を推定するため、グリッド間隔は水平方向に 0.05° (約 5 km) であり、分解能は 2 倍の 0.1° (約 10 km) とした。

さらに、平成 29 年度に構築したプレート境界特有の低角逆断層型の繰り返し発生する地震の抽出システムを用いて、2019 年 3 月までのデータをもとに、波形相関に基づくプレート境界で特有に発生する低角逆断層型の小繰り返し地震を抽出した。防災科研 Hi-net の観測点における上下動成分の 1 ~ 8 Hz のバンドパスフィルターを適用した波形について、P 波の到達の 1 秒前から S 波の到達の 5 秒後までもしくは、S 波の読み取りが無い場合は P 波の到達の 1 秒前から 40 秒間の波形について相関係数を計算した。陸域に囲まれた領域も含めて、震央距離 100 km 以内の 3 観測点以上で 0.95 以上の相関係数を持つ波形が観測された地震の組み合わせを相似地震として抽出した (Matsubara et al., 2005b)。

トモグラフィの結果から得られた三次元地震波速度構造、三次元地震波速度構造を用いて再決定した震源分布や発震機構解、小繰り返し地震の震源分布等を総合的に考慮して、フィリピン海プレート上面境界を推定した。三次元地震波速度構造からは、沈み込むフィリピン海プレート最上部の低速度海洋性地殻の存在を考慮した。発震機構解からは、プレート境界特有の逆断層型の地震の分布を考慮した。

2) 地震発生層の下限の推定

フィリピン海プレート上面境界では深部低周波微動が起こっている (例えば Obara, 2002; Shelly et al., 2006; Kato et al., 2010 等)。防災科研 Hi-net により決められた深部低周波地震の震源を三次元地震波速度構造を用いて再決定し、フィリピン海プレート上面境界モデルと比較した。

富士川河口断層帯における地震発生層の下限については、三次元地震波速度構造を用いて再決定した震源分布を元に、地震発生層の下限を推定した。フィリピン海プレート上面境界が 20~40 km に分布する一方、陸側プレートの地殻内地震の地震発生層の下限を抽出するため、周囲 $\pm 0.1^\circ$ 四方の深さ 20, 25, 30 km 以浅の地震について、10 個以上の地震がある場合に、地表から 10%の地震が起きた深さを地震発生層の上限 (D10)、90%の地震が起きた深さを地震発生層の下限 (D90) としてそれぞれ推定した。

(c) 業務の成果

1) フィリピン海プレート上面境界モデルの構築

トモグラフィにより得られた深さ 5 km および 10 km の P 波および S 波速度構造を図 4 に示す。グリッド間隔を細かくしたが、広範囲の構造が推定できている。この三次元地震波速度構造、微小地震の震源分布、逆断層型地震の震源分布等から推定したフィリピン海プレート上面境界を図 5 に示す。一次元速度構造 (鶴川・他, 1984) を用いて震源決定をしている防災科研 Hi-net の震源カタログをもとに抽出した小繰り返し地震の分布を重ねた図 6 からはでは、プレート境界で起きていると考えられる小繰り返し地震の震源はプレート境界よりも下に存在するように見えるが、これらの地震を三次元地震波速度構造により再決定した結果、藤枝付近の地震の震源の深さは 20.9 km に、また山梨県南部の地震の震源の深さは 16.1 km に決められた。よって、推定したフィリピン海プレート上面境界

と調和的である。

レシーバー関数を用いた結果では、青い領域で、上部が高速度、下部が低速度となり、低速度海洋性地殻の上部であるプレート境界を表していると考えられる。静岡県駿河湾沿岸や愛知県などでは、調和的な結果が得られた（図7）。

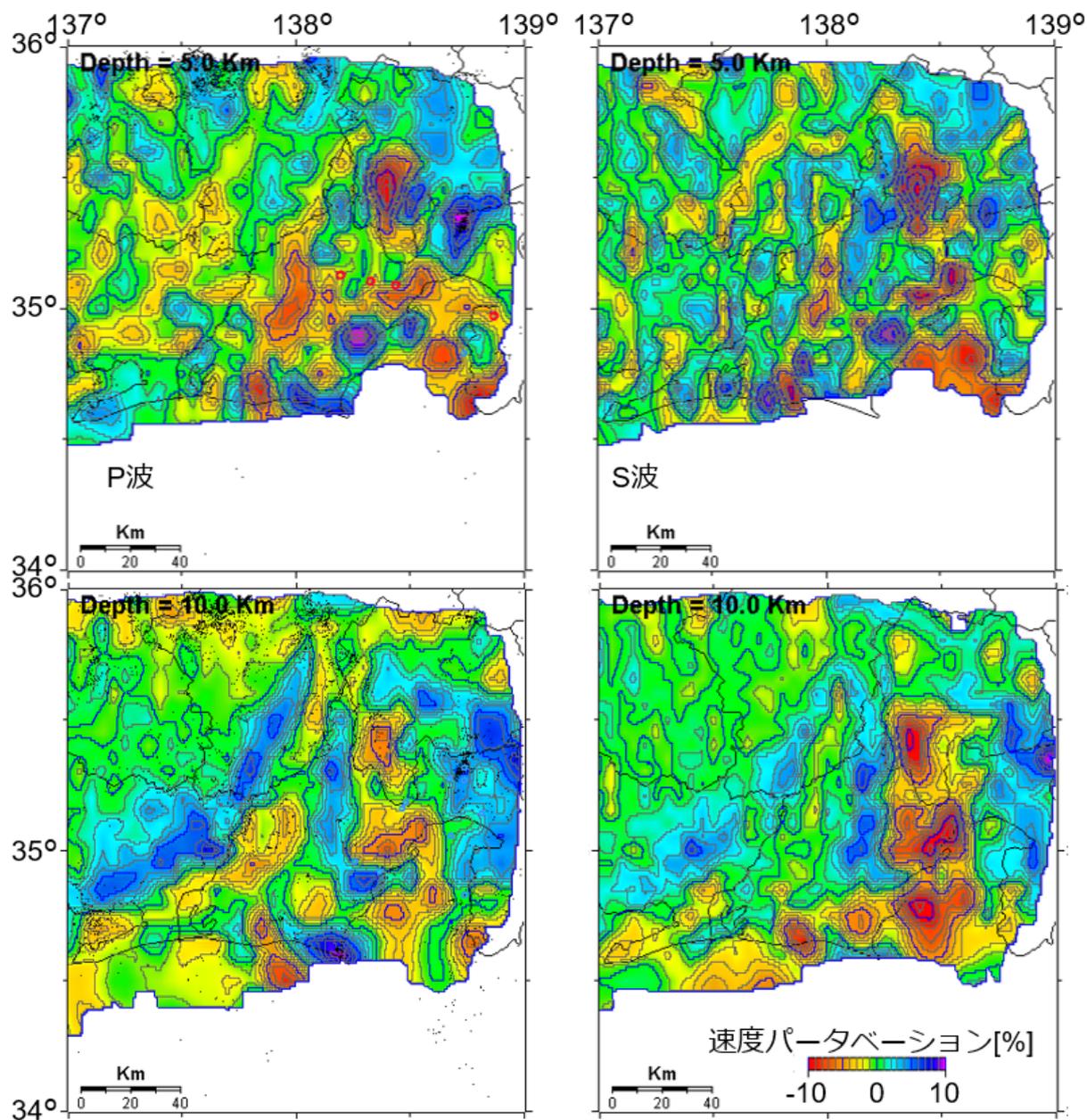


図4 深さ5 km および10 km のP波およびS波速度パーターベーション

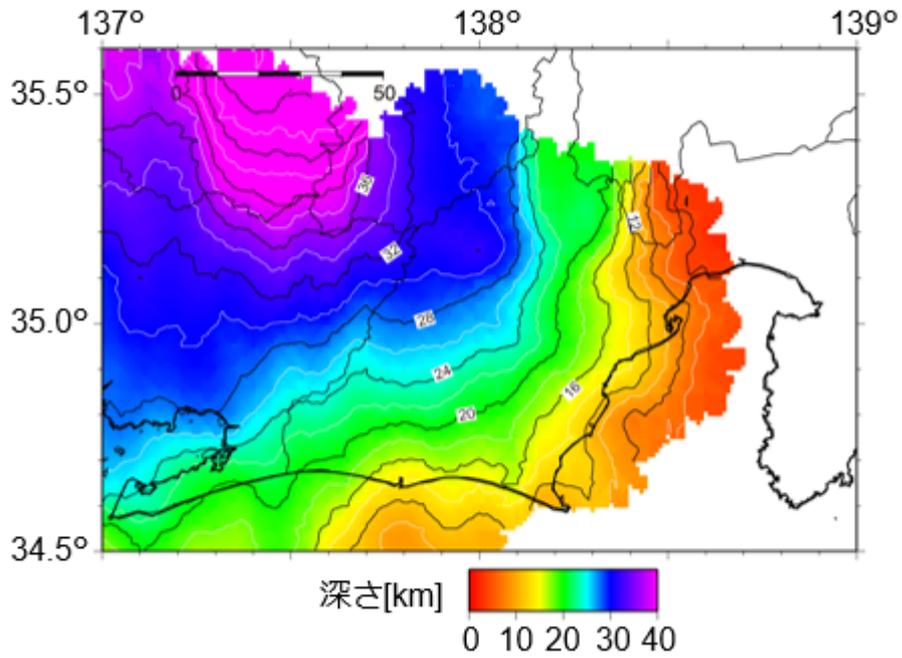


図5 フィリピン海プレート境界モデル

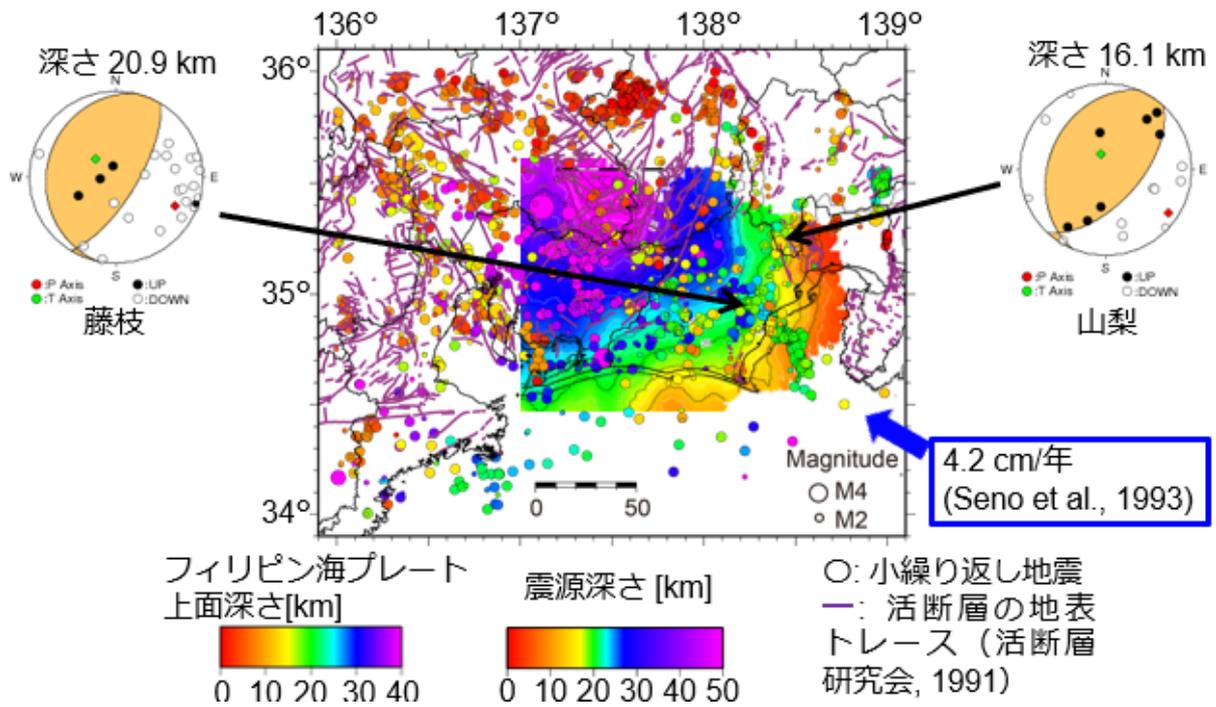


図6 フィリピン海プレート境界モデルと小繰り返り地震の分布

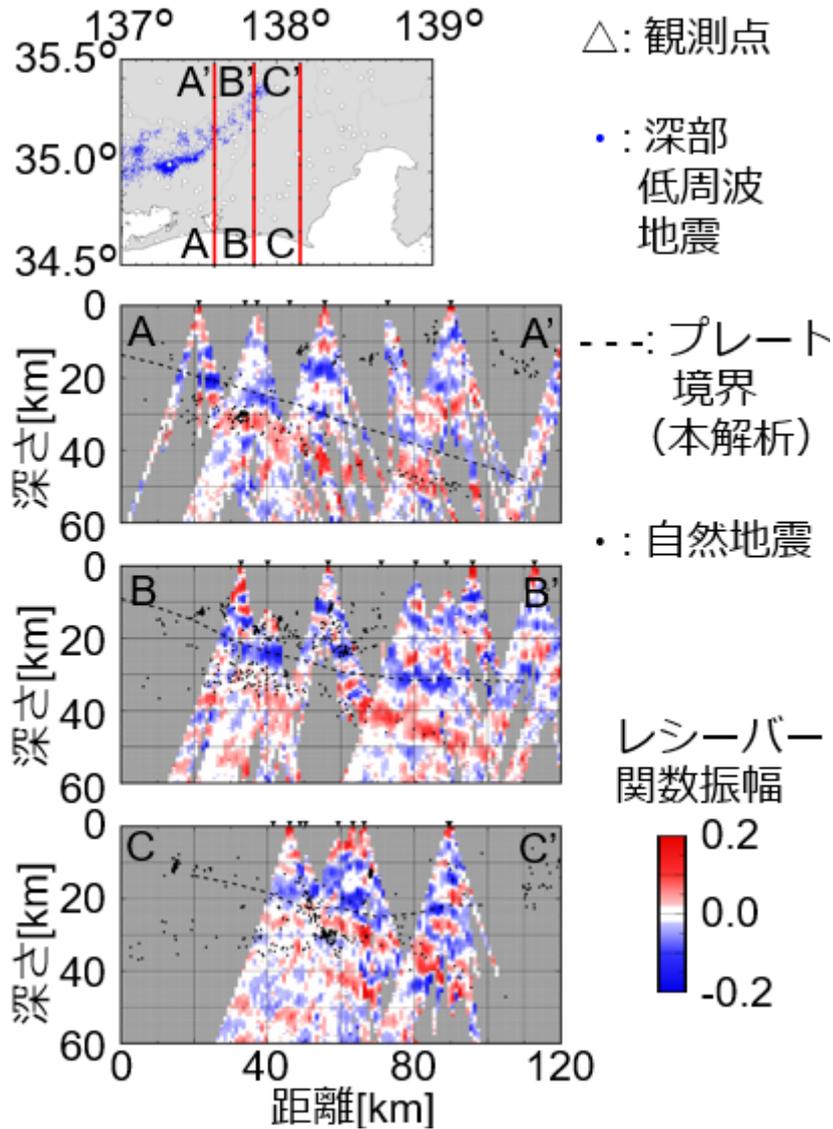


図7 レシーバー関数解析の結果とプレート境界モデル

2) 地震発生層の下限の推定

防災科研 Hi-net により決められ深部低周波地震の分布とフィリピン海プレート上面境界を比較した (図8)。深部低周波地震の震源の深さは S 波のみの読み取りによる決定のため精度が低い、深さ 30~40 km に分布しており、推定したフィリピン海プレート上面境界の深さと調和的である。

三次元地震波速度構造を用いて再決定された震源分布を元に、東海地域の深さ 20, 25, 30 km までの微小地震の分布から推定した地震発生層の下限 (D90) を図9に示す。富士川河口断層帯付近では、断層帯の西側で D90 は深さ 20 km 付近まで達する。その北側の北緯 35.5°付近では D90 は 22 km 以深まで達する。深さ 30 km までの地震を用いた解析結果から D90 が深さ 20~22 km 程度であることから、この領域の上盤側プレート地殻内の D90 は 20~22 km と考えられる。

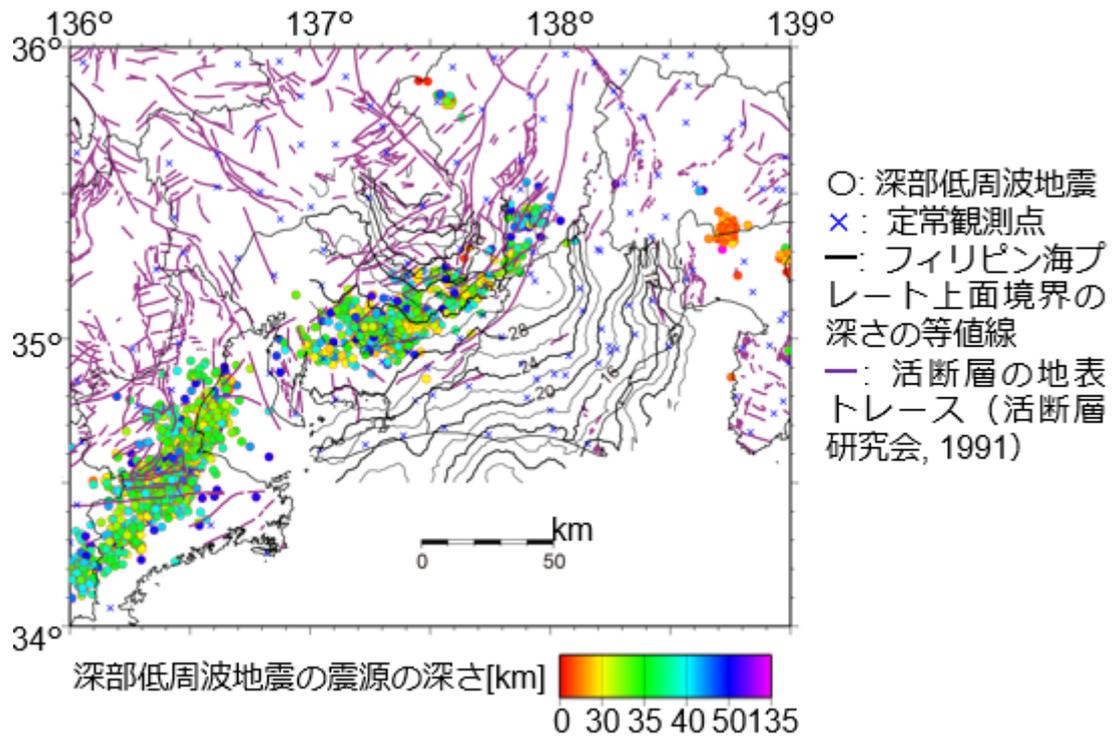


図8 深部低周波地震の分布とプレート境界モデル

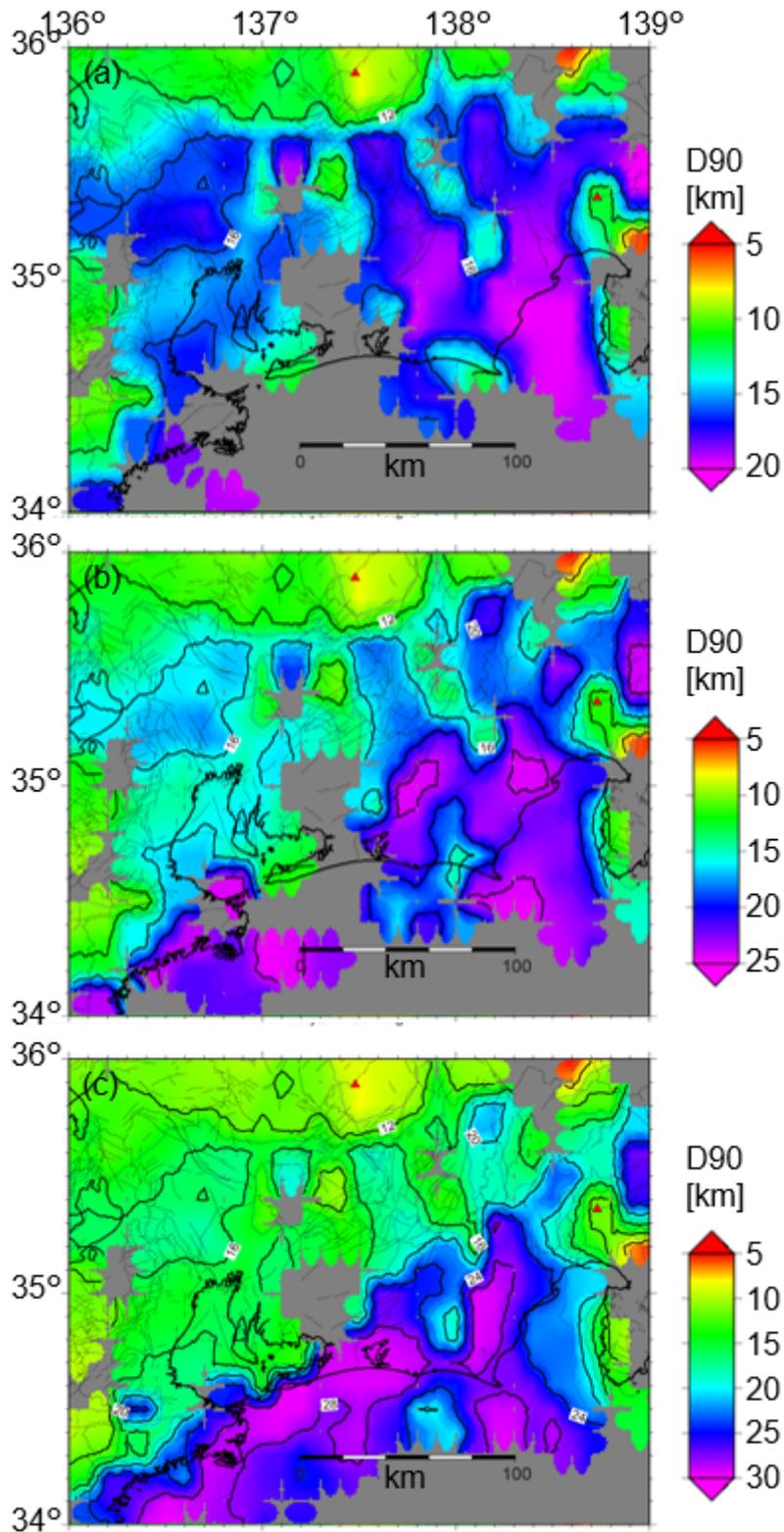


図9 (a)深さ 20 km, (b) 25 km, (c) 30 km までの地震をもとに算出した D90

(d) 結論ならびに今後の課題

富士川河口断層帯の活動とフィリピン海プレート境界の地震は連動すると考えられるため、富士川河口断層における地震の規模を推定するためにはフィリピン海プレート上面境界の構造モデルとその破壊域の下限の推定が重要となる。三次元地震波速度構造や三次元地震波速

度構造を用いて再決定された微小地震の震源や発震機構解等を総合的に考慮して、フィリピン海プレート上面境界モデルを構築した。また、小繰り返し地震の抽出も行った。プレート境界における小繰り返し地震を三次元地震波速度構造により再決定した結果震源の深さは浅くなり、フィリピン海プレート境界モデルと調和的であった。フィリピン海プレート上面境界で発生していると考えられる深部低周波地震の分布とも調和的である。得られたモデルと構造探査から推定された浅部の断層面やプレート境界モデルとを合わせて、富士川河口断層帯から駿河トラフに至る破壊域となる地震の強震動モデル等の計算に用いられた。

駿河湾内では、本プロジェクトにより多数のエアガンの発振が行われた。その振動は、防災科研Hi-net等の陸域の定常観測網でも記録されている。これらの波形は単独では読み取りが困難であるが、重合することにより読み取りが可能と考えられる。その読み取りをトモグラフィ解析に用いることにより、海域浅部の地震波速度構造解析の向上に結び付き、海域での震源分布の精度の向上が期待される。

(e) 引用文献

Kato, A., T. Iidaka, R. Ikuta, Y. Yoshida, K. Katsumata, T. Iwasaki, S. Sakai, C. Thurber, N. Tsumura, K. Yamaoka, T. Watanabe, T. Kunitomo, F. Yamazaki, M. Okubo, S. Suzuki, and N. Hirata, Variations of fluid pressure within the subducting oceanic crust and slow earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L14310, doi:10.1029/2010GL043723, 2010.

活断層研究会, 新編 日本の活断層, 東京大学出版会, 440p, 1991.

Koketsu K. and S. Sekine, Pseudo-bending method for three-dimensional seismic ray tracing in a spherical earth with discontinuities, *Geophys. J. Int.*, 132, 339-346, 1998.

Matsubara, M., Hirata, N., Sato, H., and Sakai, S., Lower crustal fluid distribution in the northeastern Japan arc revealed by high resolution 3D seismic tomography, *Tectonophysics*, 388, 33-45, doi:10.1016/j.tecto.2004.07.046, 2004.

Matsubara, M., H. Hayashi, K. Obara, and K. Kasahara, Low-velocity oceanic crust at the top of the Philippine Sea and Pacific plates beneath the Kanto region, central Japan, imaged by seismic tomography, *J. Geophys. Res.*, 110, B12304, doi:10.1029/2005JB003673, 2005a.

Matsubara, M., K. Obara and K. Kasahara, Three-dimensional P- and S-wave velocity structures beneath the Japan Islands obtained by high-density seismic stations by seismic tomography, *Tectonophysics*, 454, 86-103, 2008.

Matsubara, M., Y. Yagi, and K. Obara, Plate boundary slip associated with the 2003 Off-Tokachi earthquake based on small repeating earthquake data, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L08316, doi:10.1029/2004GL022310, 2005b.

Obara, K., Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan. *Science* 296, 1679-1681, 2002.

Shelly, D. R., G. C. Beroza, S. Ide, and S. Nakamura, Low - frequency earthquakes in Shikoku, Japan, and their relationship to episodic tremor and slip, *Nature*, 442, 188-191, doi:10.1038/nature04931, 2006.

鵜川元雄・石田瑞穂・松村正三・笠原敬司, 関東・東海地域地震観測網による震源決定方

法について、国立防災科学技術センター研究速報, Vol.53, pp.1-88, 1984.

Zhao, D., A. Hasegawa, and S. Horiuchi, Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan, J. Geophys. Res. Vol.97, pp. 19,909-19,928, 1992.

(3) 平成 29～令和元年度の成果

(a) 業務の要約

Hi-net などの定常観測点、本事業で実施する海底地震観測などの地震観測データをもとに、地震波トモグラフィによる速度構造解析、震源の高精度決定、繰り返し地震の抽出、発震機構解の検討、レシーバー関数解析などの総合的な検討により、より高い精度でフィリピン海プレート上面境界モデルを構築した。

(b) 業務の実施方法

1) フィリピン海プレート上面境界モデルの構築

東海大学等により実施された海底地震観測により捉えられた微小地震の分布を元に、陸域の Hi-net 等の定常観測網の波形データと海底地震観測のデータを統合して震源決定を行った。定常観測網のみのデータと合わせて地震波トモグラフィ解析を実施し、三次元地震波速度構造モデルを構築した。この三次元地震波速度構造モデルをもとに発震機構解を含めた震源再決定を実施した。三次元地震波速度構造を用いた震源分布、低角逆断層の発震機構解、三次元地震波速度構造モデルから海洋プレート最上部の低速度海洋性地殻の存在などを考慮して、フィリピン海プレート上面境界モデルを構築した。

平成 29 年度にプレート境界特有の低角逆断層型の繰り返し発生する地震の抽出システムを構築し、それをを用いて平成 31 年 3 月までの地震について、波形相関に基づくプレート境界で特有に発生する小繰り返し地震を抽出した。抽出された小繰り返し地震の発震機構解から低角逆断層の地震を抽出し、これらをプレート境界モデルと比較した。

2) 地震発生層の下限の推定

2000 年 10 月～2017 年 12 月までの地震を三次元地震波速度構造により再決定した。そのカタログをもとに、地震発生層を推定した。ある領域内の地表からある深さまでの地震活動のうち、全体の 10%の地震が起きている深さ (D10) を地震発生層の上限、全体の 90%の地震が起きている深さ (D90) を地震発生層の下限とした。プレート境界が深さ 15-40 km に存在していることから、深さ 20, 25, 30 km までの地震をもとに、D90 を推定した。

駿河トラフから南海トラフでは非火山性の深部低周波微動が活発である (例えば Obara, 2002; Shelly et al., 2006; Kato et al., 2010)。プレート境界における地震活動の北限と比較するため、三次元地震波速度構造により再決定したプレート境界モデルと深部低周波地震の震源分布を比較した。

(c) 業務の成果

1) フィリピン海プレート上面境界モデルの構築

トモグラフィにより得られた三次元地震波速度構造、微小地震の震源分布、逆断層型地震の震源分布等から推定したフィリピン海プレート上面境界を図 10 に示す。1980 年 7 月～2018 年 3 月までの関東東海観測網や Hi-net の地震データから小繰り返し地震抽出シス

テムにより得られた小繰り返し地震の分布を図 11 に示す。このうち、プレート境界特有の低角逆断層型の地震は藤枝付近と山梨県南部で観測されている。これらの地震を三次元地震波速度構造を用いて決め直すと藤枝付近の地震の震源の深さは 20.9 km に、また山梨県南部の地震の震源の深さは 16.1 km に決められた。よって、推定したフィリピン海プレート上面境界と調和的である (図 11)。

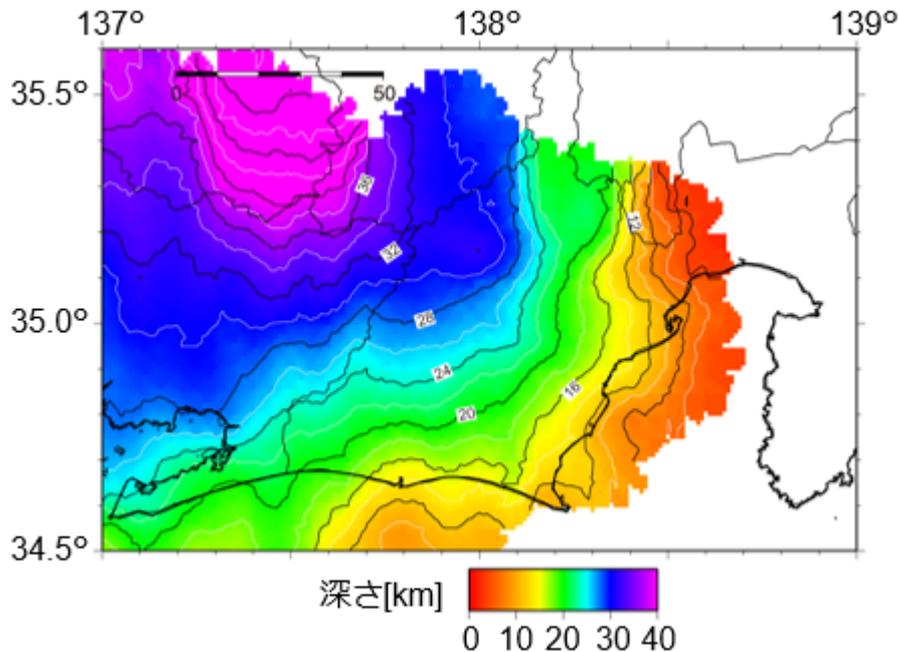


図 10 フィリピン海プレート境界モデル

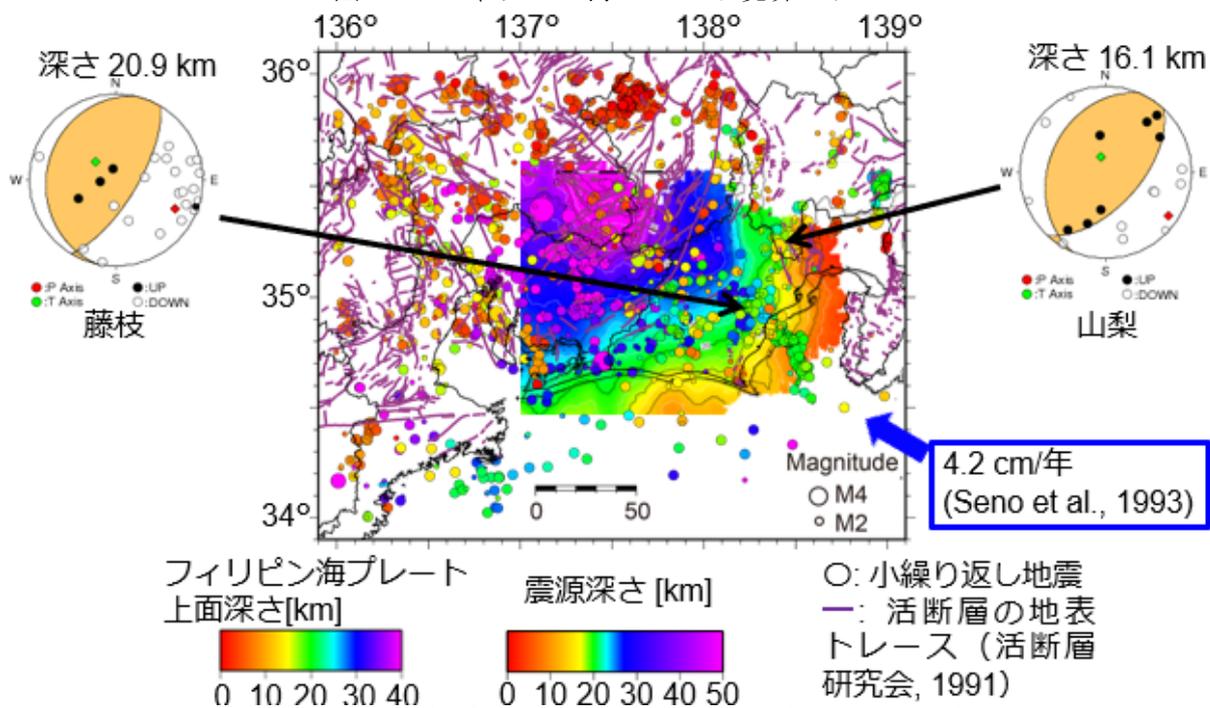


図 11 フィリピン海プレート境界モデルと小繰り返し地震の分布

2) 地震発生層の下限の推定

三次元地震波速度構造を用いて再決定された震源分布を元に、東海地域の深さ 30 km までの微小地震の分布から推定した地震発生層の下限 (D90) を図 12 に示す。富士川河口断層帯付近では、断層帯の西側で D90 は深さ 20 km 付近まで達する。その北側の北緯 35.5°

付近では D90 は 22 km 以深まで達する。深さ 30 km までの地震を用いた解析結果から D90 が深さ 20~22 km 程度であることから、この領域の上盤側プレート地殻内の D90 は 20~22 km と考えられる。

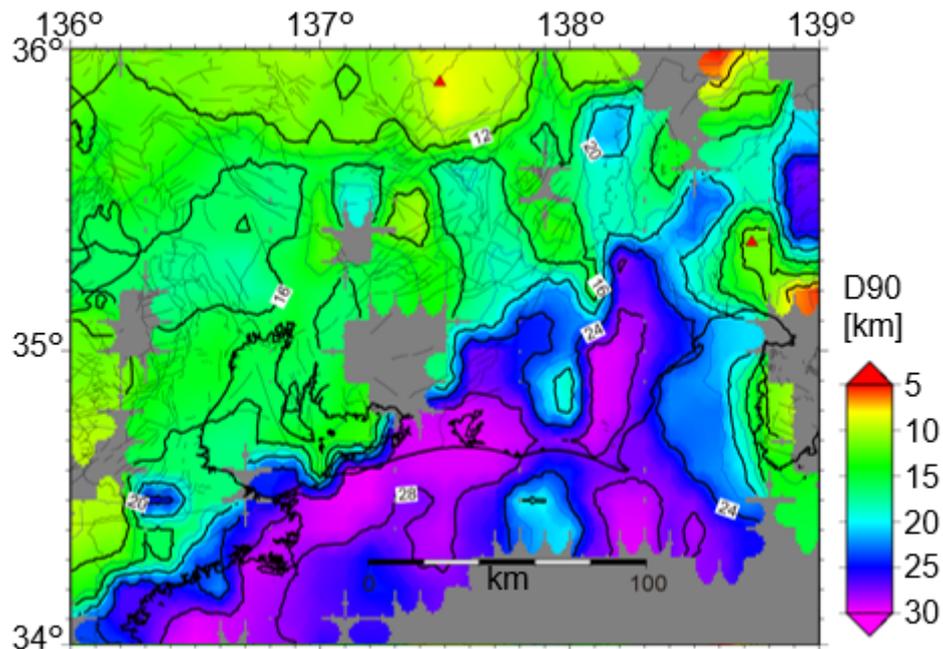


図 12 深さ 30 km までの地震活動をもとに算出した D90

防災科研 Hi-net により決められ深部低周波地震を三次元地震波速度構造により再決定した分布とフィリピン海プレート上面境界を比較した (図 13)。深部低周波地震の震源の深さは S 波のみの読み取りによる決定のため精度が低いですが、深さ 30~40 km に分布している。推定したフィリピン海プレート上面境界の深さ 30-40 km の間に分布し、調和的である。

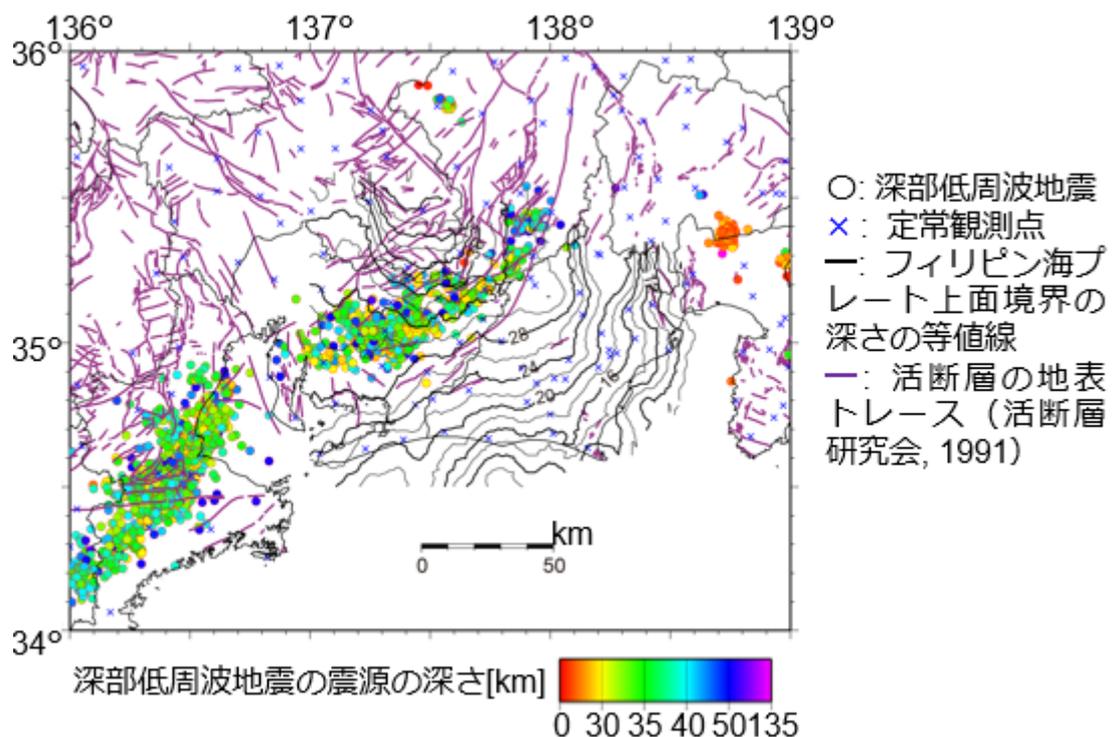


図 13 深部低周波地震の分布とフィリピン海プレート境界モデル

(d) 結論ならびに今後の課題

富士川河口断層帯の活動とフィリピン海プレート境界の地震は連動すると考えられるため、富士川河口断層における地震の規模を推定するためにはフィリピン海プレート上面境界の構造モデルとその破壊域の下限の推定が重要となる。分解能が水平方向10 kmという高精度な三次元地震波速度構造や三次元地震波速度構造を用いて再決定された微小地震の震源や発震機構解等を総合的に考慮して、フィリピン海プレート上面境界モデルを構築した。また、小繰り返し地震の抽出も行った。プレート境界における小繰り返し地震を三次元地震波速度構造により再決定した結果震源の深さは浅くなり、フィリピン海プレート境界モデルと調和的であった。フィリピン海プレート上面境界で発生していると考えられる深部低周波地震の分布とも調和的である。得られたモデルと構造探査から推定された浅部の断層面やプレート境界モデルとを合わせて、富士川河口断層帯から駿河トラフに至る破壊域となる地震の強振動モデル等の計算に用いられた。

駿河湾内では、本プロジェクトにより多数のエアガンの発振が行われた。その振動は、防災科研Hi-net等の陸域の定常観測網でも記録されている。これらの波形は単独では読み取りが困難であるが、重合することにより読み取りが可能と考えられる。その読み取りをトモグラフィ解析に用いることにより、海域浅部の地震波速度構造解析の向上に結び付き、海域での震源分布の精度の向上が期待される。

(e) 引用文献

Kato, A., T. Iidaka, R. Ikuta, Y. Yoshida, K. Katsumata, T. Iwasaki, S. Sakai, C. Thurber, N. Tsumura, K. Yamaoka, T. Watanabe, T. Kunitomo, F. Yamazaki, M. Okubo, S. Suzuki, and N. Hirata, Variations of fluid pressure within the subducting oceanic crust and slow earthquakes, *Geophys. Res. Lett.* , 37, L14310, doi:10.1029/2010GL043723, 2010.

活断層研究会, 新編 日本の活断層, 東京大学出版会, 440p, 1991.

Obara, K., Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan. *Science* 296, 1679-1681, 2002.

Shelly, D. R., G. C. Beroza, S. Ide, and S. Nakamura, Low - frequency earthquakes in Shikoku, Japan, and their relationship to episodic tremor and slip, *Nature*, 442, 188-191, doi:10.1038/nature04931, 2006.