

# P 波初動極性と実体波振幅値を用いた日本内陸域における微小地震メカニズム解決定

行竹洋平\*・武田哲也\*<sup>2</sup>・吉田明夫\*

Focal mechanism determination of intraplate earthquakes by using P wave polarity data and absolute amplitude of body waves

by

Yohei YUKUTAKE\*, Tetsuya TAKEDA\*<sup>2</sup> and Akio YOSHIDA\*

## 1. はじめに

内陸活断層に作用する応力や、内陸地震発生前の応力蓄積過程を理解するためには、内陸域における応力場を高い空間分解能で明らかにすることが重要である。地震メカニズム解は、地殻内の応力を推定するための重要なデータとなる。日本内陸域には基盤的観測網が高密度に設置され、これらの観測データに基づき防災科研 F-net の CMT 解カタログや気象庁一元化カタログなど、内陸地震のメカニズム解のカタログが整備されてきている。こうしたメカニズム解のカタログデータを用いて、日本内陸域の広域的な応力分布が推定されてきた (Townend and Zoback, 2006; Terakawa and Matsu'ura, 2010)。

一方で、これらのメカニズム解はマグニチュードがおよそ 3 以上の地震が対象とされており、メカニズム解データの数が限られてしまうので、より高い空間分解能で応力場を推定するには不十分である。そこで本研究では、基盤的観測網データをもとに、微小な地震のメカニズム解も得るため、P 波極性データに加えて実体波の振幅データも利用し、内陸域で発生した地震のメカニズム解決定を行った。本報告では、決定された日本内陸域のメカニズム解分布の特徴およびメカニズム解データから応力インバージョン法を用いて推定された応力場の空間分布について述べる。

## 2. データおよび手法

### 2.1. 解析に用いたデータ

本報告では、2004 年 1 月から 2011 年 1 月までに日本の内陸域の深さ 30km より浅い場所で発生した防災科学技術研究所 Hi-net による震源カタログに記載されているマグニチュード 2.0 以上の地震を解析対象とした。P 波極性データについては、Hi-net による検測値を用いた。P 波極性データに加えて、日本全国に設置されている

Hi-net、気象庁、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学の定常観測点 1040 点 (図 1) の地震波形記録を解析に使用した。

### 2.2. メカニズム解の決定方法

メカニズム解の決定にあたっては決定精度を上げるため、P 波初動極性データと合わせて、P 波ならびに SH 波の振幅情報も用いた。本報告では、今西ほか (2006) に記載された手順にならない、図 2 で示された解析手順によりメカニズム解を決定した。P 波極性が 12 観測点以上で読み取られている地震を解析対象とし、メカニズム解の決定を試みた。P 波と SH 波の振幅値については、変位スペクトルにおける低周波側から推定した。Hi-net カタログの震源位置を用い、また震源から各観測点への地震波の射出角は鶴川ほか (1984) による Hi-net 標準速度構造をもとに決定した。これらのデータから、Ide et al., (2003) の手法を用いて最適なメカニズム解を推定した。ここで、決定されたメカニズム解の各観測点での理論振幅値と観測振幅値との比から観測点振幅補正値を求めた。そして、その決定された観測点振幅補正値を用いて、再び上記の手順でメカニズム解を決定するという作業を反復して数回行って、最終的なメカニズム解を得た。こうした処理を施すことで地表地盤による振幅増幅あるいは減衰の影響が補正され、より精度よくメカニズム解を決定することが可能になる。

観測点振幅補正値を求めるために、図 3 に示したように、日本の内陸域を 10 個の小領域に区分した。そして、それぞれの領域内に発生した地震に対して上記の手順により観測点振幅補正値及び最終的なメカニズム解を得た。なお、2007 年能登半島地震域については、震源域の多くが海域にあり震源決定精度の影響等が大きいと判

\* 神奈川県温泉地学研究所 〒250-0031 神奈川県小田原市入生田 586

\*<sup>2</sup> 防災科学技術研究所 〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1

報告, 神奈川県温泉地学研究所報告, 第 44 巻, 39-46, 2012

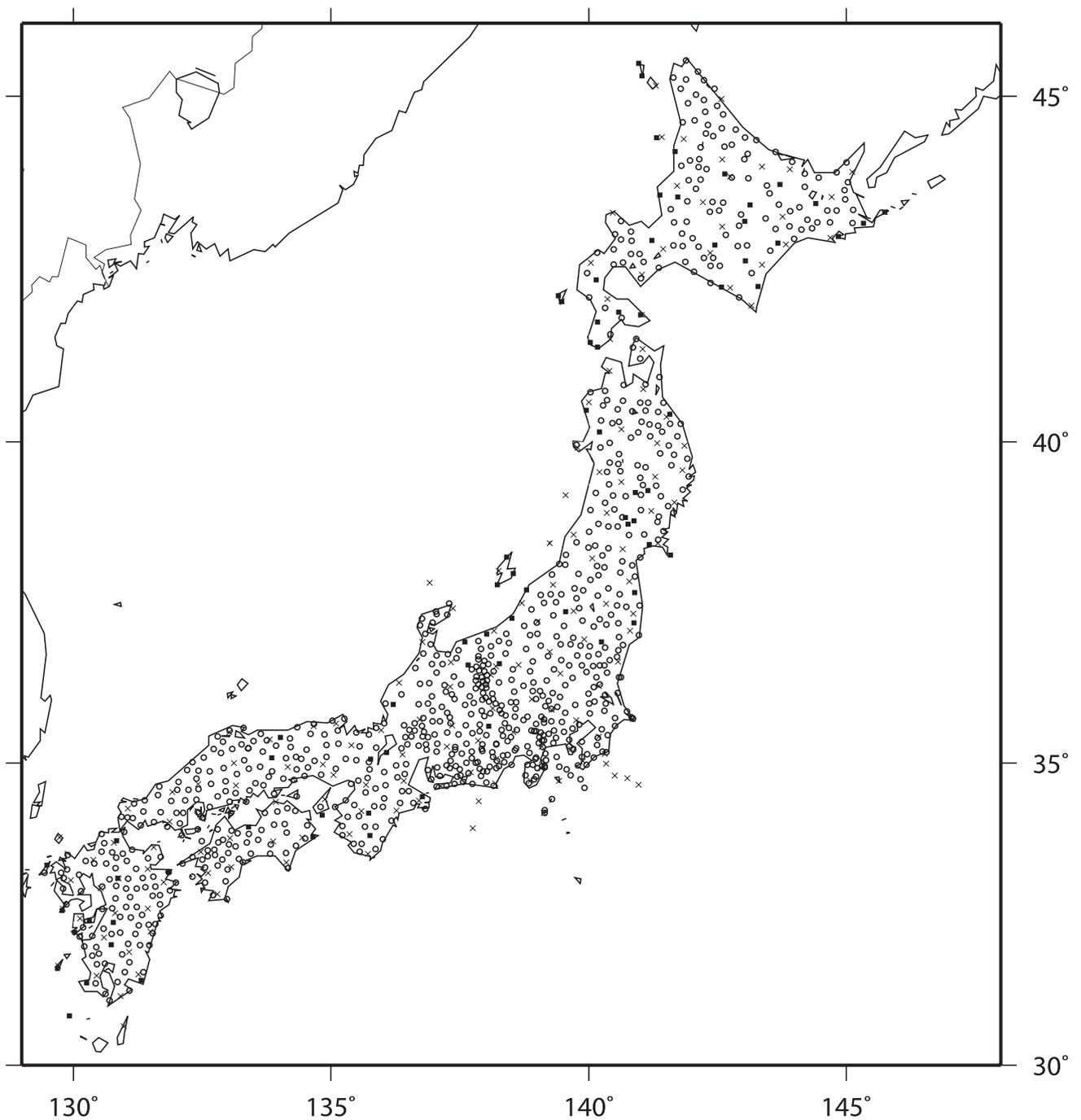


図1 使用した観測点分布。○は防災科研 Hi-net、×は気象庁、■は各大学機関（詳細は本文中に記載）の定常観測点の位置を示す。

断したため、本報告では解析対象から除外した。

その結果、日本内陸域において 7961 イベントのメカニズム解を決定することができた。最適なメカニズム解と最適解より 1.1 倍残差が多いメカニズム解（複数解あり）の節面方向とを比較することにより、最適メカニズム解の節面方向誤差の評価を行った。その結果メカニズム解の節面方向の誤差は平均で 4 度であった。今回の解析で対象とした期間および領域内において、防災科学技術研究所 F-net により決定された CMT 解の数と比較す

ると、本報告では約 10 倍のメカニズム解データ数を得ることができた。

### 3. メカニズム解分布の特徴

決定できたメカニズム解 P 軸方位角の空間分布を図 4 に示す。ここでは、P 軸の伏角が 60 度以上を正断層型、T 軸の伏角が 60 度以上を逆断層型、P 軸の伏角が 30 度以下かつ T 軸の伏角が 30 度以下を横ずれ断層型とし、それ以外を中間型と分類した。なお、図 4 では正断層

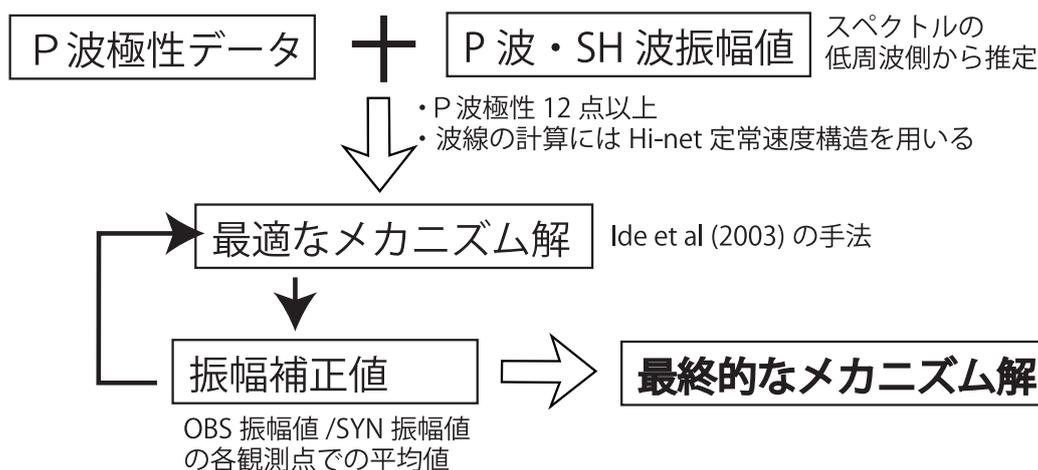


図2 メカニズム解決定手順。

型のメカニズム解については、P軸方位の代わりにB軸(Null軸)方位をプロットした。

広域的なメカニズム解分布の特徴としては、東北地方では東西方向のP軸を持つ逆断層型の地震が卓越しているのに対して、西南日本では東西方向のP軸を持つ横ずれ断層型の地震が比較的多く発生していることが分かる(図4(a)~(d))。また九州地方では別府から島原にかけての領域では横ずれ断層型に加えて正断層型の地震が多く発生している。より局所的な特徴に着目すると、例えば三陸海岸に沿った領域の深さ10-20kmの範囲では南北方向のP軸をもつ逆断層型の地震が発生(図4(d))、中部から近畿にかけての領域で逆断層型の地震が比較的多く発生している(図4(d)、拡大図は図5)、山陰地方ではP軸の方位が西北西-東南東方向の横ずれ断層型の地震が発生している(図4(c))などの特徴が見られる。なお深さ20~30kmの領域では(図4(e)(f))、関東から東海にかけて北西-南東から南北方向のP軸を持つ逆断層あるいは横ずれ型の地震が多く発生しているが、この地域のプレート境界の深さ(例えば、Ishida, 1992)を考慮にいと、これらのほとんどはこの地域に沈み込むフィリピン海プレート内部で発生している地震である。

#### 4. 応力インバージョン法を用いた応力場の推定

上記のメカニズム解データをもとに、応力インバージョン法を用いて日本内陸域の広域的な応力場の空間分布を推定した。応力インバージョン法では、次の2つの仮定のもと、解析対象領域内の最適な応力解を推定する：(1) 解析対象領域内の応力場は空間及び時間的に均質である、(2) 地震時の断層運動は断層面上でせん断応力が最大となる方向にすべる。応力インバージョン法により

決定することができる値は、主応力軸( $\sigma_1$ :最大主応力、 $\sigma_2$ :中間主応力、 $\sigma_3$ :最小主応力)の方向と各主応力の相対的な大きさである応力比( $R=(\sigma_1-\sigma_2)/(\sigma_1-\sigma_3)$ )である。本報告では、Hardebeck and Michael (2006)によって開発された、Damped Inversion法を用いた。この手法は、近接するグリット間で応力場の違いが最小になるように(応力が連続に変化するよう)ダンピングパラメータを導入し、すべてのグリットにおける最適な応力解をインバージョンにより推定する方法である。

日本内陸域に0.2度間隔のグリットを設け、グリット内に8個のメカニズム解データがある領域に対して応力場の推定を行った。また、メカニズム解節面データを用いた通常に応力インバージョンの際には、2つの節面から先験的に断層面を選択する必要があるが、ここでは両方の節面データを用いた。この方法が、応力解の最適値を得るのに有効であることは、Michael (1987)において示されている。

推定された応力場の空間分布を図6に示す。ここでは、応力場を水平面内でもっとも圧縮応力が作用する方向である水平最大圧縮軸( $\sigma_{hmax}$ )の形で表現した。また、応力場の種類を、Simpson (1997)の定義に従い分類した。

応力場の分布の特徴として、応力場の種類に着目すると、東日本では逆断層型、西南日本では横ずれ型が卓越しているように見える。正断層型の応力場については、例えば九州地方の別府から島原にかけての領域で卓越して分布している。こうした応力場の空間分布の特徴は、Townend and Zoback (2006)やTerakawa and Matsu'ura (2010)の先行研究によって得られた結果と整合する。局所的には、例えば濃尾平野から近畿地方にかけての領域では、逆断層型の応力場が見られる。この地域の応力場の特徴については、塚原・小林 (1991)において同様に

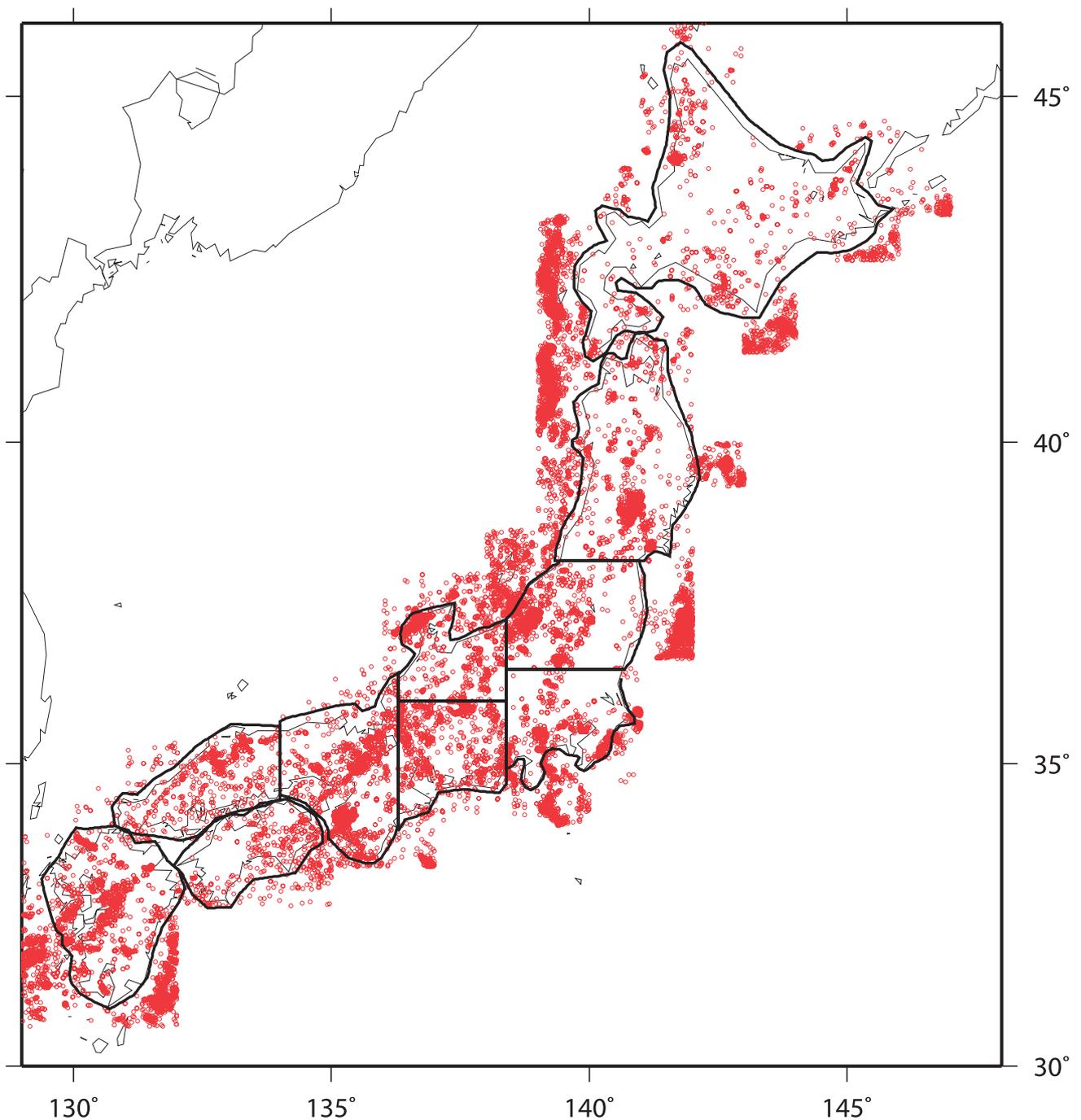


図3 メカニズム解決定を行うための領域区分。灰色丸は地震の震源位置を表す。

指摘されている。

次に、 $\sigma_{hmax}$  の方向に着目すると、日本の内陸域では基本的には東西圧縮の応力が卓越するが、地域によって系統的に変化している場所が見られる。例えば、 $\sigma_{hmax}$  の方向が三陸海岸では南北方向、中越～中部地域にかけては西北西－東南東方向、関東地方北部域では北東－南西方向、山陰地方では西北西－東南東方向、九州地方の南部では北東－南西に変化していることが分かる。山陰地方に見られた西北西－東南東方向の  $\sigma_{hmax}$  については、Kawanishi et al., (2009) でも指摘されており、彼らはそ

れを下部地殻の局所的な変形に起因するものと解釈している。また、九州南部に見られた  $\sigma_{hmax}$  の空間変化については、中央構造線の西方延長にあたる、別府－万年山断層帯や布田川・日奈区断層帯を境にして変化しているように見られることから、この地域の広域的なテクトニクスと関連していることが示唆される。このように、内陸域で見られる系統的な応力場の変化は、地殻内の構造不均質、活断層構造や、それを支配するテクトニクス、さらにプレート構造の不均質などに影響されていると考えられる。今後は、応力場の空間変化との関係について

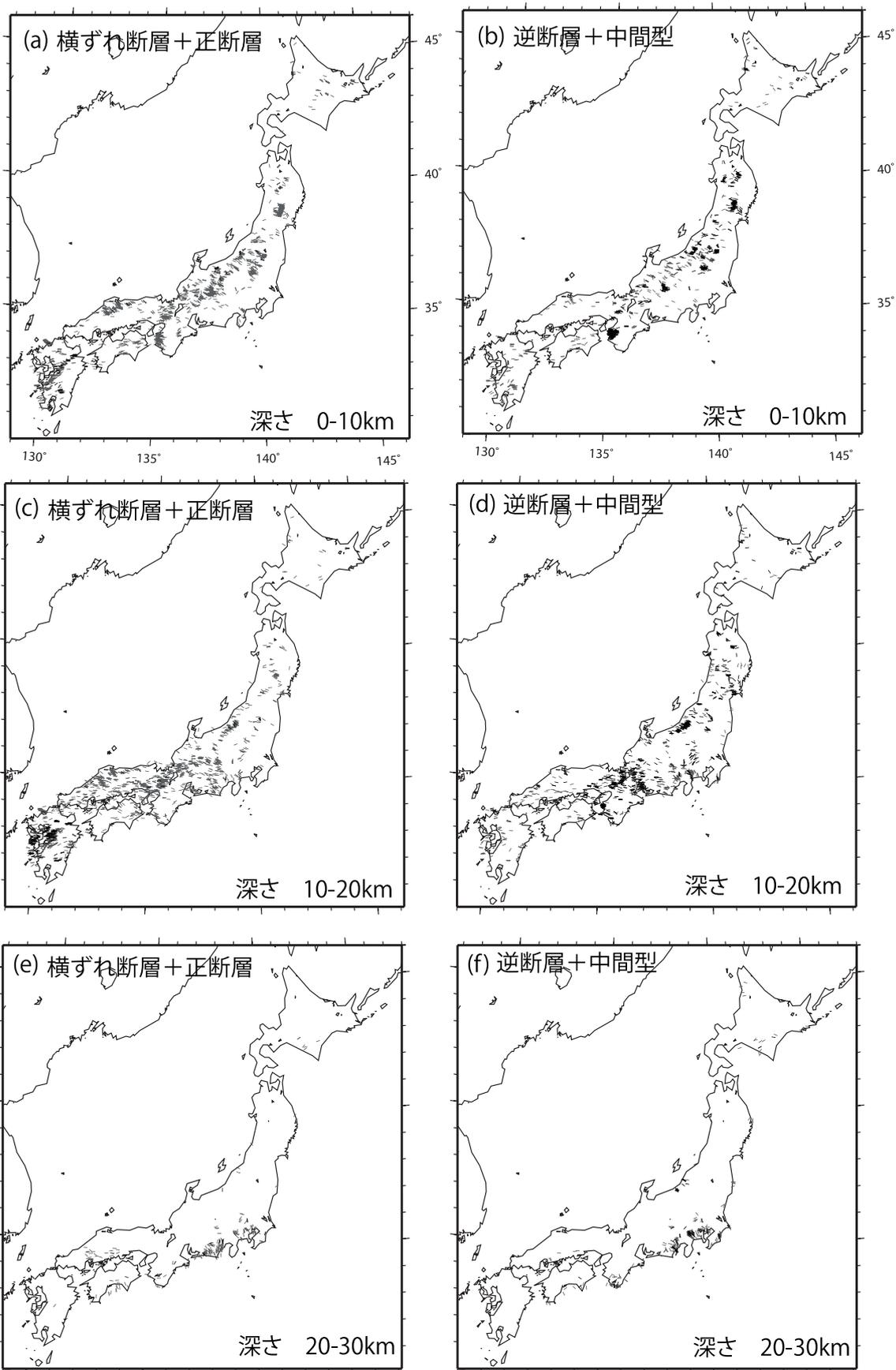


図4 メカニズム解P軸の方位角分布を示す（但し、正断層型についてはB軸方位を示す）。(a), (b)に深さ0～10km、(c), (d)に深さ10～20km、(e), (f)に深さ20～30kmの範囲内に発生した地震のP軸をそれぞれ示す。（左列）正断層型（黒色）および横ずれ断層（灰色）、（右列）逆断層（黒色）および中間型（灰色）の地震のメカニズム解P軸。

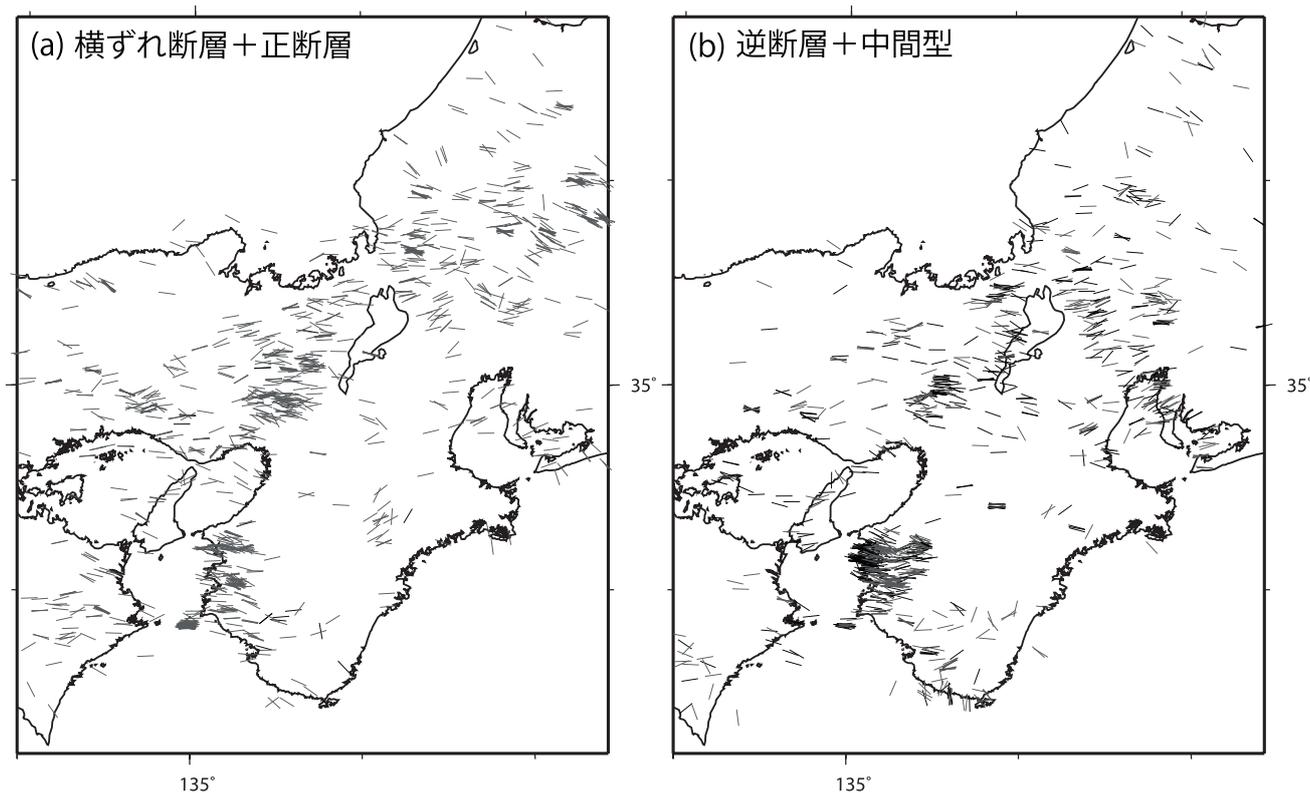


図5 中部から近畿地方にかけての領域の深さ0-30kmの範囲におけるメカニズム解P軸の方位角分布を示す。(左列) 正断層型(黒色)および横ずれ断層(灰色)、(右列) 逆断層(黒色)および中間型(灰色)の地震のメカニズム解P軸。

より詳細に議論する必要がある。

一方、関東から東海域にかけては、 $\sigma_{nmax}$  が北西-南東方向となっているが、上記のとおりこの地域で発生する地震のほとんどがフィリピン海プレート内部の地震と見られるため、これはプレート内部の応力状態を反映していると考えられる。

## 5. まとめと今後の課題

内陸域での詳細な広域応力場の分布を得るために、P波極性に加えて、P波SHの振幅値を加えてマグニチュード2を下限とする微小地震のメカニズム解決定を行った。その結果、日本の内陸域において2004年1月から2011年1月の期間で約8000個の地震のメカニズム解を決定することができ、平均誤差4度以内と精度よく求められた。決定されたメカニズム解データに応力インバージョン法を適用し、0.2度間隔で応力場の分布を推定し、内陸域における詳細な応力場の空間変化を得た。

今後は、得られた結果をもとに、内陸域の応力場がどのような要因により支配されているのか、空間的な変化とその地域でのテクトニクスや地殻構造との関係について検討することが課題である。またGPSなどから推定

される現在の内陸域におけるひずみ変化と応力場がどのような関係になっているかを調べることも、内陸域の応力状態を形成するメカニズムを理解する上で重要となろう。本報告では広域な応力場を見るためにグリッド間隔を0.2度としたが、地震活動が活発な領域や、主要活断層周辺では、より細かい分解能で応力場を推定し、活断層の構造や断層の活動度と応力場との関係を明らかにしていく予定である。

## 謝辞

本報告では、防災科研Hi-net、気象庁、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学の波形データを使用させて頂いた。東京大学井出哲博士にはメカニズム解決定プログラムを提供して頂いた。産業技術総合研究所今西和俊博士には、メカニズム解決定に関する有益な助言を頂いた。本報告の図は、Generic Mapping Tools (Wessel and Smith, 1995) で作成された。本研究は科研費MEXT/JSPS(23740347)の助成を受けたものである。

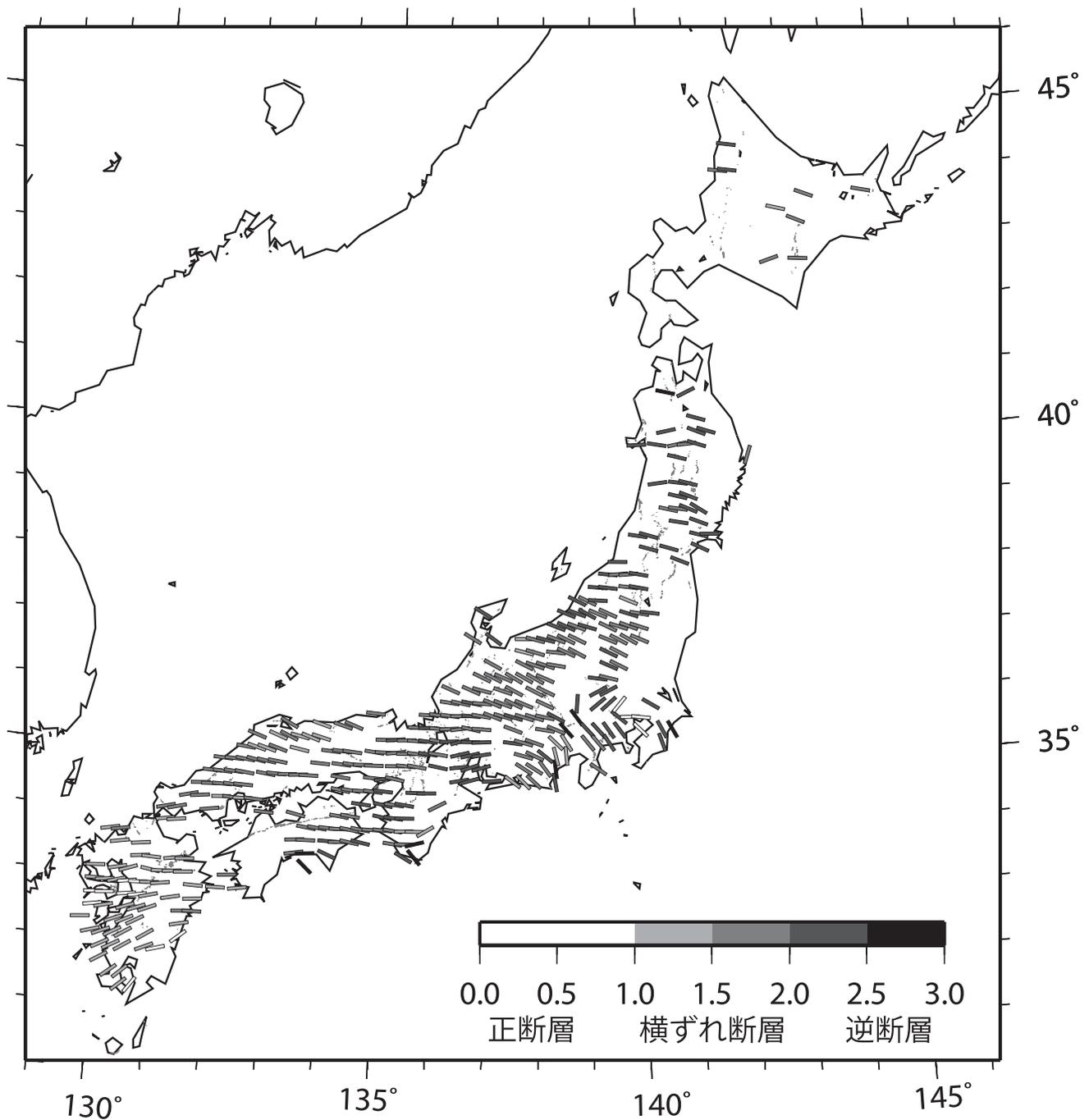


図6 応力インバージョン法により推定された水平最大圧縮軸 ( $\sigma_{hmax}$ ) 方向の空間分布。バーの色は Simpson (1997) の定義により分類された応力場の種類を示す。灰色線は、主要活断層の地表トレース (活断層研究会、1991)。

参考文献

Hardebeck, J. L., and A. J. Michael (2006) , Damped regional-scale stress inversions: Methodology and examples for southern California and the Coalinga aftershock sequence, *J. Geophys. Res.*, 111, B11310, doi:10.1029/2005JB004144.

Ide, S., G.C. Beroze, S. G. Prejean and W. L. Ellsworth (2003) , Apparent break in earthquake scaling due to path and site effects on deep borehole recordings, *J. Geophys.*

*Res.*, 108 (B5) , 2271, doi:10.1029/2001JB001617.

今西和俊・長郁夫・桑原保人・平田直・P. Yannis (2006) 糸魚川－静岡構造線活断層系中・南部域における微小地震の発震機構, 活断層・古地震研究報告, 6, 55-70.

Ishida, M. (1992) Geometry and relative motion of the Philippine Sea plate and Pacific plate beneath the Kanto-Tokai district, Japan, *J. Geophys. Res.*, 97, 489-513.

活断層研究会 (1991) 日本の活断層, 東京大学出版会,

437pp.

- Kawanishi, R., Iio, Y., Yukutake, Y., Shibutani, T. and Katao, H. (2009) Local stress concentration in the seismic belt along the Japan Sea coast inferred from numerous precise focal mechanisms -Implications for the stress accumulation process on intraplate earthquake faults-, *J. Geophys. Res.*, 114, B01309, doi:10.1029/2008JB005765.
- Michael, A. J. (1987) Use of focal mechanisms to determine stress: A control study, *J. Geophys. Res.*, 92, 357-368.
- Simpson, R. W. (1997) Quantifying Anderson's fault types, *J. Geophys. Res.*, 102, 17,909-17,919.
- Terakawa, T., and M. Matsu'ura (2010) The 3 - D tectonic stress fields in and around Japan inverted from centroid moment tensor data of seismic events, *Tectonics*, 29, 1-14, doi:10.1029/2009TC002626,
- Townend, J., and M. Zoback (2006) Stress, strain, and mountain building in central Japan, *J. Geophys. Res.*, 111, B03411, doi:10.1029/2005JB003759
- 塚原弘昭・小林洋二 (1991) 中・西部日本の地殻応力, *地震*, 44, 221-231.
- 鵜川元雄・石田瑞穂・松村正三・笠原敬司 (1984) 関東・東海地域地震観測網による震源決定法について, *国立防災科学センター報告書*, 53, 1-88.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith (1995) New version of the generic mapping tools released, *Eos Trans. AGU*, 76, 329.