

3. 2. 5. 2 沿岸域の地震活動の把握

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 8 か年の年次実施計画
 - 1) 平成 2 5 年度
 - 2) 平成 2 6 年度
 - 3) 平成 2 7 年度
 - 4) 平成 2 8 年度
 - 5) 平成 2 9 年度
 - 6) 平成 3 0 年度
 - 7) 平成 3 1 年度
 - 8) 平成 3 2 年度
- (e) 平成 2 5 年度業務目的

(2) 平成 2 5 年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法及び成果
 - 1) 地震発生層深度の推定
 - a) はじめに
 - b) 手法及びデータ
 - c) 解析結果と議論
 - 2) 三次元高分解能地震波トモグラフィー解析
 - a) はじめに
 - b) 手法及びデータ
 - c) 解析結果と議論
- (c) 結論ならびに今後の課題
- (d) 引用文献
- (e) 成果の論文発表・口頭発表等
- (f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

(3) 平成 2 6 年度業務計画案

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

2.5.2 沿岸域の地震活動の把握

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
独立行政法人防災科学技術研究所 観測・予測研究領域 地震・火山防 災研究ユニット	主任研究員	武田 哲也
	主任研究員	浅野 陽一
	主任研究員	汐見 勝彦
	主任研究員	松本 拓己
	主任研究員	木村 尚紀
	主任研究員	松澤 孝紀
	主任研究員	上野 友岳
	主任研究員	木村 武志

(c) 業務の目的

陸域の自然地震観測網のデータを基に、詳細な震源分布を明らかにし、地震発生層の下限をもとに断層面の深さについて推定する。また、発震機構解をもとに断層面上の滑り角を推定する。

(d) 8か年の年次実施計画

1) 平成25年度：

日本海沿岸域における地震活動データから、震源断層モデルにおいて重要なパラメータである地震発生層深度とすべり角の初期的情報を提供する。地震発生層深度は、ルーチン震源データに基づき、地震発生層の下限と上限の深さ（D90 と D10）の計算を実施する。その結果を基に他サブテーマで推定された予備震源断層の位置・形状情報から、各震源断層における地震発生層深度の見積もりを行う。一方、すべり角は、既存の地殻応力研究の結果に基づいた日本島弧の広域応力場に基づき、前述の予備震源断層の位置・形状情報の走向・傾斜角のデータから、最適なすべり角を推定する。

2) 平成26年度：

日本海沿岸域における地震発生層深度の改善を図ることを目的に、使用する速度モデルを信頼性のある三次元速度構造を考慮した震源再決定を行う。これによって震源の精度（特に深さ方向）が向上することから、得られた結果より地震発生層深度を推定し直し、前年度に推定した震源断層毎のモデルパラメータ更新を行う。

3) 平成27年度：

ルーチンメカニズム解データから沿岸域の広域応力場の推定を行い、震源断層モデルのすべり角の情報を更新する。既存研究・調査から三次元速度構造を改良し、震源再決定を実施して、震源断層モデルの地震発生層深度の情報を更新する。

4) 平成 28 年度：

変換波の情報を用いて沿岸域の震源の深さ精度を向上させる手法を開発する。

5) 平成 29 年度：

北陸・近畿沿岸地域で発生した地震の変換波の読み取りを行い、平成 28 年度に開発した手法を用いて震源再決定を行う。その震源分布に基づき、微小地震のメカニズム解の決定を行い、北陸・近畿沿岸地域の細分化した応力場の推定を行う。これらの結果から、北陸・近畿沿岸地域の地震発生層深度と断層すべり角の情報を更新する。

6) 平成 30 年度：

山陰・九州沿岸地域で発生した地震の変換波の読み取りを行い、平成 28 年度に開発した手法を用いて震源再決定を行う。その震源分布に基づき、微小地震のメカニズム解の決定を行い、山陰・九州沿岸地域の細分化した応力場の推定を行う。これらの結果から、山陰・九州地域の地震発生層深度と断層すべり角の情報を更新する。

7) 平成 31 年度：

北海道・青森沿岸地域で発生した地震の変換波の読み取りを行い、平成 28 年度に開発した手法を用いて震源再決定を行う。その震源分布に基づき、微小地震のメカニズム解の決定を行い、北海道・青森沿岸地域の細分化した応力場の推定を行う。これらの結果から、北海道・青森沿岸地域の地震発生層深度と断層すべり角の情報を更新する。

8) 平成 32 年度：

これまでの調査結果を取り入れた三次元速度構造モデルを構築し、それに基づき震源再決定を行い、日本海側全域の地震発生層深度の最終的な情報を提供する。合わせて、これまで得られた微小地震メカニズム解を全て取り込み、断層すべり角の最終的な情報を提供する。

(e) 平成 25 年度業務目的

日本海沿岸域における地震活動データから、震源断層モデルにおいて重要なパラメータである地震発生層深度とすべり角の初期的情報を提供する。地震発生層深度は、ルーチン震源データに基づき、D90 と D10 の計算を実施する。その結果を基に他サブテーマで推定された予備震源断層の位置・形状情報から、各震源断層における地震発生層深度の見積もりを行う。一方、すべり角は、既存の地殻応力研究の結果に基づいた日本島弧の広域応力場に基づき、前述の予備震源断層の位置・形状情報の走向・傾斜角のデータから、最適なすべり角を推定する。

(2) 平成 25 年度の成果

(a) 業務の要約

日本海沿岸域における地震活動データから、震源断層モデルにおいて重要なパラメータである地震発生層深度とすべり角の初期的情報を提供した。地震発生層深度は、ルーチン震源データに基づき、地震発生層の下限と上限の深さ（D90 と D10）の計算を実施した。その結果を基に他サブテーマで推定された予備震源断層の位置・形状情報から、各震源断層における地震発生層深度の見積もりを行った。一方、すべり角は、既存の地殻応力研究の結果に基づいた日本島弧の広域応力場に基づき、前述の予備震源断層の位置・形状情報の走向・傾斜角のデータから、最適なすべり角を推定した。

(b) 業務の実施方法及び成果

1) 地震発生層深度の推定

a) はじめに

地震発生層深度は、地震の発生規模の推定に直結し、震源断層毎に地震発生層深度を調べることは、想定すべき大地震の震源断層モデルを設定する上で重要なパラメータとなる。地震発生層は、地殻内部における脆性破壊の可能な範囲に対応し、そのような媒質の性質は、岩質・温度・圧力等に強く依存している。そのため、地震発生層深度には地域性が存在し、震源断層が想定されている場所毎に推定する必要がある。

地震発生層深度の推定には、いくつか方法があり、(1) 実際に発生した地震の本震波形データや余震分布を用いた震源断層の推定、(2) 微小地震の発生分布からの推定、(3) 上部地殻の速度構造からの推定、(4) キュリー点深度（岩石の強磁性が失われる温度の深さ）からの推定、(5) 地下温度構造からの推定、などが挙げられる。(1) から (5) にかけて情報の信頼性が低くなるのが一般的であるが、実際に使用可能なデータの存在は別問題である。(1) のデータは、確度の高い情報ではあるが、地震観測網の整備後に地震が発生した断層は数少なく、利用できるデータはほとんどない。(3) ～ (5) は、地震発生層との明確な関連付けについてさらなる調査研究が必要であったり、震源断層毎に推定するための分解能が不十分であったりするため、活用の優先度は低くならざるを得ない。特に対象となる震源断層が海域に存在する場合は、(4) と (5) のデータの使用は困難である。そこで本サブテーマでは、データの蓄積が十分にあり、比較的広範囲にわたってデータの使用が可能である (2) の微小地震の発生分布からの推定を行うことにする。

微小地震の発生分布から地震発生層下限を評価する指標として、D90 がある。D90 とは、ある深さより上方にその地域の地殻内で発生する地震数の 90% が含まれるという指標である。この地殻内には、沈み込むプレート内で発生する地震は含まないものとする。一方、上限の指標としては D10 があり、これは D90 と同様にこの深さよりも上位に地震数の 10% の地震が含まれる深さを表す。これまでに Omuralieva et al. (2012)³⁾によって D90 が計算されているが、求められた領域はほぼ陸域だけに限られ、沿岸および日本海海域では求められていない。ここでは、沿岸域および日本海海域における震源断層においての D90 と D10 について推定を試みた。

b) 手法及びデータ

ここでは、D90 および D10 の推定方法を簡単にまとめる。まず解析対象領域に 10km 間隔のグリッドを面的に配置する（例として、図 1 左）。それぞれのグリッドを中心とした円柱を設定し、その円柱に入る震源データを取り出し、サブデータセットとする（図 1 右）。今回、円柱の大きさを、半径 20km、深さ 30km と設定した。サブデータセットを用いて、上位に地震数の 90%が含まれる深さ（D90）と上位に地震数の 10%が含まれる深さ（D10）を求める。この操作を、グリッド毎に行い、それぞれのグリッドで D90 および D10 を推定した。この操作の際に、円柱に入る解析対象の地震数が 50 個以下となるグリッドは計算から除外した。

解析対象の震源データとして、本年度は防災科学技術研究所の高感度地震観測網 Hi-net のルーチン震源データを使用した。データ期間は 2001 年 1 月より 2012 年 12 月までであり、8 時～18 時のノイズレベルの高い時間帯のデータは除外して解析に使用した。使用した震源分布データ（深さ 30km 以浅）を図 2 に示す。また、解析対象範囲を、日本海沿岸域とした。グリッドの配置を図 3 に示す。グリッドは、サブテーマ（3．2．5．1）より提供された断層をカバーするように配置した。尚、使用した断層の矩形モデルについての位置情報は、国土交通省・内閣府・文部科学省が事務局を務める「日本海における大規模地震に関する調査検討会」での検討過程のものを使用しており、当該検討会での検討が終了していない。このため、具体的な数値データについては、本報告では行わない。

c) 解析結果と議論

解析結果として得られた D90 および D10 の深さ分布をそれぞれ図 4 および図 5 に示す。大局として D90 と D10 とともに海域において強い地域性が表れている。まず D90 から見ると、東北地方および北海道地方沖では、陸域に比べて海域では相対的に深くなる傾向を示す。深度分布のばらつきは大きく、特に北海道南西沖、秋田・山形県境沖、新潟県沖で、深さ 25km を超える領域が存在している。能登半島以西の西南日本沖では、地震活動が限定的であるため、沿岸域を除いて、海域の D90 は広範囲にわたって推定できていない。続いて、D10 を見ると、東北地方および北海道地方沖では、D90 と同様に海域では深度分布のばらつきが大きく、北海道南西沖、秋田・山形県境沖、新潟県沖で、深さ 15km を超える深い領域がある。能登半島周辺で数 km 程度と浅いものの、それより以西ではおよそ 5km 前後を示し、若狭湾沖や島根県西部沖で 10km を超える深さを示す。震源断層毎に推定を行ったが、その半数近くは、地震数不足のため、求めることができなかった。今後、地震数の大幅な急増の見込みは薄いため、これらの断層での D90 および D10 の推定は困難だと考えられ、地震活動データ以外からの推定が必要となるであろう。決定された震源断層での D90 は、全般的に陸域に比べて深く、25km を超える断層が 5 つ存在している。この傾向は D10 でも確認され、深さ 10km を超える断層が散見される。しかしながら、これまで日本海側の沿岸海域で発生した震源断層の下限深さは、2007 年新潟県中越沖地震では 15km 程度（例えば、Kato et al., 2008²⁾）、1983 年日本海中部地震では 20km を下回る結果（例えば、海野ほか, 1985⁶⁾）が得られており、25km を超える下限深さは過大傾向と考えられる。得られた D90 および D10 の深さの信頼性は、震源データの精度に直結しているため、解析の基となる震源データの震源決定精度について、独立したデータからの検

証が必要とある。そのため、震源データの精度を評価するために広帯域地震観測網 F-net から提供されているモーメントテンソル(MT)解との深度比較を行った。

MT 解は広帯域地震計で観測された長周期波形（表面波を含む）を用いた解析に基づいて求められるため、通常の震源決定手法では十分な精度が得られない海域下で発生する地震の深さの推定（特に浅い場合）に対して有効である。但し、取り扱いに関して以下の留意点がある。（１）およそ M3.5 以上の地震でないと、解析に必要な長周期波形データが得られないため、MT 解を決定できる地震数に制約がある。（２）F-net による MT 解は、深さに関しては 3km 毎に求められているため、深さの推定誤差は少なくとも±3km 程度は存在する。（３）MT 解の推定は、点震源とみなして解析を行うため、MT 解の深さは震源断層面の中心を示している（M5 クラスの地震の場合だと断層面サイズは 3km 程度）。（４）MT 解の推定に必要なグリーン関数の計算は、水平成層構造の速度構造に基づいており、その上、海域における水深は考慮されていない。

以上のことを考慮に入れ、ルーチン震源データで深さ 15km を超えていた地震の MT 解を図 6 に示す。そのうちルーチン震源データよりも 10km 以上浅く推定されたものを赤丸で囲む。ルーチン震源データにおいて、日本海域で発生した深さ 15km 以深の地震のほとんどが、MT 解では浅くなる傾向を示す。先ほどの MT 解の留意点を考慮に入れても、ルーチン震源データが深く推定される傾向は、有意だと言える。すなわち、地震観測点から遠く離れた海域の地震を走時によって決定するルーチン震源データを用いた D90 や D10 は、実際よりも深く推定されている可能性がある。但し、その必要な修正量は、複雑な速度構造のため、場所によって異なると考えられ、後年度に実施予定の震源データの深さ精度の向上が非常に重要となる。本年度の結果は、予備解析の側面があり、今後はこの結果を順次改善していく。

2) 断層すべり角の推定

a) はじめに

断層すべり角は、強震動のみならず、海域における津波生成に大きな影響を与える。断層すべり角推定には、断層すべりの直接的な証拠である条線（スリッケンライン）が、断層露頭で確認される場合には用いることができる。しかし、条線がすべての断層で確認されるわけではない上、海域断層の場合だと、海底での断層露頭の確認はまず不可能である。そのため、より広範な断層に対して推定が可能になるような手法が必要である。そこで、断層すべり方向は、断層面上の最大せん断応力方向と一致するという仮定をし、断層すべり角を推定することにした。この仮定のことを Wallace-Bott 仮説 (Wallace, 1951⁷⁾、Bott, 1959¹⁾) という。以下では、この仮説に基づき、断層の走向・傾斜角情報と地域的な応力場の情報を使って、最適な断層すべり角を推定することを試みた。

b) 手法およびデータ

Wallace-Bott 仮説に基づき断層すべり角の推定するためには、断層の走向と傾斜角という位置形状情報と地域的な応力場の情報を必要とする。また、断層面は起伏のない平面とし、その形状は矩形とする。以下では、図例を用いて説明する。断層が矩形断層だとすると、断層の走向と傾斜角から、断層面における法線単位ベクトル $\mathbf{n}$ が求まる（図 7）。そ

の場での応力テンソル σ が与えられているとすると、断層面での応力ベクトル t は、

$$t = \sigma \cdot n \quad (1)$$

として与えられる。応力ベクトル t の断層面法線方向ベクトル t_n とせん断方向ベクトル t_s はそれぞれ、

$$t_n = (n \cdot t)n \quad (2)$$

$$t_s = t - t_n = t - (n \cdot t)n \quad (3)$$

として与えられる。この t_s の方向を断層すべり方向とする。 t_s が推定されると、断層の走向方向 s と t_s の角度を計算して、断層すべり角 λ が求められる (図 8)。

解析に使用する震源断層の走向および傾斜角データは、前述の断層パラメータを用い、応力テンソルデータは、Terakawa and Matsu'ura(2012)⁵⁾がセントロイドモーメントテンソル(CMT)解データに基づいて推定した日本島弧全域三次元構造応力場のデータを用いた (図 9)。応力テンソルデータは、東北地方から北海道にかけては、東西方向もしくは北西-南東方向に σ_1 軸を持ち、上下方向に σ_3 軸を持つ逆断層型傾向を示す。一方、能登半島より西側では、東西方向に σ_1 軸を持ち、南北方向に σ_3 軸を持つ横ずれ断層型傾向を示す。解析には、各震源断層の中点の位置における深さ 10km の応力テンソルデータを抽出して用いた。

c) 解析結果と議論

推定された震源断層における断層すべり角の傾向を調べるため、図 10 に断層の走向とその場の応力テンソルと断層すべり角を示す。東北地方から北海道地方の沿岸にかけては、90°に近い断層すべり角を示す。一方、能登半島より、西側では断層すべり角が 0°付近もしくは±180°付近に集中している。

東北地方から北海道地方での応力テンソルデータは、東西方向もしくは北西-南東方向に σ_1 軸、上下方向に σ_3 軸を持っており、与えられた震源断層パラメータの断層走向が南北に近いものが多いので、断層すべり角が 90°に近い逆断層傾向を示すと考えられる。一方、能登半島以西は、東西方向に σ_1 軸を持ち、南北方向に σ_3 軸を持っており、断層走向が北東-南西方向、もしくはそれに共役の北西-南東方向のものが多いため、断層すべり角が 0°付近もしくは±180°付近に集中する横ずれ断層型が多くなると考えられる。

(c) 結論ならびに今後の課題

今回、ルーチン震源データを基に、海域沿岸断層の地震発生層深度(D90 および D10)を推定した。推定された D90 および D10 は、海域において大きなバラつきを示している。D90 に関して深さ 25km を超える震源断層が散見された。しかしながら、ルーチン震源データと MT 解との震源深さ比較によって、沿岸および海域の震源データは実際よりも深く推定されている可能性が示唆された。このことから、より詳細な解析を行うためには、海域の震源データの深さ精度の向上が必要である。

今回もう一つの課題として、Wallace-Bott 仮説に基づき、断層すべり角を推定した。後年度の本調査研究で計画されている海域の構造調査結果によって断層の走向および傾斜角の情報が改善されると期待される。また微小地震のメカニズム解データを用いた応力テンソルインバージョン等によって、より詳細な応力場の情報が推定できる可能性がある。今

後、これらのデータを基に、より信頼性のある情報に更新していく予定である。

謝辞：断層すべり角の解析に使用しました応力テンソルデータは、名古屋大学大学院環境学研究科寺川寿子助教にご提供頂きました。ここに記して、感謝の意を申し上げます。

(d) 引用文献

- 1) Bott, M.H.P.: The mechanics of oblique slip faulting, *Geol. Mag.*, **96**, 109-117, 1959.
- 2) Kato, A., Sakai, S., Kurashimo, E., Igarashi, T., Iidaka, T., Hirata, N., Iwasaki, T., Kanazawa, T., and Group for the aftershock observations of the 2007 Niigataken Chuetsu-oki Earthquake: Imaging heterogeneous velocity structures and complex aftershock distributions in the source region of the 2007 Niigataken Chuetsu-oki Earthquake by a dense seismic observation, *Earth Planets Space*, **60**, 1111-1116, 2008.
- 3) Omuralieva, A., Hasegawa, A., Matsuzawa, T., Nakajima, J., Okada, T.: Lateral variation of the cutoff depth of shallow earthquakes beneath the Japan Islands and its implications for seismogenesis, *Tectonophysics*, 518-521, 93-105, 2012.
- 4) 佐藤良輔・岡田義光・鈴木保典・阿部勝征・島崎邦彦:日本の地震活断層パラメータ・ハンドブック, 鹿島出版会, 390p, 1989.
- 5) Terakawa, T. and Matsu'ura, M.: The 3-D tectonic stress fields in and around Japan inverted from centroid moment tensor data of seismic events, *Tectonics*, **29**, DOI:10.1029/2009TC002626, 2010.
- 6) 海野徳仁・長谷川昭・小原一成・松澤 暢・清水 洋・高木章雄・田中和夫・小菅正裕:1983年日本海中部地震の前震と余震の震源分布, *地震*, **38**, 399-410, 1985.
- 7) Wallace, R.E.: Geometry of shearing stress and relation to faulting, *J. Geol.*, **59**, 118-130, 1951.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

なし

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成26年度業務計画案

日本海沿岸域における地震発生層深度の改善を図ることを目的に、使用する速度モデルを信頼性のある三次元速度構造を考慮した震源再決定を行う。これによって震源の精度(特に深さ方向)が向上することから、得られた結果より地震発生層深度を推定し直し、前年度に推定した震源断層毎のモデルパラメータ更新を行う。

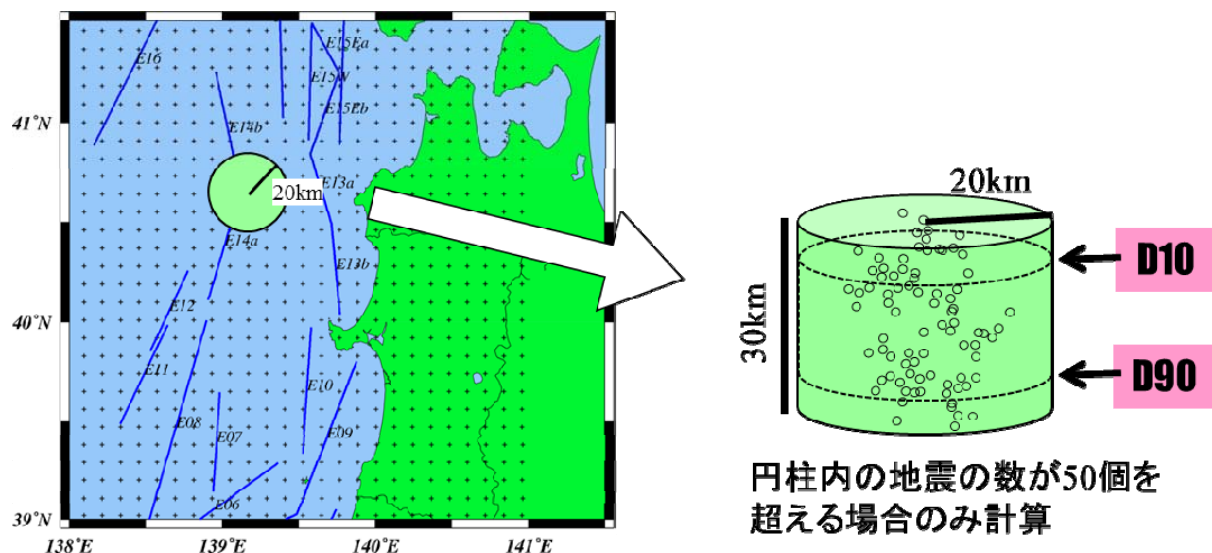


図 1 D90 および D10 の計算方法概念図

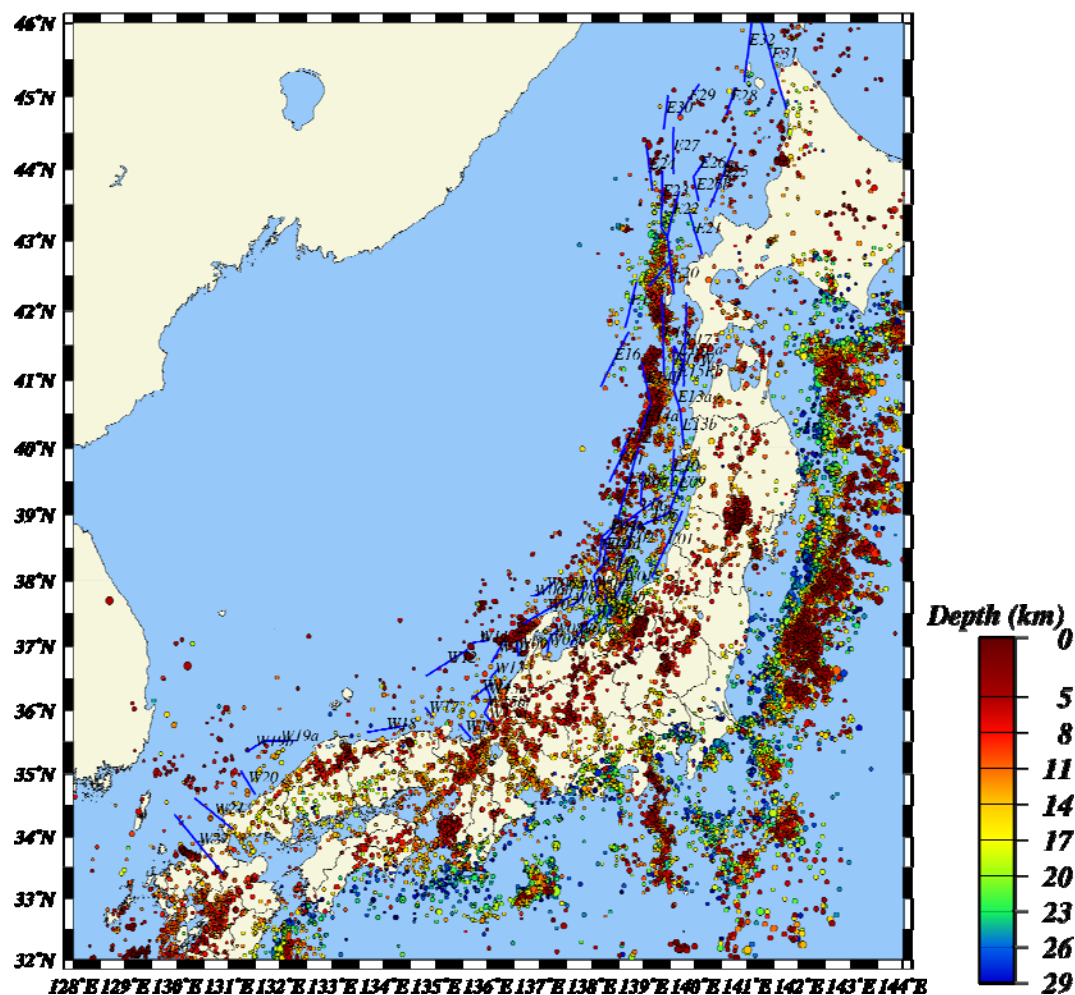


図 2 D90 および D10 の推定に使用した防災科学技術研究所高感度地震観測網(Hi-net)による震源分布 (2001-2012)。表示には M2.0 以上の震源だけを使用しているが、解析にはそれより M の小さいデータも使用している。解析対象の震源断層を青線で示す。

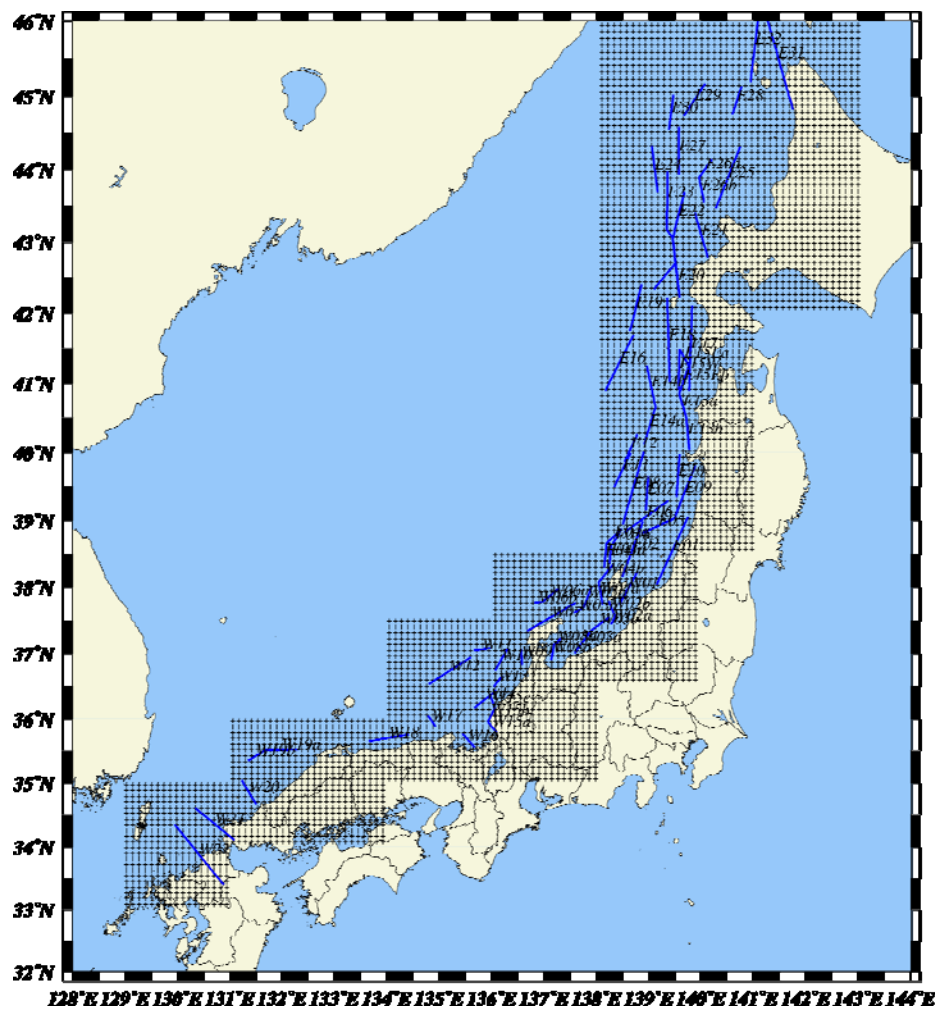


図 3 D90 および D10 の解析に使用したグリッド配置 (+で示す)。グリッド間隔は 10km である。解析対象の震源断層を青線で示す。

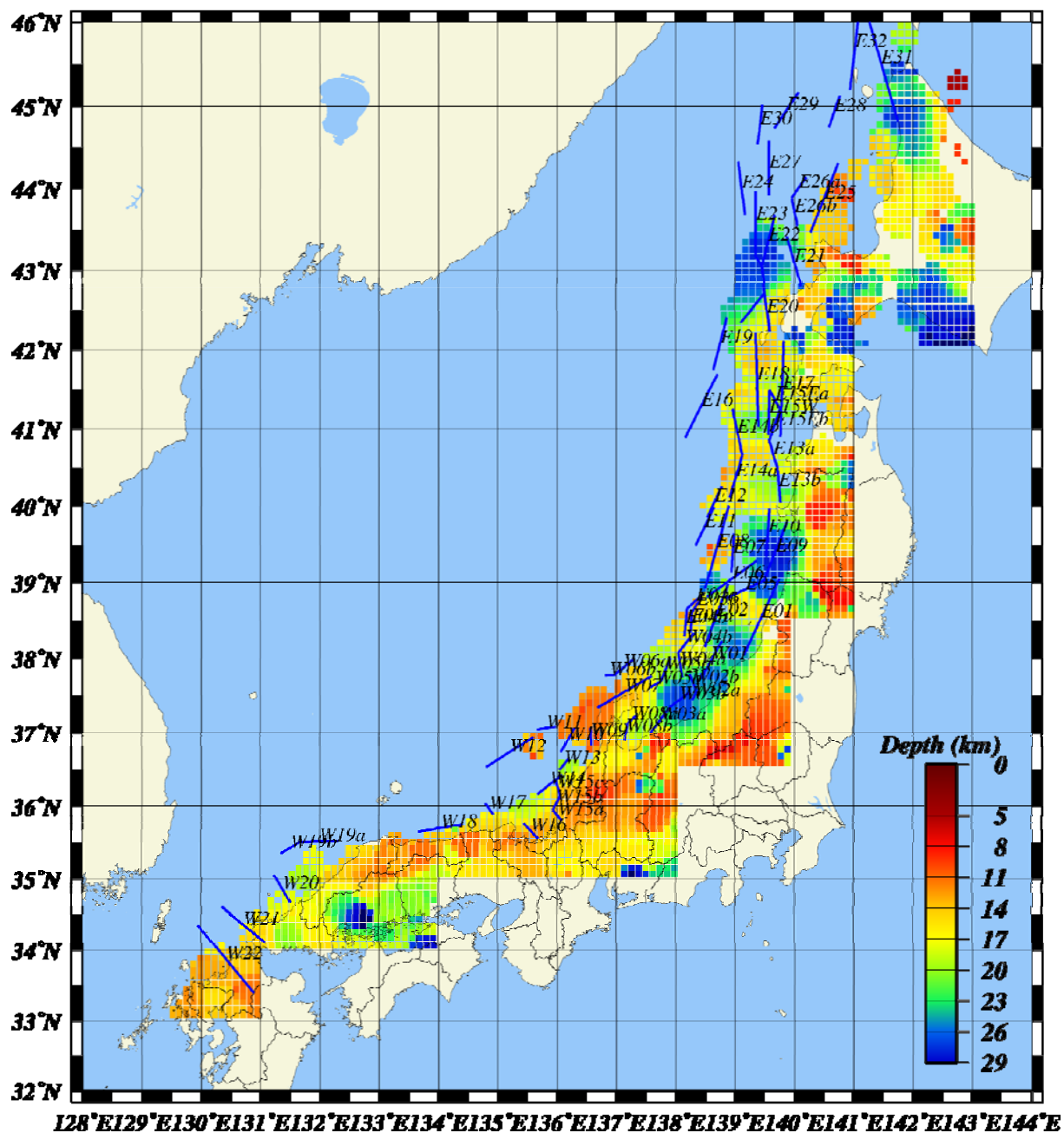


図4 解析によって推定された D90 の深度分布図。解析対象の震源断層を青線で示す。

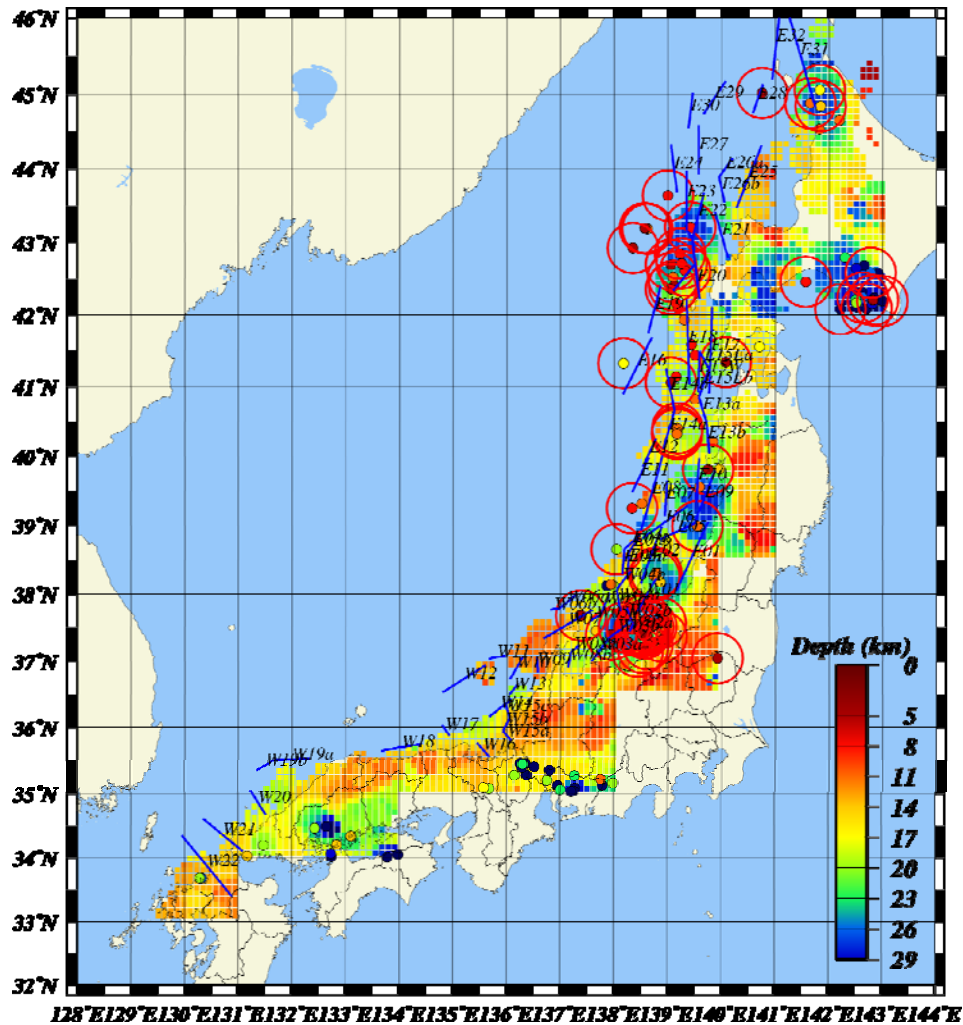


図 6 モーメントテンソル (MT) 解とルーチン震源データとの比較図。ルーチン震源データにおいて 15km 以深に推定され、F-net によって MT 解が決定されている震源を丸印で示し、図 3 に重ねる。丸印の色は MT 解の深さを示す。また MT 解がルーチン震源データより 10km 以上浅く推定されている震源を赤丸で囲む。

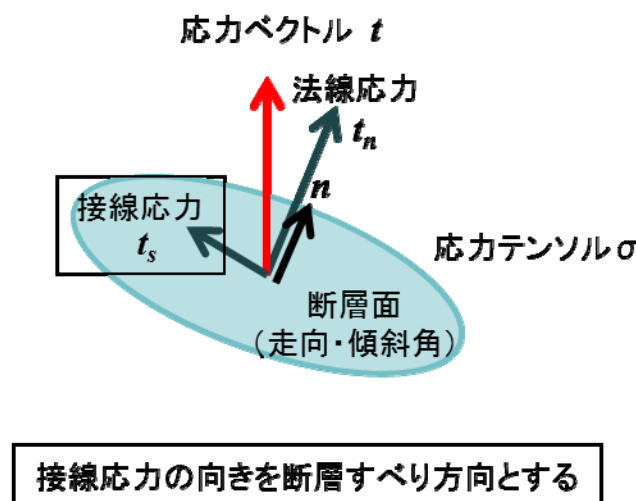
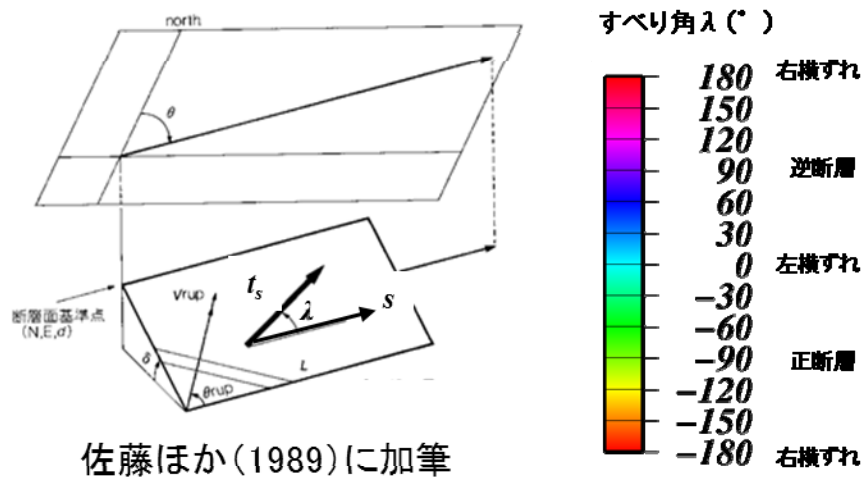


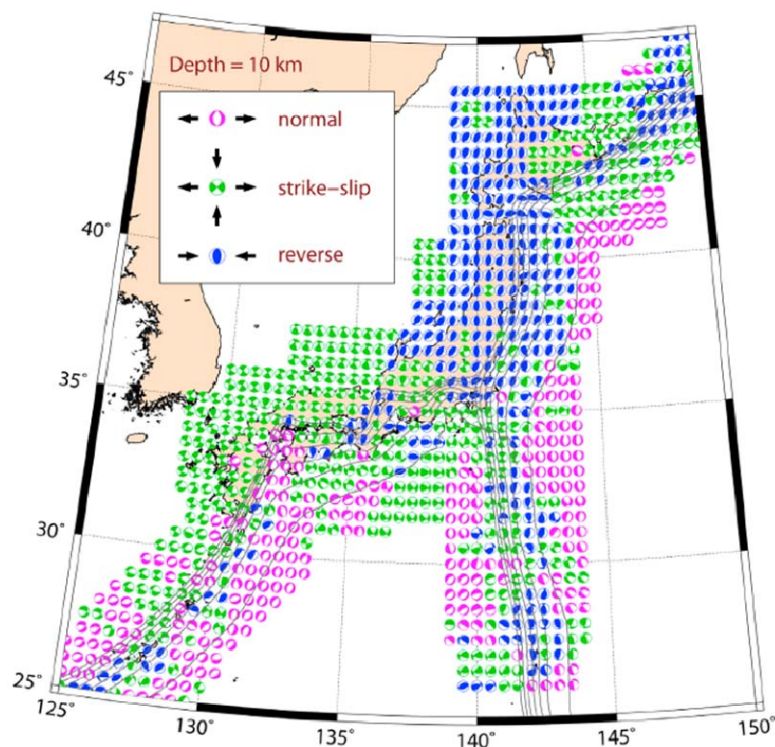
図 7 断層すべり方向を推定する概念図。



接線応力の向きと断層走向方向の角度を、断層すべり角とする

断層パラメータの説明

図 8 断層パラメータの説明図 (佐藤ほか, 1989⁴⁾に加筆)。接線応力方向 t_s と断層走向方向 s との間の断層すべり角 λ を求める。



Terakawa & Matsu'ura (2010)

図 9 解析に使用した応力テンソルデータ。図中では応力テンソルを震源球で表示している。データは、Terakawa and Matsu'ura (2010)⁵⁾による。解析には深さ 10km のデータを使用した。

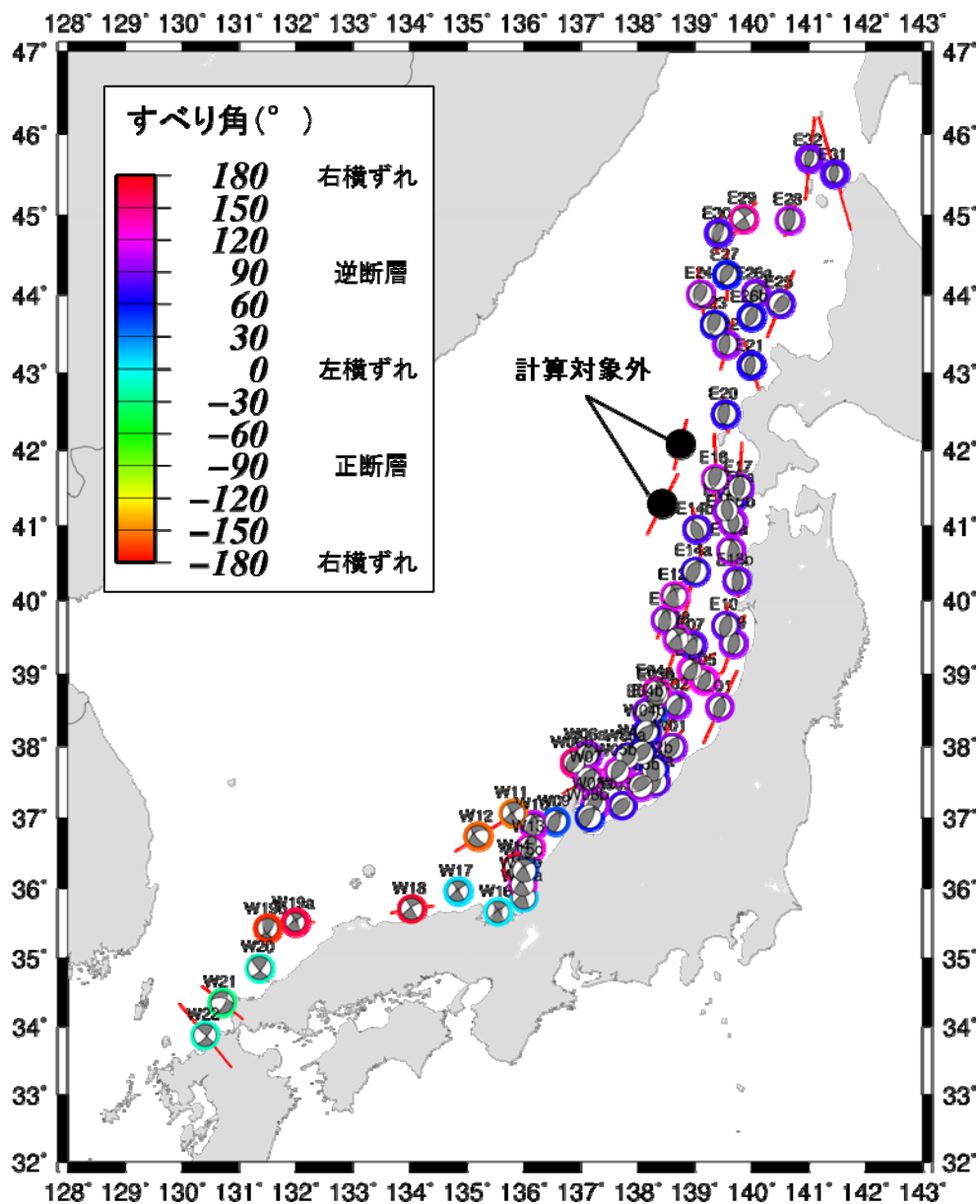


図 10 解析によって推定された断層すべり角を示す。カラースケールは断層すべり角の角度を示す。解析対象の震源断層を赤線で示す。断層線上に解析に使用した応力テンソルを震源球で示す。