

3. 2. 6 海溝型地震と内陸沿岸地震の関連メカニズムの評価準備

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（過去年度は、実施業務の要約）
 - 1) 平成25年度
 - 2) 平成26年度
 - 3) 平成27年度
 - 4) 平成28年度
 - 5) 平成29年度
 - 6) 平成30年度
 - 7) 平成31年度
 - 8) 平成32年度
- (e) 平成26年度業務目的

(2) 平成26年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法と成果
 - 1) 日本海の矩形断層モデルとすべり方向
 - 2) 有限要素法による地殻変動モデル
 - 3) 計算結果と考察
- (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27年度業務計画案

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

2.6 海溝型地震と内陸沿岸地震の関連メカニズムの評価準備

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
東京大学地震研究所	教授	佐藤比呂志
	教授	岩崎 貴哉
	助教	石山 達也
	特任研究員	橋間 昭徳
	特任研究員	加藤 直子

(c) 業務の目的

海域・海陸統合構造調査などによって得られるデータ（3.2.2、3.2.3）や、構成岩石モデル（3.2.5.3）から得られるレオロジー特性を反映させ、より現実的な日本海周辺域の構造を反映した構造モデルを構築する。この構造モデル内に、断層の形状モデル（3.2.5.1）を取り入れ、プレート境界での変位に伴う内陸の断層面上での応力変化を求めることにより、海溝型地震と内陸沿岸地震の関連メカニズムの評価準備を行う。

(d) 8か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成25年度：

構成岩石の暫定モデル（3.2.5.3）にもとづいて、日本海域周辺のリソスフェア構造を日本列島の三次元モデルに反映させるための、デジタルデータを作成した。

2) 平成26年度：

日本海および沿岸域の断層形状モデル（3.2.5.1）と構成岩石の初期モデル（3.2.5.3）にもとづいて、日本海域周辺の粘弾性モデル（初期モデル）を作成し、東北地方太平洋沖地震後の応力緩和に対応した断層面に作用するクーロン応力変化を求める。

3) 平成27年度：

前年度に作成した粘弾性モデル（初期モデル）の入力信号として、2011年東北地方太平洋沖地震以前の巨大地震も合わせて考慮し、巨大地震の発生前と発生後の内陸断層のクーロン応力変化を共に評価する。

4) 平成28年度：

過去のプレート境界の巨大地震に相当する変化を与え、その後の過去の被害地震の発生の復元性について検討を加える。

5) 平成29年度：

構造調査などの成果、更新した断層モデルを統合モデルに反映させる。過去のプレート境界の巨大地震と、内陸被害地震の関係について、数値実験によって検討する。

6) 平成30年度：

東北地方太平洋地震に伴うすべりを、震源域に与え、その後の上盤プレート内での応力変化、地殻変動を求め、観測された測地データ・発震機構解のデータと比較する。同時に、震源・波源断層面上のクーロン応力を求め、地震の発生のし易さを評価する手法を検討する。

7) 平成31年度：

数値実験を行い、東北太平洋沖地震後、地震が発生しやすい断層群を抽出する。

8) 平成32年度：

南海トラフ・千島弧の日本海溝沿いでのすべり欠損の増大に伴う、内陸・海域の断層群について、応力変化をもとめ、プレート境界での応力蓄積などもなう内陸での地震の起こりやすさについて、定量的に明らかにする。

(e) 平成26年度業務目的

日本海および沿岸域の断層形状モデル(3.2.5.1)と構成岩石の初期モデル(3.2.5.3)にもとづいて、日本海域周辺の粘弾性モデル(初期モデル)を作成し、東北地方太平洋沖地震後の応力緩和に対応した断層面に作用するクーロン応力変化を求める。

(2) 平成26年度の成果

(a) 業務の要約

日本海および沿岸域の断層形状モデル(3.2.5.1)と構成岩石の初期モデル(3.2.5.3)にもとづいて、日本海域周辺の粘弾性モデル(初期モデル)を作成し、東北地方太平洋沖地震後の応力緩和に対応した断層面に作用するクーロン応力変化を求めた。

(b) 業務の実施方法と成果

1) 日本海の矩形断層モデルとすべり方向

昨年度までに構築した有限要素法に基づく日本列島の地殻変動モデルの一次モデル(橋間ほか2013¹⁾)を用いて、日本海および沿岸域の矩形断層(3.2.5.1)における2011年東北地方太平洋沖地震(以下、東北沖地震と表記)によるクーロン応力変化を計算する。クーロン応力変化(ΔCFF)は断層面における剪断、法線応力変化($\Delta\tau, \Delta\sigma$)を用いて以下のように表される。

$$\Delta CFF = \Delta\tau + \mu'\Delta\sigma \quad (1)$$

ここで μ' は有効摩擦係数であり、ここでは0.4と仮定する。

東北沖地震による応力テンソルから、 $\Delta\tau$ を計算するためには断層面の形状だけでなく、すべり方向も指定する必要がある。ここでは、断層すべりは長期間にわたって蓄積された

応力を最も効率よく解消する方向、すなわち最大剪断応力の方向に起こると仮定する。日本列島域の応力場のモデルとしては Terakawa & Matsu'ura (2010)²⁾を用いて、すべり方向を決定した。図 1 に、矩形断層モデルと断層面上の応力場、得られたすべり方向を示す。

2) 有限要素法による地殻変動モデル

東北沖地震による応力を計算するための有限要素モデルは、モデル領域を 4900 km×4500 km×700 km にとり、日本列島下に沈み込む太平洋、フィリピン海プレートスラブの形状を取り入れている (Baba et al., 2002³⁾; Nakajima & Hasegawa, 2006⁴⁾; Nakajima & Hasegawa, 2007⁵⁾; Hirose et al., 2008⁶⁾; 弘瀬ほか, 2008⁷⁾; Nakajima et al., 2009⁸⁾; Kita et al., 2010⁹⁾; Hayes et al., 2012¹⁰⁾)。両スラブの厚さは 80 km とした。

弾性構造はスラブを除きそれぞれのプレート下で平行成層とし、日本列島を含むユーラシアプレートは Matsubara et al. (2008)¹¹⁾の平均的鉛直構造、太平洋、フィリピン海プレートの海洋地殻は Miura et al. (2005)¹²⁾に基づいて定めた。マントル以深は全地球一次元地震波速度構造モデル (Dziewonski & Anderson, 1981¹³⁾) を用いた。また、スラブは Matsubara et al. (2008)¹¹⁾、Matsubara & Obara (2011)¹⁴⁾、Huang et al. (2011)¹⁵⁾に基づき、周囲の同じ深さのものより 5 %早い地震波速度による弾性定数を用いた。

一方、巨大地震後の地殻応力の時間変化にはアセノスフェアの粘弾性緩和の効果を取り入れることが必要である。沈み込み帯の地震変動に伴い推定されるアセノスフェアの粘性率は $10^{18} - 10^{20}$ Pas の範囲である (e.g., Thatcher et al. 1980¹⁶⁾; Ohzono et al., 2012¹⁷⁾; Ashar et al., 2013¹⁸⁾)。本研究では、まずアセノスフェアの粘弾性緩和の基本的な性質を示すために、全粘弾性領域で粘性率を一様に 10^{19} Pas とした。粘弾性領域として、ユーラシアプレートでは 30 km 以深、太平洋とフィリピン海プレートでは 80 km 以深のスラブを除く領域とした。以上の領域を約 100 万個の一次正四面体要素によって分割した。四面体要素の大きさはすべり領域付近で 5 km にとりモデル領域の境界で 100 km にした。

プレート境界におけるすべり運動は断層面の上面と下面に相対変位を与えることによって表現する (Freed et al., 2012¹⁹⁾)。東北地方太平洋沖地震 (東北沖地震) のすべり分布は、上記の有限要素モデルを国土地理院による GPS 地殻変動データ、海上保安庁、東北大学などによる海底地殻変動データ (Sato et al., 2011²⁰⁾; Ito et al., 2011²¹⁾; Maeda et al., 2011²²⁾; Kido et al., 2011²³⁾; Hino et al., 2011²⁴⁾) を本モデルによりインバージョンしたものをを用いた (図 2)。

3) 計算結果と考察

震源断層については、日本海における大規模地震に関する調査検討会 (2014)²⁵⁾の断層モデルを用いた。図 3 に東北沖地震直後と 100 年後の各断層上における応力変化のパターンを震源球表示で示す。地震に伴う応力変化については Yoshida et al. (2012)²⁶⁾が震源メカニズムの解析などから求めており、本研究で計算した応力変化のパターンは彼らの結果と調和的である。100 年後の結果との比較からは、応力変化のパターン自体は時間が経っても大きくは変わらないことがわかる。

一方、図 4 には断層面上のクーロン応力変化を東北沖地震直後、10 年後、30 年後、100 年後についてカラースケールで表示した。クーロン応力変化の最も大きい断層は山形県沖

で地震直後に 0.2 MPa 減少する。応力変化の値は東北沖地震の震源域からの距離に依存して減少していく。内陸の断層については、Toda et al. (2011)²⁷⁾や地震調査研究推進本部による活断層評価²⁸⁾によると 0.1 MPa のオーダーでの減少（双葉断層のみ増加）であり、本研究の結果は既存研究と良い連続性を示している。

図に示した範囲では、糸魚川市沖と津軽沖の断層がクーロン応力変化でわずかながら増加を示している。これらの断層では東北沖地震による応力メカニズム（図 4）と比較すると、すべり方向（図 2c）が応力メカニズムの P 軸に近くなっており、剪断応力の減少による断層運動の抑制効果よりも法線応力の減少による促進効果が勝っているためである。東北沖地震は、震源域を中心として東北地方では東西伸張の応力場を作り出しているため（図 3）、東西短縮の逆断層活動を抑えるように働くと理解できるが、そこから離れた地域では東西以外の応力成分も関与してくるので、断層形状のわずかな違いや周辺物性の不均質によっては周囲の断層と異なる挙動を引き起こしうる。

応力の 100 年にわたる時間変化を見ていくと、どの断層でも単調な減少（増加）を示している。ここで計算した応力変化は東北沖地震後の粘弾性緩和のみを考慮しているので、例えば 100 年後の応力に関しては現実を表しているとは言い難い。巨大地震に伴う変動に関しては、余効すべり、粘弾性緩和、地震間のすべり域の固着を考える必要がある。本研究のように震源域からある程度離れた日本海沿岸の断層の長期的な活動評価にあたっては、余効すべりの影響はさほど大きくないが、すべり域の固着がいつから起こるのかを推定する必要がある。また、固着の影響に関しては、東北沖地震前の応力状態との比較検討とモデリングも重要である。

(c) 結論ならびに今後の課題

日本海域周辺の粘弾性モデル（初期モデル）を用いて、東北地方太平洋沖地震後の応力緩和に対応した日本海沿岸の断層面に作用するクーロン応力変化を求めた。計算結果の信頼性向上のためには、今後、断層モデルとともに、構造モデルの精緻化も求められる。また、東北沖地震によるアセノスフェアの粘弾性緩和の影響だけでなく、東北沖地震も含めた巨大地震サイクルの検討、特に東北沖地震以前のすべり領域が固着していた時期との比較研究とモデリングも重要である。

(d) 引用文献

- 1) 橋間昭徳・A. Freed・佐藤比呂志・西村卓也・D. Okaya・石山達也・松原誠・岩崎貴哉・T. Becker: 有限要素法による日本列島域における2011年東北沖地震の余効変動シミュレーション, 日本地球惑星科学連合2013大会, SCG68-12, 2013.
- 2) 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*, Vol.29, TC6008, 2010.
- 3) Baba, T., Tanioka, Y., Cummins, P.R. and Uhira, K.: The slip distribution of the 1946 Nankai earthquake estimated from tsunami inversion using a new plate model, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol.132, pp.59-73, 2002.

- 4) Nakajima, J. and Hasegawa, A.: Anomalous low-velocity zone and linear alignment of seismicity along it in the subducted Pacific slab beneath Kanto, Japan: Reactivation of subducted fracture zone? *Geophysical Research Letters*, Vol.33, L16309, doi:10.1029/2006GL026773, 2006.
- 5) Nakajima, J. and Hasegawa, A.: Subduction of the Philippine Sea plate beneath southwestern Japan: Slab geometry and its relationship to arc magmatism, *Journal of Geophysical Research*, Vol.112, B08306, doi:10.1029/2006JB004770, 2007.
- 6) Hirose, F., Nakajima, J. and Hasegawa, A.: Three-dimensional seismic velocity structure and configuration of the Philippine Sea slab in southwestern Japan estimated by double-difference tomography, *Journal of Geophysical Research*, Vol.113, B09315, doi:10.1029/2007JB005274, 2008.
- 7) 弘瀬冬樹, 中島淳一, 長谷川昭: Double-Difference Tomography法による関東地方の3次元地震波速度構造およびフィリピン海プレートの形状の推定, *地震*, Vol.60, pp.123-138, 2008.
- 8) Nakajima, J., Hirose, F. and Hasegawa, A.: Seismotectonics beneath the Tokyo metropolitan area, Japan: Effect of slab-slab contact and overlap on seismicity, *Journal of Geophysical Research*, Vol.114, B08309, doi:10.1029/2008JB006101, 2009.
- 9) Kita, S., Okada, T., Hasegawa, A., Nakajima, J. and Matsuzawa, T.: Anomalous deepening of a seismic belt in the upper-plane of the double seismic zone in the Pacific slab beneath the Hokkaido corner: Possible evidence for thermal shielding caused by subducted forearc crust materials, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol.290, pp.415-426, 2010.
- 10) Hayes, G.P., Wald, D.J. and Johnson, R.L.: Slab1.0: A three-dimensional model of global subduction zone geometries, *Journal of Geophysical Research*, Vol.117, B01302, doi:10.1029/2011JB008524, 2012.
- 11) Matsubara, M., Obara, K. and Kasahara, K.: Three-dimensional P- and S-wave velocity structures beneath the Japan Islands obtained by high-density seismic stations by seismic tomography, *Tectonophysics*, Vol.454, pp.86-103, 2008.
- 12) Miura, S., Takahashi, N., Nakanishi, A., Tsuru, T., Kodaira, S. and Kaneda, Y.: Structural characteristics off Miyagi forearc region, the Japan Trench seismogenic zone, deduced from a wide-angle reflection and refraction study, *Tectonophysics*, Vol.407, pp.165-188, 2005.
- 13) Dziewonski, A.M. and Anderson, D.L.: Preliminary reference Earth model, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol.25, pp.297-356, 1981.
- 14) Matsubara, M. and Obara, K.: The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake related to a strong velocity gradient with the Pacific plate, *Earth Planets Space*, Vol.63, pp.663-667, 2011.

- 15) Huang, Z., Zhao, D. and Wang, L.: Seismic heterogeneity and anisotropy of the Honshu arc from the Japan Trench to the Japan Sea, *Geophysical Journal International*, Vol.184, pp.1428-1444, 2011.
- 16) Thatcher, W., Matsuda, T., Kato, T. and Rundle, J.B.: Lithospheric loading by the 1896 Riku-u earthquake, northeastern Japan: Implications for plate flexure and asthenospheric rheology, *Journal of Geophysical Research* Vol. 85, pp.6429-6435, 1980.
- 17) Ohzono, M., Ohta, Y., Iinuma, T., Miura, S. and Muto, J.: Geodetic evidence of viscoelastic relaxation after the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, *Earth Planets Space*, Vol.64, pp.759-764, 2012.
- 18) Lubis A.M., Hashima, A. and Sato, T.: Analysis of afterslip distribution following the 2007 September 12 southern Sumatra earthquake using poroelastic and viscoelastic media, *Geophysical Journal International*, Vol.192, pp.18-37, 2013.
- 19) Freed, A.M., Hirth, G. and Behn, M.D.: Using short-term postseismic displacements to infer the ambient deformation conditions of the upper mantle, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117, B01409, 2012.
- 20) Sato, M., Ishikawa, T., Ujihara, N., Yoshida, S., Fujita, M., Mochizuki, M. and Asada, A.: Displacement above the hypocenter of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, *Science*, Vol.332, pp.1395, 2011.
- 21) Ito, Y., Tsuji, T., Osada, Y., Kido, M., Inazu, D., Hayashi, Y., Tsushima, H., Hino, R. and Fujimoto, H.: Frontal wedge deformation near the source region of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophysical Research Letters*, Vol.38, L00G05, doi:10.1029/2011GL048355, 2011.
- 22) Maeda, T., Furumura, T., Sakai, S. and Shinohara, S.: Significant tsunami observed at ocean-bottom pressure gauges during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, Vol.63, pp.803-808, 2011.
- 23) Kido, M., Osada, Y., Fujimoto, H., Hino, R. and Ito, Y.: Trench-normal variation in observed seafloor displacements associated with the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophysical Research Letters*, Vol.38, L24303, doi:10.1029/2011GL050057, 2011.
- 24) Hino, R., Ito, Y., Suzuki, K., Suzuki, S., Inazu, D., Iinuma, T., Ohta, Y., Fujimoto, H., Shinohara, M. and Kaneda, Y.: Foreshocks and mainshock of the 2011 Tohoku Earthquake observed by ocean bottom seismic/geodetic monitoring, 2011 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 5-9 Dec., Abstract U51B-0008, 2011.
- 25) 日本海における大規模地震に関する調査検討会: 日本海における大規模地震に関する調査検討会報告書 (本文および図表集) , 48p. および 63p., http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/daikibojishinchousa/
- 26) Yoshida, K., Hasegawa, A., Okada, T., Iinuma, T., Ito, Y. and Asano, Y.: Stress before and after the 2011 great Tohoku-oki earthquake and induced earthquakes in inland areas of eastern Japan, *Geophysical Research Letters*, Vol.39, L03302, 2012.

27) Toda, S., Lin, J. and Stein, R.S.: Using the 2011 Mw 9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake to test the Coulomb stress triggering hypothesis and to calculate faults brought closer to failure, *Earth Planets Space*, Vol.63, 725-730, 2011.

28) 地震調査研究推進本部：東北地方太平洋沖地震後の活断層の長期評価について，
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/11sep_chouki/chouki.pdf (2015年5月1日確認).

(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27年度業務計画案

前年度に作成した粘弾性モデル（初期モデル）の入力信号として、2011年東北地方太平洋沖地震以前の巨大地震も合わせて考慮し、巨大地震の発生前と発生後の内陸断層のクーロン応力変化を共に評価する。

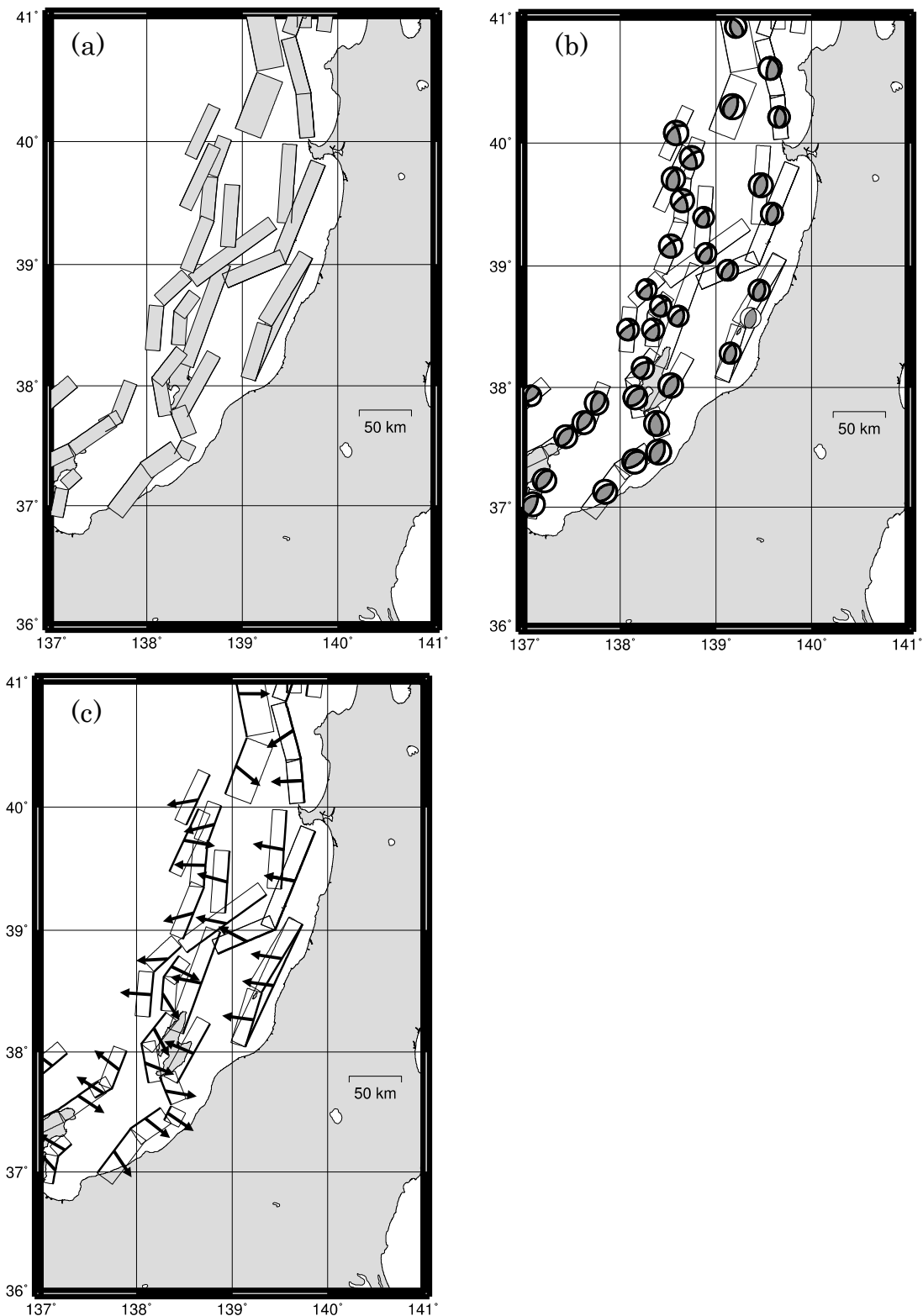


図 1 (a) 日本海および沿岸域の断層モデル (b) 各断層面における応力蓄積パターン (c) 各断層のすべり方向
 各断層は矩形によって表される。断層の上端は太線によって示されている。応力蓄積パターンは Terakawa & Matsu'ura (2010)に基づく。

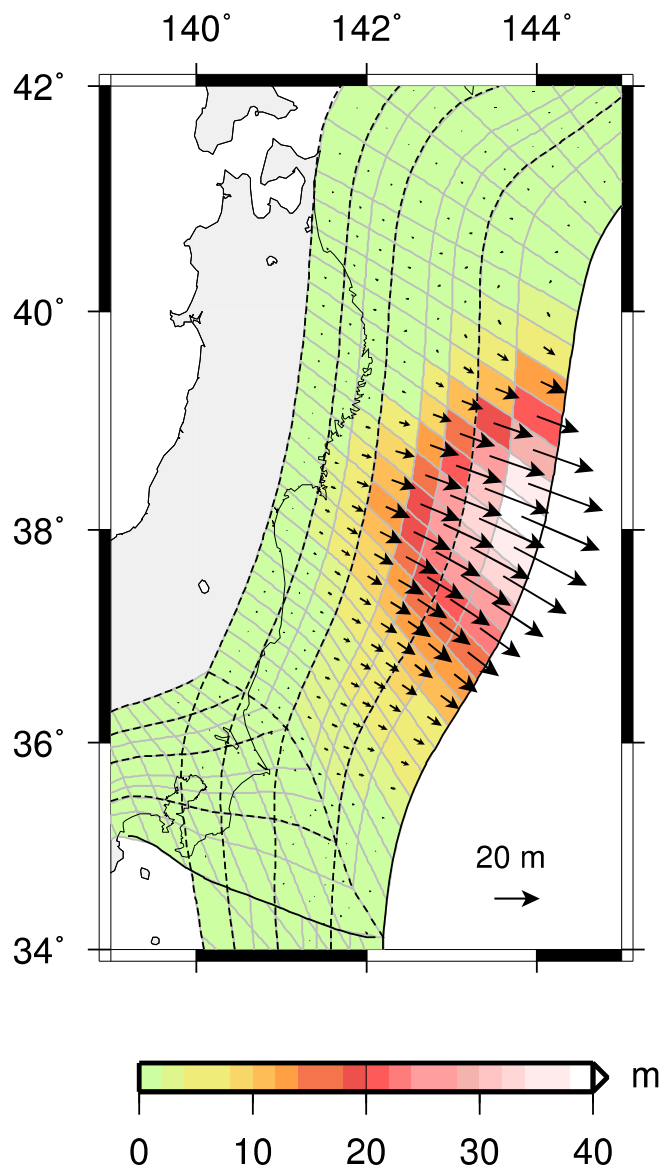


図2 東北沖地震のすべり分布

ベクトルは上盤の下盤に対する相対変位（すべり）。カラスケールはすべりの量を表す。

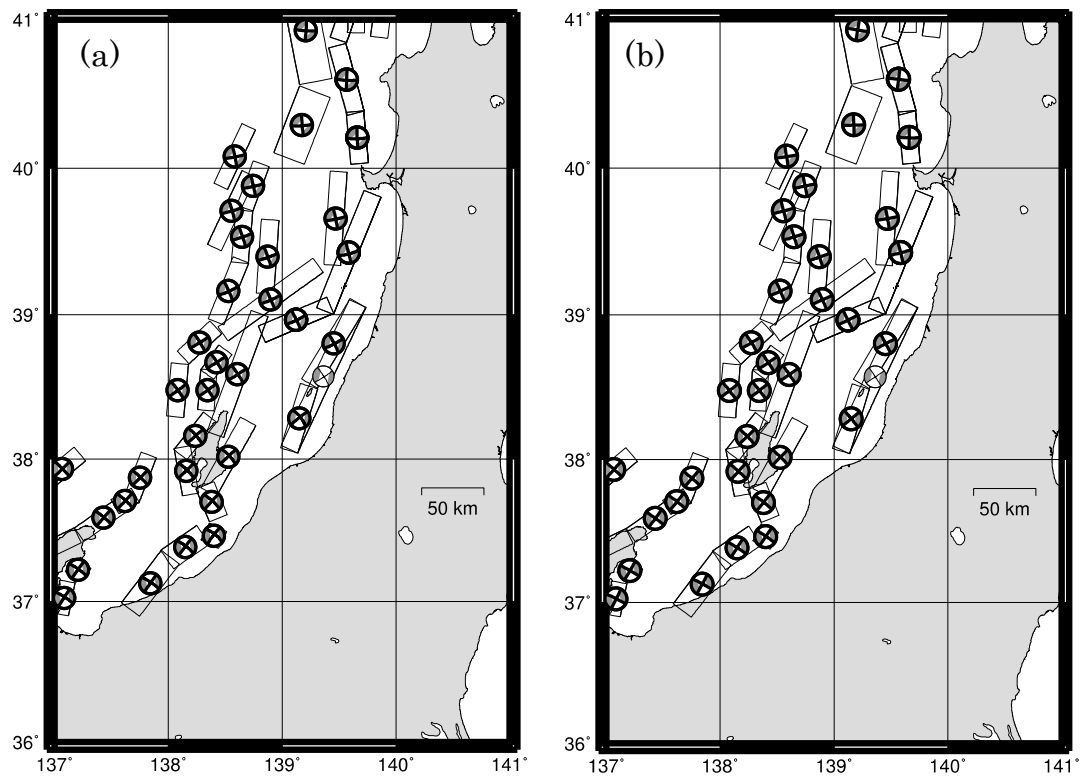


図3 日本海および沿岸域の断層における東北沖地震による応力変化パターン (a) 地震直後 (b) 100年後

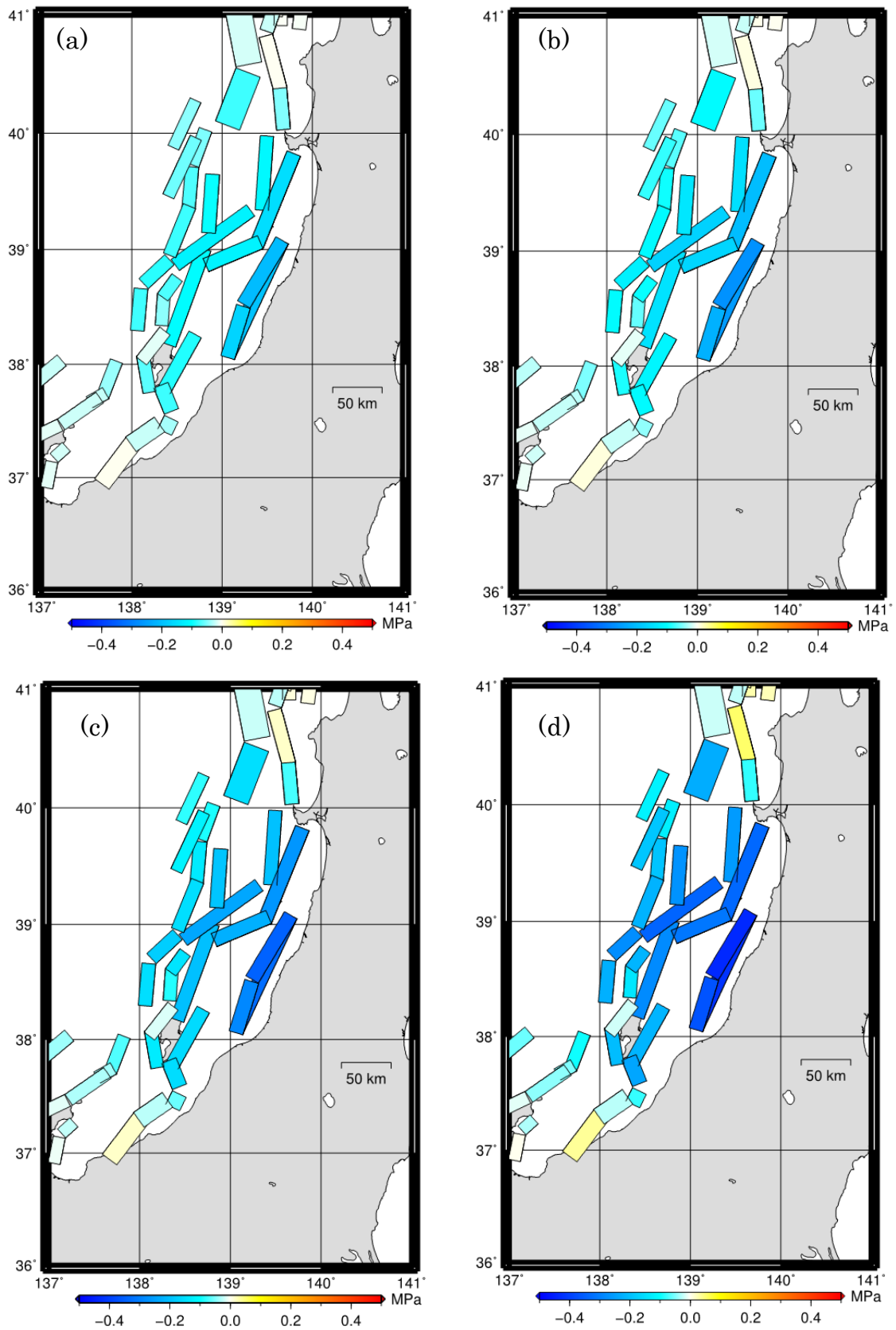


図4 日本海および沿岸域の断層における東北沖地震によるクーロン応力変化 (a) 地震直後 (b) 10年後 (c) 30年後 (d) 100年後