



8月11日の駿河湾の地震直後に観測された地下水位変化

松本則夫（地震地下水研究チーム）

Contents

Topics

● 8月11日の駿河湾の地震直後に観測された地下水位変化 … 1

● 2009年駿河湾の地震の余震分布と震源域の応力場 … 3

外部委員会活動報告（2009年9月） … 8

1. 地下水観測で見ているもの

活断層・地震研究センター地震地下水研究チームでは、1970年代から東海地震予知のための地下水観測を継続し、現在、静岡県・愛知県の10地点の15観測井で地下水位などを観測しています。観測データはリアルタイムで気象庁に転送するとともに、月に1回開催される地震防災対策強化地域判定会委員打合会で、観測データを説明しています。

地下水を含んでいる地層（帯水層）への水の出入りが少ない、または出入りがない場合には、地面が伸縮することにより、地下水位が変化します。たとえば、地下で体積が 1 m^3 あたり 0.1 cm^3 縮んだ場合、地下水位は $0.01\sim 10\text{ cm}$ 変化します。帯水層を構成する地質の性質によって地下水位の変化が異なるため、地面の伸縮が同じであっても、地下水位の変化量は異なります。

帯水層は、いつもゆっくりと、わずかに伸縮しています。その原因のひとつは地球潮汐で、これは月や太陽の引力により地球自体がごくわずかに伸び縮みする現象です。地球潮汐による地下の伸縮は計算によって推定できるので、地球潮汐による地下水位の変化がわかれば、地下の伸縮を地下水位の変化によって推定できます。そして、私たちは地下水位の変化があった場合、地下の伸縮（この場合は体積ひずみ）があったことを想定してデータを解釈しています。

2. 駿河湾の地震に伴う地下水位変化

駿河湾で本年8月11日5時7分にマグニチュード6.5の地震が発生しました。この地震によって、静岡県伊豆市、焼津市、牧之原市、御前崎市で震度6弱を観測しました（気象庁ホームページによる）。

駿河湾の地震の直後には、伊豆半島・静岡県中部の多くの観測点で地下水位変化を観測しました。図には震源から最も近い草薙観測井（静岡市）と榛原観測井（牧之原市）の地震直後の地下水位を示します。

地下水位は上述しましたように地球潮汐による体積ひずみによって変化しますが、その他にも気圧や降雨によっても変化します。私たちは観測点で地下水位の他に気圧や降水量を同時に測定し、気圧、降雨や地球潮汐の影響を取り除いた地下水位（補正後の地下水位）を1時間ごとにリアルタイムで計算し、体積ひずみによる地下水位変化を捉えようとしています。



図中の一番上はデータの補正に用いた気圧および降水量の例として、榛原観測井の観測データを示します。下の2つの図はそれぞれ榛原、草薙両観測井での地下水位の観測結果です。黒色線は観測された地下水位で、赤色線は気圧や地球潮汐、降雨の影響を差し引いた「補正後の地下水位」を示しています。駿河湾の地震後には、榛原観測井で31.0 cm 地下水位が上昇した後に同程度低下しました。草薙観測井では地下水位は193 cm 低下しました(8/17 10:00 現在)。

地震が発生すると、震源付近の地面は伸縮します。しかし今回観測された地下水位変化は、駿河湾の地震によって推定される観測点付近の地面の伸縮量では説明できないほど大きなものです。さらに、草薙観測井付近では地震直後に地面が縮んでいますが、地下水位はゆっくりと大きく減少しています。この地下水位の変化は地面の伸縮とは関係がないように見えます。

駿河湾の地震によって草薙観測井付近では地面が縮むだけでなく、大きなゆれ(静岡市:震度5強)が観測されました。草薙観測井での地震後のゆっくりした地下水位変化は、地面の伸縮とは別のメカニズム、おそらく大きなゆれが原因だと考えられます。国内外で地震直後の地面の伸縮で説明できない地下水位変化が観測されており、現状ではそのメカニズムについて、いくつかの仮説が提案されています。

さて、駿河湾の地震の震央は発生が懸念されている東海地震の想定震源域の中でした。想定される東海地震との関連を検討するために、気象庁は東海地震観測情報第1号を发出するとともに、8月11日8時から臨時の地震防災対策強化地域判定会委員打合会を開催しました。打合会では主に気象庁が観測した地震や地殻変動のデータが報告され検討が行われました。この打合会の終了後、気象庁は駿河湾の地震が想定される東海地震に結びつくものではないという内容の東海地震観測情報第3号を发出しました(気象庁ホームページによる)。この打合会には当チームの高橋誠主任研究員が説明員として参加し、産総研の地下水位観測データには、地震後の地下水位変化の他に、想定東海地震の前兆すべりに結びつく地下水位変化が見られなかったことを報告しました。

私たちの地下水位観測のもっとも大きな目的は、想定される東海地震に先行して発生すると考えられているゆっくりすべり(前兆すべり)を検出することです。前兆すべりは通常の地震のような地震動を発生しないと考えられていますので、前兆すべり発生時には前兆すべりに起因する地殻変動による地下水位変化を捉えることができると考えています。

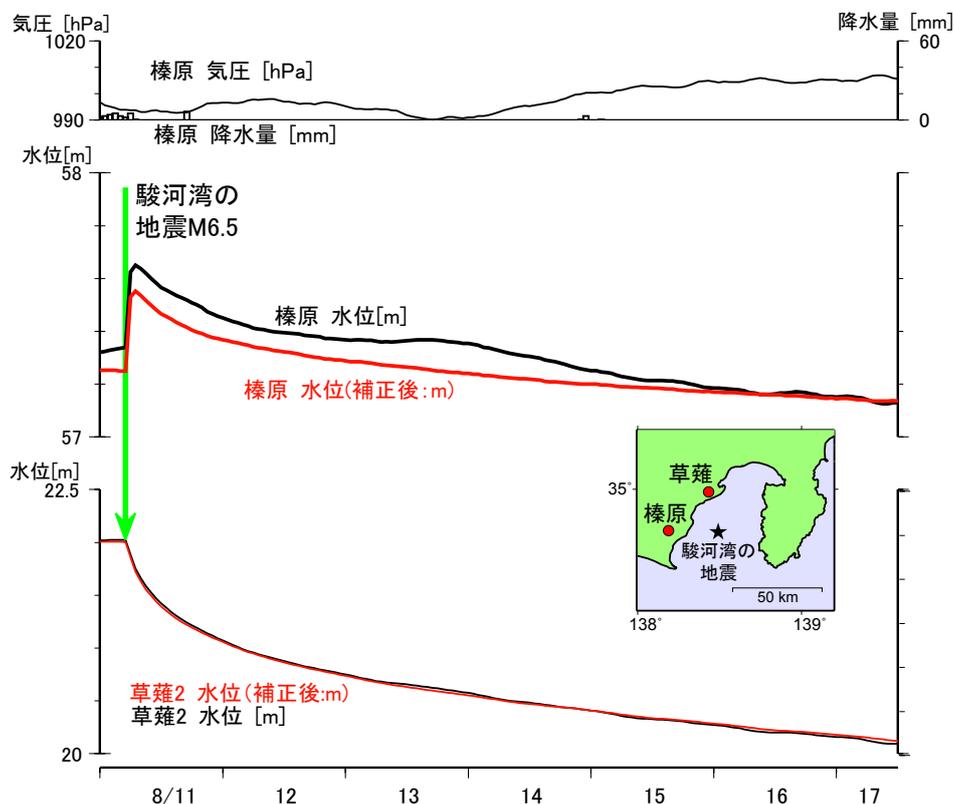


図1 駿河湾の地震後の榛原・草薙2観測井の地下水位変化。



2009年駿河湾の地震の余震分布と震源域の応力場

今西和俊（地震発生機構研究チーム）・武田直人（地震地下水研究チーム）
松下レイケン（地震発生機構研究チーム）

1. はじめに

2009年8月11日の早朝5時7分に、駿河湾内を震源とする気象庁マグニチュード6.5の地震が発生しました。この地震により、静岡県伊豆市、焼津市、牧之原市、御前崎市で震度6弱の揺れが観測され、死者1名、東名高速道路の一部が崩壊するなどの被害が生じました。およそ200 km離れたつくばにおいても揺れが感じられ、目が覚めた方もいらっしゃるのではないかと思います。図1に気象庁一元化カタログによる駿河湾の地震の本震（黄色の星）、余震（赤丸）、そして、定常的な微小地震活動（灰色）を示します。断面図を見ると上下2層の地震分布が確認できますが、プレート境界は2層に挟まれた地震活動の少ないところを通っていると考えられています（Ishida, 1995; Matsumura, 1997）。従って、下層の地震は沈み込むフィリピン海プレート内部で

発生していることとなります。駿河湾の地震も下層の分布の中で発生したことがわかります。また、下層の震源分布の中でも定常的な地震活動が比較的少ない場所で駿河湾の地震が発生したことも確認できます。気象庁（2009）は、本震の深さやメカニズム解、余震分布の拡がりを経済的に解釈して、駿河湾の地震は沈み込むフィリピン海プレート内部で発生したものと結論しました。

それでは、駿河湾の地震はどのような応力場のもとで発生したのでしょうか。図2に防災科学技術研究所によりP波初動の押し引き分布から決定されたメカニズム解とP軸方位分布を示します。視覚的に判断しやすいように、逆断層成分、横ずれ成分、正断層成分の比率に応じて色分けを行いました。駿河湾の地震の震源域では、北北東-南南西にP軸を持つ横ずれ型のメカニズム解が多く発生してい

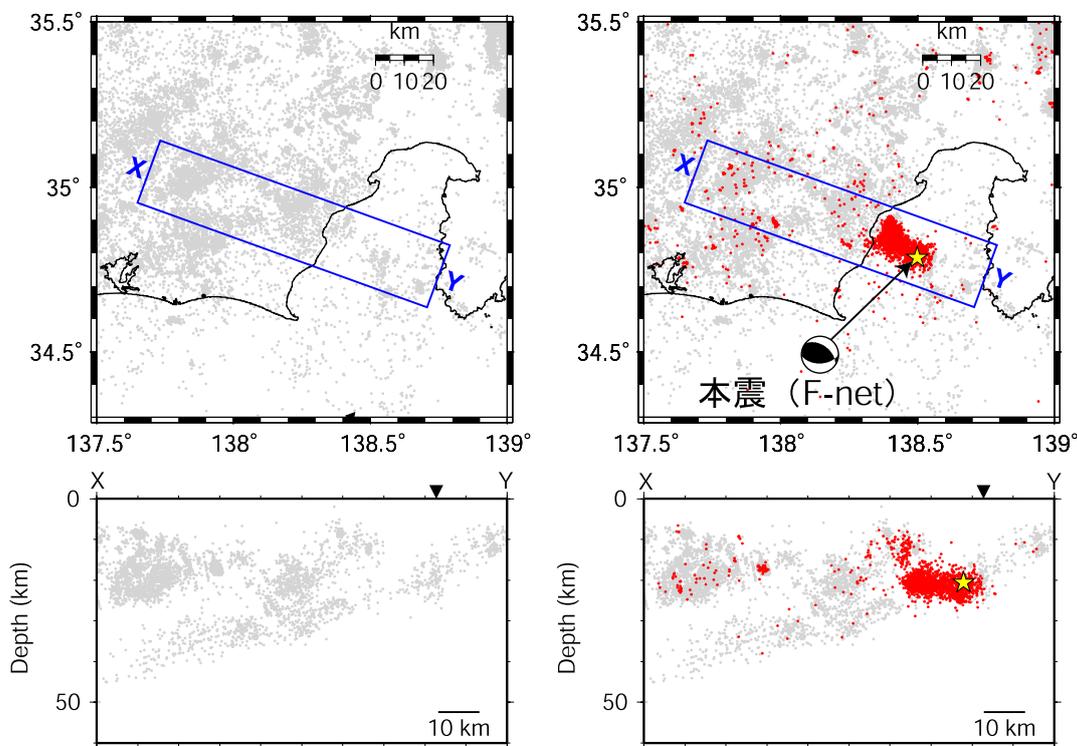


図1 気象庁一元化カタログによる深さ60 km以浅の震源分布。(a) 2002年1月1日から本震直前までの震源分布。(b) 本震発生後から2009年9月27日までの震源分布。2009年駿河湾の地震の本震の位置を黄色の星印で示す。本震のメカニズム解は、防災科学技術研究所F-netによるモーメントテンソル解である（等積投影の下半球投影）。

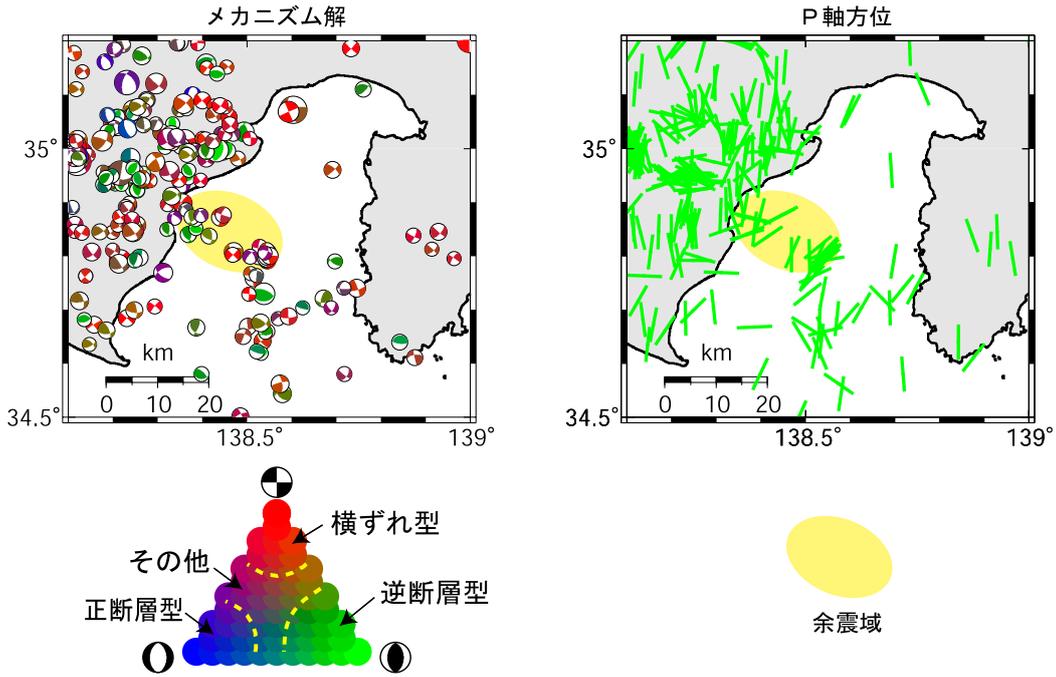


図2 防災科学技術研究所により決定されたメカニズム解 (1979年7月2日~2003年7月1日) (a) とそのP軸方位分布 (b). マグニチュード2.5以上、深さ60km以浅の地震のみプロットしている。メカニズム解は等積投影の下半球投影で表す。視覚的に判断しやすいように、逆断層成分、横ずれ成分、正断層成分の比率に応じて色分けを行っている。

ることがわかります。このP軸方位は沈み込むプレートの方向と直交しており、いささか違和感があります。Ukawa (1991) はP軸方位が伊豆半島の北端を起点として扇状に向いていることに気付き、伊豆半島の衝突により説明できることを示しました。また、松浦 (1998) は伊豆半島の衝突を考慮した数値シミュレーションを行い、駿河湾周辺は南北あるいは北北東-南南西方向にP軸を持った横ずれの応力場になることを示しています。このように、駿河湾周辺の応力場は、伊豆半島の衝突が大きく関わっているようです。

私たちは駿河湾の地震の発生メカニズムを明らかにすることを目的として、(1) 余震の震源決定、(2) 余震のメカニズム解決定、(3) 震源域の応力場解析を行っております。まだ初期解析の段階ですが、その結果からわかってきたことについて報告いたします。

2. データ

解析に使用した地震観測点の分布を図3に示します。防災科学技術研究所のHi-net観測点と産業技術総合研究所の草薙観測点が含まれています。これらの観測点では、高感度地震計がボアホールの底部に設置されています。各観測点で記録された3成分の地震波形を用いて、余震の震源決定およびメカニズム解決定を行いました。

波形例として、産業技術総合研究所の草薙観測点

で記録された本震の波形を示します(図4)。ここで、赤線はP波とS波の到達時刻に対応しています。水平動成分で顕著ですが、S波到達時刻の後に振幅の大きな位相がいくつか確認できます。これは、本震の断層運動において、複数の大きなすべりを伴う破壊が発生したことを示唆しています。震源インバージョンの結果によると、本震の破壊開始点の近傍と余震域の北部において、1mを超えるすべりが生じています(例えば、東京大学地震研究所, 2009a)。

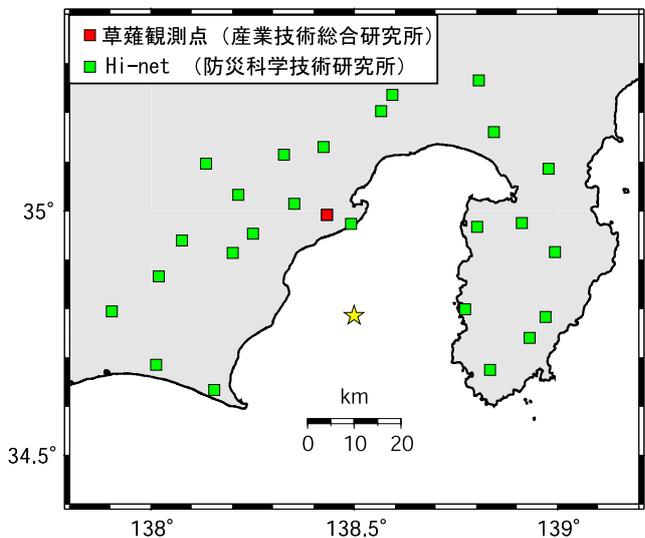


図3 解析に使用した地震観測点の分布。黄色の星印は本震の震央。

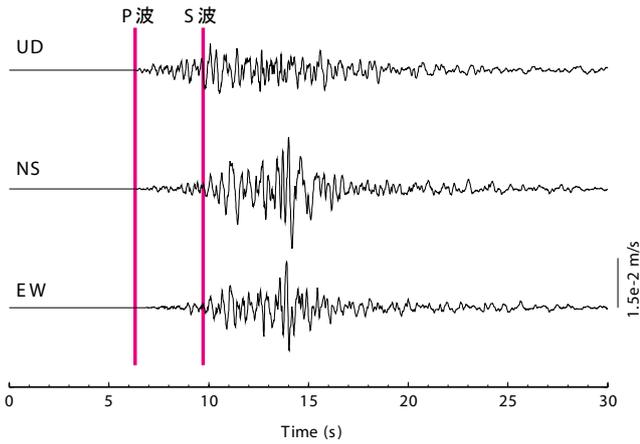


図4 草薙観測点（産業技術総合研究所）で記録された本震の波形。波形の開始時刻は、2009年8月11日5時7分5秒。上下動（UD）、南北動（NS）、東西動（EW）成分の順に並んでいる。赤線はP波およびS波の到達時刻に対応している。

3. 余震の震源決定

本震発生から8月16日までに発生した気象庁マグニチュード2以上の余震を対象に震源決定を行いました。適切な1次元速度構造（深さ方向にのみ速度が変わる構造）を仮定して震源決定を行い、この結果から計算される観測点補正値を導入して再度震源を決定するという操作を繰り返しました。図5にこの操作を3回繰り返した結果を示します。防災科学技術研究所（2009）や東京大学地震研究所（2009b）により指摘されていますが、私たちの解析でも余震域の北部と南部で特徴的な分布が確認できました。余震域の北部（図5のA-Bの領域）では東北東方向に約30度の傾斜を持った分布が、余震域の南部（図5のC-Dの領域）では約50度の南傾斜の分布が見られます。余震域南部の分布は、防災科学技術研究所F-netによるモーメントテンソル解（図1b）の節面の一つと調和的といえます。

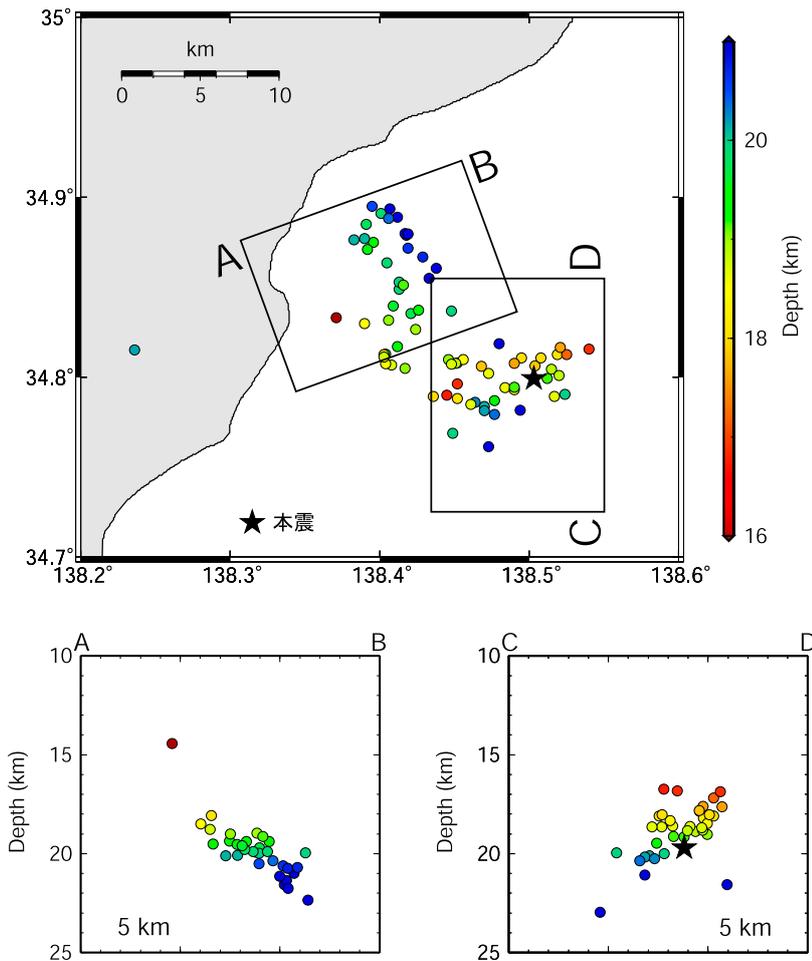


図5 本研究で推定された余震分布。震源の深さに応じて色分けを行っている。ABおよびCDの深さ断面を下側に示す。

4. 余震のメカニズム解

今回の地震は海域で起こっており、観測点配置は必ずしも良くありません。そこで、P波初動の押し引きに加えてP波とSH波の振幅値を用い、余震のメカニズム解決定を行いました。同様の手法は他地域でも適用され、その有効性が示されています（今西・他、2005; Imanishi and Kuwahara, 2009）。

図6に推定された全てのメカニズム解（72個）を示します。図2と同様に、メカニズム解のタイプに応じて色分けを行いました。Flohlich（1992）の定義に従うと、逆断層型が約半数を占め、横ずれ型が2割程度あります。残りの地震の大半は逆断層型と横ずれ型の中間のものとなっています。空間分布をみると、横ずれ成分を持つ余震を取り囲むように逆断層型の余震が発生しているように見えます。

図7にP軸の方位分布を示します。P軸方位のばらつきは小さく、概ね北北東-南南西を向いています。また、図7ではP軸の水平面からの傾き角（plunge）に応じて色分けをしています。P軸はほぼ水

平面内にあることもわかります。余震のP軸方位は、駿河湾の地震以前に発生していた微小地震のものとも概ね調和的と言えます（図2b）。

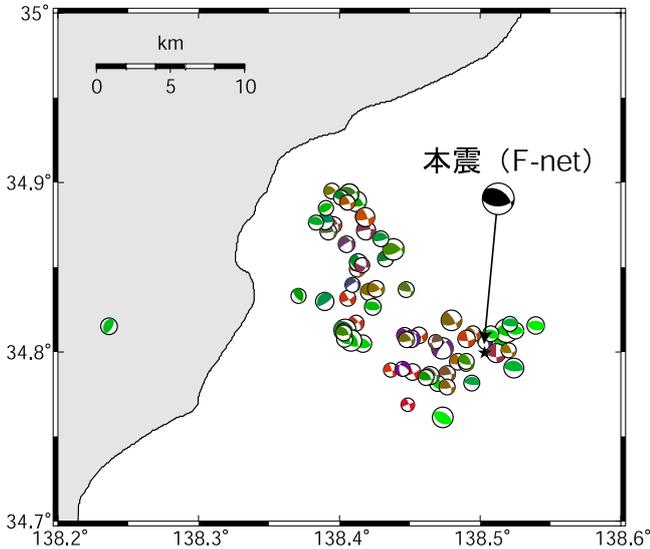


図6 本研究で推定された余震のメカニズム解。メカニズム解のタイプに応じて色分けを行っている(図2参照)。本震のメカニズム解は、防災科学技術研究所 F-net によるモーメントテンソル解である(等積投影の下半球投影)。

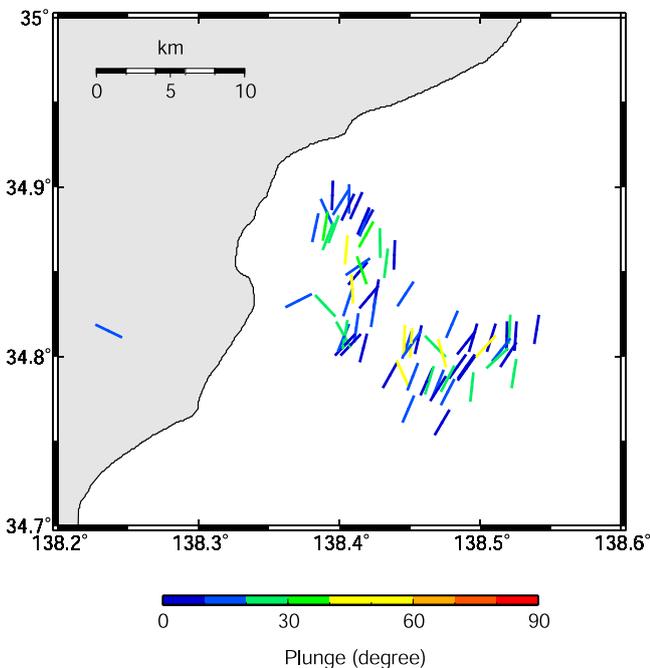


図7 余震のP軸方位分布。水平面からのP軸の傾き(plunge)に応じて色分けを行っている。

5. 応力テンソルインバージョン解析

前述の通り、駿河湾の地震が発生する以前の震源域では、南北方向に圧縮軸を持った横ずれ型の微小地震が多く発生していました。一方、余震のメカニズム解は、実に半数が逆断層型でした。巨大地震や大地震、マグニチュード6クラスの中規模地震が発生すると、本震の断層運動による影響で震源域周辺の応力場が地震発生前後で変化したという報告が数多くありますが(例えば, Hardebeck and Hauksson, 2001), 駿河湾の地震においても同様のことが起こった可能性があります。

定量的に議論するため、応力テンソルインバージョン法(Michael, 1984)を適用しました。応力テンソルインバージョン法とは、対象とする領域内の全てのメカニズム解のすべり方向が断層面に作用するせん断応力の方向に向くという条件を最も良く満足するような応力場を推定する手法です。インバージョン結果として、対象とする領域における3つの主応力の方位と応力比($\phi = (S_2 - S_3) / (S_1 - S_3)$)の情報が得られます(S_1, S_2, S_3 は最大, 中間, 最小主応力を表します)。

本震発生前の応力場については、防災科学技術研究所によるメカニズム解(図2)のうち、余震域に含まれている地震(23個)を使いました。一方、本震発生後の応力場については、本論で求めた余震のメカニズム解のうち、余震域から外れている1個を除いた71個の余震を使いました。インバージョン結果を図8に示します。本震発生前の応力場は、最大および最小主応力が水平面内にあり中間主応力は鉛直を向いています。これは、典型的な横ずれ場と言えます。応力比 ϕ は0.46と推定されました。前述の ϕ の定義から、中間主応力値は最大主応力値と最小主応力値のちょうど中間付近の値であったことがわかります。一方、本震後の応力場を見ると、応力比 ϕ (=0.47)に変化は見られませんが、主応力方位には有意な変化を確認することができます。本震発生後の最大主応力方位に着目すると、本震発生前に比べて反時計回りに20度程度回転したことがわかります。また、中間主応力と最小主応力の方位が本震発生前のものと明らかに異なっていることもわかります。このように、定量的な解析により、駿河湾の地震の発生前後で震源域周辺の応力場が変化したことを明らかにできました。さらに、どのように応力場が変化したのかについても推定することができました。応力場の変化を検出できたということは、地震学的にとっても重要な意味を持っています。本震の断層運動による応力変化と組み合わせることで、地震発生の原動力である絶対応力の情報を引き出すことができるのです(例えば、

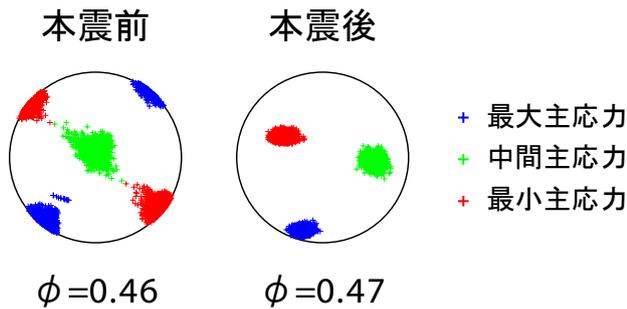


図8 応力テンソルインバージョン結果. 青, 緑, 赤のプラスは, 最大主応力, 中間主応力, 最小主応力の95%信頼区間を示す. ϕ は応力比である.

Hardebeck and Hauksson, 2001; Imanishi and Kuwahara, 2009). 絶対応力の推定結果については, 別の機会に報告したいと思います.

6. おわりに

2009年駿河湾の地震の余震について, 余震分布とメカニズム解の決定を行いました. 余震は北部と南部で異なる走向と傾斜を持った面状に分布し, 本震は複雑な破壊過程であったことがわかりました. 余震のメカニズム解は逆断層型が約半数を占めており, 横ずれが主であった本震前の応力場と異なることも明らかとなりました. 今後は, この応力場の変化を利用して震源域の絶対応力場の推定に取り組む予定です. 絶対応力場の情報は駿河湾の地震の発生メカニズムの解明につながるものと期待されます.

謝辞 本研究では, 気象庁が文部科学省と協力して求めた震源カタログを使用させて頂きました. また, 防災科学技術研究所によるメカニズム解 (<http://www.bosai.go.jp/kotai/kanto/kanto-tokai/data/indexm.html>) も利用させて頂きました. 解析には防災科学技術研究所 (Hi-net) と産業技術総合研究所の波形データを使用しました. メカニズム解の推定では, 東京大学の井出哲博士のプログラムを参考にしました. 地震発生機構研究チームの中井未里さんには, 情報収集に協力していただきました. 図は, Generic Mapping Tools (Wessel and Smith, 1998) により作成しました. ここに記して感謝致します.

文 献

防災科学技術研究所, 2009, DD法による詳細な震源分布, http://www.hinet.bosai.go.jp/topics/surugabay090811/detail_j.html

Flohlich, C., 1992, Triangle diagrams: ternary graphs to display similarity and diversity of earthquake focal mechanism, *Phys. Earth Planet. Interiors*, 75, 193-198.

Hardebeck, J. L. and E. Hauksson, 2001, Crustal stress field in southern California and its implications for fault mechanics, *J. Geophys. Res.*, 106 (B10), 21, 859-21, 882, 2001.

今西和俊・長 郁夫・桑原保人・平田 直・Yannis Panayotopoulos, 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解, 活断層・古地震研究報告, No.6, 55-70.

Imanishi, K. and Y. Kuwahara, 2009, Stress field in the source region after the 2007 M_w 6.6 Niigataken Chuetsu-Oki earthquake deduced from aftershock focal mechanisms: Implication for a pre-mainshock stress field, *Earth Planets Space*, in press.

Ishida, M., 1995, The seismically quiescent boundary between Philippine sea plate and Eurasian plate in central Japan, *Tectonophysics*, 243, 241-253.

気象庁, 2009, 東海地震に関連する情報第3号, <http://www.jma.go.jp/jma/press/0908/11d/toukai200908111120.pdf>.

松浦充宏, 1998, 地震発生過程のモデリングと予測, *地震*, 50, 213-227.

Matsumura, S., 1997, Focal zone of a future Tokai earthquake inferred from the seismicity pattern around the plate interface, *Tectonophysics*, 273, 271-291.

Michael, A. J., 1984, Determination of stress from slip data: faults and folds, *J. Geophys. Res.*, 89 (B13), 11, 517-11, 526.

東京大学地震研究所, 2009a, 2009年駿河湾の地震一震源過程一, <http://taro.eri.u-tokyo.ac.jp/saigai/suruga/source.html#B>

東京大学地震研究所, 2009b, 2009年8月11日駿河湾の地震の余震活動, http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/topics/200908_Tokai/Rinji/

Ukawa, M., 1991, Collision and fan-shaped compressional stress pattern in the Izu block at the northern edge of the Philippine sea plate, *J. Geophys. Res.*, 96, 713-728.

Wessel, P. and W. H. F. Smith, 1998, New, improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. AGU*, 79, 579.

外部委員会等 活動報告 (2009年9月)

2009年9月10日

地震調査委員会 (岡村出席 / 文部科学省)
8月の地震活動, 庄内平野東縁断層帯の評価などについて議論した。

2009年9月11日

21年度第1回糸静運営委員会 (丸山出席 / 東京大学地震研究所)
各サブテーマ担当者が研究内容と年次計画について説明した。

2009年9月14日

(社)日本地震学会地震予知検討委員会 (小泉出席 / 東大地震研究所)
日本地震学会における, 今後の地震予知研究の進め方について検討した。

2009年9月15日

地震調査研究推進本部 地震調査委員会 長期評価部会 第51回活断層評価分科会 (宮下出席 / 東京)
宮古島断層帯の評価について議論した。

2009年9月15日

原子力安全委員会 耐震安全性評価特別委員会 地震・地震動評価委員会及び施設健全性評価委員会 WG4 第8回会合 (加瀬出席 / 東京)
日本原燃株式会社 再処理施設及び特定廃棄物管理施設, 東北電力株式会社 東通原子力発電所周辺の地質・地質構造についての説明および質疑応答が行われた。

2009年9月17日

原子力安全委員会 耐震安全性評価特別委員会 地震・地震動評価委員会及び施設健全性評価委員会 WG2 第31回会合 (加瀬出席 / 東京)
若狭地区の活断層について, 説明および質疑応答が行われた。

2009年9月18日

原子力安全委員会 耐震安全性評価特別委員会 解析技術等作業会合 (加瀬出席 / 東京)
震源を特定せず策定する地震動について, 議論がおこなわれた。

2009年9月18日

原子力安全委員会 耐震安全性評価特別委員会 地震・地震動評価委員会及び施設健全性評価委員会 WG3 第31回会合 (加瀬出席 / 東京)
中国電力株式会社 島根原子力発電所の基準地震動についての説明および質疑応答が行われた。

2009年9月18日

原子力安全委員会 耐震安全性評価特別委員会 地震・地震動評価委員会及び施設健全性評価委員会 WG1 第16回会合 (加瀬出席 / 東京)
2009年8月11日に発生した駿河湾の地震の中部電力株式会社 浜岡原子力発電所における観測記録, および, それを踏まえた地下構造特性の追加調査についての説明および質疑応答が行われた。

2009年9月28日

地震防災対策強化地域判定会委員打ち合せ会 (松本出席 / 気象庁)
東海地域周辺の産総研の最近の地下水等観測データについて説明する。各期間の東海周辺の観測データについて検討する。

2009年9月30日

原子力安全委員会 耐震安全性評価特別委員会 地震・地震動評価委員会及び施設健全性評価委員会 WG4 第9回会合 (加瀬出席 / 東京)
日本原燃株式会社 再処理施設及び特定廃棄物管理施設の基準地震動についての説明および質疑応答が行われた。

2009年9月30日

地震調査研究推進本部地震調査委員会第151回長期評価部会 (吉岡出席 / 東京)

AFERC NEWS
No.6
September 2009

発行日 2009年10月16日

発行・編集 独立行政法人 産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター
編集担当 黒坂朗子

問い合わせ 〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1 中央第7事業所
Tel: 029-861-3691 Fax: 029-861-3803

ホームページ <http://unit.aist.go.jp/actfault-eq/index.html>