

12 - 14 東北地方太平洋沖地震による首都直下への応力伝播と誘発地震活動の減衰モデル

Stress transfer to seismogenic faults and triggered seismicity beneath Tokyo associated with the 2011 Tohoku-oki earthquake

遠田 晋次 (京都大学防災研究所)

Shinji Toda (Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

1. はじめに

2011年3月11日に発生したM9.0の東北地方太平洋沖地震によって、震源域に隣接する関東地方では本震後地震活動が一変した。茨城県沖や最大余震M7.7周辺海域で余震活動が活発化するだけでなく、茨城県北部、銚子周辺や千葉県東方沖、首都直下などで数多くのオフフォルト余震活動が見られる。ここでは、活発化した首都直下の地震活動について、東北沖地震の応力伝播による影響かどうかを検討するため、静的クーロン応力変化を計算するとともに、速度および状態依存摩擦構成則 (rate- and state-dependent friction law, Dieterich, 1994) による時系列再現計算を行った。以下に簡単に報告する。

2. 解析対象地域と解析データ、震源断層モデル

ここでの解析範囲は、Toda et al. (2008)の関東フラグメント (Kanto fragment) の東端周辺の関東地震帯 (Kanto seismic corridor) を考慮し、東経 $139.2^{\circ} \sim 140.35^{\circ}$ 、北緯 $35.4^{\circ} \sim 36.5^{\circ}$ 、震源の深さが100 km以浅を対象とした (第1図)。地震発生時系列作成には気象庁暫定および確定一元化データを用いた。メカニズム解は防災科研 F-net データ (1997年以降) を用いた。静的クーロン応力計算にあたっては、Okada (1992)の半無限弾性体においてIde et al. (2011)の震源モデルを採用した。ポアソン比、剛性率をそれぞれ、0.25、32 GPaと仮定した。

3. 東北地方太平洋沖地震による潜在断層へのクーロン応力変化

関東直下の地震活動は、プレート境界沿いだけでなくプレート内においても活発であるため、応力計算対象の特定の断層面を想定することができない。したがって、ここでは1997年以降東北沖地震前までに記録されたメカニズム解を対象地域内の潜在的な小中断層群と仮定して、その断層群への影響を調べることにした。

上記期間内に F-net で解析されたメカニズム解は338地震記録されている。多くは東西圧縮もしくは北西—南東の圧縮軸を持つ逆断層型であるが、横ずれや正断層解も存在する。各地震において2節面のうち真の断層面は不明なので、両節面ともにレシーバ断層 (receiver fault, クーロン応力を解く断層面) として設定し、676節面へのクーロン応力を解いた。摩擦係数は0.4と仮定した。その結果、クーロン応力は $-0.3 \text{ MPa} \sim 0.6 \text{ MPa}$ とばらつくものの、78%の節面で正のクーロン応力となる。正のクーロン応力は概ね逆断層で顕著である (第1図 a, b, 第2図ヒストグラム)。

4. 東北地方太平洋沖地震後の地震活動と余震へのクーロン応力変化

2011年3月11日から1年間に記録されたメカニズム解96個の地震 (192節面) に関しても、同様のクーロン応力変化の計算を行った。その結果、93%の節面でクーロン応力が正となった。また、

これらの地震のほとんどが逆断層解を示すとともに、本震前に正断層、横ずれ断層解で特徴付けられる地域のメカニズム解はほとんどみられない（第1図 c, d）。これらの状況から、逆断層解をもつ潜在的な断層群の活動が東北地方太平洋沖地震によって励起されたことが分かる。

5. 摩擦構成則を用いた誘発地震活動の時系列再現

解析対象範囲内の地震活動は第2図の累積曲線に見られるように、東北沖地震本震後に急増した。M3以上の地震は本震前には平均55個/年のレートで安定的に発生していたが、本震後に活発化しその後徐々に減衰している。ここでは、Dieterich (1994)の計算式を用いて、実際に本震前のメカニズム解（潜在断層面）に対して得られたクーロン応力分布と常時地震活動（ $r=55/\text{year}$ ）、摩擦構成パラメータ α 有効法線応力（ $A\sigma=0.05\text{MPa}$ ）、剪断応力速度（ $\tau\text{-dot}=25\text{ kPa}$ ）を入力値としてモデル計算を行った。再現計算ではモンテカルロ法を採用し、応力ヒストグラムから応力値をランダムに抽出しそれぞれの時系列を計算した。第2図にはその平均値も示した（手法の詳細は、Toda et al., 2012 を参照、パラメータ値は、既存の研究で得られた標準的な範囲内の値である）。その結果、本震後約1年間の時系列をおおよそ再現することができた。

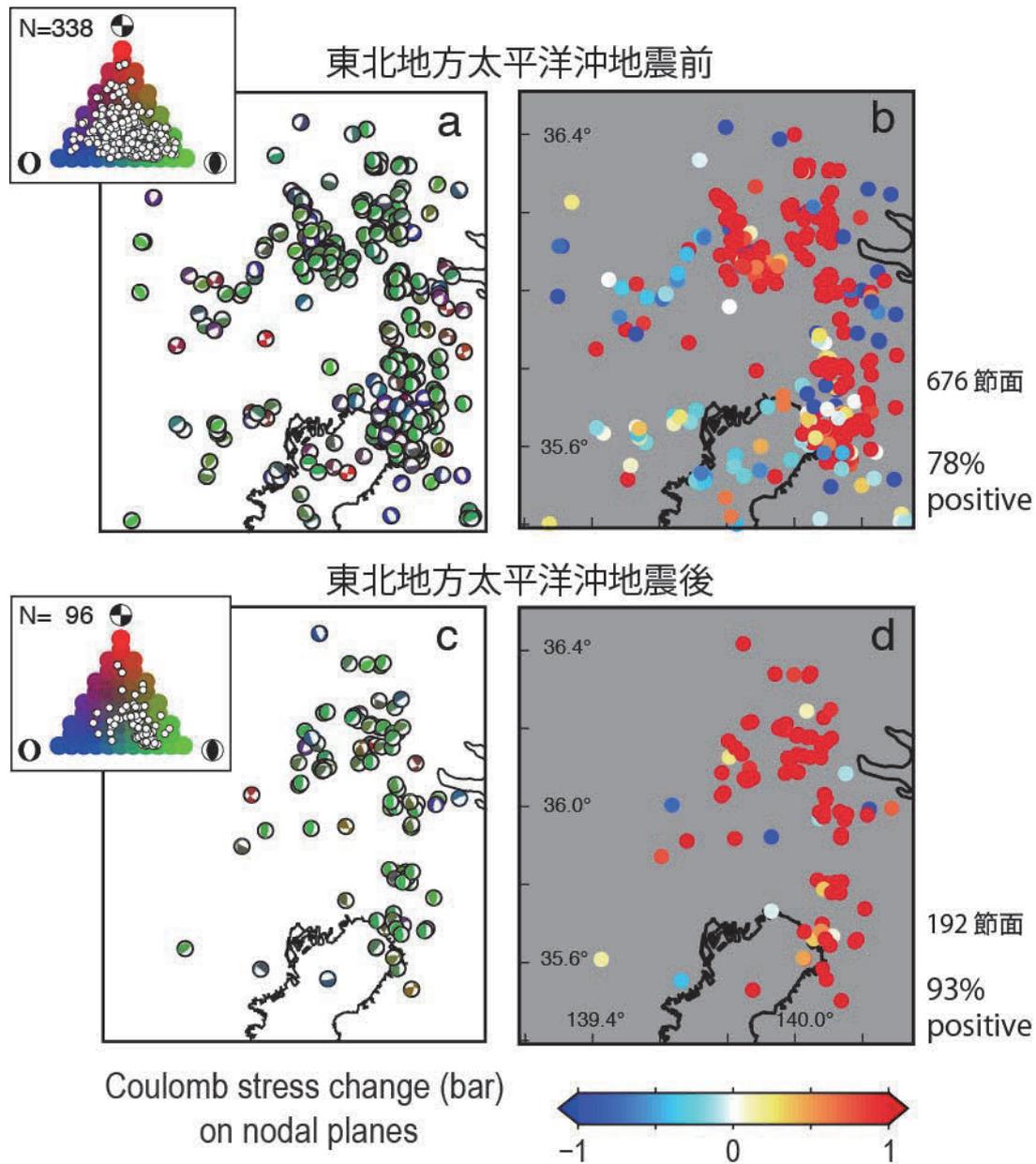
6. おわりに

上記応力計算および観測データとの対比により、東北地方太平洋沖地震後に増加した首都直下の地震活動は同地震による応力伝播でほぼ説明可能とわかった。特に、既往の研究例に示されたパラメータ値を用いて時系列を再現できることも示された。このことは、少なくとも本研究で対象とした首都直下の誘発地震活動は特異なものではなく、通常のオフフォールト型余震活動と考えられ、余効変動の影響を考慮する必要はないとみられる。今後は上記計算結果によるトレンドをプロスペクティブに検討し、応力伝播モデルの予測可能性を検討する必要がある。

なお、このモデルで得られる M7以上の今後1年間（2012年3月11日～2013年3月10日）の地震確率（ポアソン過程）は、 b 値が0.7で12%、 b 値0.8で5%、 b 値0.9で2%となる。これらの値は、同地震の影響を考慮しない常時地震活動のみを考慮する場合のそれぞれ、8%、3%、1%よりも有意に高い。しかし、確率値そのものは b 値への依存度が高い。関東直下の b 値に関しては検知最小マグニチュードや深さ依存性等による問題があり、今後慎重に検討する必要がある。

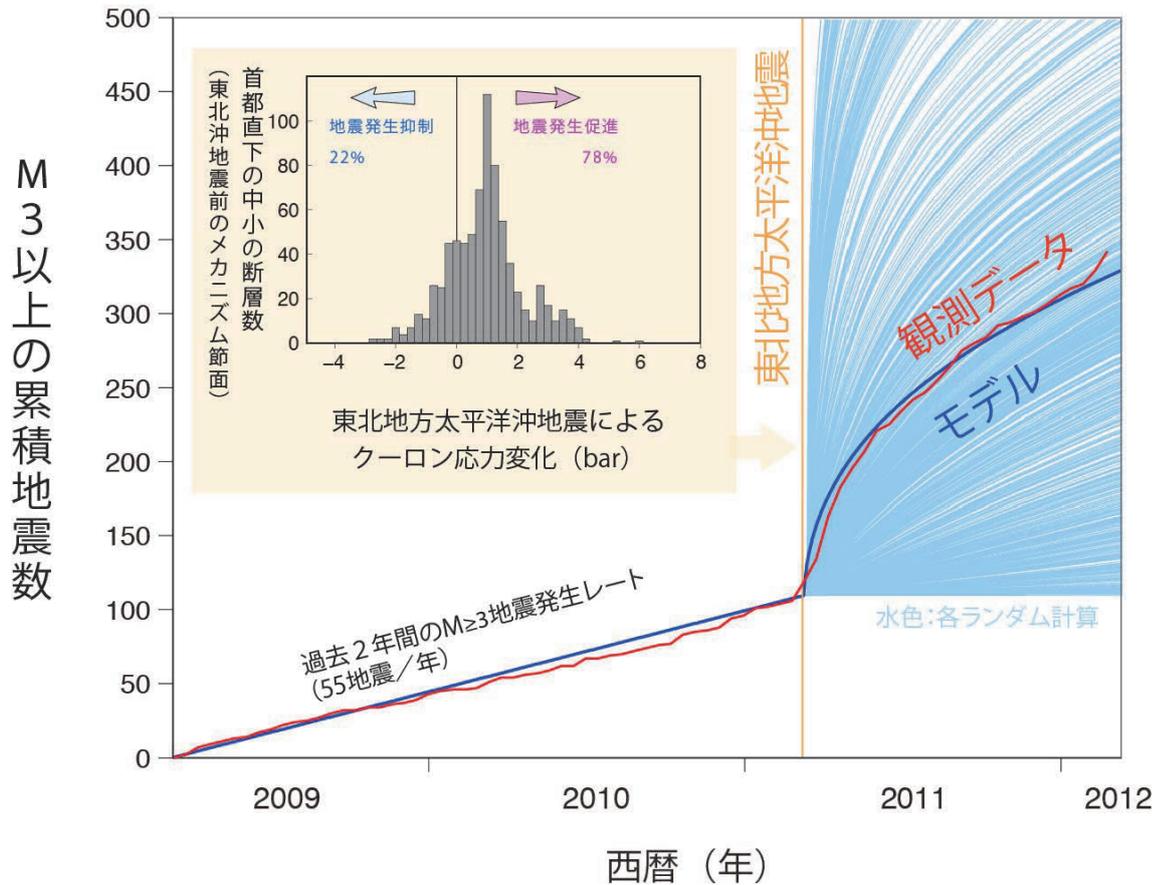
文献：

- Dieterich, J., A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering, *J. Geophys. Res.*, 99, 2601-2618, 1994.
- Okada, Y., Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 82, 1018-1040, 1992.
- Ide, S., A. Batltay, and G. C. Beroza, Shallow dynamic overshoot and energetic deep rupture in the 2011 Mw 9.0 Tohoku-oki earthquake, *Science*, 332, 1426-1429, 2011.
- Toda, S., R. S. Stein, S. H. Kirby, and S. B. Bozkurt, A slab fragment wedged under Tokyo and its tectonic and seismic implications, *Nature Geoscience*, 1, 1-6, 2008.
- Toda, S., R. S. Stein, G. C. Beroza, and D. Marsan, Aftershocks halted by static stress shadow, *Nature Geoscience*, 5, 410-413, 2012.



第1図 東北地方太平洋沖地震による関東直下地震へのメカニズム解へのクーロン応力変化とそのヒストグラム. 本震前 (a) (b), 本震後 (c) (d). メカニズム解は防災科研 F-net による.

Figure 1 Coulomb failure stress changes on nodal planes of earthquakes beneath Tokyo caused by the Tohoku-oki earthquake. Map and histogram of stress changes before (upper panels, a and b) and after the Tohoku-oki shock (lower panels, c and d).



第2図 クーロン応力変化と摩擦構成則による首都直下地震活動時系列の再現. 観測データは気象庁一元化データ. モデル曲線はモンテカルロ法による計算結果 (水色: 1000回試行) の平均値. 図中ヒストグラムは, 第1図bの応力計算結果に基づく.

Figure 2 Observed (red) and modeled (blue) seismicity time series between the Tohoku-oki earthquake. The model is the mean value of realizations drawn by Monte Carlo method (each trial is denoted as a cyan curve) using calculated Coulomb stress change on the background mechanism (histogram) and plausible rate/state parameters explained in text.