

平成 15 年 (2003 年) 十勝沖地震後の地殻変動とプレート間滑り Crustal deformation of the 2003 Tokachi-oki earthquake and interplate slip

地理地殻活動研究センター 小沢慎三郎・海津優・村上亮・今給黎哲郎
Geography and Crustal Dynamics Research Center
Shinzaburo OZAWA, Masaru KAIDZU, Makoto MURAKAMI, Tetsuro IMAKIIRE

測地観測センター 畑中雄樹
Geodetic Observation center
Yuki HATANAKA

要 旨

国土地理院の GPS 観測網により、2003 年十勝沖地震 (Mw 8) の地震時及び地震後の地殻変動が観測されている。本研究では地震後の地殻変動データから地震後にどのようなプレート間滑りが発生したのかその時空間変化を推定した。その結果、地震後のプレート間滑りは、地震時の滑り領域に隣接する地域で主に起きていることが明らかになった。この結果は、2004 年 3 月 6 日現在、地震時にあまり滑らなかった隣接のプレート間結合の強い地域で、Mw7.8 の地震に相当するエネルギーの放出が起きたことを示している。

1. はじめに

太平洋プレートは千島海溝から北西方向に年間 10 cm 程の速度で、北アメリカプレート或いはオホーツクプレートに属する北海道の下に沈み込んでいる (図-1)。このため、この地域では巨大な海溝型地震が過去に発生してきた (図 1b)。

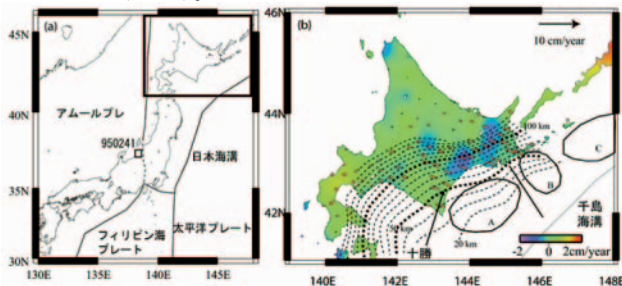


図-1 (a) 日本のプレート境界。新潟にある電子基準点 950241 点の場所は白い四角で示されている。(b) (a) の矩形地域の拡大図。巨大海溝型地震が過去に発生してきている。A:1952 年十勝沖地震 (Mw 8.2)、B:1973 年根室半島沖地震 (Mw 7.8)、C:1969 年千島地震 (Mw 8.2)。海溝軸のセグメントは実線で大まかに示されている。カラーは 950241 点に対する垂直地殻変動 (1999 年 - 2002 年)。赤い矢印はインターサイズミックな水平変動。破線は陸側プレートと海側プレート境界の等深線 (Katsumata et al., 2003)。等深線の間隔は 10 km。

十勝地方沖合いでは 1952 年の M8.2 の地震から 30 年経

た 2003 年に、30 年以内に地震が発生する確率が、~60 パーセント程度であると見積もられていた (地震調査委員会、2004 年)。このような状況下で 2003 年 9 月 26 日に Mw 8 の地震が十勝沖合いで 1952 年とほぼ同様の場所で発生した。地震の走向角度、傾斜角度、滑り角度は、それぞれ、230°、20°、及び 109° と推定され、典型的な海溝型地震であることが示されている (Yamanaka & Kikuchi, 2003)。国土地理院の GPS 観測の結果は 2003 年十勝沖地震の震源域近傍で 1 m に達するような変動を検出しており、かつ地震後の変動も観測されており、その大きさは 2004 年 3 月 6 日までに 10cm を越えている。地震後の変動がプレート間滑りによって起きているとすると、地震後の地殻変動の情報は、どこで地震後にエネルギーが解放されているか、或いはプレート間の摩擦構成則に対する制約を与えてくれ大変重要である (例えば、Heki et al, 1997; Nishimura et al, 2000; Yagi et al, 2001)。本研究では、地震時及び地震後のプレート間滑りを推定しその両者の間の関係を調べる。

2. データ及び解析方法

国土地理院の GPS 観測網は 1994 年から順次構築され現在の GEONET に至っている。GPS データの解析は、IGS の精密暦及び地球回転パラメーターを用いて、Bernese バージョン 4.2 を使用し解析されている。対流圏における電波遅延は 3 時間ごとにそれぞれの観測点で見積もられている (Hatanaka, 2003)。

解析結果の生のデータは周期成分 (大部分 1 年周期) 及びトレンド成分を含むため、1999 年~2002 年間のデータを使用し、Ozawa et al (2004) の手法でそれらを見積もって除去している。図-1 (b) は 950241 点に対する 1999-2002 年間の推定速度を示している (図-1)。また、2003 年十勝沖地震時の地殻変動は、周期成分とトレンド成分を取り除いた後にオフセットとして推定している。

図-2 (a) は 950241 点に対する地震時の変動を示す。震源域近傍で南東方向への 1 m に達する水平変動及び 20cm 以上の沈降が観測されている。

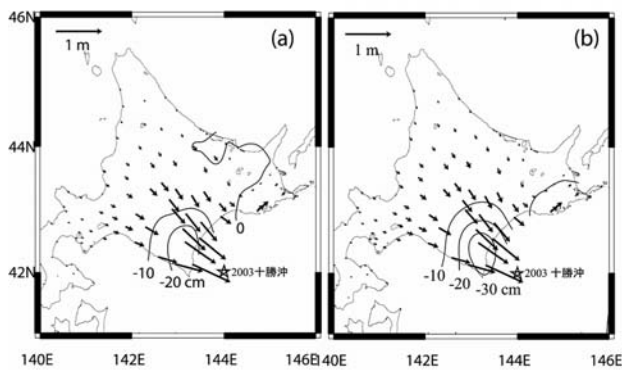


図-2 (a) 950241 点に対する、2003 年十勝沖地震に伴う地殻変動。コンターは 950241 点に対する垂直変動。10 cm 間隔。星印は気象庁によって推定された、2003 年十勝沖地震の震央。(b) 図-6 のモデルから計算した地殻変動。

また地震後に引き続き地殻変動が進行している事が図 3 に示されている。地震後の余効変動の特徴としては、地震時の変動 (図-2) に比べて震源域近傍よりもその周りでの変動が相対的に大きいように見え、このことは、地震後のプレート間滑りが震源域の周りで起きていることを示唆している。

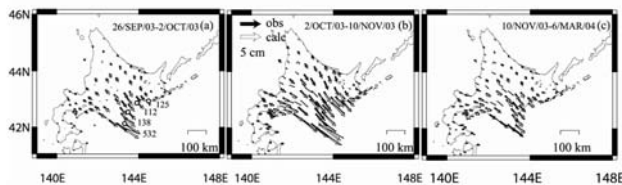


図-3 950241 点に対する地震後の地殻変動。白丸の GPS 点の時系列は図 5 に示される。(a) 2003 年 9 月 26 ~ 10 月 2 日。(b) 2003 年 10 月 2 ~ 11 月 10 日 (c) 2003 年 11 月 10 日 ~ 6、2004 年。白矢印は図 6 のモデルに基づいた計算地殻変動。黒矢印は計算値。

図-4 は 2003 年 9 月 26 日から 2004 年 3 月 6 日までの 950241 点に対する GPS 観測点の地震後の垂直変動を示す。太平洋沿岸地方に、3 cm 程の上昇が見られる。観測された上下変動のシグナルは小さいが、空間的なパターンからこの上下変動は本当の地殻変動を示しているように考えられる。このような陸域での上下変動はプレート境界深部での滑りを強く示唆する。図-3 (a) は地震時の変動を除き、かつトレンド成分を取り除いた時系列データを示している。地震後の余震が次第に減少していくのに同期するように地震後の変動も時間とともに小さくなっている。

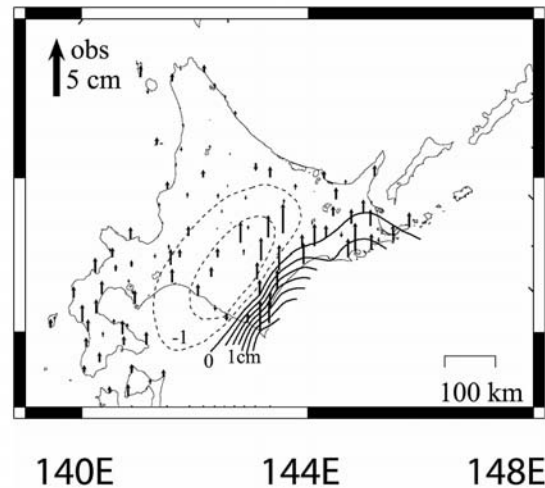


図-4 950241 点に対する 2003 年 9 月 26 日 ~ 2004 年 3 月 6 日間の地震後の垂直地殻変動。コンターは計算地殻変動、矢印は観測値。実線のコンターは隆起、破線は沈降を示す。

地震時の地殻変動データに基づき、Yabuki & Matsu'ura (1992) に基づいて地震時のプレート間滑りを推定した。プレート境界としては (図-1b) に示される Katsumata et al (2003) の推定結果を使用している。プレート境界及びプレート境界上の滑り分布を B-spline の関数の重ね合わせで表し、Akaike の情報量基準に基づいて、最適なプレート間滑りを推定している。(Akaike, 1974 ; Yabuki and Matsu'ura, 1992)。またこのインバージョンではプレート間滑りにおいて、陸側が海側に対して、東、南方向に滑るという制約を課している。地表面における地殻変動のグリーンの関数は Yabuki & Matsu'ura に基づく。図-2 に示される 85 点の GPS 観測点での東西、南北、上下変動成分を使用している。

地震時のプレート間滑りを推定した後、2003 年 9 月 4 日 ~ 2004 年 3 月 6 日間のデータに時間依存のインバージョンに似いカルマンフィルターを適用した。このインバージョン解析でも、地震後のプレート間運動は陸側プレートが海側プレートに対して東、南に動くという制約を課している。図 3 に解析に使用した GPS 点の場所を示す

3. 解析結果

推定された地震時の滑りは、十勝地方沖合いにあり、気象庁によって決められた震央は滑り分布の東端に位置している (図-6)。この推定結果はその他の研究結果と調和的である (例えば、Yamanaka and Kikuchi, 2003)。図-2 b は計算地殻変動を示し、推定されたモデルがよく観測地殻変動を再現しているのがわかる。

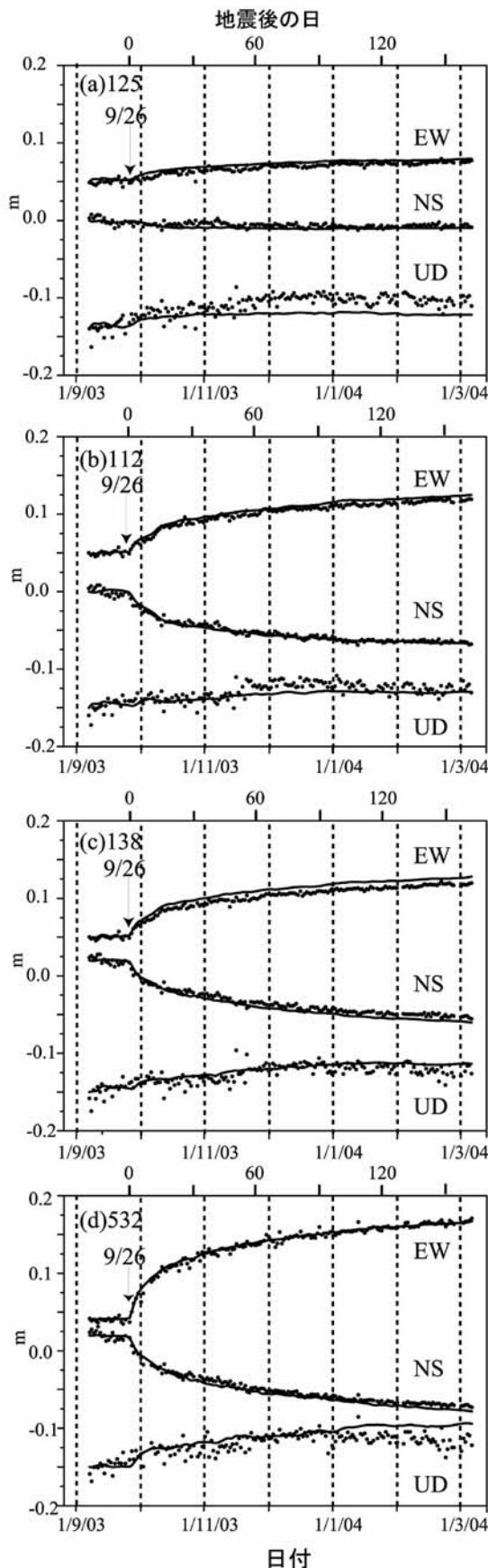


図-5。2003 年十勝沖地震の地震時の変動を取り除いた、図-3 (a) に示される点のトレンドを取り除いた時系列。実線はモデル計算値。ラベル 0-120 は 2003 年 9 月 26 日

からの日数を示す。(a) 125、(b) 112、(c) 138、(d) 532 点。

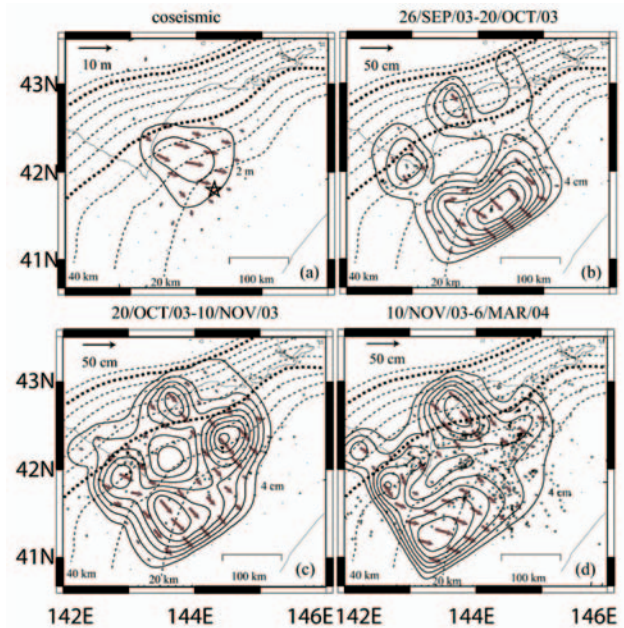


図-6 推定された地震時のプレート間滑り。白丸は余震分布を表す。破線は 10 km 間隔でのプレートの境界の等深線を表す。(a) 地震時のプレート間滑り。星印は気象庁によって決められた震央。滑り分布のコンター間隔は 2m。(b) 9 月 26 日～2003 年 10 月 2 日間の地震後のプレート間滑り。コンター間隔は 4 cm。(c) 10 月 2 日～2003 年 11 月 10 日間の地震後のプレート間滑り。コンター間隔は 4 cm。(d) 2003 年 11 月 10 日～2004 年 3 月 6 日間の地震後のプレート間滑り。コンター間隔は 4 cm。

地震後のプレート境界の滑りは、主として地震時の滑り領域の小さかった場所に見られる (図-6b-d)。9 月 26 日～10 月 2 日まで、地震後の滑り分布は地震時の滑り領域の周りを囲むように起きている (図 6b)。そして、地震後の滑りは 10 月 2 日～11 月 10 日間で北東および南西の方へ拡大している (図-6c)。地震後の滑りのこのような時間変化は余震分布の空間変化によく対応している。特に、余震の北東への伝播は図-6 における地震後の滑り変化とよく対応している。また余震の減衰に伴って地震後の余効変動も時間と共に小さくなっている。

本結果は過去の研究結果と地震後の滑りが地震時の滑りと補完的であるという点で調和的である。(例えば、Yagi & Kikuchi, 2003)。

また本研究結果はプレート境界のやや深い領域までプレート間滑りが起きていることを示唆している。過去の研究において提案された地震生成領域の下端 (30 ~ 50 km) (例えば、Ito et al, 2000 ; Mazzotti et al, 2000) に比べて、本研究はもっと深い領域まで延長されることを示唆する (~ 70 km)。実際、Murakami & Ozawa (準備中)

は、GPS のデータに基づいて、滑り欠損が北海道地域のもっと深い部分に延長されるモデルを提案した (~100 km)。彼らの結果によると、襟裳岬および十勝地域の下のスリップ欠損は、およそ 4 cm/年くらいであると見積もられている。これは 1952 - 2003 年間の累積では ~2 m に達するというを示唆する。本研究では、60 ~ 40 cm の地震後の滑りが推定されており、2 m よりはかなり小さい結果となっている。この収支の不整合は、地震後の上下変動が地震間の累積の沈降及び地震時の上下変動を説明できなという事実にも現れている。(図-1b、図-2) しかしながら、地震後の地殻変動が現在でも継続している事、また誤差が 2cm/year 程度あることを考慮すると、最終的に地震間に蓄えられていたエネルギーを放出する可能性を現段階では否定できない。現在プレート境界の深部でプレート間滑りによってエネルギーが放出されていることを考慮すると、少なくとも、地震間にこの深い領域でプレート間カップリングのエネルギーが蓄えられていたことが示唆される。この観点からすると、本結果はプレート間のスリップ欠損が深い領域まで及んでいることを示しており、その定量的な評価は今後の研究がまたれる。

また、震源域の北東部は、プレート間結合の強い地域であるが、2003 年十勝沖地震の際にはあまり破壊が及んでいない。したがって、震源北東部はプレート間結合のエネルギーを何らかの形で放出しなければならないわけであるが、現在のところその一部が 2003 年地震の余効滑りという形で放出されている。海溝型地震では、本地震と同程度のエネルギーが地震後の余効滑りによって放出される例が多く、(例えば、Heki et al, 1997; Nishimura et al, 2000)、2003 年十勝沖地震の北東部は地震後の余効変動で最終的にエネルギーを放出し、地震という形でエネルギーの放出はない可能性もある。現在、2003 年十勝沖地震後に放出されたエネルギーは地震マグニチュードにして 7.8 くらいになっている。現在エネルギー放出率が一定になりつつあり、地震後の余効変動が終了するまでもう少し時間がかかりそうであり、それによってより明瞭な描像が手に入るものと考えられる。

謝 辞

震源データは気象庁による。ここに記して御礼申し上げます。

参 考 文 献

- Akaike, H., A new look at the statistical model identification, *IEEE, Trans. Auto. Control*, AC-19, 716-723, 1974.
- Bierman G. J., Factorization methods for discrete sequential estimation, Academic Press, New York, 1977.
- Earthquake Research Committee, Long term evaluation of the seismic activity along the Chishima trench, Rep. *Earthquake Res. Committee*, in press, 2004.
- Hatanaka Y., Improvement of the analysis strategy of GEONET, *Bull. Geograph. Survey Inst.*, 49, 11-37, 2003.
- Heki K., S. Miyazaki, and H. Tsuji, Silent fault slip following an interplate thrust earthquake at the Japan Trench, *Nature*, 386, 595-598, 1997.
- Honda R. et al., Ground motion and rupture process of the 2003 Tokachi-oki earthquake obtained from strong motion data of K-NET and KiK-net, *Earth Planets Space*, 56, 317-322, 2004
- Ito T., S. Yoshioka, and S. Miyazaki, Interplate coupling in northeast Japan deduced from inversion analysis of GPS data, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 176, 117-130, 2000.
- Ito. Y. et al., Spatial distribution of moment tensor solutions of the 2003 Tokachi-oki earthquake ($M_{\text{JMA}}=8.0$) and aftershocks, *Earth Planets Space*, 56, 301-306, 2004.
- Kamae K. and H. Kawabe, Source model composed of asperities for the 2003 Tokachi-oki, Japan, earthquake ($M_{\text{JMA}}=8.0$) estimated by the empirical Green's function method, *Earth Planets Space*, 56, 323-327, 2004.
- Katsumata, K., N. Wada, and M. Kasahara, Newly imaged shape of the deep seismic zone within the subducting Pacific plate beneath the Hokkaido corner, Japan-Kurile arc-arc junction, *J. Geophys. Res.*, 108, 2565, doi:10.1029/2002JB002175, 2003.
- Koketsu K., K. Hikima, S. Miyazaki, and S. Ide, Joint inversion of strong motion and geodetic data for the source process of the 2003 Tokachi-oki, Hokkaido, earthquake, *Earth Planets Space*, 56, 329-334, 2004.
- Mazzotti S., X. L. Pichon, H. Pierre, and S. Miyazaki, Full interseismic locking of the Nankai and Japan-west Kuril subduction zones: an analysis of uniform elastic strain accumulation in Japan constrained by permanent GPS, *J. Geophys. Res.*, 105, 13159-13177, 2000.
- Nishimura et al., Distribution of seismic coupling on the subducting plate boundary, in northeastern Japan inferred from GPS observations, *Tectonophysics*, 323, 218-238, 2000.

- Ozawa, S., M. Murakami, and T. Tada, Time-dependent inversion analysis of the slow thrust event in the Nankai trough subduction zone, southwestern Japan, *J. Geophys. Res.*, 106, 787-802, 2001.
- Ozawa, S., S. Miyazaki, T. Nishimura, M. Murakami, M. Kaidzu, T. Imakiire, and X. Ji, Creep, dike intrusion and magma chamber deflation model for the 2000 Miyake eruption and the Izu islands earthquakes, *J. Geophys. Res.*, in press, 2004.
- Segall, P. and M. Matthews, Time dependent inversion of geodetic data, *J. Geophys. Res.*, 102, 22391-22409, 1997.
- Shinohara M. et al., Aftershock observation of the 2003 Tokachi-oki earthquake by using dense ocean bottom seismometer network, *Earth Planets Space*, 56, 295-300, 2004.
- Simon D. and D.L. Simon, Aircraft turbofan engine health estimation using constrained Kalman filtering, *ASME Turbo Expo 2003*, Atlanta, GA, paper GT2003-38584, 2003
- Tanioka Y, K. Hirata, R. Hino, and T. Kanazawa, Slip distribution of the 2003 Tokachi-oki earthquake estimated from tsunami waveform inversion, *Earth Planets Space*, 56, 373-376, 2004.
- Yabuki T. and M. Matsu'ura, Geodetic data inversion using Bayesian information criteria for spatial distribution of fault slip, *Geophys. J. Int.*, 109, 363-375, 1992.
- Yagi, Y., Source rupture process of the 2003 Tokachi-oki earthquake determined by joint inversion of teleseismic body wave and strong ground motion data, *Earth Planets Space*, 56, 311-316, 2004.
- Yagi Y. and M. Kikuchi, Partitioning between seismogenic and aseismic slip as highlighted from slow slip events in Hyuga-nada, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1087, doi:10.1029/2002GL015665, 2003.
- Yagi Y. M. Kikuchi, and T. Sagiya, Co-seismic slip, post-seismic slip, and aftershocks associated with two large earthquakes in 1996 Hyuga-nada, Japan., *Earth Planets Space*, 53, 793-803, 2001.
- Yamanaka Y. and Kikuchi M., EIC SEISMOLOGICAL NOTE: No. 139, 2003.