



Title	北海道の地震間および地震時地殻変動の比較 : 2003年十勝沖地震による地殻変動
Author(s)	高橋, 浩晃; TAKAHASHI, Hiroaki
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 67, 375-386
Issue Date	2004-03-15
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.67.375
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14356
Type	departmental bulletin paper
File Information	67_p375-386.pdf



北海道の地震間および地震時地殻変動の比較

—2003年十勝沖地震による地殻変動—

高橋 浩晃

北海道大学大学院理学研究科附属地震火山研究観測センター

(2004年1月26日受理)

Comparison of inter- and co-seismic crustal deformation in Hokkaido

—From the data of the 2003 Tokachi-oki earthquake—

Hiroaki TAKAHASHI

Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University

(Received January 26, 2004)

Inter-seismic crustal deformation induced by plate coupling between subducting Pacific and overriding plates has been observed since 1994 by nationwide continuous GPS network in Hokkaido. The 2003 Tokachi-oki earthquake (MJMA8.0), which occurred off Tokachi along the Pacific coast, caused co-seismic crustal deformation overall inland Hokkaido. To investigate the co-seismic release rate of crustal deformation observed in Hokkaido against the inter-seismic one between the 2003 and the 1952 Tokachi-oki earthquake (MJMA8.2), a previous large event in one earthquake cycle, I compared these horizontal displacement fields and calculated the deviational ones. Co-seismic crustal deformation released 60–70% of the inter-seismic one at the GPS stations near the 2003 earthquake fault. But more than 70% of it has remained in the northwestern inland from the fault, where corresponds to the Ishikari lowland. To discuss the stable crustal deformation field in detail, it is necessary to remove the effect of the remarkable post-seismic crustal deformation being observed after the 2003 earthquake from the original data.

I. はじめに

2003年9月26日に十勝沖を震源とする平成15年十勝沖地震(MJMA 8.0)が発生した。この地震は、沈み込む太平洋プレートと陸側プレートの境界で発生したプレート境界型地震の可能性が高い。

北海道では、1994年に国土地理院が全国GPS観測網の運用を開始して以来いわゆる「地震間」地殻変動が観測されている。北海道の太平洋岸では、太平洋プレートの沈み込みによる巨大地震が50–80年周期で繰り返し発生しているが、これらの巨大地震の間に北海道で観測される地震間

地殻変動は、太平洋プレートと陸側プレートのカップリングの影響を強く受けていると考えられる。しかし、プレート間カップリングによる地殻変動は、地震間にだけ観測される一時的なものであって、地震発生によるリバウンドによって解消されることが期待される。

しかし、地震間に蓄積された変位や歪が、巨大地震によるリバウンドによってどの程度解消されるかは、測地的データの時間分解能が低かったという制約からあまりよく分かっていなかった。近年のGPS連続観測網の整備により時間分解能の高いデータが得られるようになったため、その評価を行うことが可能になってきた。本論文では、国土地理院が運用する全国GPS連続観測網のデータを用いて、2003年十勝沖地震による地震時地殻変動と地震間地殻変動の比較を行い、この地震によって地震間地殻変動がどの程度解消されたのかを調べる。また、地震間と地震時地殻変動との残差から、北海道の造構運動を支配していると考えられる定常的な地殻変動場について考察する。

II. 地震間地殻変動

1. データ

国土地理院は1994年10月1日から全国GPS連続観測網の運用を全国100観測点で開始し、北海道には23観測点が設置された。その後、逐次観測点の増強が図られてきており、2003年時点での観測点数は120を越えている。国土地理院では、この観測網から得られたデータを解析し、日毎の各観測点の座標値を公開している(<http://www.gsi.go.jp>)。このGPS観測網により、北海道では、1994年北海道東方沖地震(MJMA=8.2)(Tsuji et al., 1995)、2000年根室半島南東沖地震(MJMA 7.0)(Takahashi and Hirata, 2003)や2000年有珠山噴火(岡崎ほか, 2003、高橋ほか, 2002)に伴う地殻変動を観測したほか、太平洋プレートと陸側プレート間のカップリングによる地震間地殻変動を観測してきている(笠原・高橋, 1999)。

ここでは、国土地理院が公開している日毎座標値を用いて、地震間地殻変動の特徴をしてみる。国土地理院のGPS観測点では、保守のためにアンテナや受信機の交換作業が実施されている。このような作業は、観測点座標値に人為的なノイズ(データの飛びや不連続)を生じさせる。本論文では、このような人為的なノイズを除去するために、北海道で最も保守作業が行われた観測点が少ない1998年11月1日から2001年10月31日までの3年間を採用した。

この3年間のうちに、保守作業が行われた観測点のデータは国土地理院の作成したリストに従って除外した。また、この期間に地殻変動データに影響を与えた地学的現象としては、2000年3月末から始まった有珠山の噴火がある。この噴火活動では、有珠山周辺域の電子基準点でマグマの移動に伴う地殻変動が長期的に観測されている。このため、有珠山周辺域のGPS観測点も除外する。この2000年有珠山噴火の他には、顕著な地震・火山噴火とも発生しておらず、基本的に北海道のGPS観測点はプレート相対運動の結果生ずる地殻変動を観測していたと考える。

この期間の国土地理院の座標値データは、ITRF 97 (International Terrestrial Reference Frame) 座標系で記述されている。ITRFはNNR-NUVEL 1 aプレート運動モデル(Argus and

Gordon, 1991 ; DeMets et al., 1994) に準拠しており、観測座標値から計算された変位ベクトルから NNR-NUVEL 1 a による変位ベクトルを差し引くことにより任意のプレートに固定した座標系に変換することができる。本論文では、北海道内の変位場を求めるために青森県岩崎(950154) (Fig. 1) を基準観測点とし、北海道および岩崎は北アメリカプレートに属しているものとする。

岩崎でのこの期間の変位ベクトルから、NNR-NUVEL 1 a で計算されたベクトルを差し引いて、岩崎の北アメリカプレートに対する変位ベクトルを得る。次に、岩崎の座標を固定して北海道内の観測点の変位ベクトルを求め、それに岩崎の北アメリカプレートに対する変位ベクトルを加えて系を平行移動させ、北アメリカプレートに対する地殻変動変位場を作成した。本論文では、水平成分のみに着目し、分解能が水平成分よりも落ちる上下成分については検討を行わない。変位ベ

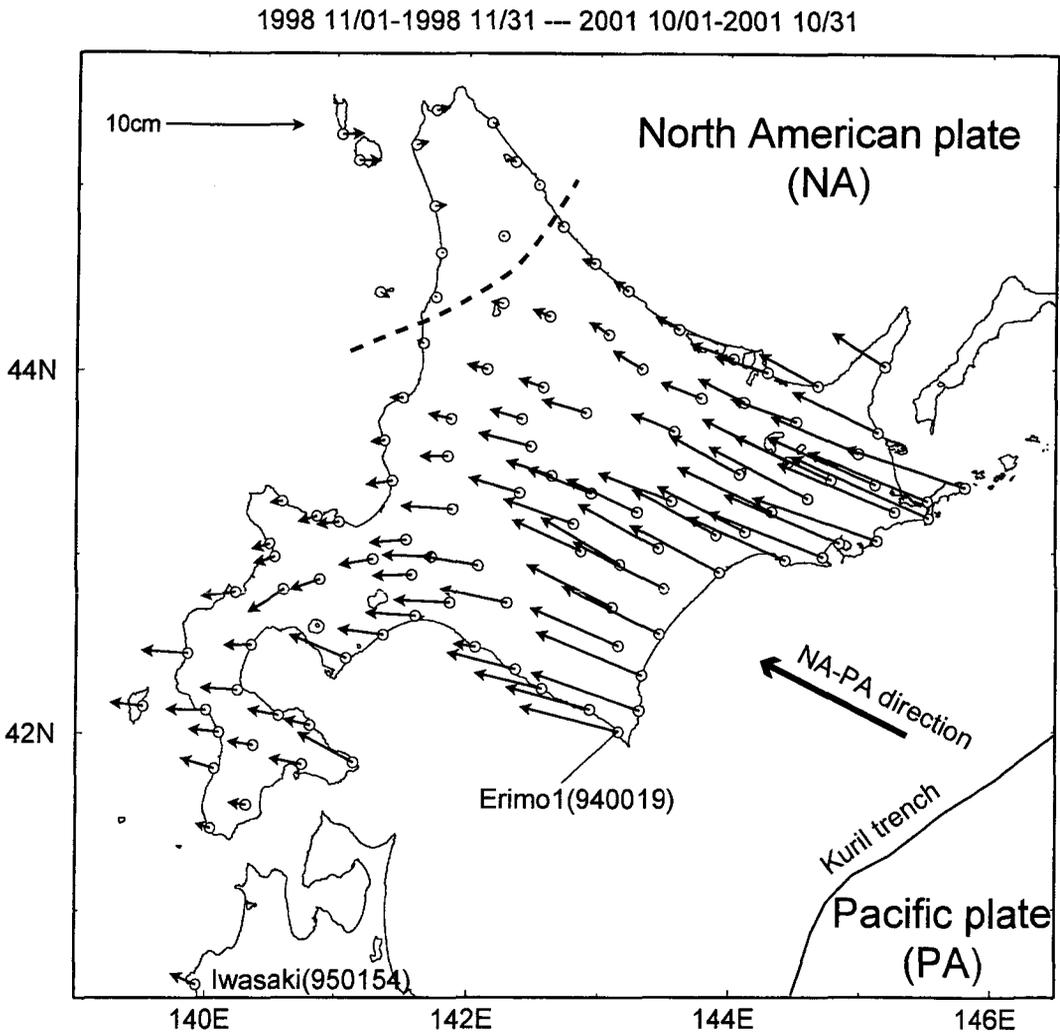


Fig. 1. Inter-seismic horizontal displacements at GPS stations in Hokkaido relative to NA between the period from November 1998 to October 2001.

クトルは、1998年11月1日から31日と2001年10月1日から31日までの1ヶ月間の平均値の差をとって作成した。

2. 地震間地殻変動

Fig. 1に、先に述べた作業を行って得られた北海道の変位ベクトル場を示す。太平洋沿岸部では、千島海溝から約8.25 cm/yrの速度 (DeMets et al., 1994) で沈み込む太平洋プレートと陸側プレートとのカップリングの影響により、北西向きの変位が観測されている。この太平洋プレートによる影響は、図中の点線で示した苫前町から枝幸町に至るラインを境として見られなくなる。一方、それよりも北側に位置するGPS観測点では東向きの成分が現れてくる。この東向きの変位は、太平洋プレートの運動に関する運動とは考えづらい。日本列島の西方域には、ユーラシアプレートから独立したアムールプレートが存在し、日本列島西縁部でユーラシアプレート

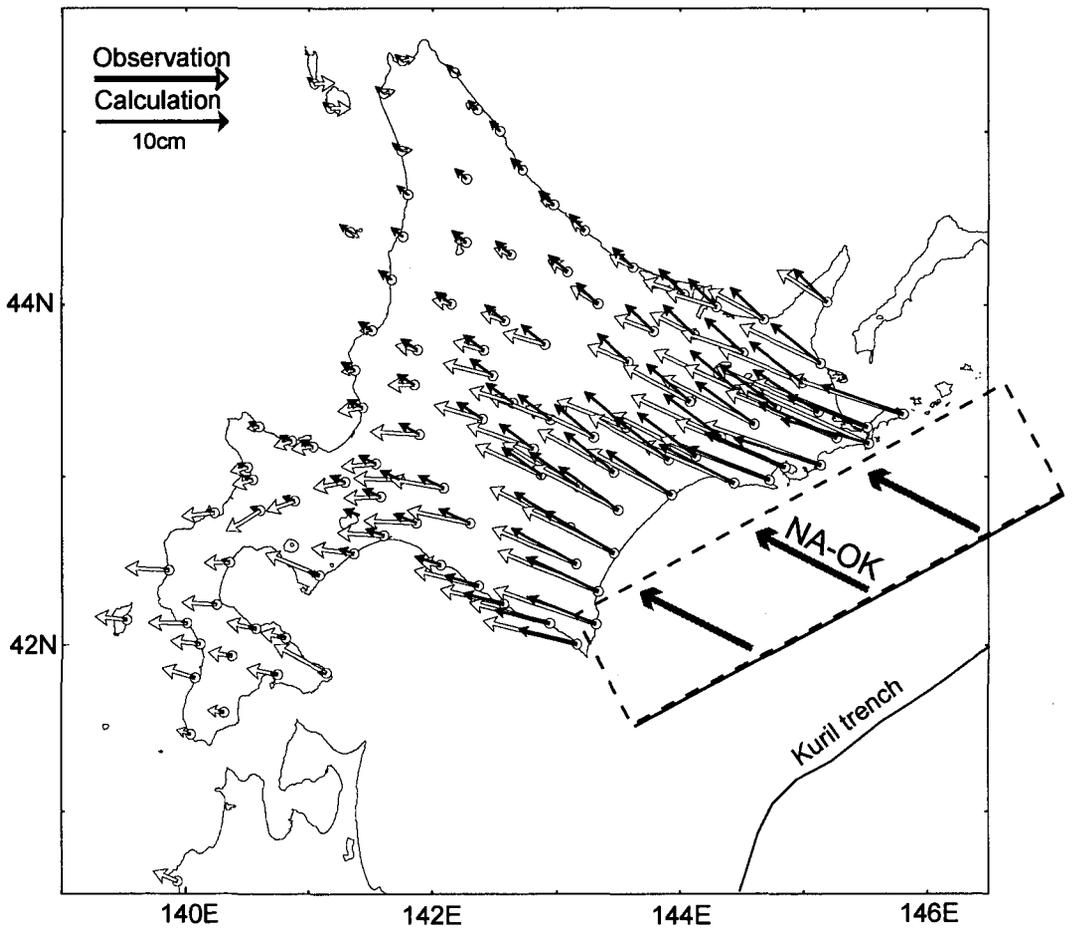


Fig. 2. Observed and calculated horizontal displacements at GPS stations relative to NA. Assumed coupled region and rake angle are shown by a rectangle and thick arrows, respectively. Observed period is same as Fig. 1.

に対して1-2 cm/yrの速度で東進していることが測地学的データから明らかにされている (Takahashi et al., 1999; Heki et al., 1999). このため、北海道北部で観測されている東向きの地殻変動は、このアムールプレートの運動の影響を受けているものと考えられる。

太平洋プレートと陸側プレートのカップリングの影響を調べるために、Fig. 2に示すような矩形領域がカップリングしているとしてバックスリップを与えた場合の理論地殻変動 (Okada, 1992) を計算した。カップリング領域は Miyamachi et al. (1994) や Iwasaki et al. (1989) によるプレートの沈み込みの形状や、1952年十勝沖地震 (MJMA 8.2)・1973年根室半島沖地震 (MJMA 7.4)・2003年十勝沖地震の断層モデル (笠原, 1975; Shimazaki, 1974) を参考に試行錯誤的に求め、上端の深さと傾斜角度はそれぞれ15 km, 25度とした。カップリング領域に与えるバックスリップの量は NUVEL-1 a (DeMets et al., 1992) に基づき GPS 観測データの期間と同じ3年分の相対運動量にあたる25 cmとした。また、すべり角の方向はプレート相対運動方向とした。

この結果得られた計算値と観測値を示したものが Fig. 2である。太平洋岸の観測点では、観測値と計算値が量・方向とも調和的である。従って、この領域では太平洋プレートと陸側プレートとのカップリングの影響が観測された水平変位ベクトルの大部分を占めていると考えられる。しかし、観測値のほうが計算値よりもやや大きい変位量を示している。また、日高西部・胆振東部・石狩・空知の各支庁管内の観測点では、カップリングのモデル計算値より2倍以上大きい変位が観測されている。同じく南西部でも計算値よりも大きな変位量が観測されているが、この領域は Fig. 2でモデル化されていない青森県東方沖でのカップリングの影響が大きいためであると考えられる。

III. 地震時地殻変動

2003年十勝沖地震による地震時水平地殻変動を Fig. 3に示す。比較した期間は、2003年9月1日から25日までと9月27日から30日まで (9月26日のデータは地震を挟んでいるため除外) のそれぞれの期間の平均値の差をとったものである。比較する期間が短いので、観測された変位はこの地震によるものであると仮定し、ITRF 97座標系の座標値をそのまま採用して変位ベクトルを計算した。北海道全域にわたり観測精度を超えるような水平地殻変動が断層運動によって引き起こされたことがわかる。最大水平変位量は広尾町で97 cm、震源から最も遠い礼文島でも約3 cmの変位が観測されている。

国土地理院はこの地殻変動データを用いて2003年十勝沖地震の断層モデルを求めたが (<http://www.gsi.go.jp>), それによる理論地殻変動を Fig. 3に示した。2003年十勝沖地震に伴って観測された地殻変動が、この断層モデルではほぼ説明できていることがわかる。釧路より東方では北東向きの地殻変動がみられるが、これは断層モデルのすべり角が断層の走向に対して直行しておらず東に振れているためである。また、この断層モデルのすべり角方向は、プレート相対運動の方向とほぼ同じであったが、1952年十勝沖地震ではこれよりも南に振れていた (Fig. 3) (笠原, 1975)。

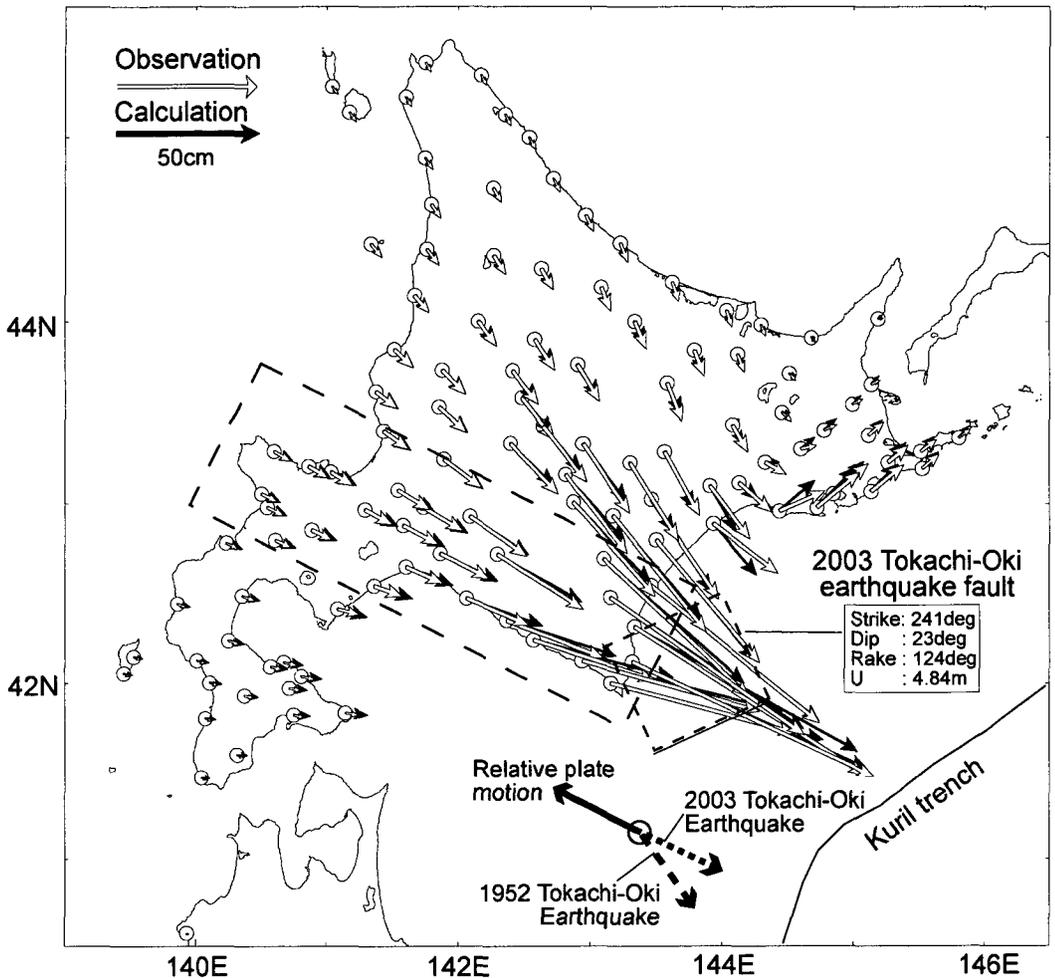


Fig. 3. Observed and calculated co-seismic displacements at GPS stations caused by the 2003 Tokachi-oki earthquake (M_{JMA}8.0) in ITRF97 reference frame. Assumed fault parameters are from Geographical Survey of Japan (2003). Rake angles of 2003 Toakchi-oki earthquake, 1952 Tokachi-oki earthquake (M_{JMA}8.2) (Kasahara, 1975) and direction of relative plate motion (DeMets, 1994) are shown.

IV. 地震間および地震時地殻変動の比較

2003年十勝沖地震では、この地震を引き起こした断層運動による地殻変動が北海道全域に及んだ。ここでは、地震時地殻変動と地震間地殻変動との比較をする。前節で述べたように、今回の地震のすべり角方向とプレート相対運動方向は、正反対であることを示す180度をなしていた (Fig. 3)。この方向の陸域延長部にあたる領域 (「影響領域」と呼ぶ、Fig. 3に表示) で観測された地殻変動は、この断層面でのカップリングの影響を強く受けていると考えることができる。一

方、影響領域よりも東側では根室半島沖の、西側は青森県東方沖のカップリングの影響を強く受けていると考えられる。従って、今回の地震によるリバウンドの議論を行えるのは影響領域だけであることに注意が必要である。

Fig. 4 に、地震間と地震時水平変動ベクトルの方位角を示す。図中では、角度が比較しやすいようにベクトルの絶対量は規格化されている。これによると、影響領域にあたる十勝支庁南東部や日高支庁の観測点では、地震間のベクトルと地震時ベクトルの差がほぼ 180 度をなしている。つまり、地震間に観測された変位が地震によって正反対の方向に引き戻されたことを示している。断層面よりも東に行くに従って方位角の残差が 180 度よりもずれてくが、これは根室半島沖のカップリングの影響が大きくなるためである。

次に、変位ベクトルの大きさに関して検討してみる。現在、国土地理院 GPS 観測網の座標値

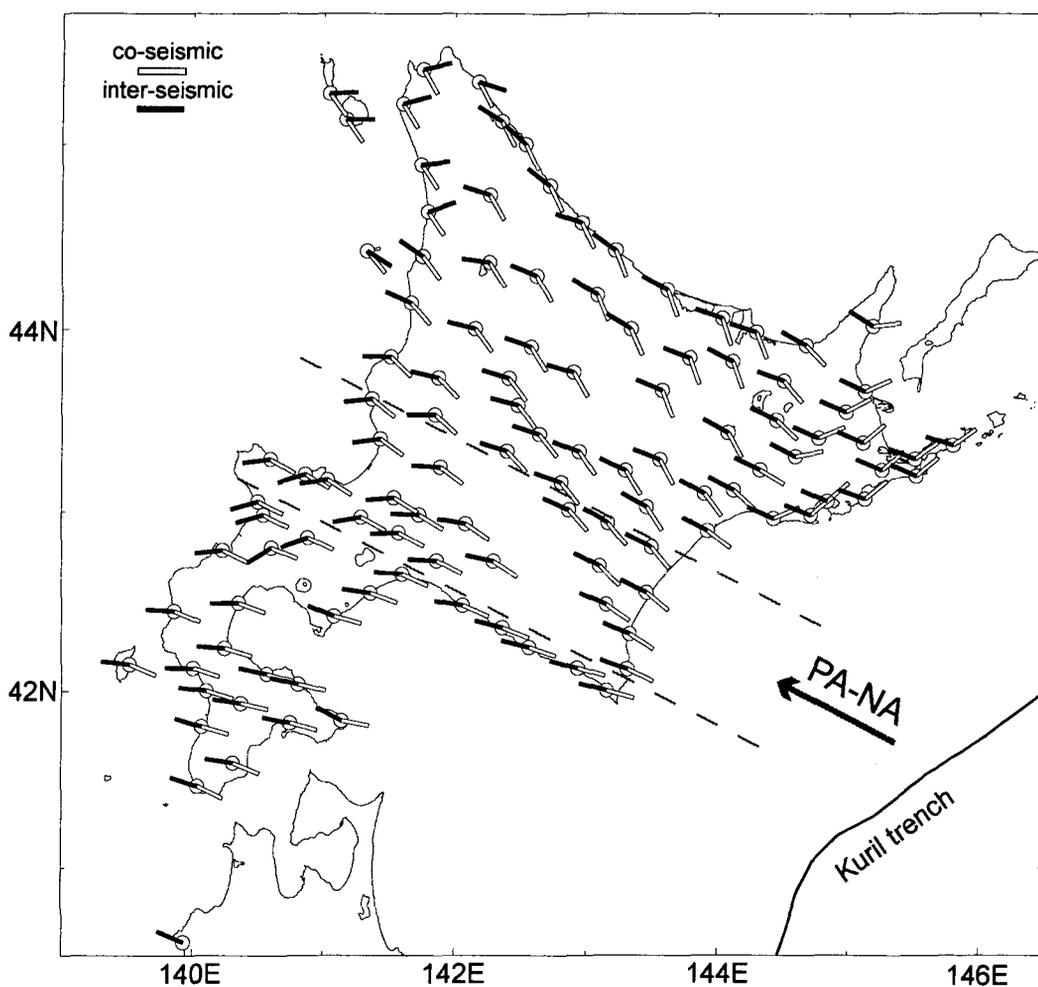


Fig. 4. Direction of inter- and co-seismic horizontal displacement vectors relative to NA. Magnitudes of vectors are standardized. Thick arrow and dashed lines indicate the direction of NA-PA relative motion.

データが入手できる 1996 年以降 2003 年十勝沖地震前までの基線長変化を見ると、ほぼ一定のレートで地殻変動が進行していることがわかる。そこで、ここでは Fig.1 で示したような変位場が 1952 年十勝沖地震以降ゆらぎなく一定に継続してきたと仮定して、2003 年十勝沖地震までの 51 年間分の変位量を外挿して求める。このようにして前回の地震以降蓄積されてきた地震間変位ベクトルを求め、2003 年十勝沖地震による地震時変位ベクトルと同時に示したものが Fig.5 である。影響領域である十勝支庁南東部や日高支庁の太平洋沿岸部では、地震間に蓄積された変位の大きな割合が地震によるリバウンドで解消されたことがわかる。また、全体的に地震時の変位量が地震間よりも小さい傾向にある。特に、石狩・空知・胆振支庁では、地震間に蓄えられた変位がこの地震によってはほとんど解消されていない。

Fig.5 で示した地震間と地震時地殻変動の残差をより詳細に見るために、その残差ベクトルを

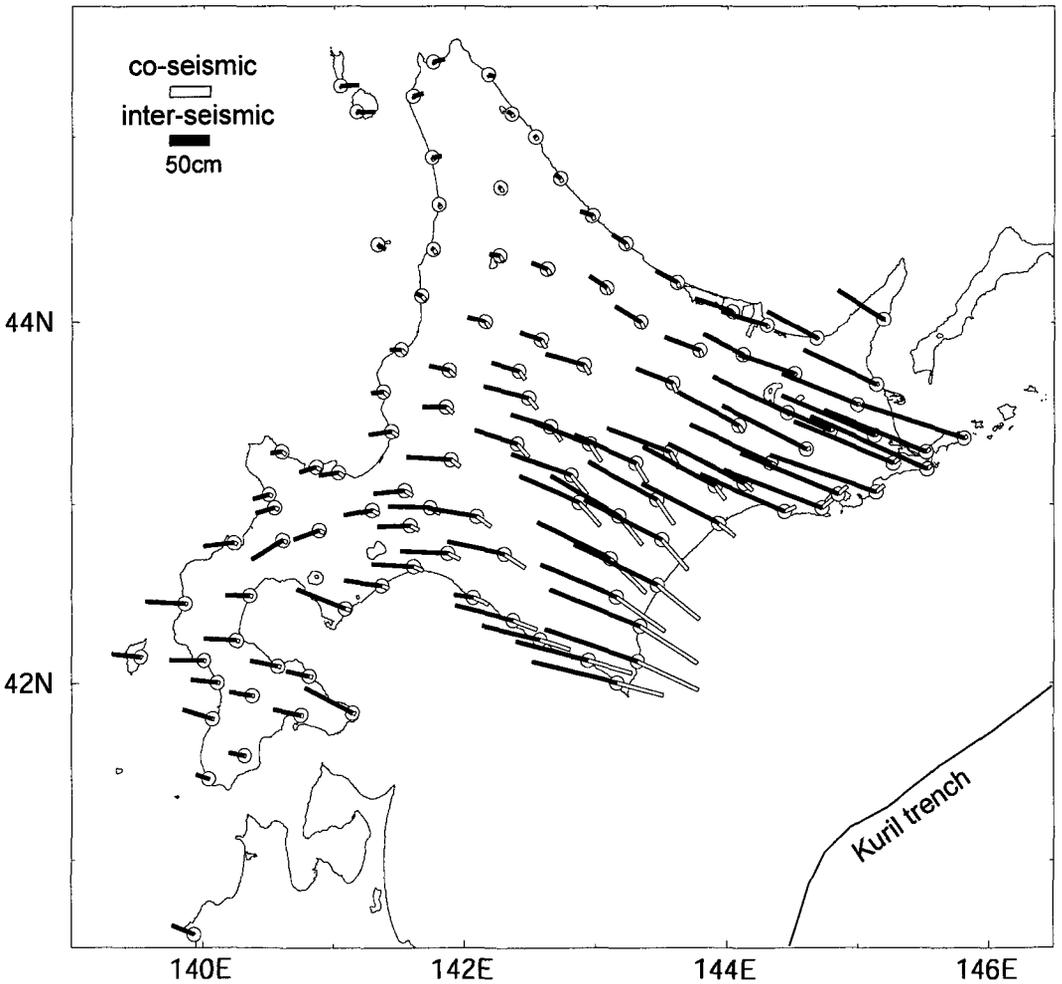


Fig. 5. Co-seismic and inter-seismic horizontal displacement field relative to NA. Inter-seismic vectors are estimated by extrapolating the observed three years displacements shown in Figure 1.

Fig. 6 に示す。観測点に記してある数値は、残差ベクトルの大きさを地震間ベクトルの大きさを割ったものを百分比で示している。つまり、この数値が小さいほど地震時地殻変動によって地震間地殻変動が解消された割合が大きいことを示している。地震断層に近い十勝支庁南部や日高支庁東部では、地震によって解消された割合が大きい (60-70%) ことがわかるが、地震間地殻変動量の 30% 以上がなお残留している。変位ベクトルの残留量は北西部に行くに従って大きくなり、石狩低地帯では 70% 以上が解消されずに残っている。

V. 考 察

1. 余効変動の影響

今回の十勝沖地震の後、震源に近い GPS 観測点では顕著な余効変動が観測されている。10 月 25 日までの地震後 1ヶ月間にえりも 1 観測点 (940019) (Fig. 1) で観測された余効変動量は 11 cm におよび、これは地震時地殻変動量の 20% にあたる。この余効変動は減速しながらも 2003 年 12

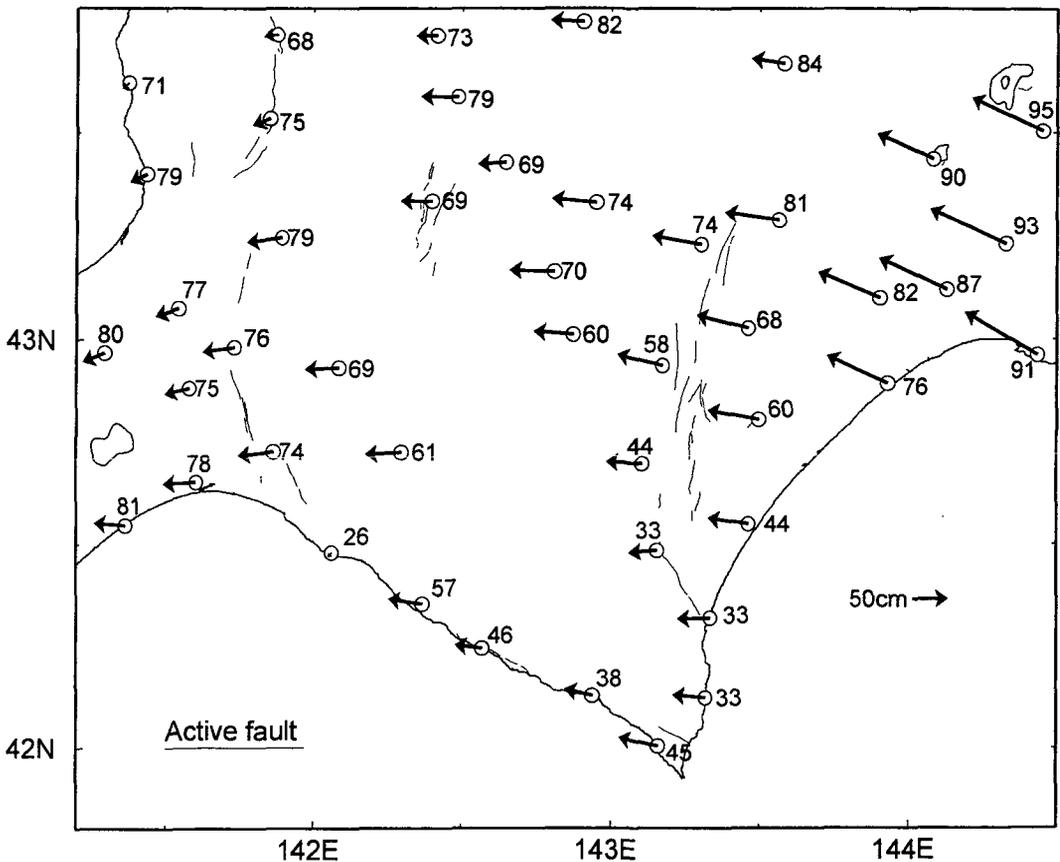


Fig. 6. Deviation vectors between inter- to co-seismic displacements shown in Figure 5. Numerical values at each GPS station indicate the proportion of remaining displacement to the inter-seismic one in percent.

月の時点で継続中である。この余効変動によって、震源に近い観測点では残留した変位が徐々に解消されつつある。震源から離れた内陸部の観測点では、地震時地殻変動によって解消された地震間地殻変動の割合が小さくなっているが、これも時定数が数年に及ぶような余効変動によって残留変位が解消される可能性がある。今回の地震の南側に隣接する領域で1994年に発生した三陸はるか沖地震(MJMA 7.6)では、余効変動によるモーメントの解放量が地震時のそれを上回っていたことが明らかにされている(Heki et al., 1997)。そのため、今後少なくとも数年間はデータを蓄積して余効変動による影響を見積もる必要がある。

2. 千島外弧の西進運動

北海道東部地域では、太平洋プレートの斜め沈みこみに伴って千島外弧が千島内弧に対して西南西向きに移動している(西進運動)という考えが提案されている(たとえば, Kimura, 1986; DeMets, 1992)。この西進運動を駆動するためには、西向き成分をもつような残差ベクトルが地震間と地震時地殻変動の差として現れる必要がある(高橋, 2002)。多田・木村(1987)は、十勝平野東縁断層帯(彼らは帯広構造線と命名している)が千島外弧西進運動の西側の衝突境界である可能性を示しているが、Fig. 6からはこの構造線の西側と東側の観測点での変位がそれほど大きく違って見えるようには見えない。しかし、この断層帯の評価を行うためには、将来発生するであろう根室半島沖地震による地震時地殻変動の影響を取り除くとともに、先にも述べた余効変動の効果を考慮する必要がある。最近実施されたこの断層帯での詳細な活断層調査では、この断層帯では過去数十万年間に断層が活動した可能性を示す地形・地質学的な現象は多く見られるが、後期更新世以降(少なくとも数万年間程度)に活断層が確実に活動したことを直接示す証拠は、南西部に位置する光地園断層を除きまだ確認されていないことが明らかにされている(廣瀬, 私信; 北海道, 2003)。

3. 石狩低地帯

石狩低地帯の東縁部には、泉郷断層や馬追断層など南北走向の活断層から構成される石狩低地帯東縁断層帯がある。最近実施された詳細な活断層調査から、最も活動度が高い泉郷断層では1300–1500年周期でM6後半の地震が繰り返し発生し、およそ1万年前以降で活動度が強まっている傾向が明らかにされている(北海道, 2001)。Fig. 6によると、石狩低地帯東縁断層の東西で残差ベクトルに不連続があるようにはみえない。地震間の変位が高い割合で残っており、地震間地殻変動もモデルから有意に外れることは(Fig. 2)、この地域が太平洋プレートとは別の要因に強く影響されている可能性を示している。しかしながら、定量的な評価を行うためには余効変動による時定数の長い変動の影響を差し引くことが必要である。石狩低地帯東縁断層帯が活断層として活動を現在まで継続していること、測地測量(1909–1984年)で大きな東西圧縮歪が観測されていること(橋本・多田, 1988)から、今後とも注意深く変動を監視してゆく必要がある。

VI. お わ り に

国土地理院が北海道に設置している GPS 連続観測点のデータを用いて、2003 年十勝沖地震に伴って観測された地震時水平地殻変動と地震間地殻変動の比較を行った。その結果、震源に近い観測点では地震間に蓄えられた変位の 60–70% が地震時地殻変動によるリバウンドで解消されたことが明らかになった。また、現在も継続中の余効変動によって、残る変位も解消されつつある。今回のような巨大地震の場合には、観測される余効変動量も大きくなることから、内陸部の活断層周辺域での残留歪や、千島外弧の西進運動の評価を行うためには、少なくとも現在継続中である余効変動を高精度に観測して、その影響を除去する必要がある。

謝辞 筆者は、西田泰典教授から本研究を始めるきっかけを与えて頂いたうえ、長年にわたり御指導を賜りました。北海道立地質研究所の廣瀬亘博士から、十勝平野東縁断層帯に関する未公表の情報を提供して頂いた。国土地理院の GPS 観測点座標データを使用した。気象庁発行の地震年報震源カタログを使用した。地殻変動の理論計算の一部には MICAP-G (内藤・古川, 1999; Okada, 1992) を、GPS に関する解析の一部には PAT-ME (中村, 1999) を使用した。図の作成には GMT (Wessel and Paul, 1995) を使用した。北海道大学地震火山研究観測センターの本谷義信博士、一柳昌義氏には原稿に目を通していただいた。記して感謝の意を表します。

文 献

- Argus, D. F. and R. D. Gordon, 1991. No-net-rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model NUVEL-1, *Geophys. Res. Lett.*, **18**, 2039–2042.
- DeMets, C., R. G. Gordon, D. F. Argus and S. Stein, 1994. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimate of current plate motions, *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 2191–2194.
- DeMets, C., 1992. Oblique convergence and deformation along the Kuril and Japan trenches, *J. Geophys. Res.*, **97**, 17615–17625.
- 橋本学・多田亮, 1988. 北海道の水平変動とテクトニクス, *地震*, **41**, 29–38.
- Heki, K., S. Miyazaki and H. Tsuji, 1997. Silent fault slip following an interplate thrust earthquake at the Japan trench, *Nature*, **386**, 595–598.
- Heki, K., S. Miyazaki, H. Takahashi, M. Kasahara, F. Kimata, S. Miura, N. Vasilenko, A. Ivashchenko and K. D. An, 2000. The Amurian plate motion and current plate kinematics in East Asia, *J. Geophys. Res.*, **104**, 29147–29153.
- 北海道, 2001. 石狩低地帯東縁断層帯, 活断層図とその解説, pp 157.
- 北海道, 2003. 十勝平野断層帯に関する調査, 活断層調査成果および堆積平野地下構造調査成果報告会予稿集, 文部科学省, 217–226.
- Iwasaki, T., H. Shiobara, A. Nishizawa, T. Kanazawa, K. Suyehiro, N. Hirata, T. Urabe and H. Shimamura, 1989. A detailed subduction structure in the Kurile trench deduced from ocean bottom seismographic refraction studies, *Tectonophysics*, **165**, 315–336.
- 笠原稔, 1975. 1952 年十勝沖地震の断層モデル, *地震学会予稿集*, **2**, 90.
- 笠原稔・高橋浩晃, 1999. 最近の地殻変動から見た北海道のテクトニクス, *地球*, 号外, 東北日本トランセクト——

- 島弧変形と地殻活動——, **27**, 194–199.
- Kimura, G., 1986. Oblique subduction and collision: Forearc tectonics of the Kuril arc, *Geology*, **14**, 404–407.
- 国土地理院, 2003. 国土地理院ホームページ (<http://www.gsi.go.jp>).
- Miyamachi, H., M. Kasahara, S. Suzuki, K. Tanaka and A. Hasegawa, 1994. Seismic velocity structure in the crust and upper mantle beneath northern Japan, *J. Phys. Earth*, **42**, 269–301.
- 中村浩二, 1999. GPS データ簡易表示プログラム (SEIS-GPS) の開発, *情報地質*, **10**, 257–266.
- 内藤宏人・古川澄夫, 1999. 地殻変動解析支援プログラムの開発, *地震*, **52**, 101–103.
- Okada, Y., 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**, 1018–1040.
- 岡崎紀俊・高橋浩晃・笠原稔・石丸聡・森濟・北川貞之・藤原健治・中禮正明, 2002. 高密度GPS観測による2000年有珠山噴火に伴う地殻変動, *火山*, **47**, 547–448.
- 多田堯・木村学, 1987. 千島弧南西端における衝突現象と地殻変動, *地震*, **40**, 197–204.
- Shimazaki, K., 1974. Nemuro-Oki earthquake of June 17, 1973. A lithospheric rebound at the upper half of the interface, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **9**, 314–327.
- Takahashi H., M. Kasahara, F. Kimata, S. Miura, K. Heki, T. Seno, T. kato, N. Vasilenko, A. Ivashchenko, V. Bahtiarov, V. Levin, E. Gordeev, F. Korchagin and M. Gerasimenko, 1999. Velocity field of around the Sea of Okhotsk and Sea of Japan regions determined from a new continuous GPS network data, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 2544–2536.
- 高橋浩晃・岡崎紀俊・石丸聡・森濟・松島健・渡邊篤志・三浦哲・中尾茂・加藤照之・木股文昭・笠原稔, 2002. 2周波GPS受信機による2000年有珠山噴火前後の地殻変動観測, *火山*, **47**, 161–166.
- 高橋浩晃, 2002. GPS観測データからみた北海道東部と日高山脈の地殻変動, *月刊地球*, **24**, 508–511.
- Takahashi, H. and K. Hirata, 2003. The 2000 Nemuro-Hanto-Oki earthquake, off eastern Hokkaido, Japan, and high intra-slab seismic activity in southwestern Kuril trench, *J. Geophys. Res.*, **108**, 2178.
- Tsuji, H., Y. Hatanaka, T. Sagiya and M. Hashimoto, 1995. Coseismic crustal deformation from the 1994 Hokkaido-Toho-Oki earthquake monitored by a nationwide continuous GPS array in Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 1669–1672.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith, 1995. New version of the Generic Mapping Tools Released, *EOS Trans. AGU*, **76**, 329.