

## 4.2.2 GPS繰り返し観測による余効変動観測

### (1) 調査研究の目的と概要

(a) 課題名 GPS 繰り返し観測による余効変動観測

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
北海道大学理学研究科	教授	笠原 稔	mkasa@eos.hokudai.ac.jp
北海道大学理学研究科	助手	高橋浩晃	hiroaki@eos.hokudai.ac.jp
東京大学地震研究所	教授	加藤照之	teru@eri.u-tokyo.ac.jp
	助手	中尾 茂	nakao@eri.u-tokyo.ac.jp
	大学院生	福田淳一	fukuda@eri.u-tokyo.ac.jp
	大学院生	飯沼卓史	iinuma@eri.u-tokyo.ac.jp
名古屋大学環境学研究科	助教授	鷺谷 威	sagiya@seis.nagoya-u.ac.jp
	PD 研究員	伊藤武男	take@seis.nagoya-u.ac.jp
京都大学防災研究所	教授	橋本 学	hasimoto@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp
	助手	大谷文夫	ohya@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp
	技官	細善信	hoso@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp
	技官	藤田安良	fujita@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp
	大学院生	佐藤一敏	sugar@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp
九州大学理学研究院	助教授	松島 健	mat@sevo.kyushu-u.ac.jp
	大学院生	河野裕希	yuki-k@sevo.kyushu-u.ac.jp
国土交通省国土地理院	室長	今給黎哲郎	ima@gsi.go.jp

(c) 調査研究の目的

十勝沖地震の余効地殻変動の時間的・空間的变化を把握する。機動 GPS 連続観測システムを導入して機動観測を実施し、震源域およびその周辺域でのプレート間カップリングの時間的変動を把握する。

### (2) 調査研究の成果

(a) 調査研究の要約

地震発生直後から、北海道大学・東京大学地震研究所・名古屋大学・京都大学防災研究所・九州大学からなる GPS 大学連合は連携して、余効変動の深部延長及び東西延長の時間発展を精度よく見ていくために、GEONET 観測網の隙間を埋めるように 30 点の観測点で GPS 機動システムによる連続観測を開始した。観測点には、アンテナ設置安定性が求められるために、その多くは小中学校や公共施設の鉄筋コンクリート建築物の屋上にステンレスボルトの埋設、あるいはアンテナアタッチメントを用いて堅強に固定された。また、使用した GPS 受信機は 2 周波受信型で、サンプリ

ング間隔は 30 秒とした。地震後 3 日までに 80%の観測点の設置ができた。多くの観測点は、データ現地収録型システムであるが、冬季間にも安定したデータ取得ができており、設置後何度かのデータ回収作業を行った。得られた GPS データを専用ソフトウェアを用いて高精度に解析して余効変動の検出を行い、その変動特性を明らかにした。

#### (b) 調査研究の成果

GPS 機動観測により取得された連続観測データを Bernese GPS Software version 4.2 および International GPS Service for Geodynamic Precise Ephemerises を用いて ITRF2000 座標系を採用して日毎ごとに座標解析を行った。その結果、震源域を含む広範囲で顕著な地震後余効変動が発生していることが明らかになった。

地震直後の大きな余効変動は、本震発生時から時間がたっていないほど大きな速度を示しており、それは 4 から 11 日の比較的短い時定数を持つような対数関数系で近似できることがわかった。また、余効変動を発生させている要因が単一であるとすれば、時定数は一定のはずであり、それぞれの観測点で余効変動の振幅を推定することにより、余効すべりの絶対量の比較検討ができる。そのため、振幅が最も大きかった庶野(SYPS)で求められた時定数を固定して各観測点の振幅を推定した。その結果、震源域の中心部(アスペリティ付近)での振幅は小さく、西側である SYPS や KMUS、東側である NSRO で振幅が大きいことが分かった。

この結果は、次のようなモデルで説明できる。地震時に大きくすべったいわゆるアスペリティ(Yamanaka and Kikuchi(2003))では、本震時にそのほとんどのモーメントを解放してしまったため、余効すべりが発生しない。一方、本震時にあまりすべらなかつたアスペリティの周辺部は、その後時間をかけて、余効変動として応力を如くに解放する。SYPS や NSRO の大きな余効変動は、上記のようなメカニズムで発生しているものと考えられる。余震の活動状況を見てみると、本震アスペリティの東外側で M6 級の大き目の地震が多く発生している。これは、余効変動の空間パターンと調和的であり、アスペリティの周辺部でおおきな余効すべりを発生しつつ、それが大きめの余震となって現れているものと考えられる。

ところで、北海道東部の太平洋沿岸では、地震時および地震時とも、沈降が観測されてきている。(Katsumata et al., 2002, Geographical Survey Institute of Japan, 2002, Aoki and Scholz, 2003)。一方、北海道東部の潟湖の堆積物の調査からは、400 年から 500 年に一度づつ隆起が発生していたことが明らかにされた(Sawai, 2001, Sawai et al., 2002, Sawai, 2002)。したがって、今回の十勝沖地震の変動の特性を明らかにしてどのモードに対応しているのかを調べることは、プレート沈み込みの活動様式を研究するうえで重要な知見を与える。特に、本震よりも深い部分は、温度が高いためプレート境界はずるずると定常的にすべっている領域であると考えられているため、この部分で余効変動が発生しているとすれば、プレート境界の力学および熱学モデルに大きな変更を要するものとなる。

このような視点に立ち、今回の地震後の余効変動が、本震断層のどの領域で発生しているかモデル計算を行って調査した。もし、余効変動の原因が本震断層の深部延長部で発生しているとすれば、沿岸部に我々が設置した GPS 観測点で土地の隆起が観測されるはずである。一方、余効変動の原因が本震断層面上、あるいはその東西延長部、あるいは海溝側延長部で発生しているとすれば、我々が設置した GPS 観測点では隆起は観測されず、非常に小さい値ながら沈降が生じるはずである。

我々が解析した GPS 観測データは、いずれの観測点でも上下成分に有意な変動は観測されなかった。一方、顕著な南東向きの水平変動が観測された。この、大きな水変動と上下変動がないという観測事実は、発生している余効変動の原因が本震の深部延長部ではなく、それよりも浅い領域で発生していることを示すものである。したがって、今回の十勝沖地震では、その地震断層の深部延長部へ顕著なすべりが伝播していったということはなかったと結論できる。ちなみに、GPS の観測精度を考慮して深部延長部でのすべり量の検知は 0.6m 以上であり、これは本震のすべり量の 15%にあたる量である。

我々の GPS 観測点では、顕著な水平余効変動が観測されたが、10 月末までの期間で最もその変動量が大きかったのは庶野で 6.6cm であった。この付近の地震時の変動量は 80cm 程度であるから、この期間までの余効変動量は本震の 10%以下である。今回の十勝沖地震の南側の隣接区域で発生した 1996 年三陸はるか沖地震では、地震後に観測された余効変動によるモーメントが地震時に放出されたそれと、ほぼ同じ量であった(Heki et al., 1997)。これに比べると、今回の地震での余効変動量はかなり小さい。余効変動は平成 16 年 3 月現在も継続しており、今後解放されるモーメントが幾分増える可能性はある。

前述のように、余効変動は 10 月以降も継続して続いている。変動様式は、初期のように対数関数というよりは、より線形に近い形となっている。観測されている余効地殻変動は、平成 16 年 3 月現在でも継続中である。

日高地方における観測は京都大学防災研究所が担当した。設置作業は 10 月 1~5 日と 19~24 日の 2 回にわけて実施し、延べ 7 ヶ所に設置した。使用受信機は Trimble5700(アンテナ Zephyr)および JAVAD Legacy-E(アンテナ LegAnt または RegAnt)である。アンテナは、役場、小学校等公共施設の屋上に、ボルトまたは観測基台にて固定した。これら京大設置観測点のうち 10 月中に先行して観測を行っている FUIM(笛舞:撤収済み)、URKW(浦河)、HOBT(穂別)の 3 点、および GEONET は 0016(静内)、0019(えりも)、0132(厚真)、0133(平取)、0141(門別)、0142(三石)、0144(様似)、の計 7 点、合計 10 点のデータを用いて、地震発生から 10 月 20 日前後までのデータ解析した。静内 2 についても観測を行っていたが、アンテナケーブルのトラブルに伴いデータは最初の数時間をのぞいて欠測となっているため使っていない。解析においては、新潟県村上市の GEONET 点 940049 を固定点として使用した相対変位で示している。

10 月 1~5 日に設置した 3 ヶ所の観測点について、周辺の GEONET 観測点のデータとあわせて解析した暫定結果を示す。解析ソフトウェアは GIPSY - OASIS を使用し、JPL 暦を利用した PPP(精密単独測位)解析を行った。図 6 は静内以北の観測点の座標の日変化である。10 月 2 日以降 18 日までの変位は、東および南へ最大約 2cm である。図 7 は南部浦河~えりも周辺の観測点の座標の日変化である。10 月 2 日以降 18 日までの変位は、東へ最大約 4cm、南へ 2cm 程度であるが、南の観測点ほど大きい傾向がある。また、全観測点において、10 月 8~10 日に変動が加速したようにも見える。なお、11 月以降の変動については、2004 年 3 月にデータを回収した。門別周辺で 2003 年末に発生した停電等により南の方の観測点で欠測が発生しているが、データのある期間について解析を進めているところである。

(c) 結論ならびに今後の課題

平成 15 年十勝沖地震の余効地殻変動を詳細に調査するために機動 GPS 観測点を設置して観測を行った。観測で得られた GPS 連続データを高精度に解析した結果、顕著な余効変動が発生していることが明らかになった。余効変動は、本震のアスぺリティ付近では小さく、その周辺域で大きい傾向があった。また、余効変動は本震断層の深部延長部ではなく、その周辺部の浅い部分でのすべりにより起こっていることが明らかになった。余効変動は現在でも継続しており、最終的なモーメントの推定、余効変動の減衰様式の特定、あるいは、断層のすべり特性を解明するために、引き続き GPS 観測を継続して行う必要がある。

(d) 引用文献

Aoki, Y., and C. H. Scholz, Vertical deformation of the Japanese islands, 1996-1999, J. Geophys. Res., 108, 2257, doi:10.1029/2002JB002129, 2003.

Geographical Survey Institute of Japan, Vertical crustal movements in Japan estimated from the leveling observations data for the past 100 years, Report of the coordinating committee for earthquake prediction, 67, 555, 2002.

Heki, K., S. Miyazaki and H. Tsuji, Silent fault slip following an interplate thrust earthquake at the Japan Trench, Nature, 386, 595-598, 1997.

Kastumata, K., M. Kasahara, S. Ozawa, and A. Ivashchenko, A five years super-slow precursor model for the 1994 M8.3 Hokkaido-Toho-Oki lithospheric earthquake based on tide gauge data, Geophys. Res. Lett., 29, 1654, doi:10.1029/2002GL014982, 2002.

Sawai Y., H. Nasu, and Y. Yasuda, Fluctuations in relative sea-level during the past 3000 yr in the Onnetoh estuary, Hokkaido, northern Japan, J. Quater. Sci., 17, 607-622, 2002.

Sawai Y., Evidence for 17th-century tsunamis generated on the Kuril-Kamchatka subduction zone, Lake Tokotan, Hokkaido, Japan, J. Asian Earth Sci., 20, 903-911, 2002.

Sawai Y., Episodic emergence in the past 3000 years at the Akkeshi estuary, Hokkaido, northern Japan, Quaternary Research, 56, 231-241, 2001.

Yamanaka, Y., and M. Kikuchi, 2003, Source process of the recurrent Tokachi-oki earthquake on September 26, 2003, inferred from teleseismic body waves, Earth Planets Space, 55, e21-e24.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
笠原稔・高橋浩晃・岡崎紀俊・中尾茂・鷺谷威・伊藤武男・大谷文夫・佐藤一敏・藤田安良・橋本学・細善信・加藤照之・飯沼卓史・福田淳一・松島健・河野裕希	2003年(平成15年)十勝沖地震におけるGPS観測	日本地震学会2003年秋季大会十勝沖地震緊急セッション	平成15年10月6日

笠原稔・高橋浩晃・岡崎紀俊・中尾茂・鷺谷威・伊藤武男・大谷文夫・佐藤一敏・藤田安良・橋本学・細善信・加藤照之・飯沼卓史・福田淳一・松島健・河野裕希	2003年(平成15年)十勝沖地震におけるGPS観測	日本測地学会2003年秋季大会十勝沖地震緊急セッション	平成15年10月22日
今給黎哲郎	GEONET で見た最近の顕著な地殻変動	防災研究所研究一般集会 15K-5,長周期イベントの理解に向けての現状と今後 / 主催: 京都大学防災研究所	平成15年12月15日
佐藤一敏・橋本学・大谷文夫・細善信・藤田安良	2003年十勝沖地震余効変動GPS稠密観測報告	平成15年度京都大学防災研究所研究発表講演会	平成16年2月20日
高橋浩晃・岡崎紀俊・中尾茂・鷺谷威・伊藤武男・大谷文夫・佐藤一敏・藤田安良・橋本学・細善信・加藤照之・飯沼卓史・福田淳一・松島健・河野裕希・笠原稔	GPS臨時観測による地殻変動	2003年十勝沖地震研究成果報告会 / 主催: 北海道大学大学院・理学研究科・地震火山研究観測センター, 工学研究科・都市環境工学専攻	平成16年3月5日
小沢慎三郎	GEONETによる2003年十勝沖地震の地殻変動	2003年十勝沖地震研究成果報告会 / 主催: 北海道大学大学院・理学研究科・地震火山研究観測センター, 工学研究科・都市環境工学専攻	平成16年3月5日
Takahashi H, N. Shigeru, N Okazaki, J Koyama, T Sagiya, T Ito, F Ohya, K Sato, Y Fujita, M Hashimoto, Y Hosono, T Kato, T Iinuma, J Fukuda, T Matsushima, Y Kohno, and M Kasahara	GPS observation of the first month of postseismic crustal deformation associated with the 2003 Tokachi-oki earthquake ( $M_{JMA}8.0$ ), off southeastern Hokkaido, Japan	Earth Planets and Space, 56, 77-382.	平成16年3月
笠原稔・高橋浩晃・岡崎紀俊・中尾茂・鷺谷威・伊藤武男・大谷文夫・佐藤一敏・藤田安良・橋本学・細善信・加藤照之・飯沼卓史・福田淳一・松島健・河野裕希	2003年(平成15年)十勝沖地震におけるGPS観測	地球惑星科学関連合同大会	2004年5月予定

Hashimoto M, Takahashi H, N. Shigeru, N Okazaki, J Koyama, T Sagiya, T Ito, F Ohya, K Sato, Y Fujita, Y Hosono, T Kato, T Iinuma, J Fukuda, T Matsushima, Y Kohno, and M Kasahara	Postseismic deformations associated with the 2003 Tokachi-oki earthquake from dense GPS data	Western Pacific Geophysical Meeting	2004 年 8 月 予定
Takahashi H, N. Shigeru, N Okazaki, J Koyama, T Sagiya, T Ito, F Ohya, K Sato, Y Fujita, M Hashimoto, Y Hosono, T Kato, T Iinuma, J Fukuda, T Matsushima, Y Kohno, and M Kasahara	Postseismic deformations associated with the 2003 Tokachi-oki earthquake from dense GPS data	4th Biennial Workshop on Subduction Processes emphasizing the Kurile Kamchatka Aleutian Arcs	2004 年 8 月 予定
Ozawa S, M Kaidzu, M Murakami, T Imakiire, Y Hatanaka,	Coseismic and postseismic crustal deformation after the Mw 8 Tokachi-oki earthquake in Japan	Earth Planets Space	投稿中

## 図の説明

図 1 機動 GPS 臨時観測により設置された観測点分布図。

図 2 取得された GPS データを解析して得られた 2003 年 10 月末までの座標の時系列。

図 3 (a)本震断層の深部延長ですべりが発生した場合に GPS 観測点で観測される上下変動。(b)本震断層の深部延長ですべりが発生した場合に地表面で発生する上下変動の(a)の X-X ラインにそったプロファイリング。(c)本震断層と同じ場所で余効すべりが発生した場合に地表面で発生する上下変動のプロファイリング。

図 4 観測された水平変動を最も変動量の多い方向に投影してノルムをとり、それに対して対数関数のフィッティングを行って時定数および振幅を推定した結果。は時定数(単位は日)を示す。

図 5 日高地方の十勝沖地震に伴う余効変動 GPS 観測点配置。英字コードは京大防災研設置点、数字コードは GEONET 点を示す。

図 6 10 月 2 日以降 18 日までの静内以北 GEONET 観測点および京大観測点の座標変化。(上)東西、(下)南北成分。

図 7 10 月 2 日以降 18 日までの浦河～えりも周辺の GEONET 観測点および京大観測点の座標変化。(上)東西、(下)南北成分。