

められた震源モデルによれば、平均的な地殻の水平歪み量が 2 ppm (10km で 2cm) を超える地域は約 3 万 km<sup>2</sup> (図-11) に及ぶ。この中には約 4,800 点の一・二・三等三角点が設置されており、すべての三角点の再測量は非現実的であるため、骨格的な三角点において GPS 測量を行い、空間的に詳細な水平変動を捉えた上で、電子基準点及び高度地域基準点測量のデータを総合して、一等から四等までの三角点成果を計算することとした。

なお、地震後も震源周辺でかなりの余効変動が継続していること (Ozawa et al., 2004)、網の歪みが特に大きいのは山岳地であること、さらに北海道では冬季に大規模な測量作業ができないことから、2003 年度の測量作業は断念し、2004 年度に高度地域基準点測量を実施することとした。

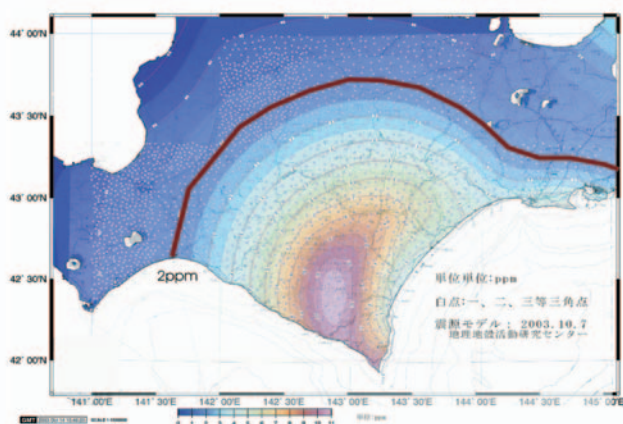


図-11 十勝沖地震に伴う水平歪みの大きさ。分布を大まかに把握するため、震源モデルから計算された水平主歪みの伸び・縮み成分の二乗和根を表示。

## 5.2 2003 年度三角点成果の取り扱い

三角点の測量成果（いわゆる「測地成果 2000」；世界測地系に基づく経緯度）の維持管理では、隣接する基準点の経緯度の局所整合性が重要である（国土地理院, 2003）。実際の測量で誤差要因となるのは、基準点の変動量の大きさそのものではなく、基準点間の変動ベクトルの差、つまり歪みの大きさである。この立場では、三角点の絶対位置の様な変化は許容できるが、相対位置に歪みが生じた場合、当該地域の三角点成果を早急に停止し、成果改定のための測量作業を実施する必要がある。

今回の地震でも前出の図-11 のように、広域に水平変動が生じたが、海域を震源域とするプレート境界地震であったため、陸域での水平変動は概ね同一方向となり、水平歪みの平均的な大きさは、北海道の広い範囲で数 ppm に達するものの、上限は日高山脈付近の 11ppm 程度であると推定された（余効変動分は含んでいない）。また、隣接する電子基準点間（約 20km）の変動ベクトル量の差も 20cm (10ppm) 以内であった。

以上のことから、隣接する三角点成果の局所整合性は地震によって低下したものの、許容範囲内には保たれており、小地域での公共測量への影響は小さいと判断した。このため、2003 年度は三角点の測量成果の停止は行わず、公共測量等で使用する場合は、なるべく近傍の三角点及び電子基準点を利用するよう指導・助言することとした。また、電子基準点と三角点の成果（経緯度）の局所整合性を保つため、電子基準点の経緯度についても、2003 年度は改定しなかった。

## 5.3 2004 年度測量計画

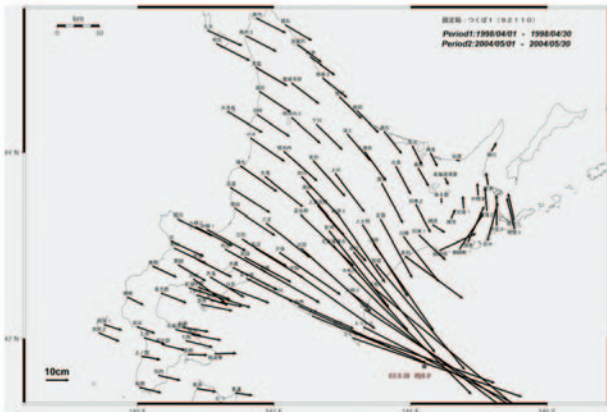
2004 年度になって余効変動は徐々に小さくなってきたことから、2004 年度に高度地域基準点測量を実施し、三角点の測量成果を改定することとした。地殻の平均的な水平歪み量が 2ppm を超える地域のうち、電子基準点の水平変動ベクトルが大きな地域内にある合計 196 点の一・二・三等三角点（高度地域基準点）において GPS 測量の実施を計画している。

このうち、釧路地域の高度地域基準点 46 点については直営作業を 2004 年 5 月から実施し、その他の地域 150 点の高度地域基準点については、6 月から外注作業によって実施することとした。

こうした高度地域基準点測量の結果により、地震による詳細な地殻変動を把握するとともに、次の方法により、測地成果 2000 に準拠した三角点成果と電子基準点成果の算出を計画している。

- 1) 電子基準点成果を計算する観測データとしては、地震時の変動と余効変動を含めた最新の観測データを使用する（例：図-12）。
- 2) 平均的な水平歪み量が 2ppm よりも小さな地域の電子基準点成果（測地成果 2000）を固定し、2ppm を超える地域にある電子基準点の測量成果を計算する（図-13）。
- 3) 計算された新しい電子基準点成果を基準に、高度地域基準点の測量成果を求める。
- 4) 電子基準点、高度地域基準点における地震に伴う地殻変動量から、周辺の三角点における地殻変動量を補間計算し、測量を行わなかった三角点の成果にその変動量を加えて、地震後の測量成果を算出する（変動パラメータ方式）。
- 5) 変動パラメータ方式で求めた三角点の一部については、独立な GPS 観測による検証作業を行い、改定成果の精度を検証する。

以上の方法により、電子基準点成果及び三角点成果を 2004 年度内に改定し、2005 年度初旬に新しい成果を公表できるよう準備を進めている。高度地域基準点測量は、直営、外注作業ともに 2004 年 11 月までに観測が終了する予定である。



図一 12 電子基準点の地殻変動（余効変動も含む）。基準期間：1998年4月1日～4月30日。比較期間：2004年5月1日～5月30日

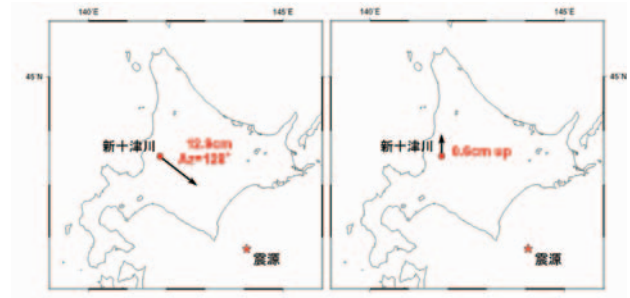


図一 13 電子基準点・三角点の成果改定予定地域。ただし、計算の結果、地域が変更される可能性もある。

#### 5.4 VLBI による検証

十勝沖地震による地殻変動は非常に広域に渡ったことから、電子基準点による変動監視のほか、VLBI 観測によっても変動量を確認した。国土地理院では、北海道新十津川町に VLBI 観測局を設置しており、定期的に観測を行っている。地震前の定期観測データと地震後の10月2日に実施した国内 VLBI 観測データ及び世界各地で取得されている国際 VLBI 観測によるデータを合わせて、グローバル解析を行い、三次元的な位置変化を求めたところ、図一 14 に示すように新十津川局は水平方向に 12.9cm、上方向に 0.6cm の変動が得られた。新十津川 VLBI 観測局の近傍に設置されている電子基準点から得られた変動量は、この VLBI グローバル解析による変動量と調和していることが確認された。

十勝沖地震では、地震後の余効変動があり、VLBI 観測においても検出されている。今後、電子基準点によって観測された余効変動量に関して、VLBI 観測の継続により検証していく予定である。



図一 14 VLBI グローバル解析により得られた新十津川 VLBI 観測局の三次元位置変化。左：水平方向、右：鉛直方向。解析方法：世界の主要 VLBI 観測局が ITRF 準拠の速度場に従って動くと仮定し、地球全体の VLBI 観測網に回転成分を与えないように、1980年～2003年の約3500セッションの VLBI データを三次元網平均計算し、十勝沖地震発生時の変動量のみを抽出した。

#### 6. 重力観測

##### 6.1 概要

十勝沖地震に伴う重力変化の検出を目的に、測地第一課は、重力測量を実施した。観測は、基準重力点の設置されている帯広畜産大学（帯広市）において、2004年3月22日から28日まで、絶対重力計（FG5）#201を用いて実施した。この測量は平成15年十勝沖地震に関する緊急研究の一環として、科学技術振興調整費により実施されたものである（平田，2004）。

今回の観測地点である帯広畜産大学土木工学実験室は、1998年に絶対重力観測を実施し、基準重力点（帯広FGS）が設置された場所である。今回の観測で得られた重力値と地震前の重力値と比較するため、前回の観測が6月であることを考慮し、雪解けで積雪の影響が少ないことが期待される3月に観測を実施することとした。

帯広FGSは恒温室（写真－3）に設置されているが、観測実施時、恒温装置が故障のため恒温状態が維持できない状態であった。ただし、断熱効果は高く、一晩扉を閉めただけの状態でも翌朝約25℃（外気の最低気温約-5℃）を示しており、観測に支障をきたすほどの室温変化はみられないと判断した。



写真－3 FG5 絶対重力計観測風景

## 6.2 測定結果

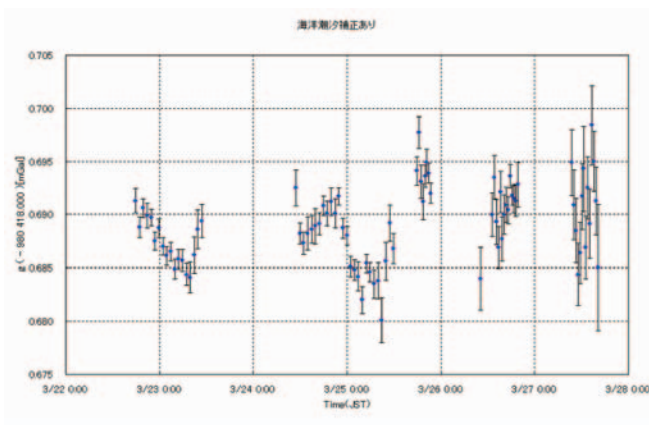
観測期間中の重力値の時間変化を図－15 に、重力値のヒストグラムを図－16 に、さらに前回観測値との比較を表－1 にまとめる。1998 年から 2004 年までの間に、帯広の絶対重力は約  $20 \mu\text{Gal}$  増加している。FG5 の測定公称精度は  $2 \mu\text{Gal}$  なので、この変化は有意と考えられる。なお、重力値はすべて金属標直上 1.30 m での値である。

北海道十勝沖では、海側の太平洋プレートが陸側の北米プレートに沈み込むという定常的な地殻変動が起こっている。この効果による重力変化が十勝沖地震に伴う変化に比べて十分小さいと仮定すると、今回の重力変化量は約 7cm の沈降に相当する。

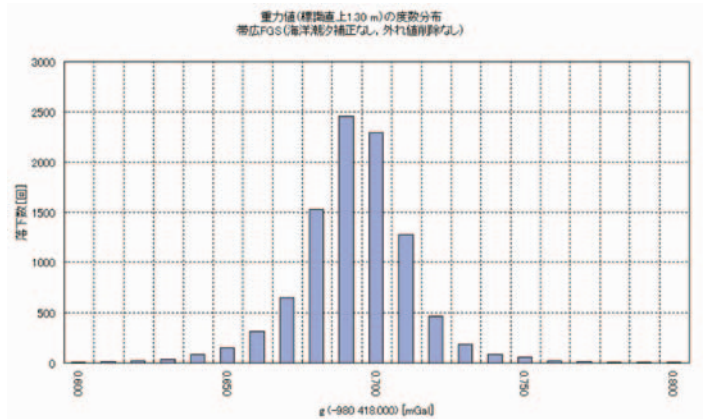
帯広 FGS への取付水準測量は今回が初めてなので、1997 年に水準測量が行われた最寄りの（約 8km 離れた）水準点（J33）での上下変動と比較してみる。J33 の釧路検潮所に対する沈降量は約 6cm で（図－7 上）、1997 年から 2003 年までの釧路検潮所の沈降量は約 3cm であることから（図－8）、この間の J33 の沈降量は約 9cm と推定される。比較している時期、場所がやや異なるが、これは観測された絶対重力変化と調和的である。

なお、今冬は積雪量が多く、観測時期にも建物周辺に約 30cm の積雪が残っていた。実験室の建物屋上に 1 m の積雪があった場合、重力値は  $0.8 \mu\text{Gal}$  だけ減少する。また、観測点周辺が一面に 40cm の積雪で覆われた場合、 $3.2 \mu\text{Gal}$  の重力増加が見込まれる（大久保・笠原, 2004）。このため、積雪量の影響については精査が必要である。

今回の作業により、地震発生 5 年前の 1998 年のデータと十勝沖地震後のデータとの比較を行うことができた。今後も時間的に密な繰り返し改測を行うことで、重力点の重力値を決定するとともに、国内の経年的な重力変化を求め、その傾向を把握することが重要である。



図－15 帯広 FGS における重力値の時間変化  
測定期間 2004 年 3 月 22 日～28 日



図－16 帯広 FGS における重力値の頻度分布  
測定期間 2004 年 3 月 22 日～28 日

表－1 帯広 FGS における絶対重力観測結果

| 測器   | 観測期間         | 重力値 mGal                 | 有効落下数  | 標準偏差 mGal |
|------|--------------|--------------------------|--------|-----------|
| #203 | 1998/6/16～24 | 980 418.6686<br>± 0.0002 | 29,942 | 0.0416    |
| #201 | 2004/3/22～28 | 980 418.6889<br>± 0.0002 | 9,606  | 0.0183    |
| 差    |              | + 0.0203<br>± 0.0003     |        |           |

## 7. 地震に伴う基準点体系の維持管理

地震等による地殻変動により基準点網に大きな歪みが生じた場合、その機能を維持するために、必要な測量成果の改定を行うこととなる。

水準点網については、変動の大きさにより、改測作業終了後、速やかに成果を改定することとしている。

しかし、三角網の場合は、もう少し事情が複雑で、改定の範囲・方法・時期について、地殻変動の様相（変動量、歪み）、公共測量への影響、地域の特性（地形、人口等）等を踏まえ、最も適切な手法を選ぶ必要がある。2003 年 7 月に発生した内陸性地震である宮城県北部の地震（M6.2）と対比しながら（豊田他, 2004）、十勝沖地震への対応の特徴を表－2 にまとめる。

最後に、北海道における三角点の成果改定の履歴について述べる。前回の 1952 年十勝沖地震（3 月 4 日、M8.2）の後、一等三角測量等が行われ、地震に伴う変動量を明らかにしているが（国土地理院, 1956）、測量成果（旧日本測地系）の改定は行われなかった。1994 年北海道東方沖地震（10 月 4 日、M8.2）においては、当時整備されたばかりの GPS 連続観測網により根室市で 40cm 程度の水平変動が記録されたが（Tsuji et al., 1994）、やはり三角点の測量成果は改定されなかった。これらの大地震による測量成果の歪みは、測地成果 2000 を計算する際に、地震後の測量データを用いて骨格網の位置を網平均計算したことにより、解消されている。

表ー2 内陸性地震と海溝型巨大地震における三角点の維持管理に関する対応の比較

|                      | 宮城県北部の地震                                                                                                                                                                                                                        | 平成 15 年十勝沖地震                                                                                                                                                                                                                                                     |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 発 生 日 時              | 2003 年 7 月 26 日 7 時 13 分                                                                                                                                                                                                        | 2003 年 9 月 26 日 4 時 50 分                                                                                                                                                                                                                                         |
| 地 震 の 規 模            | M6.2                                                                                                                                                                                                                            | M8.0                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 地 震 の 種 類            | 内陸のごく浅い中規模地震<br>(上盤側プレート内地震)                                                                                                                                                                                                    | 海溝型巨大地震 (プレート境界地震)                                                                                                                                                                                                                                               |
| 震 源 の 深 さ            | 約 12km                                                                                                                                                                                                                          | 約 42km                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 最 大 震 度              | 震度 6 強                                                                                                                                                                                                                          | 震度 6 弱                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 地 震 時 の<br>地 殻 変 動   | 旭山撓曲周辺に局所的な変動<br>(電子基準点 [矢本] が、<br>南東に約 17cm 移動し 9cm 隆起)                                                                                                                                                                        | 北海道の広い範囲で観測された<br>(電子基準点 [えりも 2] は、<br>南東に約 87cm 移動し 20cm 沈降)                                                                                                                                                                                                    |
| 地 震 後 の 変 動          | 観測されなかった                                                                                                                                                                                                                        | 北海道の広い範囲で地震後の地殻変動 (余効変動) を観測中                                                                                                                                                                                                                                    |
| 地 震 発 生<br>直 後 の 対 応 | <ul style="list-style-type: none"> <li>震源が浅く、その周辺では局所的に複雑な変動パターン (水平歪み) が予想されたことから、震源周辺の三角点 20 点及び機動観測点 6 点で GPS 測量を実施</li> <li>仙台市～牡鹿町、石巻市～志津川町間の水準測量 76.5km を緊急に実施</li> <li>緊急測量の結果は、電子基準点の観測から求めた震源断層モデルの改良に利用された</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>海溝型巨大地震であり、地殻変動のパターン (水平歪み) は電子基準点の観測によりある程度把握できること、また地殻変動を受けた範囲が極めて広く、季節も冬季に向かうことから、三角点の大規模な測量は断念。ただし機動観測点 6 点での緊急測量は実施</li> <li>襟裳半島西側の門別町～襟裳岬～釧路市、豊頃町～清水町、池田町間の水準測量 481km を緊急に実施</li> </ul>                            |
| 断層モデル計算<br>による地殻歪み   | 10 ppm 以上の歪みが狭い範囲に集中し、震源断層直上で 270ppm 程度に達している                                                                                                                                                                                   | 北海道の広い範囲で数 ppm に達するが、上限は日高山脈付近の 10ppm 程度 (ただし余効変動分は含まず)                                                                                                                                                                                                          |
| 公 共 測 量 へ の<br>影 響   | これだけの歪みがあると公共測量の実施は不可能                                                                                                                                                                                                          | 既知点とする基準点間の距離に (歪みに応じた) 上限を設ければ、作業規程の許容範囲を満たすことは可能                                                                                                                                                                                                               |
| 基 準 点 網<br>の 被 災 状 況 | 局所的に機能不全                                                                                                                                                                                                                        | 機能が低下し、利用者に不便を与えるが、何とか使える状態                                                                                                                                                                                                                                      |
| 対 応<br>( 三 角 点 )     | <ul style="list-style-type: none"> <li>歪みが大きな地域及びその周辺の全三角点 (125 点) について改測を実施</li> <li>これらの三角点については、測量成果の提供を一時停止し、改測が終了後、成果を改定した。ただし電子基準点 (矢本) の成果は、先行して改定された</li> </ul>                                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>余効変動が続いていること、歪みが大きいのは山岳地であること、冬季に大規模な測量作業はできないこと等から、三角点の測量成果は、当面現状のままとし、基準点体系の整合性を保つため、電子基準点も同様に扱うこととした</li> <li>被災した基準点網の復旧測量は、平成 16 年度に実施し、必要な成果の改定を行う予定</li> <li>公共基準点等の改算が円滑に行われるよう、成果改訂に伴う変換手法をあわせて提供する予定</li> </ul> |

## 8. まとめ

本稿では、平成 15 年十勝沖地震への対応として、測地部が総力を挙げて実施した、現地における総合的な測地測量の概要をまとめた。複雑な地殻変動の解明には、電子基準点における連続観測だけでなく、水準測量、三角点等における GPS 測量、VLBI 観測、絶対重力観測といった複数の測地測量手法を用いることが効果的である。また、地震によって被災した測地基準点体系を復旧するための維持管理計画をまとめた。地殻変動が著しく、地震や火山噴火が頻発する日本では、位置の基準を与え、地殻変動を監視する測地基準点体系の役割は極めて大きい。

## 参 考 文 献

地理地殻活動研究センター (2004) :

<http://www.gsi.go.jp/WNEW/PRESS-RELEASE/2003/0926-2.htm>.

地理調査所 (1956) : 十勝沖地震復旧測量報告, 測地学会誌, 第 2 巻, 第 3-4 号, 79-82.

平田直編 (2004) : 平成 15 年 (2003 年) 十勝沖地震に関する緊急調査研究報告書, 東京大学地震研究所.

国土地理院 (2003) : ダイナミックな測地基準点体系の

実現に向けてー変動する国土と人々を結ぶ位置情報の基盤ー, 国土地理院技術協議会基準点体系分科会 (Ⅲ) 報告書, p. 46.

大久保修平, 笠原稔 (2004) : 重力観測, 平成 15 年 (2003 年) 十勝沖地震に関する緊急調査研究報告書 (平田直編), 第 4.2.3 節, 東京大学地震研究所.

Ozawa, S., M. Kaidzu, M. Murakami, T. Imakiire, Y. Hatanaka (2004) : Coseismic and postseismic crustal deformation after the Mw 8 Tokachi-oki earthquake in Japan, *Earth Planets Space*, 56, 675-680.

測地観測センター・北海道地方測量部 (2004) : <http://www.gsi.go.jp/WNEW/PRESS-RELEASE/2003/0926.htm>.

豊田友夫, 杉原和久, 大滝三夫, 川本利一, 宮崎孝人 (2004) : 宮城県沖を震源とする地震及び宮城県北部を震源とする地震に対する測地部の取り組み, 国土地理院時報, No. 104, 93-100.

Tsuiji, H., Y. Hatanaka, T. Sagiya, and M. Hashimoto, 1995, Coseismic crustal deformation from the 1994 Hokkaido-Toho-Oki earthquake monitored by anationwide continuous GPS array in Japan, *Geophysical Research Letters*, Vol. 22, 1669-1672.