平成 16 年（2004 年）新潟県中越地震に伴う GEONET の緊急対応と地殻変動
Emergency Response of GEONET to the Mid Niigata Prefecture Earthquake in 2004 and Observed Crustal Deformation

測地観測センター
小島秀基・小清水 寛・米溪武次・根本盛行・岩田昭雄・湯通堂 亨・雨貝知美・矢萩智裕
Geodetic Observation Center
Hideki KOJIMA, Hiroshi KOSHIMIZU, Takeji KOMETANI, Moriyuki NEMOTO, Masao IWATA, Toru YUTSUDO, Tomomi AMAGAI and Toshihiro YAHAGI

地理地殻活動研究センター　今給黎哲郎
Geography and Crustal Dynamics Research Center　Tetsuro IMAKIIRE

測地部　岩田和美
Geodetic Department　Kazumi IWATA

要　旨

平成 16 年（2004 年）新潟県中越地震（Mj＝6.8）では地震発生直後に生じた停電のため，震源周辺に位置する電子基準点から観測データの供給が停止した．この事態に対処するため，国土地理院は現地緊急測量調査班を編成し，地震発生当日に職員を現地に派遣した．この結果，電子基準点に蓄積されていた観測データを速やかに回収することができ，回収された観測データにより地殻変動を検出することができた．また，上記の解析結果を含む GEONET 解を使用して地震断層モデルを推定することができた．このモデルは，地震観測から求められた震源メカニズム，余震分布から推定される断層の形状と調和的であった．

1.　はじめに

2004 年 10 月 23 日 17 時 56 分に発生した平成 16 年（2004 年）新潟県中越地震（以下「新潟県中越地震」と表記する）は，震源が浅かったために北魚沼郡川口町で最大震度７が観測された．また，本震に引き続いて強い余震が多数発生し，中越地方に大きな被害をもたらした．地震発生直後には震源周辺地域で停電が発生し，震源付近に設置されている電子基準点 10 点からの観測データの供給が停止した（図－１）．これらは震源に近いことから断層モデル決定等に重要なデータを提供すると考えられ，観測データの速やかな回収が求められた．このため国土地理院は，北陸地方測量部長を班長とする現地緊急測量調査班を編成し，地震発生当日に職員を現地へ派遣して観測データを回収する決定を行った．現地緊急測量調査班は班長の他に衛星測地課職員１名，機動観測課職員１名，委託職員（運転手）１名の計４名であった．また，地震発生翌日からは北陸地方測量部測量課からも３名の職員が現地緊急測量調査に加わった（第２章）．

図－１　地震発生直後に観測データの供給が停止した電子基準点の分布．

地震発生後，国土地理院は早急に震源周辺の地殻変動の結果を提供するために観測データの供給が停止している電子基準点を除いた Q2 解析（迅速解析）による結果を第一報として公表した．また，現地緊急測量調査班により回収されたデータは S2 解析（緊急解析）によって解析された（第３章，第４章）．解析によって判明した地殻変動結果は地震断層モデルの決定に役立てられた（第５章）．

２．現地緊急測量調査

２．１　地震発生直後から現地緊急測量調査までの対応

新潟県中越地震発生後，測地観測センターでは震源周辺の電子基準点から観測データが供給されているかどうか，通信確認による調査を行った．その結果，地震発生直後は10点の電子基準点と通信を行えないことが判明した．被災地において停電が起きているとの情報から，観測データの供給が停止した原因として停電による通信機器の停止が疑われた．電子基準点は停電時に観測機器が６時間以上稼動できる能力を持った直流無停電電源装置を備えている．これにより観測は途切れずに行われるが，通信装置については電源部の改造が行われていない場合，停電時は通信ができない状態となってしまう．中越地域は電源部改造を行っていなかったため，震源周辺の電子基準点から国土地理院GPS中央局まで観測データが来ない原因が，停電によるためだけなのか，あるいは通信線の物理的な遮断にもよるのか，判断することができなかった．このため現地調査が急務であるとし，電子基準点が以下の状況にある場合を想定して準備を行った．

１）停電による通信機器の停止
２）GPS中央局までの通信線の断線

この２つの状況を考えて，現地でのデータ回収作業について以下の手順を検討した．

１）通信機器へ電力の供給を確保する．
２）GPS 中央局までの一般回線による通信が可能か確認する．
３）一般回線による通信が可能な場合はGPS中央局よりリモート操作で観測データをダウンロードする．
４）一般回線による通信が不可能な場合は以下により，データを回収する．
　・観測装置が稼動している場合，受信機から PC 等により観測を停止させずに観測データを取得する．取得したデータは携帯電話によるメール通信で転送する．
　・観測装置が稼動していない場合，受信機内のメモリーカードを取り出してデータを取得する．データは携帯電話によるメール通信で転送する．
５）一般回線のみならず，携帯電話による通信が不可能な場合は，回収したデータを北陸地方測量部より転送する．

上記作業を行える器材を準備し，現地緊急測量調査班は被災地へ向かった．

２．２　現地緊急測量調査の概要

国土地理院本院からの現地緊急測量調査班は地震が発生した10月23日深夜に出発し，翌朝，北陸地方測量部からの調査班と北陸自動車道大潟 PA で合流した．停止していた電子基準点は，停電の復旧に合わせて次々と回復し，現地緊急測量調査班が被災地に到着したときには「小千谷」「新潟三島」「守門」の３点が停止していた．現地緊急測量調査班は３点のうち電子基準点「守門」が設置されている北魚沼郡守門村（現在は合併により魚沼市）の進入は道路事情により困難と判断し，震源に最も近い電子基準点「小千谷」，続いて「新潟三島」でのデータ回収及び現地調査を行った．

２．３　調査結果（小千谷）

電子基準点「小千谷」には10月24日11時頃に到着した．収納箱を開けたところ受信機は直流無停電電源装置により観測を続けていたが，通信装置は電力供給が止まっているために停止していた．このため，通信を回復する手段として，作業車のバッテリーによる直流電力をインバーターで交流に変換し，電子基準点各装置に電力を提供する方法を試みた（図－２）．電子基準点の各装置に電力が供給されていることを確認後，携帯電話により国土地理院 GPS 中央局と連絡をとった．GPS 中央局からリモート操作で受信機にアクセス出来ることが確認されたため，GPS 中央局より直接観測データのダウンロードを行った．

図－２　電子基準点「小千谷」における観測データの回収作業

電子基準点「小千谷」は平坦な中学校校庭に設置されている．現地調査では電子基準点周囲の地割れなど地面の異常は認められず，また電子基準点本体も外見上の問題は見られなかった．しかし，地震の規模が大きかったために電子基準点が傾斜した恐れがあり，水準測量による傾斜測定を行った．これは

電子基準点付近に設置された参照点を基準に，電子基準点の基礎コンクリート部に設置された付属金属標及び基礎コンクリート部の四隅に設置されている固定鋲との比高を測るものである．固定鋲はピラーの正面に向かって左隅の鋲から左回りに１～４番となっている．傾斜測定の結果を表－１に示す．前回測定値との差を見ると付属金属標及び各固定点についての値は 100mm 程度のオフセットが加わっているが値はほぼ同じであり，電子基準点が傾斜していないことが確認できた．なぜ 100mm 程度のオフセットが加わったのか，原因はははっきりしなかったが前回測定時と参照点の状況が変化した可能性が考えられた．

表－１　電子基準点「小千谷」における水準測量の結果

観測日	付属標	固定点1	固定点2	固定点3	固定点4
2000/11/25	−0.186	−0.206	−0.201	−0.199	−0.204
2004/10/24	−0.080	−0.102	−0.096	−0.094	−0.100
較　差	0.106	0.104	0.105	0.105	0.104

２．４　調査結果（新潟三島）

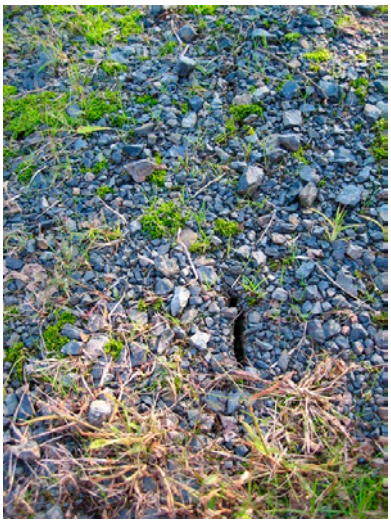
電子基準点「新潟三島」への到着は，24 日 15 時頃である．こちらも「小千谷」と同様に受信機は直流無停電電源装置により稼働していたが通信装置は停電のために停止していた．「新潟三島」においても電子基準点電源部へ作業車から電力供給を行った結果，本院 GPS 中央局までの通信回線が無事であったため，GPS 中央局からリモート操作によりデータをダウンロードすることに成功した（図－３）．

電子基準点「新潟三島」周辺は 10m ほど離れた東側が擁壁に覆われた崖となっている．また電子基準点東側の地面には小さな地割れも認められ（図－４），地震による電子基準点の傾斜が疑われた．水準測量による傾斜測定の結果を表－２に示す．前回の観測結果との差を見ると電子基準点ピラーから見てそれぞれ北西，南西に位置する固定点２，３の較差が大きく，電子基準点のアンテナ台座部分で約１cm 東側に変位していることが判明した．

表－２　電子基準点「新潟三島」における水準測量の結果

観測日	付属標	固定点1	固定点2	固定点3	固定点4
1999/11/25	0.169	0.157	0.158	0.159	0.160
2004/10/24	0.174	0.160	0.164	0.166	0.163
較　差	0.005	0.003	0.006	0.007	0.003

図－３　現地緊急調査時における電子基準点「新潟三島」周辺の様子．

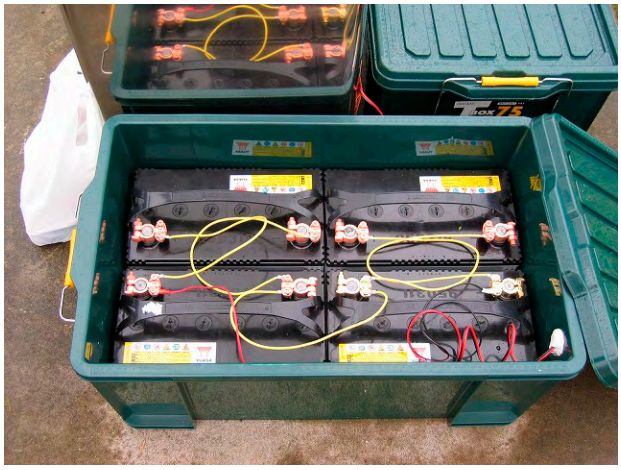


図－４　電子基準点「新潟三島」付近で見られた地割れの様子．

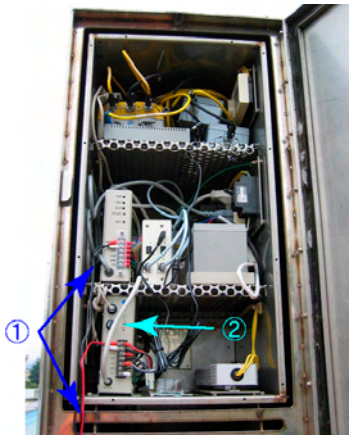
２．５　電子基準点「小千谷」における非常電源設置

被災地では現地緊急測量調査班が観測データの回収を行った 24 日以降も活発な余震活動が続いていた．これらの余震活動は規模が大きく，余震による地殻変動が検出される可能性があった．そのような状況の中で観測データの供給が停止していた電子基準点３点のうち，「新潟三島」及び「守門」は 26 日朝までには停電の解消により観測データの供給が復旧した．しかし，電子基準点「小千谷」周辺では停電の復旧の目処が立たず観測データ供給を再開できる見通しも立たなかった．このため，電子基準点「小千谷」には一時的に非常電源を設置して電力が回復するまでの期間を稼動させることとした．非常電源はカーバッテリーと直流無停電電源装置を使用し，観測データをリアルタイム（１Hz）に送信した状態で充電をせずに 10 日間以上維持できる仕様とした（図

－５，図－６）．また，商用電力が回復した場合には，受信機，通信機器等が商用電力によって稼動し，かつ非常電源も充電されるような構成にした．これにより再び停電が発生した場合はバッテリーからの電力供給を再開することが可能であった．



図－５　電子基準点「小千谷」に設置された非常電源装置のバッテリー部分．



図－６　通信装置用直流無停電電源装置②を追加した収納箱内の様子．①が外部バッテリーから観測装置，通信装置へ電力を供給する電源線．

３．GPS 中央局における対応

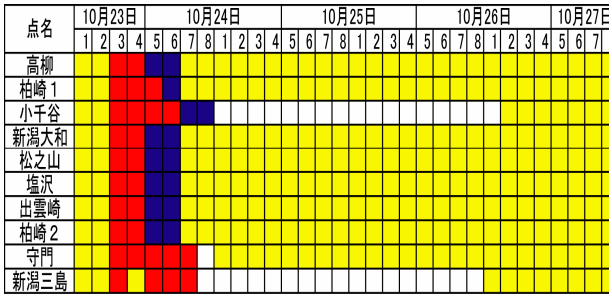
深夜，現地緊急測量調査班が被災地に向かっている間にも被災地では電力復旧作業が進められ，次々と停電地域が減少した（表－３）．GPS 中央局では電力が回復した地域の情報が入るたびに，電子基準点の通信確認を行った．24 日朝までには前述のとおり電子基準点「小千谷」，「守門」，「新潟三島」以外の電力供給が復旧したため，現地緊急測量調査班へはこの３点へ向かうように連絡を行った．

表－３　停止した電子基準点の復旧状況

点名	停止月日	時刻(JST)	復旧月日	時刻(JST)	停止時間(時間)
高柳	10 月 23 日	17:57	10 月 24 日	8:09	14.2
柏崎１	10 月 23 日	17:56	10 月 24 日	1:52	7.9
小千谷	10 月 23 日	17:57	10 月 26 日	11:33	65.6
新潟大和	10 月 23 日	17:57	10 月 24 日	6:42	12.8
松之山	10 月 23 日	17:57	10 月 24 日	6:02	12.1
塩沢	10 月 23 日	17:57	10 月 24 日	9:07	15.2
出雲崎	10 月 23 日	17:56	10 月 24 日	3:45	9.8
柏崎２	10 月 23 日	17:56	10 月 24 日	7:26	13.5
守門	10 月 23 日	17:56	10 月 24 日	12:19	18.4
新潟三島	10 月 23 日	17:56	10 月 26 日	9:07	63.2

26 日午前中までに全点が復旧した．

Q2 再解析は，停止している電子基準点の復旧目処が立たなかったため，停止している点すべての観測データのリカバリーが終わるまで行わない方針で作業を進めた．順次，観測データの供給が復旧した電子基準点については，S2 解析を使用して解析を行った．S2 解析とは，Q2 解析と同等の解析を行える解析戦略である．10 月 24 日にはその日の朝までに復旧した７点の電子基準点を含めて S2 解析を行い，10 月 24 日第５，６セッションの解析結果を得た．作業班による復旧で「小千谷」の観測データをリカバリーした後は，「小千谷」の解析結果を出すために，第７，８セッションの S2 解析を行って結果を得た．その後は，定常解析の Q2 解析で対応を行い，「守門」と「新潟三島」のデータリカバリーを終えてから，10 月 23 日第３，４セッション，10 月 24 日第５～８セッションの Q2 再解析を行った（図－７）．



図－７　地震発生から５日間の各セッション（１日は UTC で８セッションに分けられる）について Q2，S2 解析の解析状況を示す．黄色が Q2 解析，青色が S2 解析，赤色が Q2 再解析を表す．日付は JST．

４．GEONET による解析結果

測地観測センターでは，新潟県中越地震の本震，およびそれに引き続く大きめの余震の発生に伴い，

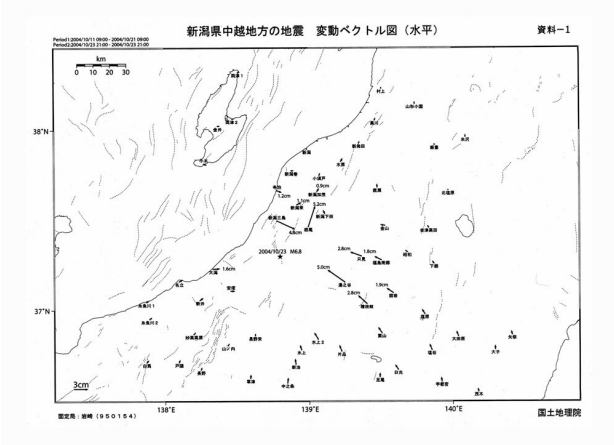
地殻変動を観測し，有意な地殻変動データを検出する毎に，速やかに記者発表資料として情報提供を行った（表－４）．

表－４　記者発表時に提供した資料の一覧

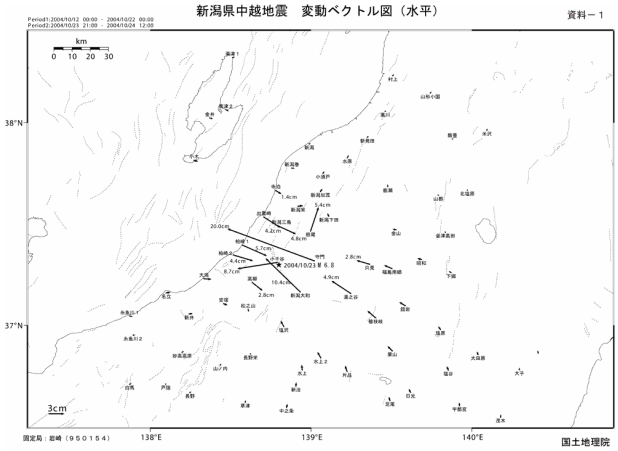
	提供日時	発生した地殻変動	提供資料
第１報	10/24 04:00	10/23 17:56 Mj6.8	基線変化/断層モデル
第２報	10/24 19:30	10/23 17:56 Mj6.8	基線変化/断層モデル
第３報	10/24 20:45	10/23 17:56 Mj6.8	基線変化/断層モデル
第４報	10/28 15:00	10/27 10:40 Mj6.8	基線変化
第５報	10/29 15:00	10/27 10:40 Mj6.1	断層モデル
第６報	11/08 22.15	11/08 11:16 Mj5.9	基線変化/断層モデル

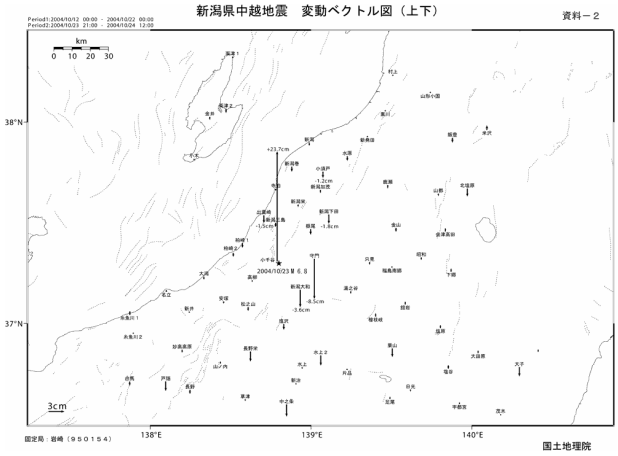
本震については観測データの復旧とともに提供情報が逐次更新された．

新潟県中越地震の本震に伴い，GEONETでは中越地方を中心に明瞭な地殻変動が観測された．17時56分に発生したMj=6.8の本震直後１時間以内に，18時03分(Mj=6.3)，同11分(Mj=6.0)，同34分(Mj=6.5)と大きめの余震が引き続き発生したため，これらの地震に伴う地殻変動を定常解析レベルで分離することは困難であった．このため，定常解析でもっとも短時間に解析結果を得ることの出来るQ2解析においてもこれらの変動を分離して見ることは出来なかった．地震発生後，一連の地震活動について震源の特性を把握するために，震源近傍の停止した電子基準点９点を除いた電子基準点の観測データを使用して解析を行った．ここで，停止した電子基準点10点のうち「新潟三島」に関しては，現地周辺に偶然宿泊していた保守業者によって地震後の観測データを回収することができた．その結果，電子基準点「栃尾」（栃尾市）が約５cm北北東方向へ，「湯之谷」（魚沼市）が約５cm北西方向へ移動しているなど，新潟県を中心に広い範囲で地殻変動が見られた（第１報，図－８）．その後，復旧された観測データを迅速に解析して，地殻変動量をより的確に把握するため，GEONETのS2解析解を用いて変動量監視を行った．その結果，「小千谷」（小千谷市）が約24cm隆起し，約９cm西南西方向へ，「守門」（魚沼市）が約９cm沈降し，約20cm北西方向へ，新潟大和観測点（南魚沼市）が約４cm沈降し，約10cm北西方向へ移動しているなど新潟県中越地方を中心に広い範囲で大きな地殻変動を認めた（第３報，図－９，10）．この結果は，GPS衛星軌道情報としてIGS最終解を用いたF2解析（最終解析）の結果と整合的であった．この結果，断層の形状をより精緻に推定するために十分なデータを取得することができた．その後，10月27日10時40分頃にMj=6.1の余震が，11月８日11時16分頃にMj=5.9の余震が発生した．ともに，地震の規模がM6ぎりぎりであったが，Q2解析の結果から震源域周辺の数点において有意な地殻変動を検出し，震源域の形状をある程度特定するための解析データを提供することが出来た（第４報・第６報）．

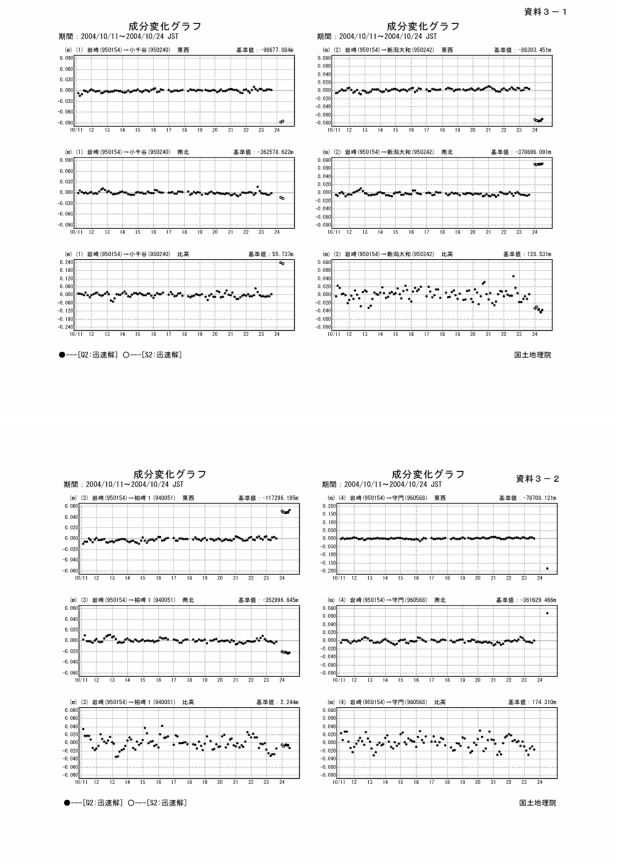


図－８　第１報資料１（水平変動ベクトル図）





図－９　第３報資料１，２（変動ベクトル図）

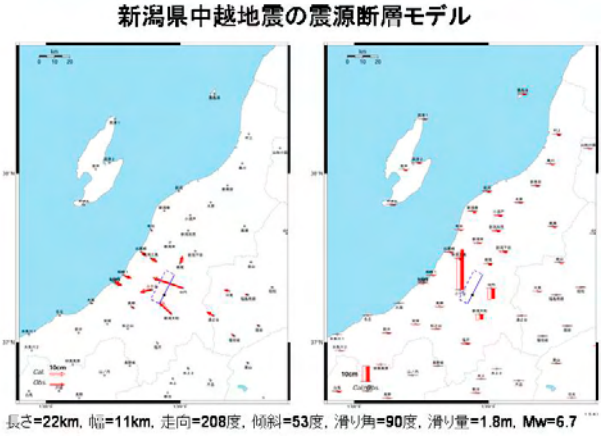


図－10　第３報資料３（成分変化グラフ）

５．地震断層モデルの決定と結果

GEONET 観測から得られた地殻変動パターンは，全体的に見て震源の西側では東向きのベクトルが，震源の東側では西向きのベクトルが見られることから，東西圧縮の逆断層が予想される．また，地震計の観測から得られた気象庁の初動解，防災科学技術研究所 F-net の CMT 解などの震源メカニズム解でも，北北東－南南西走向の逆断層のメカニズムが得られている．

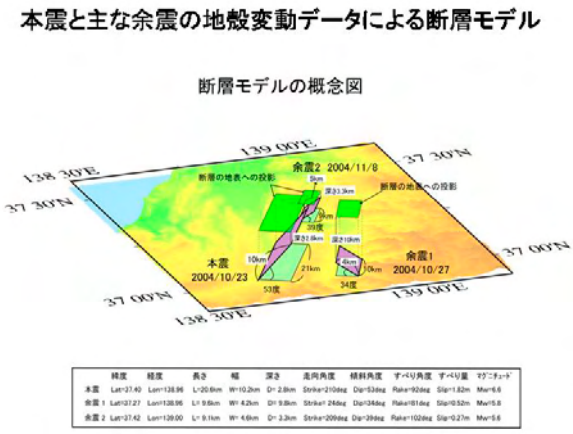
図－９に示した本震に伴う地殻変動量から，これに基づいて地震断層モデルの推定を行った．震源断層のパラメータ推定には，地表の変位から半無限弾性体を仮定したモデル（Okada，1985）に基づいたインバージョンプログラムを用いた．なお，図－９の地殻変動には，本震（17:56 発生,Mj=6.8）の他，直後の余震（18:03,Mj=6.3，18:11,Mj=6.0，18:34,Mj=6.5）等による変動も含まれていると考えられるが，分離が困難なため，１枚の断層でモデル化している．結果として得られたモデルは東西圧縮の逆断層で，北北西から南南東方向にのびる走向（方位角 208°）を持つものとなった．断層面の傾斜は高角（傾斜角 53°）で西側にむかって深くなり，滑りの向きは西側が東側に向かって乗り上げるほぼ純粋な逆断層（滑り角 90°），滑り量は約 1.8m と推定された（図－11）．上盤側に位置する小千谷観測点が西向きの変動であることが一見モデルと一致しないが，断層の傾斜が 53 度と高角であり隆起の中心近くに観測点があるために起きる現象である．



図－11　GEONET 観測結果から推定した断層モデル

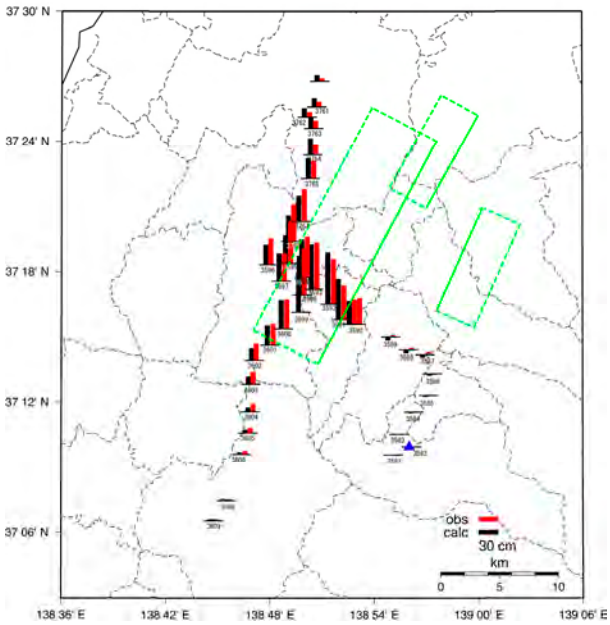
この地殻変動から求められた断層モデルは，地震観測から求められた震源メカニズム，余震分布から推定される断層の形状と調和的である．実際には，余震分布からは直後の大きな余震に対応する複数の断層面が存在することが推定されている．（京都大学防災研究所他,2005）

10 月 27 日(Mj=6.1)，11 月８日(Mj=5.9)の余震についても，GEONET の地殻変動観測結果からそれぞれ断層モデルを作成した．いずれも北北東－南南西走向の逆断層であるが，本震が西下がりの断層面であったのに対し,10 月 27 日の余震は東下がりの断層面で，共役関係にあたる形状であることが確認された．これらの断層の位置関係を３次元的に示した見取り図が図－12 である．



図－12　中越地震の本震および余震の断層モデル

地震後，震源域周辺では水準測量が実施され，水準路線沿いの上下変動がさらに詳細に確認された．この測量結果から計算された地震時の上下変動と，図－11 に示した断層モデルから計算される水準路線沿いの上下変動を比較すると，図－13 のように非常に良く一致する．



図－13　断層モデルから推定された上下変動と水準測量結果から得られた上下変動の比較

これは，東西圧縮の場において本震と多数の余震に関連した非常に複雑な断層系で解放した地殻歪みが，総合してみると一つの単純な断層で解放したものと同等であったことを意味している．すなわち，地殻変動からその地域の地殻の歪み集中と地震発生のプロセスを考える場合，いたずらに複雑なモデルを立てるのではなく，典型的な例について考えれば基本的な理解は得られるということを示している．

６．まとめ

電子基準点が，有線を使用して通信をしている限り，地震等により通信が遮断されることは予想されることである．新潟県中越地震の場合，電力の供給を行うことで通信を回復できたことは幸運であったと思われる．この通信の回復により観測データの回収を速やかに行うことができ，解析結果から地殻変動情報の提供や断層モデルの構築を迅速に行えたことは，国土地理院がその責務を果たせたことといえる．しかし，通信線が物理的に切断されていた場合，観測データの回収に時間がかかると思われるため，今回の経験を十分に生かし，今後の緊急時の対応に生かしていく必要がある．

７．謝　　辞

電子基準点の現地緊急測量調査を行うにあたって，北陸地方測量部関係者に大変お世話になりました．この場を借りてお礼申し上げます．

参 考 文 献

熊木洋太，大瀧　茂，山際敦史，畑中雄樹，宮崎清博，岩田昭雄，野神　憩，仲井博之，重松宏実，相田　清，田辺　正，雨宮秀雄（2004）：小特集　電子基準点 1,200 点の全国整備について，国土地理院時報，103，7-51.

京都大学防災研究所，九州大学大学院理学研究院地震火山観測研究センター（2004 年）：新潟県中越地震の余震分布，地震予知連絡会会報第 73 巻，332-340.