7-13 北陸・中部地方の地殻変動

Crustal Movements in the Hokuriku and Chubu District

国土地理院 Geographical Survey Institute

[2007年3月25日の平成19年(2007年)能登半島地震]

第1~8回は,2007年3月25日に発生した平成19年(2007年)能登半島地震に伴う地殻変動 等である.

[水準測量]

第1図は、輪島市験潮場から羽咋(はくい)市に至る能登半島西海岸沿いの水準路線の水準測量 結果である.最上段は、平成19年能登半島地震を挟む2001年夏に対する2007年6月の上下変動 で、震源に近い海岸の水準点で、断層運動に伴う隆起が明瞭である.震源の北東の海岸に位置す る輪島市門前町(もんぜんまち)大泊(おおどまり)付近の水準点では、9259で38.4cm、9260で 37.0cm、9261で41.1cmの隆起量となっている.輪島市の東側の短い路線では3cm程度の変動にと どまっている.

第2図は、輪島市から七尾市に至る能登半島を南北に縦断する水準路線と穴水町から能登町に至 る東西の水準路線の水準測量結果である.最上段は、平成19年能登半島地震を挟む上下変動であ るが、水準点固有の原因と思われる変動を除けば、3cm以内の変動にとどまっている.

[GPS]

第3図は,GEONET による平成19年能登半島地震前後における震源周辺の4基線の成分変化グラフである.この地震に伴う地殻変動が観測されている一方,プレスリップや顕著な余効変動は見られない.2007年7月16日に発生した平成19年(2007年)新潟県中越沖地震に伴う変動は見られない.

[震源断層モデル すべり分布 SAR・GPS]

第4図は、「だいち」PALSARの干渉画像とGPS 3 成分から推定した断層面上のすべり分布である. 走向(55°)と傾斜(63°)は、前回報告した矩形断層・一様すべりと同じ値を使用し、干渉 SAR(2007/02/23 - 2007/04/10のアセンディングと2006/12/23 - 2007/05/10のディセンディング) とGPSの観測結果に基づき、矩形断層の位置を推定. その上端深さ、走向、傾斜角を拘束し、矩形 断層を幅20km、長さ34.5kmに拡張した面上で詳細なすべり分布を推定した. 解を安定させるために、 上端のすべり量は0とした. 干渉画像のコヒーレンス(干渉性)が異なるが、インバージョンの際 には、アセンディングとディセンディングの重みは同一にした. すべり量の大きな場所は、震源付 近から南西方向の浅い方に伸びており、最大すべり量は約2.4mで、5月9日の地震調査委員会及 び5月14日の第173会地震予知連絡会で公表したもの(最大すべり量が3.5m)より小さめである.

[上下変動量の比較 水準測量・断層モデル]

第5回は,能登半島西海岸沿いの水準路線について,水準測量による上下変動観測値と震源断層 モデルから推定される上下変動量の比較を地図上に示し,西側から能登半島を見るように作図した ものである. 震源断層モデル作成には,水準測量結果は用いられていないにもかかわらず,震源断 層直上で見られる大きな隆起も含め,路線全体の変動が震源断層モデルで非常に良く説明されてい る. なお,図中,緑色の長方形で示した矩形断層モデルは,震源域を示すための目安であり,上下 変動量を計算した元の震源断層モデルは前ページのすべり分布を推定したものである.

[上下変動量の比較 水準測量・SAR・断層モデル]

第6図は、今回報告の水準路線全路線について、水準測量(青)・震源断層モデル(緑)・合成開 ロレーダー(赤)による上下変動量を比較したものである.合成開ロレーダー(SAR)については、 アセンディングとディセンディングの視線距離の変化から、ほぼ上下方向(厳密には南に8.4°傾 いた方向.上下の99%に相当)の変動量を計算した.最上段の9263で、SARが大きくずれている 原因は、解析上(Phase Unwrapping)の問題であると思われる.これを除けば、SARも含め全体的 に数 cm 以内で一致している.最上段と2段目の右の方で見られる3~4cm程度の系統的な SAR の ずれの原因は、SAR 解析特有の位相の flattening の不完全さであると考えられる.

なお、今回の上下変動の比較にあたっては、3つの観測値について、固定点などでオフセット をゼロにする操作を行っていないにもかかわらずオフセットがほとんど見られない。断層モデル と SAR の間は、(GPS-SAR 融合処理により) GPS 観測が取り持っていることが理由と考えられる.こ れら2つと、水準測量にオフセットがないことは、固定点基17の上下変動がGPSの固定局「福光」 観測点と同様にほとんどゼロであることを意味する.このことは、輪島験潮場及び最南端の9247 で上下変動が1mm 未満であることと整合する.

[GPS 高度地域基準点測量(繰り返し観測) 能登半島地震]

第7図は,能登半島のGPS繰り返し観測の結果である.右側の歪み図には,震源に近いところで, 2007年3月25日に発生した平成19年(2007年)能登半島地震に伴う東西方向の伸びと南北報告 の縮みが見られる.

[SAR 能登半島地震]

第8回は、「だいち」PALSARの干渉画像である.上段は地震を挟む期間のもの、下段は地震後の2007年5月10日~8月10日のものである.地震時には地滑りが多数見られたが、地震後には顕著な地滑りは見られない.

[2007年7月16日の平成19年(2007年)新潟県中越沖地震]

第9図からは、2007年7月16日に発生した平成19年(2007年)新潟県中越沖地震(M6.8,最 大震度6強)に伴う地殻変動・断層モデルに関する資料である.

[水準測量 新潟県中越沖地震]

第9~11図は、新潟県中越沖地震に関連した上下変動を示す水準測量結果である.

第9~10図は,観測時期が異なる水準測量を忠実に記述するため,若干見にくくなっているが, 丹念に見れば,地震前・地震時・地震後の変動を見ることができる.

第9図は,海岸沿いの路線で,柏崎験潮場近くの水準点3742を不動点として,上下変動を示している.4段目が地震時の上下変動で,観音岬の水準点4458で約29cmの隆起が見られる.1段目

の地震後の変動では、交点 交 3745 で約 2.5 cm の沈下が見られる. この交点は、5 段目に見られる ように、過去にも 3 cm 強の沈下を見せている. この交 3745 は、次の図の内陸側の路線との結合の 役割を担っているため、厳密な議論を行う際には、地震後の沈下約 2.5 cm も考慮する必要がある. 災害状況図を参照すると、4 段目の地震時の上下変動に見られる -20 cm を超える大きな沈降の原因 として、3744 は液状化現象(地下の液状化も含む)、4461(原子力発電所の東に隣接)は砂丘の流 動が候補として挙げられる.

第10回は、内陸側の路線で、交点 交3745を不動点として、上下変動を示している.2段目が 地震時(+地震後約2ヶ月間の)の上下変動で、長岡市の交点 交3761を基準にすると、西側での 沈降や、南側での隆起が見られる.西側の内、水準点3749は西山丘陵の隆起域西端に位置しており、 西山隆起の片鱗を見せている.一方、南側については、2004年10月23日に発生した新潟県中越 地震の余効変動による隆起と考えられる.因みに、中越沖地震時の上下変動は3段目に示してある.

第11 図は、地震時+前後の絶対的な上下変動を大まかに把握する目的で、観測時期の若干の違いを無視して、GPS と潮位データから上下変動が小さかったと推測される出雲崎の水準点4451 を不動点として、海岸線沿いと内陸側の路線を同時に表示した上下変動図である。観音岬の4458 で約25cmの隆起,交3745 で約12cmの沈降、長岡市の交3761 でほぼゼロ、小千谷町・川口町で約5cmの隆起が見られる。

仮に,交 3749 が,海側の路線の観測日 2007 年 7 月 28 日と内陸の路線の観測日 8 月 7 日の間に 局所的に 23mm 沈降したと仮定すると,第 11 図下段の図は,+23mm のオフセットが加わることになる.

[GPS 新潟県中越沖地震]

第 12 ~ 21 図は, GEONET による GPS 連続観測から求めた震源域周辺の地殻変動である. [GPS ベクトル図]

第12回は、平成19年(2007年)新潟県中越沖地震時の地殻変動ベクトル図で、上段に水平変 動ベクトル、下段に上下変動が示してある.固定局は、富山観測点とした.震源に一番近い出雲崎 観測点と柏崎2観測点では、電子基準点ピラーが地震時に傾斜(出雲崎 4.9cm、方位角 77°;柏 崎2 1.3cm、方位角 95°)したので、傾斜補正を施してある.水平変動は、柏崎市の海岸地域の 電子基準点「柏崎1」で北西方向へ約17cm、「柏崎2」で北北西方向へ約14cm、「P柏崎」(験潮場 のGPS連続観測点)で北北西へ約11cm、出雲崎町にある電子基準点「出雲崎」で北東へ約15cm で ある.上下変動としては、顕著な隆起はなく、柏崎2で最大の6cmの沈降を観測した.

[GPS ベクトル図 余効変動 新潟県中越沖地震]

第13回は,新潟県中越沖地震時の余効変動の有無を確認するための水平変動ベクトル図で,上 段が地震を挟む時期の変動,下段が地震後の変位速度を示す.出雲崎,柏崎1,柏崎2,P柏崎な どで,地震後の変動ベクトルが地震時の変動ベクトルに近い方向を向いていることから,余効変動 が観測されたと見られる.

[GPS 時系列 本震と余効変動 新潟県中越沖地震]

第14~17 図は,新潟県中越沖地震及びその余効変動を示す GPS 連続観測時系列である.地震時 に明瞭な飛びが見られる一方,明瞭なプレスリップは見えない. 柏崎1,出雲崎,新潟三島等で, 余効変動が見られ,減衰しながらも継続しているように見える. ただし,出雲崎観測点について は、GPS 大学連合から、地震後にも表層地盤の変形による変動が見られるとの報告(太田雄策他, 第108回測地学会,2007)もある.

[GPS 時系列 GPS 1 秒サンプリング 新潟県中越沖地震]

第18~21 図は,富山観測点を始点とした7本の基線の基線ベクトル3成分の1秒サンプリング GPS 解析による時系列グラフである.地震に伴う地殻変動の進行が見える.(2007年3月25日の平 成19年能登半島地震(M6.9)の際には,通信障害により,地震波到達後約10秒以降,データがと ぎれ,欠落したが,今回はデータの欠落は生じなかった.)第18 図上段楕円体高のグラフで,地震 直前に変動が見られるが,他の手法(RTD)による解析では,見られないことから,アンビグイティ 推定のエラーなどによると思われる.

[潮位 新潟県中越沖地震]

第22回は,国土地理院の6箇所の験潮場で観測された2007年7月16日の新潟県中越沖地震発 生時の潮位記録である.小木と柏崎で津波による最大0.3mの潮位変化が観測された.

第23 図は, 震源に近い3つの験潮場の潮位差である.最上段の鼠ヶ関(ねずがせき)に対する 柏崎のデータでは, データのばらつきが小さく, 柏崎に約4cmの沈降が見られる. 今後のデータを 見る必要はあるが, 第12 図のGPS上下成分では, 験潮場に隣接したP柏崎の上下変動量は約4cm であるので, 整合している.

[SAR Descending 中越沖地震]

第24 図は、「だいち」(ALOS) PALSAR データの干渉解析結果である.東南東上空の入射角約40°(高 度角(仰角)約50°)の人工衛星から地震前後の2007年1月16日と7月19日に撮影した合成開 ロレーダー画像を干渉処理し、衛星と地上を結ぶ視線方向の距離の変化を位相で表示したものであ る.画像の右上端に見える青の場所を基準にすると震源に至るまでに約3サイクル衛星に近づくセ ンスの位相変化が数えられるので、約35cmの地殻変動が観測された.

[SAR Ascending 中越沖地震 西山丘陵 小木ノ城背斜 地質断面図]

第25 図は、「だいち」合成開口レーダーによる Ascending 軌道の西側からの地殻変動観測結果 である.海岸線付近には、中越沖地震に伴う地殻変動を表す位相変化が見られているが、特筆す べき特徴として、西山丘陵西側斜面に帯状の隆起(幅約1.5km,長さ約15km,隆起量換算値の最 大約15cm)を示す位相変化が見られる.この隆起域は、小木ノ城(おぎのじょう)背斜の位置 と良く一致しており、活褶曲である小木ノ城背斜の成長を示すような隆起が観測されたことにな る.なお、小木ノ城背斜軸の図と地質断面図は、地質調査所地質図幅「柏崎」(使用承認番号 第 63500-A-20071002-002 号)を基に作成したものである.

第26回は,前ページのSAR干渉画像と水準測量による地震時上下変動を比較した図である.西 山丘陵を横切る路線の水準測量でも干渉画像で見られた隆起と整合的な結果が得られている.水準 点間隔は平均約2kmであり,地殻変動を捉えるのには有効であるが,幅が1.5km程度の局所的な褶 曲活動等を捉えるためには,点間隔が若干広すぎる.SARとの組合せ観測が重要な事例といえる.

第27 図は、中越沖地震以降の余効的な地殻変動を見るための SAR 干渉画像である.3cm 程度の 気象ノイズ(マイクロ波伝播媒質不均質の影響)が一部に見られるが、これを超える大きさの地殻 変動は見られない.ただし、上段の地震後3日後以降の干渉図では、西山丘陵西側斜面にわずかな 隆起と整合する位相変化も見られることから、活褶曲の地震後の成長が観測された可能性もある.

[震源断層モデル 新潟県中越沖地震]

第28~51 図に、断層面の位置と傾斜方向を変えた5種類の断層モデルを示す。断層モデル作成 には、地震に伴う地殻変動データ(GPSデータ、水準測量データ、SAR干渉画像)を用い、矩形断 層を仮定してインバージョンにより断層パラメータを推定した。なお、断層モデルの推定において、 1枚の矩形断層では観測された地殻変動を説明することは難しい。そのため、2枚以上の矩形断層 を用いて断層パラメータを推定した。

第28回は、5種類の震源断層モデルの比較表である.地殻変動のデータに関するフィッテイング、 震源分布との整合性の観点から各モデルを評価した.西山丘陵の隆起を含まない中越沖地震本震の 断層モデル(モデル1~4)を比較すると、地殻変動データを最も良く説明するのはモデル3であ り、モデル2、モデル1と続く.この4つのモデルの差はそれほど大きくなく、地殻変動データそ のものから断層面が北西傾斜なのか、南東傾斜なのかを決定することは難しい.ただし、干渉 SAR のAscending 軌道からと Descending 軌道からの両方の干渉画像から、観音岬周辺(震源域北東部) での地殻変動を説明するには、北西傾斜の方が良いと思われる.

東京大学地震研究所によって決定された震源分布と矩形断層の位置を比較すると、モデル1~4 においては、震源域北東部に見られる北西傾斜もしくは南東傾斜の余震分布に対応して矩形断層が 位置している. 震源域北東部を北西傾斜にしたモデル1,3の場合には、本震の震源位置付近を断 層面が通過するが、南東傾斜にしたモデル2,4の場合には、本震の震央が矩形断層の上端付近に 位置するため、深さにして約8kmの差がある.また、海底地震計を用いた余震観測によると、震 源域南西部では、余震分布が南東傾斜であることが有力となっている.そのため、震源分布との対 応は、モデル3の方がモデル1,2,4より良いと考えられる.以上、総合的に考えると、震源断層 モデルとしては、モデル3が有力である.

また,西山丘陵の隆起を含めた断層モデル(モデル3a)では,AIC(Akaike's information criterion)を用いてパラメータ数の増加を考慮しても、本震の断層モデルに対して残差が小さくなるという結果が得られている.

[震源断層モデル1 北西傾斜]

第29~32図は,第1の断層モデルで,北西傾斜の2枚の矩形断層を仮定した.断層パラメータのうち,長さ,幅,走向は比較的強く拘束してパラメータを推定した.

第 29 図に GPS との比較,第 30 図に Descending 軌道からの SAR 干渉画像との比較,第 31 図に Ascending 軌道からの SAR 干渉画像との比較を示した.

第32回は、観測値から計算値を差し引いた SAR 干渉画像の残差である.

[震源断層モデル2 南東傾斜]

第33~36図は,第2の断層モデルで,南東傾斜の2枚の矩形断層を仮定した.断層パラメータのうち,長さ,幅,走向は比較的強く拘束してパラメータを推定した.

第 33 図に GPS との比較,第 34 図に Descending 軌道からの SAR 干渉画像との比較,第 35 図に Ascending 軌道からの SAR 干渉画像との比較を示した.

第36図は、観測値から計算値を差し引いたSAR干渉画像の残差である.

[震源断層モデル3 北西+南東傾斜]

第37~42図は,第3の断層モデルで,震源域北東部を北西傾斜,震源域南西部を南東傾斜とした。 たものである。断層パラメータのうち,長さ,幅,走向は比較的強く拘束してパラメータを推定した。

第 37 図に GPS との比較,第 38 図に Descending 軌道からの SAR 干渉画像との比較,第 39 図に Ascending 軌道からの SAR 干渉画像との比較を示した.

第40回は, 観測値から計算値を差し引いた SAR 干渉画像の残差である. 震源域に近い観音岬付近のプロファイル B-B'の左端で,他のモデルと比べて残差が小さくなっているのが特徴である.

第41 図は、余震分布との比較を行った結果である.北側の断層②が、本震の震源近くを通る.

第42図は,推定された矩形断層の概念図である.

現時点では、このモデル3が、地殻変動データ及び余震分布との整合性から、国土地理院では有 力と考えている.南の断層①の断層パラメータは、上端深さ2.3km、長さ約10.0km、幅約9.7km、 走向が40°、傾斜角が28°、滑り角が89°、滑り量が約1.64mである.北の断層②の断層パラメー タは、上端深さ5.3km、長さ約7.7km、幅約10.3km、走向が220°、傾斜角が33°、滑り角が124°、 滑り量が約2.72mである.ただし、地殻変動だけからは、最良のモデルの判断ができないことから、 震源分布が変更された場合には、震源断層モデルの再検討が必要となる.

[震源断層モデル4 余震域に位置を合わせたモデル]

第43~46回は,第4の断層モデルで,震源域北東部を南東傾斜,震源域南西部を北西傾斜としたものである.断層パラメータのうち,長さ,幅,走向は比較的強く拘束してパラメータを推定した.

第43回にGPSとの比較,第44回にDescending 軌道からのSAR干渉画像との比較,第45回にAscending 軌道からのSAR干渉画像との比較を示した.

第46回は、観測値から計算値を差し引いたSAR干渉画像の残差である.

[震源断層モデル3a モデル3+デタッチメント・ランプ・バックスラスト]

第47~51 図は、中越沖地震の本震に加えて、西山丘陵の隆起を含めて断層運動で説明したモデル(モデル3a)である.中越沖地震の本震の断層モデルとして、モデル3と同じ断層傾斜方向を用い、 北西傾斜の断層面から低角化したデタッチメント断層が西山丘陵の隆起域直下まで伸び、隆起域の 両端にV字状の高角な断層(ランプとバックスラスト)を仮定して、滑り量以外の各パラメータを 強く拘束してパラメータを推定した.

第47 図に GPS との比較,第48 図に Descending 軌道からの SAR 干渉画像との比較,第49 図に Ascending 軌道からの SAR 干渉画像との比較,第50 図に観測値から計算値を差し引いた SAR 干渉 画像の残差を示した.

第51 図は,余震分布との比較を行った結果である.(第175 回連絡会の際に,東京大学地震研究 所から,「第51 図の余震分布は,最新のものとかなり違うので,なかったものとしてほしい.」と の発言があった.その後,大きく変更になった震源分布とできるだけ整合する震源断層モデルを 2007 年12 月に作成した.) [2.5 次元 SAR による震源断層モデル 新潟県中越沖地震]

第52 図は、南行(Descending)軌道の東南東からの SAR 観測と北行(Ascending)軌道の西南西 からの SAR 観測の2方向からの観測値の組合せ解析(2.5 次元解析)による結果である.これによ ると、北側断層面が北西傾斜の断層モデル3が観測値を良く説明できる.また、小木ノ城背斜の隆 起を断層面で説明するモデルの1つとして、デタッチメント、ランプ、バックスラストからなるモ デル3 a を示した.

[媒質の構造を変えた場合の地殻変動計算値比較]

第53回は,媒質の構造を変えた場合にどのくらい地殻変動が変わってくるか計算したものである.表層付近の弾性係数(弾性波速度)が小さい場合,半無限媒質を仮定した場合と比較して地表での地殻変動が大きくなる.また上下変動より水平変動の方が媒質による影響が大きい.しかし,地殻変動の基本的なパターンは変化しない.また,堆積層では通常S波速度が遅いことを考慮し, 第1層のS波速度を1.27km/sや0.88km/sに変えてみても,その影響は小さい.

第54 図は、媒質の構造を変えた場合にどのくらい干渉画像の視線方向変動量が変わってくるが 計算したものである. 北側のより深い断層の方が影響が大きく、南側はあまり影響しない. これ は、深い断層ではそれより浅部にある弾性係数の小さな媒質による影響を受けて変動量が大きくな るが、浅部の弾性係数の小さな媒質内に断層がある場合は、地表から断層までの媒質があまり変化 せず、均質媒質の場合に近くなるからである. なお、半無限媒質と成層構造の地殻変動の計算値を 比較すると、成層構造媒質の方が変動量が大きいが、(4)のように成層構造媒質の場合の断層位置 を 1.5km 深くするとおおむね、同じ程度の変動量となる.

以上のように媒質の地殻変動への影響は限定的であるが、震源断層モデルの推定において半無限 媒質を仮定したことにより、実際の震源断層位置より浅めに推定されている可能性があるが、その 量はたかだか1~2km程度である.

[空中写真撮影範囲]

第55回上段は,平成19年新潟県中越沖地震に伴う被災状況の把握と復興を支援するため、国土 地理院が7月19日に緊急撮影を実施した1/10,000空中写真の撮影範囲である.下段は,被害が集 中した柏崎市中心部について,空中写真に2万5千分1地形図の情報を重ねて作成した正射写真図 4面の一部である.空中写真と正射写真図はホームページで公開し,また正射写真図は印刷して関 係機関に提供した.

[災害対策用図]

第56図aは,地震発生後直ちに,震度6弱以上となった主な地域を範囲として,2万5千1地 形図のデータから緊急に作製した3万分1災害対策用図7面の範囲で,第56図bはそのサンプル である.この図は7月16日に印刷され,翌日に現地を含む関係機関に直接搬入された.

[災害状況図]

第57図は、国土地理院が、空中写真判読と緊急現地調査に基づき作成した災害状況図である. 建物の倒壊などの被害は、柏崎市街地の立地する砂丘の末端に多く見られる.この図は国土地理院 のホームページ(http://www1.gsi.go.jp/geowww/saigaikiroku/0707-chuetsuoki/index.html)か

[海成段丘にみる長期的地殻変動 新潟県中越沖地震]

第58回に,酸素同位体ステージ5e(下末吉相当=約13万年前)の海成段丘の分布及び海岸に沿った旧汀線高度分布を示した.併せて,今回水準測量で検出された地殻変動を示した(異常な沈下を示した点を除く).旧汀線高度は、長期的には、柏崎市街地付近も観音岬付近と同程度に隆起していることを示し、柏崎付近で沈降し、観音岬付近で大きな隆起を示した今回の地殻変動とは整合しない.従って、今回の地殻変動パターンだけで長期的な地殻変動を説明することはできない.長期的な地殻変動だけから見ると、今回の地震とは別に、上越市柿崎付近に大きな隆起をもち、柏崎付近も隆起させるような、今回と相補的な地殻変動を引き起こすメカニズムが存在していることを示唆している.

[中越地震以降の地殻変動]

第59 図は、2004 年新潟県中越地震から 2007 年能登半島地震までの新潟県周辺の非定常地殻変 動を示すベクトル図である.1998 年 4 月から 2004 年 10 月(中越地震発生以前)を定常的な期間 としてトレンド、年周、半年周を除いて、2004 年 10 月(中越地震発生以降)から 2007 年 3 月ま での水平変位をベクトル表示した.中越地方には、最大 3cm に及ぶ非定常地殻変動が見られ、中越 地震の余効変動と考えられる.また、下越地方では 2005 年の宮城県沖地震の地震時及び余効変動 が見られる.第60 図は、トレンド成分等を除去した基線長変化の時系列である.ここに示した基 線は、第174 回連絡会で統計数理研究所の尾形委員より中越地震以降に変化があると指摘されたも のである.宮城県沖地震の地震時及び余効変動がほぼ全ての基線で見られる.また、新潟巻に関す る基線では、観測点保守に伴う飛びやトレンド変化があるが、この地域の広域の変動を表すように は見えない.すなわち、この地域の非定常地殻変動は、中越地震の余効変動、宮城県沖地震の地震 時・地震後変動、観測点固有の変動で説明できる.よって、地殻変動データを説明するという観点 では、中越沖地震の前駆滑りを必要としないと考えられる.

第61 図は、中越地震の余効変動に関する余効滑り断層モデルを推定したものである. 第10 図に示した水準測量データから、2004 年中越地震の震源域で地震後に隆起したことが明らか になったため、GPS のデータを含めて、矩形断層での滑りを仮定してパラメータの推定を行なった. Model-A は、1 枚の矩形断層を仮定したもので、Model-B は、2 枚の矩形断層を本震断層の南部延 長と浅部延長付近に仮定して、パラメータを推定したものである. どちらのモデルでも、本震と比 較して南側に余効滑りが広がったという特徴があり、おおむね観測値を説明している.

[GPS 時系列 中越沖地震以降の地殻変動 中越・中越沖地震の連動性]

第62~63 図は、中越地震と中越沖地震の連動性を地殻変動で確認するための、新潟県中越沖地 震の震源域の南側及び北側でのGPS 連続観測時系列である.2000年1月から2003年1月を定常的 な期間としてトレンド、年周、半年周を除いたグラフとしている。第62 図 a 左に基線配置を示し た南側の長野地区では、第62b~63 図に長野に関連する基線において2005年4月にステップ状の 変化、2005年12月に異常なばらつきが表れている。前者は、2005年4月23 に発生した長野県北 部の地震(M4.1)に伴う観測点周囲の局所的な変動、後者は電波状況(マルチパス)の変化や受信 機の異常が疑われる。また、名立(なだち)に関連する基線においても2007年6月頃からトレン ドの変化が見られている.この変化は、年周変化の除去方法や観測点周囲の植生の影響を確かめる 必要がある.

第62図a右に基線配置を示した北側の新潟北部地区では,第64~65図に中越地震や2005年宮 城県沖の地震に伴う地震時及び余効変動が見られているが,それ以外に特筆すべき変動は見られな い.以上のように,中越地震,中越沖地震,長野県北部の地震,宮城県沖の地震,観測局固有の問 題を考慮すると,中越・中越沖地震の連動性を示唆するような顕著な変動は見られない.しかし, 連動性の有無については,さらに検討が必要である.第62図の(1),(3),(5)等で,2007年10 月頃から基線の短縮が見られるが,もう少し様子を見る必要がある.

参考文献

1)	国土地理院,	2004,	中部・近畿地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 72, 510-514.
2)	国土地理院,	2005,	北陸地方の地殻変動,地震予知連絡会会報,73,269-317.
3)	国土地理院,	2005,	中部・近畿地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 73, 426-463.
4)	国土地理院,	2005,	北陸地方の地殻変動,地震予知連絡会会報,74,331-345.
5)	国土地理院,	2005,	中部・近畿地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 74, 365-380.
6)	国土地理院,	2006,	北陸地方の地殻変動,地震予知連絡会会報,75,443-450.
7)	国土地理院,	2006,	長岡における絶対重力測定, 地震予知連絡会会報, 75, 451-452.
8)	国土地理院,	2006,	北陸・中部地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 76, 446-463.
9)	国土地理院,	2006,	北陸・中部地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 78, 424-456.

.

輪島市~羽咋市の上下変動



Fig.1 Results of leveling survey from Wajima city to Hakui city.

輪島市~七尾市、穴水町~能登町間の上下変動



第2図 輪島市~七尾市、穴水町~能登町間の上下変動

Fig.2 Results of leveling survey from Wajima city to Nanao city and from Anamizu town to Noto town.

平成19年(2007年)能登半島地震に伴う地殻変動





第3図 能登半島における GPS 連続測定結果

05/01 16 06/01 16 07/01 16 08/01※「能登島」の傾斜による

変位は補正しています。

● ----[F2:最終解] O ----[R2:速報解]

Fig.3 Results of continuous GPS measurements in Noto Peninsula

震源断層面上の推定すべり分布

干渉SAR(2007/2/23-2007/4/10のアセンディングと2006/12/23-2007/5/10のディセンディング)と GPSの観測結果に基づき、矩形断層の位置を推定。

その上端深さ、走向、傾斜角を拘束し、矩形断層を上端深さ 0km、幅25km、長さ61kmに拡張した 面上で詳細なすべり分布を推定した。上端すべり量は0に拘束した。



第4図 「だいち」PALSARの干渉画像とGPS 3成分から推定した断層面上のすべり分布

Fig.4 Estimated slip distribution on the earthquake source fault from the SAR interferogram (Ascending + Descending) and GPS results



第5図 水準測量による上下変動観測値と断層モデルから推定される上下変動量の比較 Fig.5 Comparison of vertical components between leveling and calculation from the source fault model.



水準測量結果・SAR・震源断層モデル計算値の比較

第6図 水準測量結果・SAR・震源断層モデル計算値の比較 Fig.6 Comparisons of vertical components of deformation between leveling, InSAR and calculation from the earthquake source fault model.

平成19年度 精密測地網高度地域基準点測量 能登地区

今回観測:2007年 5月 前回観測:1998年10月



第7図 能登地区における平成19年度精密測地網高度地域基準点測量による歪

Fig.7 Crustal horizontal strain in Noto peninsula calculated from geodetic survey results.



「だいち」SAR干渉画像にみる能登半島地震後の地表変動

地震後(2007/5/10-8/10)のSAR干渉画像。地震後の顕著な変動は見られない。

第8図 「だいち」SAR干渉画像にみる能登半島地震後の地表変動 Fig.8 Surface deformation observed by Daichi InSAR after the Noto Hanto Earthquake.



Fig.9 Results of leveling survey from Joetsu city to Tsubame city.



柏崎市~川口町、小千谷間の上下変動

第10図 柏崎市~川口町、小千谷市間の上下変動

Fig.10 Results of leveling survey from Kashiwazaki city to Ojiya city and Kawaguchi town.



※ 白ヌキは改埋点を示す。2007.7~10使用成果は現地概算値による。

第11図 新潟県中越沖地震に伴う柏崎周辺の上下変動のまとめ

Fig.11 Summary of leveling survey around Kashiwazaki city associated with the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007.



第12図 a 平成 19 年(2007 年)新潟県中越沖地震に伴う地殻変動(水平,最終解) Fig.12a Crustal deformation associated with the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007 (horizontal, F 2)



第12図b 平成19年(2007年)新潟県中越沖地震に伴う地殻変動(上下) Fig.12b Crustal deformation associated with the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007 (vertical, F 2)





平成19年(2007年)新潟県中越沖地震に伴う地殻変動



第14図 平成19年(2007年)新潟県中越沖地震における GPS 連続測定結果 Fig.14 Results of continuous GPS measurements in Niigataken Chuetsu-oki (3 components) (1/4).





16 11/01

16 11/01

16

بلام وبعرون

08/01

16 09/01 16 10/01

07/01

16

● ----[F2:最終解] O ----[R2:速報解]

04/01 07/01 10/01 ' 06/01/0104/01 07/01

10/01'07/01/0104/01

07/01 10/0

-0. 030

-0.060

-0.090

-0. 120

01/01

第15図 平成19年(2007年)新潟県中越沖地震における GPS 連続測定結果 Fig.15 Results of continuous GPS measurements in Niigataken Chuetsu-oki (3 components) (2/4).

-0.030

-0.060

-0.090

-0. 120

16 06/01 16



● ----[F2:最終解] O ----[R2:速報解]

第16図 平成19年(2007年)新潟県中越沖地震における GPS 連続測定結果 Fig.16 Results of continuous GPS measurements in Niigataken Chuetsu-oki (3 components) (3/4).



● ---[F2:最終解] O ---[R2:速報解]

第17図 平成19年(2007年)新潟県中越沖地震における GPS 連続測定結果 Fig.17 Results of continuous GPS measurements in Niigataken Chuetsu-oki (3 components) (4/4).

比高

08/01

16

16 10/01

09/01

基準値:60.572m

11/01

平成19年(2007年)新潟県中越沖地震に伴う地殻変動(1秒サンプリング解析)(1)

第18図 1秒サンプリング GPS 解析による平成 19年(2007年)新潟県中越沖地震に伴う座標変化 Fig.18 Displacements of the 2007 Noto Hanto Earthquake measured by one Hz sampling GPS (1/4).

座標変化グラン	フ
---------	---

O---[RTNET4]

第19図 1秒サンプリング GPS 解析による平成 19年(2007年)新潟県中越沖地震に伴う座標変化 Fig.19 Displacements of the 2007 Noto Hanto Earthquake measured by one Hz sampling GPS (2/4).

座標変化グラフ

第 20 図 1 秒サンプリング GPS 解析による平成 19 年(2007 年)新潟県中越沖地震に伴う座標変化 Fig.20 Displacements of the 2007 Noto Hanto Earthquake measured by one Hz sampling GPS (3/4).

平成19年(2007年)新潟県中越沖地震に伴う地殻変動(1秒サンプリング解析)(4)

座標変化グラフ

平成19年(2007年)新潟県中越沖地震に伴う潮位データ

第 22 図 平成 19 年(2007 年)新潟県中越沖地震に伴う潮位データ Fig.22 Tide level records at GSI's tidal stations associated with the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007.

第23図 平成19年(2007年)新潟県中越沖地震前後の潮位差(日平均値)

Fig.23 The difference of daily mean tide level between tidal stations before and after the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007.

「だいち」による SAR 干渉画像

(Descending34. 3° 2007/1/16-7/19) 37'40' 0cm 震央 $\overrightarrow{\Delta}$ -10cm -20cm 37°30' +10cm 37°20' 0cm 138'30' 138°40' 138°50' Analysis by GSI from ALOS raw data (c)METI, JAXA

第24図 平成19年新潟県中越沖地震合成開口レーダー干渉図(だいち, Descending) Fig.24 Synthetic Aperture Radar (SAR) interferogram of the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007. (Descending)

「だいち」合成開口レーダーによる地殻変動分布図

第25図 a 平成 19 年新潟県中越沖地震合成開口レーダー干渉図(だいち, Aescending) Fig.25a Synthetic Aperture Radar (SAR) interferogram of the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007. (Ascending)

西山丘陵西側斜面の帯状の隆起の概念図

Fig.25b Schematic diagram of uplift of narrow strip, Oginojou anticline, which is located on west side of Nishiyama hill.

第25図b 西山丘陵西側斜面の帯状の隆起の概念図

西山丘陵を横切る路線の水準測量結果

水準測量観測路線

第26図 西山丘陵を横切る路線の水準測量結果

Fig.26 Vertical crustal movement by precise leveling survey across the Nishiyama hill.

SAR干渉解析による新潟県中越沖地震以降の地殻変動

第27図 SAR干渉解析による新潟県中越沖地震以降の地殻変動

Fig.27 SAR interferograms which show surface deformation after the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007.

地殻変動データに基づく新潟県中越沖地震の震源断層モデル比較(Ver.2b)

震源断層モデル	地殻変動データとの 整合性	震源分布(地震研)との整合性 (注)	その他	総合評価
モデル1 (北西傾斜) 矩形断層2枚を仮定.	χ ² =1,401 AIC=10,621 柏崎の沈降量が(水 準とGPS)観測値より 小さい.	▲ ~ ○ 震源域北東部では、矩形断層が 北西傾斜の余震分布に対応し、 本震の震源付近を通過する. 震源域南西部では、余震よりかなり浅い.	震源域北東部 と南西部で断 層の深さや傾 斜角にオフセ ットがある.	\bigtriangleup
モデル2(南東傾斜) 矩形断層2枚を仮定.	χ ² =1,311 AIC=10,585 観音岬周辺でのSAR データが系統的に説 明できない.(m2-4 Profile B-B'参照)	▲ 震源域北東部では、矩形断層が 南東傾斜の余震分布に一部対応 しているが、本震の震源とは離 れる.震源域南西部では、傾斜 は整合的だが、深さが浅い.	震源域北東部 と南西深さや傾 斜角にオフセ ットがある.	\bigtriangleup
モデル3(北西+南東 傾斜) 震源域北東部で北西 傾斜,震源域南西部で 南東傾斜の矩形断層 を仮定.	$\bigcirc \\ \chi^{2}=1, 216 \\ \text{AIC}=10, 461 \\ \end{alignedat}$	▲ ~ ○ 震源域北東部では、矩形断層が 北西傾斜の余震分布に対応し、 本震の震源付近を通過する. 震源域南西部では、傾斜は整合 的だが、深さが浅い.		0
モデル4(南東+北西 傾斜) 震源域北東部で南東 傾斜,震源域南西部で 北西傾斜の矩形断層 を仮定.	χ ² =1,465 AIC=10,735 観音岬周辺での SAR データが系統的に説 明できない.(m4-4 Profile B-B'参照)	△ 震源域北東部では,矩形断層が 南東傾斜の余震分布に一部対応 しているが,本震の震源とは離 れる.震源域南西部では,余震 よりかなり浅い.		\bigtriangleup

(注)弾性定数の小さな堆積層の影響で,地殻変動から推定された断層モデルの深さは,数km実際より浅く 推定されている可能性が高い.余震分布との比較については,このような可能性を考慮している.

西山丘陵の隆起を含めた断層モデル

 モデル3a(モデル3 +デタッチメント・ランプ・バックスラスト) モデル3の震源断層に加えて、震源域北部から西山丘陵西部に至るほぼ水平の断層(デタッチメント)を置き、水平の断層の東端から高角で V 字型の2つの断層(ランプ+バックスラスト)を仮定.(計5)断層) 	Ο χ ² =921 AIC=10, 205	▲ ~ ○ 震源域についてはモデル 3 と同じ、デタッチメントやランプ、バックスラストに相当する浅部においては、地震活動はほとんど見られない。	平田・佐藤・酒 井・加藤(2007) による長岡平 野の関連指 で 部 整 合 す る.	● 「良す観一く条え」の人の人の人の人の人の人の人の人の人の人の人の人の人の人の人の人の人の人の人
---	---	---	---	---

第28図 地殻変動データに基づく新潟県中越沖地震の震源断層モデル比較表(Ver.2b)

Fig.28 Comparison of earthquake source fault models of the Chuetsu-oki Earthquake. (Ver. 2b)


m1-1

第29図 中越沖地震 北西傾斜震源断層モデルと地殻変動(電子基準点観測との比較)

Fig.29 Comparisons of horizontal and vertical components between GPS observation and the model calculation. (NW dipping faults)



第 30 図 中越沖地震 北西傾斜震源断層モデルと SAR 干渉画像 (Descending) Fig.30 Comparison of SAR interferogram between Daichi observation and the model calculation. (NW dipping faults) (Descending)



第31図 中越沖地震 北西傾斜震源断層モデルと InSAR 画像 (Ascending) Fig.31 Comparison of SAR interferogram between Daichi observation and the model calculation. (NW dipping faults) (Ascending)



第 32 図 中越沖地震 北西傾斜震源断層モデルと InSAR 画像(残差) Fig.32 Residual interferograms (observation - calculation). (NW dipping faults)

モデル2:南東傾斜



m2-1

第33図 中越沖地震 南東傾斜震源断層モデルと地殻変動(電子基準点観測との比較)

Fig.33 Comparisons of horizontal and vertical components between GPS observation and the model calculation. (SE dipping faults)



第 34 図 中越沖地震 南東傾斜震源断層モデルと InSAR 画像(Descending) Fig.34 Comparison of SAR interferogram between Daichi observation and the model calculation. (SE dipping faults) (Descending)



第 35 図 中越沖地震 南東傾斜震源断層モデルと InSAR 画像 (Ascending) Fig.35 Comparison of SAR interferogram between Daichi observation and the model calculation. (SE dipping faults) (Ascending)



第 36 図 中越沖地震 南東傾斜震源断層モデルと InSAR 画像(残差) Fig.36 Residual interferograms (observation - calculation). (SE dipping faults)

モデル3:北西+南東傾斜



m3-1

第37図 中越沖地震 北西+南東傾斜震源断層モデルと地殻変動(電子基準点観測との比較)

Fig.37 Comparisons of horizontal and vertical components between GPS observation and the model calculation. (NW+SE dipping faults)



第38図 中越沖地震 北西+南東傾斜震源断層モデルと InSAR 画像 (Descending) Fig.38 Comparison of SAR interferogram between Daichi observation and the model calculation. (NW+SE dipping faults) (Descending)



モデル3:北西+南東傾斜 平成19年新潟県中越沖地震 北西+南東傾斜震源断層モデルとInSAR画像(Ascending)

第 39 図 中越沖地震 北西+南東傾斜震源断層モデルと InSAR 画像 (Ascending) Fig.39 Comparison of SAR interferogram between Daichi observation and the model calculation. (NW+SE dipping faults) (Ascending)



第40図 中越沖地震 北西+南東傾斜震源断層モデルと InSAR 画像(残差) Fig.40 Residual interferograms (observation - calculation). (NW+SE dipping faults)

平成19年新潟県中越沖地震 北西+南東傾斜震源断層モデルと地震分布の位置関係



水平分布図

m3-5

第41図 中越沖地震 北西+南東傾斜震源断層モデルと地震分布の位置関係 Fig.41 Locations of model faults and hypocenter of aftershocks. (NW+SE dipping faults) 平成19年新潟県中越沖地震 震源断層モデルの概念図



断層パラメータ

① 37.410 ° 138.430 ° 2.3km 10.0km 9.7km 40 ° 28 ° 89		
	1.64m	6.39
② 37.505 ° 138.608° 5.3km 7.7km 10.3km 220° 33° 124	2.72m	6.47

Total Mw 6.63

第42図 中越沖地震 北西+南東傾斜震源断層モデルの概念図

Fig.42 Schematic diagram and fault parameters of the earthquake source fault model of the Chuetsu-oki Earthquake in 2007. (NW+SE dipping faults)

モデル4:南東+北西傾斜



第43 図 中越沖地震 南東+北西傾斜震源断層モデルと地殻変動(電子基準点観測との比較) Fig.43 Comparisons of horizontal and vertical components between GPS observation and the model calculation. (SE+NW

dipping faults)



第44 図 中越沖地震 南東+北西傾斜震源断層モデルと InSAR 画像(Descending) Fig.44 Comparison of SAR interferogram between Daichi observation and the model calculation. (SE+NW dipping faults) (Descending)



第45 図 中越沖地震 南東+北西傾斜震源断層モデルと InSAR 画像 (Ascending) Fig.45 Comparison of SAR interferogram between Daichi observation and the model calculation. (SE+NW dipping faults) (Ascending)



第46 図 中越沖地震 南東+北西傾斜震源断層モデルと InSAR 画像(残差) Fig.46 Residual interferograms (observation - calculation). (SE+NW dipping faults)



Fig.47 Comparisons of horizontal and vertical components between GPS observation and the model calculation. (NW+SE dipping faults, detachment, ramp, backthrust)



Fig.48 Comparison of SAR interferogram between Daichi observation and the model calculation. (NW+SE dipping faults, detachment, ramp, backthrust) (Descending)



モデル3a:北西+南東傾斜+追加





第50図 中越沖地震 陸域に断層を追加したモデルと InSAR 画像(残差) Fig.50 Residual interferograms (observation - calculation). (NW+SE dipping faults, detachment, ramp, backthrust)

平成19年新潟県中越沖地震 陸域に断層を追加したモデルと地震分布の位置関係



水平分布図

第51図 中越沖地震 陸域に断層を追加したモデルと地震分布の位置関係 Fig.51 Locations of model faults and hypocenter of aftershocks. (NW+SE dipping faults, detachment, ramp, backthrust)

合成開ロレーダ(SAR)の2方向観測を用いた総合解析から推定される 新潟県中越沖地震の震源断層モデル

新潟県中越沖地震の震源断層の傾斜方向については、北東傾斜であるか南東傾斜であるか議論が続い ている所であるが、地殻変動観測データ(干渉 SAR, GPS, 水準測量)を説明する立場から、震源域 の北東部に関しては北西傾斜である可能性が高いと考えられる.なお、震源域の南西部に関しては、震 源域北東部の断層の単純な延長面上では説明が不可能である。特に、柏崎市市街地における局所的な地 盤変動の影響があるため、地殻変動から傾斜方向を断言することは難しいが、どちらかというと南東傾 斜の方が残差が小さくなるという結果を得ている.

震源域北東部が北西傾斜の断層面と判断する根拠(1)

観音岬周辺は震源域に最も近い陸地であり、この場所での地殻変動は断層の傾斜方向に最も敏感であると考えられる. 干渉 SAR データの 2.5 次元解析から得られた観音岬周辺の準東西成分と準上下成分の断面をとって比較すると(図2の断面 B-B')、南東傾斜のモデル(モデル2)では、観測値に対し東向きの成分が過小であるのに対し、北西傾斜のモデル(モデル3)では、観測値を再現している.

北西傾斜の逆断層の場合は観音岬周辺は断層を地表方向へ延長させた位置より西(上盤)側になるため、上盤が下盤に対して南東方向へ滑る動きを反映して、東向きの変位を作りやすい.一方、南東傾斜の逆断層の場合、観音岬周辺は断層を地表方向へ延長させた位置より東(上盤)側になる.上盤が下盤に対して北西方向へ滑るため、東向きの変位は作りにくい.実際は、モデル2のように断層が高角で(55°以上)ある程度深い場合は、東向きへの変位を作ることが可能であるが、大きな東向き変位を作り出すことは難しい.



よって、観音岬周辺で観測されている東向き変位を説明するためには、北西傾斜の断層面の方が良い.

図1 SAR 南行軌道干渉画像(2007/1/17-7/19)と北行軌道干渉画像(2007/6/14-9/14)の組み合わせから 2.5 次元解析によって得られた変位分布.2つの干渉画像の間に余効変動などの時間変化する変動はない と仮定して解析を行なっている.GPS 連続観測点における南行軌道衛星の撮影日(7/19)と北行軌道衛 星の撮影日(9/14)間の余効変動は本震時の10%以下であるので、上記のような仮定は第1近似として は正しいと考えられる.(左)準東西成分.(右)準上下成分.

第52図a 合成開口レーダー (SAR) の2方向観測を用いた総合解析から推定される中越沖地震の震源断層モデル Fig.52a Earthquake source fault model of the 2007 Chuetsu-oki Earthquake estimated from 2.5D analysis of Daichi SAR interferogram.



図2 図1の A-A', B-B'での地殻変動の断面図. 準東西成分を左右方向, 準上下成分を上下方向に示している. 断面 B-B'の左側(観音岬周辺)でモデル間の差異が大きい.

震源域北東部が北西傾斜の断層面と判断する根拠(2)

西山丘陵西部の小木ノ城背斜付近では、地震とほぼ同時期に隆起したことが明らかになっている.時間的な近接性から、小木ノ城背斜付近の隆起は中越沖地震の発生と関連付けることが合理的である.中 越沖地震の震源断層が北西、南東傾斜のいずれの場合でも隆起域付近の弾性歪みは東西短縮となるが、 隆起域が狭く帯状に分布していることから、この場所のみに効果的に変形域を集中させるメカニズムが 必要である.

<u>北西傾斜の震源断層が浅部では低角となって小木ノ城背斜付近まで達するデタッチメント断層が存</u> <u>在しデタッチメント断層で非地震性のすべりがあったと考えれば、小木ノ城背斜付近で変形が集中し隆</u> 起することを合理的に説明できる. しかし、南東傾斜の断層面では、中越沖地震震源域と西山丘陵の隆 起を直接結びつけるようなメカニズムを考えることは難しいと思われる.



- 図3 震源域北東部での震源断層と西山丘陵の隆起のメカニズムに関する概念図. 堆積層中の断層形状に 関しては,佐藤・他(2007),長岡平野西縁断層帯の長期評価(地震調査委員会,2004)を参考にして いる. 堆積層での非弾性変形を考慮すればバックスラストやランプは必ずしも必要ないかもしれない.
- 第52図b 合成開口レーダー (SAR) の2方向観測を用いた総合解析から推定される中越沖地震の震源断層モデル Fig.52b Earthquake source fault model of the 2007 Chuetsu-oki Earthquake estimated from 2.5D analysis of Daichi SAR interferogram.







表1	成層構造での計算に用いた弾性係数(弾性波速度)
(地震	震研究所の速度構造に準拠)

深さ(km)	P波速度(km/	/s) S波速度(km/s)	密度(kg/m ³)
0.0	2.20	1.27 or 0.88	1800
1.0	2.80	1.62	2000
2.0	3.60	2.08	2200
4.4	4.40	2.54	2400
5.5	5.85	3.38	2700
21.0	6.70	3.87	3200
37.0	8.00	4.62	3300

1次元成層構造での地殻変動の計算には, EDGRN/EDCMP(Wang et al., 2003)を使用した. また, 震源断層モデルのパラメータは以下の通り.

-										
	緯度	経度	上端深さ	長さ	幅	走向	傾斜角	すべり角	すべり量	モーメントマグニチュード
	37.444°	138.575°	1.2km	11.9km	9.8km	223°	44°	84°	1.47m	6.41
	37.511°	138.647°	5.2km	10.0km	9.9km	218°	42°	110°	1.39m	6.34
	(7月26日公表)									

第53図 媒質の構造を変えた場合の地殻変動計算値比較

Fig.53 Effect of subsurface structure on calculated displacement from the fault model.

媒質を変えた場合の視線方向変動量の計算値比較



第 54 図 媒質を変えた場合の視線方向変動量の計算値比較 Fig.54 Effect of subsurface structure on calculated change of LOS range.

空中写真撮影範囲



撮影:7月19日 縮尺:1:10,000

第55図a 空中写真撮影範囲 Fig.55a Coverage of aerial photographs in Chuetsu area.



※ 正射投影した空中写真に2万5千分1地形図の情報の一部を重ね合わせています。



平成 19 年(2007 年) 新潟県中越沖地震 災害対策用図索引図



第56図 a 平成 19 年(2007 年)新潟県中越沖地震 災害対策用図索引図 Fig.56a Index map for base maps for disaster response of the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007.



第 56 図 b 新潟県中越沖を震源とする地震災害対策用図(柏崎市・刈羽村) Fig.56b An example of base maps for disaster response for the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007.



第 57 図 平成 19 年(2007 年)新潟県中越沖地震「災害状況図」 Fig.57 Disaster Information Map of the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007.

海成段丘にみる長期的地殻変動



「日本の海成段丘アトラス」より転載



本地域には酸素同位体ステージ5e(下末吉相当=約13万年前)の海成段丘が断片的に分布 している。旧汀線高度は、上越市柿崎周辺がやや高く、柏崎市付近はやや小さくなり、さらに北 に向かうと再び高くなるパターンが読み取れるが、今回検出された隆起・沈降のパターンとは 整合せず、今回の地殻変動が長期にわたって累積していることは読み取れない。このことは、 この地域には、今回の地震とは別に、今回と相補的な地殻変動を引き起こすメカニズムが存在 していることを示唆している。

> 第58図 海成段丘にみる長期的地殻変動 Fig.58 Long term crustal deformation in marine terraces.

新潟県中越地震以後の地殻変動について

第174回地震予知連絡会において、統計数理研究所尾形委員より2004年新潟県中越地震以降、2007年新潟県中越 沖地震の発生に至る間に、中越沖地震震源域近傍のGEONET観測点において北東-南西方向の伸びが観測されている との指摘があった。ここでは、中越地震以前のデータを用いて経年変化及び年周成分の補正を行い、ベクトル図(下図)および時系列(次ページの図)を作成した。

この北東-南西方向の伸びの原因として、

(1)新潟県(特に下越地方)の観測点における2005年8月16日宮城県沖地震の地震時・地震後地殻変動(北東-南 西伸長)(下図)

(2)電子基準点「新潟巻」に観測点保守(2006/10/26)と同期した原因不明のとびがある。(次ページ)

(3)既に報告されているが、電子基準点「柏崎1」の受信機交換以降に原因不明の変化がある。

(4)新潟県中越地震の余効変動および2004/11/8の余震による変動(2ページ後に断層モデルを提示)。 が考えられる。これらの要因による変形として、中越沖地震震源域近傍の地震以前の観測変位は説明可能であり、 GPS観測データが中越沖地震の震源断層下部延長での前駆すべりを積極的には支持しない。



定常成分、年周成分を補正した新潟県およびその周辺の水平変位 (2004年中越地震発生後から2007年能登半島地震の発生前まで)

第59図 新潟県中越地震以後の地殻変動について Fig.59 Crustal deformation after the 2004 Niigataken Chuetsu Earthquake.



基線長変化グラフ(速度・年周補正後)

第60図 基線長変化グラフ(速度・年周補正後)

Fig.60 Time series of baseline length from GEONET solution after removing velocity and annual terms.

新潟県中越地震の余効滑りモデル

2004年新潟県中越地震の余効変動については、過去の地震予知連絡会においても余効すべりの断層モデルを提示 している。今回、中越沖地震以降に行われた水準測量の一部が中越地震の震源域周辺をカバーしており、震源域周 辺の隆起が明らかになったため、再度検討を行なった。GPSデータは、2004年11月から2006年7月までの変位から地 震以前のトレンドと2005年の宮城県沖地震の影響を差し引いたものを観測値として、1枚の矩形断層のパラメータ を自由に推定したもの(Model-A)と本震の震源断層浅部延長と南部延長付近に2枚の矩形断層を仮定して、パラメ ータを推定したもの(Model-B)を以下に示す。どちらのモデルでも、おおむね水平変動及び上下変動を説明するこ とができる。また、どちらのモデルでも、本震の震源域に比べて有意に余効すべりが南側に拡大していることがわ かる。



N37.359 E138.956 D2.2km L25.9km W13.6km Strike210 Dip39 Rake 103 Slip 0.15m Mw 6.07 Model-B (2枚の矩形断層を、本震震源断層の浅部及び南延長周辺に仮定) N37.382 E138.979 D3.0km L20.2km W7.3km Strike210 Dip47 Rake 100 Slip 0.24m Mw 5.95 N37.238 E138.845 D3.4km L9.3km W11.3km Strike203 Dip33 Rake 92 Slip 0.19m Mw 5.79 (Total Mw 6.05)

第61図 新潟県中越地震の余効滑りモデル

Fig.61 Models of afterslip of the 2004 Niigataken Chuetsu Earthquake.

新潟中越沖地震以降の地殻変動



第62図a 新潟県中越沖地震以降の地殻変動(長野地区・新潟北部地区 基線図) Fig.62a Results of continuous GPS measurements in Niigata after the 2004 Earthquake. (baseline map)



第62図b 新潟県中越沖地震以降の地殻変動(長野地区)(1/2)

Fig.62b Time series of baseline length from GEONET solution after removing trend, annual and semiannual terms. (Nagano area) (1/2)
傾斜・半年周・年周補正グラフ

期間:2004/04/01~2007/11/11 JST (m)(6)妙高高原(950247)→長野(950267) 斜距離 基準値:22648.310m 0 02 0.010 -0.010 -0. 020 07/01 10/01 05/01/01 07/01 10/01 06/01/01 04/01 07/01 10/01 07/01/01 04/01 07/01 10/01 04/01 (m)(7)山ノ内(950265)→松之山(950244) 斜距離 基準値: 34415.839m (m) (7) 0.020 0.010 0.000 -0.010 -0.020 04/01 1 10/01 05/01/01 04/01 07/01 10/01 06/01/01 04/01 07/01 10/01 07/01/01 04/0 (m) (8) 松之山 (950244) →名立 (950243) 斜距離 0.020 0.010 基準値:46096.546m 0.000 -0. 010 -0. 020 04/01 05/01/01 04/01 07/01 10/01 06/01/01 04/01 10/01 07/01 07/01/01 10/01 07/01 10/01 04/0 07/01 (m) (9) 妙高高原 (950247)→名立 (950243) 斜距離 0 020 基準値: 33936.885m 0.020 - manager and a start inter the second 1.1.1 and the second second -0. 010 -0. 020 04/01 07/01 06/01/01 04/01 07/01 07/01/01 10/01 10/01 05/01/01 04/01 07/01 10/01 10/01 04/0 07/01 (m)(10)妙高高原(950247)→糸魚川1(950245) 斜距離 基準值:35148.722m 0.02

0. 020 0. 010 0. 000 -0. 010 -0. 020 04/01 07/01 10/01 Man and Maria Manager States Sara and **North** 05/01/01 04/01 07/01 10/01 06/01/01 04/01 07/01 10/01 ; 07/01/01 04/01 07/01 10/01

傾斜・半年周・年周補正グラフ



● ---[F2:最終解] ○ ---[R2:速報解]

第63図 新潟県中越沖地震以降の地殻変動(長野地区)(2/2)

Time series of baseline length from GEONET solution after removing trend, annual and semiannual terms. (Nagano Fig.63 area) (2/2)

長野地区

^{----[}F2:最終解] 〇 ----[R2:速報解]

-476-

新潟県中越沖地震以降の地殻変動(新潟北部地区) 第 64 図

Fig.64 Time series of baseline length from GEONET solution after removing trend, annual and semiannual terms. (Northern Niigata area) (1/2)



10/01

05/01/01

04/01



傾斜・半年周・年周補正グラフ

06/01/01

04/01

07/01

10/01

07/01/01

04/01

للمعراد

10/01

07/01

----[F2:最終解] O ----[R2:速報解]

期間:2004/04/01~2007/11/11 JST

07/01

0.010

-0.010

期間:2004/04/01~2007/11/11 JST

07/01

0.020 0.010 0.000

-0. 020

(m)(1) 新発田(950234)→鹿瀬(950236) 斜距離

10/01

07/01 07/01 06/01/01 10/01 10/01 05/01/01 04/01 10/01 04/01 07/01 10/01 07/01/01 04/01 07/01 基準値:36366.880m

05/01/01 06/01/01 (m) (2) 新発田(950234)→村上(940049) 斜距離 基準値:36207.319m 0. 020 0.010 0.000 -0. 010 -0. 020 04/01 07/01 05/01/01 07/01 04/01 10/01 06/01/01 04/01 07/01 10/01 07/01/01 04/01 07/01 10/01

04/01

07/01

10/01

07/01/01

04/01

(m) (3) 新発田(950234)→小須戸(960571) 斜距離 0.020 0.010 0.000 基準值:31372.621m -0.010 (m) (4) 小須戸(960571)→鹿瀬(950236) 斜距離 0.020 0. 020 0. 010 0. 000 -0. 010 -0. 020 04/01 07/01 '05/01/01 04/01 07/01 10/01 06/01/01 04/01 07/01 10/01 07/01/01 04/01 10/01 10/01

傾斜・半年周・年周補正グラフ

وكالمالية الطريسان

10/01

07/01

04/01

新潟北部地区 計算期間:2000/01/01-2003/01/01

07/01

計算期間:2000/01/01-2003/01/01

基準値:28065.602m

10/01

基準値:29227.971m

10/01

新潟北部地区





● ----[F2:最終解] ○ ----[R2:速報解]

0.020

-0.010 -0. 020

-0. 020

0. 020f 0.010

0.000

-0. 010 -0. 020 04/01

0.000

-0.010 -0.020

0.020

-0.010 -0. 020

新潟県中越沖地震以降の地殻変動(新潟北部地区) 第 65 図

Fig.65 Time series of baseline length from GEONET solution after removing trend, annual and semiannual terms. (Northern Niigata area) (2/2)