

第2章 この10年の全国的地殻変動

今給黎 哲郎（国土地理院）

1. 概観

「この10年の全国的地殻変動」がこのように項立てされて記述されることになったのは、「地震予知連絡会30年のあゆみ」が刊行されて以降10年間の地殻変動観測成果に、それだけの質と量と価値があると地震予知研究のコミュニティが認めたことに他ならない。その一つの大きな要因は、地震調査研究推進本部が進めた基盤的観測網整備の一環として、地殻変動観測網としてのGEONET(GPS連続観測網)が充実したことである。全国を対象とする国土地理院のGPS連続観測網は1994年以来観測を積み重ねており、「30年のあゆみ」が編集された1998年時点でも、既に全国の定常的な地殻変動の状況、地殻水平歪みの集中する地域の確認、顕著な地震時に伴う地殻変動の検出、三陸はるか沖地震の余効変動や房総半島でのスロースリップ現象の検出などの成果が上がっていた。しかし、この10年においては、さらに新たな観測事実の検出と、観測データの詳細な解析が行われることで、地震発生サイクルにおける、地震間・地震時・地震後の各ステージで観測される地殻変動とその発生メカニズムの理解がさらに大きく進展した。

2000年の三宅島噴火・新島神津島近海の群発地震では火山活動と群発地震活動のメカニズムについて地殻変動の観点からもそのメカニズムについての議論が大いに深まった。その後引き続いて発生した東海スロースリップは、2000年後半から2005年まで続き、東海地震の想定震源域に隣接するプレート境界で観測された前例のない現象であった。当初、東海地震のプレスリップに相当するものである可能性も取りざたされただけに、社会的にも大きな注目を集めた。その空間的広がり、時間的追跡から、大地震の震源となるアスペリティ領域と、スロースリップ発生領域の棲み分けが確認されたことは、大地震発生のメカニズムを理解する上で大きな収穫であった。この他、豊後水道、房総半島でもスロースリップが繰り返し発生していることが観測され、それぞれそのメカニズムについての研究が行われている。

西南日本で繰り返し発生している短期的スロースリップは、GEONETと同じく基盤的観測網として整備されたHi-netの高感度加速度計(傾斜計)により、傾斜変動として検出された。この地殻変動と、Hi-netの高感度地震計によって捉えられた深部低周波微動が、プレート境界におけるスロースリップイベントによる一連の現象であることが示されたことも、こ

の10年間における重要な発見である。

これら長期的、短期的なスロースリップイベントに関する研究から、プレート境界におけるアスペリティとその深部延長におけるプレートカップリングの状況についてのモデルが提案され、またその時間的发展を摩擦構成則から説明する理論的考察、シミュレーションの研究などに発展している。

この他にも、この10年間では海溝型のM8級地震である2003年十勝沖地震が発生し、地震に伴う変動及び余効変動の観測がされたこと、その他にも2005年宮城県沖地震を含めたM6-M7クラスのプレート境界の地震に関連した地殻変動の観測から、プレート境界のアスペリティモデルの構築に関連するさまざまな研究成果が生まれている。同様に、2000年鳥取県西部地震以降、2003年宮城県北部の地震、2004年新潟県中越地震、2005年福岡県西方沖の地震、2007年能登半島地震、2007年新潟県中越沖地震、2008年岩手宮城内陸地震など、M6-7級の地殻内の浅い地震に関連して地殻変動の観測結果から震源断層モデルを推定することが当たり前のように行われるようになった。

断層モデル作成のための地殻変動データとしては、GEONET観測結果、測地測量のデータの他に、最近では衛星干渉SARのデータが大きな役割を果たすようになっている。面的な地殻変動パターンを把握できる干渉SARは滑り分布の推定など詳細な断層モデルの作成において重要な情報をもたらす。GPS観測とは独立な情報でもあるだけにその価値は高い。特に、2006年1月に打ち上げられた国産の地球観測技術衛星「だいち」(ALOS)のLバンドSAR(PALSAR)による観測データが広く公開されるようになったこともあって、2007年能登半島地震、2007年新潟県中越沖地震、2008年岩手・宮城内陸地震については多くの研究機関で解析が行われ、地震に伴う地殻変動と断層モデルに関する詳細な議論が行われている。

個別のイベントに関する記述はそれぞれの項でなされることになっているので、本項では地殻変動観測・研究の観点から当該イベントに関連して特に注目すべき点などがあれば触れるにとどめることとし、この10年間における全国的地殻変動の概況を、GEONETの観測に基づく水平歪み図を中心に時系列的に概説し、上下変動については水準測量、驗潮の観測を加えて得られた全般的な傾向について述べることにする。また、個別の項立てはないけれども地殻変動観測の点から注意を引くいくつかのイベント

については、本項で紹介することとしたい。

2. 水平歪み図で見た地殻変動の推移

地震予知連絡会報には、第66巻(2001年8月)から GEONET 観測結果による全国の水平歪み図が掲載されるようになった。それ以前は、水平変動ベクトル図のみが掲載されていたが、広域の地殻変動場を理解するには歪み図の方がわかり易いと思われる。本稿では時系列的に水平歪み図を追いながら、この10年間の全国の地殻変動の状況を振り返る。

2.1 1998年～1999年

1998年から1999年にかけては全国的に顕著な地震、火山イベントが発生しない静穏な時期であった。そのため、地殻変動のパターンを解析する際に「定常」変動としてこの時期を用いることが多い。例えば国土地理院(2008)¹⁾の東海スロースリップの解析では1998年1月から2000年1月までの状況を非スロースリップ期の変動速度場として示している。

図1-1は1998年1月～1999年1月の全国の水平歪み図であるが、日本列島の定常的な歪み場を良く表している。

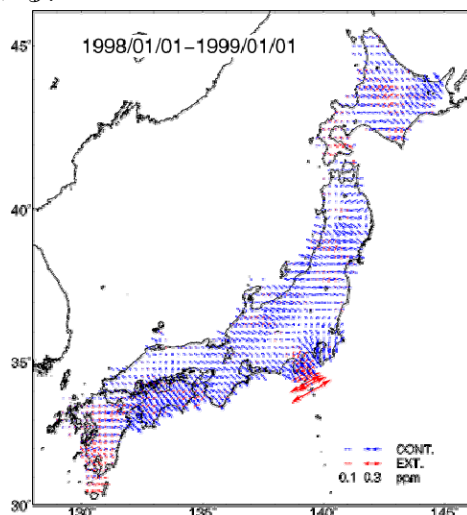


図1-1 1998年1月-1999年1月の全国水平歪み図

北海道から東北地方にかけて太平洋岸を中心に太平洋プレートの沈み込みに伴う北西-南東から東西圧縮の歪みが見られるが、岩手県周辺では1994年三陸はるか沖地震の余効により沿岸部で東西圧縮がみられないこと、1998年夏の岩手山の火山活動および9月3日の岩手内陸北部の地震に関連して内陸に南北伸張が一部あるなど周囲と異なる傾向を見せている。東海から紀伊半島、四国の太平洋岸にかけては、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う北西-南東方向の圧縮が見える。また、新潟から神戸に至る帯状の地域で明瞭に西北西-東南東の圧縮が見られるが、Sagiya et al. (2000)²⁾がいわゆる「新

潟-神戸ひずみ集中帯」として指摘したものである。伊豆半島・伊豆諸島北部では火山性の地殻活動で北東-南西方向の伸びの歪みが目立っている。九州においては、南北伸張の傾向が見られる。図1-2は、1999年1月～2000年1月の水平歪み図であるが、これも同様に顕著なイベントの影響をほとんど含まないものである。前時期において岩手山周辺にあった伸びのパターンがなくなったことが主な違いである。

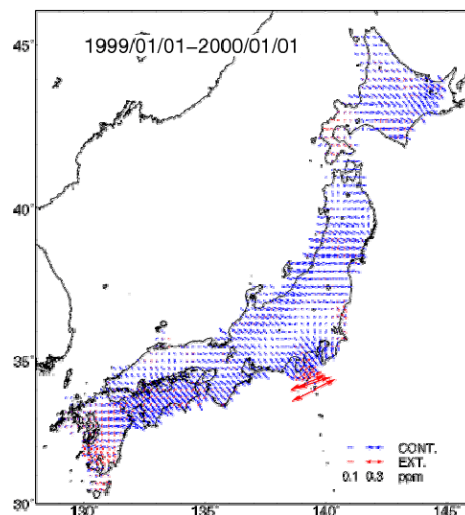


図1-2 1999年1月-2000年1月の全国水平歪み図

なお国外の地震であるが、1999年9月21日の台湾集集地震(M7.7, USGSによる)に伴う地殻水平変動も与那国島の電子基準点で検出された。

2.2 2000年

2000年はその前年とうって変わって地震、火山のイベントが各地で発生し、地殻変動観測でも非常に大きな変化が捉えられている。図1-3は2000年1月～2001年1月の水平歪み図である。

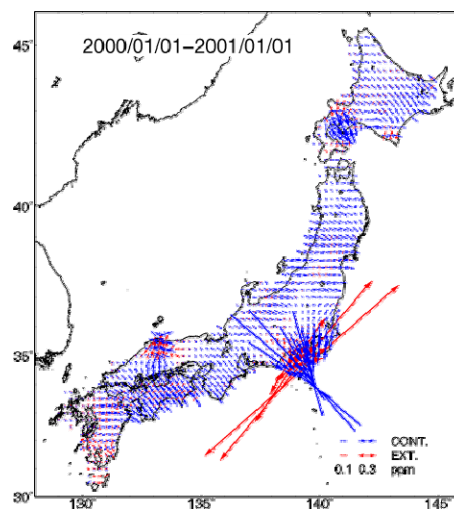


図1-3 2000年1月-2001年1月の全国水平歪み図

3 月末に発生した有珠山噴火の影響はあまり明瞭ではないが、噴火湾北東側に見られる北西-南東で圧縮は噴火後の山体の収縮に関連している。一方で、6 月末から始まった三宅島噴火、それに引き続く新島・神津島近海の群発地震活動に関連した非常に大きな地殻歪みが伊豆諸島北部から南関東・伊豆半島周辺に見られる。2000 年三宅島噴火に際して、三宅島島内に設置されていた電子基準点によりイベントの進行に伴う地殻変動の推移が観測された。地震活動が始まった6月26日夕刻から検出された変動は、島内西側で大きな伸びを示し、阿古地区では大きな沈降が観測された。これは同時期に地震活動も西方へ移動し、三宅島の西方沖で海底の小噴火が発生したと合わせて、阿古付近から西方にダイクの貫入が起きたことを捉えたものと考えられている。その後、三宅島では7月8日に山頂で噴火が始まり直径約1 kmの陥没火口が出現。8月18日には噴煙が15,000 mに達する最大規模の噴火が発生し、8月29日にも噴火が発生し低温の火砕流も発生、9月からは大量の二酸化硫黄が発生するようになるといった経過で活発な活動が続いた。このイベントの進行に平行して地殻変動としては島の急激な収縮、沈降が観測された。2000 年末までには火山ガス放出以外の目立った活動は終息したが、地殻変動としては水平方向で最大91 cmの変位、島を横断する約4 kmの基線では1 m以上の短縮、上下変動では最大98 cmの沈降が最終的に観測された。一方、三宅島の西方沖へ移動した地震活動は、そこから神津島・新島周辺にかけての海域で活発な群発地震活動として約2ヶ月間継続した。この間に発生した数回のM6.0以上の地震に伴う地殻変動も観測されたが、新島-神津島間の基線が非常に速い速度で伸び続けたことが最大の特徴であった。代表的な数値を挙げれば、電子基準点「新島」と「神津島1」の距離は活動開始から約2ヶ月後の8月31日までに82 cm伸張した。この三宅島噴火、新島・神津島近海の群発地震活動イベントによる地殻変動は、房総半島、関東地方南部、伊豆半島、東海地方、伊豆大島、利島、御蔵島等伊豆諸島北部全域といった広域で GEONET により観測された。これらの地殻変動は、三宅島のマグマ溜まりの収縮、三宅島西方のダイク、神津島東方沖のダイク、地震活動にともなう右ずれ性の断層運動の重ね合わせによってモデル化された³⁾。なお、地震活動を含めた詳細な記述は第3章1節を参照されたい。

図1-3で読み取れるもうひとつ大きな山陰地方の水平歪みは10月6日に発生した鳥取県西部地震(M7.3)に伴うものであり鳥取・島根県境付近の震源

域周辺で顕著である。GEONET で観測された co-seismic な地殻変動から左横ずれの矩形断層モデルが地震の翌日に発表されているが、その後、RADARSAT の SAR 干渉画像から面的な地殻変動を捉え、断層面上の滑り分布モデルが作成された。また SAR 干渉画像では10月8日に本震の約25 km西方で発生した M5.8 の地震に伴う変動も確認することができたことから、その地殻変動検出能力の高さが改めて注目された。GEONET および大学合同観測班の GPS 観測データからは地震後の余効的地殻変動が数ヶ月継続したことが確認されている。詳しくは第3章2節を参照されたい。

2.3 2001 年

地殻変動観測・研究の観点から見れば、2001 年の最大の出来事は東海スロースリップイベントが検出されたことである。駿河湾西部から遠州灘沿岸の東海地方における水平変動は、電子基準点「大浜」固定で表示すると、フィリピン海プレートの沈み込みにより西北西方向の変動ベクトルで代表される動きとなるのが2000年春以前までのパターンであった。2000年の三宅島噴火、新島・神津島周辺の群発地震の影響を受けて南東方向の変動が東海地方でも観測された。2000年秋以降、変動方向は西向き成分を取り戻したが、南向き成分は2001年初めになってもなくならず、春頃からは伊豆諸島北部を変動源とする説明が難しい非定常的な地殻変動が東海地方で続いていることが疑われるようになった。原因が東海地方のプレート境界で発生しているゆっくり滑りであると推定されて、地震予知連絡会強化地域部会、地震防災対策強化地域判定会委員打合会で、その意味について検討が行われたのは7月末のことである。伊豆諸島での地震火山活動に伴う地殻変動の影響が非常に大きかったために、このゆっくり滑りイベントの開始時期を特定することは困難であるが、遅くとも2001年初め頃、早ければ2000年秋頃から始まっていたと考えられる(詳しくは第3章4節を参照)。図1-4の水平歪み図で見ると、それ以前見られていた御前崎から遠州灘沿岸付近の北西-南東圧縮の歪みが見られなくなっていることが、この東海スロースリップ期間の特徴である。東海スロースリップは消長を繰り返し、最終的に2005年夏に終息するまで継続した。

2001年に発生し、地殻変動が捉えられた他の顕著なイベントとしては、3月24日の芸予地震(M6.7)がある。震源の深さが51 kmとやや深かったため観測された地震時の地殻変動は1-2 cmであったが、水平歪み図には震源域を中心にやや大きめの北西-南東圧縮、北東-南西伸張の歪みが確認できる。伊豆諸島

北部の北東-南西伸張も継続的に見られる。地震に関する詳しい内容は第3章3節を参照されたい。

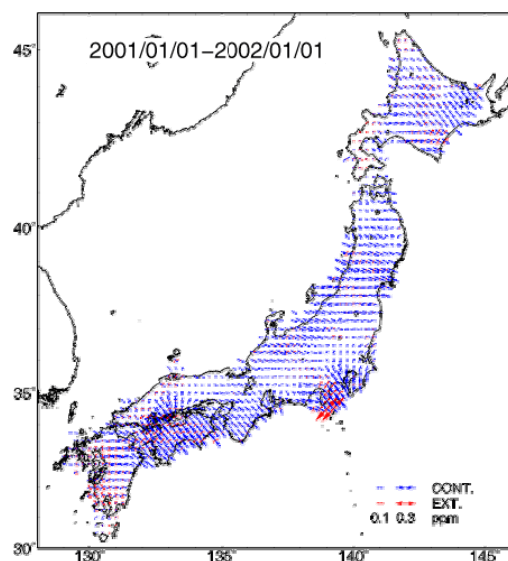


図 1-4 2001 年 1 月-2002 年 1 月の全国水平歪み図

Hi-net の高感度地震計(傾斜計)により検出された短期的スロースリップイベントは、愛媛県西部・豊後水道周辺で 2001 年 1 月, 8 月, 2002 年 2 月, 8 月とその後約半年周期で繰り返し発生したものが最初に報告されている。これは深部低周波微動の活発化と傾斜計で捉えられた傾斜変動が、プレート境界のやや深い領域(深さ約 40 km 付近)で発生しているスロースリップであることを発見したもので、その後、紀伊半島から愛知県東部にかけの領域でも同様な現象が起きていることが Hi-net の傾斜計の他、気象庁の体積歪み計、産業技術総合研究所、名古屋大学、東濃地震科学研究所のボアホール歪計等の観測により確認・報告されている。詳細は第 3 章 13 節を参照されたい。

2.4 2002 年

地殻変動観測の点から注目される 2002 年のイベントは、10 月に房総半島で発生したスロースリップである。10 月 4 日から約 10 日間で、房総半島東部にある複数の電子基準点が最大 2 cm 程度南東方向に変動した。これは 1996 年 5 月に起きた現象の再来であり、プレート境界での長期的スロースリップイベントが同じ領域で繰り返し起きることを国内で初めて具体的に確認した事例として重要である。Ozawa(2003)⁴⁾では滑り領域の時間変化についても推定し、同時期に発生していた微小地震の活動との対比からもイベントの時間発展を議論している。水平歪み図(図 1-5)では、房総半島周辺に北西-南東伸張が目立っているのがこのイベントの影響である。

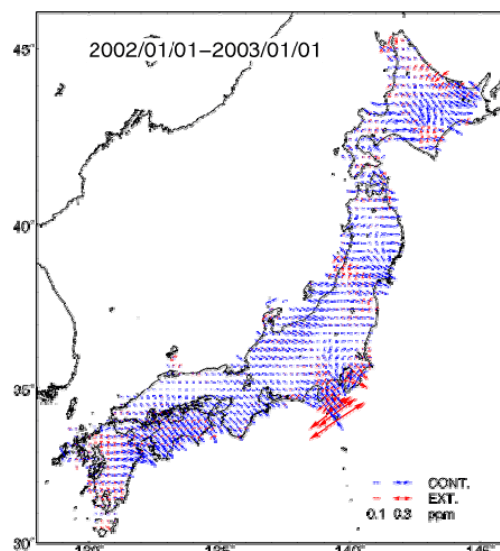


図 1-5 2002 年 1 月-2003 年 1 月の全国水平歪み図

離島でのイベントであるため、歪み図にはその影響は反映されていないが、8 月に八丈島近海で発生した群発地震活動により、八丈島の電子基準点が約 4 cm 東方向に変位するなどの変動が観測された。島内の海上保安庁の GPS 観測点の変位および名古屋大学の GPS キャンペーン観測とあわせてダイクの貫入による地殻変動としてモデル化されている⁵⁾。

2.5 2003 年

5 月 26 日に発生した宮城県沖の地震(M7.1)は、震源が 71 km と深かったため観測された地殻変動は最大でも 1.5 cm 程度であったが、宮城県、岩手県を中心に明瞭な変動が見られた。地殻変動から推定された断層モデルは高角の逆断層で、スラブ内で発生したものと考えられる。地震波形から推定されたメカニズム⁶⁾とも整合している。

7 月 26 日に発生した宮城県北部の地震(M6.4)は、地殻内の浅い地震であった。7 時 13 分に発生した本震の前に M5.6 の前震が 00 時 13 分に発生しており、また 16 時 54 分に発生した M5.5 の最大余震とあわせて震度 6 弱以上が 1 日に 3 回観測された。観測された地殻変動も震源が浅いために大きいものであった。震央近くの電子基準点「矢本」では、南東方向に約 16 cm の変位及び約 8 cm の隆起が観測された。この地震が発生した時期、震源域を横切る路線での水準測量作業が行われていたため、地震の直前と直後の観測値を比較して上下変動を精密に測定できた希な事例ともなった。RADARSAT のデータを用いた SAR 干渉解析も行われ、震源域中央部は田園・山林であったため干渉画像が得られなかったものの、周辺での面的な変動パターンが得られたことで、本震と前震のそれぞれのメカニズムに対応した 2 枚の断

層とそれらに対応する滑り分布モデルが推定された⁷⁾。

9月26日に発生した十勝沖地震(M8.0)は、GEONETの本格的な観測が始まってから初めてのM8級のプレート境界地震であった。北海道太平洋岸の広い地域で観測された水平変動は、海溝軸に向かって南東側にせり出す典型的な逆断層のパターンを示した。電子基準点「広尾」は南東に約97 cm移動し、地震時の変動としてはそれまでの最大であった1994年北海道東方沖地震の際の「根室4」における42 cmを大きく上回った。また上下変動では「大樹2」が28 cmの沈下を記録した。地震時の変動から推定された矩形断層モデルは長さ約92 km、幅約90 kmの面で約4.8 mの一様滑りが生じたというものである(Mw8.0相当)。この地震後も余効的な地殻変動が継続し、震源域周辺のプレート境界ではゆっくりとした滑りが続いていることが推定された⁸⁾⁹⁾。余効滑りの領域と本震の主な滑り領域が相補的な位置関係にあることが指摘されたこともこの地震の地殻変動データから得られた重要な知見である。一方、この地震の直前においては、特に前兆的な地殻変動が見つからなかったことも事実である。いわゆる前兆滑りに相当するものはGEONETの観測からも、えりもにおける北大の地殻変動連続観測でも確認されなかった。地震に関する詳しい記述は第3章5節を参照されたい。

10月には豊後水道でスロースリップが発生したことがGEONETの観測とHi-netの傾斜計で捉えられた。これは1997年から98年にかけて発生したイベントの再来であり、滑り領域、規模(Mw6.8相当)ともにほとんど前回と同じであった¹⁰⁾。スロースリップは12月まで約3ヶ月継続した。房総半島に続き2例目のスロースリップの繰り返しが観測されたことで、プレート境界にはスロースリップを繰り返し発生する領域が固着域に隣接して存在する、というモデルがほぼ確実なこととして受け入れられるようになった。この豊後水道における長期的スロースリップ領域は、プレート境界のより深い側での短期的スロースリップ発生領域と隣接しており、プレート境界面の深さによってその発生頻度・継続時間に固有の時定数があることが示唆されると小原、広瀬(2004)¹¹⁾は指摘している。

水平歪み図(図1-6)では十勝沖地震による歪みが北海道で顕著であるほか、5月26日宮城県沖、7月26日宮城県北部、豊後水道スロースリップの影響が見られる他、10月31日に発生した福島県沖の地震(M6.8)の影響も見られる。

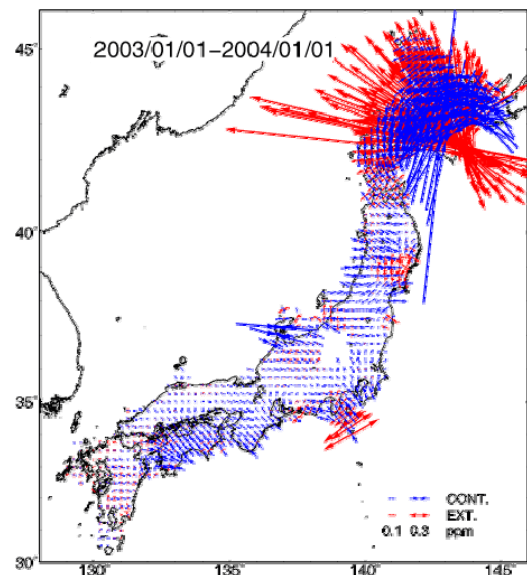


図1-6 2003年1月-2004年1月の全国水平歪み図

この地震については、わずかではあるがco-seismicな変動と余効変動が観測され、そのため福島県沿岸では歪みの東西圧縮が小さくなっている。伊豆諸島北部の北東-南西伸張も継続的に見られる。

2.6 2004年

2004年9月5日に発生した紀伊半島南東沖の地震は、南海トラフの海溝軸に近い浅い地殻内で発生した地震で、そのメカニズムについては地震観測、地殻変動観測の解析結果が単純ではないことから論議を呼んだ。GEONETの観測では紀伊半島東岸から東海地方沿岸にかけて広い範囲で最大5 cm程度の水平変動が観測され、上下変動としては紀伊半島南東部で隆起、志摩半島では沈降が観測された¹²⁾。地殻変動データによる断層モデル推定では、19時に発生した前震(M6.9)と23時に発生した本震(M7.4)による変動の分離が難しく、震源も沖合であるためにモデルが一意に決まりにくいと言う限界があった。しかし、この海域では名古屋大学、海上保安庁などがキネマティックGPSと音響測距を結合した海底地殻変動観測を実施しており、その結果からは海溝軸に平行な逆断層と、北西-南東走向の逆断層成分を伴った横ずれ断層が活動したことが支持されている。地震観測のデータと併せた詳しい論議は第3章6節を参照されたい。この地震の発生によって継続していた東海スロースリップの地殻変動のシグナルが分離しにくくなったが、2004年の間はまだスロースリップイベントは継続していたと考えられている。

10月23日には新潟県中越地震(M6.8)が発生した。この地震は新潟-神戸歪み集中帯の中で発生した北西-南東圧縮の逆断層の地震で、断層の上盤側にあ

たる「小千谷」では約 27 cm の隆起，断層を横切る水準路線では最大 74 cm の隆起が確認されるなど，周辺の観測点において顕著な地殻変動が観測された．GEONET の 1 秒データによるキネマティック測位解から本震直後の地殻変動の推移を規模の大きな余震と関連づけた解析結果が報告された¹³⁾．また，K-NET の加速度計記録の二階積分により得られた変位波形と GPS1 秒サンプリングデータによる変位波形が整合することが示された¹⁴⁾．地震に関する詳しい記述は第 3 章 7 節を参照されたい．

2003 年十勝沖地震の余効変動は 2004 年になっても継続していたが，地殻変動から推定される滑り量域がプレート境界の東側および深い側に広がっていることが指摘されてその推移が注目される中，11 月 29 日に釧路沖で M7.1 の地震が発生，12 月 6 日にはその余震域の根室半島南東沖で M6.9 の地震が発生した．釧路沖の地震では，「根室 4」が北東へ約 3 cm 変位し，約 3 cm 沈下するなどの変動が観測され，根室半島南東沖の地震でも最大 1 cm 程度の水平変動が観測された．いずれも，2003 年十勝沖地震の余効滑り領域の東に隣接するプレート境界で発生した地震であり，遷移的な地殻変動が M7 級の地震を誘発した例として関心を集めた．また，余効的な地殻変動がこの後も観測され，十勝沖から釧路沖のプレート境界では余効滑りがさらに継続していることが推定された¹⁵⁾．

12 月 14 日に発生した留萌支庁南部の地震(M6.1)は規模が小さかったものの震源がごく浅かったため周辺の電子基準点で数 cm の変動が観測された．

この他，4 月か末から 5 月初めにかけて伊豆半島東方沖で発生した群発地震の影響で伊豆半島東部においてわずかな地殻変動が観測されている．

水平歪み図(図 1-7)では，紀伊半島南東沖の地震，新潟県中越地震，釧路沖の地震の影響が顕著に見られ，十勝沖地震の余効変動及び留萌支庁南部の地震の影響もわずかに見られる．伊豆諸島北部の北東-南西伸張も継続的に見られる．

12 月 26 日に発生したスマトラ島沖の地震は Mw9.0 という巨大地震であったこともあり，国内の地殻変動観測でも影響が捉えられている．気象庁の体積歪計，地震予知総合研究振興会東濃地震科学研究所のボアホール歪計が歪波形を検出してモーメントマグニチュードの推定結果が報告された¹⁶⁾¹⁷⁾ほか，産業技術総合研究所の観測点が地下水位の変動を検出した結果¹⁸⁾，GEONET の 1 秒観測データから周期 20 秒程度の地震波を検出した結果の報告¹⁹⁾，ENVISAT のレーダー画像を地震前と地震後で重ね合わせることで海岸線の隆起沈降を把握した結果の報告²⁰⁾など

が行われている．

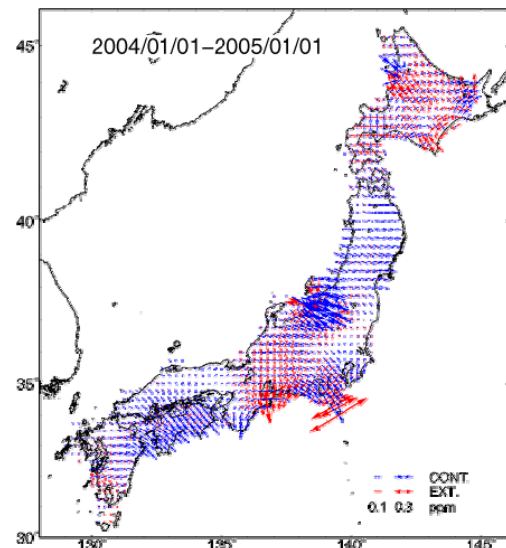


図 1-7 2004 年 1 月-2005 年 1 月の全国水平歪み図

2.7 2005 年

3 月 20 日に発生した福岡県西方沖の地震(M7.0)は，2000 年鳥取県西部地震と同様にそれまで観測されていた歪み速度の小さい地域で発生した．周辺の電子基準点および海上保安庁の D-GPS 観測点で地殻変動が観測されたほか，震源近くの玄界島内の三角点において約 38 cm，海上保安庁の観測点で約 29 cm の水平変動が検出された．地殻変動から推定された初期的な断層モデルはほぼ垂直な左横ずれ断層であったが，ENVISAT 衛星の SAR 干渉解析結果，三角点改測結果，および GPS 連続観測点のデータを用いて，断層面上のすべり分布も推定された²¹⁾．この地震については，GEONET および GPS 大学連合の観測で余効変動が 1 ヶ月程度の間観測された．この地震に関する詳しい記述は第 3 章 8 節を参照されたい．

8 月 16 日に発生した宮城県沖の地震(M7.2)では，牡鹿半島の電子基準点「牡鹿」で東南東方向に約 6 cm の変位，上下方向では約 5 cm の沈下など，宮城県を中心とする地域で地殻変動が観測された²²⁾．海上保安庁が設置している海底地殻変動観測点「宮城県沖 2」では，この地震に伴うと見られる約 10 cm の東向きの変位が検出された²³⁾．地殻変動データから推定された矩形断層あるいはプレート境界面における滑り分布などからは，この地震における破壊の範囲が地震調査委員会の長期評価で想定されている「宮城県沖地震」のアスペリティ全体ではないことが推定された²³⁾．これは地震波形の解析結果などとも整合し，宮城県沖のアスペリティについては割れ残りがあるという解釈の根拠のとなっている．この地震に関する詳しい記述は第 3 章 9 節を参照されたい．

2005 年に発生したその他の地震では，10 月 19 日

の茨城県沖の地震(M 6.2)および12月2日の宮城県沖の地震(M6.6, 8月16日の地震の余震域で発生)に伴いわずかな地殻変動が検出されている。

1年間の水平歪み図(図1-8)では、福岡県西方沖の地震、宮城県沖の地震の影響の他に、十勝沖地震震源域周辺の余効変動、中越地震の余効変動の影響が見られる。東海スロースリップイベントは2005年夏にはほぼ終息したので、東海地方周辺では西北西-東南東方向の圧縮が再び見えるようになっている。

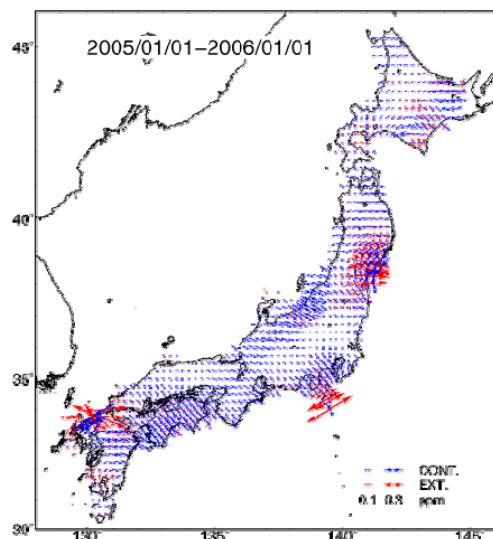


図1-8 2005年1月-2006年1月の全国水平歪み図

2.8 2006年

伊豆半島東方沖においては、2006年1月から5月にかけて、4月21日に発生したM5.8の地震を最大とする群発地震活動があり、4月17日から24日にかけての間に「伊東八幡野」観測点が南西方向に3.5 cm変位するなどの地殻変動が観測された²⁴⁾。

11月18日に奄美大島近海で発生した地震(M6.0)に伴い、喜界島で小さな地殻変動が観測された。

この他には特に大きな地震が発生しなかったため、水平歪み図(図1-9)においては顕著なパターンが余り見られない。特徴的なものとしては十勝沖地震震源域周辺の余効変動と伊豆諸島北部の北東-南西伸張などに限られる。

なお国外の地震であるが、2006年11月15日千島列島(択捉島の東北東、約390 km付近)で発生したM7.9の地震に伴って、北海道の北部の広い範囲でわずかな地殻変動が観測されている²⁵⁾。

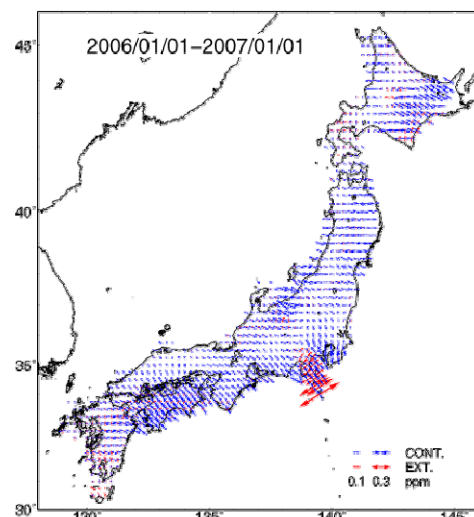


図1-9 2006年1月-2007年1月の全国水平歪み図

2.9 2007年

2007年3月21日に能登半島地震(M6.9)が発生し、電子基準点「富来」(志賀町富来)で南西方向へ約21 cmの移動と約7 cmの隆起が観測された。また、海岸線ではカキの分布上限高度と海面の差から、最大隆起量40 cm・最大沈降量10 cmの上下変位が推定される²⁶⁾など、能登半島周辺で顕著な地殻変動が観測された。国産の地球観測技術衛星「だいち」のLバンドSAR(PALSAR)による干渉解析がこの地震による地殻変動を明瞭に捉え、左横ずれ成分を伴う逆断層の滑り分布モデルが作成された。SAR干渉画像の解析からは、断層運動に伴う地殻の弾性変形から推定される変動と実際に観測された変動の差により、地滑り等に伴う局所的な地表変形まで検出できたことが報告された²⁷⁾。この地震に関する詳しい記述は第3章10節を参照されたい。

7月16日には新潟県中越沖地震(M6.8)が発生した。電子基準点「柏崎1」で北西方向へ約17 cm変位するなど新潟県を中心に地殻変動が観測された。地震後に行われた水準測量では観音岬近くの一等水準点4458で柏崎験潮場付近の水準点3742に対して約29 cm隆起していることが観測された²⁸⁾ほか、カキ・イガイ類など潮間帯海棲生物の分布高度を指標とする調査では海岸線で最大22 cmの隆起、7 cmの沈降が確認される²⁹⁾など、顕著な地殻変動が観測された。「だいち」によるSAR干渉解析では震源域周辺で鮮明な干渉画像が得られ、観音岬周辺の隆起域と柏崎市西部の沈降域が確認できるなど、面的な変動が詳細に把握された。また験潮データからは柏崎験潮場が約4 cm沈降したことが推定された。地殻変動データに基づく断層モデルは震源断層が海域にかかっているために傾斜方向の確定がやや難しく、い

くつかの可能性が検討されたが、最終的に南東傾斜の主断層とその北部に北西傾斜の副断層が存在するというモデルが地震調査委員会での結論となった³⁰⁾。「だいち」による SAR 干渉画像の解析からは、震源断層の動きによる弾性的な変形の他に、震源域の東側にあたる西山丘陵で帯状の隆起域が確認され、小木ノ城背斜の活褶曲が地震時に成長したと解釈された。この地震に伴っては GEONET および大学連合の稠密 GPS 観測³¹⁾で余効変動が観測された。この地震に関する詳しい記述については第3章11節を参照されたい。

8月13日から8月22日にかけて、房総半島の東部で3回目のスロースリップイベントが発生し、GEONET および Hi-net の傾斜計で地殻変動が観測された。地殻変動から、滑り領域は1996年、2002年とほぼ同じ場所で、解放されたモーメントは Mw6.4～6.6 相当と推定された³²⁾³³⁾。

紀伊半島南部は、愛知県東部から三重県にかけて観測されている低周波微動・短期的スロースリップ発生域に隣接する地域であるが、Hi-net の傾斜計では低周波微動発生に伴って傾斜変動が起きていることが不明瞭とされていた。産業技術総合研究所が2007年から紀伊半島南部に展開した観測点で、11月中旬に発生した低周波微動に伴い歪み変化が観測され、この領域においても短期的スロースリップがプレート境界で発生していることが示唆された³⁴⁾。

1年間の水平歪み図(図1-10)では能登半島地震、新潟県中越沖地震に対応する大きな歪みが目立つほか、房総半島でもスロースリップの影響が見える。また、2006年末12月から2007年1月にかけて御嶽山付近で発生した微小地震活動に関連して山体を挟む基線での膨張が確認されており、この影響が岐阜-長野県境付近にわずかに見られる。

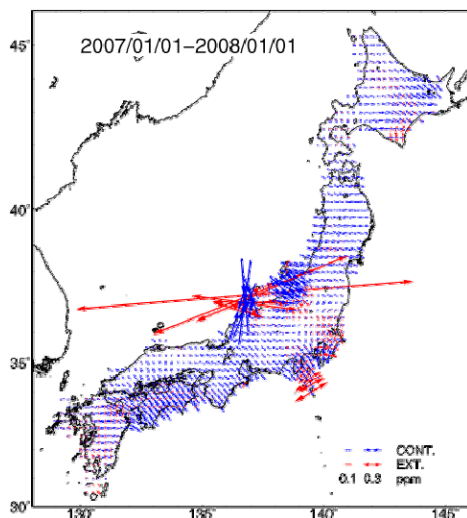


図1-10 2007年1月-2008年1月の全国水平歪み図

2.10 2008年

5月8日に茨城県沖で発生した M7.0 の地震に伴い、茨城県の太平洋沿岸を中心に南東から東向きに最大1 cm 程度の変位が観測された。この地震は余効変動を伴い、地殻変動から推定された滑り領域は本震から西に広がる傾向をもっていた。これは余震域が次第に西に拡大したものと調和的である³⁵⁾。

6月14日には、岩手・宮城内陸地震 (M7.2) が岩手-宮城県境付近の内陸部で発生した。この地震により電子基準点「栗駒2」は南東方向に約1.5 m 変位、上下方向には約2.1 m 隆起する変動を記録した。GPS 連続観測で確認された1回の地震に伴う地殻変動としては、観測史上最大のものとなった³⁶⁾。また、震源近傍の KiK-net 観測点「一関西」の加速度記録からも二回積分により北東方向に約63 cm 変位、上下方向に140 cm 隆起という大きな変動が確認された。この加速度記録からは傾斜変動も推定されている³⁷⁾。震源域周辺には東北大学が展開する GPS 観測網もあり、これらをふくめて東西圧縮の逆断層を示す変動が確認された³⁸⁾。「だいち」のデータによる SAR 干渉解析も複数の機関で行われ、地殻変動データに基づくいくつかの断層モデルが提唱された。主に西傾斜の一枚あるいは二枚以上の断層の活動であると推定されている。また、SAR の位相データでなく強度データから画像マッチングの手法により大変位の量を推定することも行われた。この地震に関する詳しい記述については第3章12節を参照されたい。

7月19日に発生した福島県沖の地震 (M6.9) では、電子基準点「小高」(福島県南相馬市) が東南東方向へ1 cm 弱変位するなど、わずかな地殻変動が観測された。この地震の震源域周辺では、2007年11月に発生した M6.0 の地震以降、非定常的なプレート間滑りが起きていたことが GEONET データの解析から推定されており、地震発生前の前駆的現象の可能性が指摘された。

9月11日に発生した十勝沖の地震 (M7.1) では、電子基準点「えりも2」で東南東方向へ約2 cm の変位が観測されるなど、北海道太平洋岸で地殻変動が観測された。地殻変動から推定された破壊域は、2003年十勝沖地震の主な滑り領域の南側の領域であった³⁹⁾。

この他、2月22日に発生した父島近海の地震 (M6.6) により父島で1 cm 弱の変位が観測されている。

水平歪み図(図1-11)では、岩手・宮城内陸地震の影響で東北地方中央部に顕著な東西圧縮が見えていたほか、十勝沖地震の影響も見られる。また、茨城県沖地震、福島県沖地震の影響で、東南北部から

関東地方の太平洋岸では通常見られる東西圧縮が弱くなっている。

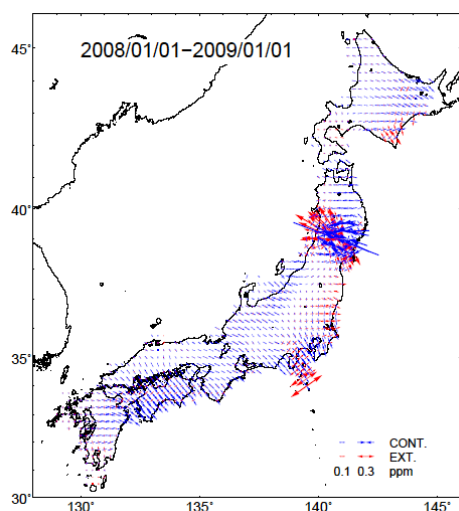


図 1-11 2008 年 1 月-2009 年 1 月の全国水平歪み図

なお、国外の地震であるが 5 月 12 日に発生した中国四川省の地震 (M7.9, 気象庁による) により、国内の地殻変動観測施設でも歪み変化などが観測されている⁴⁰⁾。東海地域に設置されている気象庁の体積歪み計により観測された歪み波形から地震の規模は Mw8.0 相当と推定されることが報告された⁴¹⁾。「だいち」PALSAR のデータ解析も各機関で精力的に行われ、断層破壊の主要部分は 285 km 程度であったこと、断層南西部では逆断層成分が大きく、北東部では横ずれ成分が大きい滑り分布であったことなどが推定、報告されている⁴²⁾。

3. 上下変動

地殻の上下変動については GEONET による観測精度も水平変動と比較すると劣るとされているが、データの蓄積により定常的なトレンドを十分議論できる基礎データとなることを村上・小沢 (2004)⁴³⁾ が示した。図 2 は同論文に掲載された 1996 年 4 月から 2003 年 4 月のデータに基づく日本列島の上下変動速度場である。

北海道東部太平洋沿岸の沈降、東北地方太平洋岸の沈降と日本海岸の隆起、中部山岳地帯の沈降、東海地方～紀伊半島南部～四国南部の南海トラフ沿い沿岸部の沈降とその後背地の隆起などを地域的な特徴として議論されている。本稿の対象期間である 2008 年末までの期間では、2003 年十勝沖地震など、この傾向に影響を与えるようなイベントも発生しているが、比較的平穏な時期に対応した図 2 で全般的な傾向を概観し、潮位観測データから推定された

2003 年以降の上下変動の傾向と合わせて紹介する。ただし、村上・小沢 (2004) は日本全国の上下変動速度が平均で 0 となることを仮定していることには留意する必要がある。

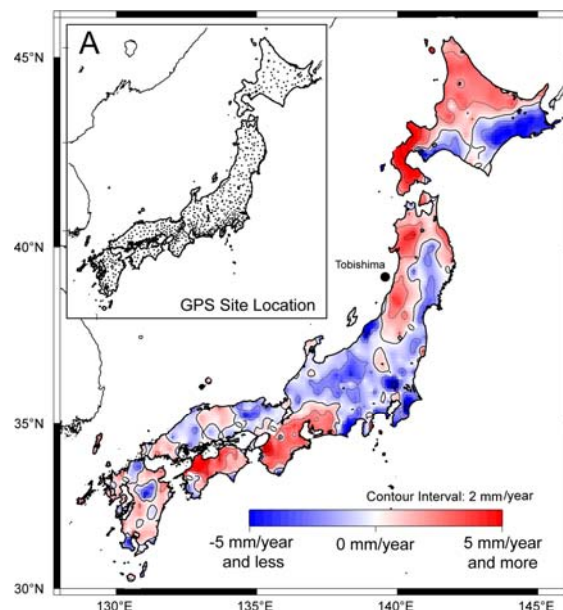


図 2 1996 年 4 月-2003 年 4 月の日本列島の上下変動速度場

北海道東部太平洋沿岸は潮位観測からも 2003 年までの時期の沈降が確認できる。例えば国土地理院 (2008)⁴⁴⁾ では、加藤・津村 (1979)⁴⁵⁾ の方法による験潮場の上下変動を時系列で示しているが、道東の花咲、釧路では 2003 年までの期間、沈降の傾向が明瞭である。しかし、2003 年十勝沖地震以降、その傾向はやや不明瞭となった。十勝沖地震の震源域東側に広がった余効滑りや 2004 年 11 月 29 日の釧路沖の地震などに伴うとみられる隆起があり、この 10 年間でも前半と後半では様相が明らかに異なる。一方、日高、十勝周辺では十勝沖地震に伴う沈降が広く観測されたが、余効変動ではそれ以前のトレンドと比較してやや隆起の傾向が続いている⁴⁶⁾。

東北地方においては、太平洋側の定常的沈降傾向が釜石、大船渡、鮎川、相馬でこの 10 年間続いていたことが潮位観測データからも確認できる。2005 年 8 月 16 日の宮城県沖の地震時には牡鹿半島周辺が沈降し、その後の余効変動でも非定常な沈降成分が 1 年以上見られた⁴⁷⁾。一方、八戸・宮古の周辺では GPS 観測、潮位観測データからも上下変動は明瞭でない。東北地方内陸部では 2008 年岩手・宮城内陸地震により震源近傍の電子基準点「栗駒 2」が 2m 以上大きく隆起した。定常的には特に大きな隆起速度を持たない地域であり、断層運動による山地の成長を示すイベントであった。

中部山岳地域の沈降を示す観測結果については、山岳地域は長期的に隆起しているという通念と反するため議論を呼んだ。数年の観測結果が長期的な傾向と一致しないのは変動速度の揺らぎである可能性も指摘されたが、電子基準点の配置が多くは山岳部ではなく山沿いの盆地にあるため、観測された沈降傾向が地域を代表するものではないという議論があり⁴⁸⁾、これを確認するための山頂部の三角点における繰り返し観測も行われているが、まだ決着を見るには十分なデータが蓄積されているとは言えない。

東海から四国にかけての太平洋沿岸における沈降は、以前からの水準測量の繰り返しによっても確認されているが、この10年間においても同様の傾向が続いていることが観測されている。御前崎周辺における年4回の繰り返し水準測量では、掛川市(BM140-1)からみて御前崎市(旧浜岡町, BM2595)が年間平均約5 mmの速度でここ40年間沈降を続けているが、この10年間においては、東海スロースリップイベントの時期に当たる2000年から2005年にかけて、その速度が若干速まった⁴⁹⁾。東海地方においては年1回の水準測量が行われており、上下変動のパターン変化はGPSだけでなく水準測量結果からも把握されているが⁵⁰⁾、スロースリップ期間においては、非定常的な隆起の中心が浜名湖の北東側にあり、掛川側の隆起量が大きかったために相対的に御前崎の沈下速度が速まったようにみえていたと考えられる。

四国の太平洋岸においても、半島の先端部が付け根に対して沈降していることが水準測量で確認されている。室戸岬におけるこの10年の沈下量は約6 cmで水準測量とGPS観測による結果はよく一致している。特にこの10年間では室戸岬周辺の水準測量の頻度を高めて先端部の沈下の監視を強化している。最近の沈下速度はそれ以前とほぼ同じという観測結果になっている⁵¹⁾。

その他、地殻活動に伴う上下変動が特徴的に観測されている地域としては伊豆半島東部がある。伊豆半島の海岸線沿い1周と半島中央部を縦横断する水準測量がほぼ毎年実施されている。伊東市周辺では、1980年代から90年代にかけて活発な群発地震活動とそれに関連した隆起の変動が観測されていたが、この10年間はその時期と比べると比較的静穏な状況にある。それでも2006年3月から5月にかけての地震活動に関連して最大で4 cm程度の隆起が伊東駿潮場近くで観測されている⁵²⁾。

参考文献

- 1) 国土地理院, 2008. 東海地方の地殻変動. 地震予知連絡会会報, **80**, 283-342.
- 2) Sagiya, T., S. Miyazaki and T. Tada, 2000. Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan. *Pur. Appl. Geophys.*, **157**, 2302-2322.
- 3) T. Nishimura, S. Ozawa, M. Murakami, T. Sagiya, T. Tada, M. Kaidzu, and M. Ukawa, 2001. Crustal Deformation caused by magma migration in the northern Izu Islands, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 3745-3748.
- 4) Ozawa, S., S. Miyazaki, Y. Hatanaka, T. Imakiire, M. Kaidzu, and M. Murakami, 2003. Characteristic silent earthquakes in the eastern part of the Boso peninsula, Central Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1283, doi:10.1029/2002GL016665.
- 5) 木股文昭, イルワン・メイラノ, 深野慶太, 2004. GPSにより観測された八丈島における地殻変動とそのダイク貫入モデルの推定(2002年8月13~22日). 火山, **49-1**, 13-22.
- 6) 気象庁, 2004. 東北地方とその周辺の地震活動(2003年5月~2003年10月). 地震予知連絡会会報, **71**, 213-220.
- 7) Nishimura, T., T. Imakiire, H. Yarai, T. Ozawa, M. Murakami, and M. Kaidzu, 2003. A preliminary fault model of the 2003 July 26, M6.4 northern Miyagi earthquake, northeastern Japan, estimated from joint inversion of GPS, leveling, and InSAR data. *Earth, Planets and Space*, **55**, 751-757.
- 8) 国土地理院, 2004. 北海道地方の地殻変動. 地震予知連絡会会報, **71**, 135-187.
- 9) Ozawa, S., M. Kaidzu, M. Murakami, T. Imakiire, and Y. Hatanaka, 2004. Coseismic and postseismic crustal deformation after the Mw8 Tokachi-oki earthquake in Japan. *Earth, Planets and Space*, **56**, 675-680.
- 10) 国土地理院, 2004. 中国・四国・九州地方の地殻変動. 地震予知連絡会会報, **71**, 680-694.
- 11) 小原一成, 廣瀬仁, 2004. 豊後水道付近のスロースリップイベントと深部低周波微動. 地震予知連絡会会報, **71**, 670-679.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.

- 15) 国土地理院, 2005. 北海道地方の地殻変動. 地震予知連絡会会報, **73**, 35-60.
- 16) 気象庁, 2005. 埋込式体積歪計の記録から推定されるスマトラ沖地震の Mw. 地震予知連絡会会報, **74**, 575-577.
- 17) 地震予知総合研究振興会東濃地震科学研究所, 名古屋大学環境学研究科, 2005. 深部ボアホール歪観測によるスマトラ地震. 地震予知連絡会会報, **74**, 591-593.
- 18) 産業技術総合研究所, 2005. 2004 年スマトラ島西方沖の地震 (M9.0) と 2005 年スマトラ島北部の地震 (M8.5) の地震波に伴う地下水位変化. 地震予知連絡会会報, **74**, 598-604.
- 19) 国土地理院, 2005. 電子基準点が捉えたスマトラ沖の地震 (2004 年 12 月 26 日、M9.0) の地震波. 地震予知連絡会会報, **74**, 578-579.
- 20) 飛田幹男, 水藤尚, 2005. 人工衛星画像を用いた海岸線変化抽出による 2004 年スマトラ沖地震・インド洋津波に伴う隆起・沈降域の把握. 地震予知連絡会会報, **74**, 580-588.
- 21) 国土地理院, 2005. 地殻変動統合解析による福岡県西方沖地震のすべり分布. 地震予知連絡会会報, **74**, 494-497.
- 21) 国土地理院, 2006. 東北地方の地殻変動. 地震予知連絡会会報, **75**, 75-114.
- 22) 海上保安庁, 2006. 8 月 16 日宮城県沖の地震前後の海底地殻変動観測結果. 地震予知連絡会会報, **75**, 152-155.
- 23) 地震調査委員会, 2005. 2005 年の主な地震活動ー宮城県沖の地震活動【2005 年 8 月 16 日 M7.2 深さ約 40km】.
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/major_act/act_2005.htm#a20050816
- 24) 国土地理院, 2006. 伊豆地方の地殻変動. 地震予知連絡会会報, **76**, 215-245.
- 25) 国土地理院, 2007. その他の地域の地殻変動. 地震予知連絡会会報, **77**, 460-470.
- 26) 産業技術総合研究所, 2007. 能登半島地震の緊急調査報告. 地震予知連絡会会報, **78**, 386-387.
- 27) 国土地理院, 2007. 北陸・中部地方の地殻変動. 地震予知連絡会会報, **78**, 424-456.
- 28) 国土地理院, 2008. 北陸・中部地方の地殻変動. 地震予知連絡会会報, **79**, 403-477.
- 29) 産業技術総合研究所, 2008. 2007 年新潟県中越沖地震に伴う海岸部の地殻上下変動. 地震予知連絡会会報, **79**, 496-497.
- 30) 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2008. 平成 19 年 (2007 年) 新潟県中越沖地震の評価 (主に断層面に関する評価).
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/08jan_chuetsu_oki/index.htm
- 31) 東北大学理学研究科・九州大学大学院理学研究院・北海道大学大学院理学研究院・東京大学地震研究所・名古屋大学大学院環境学研究科・富山大学大学院理工学研究部, 2008. 稠密 GPS 観測に基づく 2007 年新潟県中越沖地震の余効変動. 地震予知連絡会会報, **79**, 478-483.
- 32) 防災科学技術研究所, 2008. 2007 年 8 月に発生した房総沖スローリップと群発地震活動. 地震予知連絡会会報, **79**, 123-127.
- 33) 国土地理院, 2008. 関東甲信地方の地殻変動. 地震予知連絡会会報, **79**, 140-150.
- 34) 産業技術総合研究所, 2009. 紀伊半島における SSE に伴う歪変化 (2008 年 6 月および 11 月). 地震予知連絡会会報, **81**, 502-521.
- 35) 国土地理院, 2008. 関東甲信地方の地殻変動. 地震予知連絡会会報, **80**, 157-171.
- 36) 国土地理院, 2009. 東北地方の地殻変動. 地震予知連絡会会報, **81**, 208-263.
- 37) 防災科学技術研究所, 2009. K-NET 及び KiK-net で記録された平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震の強震動. 地震予知連絡会会報, **81**, 165-168.
- 38) 2008 年岩手・宮城内陸地震緊急観測グループ, 東北大学大学院理学研究科, 2009. 平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震について. 地震予知連絡会会報, **81**, 172-181.
- 39) 国土地理院, 2009. 北海道地方の地殻変動. 地震予知連絡会会報, **81**, 66-83.
- 40) 京都大学防災研究所, 2008. 2008 年 5 月 12 日中国四川省地震による歪地震動 (京都大学防災研究所 近畿・北陸地殻変動総合観測線). 地震予知連絡会会報, **80**, 533-538.
- 41) 気象庁, 2008. 2008 年 5 月 12 日中国四川省の地震 (M7.9) について. 地震予知連絡会会報, **80**, 512-518.
- 42) 国土地理院, 2009. 中国四川省の地震. 地震予知連絡会会報, **81**, 579-582.
- 43) 村上亮・小沢慎三郎, 2004. GPS 連続観測による日本列島上下地殻変動とその意義. 2004, 地震 **2**, 57-2, 209-232.
- 44) 国土地理院, 2008. 全国の地殻変動. 地震予知連絡会会報, **80**, 5-27.
- 45) 加藤照之・津村建四朗, 1979. 潮位記録から推定される日本の垂直変動. 地震研究所彙報, **54**, 559-628.

- 46) 国土地理院, 2008. 北海道地方の地殻変動. 地震予知連絡会会報, **80**, 39-50.
- 47) 国土地理院, 2008. 東北地方の地殻変動. 地震予知連絡会会報, **80**, 75-79.
- 48) 鷲谷威・井上政明, 2003. 測地測量データで見る中部日本の地殻変動. 月刊地球, **25**, 918-928.
- 49) 国土地理院, 2008. 東海地方の地殻変動. 地震予知連絡会会報, **80**, 283-342.
- 50) 国土地理院, 2008. 東海地方の地殻変動. 地震予知連絡会会報, **79**, 244-323.
- 51) 国土地理院, 2008. 中国・四国地方の地殻変動. 地震予知連絡会会報, **80**, 467-471.
- 52) 国土地理院, 2008. 伊豆地方の地殻変動. 地震予知連絡会会報, **80**, 185-220.