

北アルプス穂高連峰の隆起に関する測地学的検証 ～一等三角点穂高岳でのGNSS観測～

Geodetic examination of uplift in the Hotaka peaks, northern Japan Alps ～GNSS observation at the 1st-order triangulation point “Hodakadake”～

地理地殻活動研究センター 西村卓也¹

国土地理院穂高岳測量班

Geography and Crustal Dynamics Research Center
Takuya NISHIMURA

Hotaka Dake Survey Team of the Geospatial Information Authority of Japan

要 旨

最近数百万年の間の急激な隆起によって形成されたと考えられている飛騨山脈（北アルプス）が、現在でも隆起しているかを明らかにするため、1999年、2005年、2008年、2012年に、前穂高岳山頂にある一等三角点「穂高岳」でのGNSS観測を行った。その結果、1999年、2005年、2008年の3回の観測からは、年間約5mmの隆起傾向が明らかとなった。しかし、2012年の観測データは、2008年に比べて約8mmの沈降を示した。この沈降は、東北地方太平洋沖地震や周辺で発生した群発地震の影響を受けた可能性がある。飛騨山脈北部の立山周辺に設置されたGNSS連続観測点のデータは、経年的な隆起傾向を示しており、穂高岳の観測結果と合わせて、飛騨山脈は現在でも隆起していると考えられる。

1. はじめに

日本列島中央部には、飛騨山脈（北アルプス）、木曾山脈（中央アルプス）、赤石山脈（南アルプス）といった標高3,000m級の山々が連なっており、日本アルプスと呼ばれている。これらの山脈は、地形・地質学的研究から、第四紀に急激に隆起した（例えば、米倉ほか、2001）が、その隆起速度はかなりの変遷があったと考えられている。飛騨山脈については、Harayama（1992）が山脈主稜線西側に露出している滝谷花崗閃緑岩が約190～80万年前に形成された世界で最も若い花崗岩類であることを発見した。さらに、原山ほか（2003）は、飛騨山脈の地質学的構造から、隆起は主に2段階で生じ、最初の隆起は、鮮新世後期から更新世初頭（約270～150万年前）、2回目の隆起は前期更新世後半（約130万年前）以降に生じたと主張している。

日本アルプスの測地学的手法に基づく上下変動観測については、壇原（1971）が1965年以前の約70年間の水準測量の結果から、赤石山脈周辺で4mm/年の隆起を推定し、山脈の隆起運動が現在も継

続していることを指摘した。しかし、飛騨山脈の周辺では顕著な隆起は検出されなかった。鷺谷・井上（2003）は、1990年頃までの100年間の水準測量結果を検討し、掛川から諏訪湖へと北上する水準路線に沿っては顕著な隆起が生じ、赤石山脈と木曾山脈及びその周辺では顕著な隆起が定常的に生じており、山地の形成に関連した地殻変動が捉えられている可能性があるとしている。村上・小沢（2004）は、国土地理院のGEONET（GNSS連続観測システム）による日本全国の上下変動を整理し、日本アルプスを含む中部山岳地帯では、隆起ではなく沈降傾向にあることを示した。よって、飛騨山脈については、地質学的時間スケールでは隆起してきたことが確実であるが、測地学的手法によっては隆起をしているという証拠はないのが現状である。また、従来の測地学的データ解析に用いられた水準点や電子基準点は、そのほとんどが山地の合間にある盆地に設置されているため、山脈そのものの上下変動を計測しているわけではない。そこで国土地理院では、1999年度から2012年度まで、一般研究「日本アルプスの隆起運動に関する研究」（以下、本研究という）を実施し、日本アルプスの高峰に設置された三角点においてGNSS観測を実施し、山脈の高さを高精度に測定することで、山地の隆起を測地学的に検証することを試みた。本稿は、本研究で行われたGNSS観測結果と周辺の電子基準点データを整理して、飛騨山脈及びその周辺での上下変動を明らかにすることを目的とするものである。

なお、本研究の開始当初は、飛騨山脈に限らず日本アルプス全体のGNSS観測の実施を目指していたが、作業量等の観点から、飛騨山脈での観測に集中した。飛騨山脈での観測は、14年間に計4回の直営観測作業を一等三角点「穂高岳」において実施し、その都度、穂高岳測量班を編成した。測量班のメンバーは、1999年は石本正芳技官、小田切聡子技官、坂井尚登技官、鷺谷威技官、西村卓也技官、2005年

現所属：¹ 京都大学防災研究所



図-1 一等三角点「穂高岳」での観測風景。
 (上) 2005年の観測, (中) 2008年の観測,
 (下) 2012年の観測。

は、大井信三技官、水藤尚技官、西村卓也技官、森克浩技官、朝比奈政郎測手、2008年は高野和友技官、中埜貴元技官、西村卓也技官、朝比奈政郎測手、嘉陽淳次測手、2012年は、池田尚應技官、西村卓也技官、本田昌樹技官、朝比奈政郎測手、中島宗治測手であった。本稿の著者である国土地理院穂高岳測量班は以上のメンバーを指すものである。

2. 観測作業及びGNSSデータ解析

一等三角点「穂高岳」では、1999年9月8～10日、2005年8月31日～9月2日、2008年9月7～9日、2012年9月10～12日にそれぞれ約48時間のGNSS観測を行った。三角点は、北アルプスの最高峰で国内第3位の標高(3,190m)を誇る奥穂高岳ではなく、その南側に位置する前穂高岳(標高3,090m)の山頂

にある。前穂高岳への到達ルートとしては、上高地から北上して重太郎新道を直登する距離の短い岳沢ルートと梓川沿いに横尾まで平坦な道を行き、そこから涸沢、ザイテングラート、奥穂高岳を経る涸沢ルートの2つのルートがある。本作業では、バッテリーやGNSS受信機など観測機材があるため、距離は長いが比較的傾斜が緩い涸沢ルートを主に用いたが、撤収の際には岳沢ルートも用いた。自動車到達点から三角点への徒歩での移動時間は、涸沢ルートで約10時間であった。前穂高岳山頂部は、比較的平坦であり、三角点の埋設状況も良好である。よって、天気さえ良ければ、GNSSアンテナの設置観測作業に大きな困難はなく、観測条件も良好であった。穂高連峰は、登山客の人气が高く、三角点周辺にも日中は多数の登山客が訪れる。そのため、良好なGNSS観測を実施し、登山客の安全を確保するため、観測中は、三角点の周囲をロープで囲うとともに、日中は周辺での監視を行った(図-1)。GNSSアンテナは4回とも同一のTrimble Permanent L1/L2 (TRM23903.00)アンテナを用い、GNSS受信機は1999年の観測時のみTrimble4000SSE、あとの3回はTrimble5700を用いた。用いたGNSS衛星はGPS衛星のみである。

GNSSデータの解析は、他の基準点を用いなくても高精度な座標値が算出できる精密単独測位法(PPP; Zumberge et al., 1997)において定評があるGIPSY Ver.6.1を用いた。GNSS衛星の軌道情報としては、GIPSYの開発元であるジェット推進研究所(JPL)の精密暦及び時計情報を用いた。そしてJPLから提供される座標変換パラメータを用いて、ITRF2008準拠(IGS2008)のGPS時刻に基づく1日毎の座標値を算出した。GNSS解析時の設定としては、GIPSYのgd2p.plスクリプトに実装されている一般的なものを用いた。大気遅延についてはマッピング関数としてGMFを用い、天頂遅延量と大気遅延勾配の推定を行った。また、固体地球潮汐に加えて海洋潮汐荷重変形の補正も行った。なお、TSKB等のGNSS連続観測点のデータを用いてGIPSYの精密単独測位法とGEONETの定常解析結果(F3)を比較し、測位解に大きな差が出ないことを確認している。

3. 測位結果

精密単独測位法によって得られた座標値を表-1、座標値の変化グラフを図-2に示す。なお、1994年に高度基準点測量、2008年に高度地域基準点測量によって「穂高岳」でのGNSS観測が行われており、表-1及び図-2はこれらのGNSSデータを上記の解析方法で座標値を算出した結果を含んでいる。しかし、これらのGNSS観測は、観測時間が6時間から13

時間と短く、用いた GNSS アンテナ、受信機も本研究で使用したものと異なるため、単純には結果が比較できない。そのため、これらの観測結果は参考にとどめることとする。図-2 の縦軸は 1994 年の緯度、経度、楕円体高を基準とした相対的な座標値を南北・東西・上下成分で表して、位置の変化を見たものである。4 回の観測において各回の日平均座標値の差は、最大で南北方向で 3.4mm、東西方向 2.9mm、上下方向 9.4mm と小さく、良好な観測が行われている。座標値の時間変化を見ると、2012 年の観測値はそれ以前とは大きく異なっている。特に東西成分は、図-2 の基準で言うと 9 月 20 日が 44.03cm、9 月 21

日が 43.83cm であり、枠外となった。このような大きな変化は 2011 年 3 月 11 日発生した東北地方太平洋沖地震に伴う変化であると考えられる。2012 年を除く、1999 年、2005 年、2008 年の座標値に一次関数をあてはめると、南北方向 12.1mm/年、東西方向 8.0mm/年、上下方向 5.1mm/年という変動速度が得られ、GNSS によって穂高岳で年間約 5mm の隆起が観測されたといえる。ただ、南北成分と東西成分に関しては、図-2 からほぼ直線的な変化が読み取れ、一次関数をあてはめた時の相関係数も 0.99 を超えているが、上下成分の相関係数は約 0.9 であり、直線的に隆起しているとは必ずしも言いがたい。また、

表-1 GNSS 観測による一等三角点「穂高岳」の ITRF2008 系における座標値

観測年月日 (GPS 時刻) (通算日)	観測時間 (時)	緯度 (°)	経度 (°)	楕円体高 (m)	備考
1994/9/21(264)	13.0	36.281979471	137.660571045	3133.3877	高度基準点測量
1999/9/8(251)	21.7	36.281978993	137.660571254	3133.3374	本研究 (1 回目)
1999/9/9(252)	24.0	36.281978980	137.660571275	3133.3468	本研究 (1 回目)
2005/8/31(243)	22.8	36.281978294	137.660571845	3133.3617	本研究 (2 回目)
2005/9/1(244)	24.0	36.281978780	137.660571817	3133.3634	本研究 (2 回目)
2008/9/7(252)	23.6	36.281978028	137.660572034	3133.3856	本研究 (3 回目)
2008/9/8(253)	24.0	36.281977998	137.660572069	3133.3942	本研究 (3 回目)
2008/9/13(257)	6.0	36.281978000	137.660572385	3133.3558	高度地域基準点測量
2012/9/20(264)	23.4	36.281978295	137.660575955	3133.3790	本研究 (4 回目)
2012/9/21(265)	24.0	36.281978308	137.660575932	3133.3851	本研究 (4 回目)

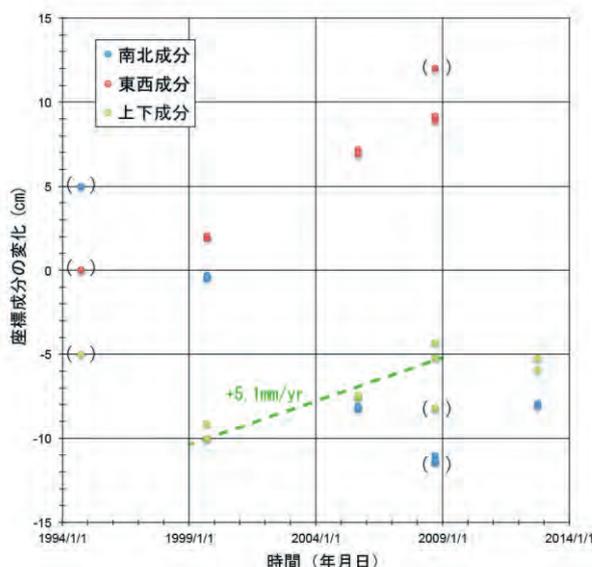


図-2 一等三角点「穂高岳」の座標変化。2012 年の東西成分は東北地方太平洋沖地震による地殻変動のためグラフの範囲外となっている。緑の点線は 1999、2005、2008 年の楕円体高に対する近似直線。括弧のシンボルは高度基準点測量及び高度地域基準点測量による。

地形形成における隆起沈降を議論する場合には、ITRF2008 座標系よりも周辺に対する相対的な隆起沈降も重要であると考えられる。よって、次章で周辺の GEONET 電子基準点データと比較して上下変

動の議論を行う。

4. GEONET データによる飛騨山脈周辺の上下変動

飛騨山脈及びその周辺は地形的に険しく、GEONET の GNSS 連続観測点は多いとは言えない。それでも、糸魚川-静岡構造線断層帯に関連する地殻変動観測のための観測点や 2002 年以降には乗鞍岳や立山などの標高 2500m を超える場所にも観測点が設置され、村上・小沢 (2004) の解析時に比べると観測点数が大幅に増加している。そこで、GEONET の定常基線解析結果 (F3) を用いて、飛騨山脈及びその周辺の上下変動を見てみる。図-3 及び図-4 に、穂高岳周辺の GEONET 観測点の上下成分の時系列と 2005 年 1 月 1 日から 2010 年 12 月 31 日までの 6 年間の平均上下速度分布を示す。なお、GEONET 定常解析の座標値 (F3 解) は、ITRF2005 座標系に準拠しており、穂高岳の GNSS 解析で用いた ITRF2008 座標系とは異なるが、ITRF2005 と 2008 間の座標変換パラメータで時間に依存する成分は、並進成分の年間 0.3mm と極めて小さい。よって、本稿では変動速度の座標系による違いは無視することにする。

図-3 の時系列には、ほとんどの観測点で東北地方太平洋沖地震の前に沈降傾向にあることと東北地方太平洋沖地震の後は隆起が見られるという特徴がある。地震前の沈降は図-4 の上下変動分布図からも明瞭であり、特に飛騨山脈の東側にある松本盆地から浅間山にかけては顕著に沈降している。この変化は村上・小沢 (2004) が示した中部地方での沈降傾向

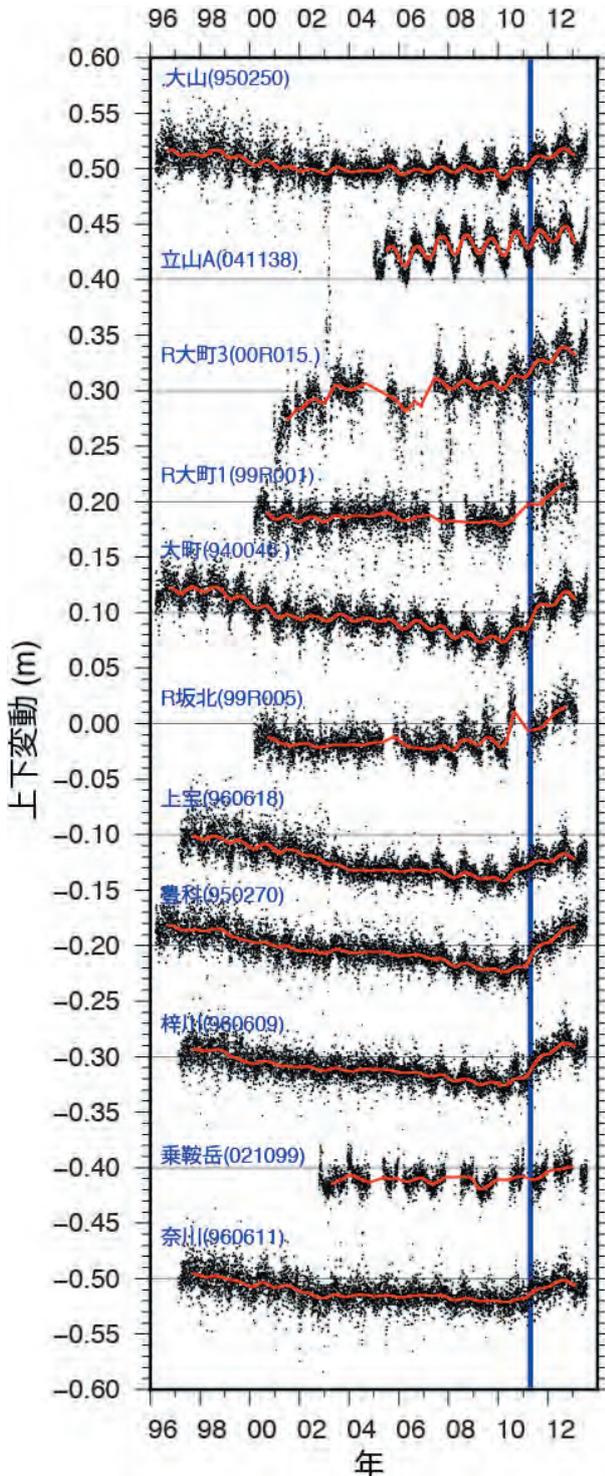


図-3 GEONET 観測点における飛騨山脈及びその周辺の上下変動。青縦線は東北地方太平洋沖地震を表す。黒点及び赤線は、日座標値とその 365 日移動平均を表す。観測点の位置は図-4 に示す。

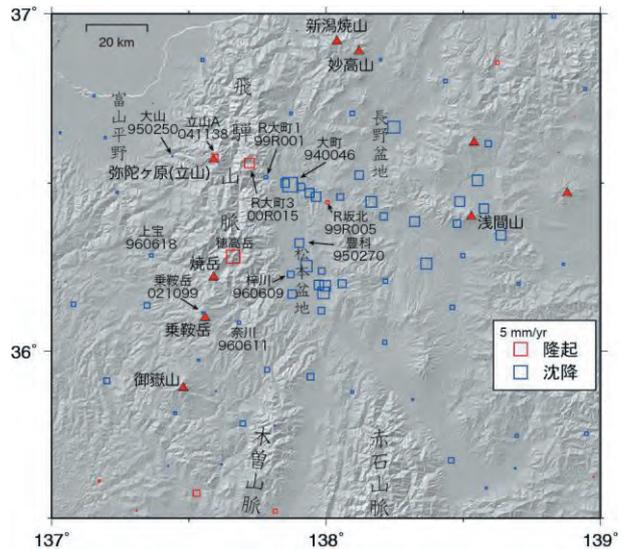


図-4 2005-2010 年の飛騨山脈及びその周辺の上下変動速度分布。穂高岳の上下変動は、1999,2005,2008 年の 3 回の繰り返し観測結果を示す。

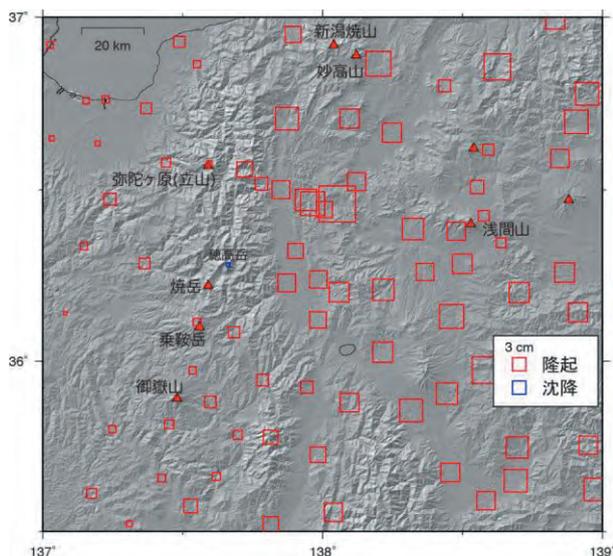


図-5 2008年9月3-12日から2012年9月16-25日までの飛騨山脈及びその周辺の上下変動分布。穂高岳の上下変動は、2008年と2012年の繰り返し観測の差を示す。

と一致している。沈降速度は、松本盆地や長野盆地といった堆積盆地の観測点がより大きいように見えるものの、周辺の丘陵地でも沈降しており、数10kmの波長のやや広域で沈降しているように見える。その一方、飛騨山脈中軸部にある立山AやR大町3では、若干の隆起傾向が見られ、穂高岳での繰り返し観測で見られた隆起と整合している。立山では、GEONET観測点以外でも標高2839mの浄土平において、1996～2004年の間にGEONET富山観測点に対して年間3.8mmの隆起が観測されており(道家ほか, 2008)、立山AやR大町3の隆起と調和的である。よって東北地方太平洋沖地震前の5～10年程度のGNSS観測からは、飛騨山脈の中軸部では年間数mm程度で隆起していると言える。

東北地方太平洋沖地震以後の隆起については、大町や豊科、梓川では地震時の隆起が見られるが、ほとんどの観測点では地震後の隆起がより明瞭である。図-5は、穂高岳における2008年と2012年の繰り返し観測と同時期のGEONET観測点の上下変動を合わせて示したものである。全体として隆起が卓越し、特に飛騨山脈より東側では4cm以上の隆起が観測されている場所が多い。飛騨山脈よりも西側では隆起量は小さくなっているが、穂高岳を除いて沈降した場所は見られない。そのため、2008年から2012年までの穂高岳の約8mmの沈降は、かなり局所的なものだと言える。一方、より広域の上下変動を見ると、東北地方太平洋沖地震後に、関東から甲信越地方にかけての東北地方太平洋沖地震の震源からドーナツ状の隆起域が見られている(例えば、国土地理

院, 2013の第9図)。図-5の範囲は概ねこの隆起域に対応しており、穂高岳でも長波長の隆起変動に局所的な大きな沈降が重なり合っていると考えることができる。よって、穂高岳での局所的な原因による沈降は、観測された8mmよりもさらに大きい可能性がある。

局所的な沈降の原因としては、群発地震活動による地殻変動や重力性の崩壊などが考えられる。飛騨山脈では、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震の本震発生直後に焼岳、乗鞍岳周辺で地震活動が活発化し、特に焼岳山頂の北1-5kmの深さ4km以浅では、M4.5以上の地震2個を含む1ヶ月程度の群発地震活動があった(大見ほか, 2012)。穂高岳はこの地震活動域に隣接しており、この群発地震に伴う地殻変動が生じた可能性があるが、地震波から決められているマグニチュードや大きな地震のメカニズム解が逆断層である(大見ほか, 2012)ことを考えると地震そのものの地殻変動で穂高岳が有意に沈降したとは考えにくい。同様の例として、1998年8月から始まった最大M5.4の地震を含む群発地震活動の影響を考えてみる。穂高岳における1994年の高さ(図-2)は観測条件からやや信頼性に劣るものの、1999年の高さに比べて5cm弱高く、この間に大きく沈降したことが示唆される。1998年の群発地震は近年では最大規模の活動であった(和田ほか, 2000)が、Aoyama et al. (2002)による地震波の解析から推定された震源メカニズム解18個(M_w 3.6～5.1)を用いて、半無限弾性体での地表変位を計算すると、穂高岳で期待される地表変位は2mm程度の沈降であり、数cm規模の地殻変動は生じるとは考えにくい。よって、1998年や2011年の地震活動そのものでは、穂高岳で観測された沈降を説明することは難しいといえる。しかし、地震波では捉えられていないゆっくりとした断層運動や地下での流体移動等があれば、数cm程度の地殻変動は説明できる可能性がある。さらに、飛騨山脈などの高山では、重力性の崩壊地形が見つかっており(例えば、西井, 2009)、実際に崩壊が進行していることが観測された例(例えば、Nishii and Matsuoka, 2012)もある。穂高岳でも、群発地震や東北地方太平洋沖地震によって、かなりの強震動に見舞われたと考えられるので、重力性の沈降が一時的に加速された可能性があるかもしれない。

5. GEONETデータによる飛騨山脈周辺の水平変動

山岳の上下変動のメカニズムを考える上で、一般的に水平圧縮力は隆起の主要因と考えられていることもあり、水平変動を調べることは重要である。図-6は、2005年1月1日から2010年12月31日までの6年間の水平変動速度分布である。飛騨山脈は、

西北西—東南東方向の短縮変形が卓越する新潟-神戸ひずみ集中帯(Sagiya et al., 2000)に位置しており、図-6からも全体的に西北西—東南東方向の短縮変形場にあることがわかる。穂高岳周辺のベクトルを見ると、概ね東西方向の短縮変形が見受けられるが、変動の勾配であるひずみは全般的に小さい。穂高岳

と東側の松本盆地の間の観測点では 2mm/年程度の短縮がみられるが、西側の上宝観測点との短縮速度は非常に小さいことがわかる。すなわち穂高岳周辺では、飛驒山脈に直交する方向の短縮変形はあるが、その速度は 30km で約 2mm/年 (約 0.07ppm) と小さいことがわかる。穂高岳付近の GNSS 観測点は少ないため、これ以上の詳細な議論は出来ないが、飛驒山脈北部の立山周辺では、山脈を横断するように GNSS 観測点が存在する (図-6)。そこで、立山を横断する GNSS 観測点の変動速度を最大圧縮軸方向にほぼ等しい北 105°東の方向に投影したものが図-7である。上下変動については飛驒山脈での隆起が見られるが、水平変動の変形集中域は、飛驒山脈ではなくその東側の幅 20km 程度の領域であることが明瞭である。この変形集中域は、糸魚川—静岡構造線断層帯に関連しているものと考えられるが、糸魚川—静岡構造線断層帯の地表トレース (松本盆地東縁断層) の西側まで変形集中域が及んでいることも明らかであり、Sagiya et al. (2004) が指摘するように単純な弾性変形では説明が難しい。隆起域と水平短縮集中域が隣接していることは、飛驒山脈の隆起メカニズムを解明する上で、重要な拘束条件であるが、穂高岳付近では短縮変形の集中域は明瞭ではなく、現在の飛驒山脈の変形メカニズムも南北で異なっているのかもしれない。

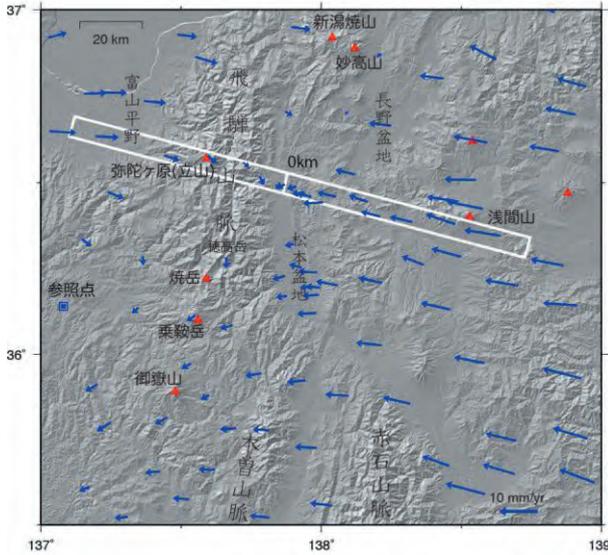


図-6 2005-2010 年の飛驒山脈及びその周辺の水平変動速度ベクトル図。穂高岳の水平変動は、1999,2005,2008 年の 3 回の繰り返し観測結果を示す。矩形領域は図-7 の変動プロファイルの位置を表す。

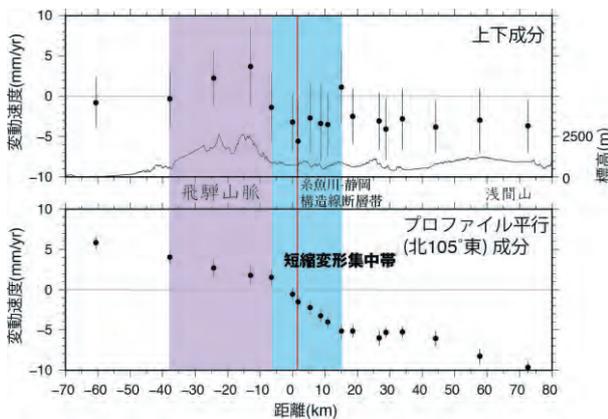


図-7 飛驒山脈立山付近を横断する測線上における変動速度プロファイル。縦棒付きの丸が変動速度、縦棒の長さが誤差 (3σ) を表す。上下成分の実線は測線上の標高を表す。赤線は糸魚川-静岡構造線断層帯の位置。

6. おわりに

飛驒山脈の一等三角点「穂高岳」において 1999, 2005, 2008 年に実施した GNSS 繰り返し観測により、前穂高岳が年間約 5mm で隆起していることが明らかになった。さらに、立山周辺の GEONET 観測点の変動速度も山脈中軸部での隆起を示し、飛驒山脈が現在でも隆起していることが確かめられた。しかし、本研究作業以外で取得された GNSS 観測データや東北地方太平洋沖地震後の 2012 年の観測データを含めると沈降を示す時期もあり、必ずしも単調に隆起しているわけではなく、間欠的な変動をしている可能性も否定できない。

本稿では、GNSS 観測データの整理にとどまり、飛驒山脈隆起のメカニズムの考察には至らなかった。今後のメカニズム解明のためには、間欠的な変動をしていることを否定できないことから観測頻度を増やすとともに、変動の空間パターンを詳細に明らかにするために稠密な GNSS 観測や SAR 干渉解析などを実施することが望まれる。

(公開日：平成 25 年 9 月 30 日)

参考文献

- Aoyama, H., M. Takeo, and S. Ide (2002) : Evolution mechanisms of an earthquake swarm under the Hida Mountains, central Japan, in 1998, *J. Geophys. Res.*, 107 (B8) , doi:10.1029/2001JB000540
- 壇原毅 (1971) : 日本における最近 70 年間の総括的上下変動, 測地学会誌, 17, 100-108.
- 道家涼介, 竹内章, 安江健一, 畠本和也, 松浦友紀 (2008) : GPS 観測データから見た北アルプス立山における最近の地殻変動, 東京大学地震研究所彙報, 83, 193-201.
- Harayama, S. (1992) : Youngest exposed granitoid pluton on Earth: Cooling and rapid uplift of the Pliocene-Quaternary Takidani Granodiorite in the Japan Alps, central Japan, *Geology*, 20, 657-660.
- 原山智, 大藪圭一郎, 深山裕永, 足立英彦, 宿輪隆太 (2003) : 飛騨山脈東半部における前期更新世後半からの傾動・隆起運動. 第四紀研究, 42 (3) , 127-140.
- 国土地理院 (2013) : 東北地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 89, 72-105.
- 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, 地震 2, 57, 209-231.
- 西井稜子 (2009) : 飛騨山脈の花崗岩山域における斜面崩壊が線状凹地の分布に及ぼす影響, 地学雑誌, 118, 233-244.
- Nishii, R. and N. Matsuoka (2012) : Kinematics of an alpine retrogressive rockslide in the Japanese Alps, *Earth Surf. Process. Landforms*, 37, 1641-1650. doi:10.1002/esp.3298.
- 大見士朗, 和田博夫, 濱田勇輝, 三和佐知栄, 高田陽一郎 (2012) : 東北地方太平洋沖地震後に活発化した飛騨山脈脊梁部の地震活動について, 京都大学防災研究所年報, 55B, 95-104.
- 鷺谷威, 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.
- Sagiya, T., S. Miyazaki, and T. Tada (2000) : Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan, *Pure and applied Geophysics*, 157, 2303-2322.
- Sagiya, T., T. Nishimura, and Y. Iio (2004) : Heterogeneous crustal deformation along the central-northern Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line Fault system, Central Japan, *Earth Planets Space*, 56, 1247-1252.
- 和田博夫, 伊藤潔, 大見士朗 (2000) : 飛騨山脈の群発地震 (その 2) -周辺活動域への影響-, 京都大学防災研究所年報, 43B-1, 115-121.
- 米倉伸之, 貝塚爽平, 野上道男, 鎮西清高 (編) (2001) : 日本の地形 1 総説, 東京大学出版会, 349pp.
- Zumberge, J. F., M. B. Hefflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins, and F. H. Webb (1997) : Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *J. Geophys. Res.*, 102 (B3) , 5005-5017.