

飛騨山脈西穂高岳の GPS 地殻変動観測 (1994-2007)

角野由夫*・渡邊創太・秋山侑輝・島田祐輝・高山大貴・川合俊二・藤巻ひろみ

信州大学理学部地質科学教室

Measuring Crustal Movements with GPS at Nishihotaka-Dake, Hida Mountains, Central Japan (1994-2007)

Yoshio Sumino*, Souta Watanabe, Yuuki Akiyama, Yuki Shimada, Hiroki Takayama, Shunji Kawai and Hiromi Fujimaki

Department of Geology, Faculty of Science, Shinshu University

Abstract

Since 1994, crustal deformation in northern Nagano Prefecture, including the Hida mountain range, has been measured by a geodetic survey using the Global Positioning System (GPS). The GPS network, established at Nishihotaka-Dake, Hida mountains, and in the Matsumoto Basin along the Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, consists of three observation stations, Kurio (Nishihotaka-Dake), Hakuba (Hakuba village), and Shinshu University (Matsumoto city). The observed data are analyzed from broadcast ephemeris and default meteorological values using the double difference technique.

From the present GPS measurements, it has been found that, for the baseline between Kurio and Shinshu University, which is about 34 km in length in the east-west direction, the temporal change of baseline length during thirteen years from 1994 to 2007 showed a contraction of -4 cm (-1 ppm). Variations of upheaval at Kurio, Nishihotaka-dake, were almost zero during the same period, when fixed at Shinshu-University (Matsumoto city). On the other hand, at the baseline between Kurio and Hakuba, which is about 53 km in the northeast-southwest direction, the temporal change of baseline length showed an extension of $+5$ cm ($+1$ ppm) during the twelve years from 1995 to 2007. And, at the baseline between Hakuba and Shinshu University, which is about 51 km in the northwest-southeast direction, the temporal change of baseline length showed a contraction of -5 cm (-1 ppm) during the same period. Crustal deformation in northern Nagano Prefecture, including the Hida mountains during the last thirteen years, 1994-2007, are reported and discussed in the present study.

Key words: GPS, Hida mountains, crustal movement

1. はじめに

飛騨山脈(北アルプス)は、最大標高 3000 m の巨大な花崗岩の褶曲岩体である。図 1 に飛騨山脈と松本盆地を示す。西穂高岳は飛騨山脈の穂高連峰(図 1 の KRO 地点北東側の 3,000 m 級の山々)の一角にあり、地帯構造区分において西南日本内帯の飛騨外縁帯と美濃帯北縁部にまたがる境界部にあたる。この地域の地質は古いほうから飛騨外縁帯の変成岩類と古生層、船津花崗岩類、美

濃帯中生層、白亜紀前期の手取層群、白亜紀末期-古第三紀の火山-深成複合岩帯、鮮新世-更新世中期の火山噴出物と堆積物、乗鞍火山および焼岳火山群の噴出物、更新世後期以降の堆積物から構成される(原山, 1990)。

飛騨山脈西穂高岳地域は第四紀に入って急速な隆起をしたと考えられており、第四紀地殻変動研究グループ(1968)によればいくつかの未確定な要素があるが、その隆起量は最大で 1,700 m に及ぶとされている。この隆起

* e-mail: ysumino@shinshu-u.ac.jp (〒390-8621 長野県松本市旭 3-1-1)

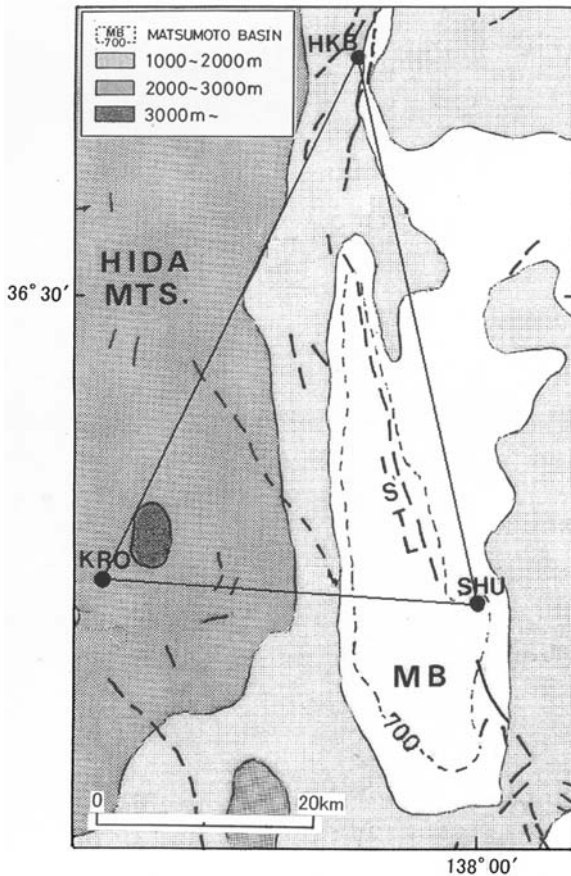


Fig. 1. The locations of the GPS stations of Shinshu University used in the present study at and around the Hida mountains. SHU shows Shinshu-University; HKB, Hakuba; KRO, Kurio. HIDA MTS shows the Hida mountains, and MB shows the Matsumoto basin. ISTL is the Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, called to the East Matsumoto Basin Fault at the Matsumoto basin.

の時期と要因について様々な報告がされているが、原山ほか (2003) によると、隆起は鮮新世末と更新世前期後半の2回にわたって起こったとされている。この二段階隆起の根拠の一つは、更新世前期に活動した穂高-滝谷火山深成コンプレックスが傾動隆起している点だとしている。一方、池田 (1995) は、鮮新世前期に隆起し始め、鮮新世後期には高い山に成長したとしている。またその要因については、飛騨山脈の重力異常図 (例えば、Yamamoto *et al.*, 1982) にもとづいて、飛騨山脈は厚い地殻に働く浮力によってアイソスタティックに支えられているタイプの山であるから、この厚い地殻を形成したプロセスが隆起の原因であるとし、それはマグマが地殻へ入り込み地殻を太らせ山脈を押し上げたものと考えている。また、竹内 (1995) によると現在のテクトニックな隆起活動は停止していると考えられている。

本研究において用いた西穂高岳の国土地理院栗尾三等三角点 (図1と図2のKRO地点) は、地球上で最も若い露出花崗岩類プルトンである滝谷花崗閃緑岩と呼ばれる岩体上にある。この滝谷花崗閃緑岩は南北13 km、東西最大4 kmの細長い岩体であり、約1.4 Maに固結し始めたとされている (原山ほか, 2003)。一方、白馬~松本盆地にかけてはフォッサマグナの西縁部に位置し、糸魚川-静岡構造線が南北に縦走している。この構造線の両側で地質構成が全く異なり、西側は先白亜紀-古第三紀火成岩類からなるのに対し、東側は新第三紀の地層が分布している。

飛騨山脈西穂高岳における現在の地殻変動の時間的推移を把握するため、信州大学では1994年よりGPSによる精密測位観測を実施している。ここでは、飛騨山脈西穂高岳の地殻変動について、GPSによる測量結果を報告する。

2. 飛騨山脈およびフォッサマグナ西縁部の地震活動

長野県北部地域の震源分布図 (1997年1月~2005年12月) を図2に示す (佃, 2006)。飛騨山脈およびフォッサマグナ西縁部の地震活動は1998年以降、非常に活発となった。1998年7月1日に長野県北部の大町市美麻地区でマグニチュード (M) 4.7が発生した (酒井, 2005)。そして、その翌月、1998年8月7日より飛騨山脈に群発地震が発生し、M4以上の地震が約1ヶ月の間に15回にも及んだ (和田ほか, 1999, 2000; 気象庁, 1998)。飛騨山脈西穂高岳周辺 (図2のKRO地点の東側地域) の地震活動は、1998年8月7日の地震 (M2.7) を最初とした群発地震活動が、長野県中西部の上高地から穂高岳、槍ヶ岳、野口五郎岳付近まで南北方向にかけて発生した (図2の矢印Aの地域)。この群発地震は概ね北西-南東方向に圧縮軸をもつ横ずれ断層型であり、8月12日にM4.7の地震が発生し、この一連の活動の中で最大震度 (震度5) を記録した。それ以降は活動域の北方に位置した岐阜県飛騨地方 (穂高岳付近) に地震活動が見られはじめ、地震活動は徐々に北方向へ拡大し、活動域は上高地付近から槍ヶ岳にいたる逆T字型 (南北約15 km、東西約5 km) までになった (図2)。また、8月16日に槍ヶ岳付近では、近年において最大規模となるM5.4の地震が発生、その後も活動域はさらに北方に拡がり、長野県・富山県境 (野口五郎岳付近) でも9月5日にM4.4とM4.3の地震が発生した。この地震活動は槍ヶ岳付近での9月18日に発生したM4.4とM4.3の地震以降、10月末まではM4.0以上の地震はなく南北方向の活動は次第に衰退していった。しかし上高地付近では活動初期から

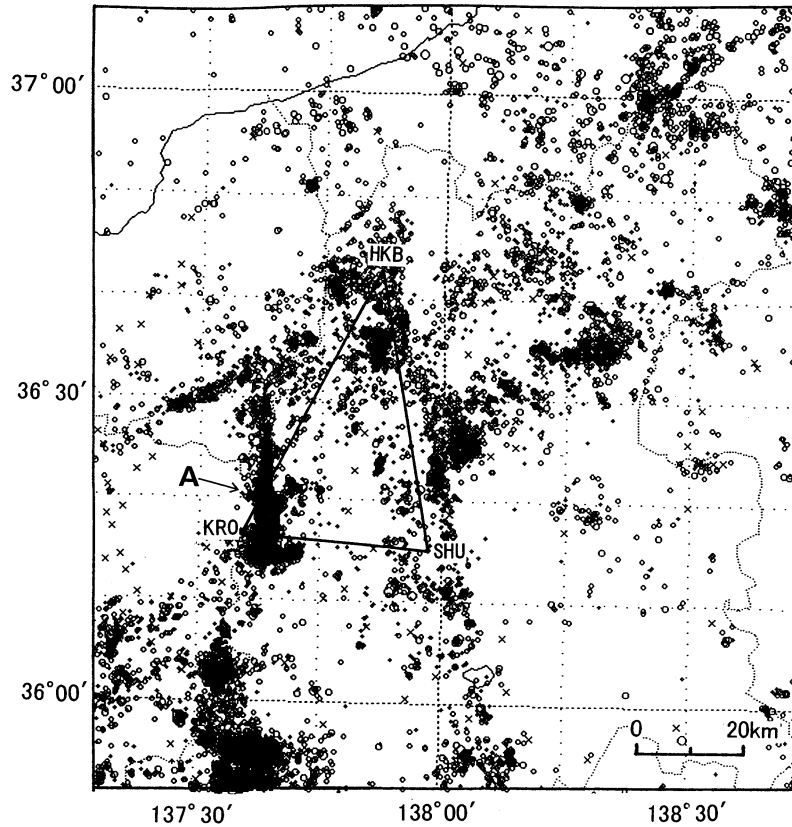


Fig. 2. Epicenter distribution of the northern part of Nagano Prefecture from Jan. 1997-Dec. 2005, $M > 0$, determined by the Earthquake Research Institute, University of Tokyo (Tsukuda, 2006). Large triangle surrounded with SHU, KRO, and HKB in this figure shows the baselines of GPS network in the present study. A shows the epicenters of the 1998 Hida earthquake swarm.

Table 1. GPS station coordinates (WGS84) used in the present study.

Site	Latitude	Longitude	Height
Shinshu-U. (SHU)	N 36° 15' 04.92909"	E 137° 58' 39.62820"	686.101 m
Kurio (KRO)	N 36° 16' 04.67046"	E 137° 36' 07.59497"	2199.390 m
Hakuba (HKB)	N 36° 41' 53.47860"	E 137° 51' 42.38589"	758.437 m

1998年10月末まではほぼ断続的に活動が見られた。翌年の1999年1月28日には長野県中部の明科町付近でM4.7が、続いて1999年10月29日には長野県北部の長野市付近でM4.0が発生している。すなわち、1998年7月～1999年10月にかけて、長野県北部の糸魚川-静岡構造線の沿線地域においてはM4以上の地震が十数回発生しており、地震活動が非常に活発な時期であったことがいえる。これらの一連の地震活動は今回のGPS観測データでも顕著な影響がみられており、本研究においても非常に重要なできごとであった。

3. GPS観測と結果

飛騨山脈およびフォッサマグナ西縁部の糸魚川-静岡

構造線沿線地域の信州大学GPS観測点を図1に示した。本報告で用いた、信州大学GPS観測点の座標を表1に示した。糸魚川-静岡構造線沿線地域のGPS観測点は、松本盆地南部の松本市の信州大学理学部屋上に信州大学観測点(略号SHU, #4009: 金属固定柱)、長野県北部の北安曇郡白馬村村役場屋上に白馬観測点(HKB, #4052: 金属固定柱)、飛騨山脈西穂高岳の新穂高ロープウェイ西穂高口駅前の栗尾観測点(KRO, #4042: 国土地理院栗尾三等三角点)である(図1)。それぞれの地質は、信州大学観測点(SHU)が新第三紀の地層をおおう第四紀更新世の堆積物で砂および礫からなっている(松本盆地団体研究グループ, 1972; 1977)。また、白馬観測点は、有明花崗岩の上位にある第四紀更新世中期の高位段丘面

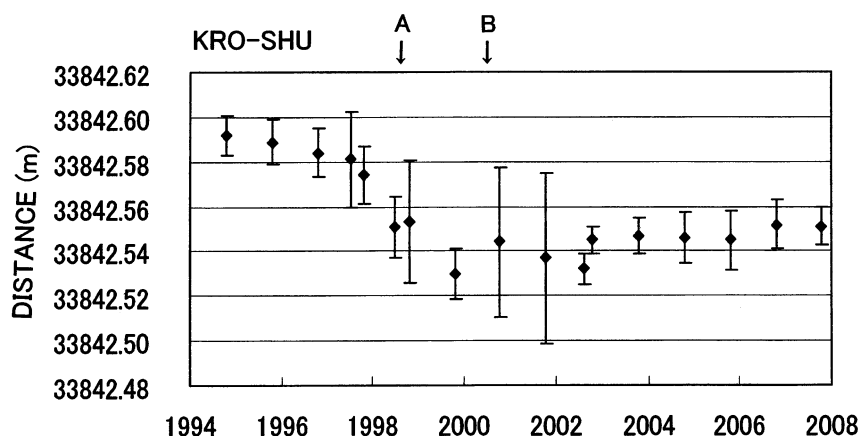


Fig. 3. Temporal changes of baseline lengths between Kurio (KRO) and Shinshu-University (SHU) sites for 1994-2007.

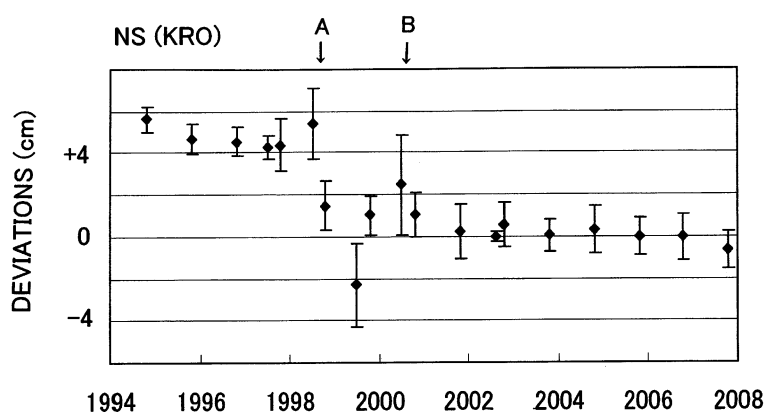


Fig. 4. Temporal changes of the horizontal component in the north-south direction of GPS coordinates at Kurio (KRO) site, when fixed at Shinshu-University (SHU). Upward shows to north.

堆積物で、砂および礫からなっている（加藤碩一ほか、1989）。西穂高岳の栗尾観測点は、地球上で最も若い露出花崗岩類プルトンである滝谷花崗閃緑岩と呼ばれる岩体上にあり、この滝谷花崗閃緑岩は南北 13 km、東西最大 4 km の細長い岩体であり、約 1.4 Ma に固結し始めたと言われている（原山ほか、2003）。

GPS 観測は、1 ヶ月に 3~4 週間ほど連日でおこなわれるため、その月平均値を観測値として採用した。なお、観測誤差は月平均値の標準偏差 (1σ) をもちいた。1994 年の観測開始の当初は、上空に衛星数が少なかったため、衛星の選択をおこなった。そのため、1994 年~1999 年の期間中は、0.5 恒星日の公転周期をもつ GPS 衛星の運動と地球の自転のずれから同一配置の時刻が 1 日約 4 分ずつ早いほうへずれてゆくの、それにあわせて観測時間帯も 1 日 4 分ずつ早めた。2000 年以降は、観測時間帯は一定となり、16:00~21:00（世界協定時）に実施した。GPS 受信機は、米国トリンブル社製 4000 型を使用した。

基線ベクトルの解析には、解析ソフト TRIMVEC (Ver. 3.01; Trimble Navigation, 1991) を使い、二重位相法で処理し、サイクルスリップの編集は自動でおこなった。衛星の軌道暦は放送暦を使用し、大気条件は標準値 (1013 hPa, 20°C, 50%) を用いた。また、1 周波による観測のため電離層による電波の伝播遅延は補正していない。

本研究の測量成果については、地殻変動の経年変化を図 3~図 14 に示した。GPS 観測は毎年 9 月下旬~10 月下旬の約 1 カ月間ほど連日で実施しており、その月平均値を図示してある。また、年によっては、6 月の 1 ヶ月間、観測を連日で実施している。観測期間中、1998 年 8 月には、飛騨山脈に群発地震が発生し、大規模な活動が約 1 ヶ月間続いた。その発生時期を図 3~図 14 において、図中に矢印 A で記入した。また、2000 年 8 月~2001 年 6 月の期間中、GPS アンテナが設置してある信州大学理学部建物において、耐震化のための大改修工事がおこなわれ、その結果、東西方向に工事にともなう人為的な変化が認められた（角野ほか、2008）。その改修工事の開始

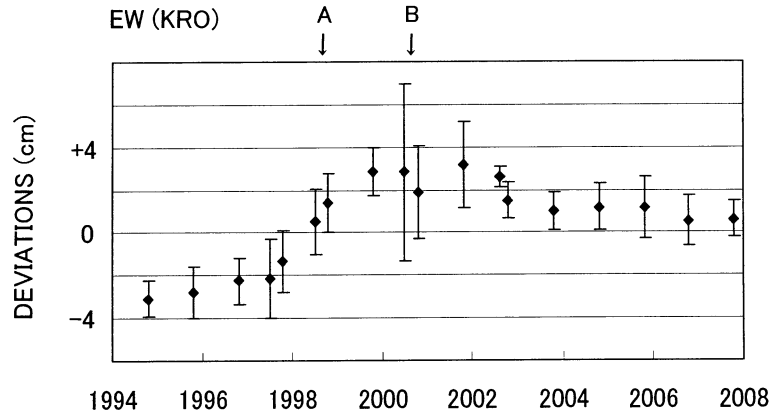


Fig. 5. Temporal changes of the horizontal component in the east-west direction of GPS coordinates at Kurio (KRO) site, when fixed at Shinshu-University (SHU). Upward shows to east.

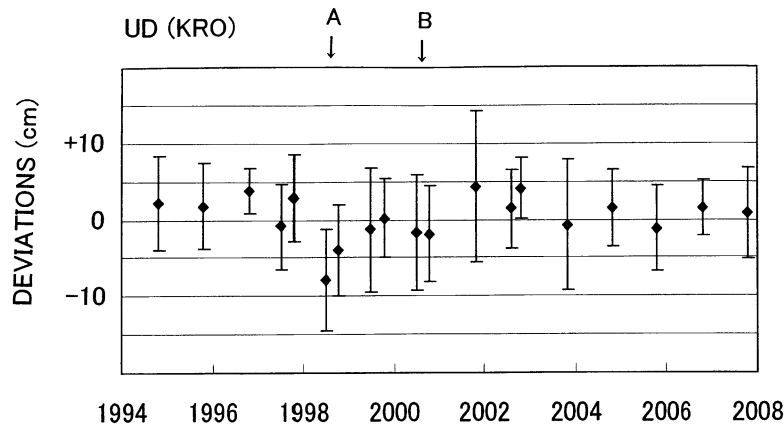


Fig. 6. Temporal changes of vertical component in GPS coordinates at Kurio (KRO) site, when fixed at Shinshu-University (SHU). Upward shows to upheaval.

時期を図3～図6および図11～図14において、図中に矢印Bで記入した。

4. 考察とまとめ

図3に栗尾(KRO)-信州大学(SHU)の基線長変化を示した。図3より栗尾-信州大学の基線長の変化は、2000年まで短縮傾向が続き、2000年を境に伸びに転じ2004年以降変化のない状況が続いている。特に、飛騨山脈の大規模な群発地震の直前、1998年6月に顕著な短縮が認められた。次に、信州大学を固定したときの栗尾の水平変動の変化を、南北成分については図4に、東西成分については図5に示した。図4および図5より、栗尾の水平変動は2000年までは南東方向へ移動する傾向が認められたが2000年頃を境に、わずかではあるが南西方向へ動きが変化している。特に、1998年から2000年にかけて、飛騨山脈の群発地震の期間、顕著な動きが認められた。また、信州大学を固定したときの栗尾の上下変動の

変化を、図6に示した。飛騨山脈の群発地震の期間、若干の沈降傾向が認められるものの、1994年～2007年の13年間、変化は誤差の範囲内にあり、栗尾が上昇も沈降もしていないことがわかる。

図7に栗尾(KRO)-白馬(HKB)の基線長変化を示した。図7より栗尾-白馬の基線長の変化は、1995年から2007年の12年間、伸張傾向にある。なお、飛騨山脈の大規模な群発地震の前後、短縮傾向が認められた。次に、白馬を固定したときの栗尾の水平変動の変化を、南北成分については図8に、東西成分については図9に示した。図8および図9より、栗尾の水平変動は1998年までは北東方向へ移動する傾向が認められたが1999年頃を境に、わずかではあるが南西方向へ動きが変化している。特に、図9より2000年以降、西方向への顕著な動きが認められる。また、白馬を固定したときの栗尾の上下変動の変化を、図10に示した。飛騨山脈の群発地震の直前から沈降傾向が認められ、2000年以降上昇に転じ、

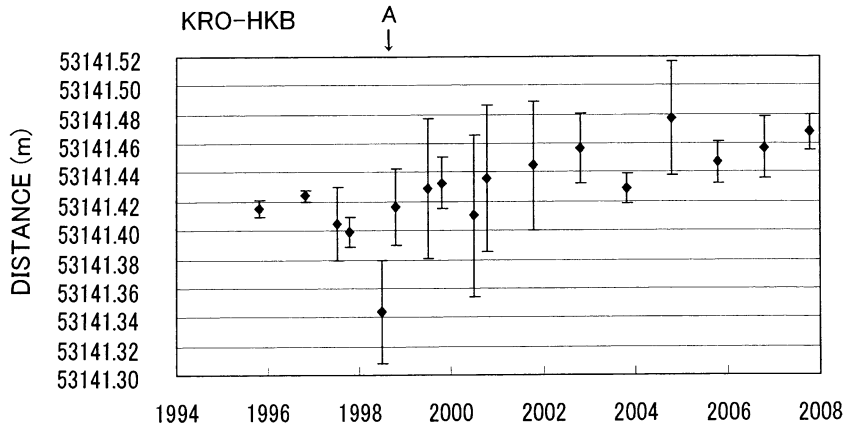


Fig. 7. Temporal changes of baseline lengths between Kurio (KRO) and Hakuba (HKB) sites for 1995-2007.

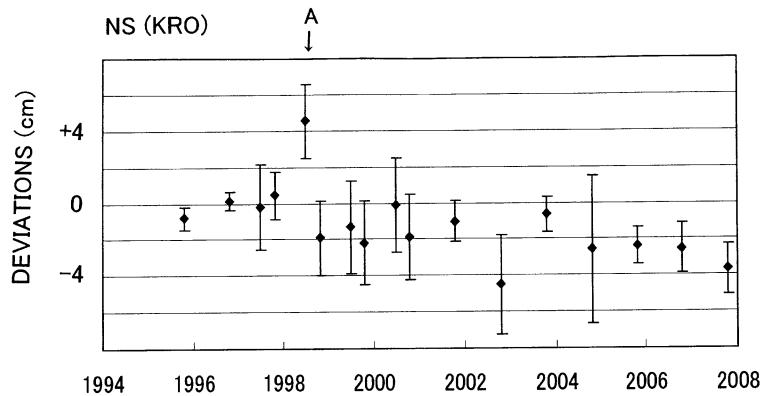


Fig. 8. Temporal changes of the horizontal component in the north-south direction of GPS coordinates at Kurio (KRO) site, when fixed at Hakuba (HKB). Upward shows to north.

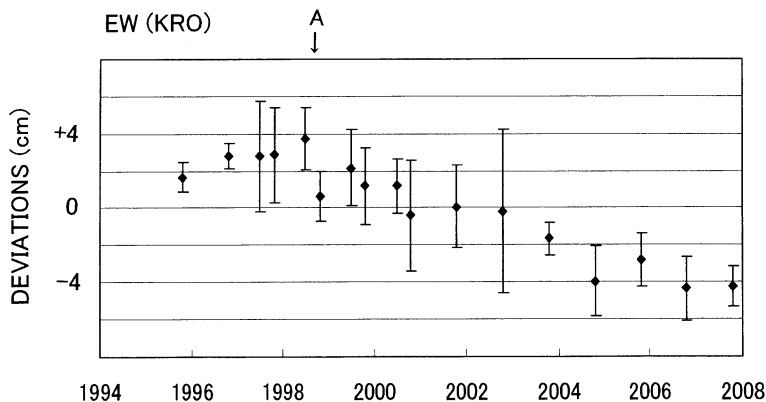


Fig. 9. Temporal changes of the horizontal component in the east-west direction of GPS coordinates at Kurio (KRO) site, when fixed at Hakuba (HKB). Upward shows to east.

2002年以降はもとの状態にもどっている。すなわち、飛騨山脈の群発地震の前後を除くと、1995年～2007年の12年間、上下変動は誤差の範囲内にあり、栗尾が上昇も沈降もしていないことがわかる。

図11に白馬(HKB)-信州大学(SHU)の基線長変化

を示した。図11より白馬-信州大学の基線長の変化は、2000年まで短縮傾向が続き、2000年を境に変化のない状況が続いている。また、1995年から2000年まで変化の状況が一定している。すなわち、栗尾-信州大学基線(図3)や栗尾-白馬基線(図7)に現れた飛騨山脈の群発

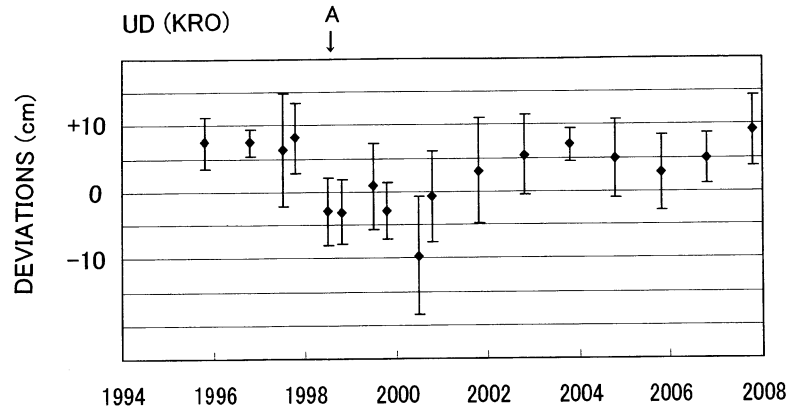


Fig. 10. Temporal changes of the vertical component in GPS coordinates at Kurio (KRO) site, when fixed at Hakuba (HKB). Upward shows to upheaval.

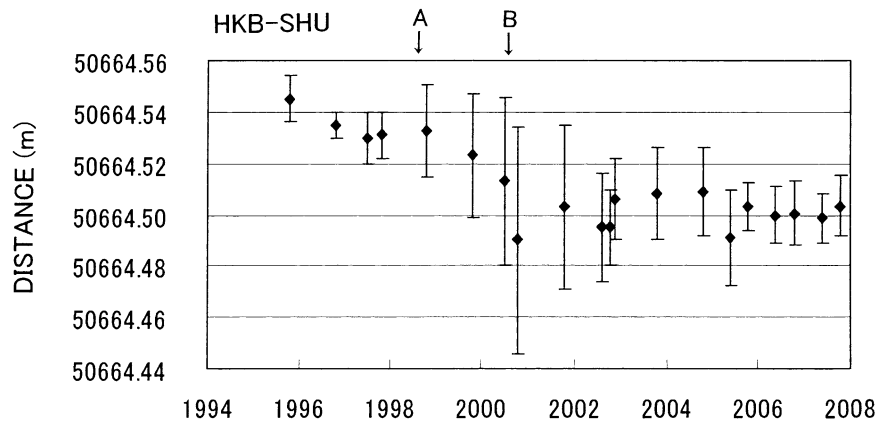


Fig. 11. Temporal changes of baseline lengths between Hakuba (HKB) and Shinshu-University (SHU) sites for 1995-2007.

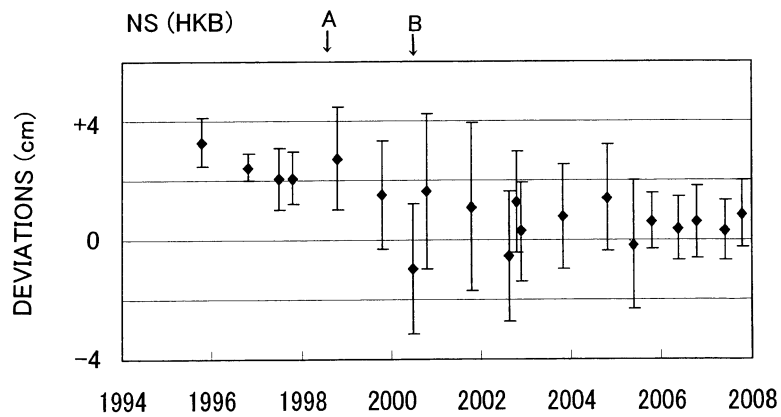


Fig. 12. Temporal changes of horizontal component in north-south direction of GPS coordinates at Hakuba (HKB) site, when fixed at Shinshu-University (SHU). Upward shows to north.

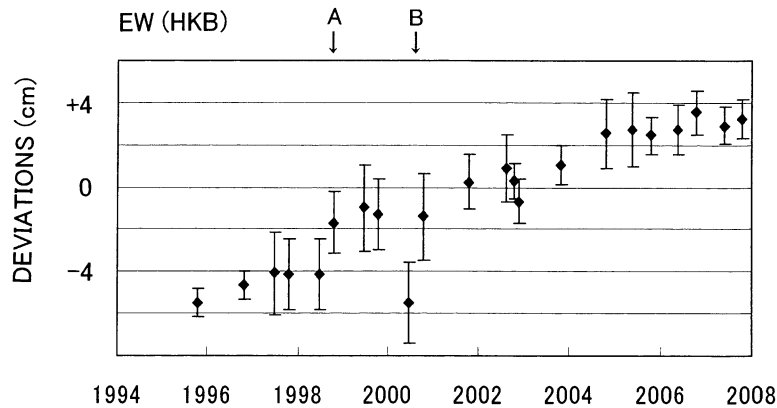


Fig. 13. Temporal changes of the horizontal component in the east-west direction of GPS coordinates at Hakuba (HKB) site, when fixed at Shinshu-University (SHU). Upward shows to east.

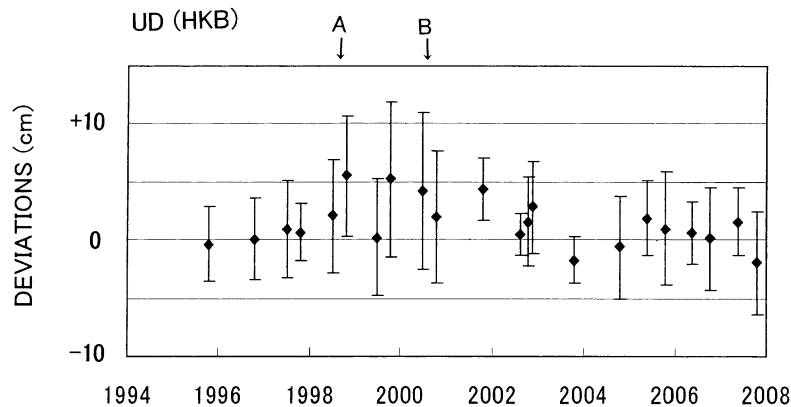


Fig. 14. Temporal changes of the vertical component in GPS coordinates at Hakuba (HKB) site, when fixed at Shinshu-University (SHU). Upward shows to upheaval.

地震の影響は、白馬-信州大学基線では認められなかった。次に、信州大学を固定したときの白馬の水平変動の変化を、南北成分については図 12 に、東西成分については図 13 に示した。図 12 および図 13 より、白馬の水平変動は 2000 年までは南東方向へ移動する傾向が認められたが 2000 年頃を境に、南への動きは止まり、東方向の動きへと変化している。また、信州大学を固定したときの白馬の上下変動の変化を、図 14 に示した。飛騨山脈の群発地震の期間、若干の上昇傾向が認められるものの、1995 年～2007 年の 12 年間、変化は誤差の範囲内にあり、白馬が上昇も沈降もしていないことがわかる。なお、信州大学-栗尾-白馬間の上下変動の総和は、すなわち、図 6、図 10 と図 14 の数値の総和は本来、一定となる。

以上の結果より、栗尾 (KRO) を含む基線においては、1998 年 8 月に発生した飛騨山脈の群発地震にともなう変動が顕著に認められた。その原因は、群発地震の震源の深さが 10 km 程度で非常に浅いことによることが考え

られる。また、飛騨山脈西穂高岳は糸魚川-静岡構造線沿線地域から見ると、過去 14 年間、上昇傾向でも下降傾向でもないことがわかった。この結果は、中部山岳地帯の重力のブーゲ異常図 (例えば Yamamoto *et al.*, 1982) から得られる知見と調和的である。

謝 辞

観測点の設置、観測機材の運搬および商用電源の使用において、奥飛騨観光開発(株)新穂高ロープウェイおよび白馬村役場の方々に多大な便宜供与をいただいた。また、飛騨山脈の観測において、京都大学防災研究所地震予知センター上宝観測所の和田博夫氏に大変お世話になった。本研究は信州大学理学部地質科学教室の以下の方々の卒業研究の成果を利用させていただいた。佐藤有志、小粥圭一、古賀 敬、安藤教宣、藤沢 泉、加藤昌孝、加藤創一郎、金 亜伊、乗松正志、新居和展の各氏。本地域の地質については、信州大学理学部の原山智先生

にご助言をいただいた。なお、本研究において東京大学地震研究所特定共同研究 (A) 「内陸直下の地震予知」 (平成 11 年度～平成 19 年度) を用いた。これらのすべての方々に深く感謝します。

参考文献

第四紀地殻変動研究グループ, 1968, 第四紀地殻変動図, 第四紀研究, **7**, 182-187.
 原山 智, 1990, 上高地地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, pp. 1-175.
 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**, 127-140.
 池田安隆, 1995, 飛騨山脈の形成に関する地質学的観測事実, 月刊地球, **18**, 72-76.
 加藤慎一・佐藤岱生・三村弘二・滝沢文教, 1989, 大町地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地形図幅), 地質調査所, 111p.
 気象庁, 1999, 長野県・岐阜県境 (上高地～槍ヶ岳) と長野・富山県境 (野口五郎岳) の地震活動, 地震予知連絡会会報, **61**, 399-405.
 国土地理院, 2003, 東海地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, **69**, 14-17.
 国土地理院, 2005, 東海地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, **74**, 227-283.
 松本盆地団体研究グループ, 1972, 松本盆地の第四紀地質の概

要—松本盆地の形成過程に関する研究 (1)—, 地質学論集, **7**, 297-304.
 松本盆地団体研究グループ, 1977, 松本盆地の第四紀地質—松本盆地の形成過程に関する研究 (3)—, 地質学論集, **14**, 93-102.
 酒井慎一, 2005, 糸魚川—静岡構造線北部の地震活動, 月刊地球, 号外 No. 50, 162-167.
 角野由夫・秋山侑輝・秋山知生・小林 亘, 2008, 松本盆地の GPS 地殻変動観測 (1992-2006), 東京大学地震研究所彙報, **83**, 000-000.
 竹内 章, 1995, 応力場の変化と火山活動—中部山岳地域—, 月刊地球, **18**, 92-97.
 Trimble Navigation, 1991, TRIMVEC-PLUS GPS 測量ソフトウェア使用説明書, Trimble Navigation Ltd., 326p.
 佃 為成, 2006, 長野県白馬村付近およびその周辺の地震活動の推移, 内陸直下地震の予知, 平成 17 年度地震研究所特定共同研究 (A) 報告, pp. 11-22.
 和田博夫・伊藤 潔・大見士郎・岩尾圭美・池田直人・北田和幸, 1999, 1998 年飛騨山脈群発地震, 京都大学防災研究所年報第 **42** 号 (B-1), 81-96.
 和田博夫・伊藤 潔・大見士郎, 2000, 飛騨山脈の群発地震 (その 2) —周辺活動への影響—, 京都大学防災研究所年報第 **43** 号 (B-1), 115-121.
 Yamamoto, A, K. Nozaki, Y. Fukao, M. Furumoto, R. Shichi, and T. Ezaki, 1982, Gravity survey in the central ranges, Honshu, Japan, J. Phys. Earth, **30**, 201-243.

(Received December 11, 2007)

(Accepted September 11, 2008)