

飛騨山脈焼岳の GPS 地殻変動観測と噴気孔温度観測 (1992-2008)

角野由夫*・梅田祥平・菊地悠一郎・宮田皓司・木元章典・柴田淳和・大石 陽・佐藤有志・小粥圭一・都築康久・上野友岳・百合本岳・島田祐輝・高山大貴・小林和典・嶋田庸司・細川盛樹
信州大学理学部地質科学教室

Measuring Crustal Movements with GPS and Temperature of Fumaroles with Radiation Thermometer at Volcano Yake-Dake, Hida Mountains, Central Japan (1992-2008)

Yoshio Sumino*, Shouhei Umeda, Yuichirou Kikuchi, Koji Miyata, Akinori Kimoto, Junna Shibata, Akira Oishi, Yushi Sato, Keiichi Ogai, Yasuhisa Tuzuki, Tomotake Ueno, Gaku Yurimoto, Yuki Shimada, Hiroki Takayama, Kazunori Kobayashi, Yoji Shimada and Shigeki Hosokawa

Department of Geology, Faculty of Science, Shinshu University

Abstract

Since 1992, crustal deformation at and around the Yake-dake volcano in the Hida mountains, central Japan, has been measured by the geodetic survey with a Global Positioning System (GPS), and the temperatures of fumaroles at the Yake-Dake volcano have been measured with a radiation thermometer since 1993. The GPS network, established at and around the Yake-dake volcano, Hida mountains, and in the Matsumoto basin, consists of five observation stations: Yake-dake, Kamikochi, Nakao, Kurio, and Shinshu University (Matsumoto city). The Yake-dake station is located at the Yake-dake observation platform, which is near the top of the mountain, and the Kamikochi and the Nakao stations are located at the foot of the volcano. The Kurio station is located at the middle foot of Mt. Nishihotaka-dake, and its altitude (2199 m, WGS84) is almost the same as that of Yake-dake station (2176 m). Observed data were analyzed using the broadcast ephemeris and the default meteorological values with the double difference technique.

From the present GPS measurements, it was found that, for the baseline between Yake-dake and Kurio, about 3.7 km in length in the north-south direction, the temporal change of baseline length during the twelve years from 1996 to 2008 contracted -7 cm (-20 ppm), and the variation of upheaval at Yake-dake became $+3$ cm during the same period, when fixed at Kurio (Nishihotaka-dake). On the other hand, for the baseline between Kamikochi and Nakao, located at the foot of the Yake-dake volcano, about 5.3 km toward the northwest-southeast direction, the temporal change of baseline length became within 1 cm (2 ppm) during the sixteen years from 1992 to 2008. Crustal deformation at and around the Yake-dake volcano during the last sixteen years, 1992-2008, and temperatures of fumaroles at the Yake-dake volcano during the last fifteen years, 1993-2008 are reported and discussed in the present study.

Key words: Yake-dake volcano, GPS, crustal movement, fumarole temperature

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

1. はじめに

飛騨山脈（北アルプス）は、最大標高 3000 m の巨大な花崗岩である。図 1 に飛騨山脈と松本盆地を示す。焼岳（図 1 の YKD 地点）は飛騨山脈南部の長野・岐阜県境に位置する標高 2455 m のトロイデ火山であり、南部にある御嶽山を除けば、飛騨山脈で唯一有史以来噴火記録が多数残されている火山である。周辺に、火山地形をほとんど残していない割谷山及び白谷山火山の 2 つの火山と、溶岩台地や火砕流堆積面など比較的火山地形を残す岩坪山火山・焼岳火山及びアカンダナ火山の 3 つの火山体がある。そしてこれら 5 つの火山体が複合したものを焼岳火山群という（原山, 1990）。また、焼岳の基盤は中・古生界・第四紀花崗岩などからなり、基盤からの比高は最大で 1000 m 前後である。焼岳全体としては、黒雲母角閃石輝石安山岩～デイサイトの噴出溶岩や、火砕流・泥流などの堆積物から形成されている（原山, 1990, 1994: 図 2）。山頂は山頂火口が大部分を占め、東西にやや長い楕円形（長径約 300 m）をなしているが、その外輪も一部を欠いているため、壁はおおよそ北、北東、南の三峰に別れている。また、山腹噴火や水蒸気爆発もたびたび起こり、東側及び北側山腹に爆裂火口があり、噴気孔も多数点在する（気象庁, 1982, 1991）。この火山の

名称は昔から焼岳、硫黄岳、硫黄ヶ岳などがあり、長野県側で焼岳と呼称されるものを岐阜県側では硫黄岳と呼び、中尾峠北側の小屋の小岳を焼岳と称した。この小岳は明治末期に山頂付近から噴気を上げていた。現在では国土地理院も焼岳の名称を使用し、火山名としても焼岳としている（気象庁, 2005）。

焼岳山体の地殻活動を把握するため、信州大学では 1992 年より GPS による精密測位観測を、そして 1993 年より山頂付近の噴気孔の温度観測を実施している。ここでは、焼岳の活動について、GPS による測量結果と噴気孔温度の観測結果を報告する。

2. 焼岳の火山活動

近年、焼岳火山群の地質調査が進められ、有史以前から近年までの焼岳火山の活動史及び噴火様式が及川・紀岡（2000）、及川ほか（2002）などにより詳しく報告されている。それらによると、焼岳火山群の活動開始時期は 120 ka よりやや古い時期で、岩坪山火山の形成（約 120 ka）、割谷山火山の形成（約 70 ka）、白谷山・アカンダナ・焼岳火山の形成（約 30 ka）という 3 つの活動時期があり、最新のマグマは 2 ka に生じた焼岳円頂丘溶岩の形成に伴う中尾火砕流堆積物の形成である。

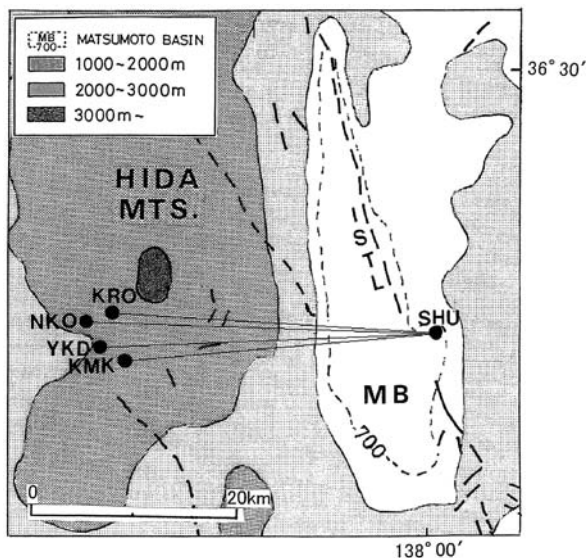


Fig. 1. The locations of GPS stations of Shinshu University used in the present study at and around the Yake-dake Volcano in the Hida mountains and in the Matsumoto basin. YKD shows Yake-dake; KRO, Kurio; NKO, Nakao; KMK, Kamikochi; SHU, Shinshu University. HIDA MTS shows the Hida mountains and MB shows the Matsumoto basin. ISTL is the Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line called the East Matsumoto Basin Fault at the Matsumoto basin.

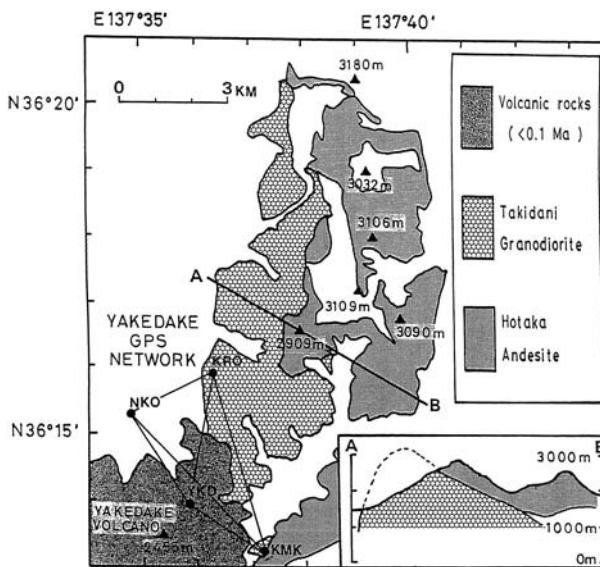


Fig. 2. The locations of GPS stations of Shinshu University used in the present study at and around the Yake-dake Volcano. YKD shows Yake-dake. KRO shows Kurio, located at the middle foot of Mt. Nishihotaka-dake. NKO and KMK show Nakao and Kamikochi, respectively, located at the middle foot of the Yake-dake Volcano. Each station is plotted on a map that is simplified from the geological map after Harayama (1990,1994). The cross-section between A and B is shown at right corner in this figure.

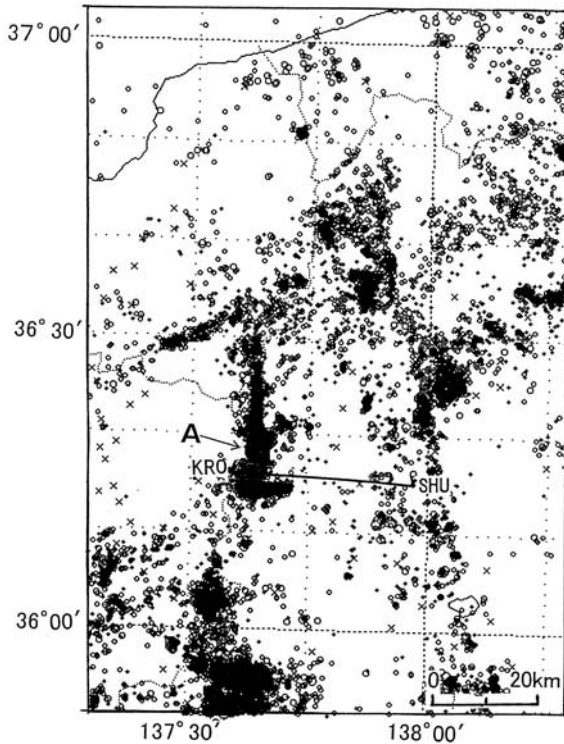


Fig. 3. Epicenter distribution of the northern part of Nagano Prefecture from Jan. 1997-Dec. 2005, $M > 0$, determined by the Earthquake Research Institute, University of Tokyo (Tsukuda, 2006). Straight line connecting Kurio (KRO) and Shinshu University (SHU) shows the baseline in the present study. A shows the epicenters of the 1998 Hida earthquake swarm.

明治以後の噴火活動は、加藤（1912）、小平（1932）、Murai（1962）、Yamada（1963）によって報告されている。加藤（1912）は、1907年以前に噴気活動以外の確実な活動記録は無いこと、山頂部まで植生に被覆されていたことから、1907年以前に長期の休止期間が存在したと推定している。1907～1939年まで約30年続いた活動期間のうち、山頂部に新火口（インキョ穴）が形成された1911年と1925年はとりわけ活発な時期であった。また1915年の噴火（水蒸気爆発）で大正火口が形成され、そこから流出した“泥流”は梓川を堰止めて、大正池を形成した。その後大きな前兆もないまま1962年に再び噴火（水蒸気爆発）し、数回の噴火によって東西から北東-南西方向にかけて800mの列弧状裂け目が形成され、多量の噴石、降灰をもたらした。これにより、焼岳小屋は倒壊し、4名の負傷者を出した。この噴火活動については、Murai（1962）、Yamada（1963）、小坂・小沢（1966）によって詳細な報告がされている。

現在、山頂火口や北側山腹火口などの一部で噴気・硫

気が続いている（気象庁、1982、1991、1996）。また、1990年から焼岳火山を含めた飛驒山脈南部において地震活動が活発化しており、1994年1月および1998年8月～10月において群発地震が観測されている（和田ほか、1993、1994、1999、2000）。なお、1997年～2005年の期間について飛驒山脈を含む長野・岐阜県北部における地震活動の震央分布図を図3に示した（佃、2006）。

3. 焼岳の GPS 観測

焼岳山体の地殻変動を把握するため、1992年夏に焼岳とその周辺地域に3点のGPS観測点を設置した（細川ほか、1995；角野ほか、1997）。GPS観測点は、焼岳山頂付近に焼岳観測点（略号YKD、#4007：中尾峠近くの焼岳展望台付近）、焼岳山麓に中尾観測点（NKO、#4005：京都大学防災研究所流域研究センター穂高砂防観測所屋上）および上高地観測点（KMK、#4008：国土交通省松本砂防工事事務所上高地防災管理センター構内）である（図2）。そして、さらに1994年秋に西穂高岳の中腹に栗尾観測点（KRO、#4042：新穂高ロープウェイ西穂高口駅前、国土地理院栗尾三等三角点）をあらたに加えた（図2）。それぞれの地質は原山（1990、1994）によると、焼岳観測点（YKD）が中尾峠溶岩（安山岩～デイサイト質溶岩）であり、中尾観測点（NKO）は中尾火砕流堆積物、上高地観測点（KMK）は穂高安山岩である（図2）。一方、栗尾観測点（KRO）は、西穂高岳の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13km、東西最大4kmの細長い岩体で約1.4Maに固結し始めたとされている（図2：原山ほか、2003）。中尾（NKO）-焼岳（YKD）-上高地（KMK）の3点からなる観測列は北西-南東方向からなり、この方向は境峠断層の方向および地熱高温帯の方向と一致している（原山1990）。この北西-南東方向の地熱高温帯の地下深部においては、人工地震をもちいた地下構造探査により、地震波の高減衰帯の存在がはっきりになった（Yamazaki, 1996）。一方、糸魚川-静岡構造線の沿線地域のGPS観測点は、松本盆地南部の信州大学理学部屋上に設置した信州大学観測点（略号SHU、#4009：金属固定柱、図1）であり、地質は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；原山ほか、2009）。

焼岳山麓地域のGPS観測は、1992～2003年までは毎年6月と10月のそれぞれ約1カ月間ほぼ連日でおこなわれた。また、2004年以降は、10月の約1カ月間ほぼ連日でおこなった。そして、その月平均値を観測値として採

用し、観測誤差は月平均値の標準偏差 (1σ) をもちいた。また、焼岳山頂付近の GPS 観測は 2003 年までは毎年 6 月頃および 10 月頃の 2 日間、また、2004 年以降は、10 月頃の 2 日間実施した。1992 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、1992 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で、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) を用い、二重位相差法で処理し、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 4～図 19 に示した。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 (図 3)。その発生の開始時期を図 4～図 19 において、図中に矢印 A で記入した。

1998 年 8 月の飛騨山脈の群発地震は、M 4 以上の地震が約 1 ヶ月の間に 15 回にも及んだ大規模な地震活動であった (和田ほか, 1999, 2000; 気象庁, 1999)。飛騨山脈西穂高岳周辺 (図 3 の KRO 地点の東側地域) の地震活動は、1998 年 8 月 7 日の地震 (M 2.7) 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 3 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 M 4.7 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 3)。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 M 5.4 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 M 4.4 と M 4.3 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 M 4.4 と M 4.3 の地震以降、10 月末までは M 4.0 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 1998 年 10 月末まではほぼ断続的に活動が見られた。

4. 焼岳 GPS 観測の結果

4-1. 松本盆地から見た焼岳地域の変動

焼岳-信州大学基線 図 4 に焼岳 (YKD)-信州大学 (SHU) の基線長変化を示した。図 4 より焼岳-信州大学の基線長の変化は、1996 年から 2000 年まで年平均約 15 mm という大きな割合で縮んでいたが、2000 年頃を境にそれ以降は変化のない状況が続いている。

中尾-信州大学基線 図 5 に中尾 (NKO)-信州大学 (SHU) の基線長変化を示した。図 5 より中尾-信州大学の基線長の変化は、2000 年まで短縮傾向が続くが、2000 年を境に伸びに転じ 2004 年以降は、わずかではあるが短縮傾向の状況が続いている。また、1998 年 8 月の飛騨山脈の大規模な群発地震の直前である 1998 年 6 月には

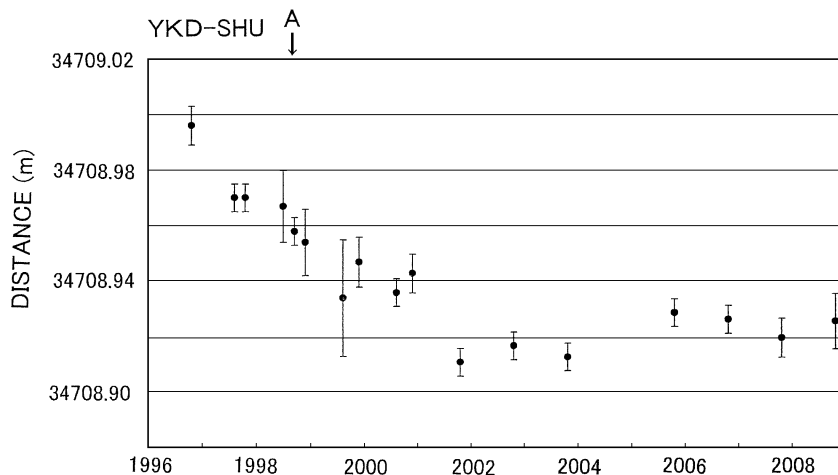


Fig. 4. Temporal changes of baseline lengths between Yake-dake (YKD) and Shinshu-University (SHU) sites for 1996–2008. A shows the beginning of the 1998 Hida earthquake swarm.

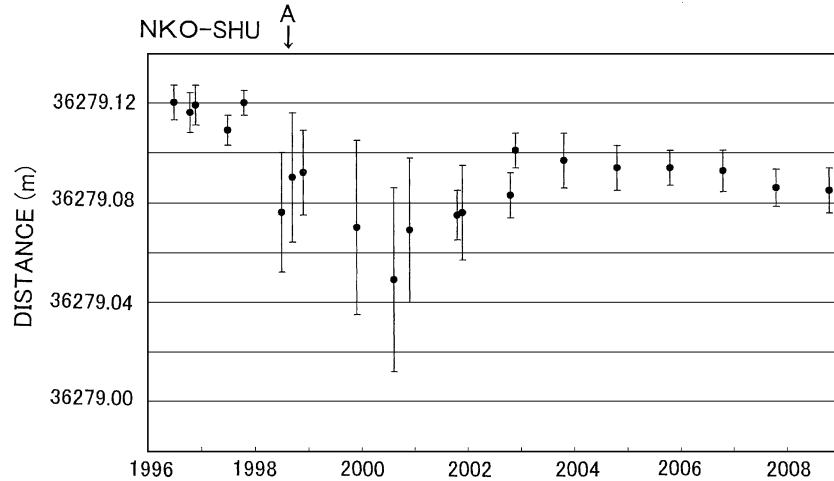


Fig. 5. Temporal changes of baseline lengths between Nakao (NKO) and Shinshu-University (SHU) sites for 1996-2008. A shows the beginning of the 1998 Hida earthquake swarm.

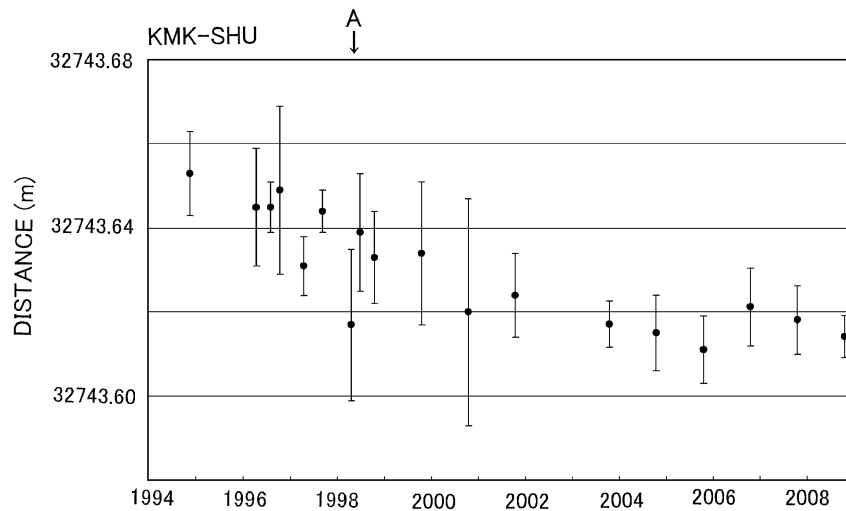


Fig. 6. Temporal changes of baseline lengths between Kamikochi (KMK) and Shinshu-University (SHU) sites for 1994-2008. A shows the beginning of the 1998 Hida earthquake swarm.

顕著な短縮が認められた。

上高地-信州大学基線 図6に上高地（KMK）-信州大学（SHU）の基線長変化を示した。図6より上高地-信州大学の基線長の変化は、2000年まで年平均約4mmの割合で縮んでいる傾向が見られたが、2000年頃を境にそれ以降は変化のない状況が続いている。なお、上高地観測点は2002年冬の敷地内の工事に伴い、2003年に観測点を移設した。よって、2003年以前の値に補正を加えることにより、移設後の2003年から2008年の解析結果と合わせて図示してある。

栗尾-信州大学基線 図7に栗尾（KRO）-信州大学（SHU）の基線長変化を示した。図7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年以降は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である1998年6月に顕著な短縮が認められた。なお、この基線の詳細な結果は、角野ほか（2008a）で報告されている。

4-2. 焼岳山体および山麓部の変動

焼岳-栗尾基線 焼岳（YKD）と栗尾（KRO）は直線距離が4km弱と短く、かつ標高差が23m（表1）ときわめて小さいため、電離層や大気による電波遅延誤差の影響が少なく、その結果、相対的に精度の高い観測が可能となった。焼岳（YKD）-栗尾（KRO）の基線長変化を図8に示した。基線長の経年変化は、2001年を除いて、1996年から2002年まで年平均約7mmの割合で縮んでいた。

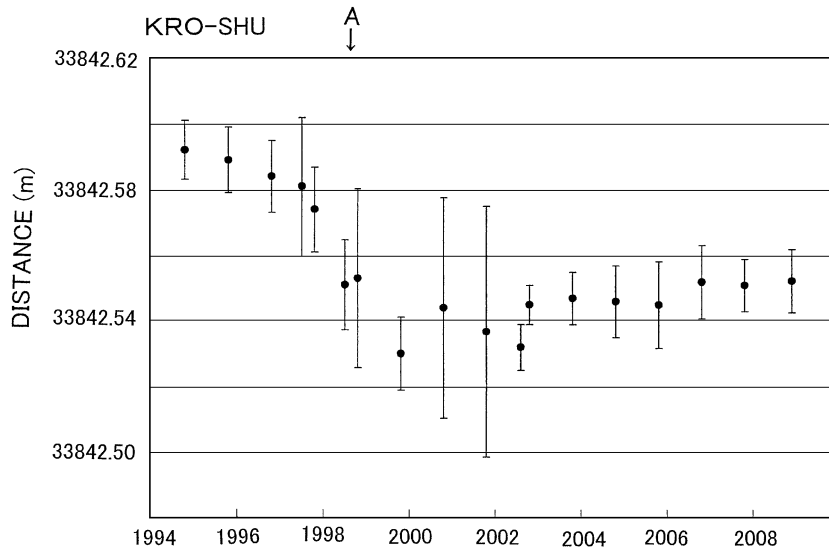


Fig. 7. Temporal changes of baseline lengths between Kurio (KRO) and Shinshu-University (SHU) sites for 1994–2008. A shows the beginning of the 1998 Hida earthquake swarm.

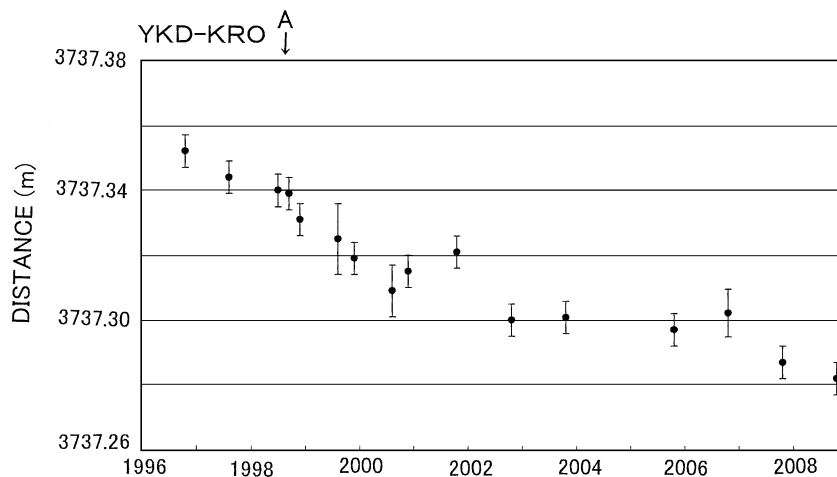


Fig. 8. Temporal changes of baseline lengths between Yake-dake (YKD) and Kurio (KRO) sites for 1996–2008. A shows the beginning of the 1998 Hida earthquake swarm.

2002年から2006年にかけては、変化のない状態であったが、2007年からは縮みの傾向が見られる。次に、栗尾 (KRO) を固定したときの焼岳 (YKD) の水平変動の変化を、南北成分については図9に、東西成分については図10に示した。図9および図10より、焼岳 (YKD) の水平変動は2000年までは北西へ移動する傾向が認められたが2000年頃を境に、北東方向へと向きが変化している。また、栗尾 (KRO) を固定したときの焼岳 (YKD) の上下変動の変化を、図11に示した。図11より、1997年から2008年にかけて、わずかではあるが上昇傾向が見られる。

焼岳-中尾基線 図12に焼岳 (YKD)-中尾 (NKO) の

基線長変化を示した。基線長の経年変化は、2003年の値を除くと、1992年から2008年の期間まで変化がない状態が続いている。

焼岳-上高地基線 図13に焼岳 (YKD)-上高地 (KMK) の基線長変化を示した。基線長の経年変化は、1996年秋の値を除くと、1992年から2001年の期間は変化の少ない状態が続いている。上高地観測点は2002年冬の敷地内の工事に伴い、2003年に観測点を移設した。よって、2003年以前の値に系統的な補正が加えることにより、移設後の2003年から2008年の解析結果と合わせて図示してある。

上高地-中尾基線 図14に上高地 (KMK)-中尾 (NKO)

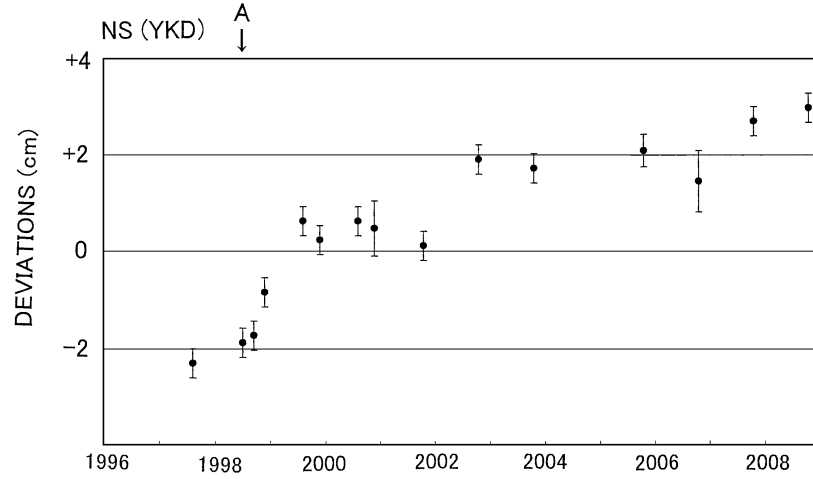


Fig. 9. Temporal changes of the horizontal component in the north-south direction of GPS coordinates at Yake-dake (YKD) site, when fixed at Kurio (KRO). Upward shows to north. A shows the beginning of the 1998 Hida earthquake swarm.

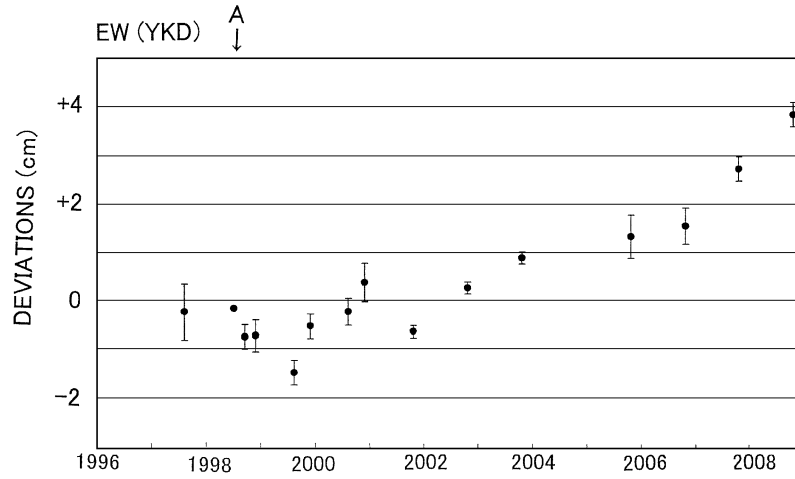


Fig. 10. Temporal changes of the horizontal component in the east-west direction of GPS coordinates at Yake-dake (YKD) site, when fixed at Kurio(KRO). Upward shows to east. A shows the beginning of the 1998 Hida earthquake swarm.

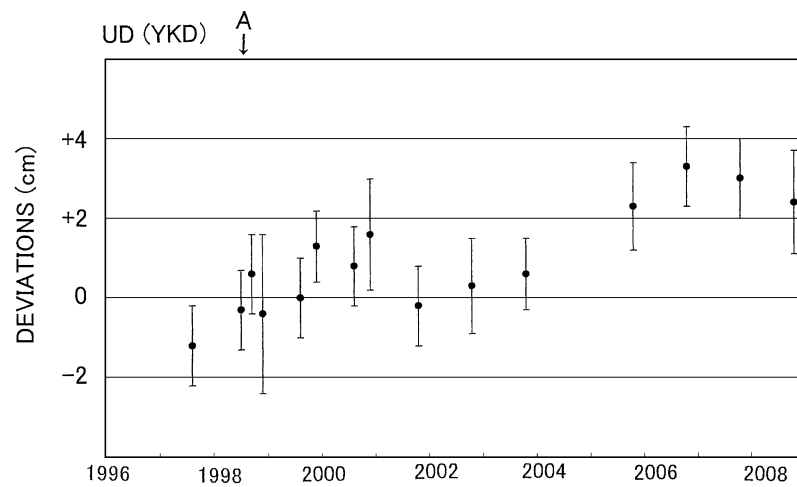


Fig. 11. Temporal changes of vertical component in GPS coordinates at Yake-dake (YKD) site, when fixed at Kurio(KRO). Upward shows to upheaval. A shows the beginning of the 1998 Hida earthquake swarm.

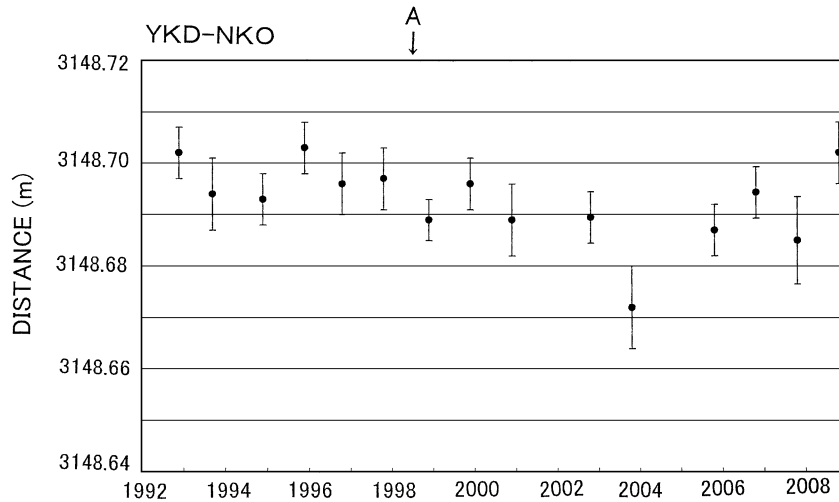


Fig. 12. Temporal changes of baseline lengths between Yake-dake (YKD) and Nakao (NKO) sites for 1992-2008. A shows the beginning of the 1998 Hida earthquake swarm.

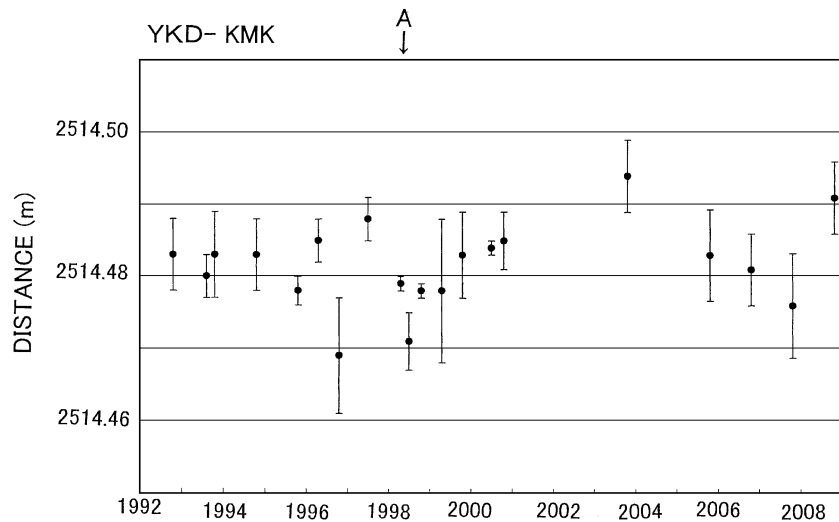


Fig. 13. Temporal changes of baseline lengths between Yake-dake (YKD) and Kamikochi (KMK) sites for 1992-2008. A shows the beginning of the 1998 Hida earthquake swarm.

の基線長変化を示した。基線長の経年変化は、1992年から1997年まで緩やかに伸びの傾向が見られたが、1998年の飛騨山脈の群発地震直前に縮んだ後は、緩やかに伸びの傾向にある。特に、飛騨山脈の群発地震が1998年8月初旬に始まるが、その直前の1998年6月には顕著な短縮が認められた(図14の矢印A)。次に、中尾(NKO)を固定したときの上高地(KMK)の水平変動の動きを、南北成分については図15に、東西成分については図16に示した。図15より、上高地(KMK)の南北成分の動きは1994年から1998年にかけてはほぼ変化のない状態であったが、飛騨山脈の群発地震発生直前に南方方向へ変化した後、引き続き南方方向への動きが加速された。図16

より、上高地(KMK)の東西成分の動きは1994年から1997年まで西方方向へと変化する傾向が見られたが、飛騨山脈の群発地震の発生直前である1998年6月には顕著な西方方向への動きが認められた。2003年以降は緩やかに西方方向へ動きが認められる。図17より、上高地(KMK)の上下変動については1994年から2008年まで、観測誤差を考慮に入れると変化の少ない状態が続いていると考えられる。なお、上高地観測点は2002年冬の敷地内の工事に伴い、2003年に観測点を移設した。よって、2003年以前の値に系統的な補正が加えることにより、移設後の2003年から2008年の解析結果と合わせて図示してある。

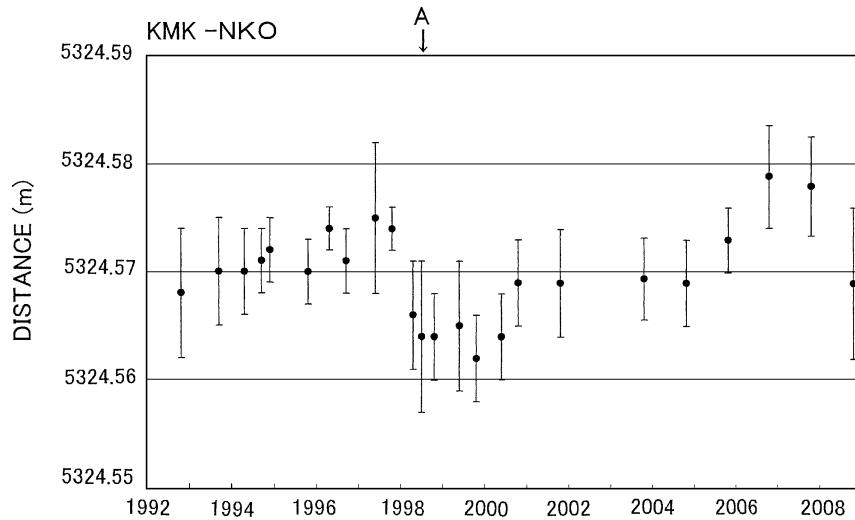


Fig. 14. Temporal changes of baseline lengths between Kamikochi (KMK) and Nakao (NKO) sites for 1992-2008. A shows the beginning of the 1998 Hida earthquake swarm.

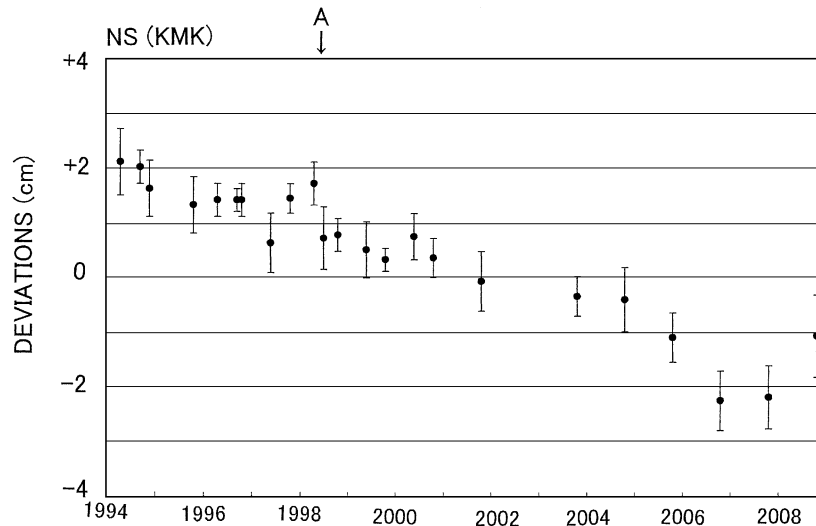


Fig. 15. Temporal changes of the horizontal component in the north-south direction of GPS coordinates at Kamikochi (KMK) site, when fixed at Nakao (NKO). Upward shows to north. A shows the beginning of the 1998 Hida earthquake swarm.

中尾-栗尾基線 図 18 に中尾 (NKO)-栗尾 (KRO) の基線長変化を示した。基線長の経年変化は、1996 年から 2008 年の期間まで変化がない状態が続いている。

上高地-栗尾基線 図 19 に上高地 (KMK)-栗尾 (KRO) の基線長変化を示した。1994 年から 2002 年にかけては緩やかに縮む傾向が見られたが、2004 年以降は伸びに転じたと考えられる。なお、上高地観測点は 2002 年冬の敷地内の工事に伴い、2003 年に観測点を移設した。よって、2003 年以前の値に系統的な補正が加えることにより、移設後の 2003 年から 2008 年の解析結果と合わせて図示してある。

5. 焼岳の噴気孔放射温度観測

焼岳は 1963 年以來、現在にいたるまで噴火活動はないが、現在も山頂火口や北側山腹火口などにおいて噴気活動が続いている。その噴気孔の温度を赤外線放射温度計により測定した。使用した放射温度計はミノルタ TR-0510b（一眼レフ式、測定波長 $8\sim 13\mu\text{m}$ 、温度測定範囲 $-50^{\circ}\text{C}\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 、測定距離 $0.75\sim \infty\text{ m}$ 、標準サイズ縦 $11\text{ mm}\times$ 横 $4\text{ mm}\sim \infty$ 、測定角 $1^{\circ}\times$ 縦 $1/3^{\circ}$ ）である。焼岳火山の噴気孔の分布は図 20 に示す。噴気孔の名称は気象庁（1982）に従い、T, W, X, Y, Z とした（図 20）。観測に際しては精度を得るため、可能な範囲で観測対象か

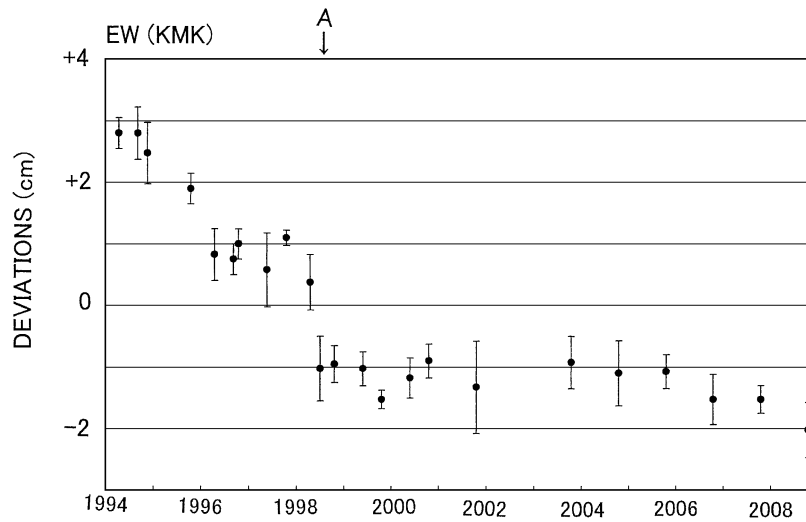


Fig. 16. Temporal changes of the horizontal component in the east-west direction of GPS coordinates at Kamikochi (KMK) site, when fixed at Nakao (NKO). Upward shows to east. A shows the beginning of the 1998 Hida earthquake swarm.

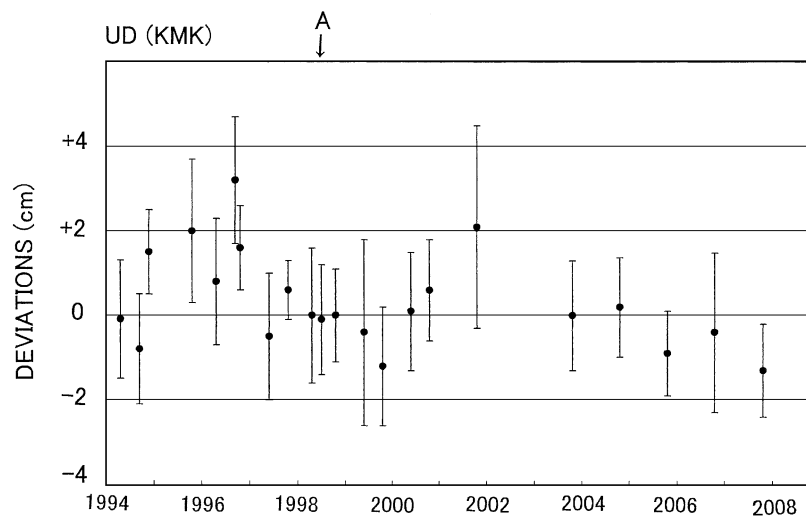


Fig. 17. Temporal changes of vertical component in GPS coordinates at Kamikochi (KMK) site, when fixed at Nakao (NKO). Upward shows to upheaval. A shows the beginning of the 1998 Hida earthquake swarm.

らの距離を0.75~1 mとし、複数回の測定をおこない、その平均値と標準偏差 (1σ) 求めた。焼岳展望台周辺の噴気孔群 (W)、登山道近くの昭和37年噴火噴気帯 (X-1, X-2)、東峰北斜面の噴気孔群 (T)、山頂東斜面の噴気孔 (Y-1, Y-2)、火口湖東側縁の噴気孔帯 (Z) についてはごく近接距離から温度測定をおこなった。一方、インキョウ穴火口 (U) については、1911年の噴火によって形成された山頂部の火口内の噴気孔で通常立入禁止地域内であり、かつ足場が悪く大変危険性が高いため、この噴気孔の観測は望遠観測をおこなった。なお、噴気孔の温度観測は、焼岳展望台付近のGPS観測と同時にこな

われたため、2003年までは毎年6月頃および10月頃の2日間、また、2004年以降は10月頃の2日間実施した。

噴気孔温度の観測成果については、噴気孔温度の経年変化を図21~図28に示した。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 (図3)。その発生の開始時期を図21~図28において、図中に矢印Aで記入した。

6. 焼岳噴気孔温度観測の結果

焼岳展望台周辺の噴気孔群 (W) 焼岳展望台は新中尾峠と旧中尾峠の間にあるピーク上にあり、ここにGPS

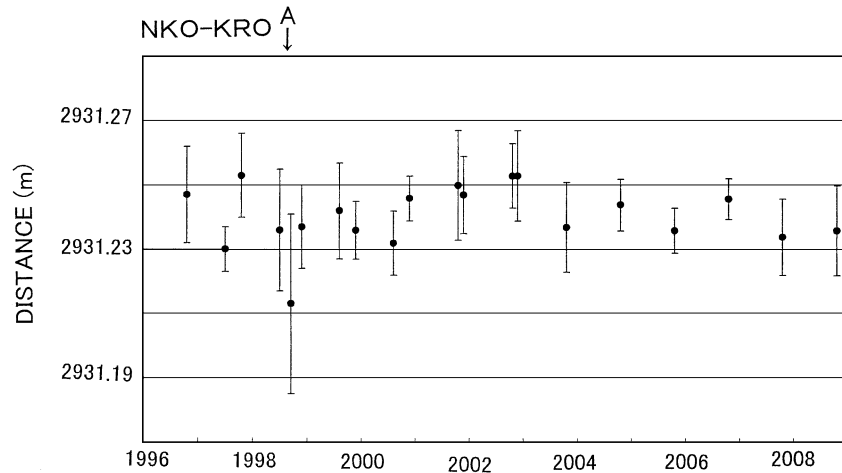


Fig. 18. Temporal changes of baseline lengths between Nakao (NKO) and Kurio (KRO) sites for 1996-2008. A shows the beginning of the 1998 Hida earthquake swarm.

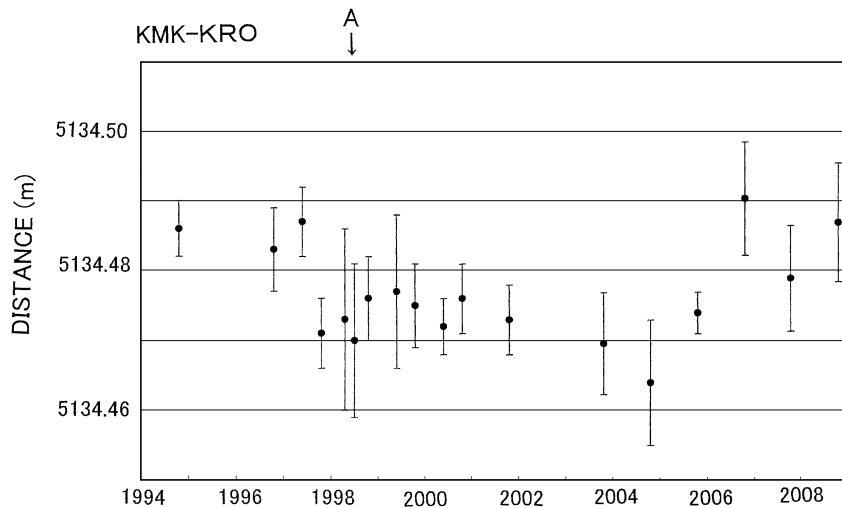


Fig. 19. Temporal changes of baseline lengths between Kamikochi (KMK) and Kurio (KRO) sites for 1994-2008. A shows the beginning of the 1998 Hida earthquake swarm.

焼岳観測点を設置している。噴気孔は展望台西側～南側に集中しているほか、東側のやや下の方にも見られる。焼岳展望台周辺の噴気孔群（W）の温度観測の結果を図 21 に示した。噴気孔はいずれも臭気が弱く、植生に覆われ温度もそれほど高くなく 30℃～60℃ 前後である。

昭和 37 年噴火噴気帯（X-1・X-2） 上々堀沢（峠沢）上流の登山道沿いに分布する噴気孔群で、昭和 37 年噴火噴気帯である。噴火噴気帯（X-1）の温度観測の結果を図 22 に示した。噴火噴気帯（X-1）は上々堀沢（峠沢）をまたぐ登山道から下方に 40 m ほど下ったところにある。噴気量はやや多く、崩落の危険性があるため観測を 2002 年以降はとりやめた。一方、噴火噴気帯（X-2）の温度観測の結果を図 23 に示した。この噴火噴気帯は 1962

年（昭和 37 年）6 月 7 日の噴火によってできた割れ目噴火口跡に分布する。登山道沿いから 5 m ほど上に登ったところにあり、硫黄臭や噴出音が強かった。また噴気量も多く、噴気孔周辺には硫黄の昇華物が付着しており、噴気孔の温度は 90℃ 前後とかなり高い。

東峰北斜面噴気孔群（T） 山頂から 50 m ほど東にある鞍部を形成する峰の北斜面に分布する噴気孔群である。東峰北斜面噴気孔群（T）の温度観測の結果を図 24 に示した。

山頂東斜面噴気孔（Y-1・Y-2） 山頂直下の東斜面の登山道沿いに分布する噴気孔群である。山頂東斜面噴気孔（Y-1）温度観測の結果を図 25 に示した。一方、山頂東斜面噴気孔（Y-2）は規模の小さな噴気孔の集まりで

あるが、噴気量が多く、噴気臭も強く、噴気音がかなり大きかった。全体的に白く珪化しており、ほとんどの噴気孔に硫黄の昇華物が結晶化している。山頂東斜面噴気孔 (Y-2) の温度観測の結果を図 26 に示した。

火口湖東側縁噴気孔帯 (Z) 火口湖東側縁噴気孔帯 (Z) は焼岳火山で最も激しく活動している噴気孔群で、噴気量はかなり多く、強い噴気臭で噴気音もかなり大きい。温度はどの噴気孔も 90℃~100℃ 以上と高い。一般



Fig. 20. The locations of fumaroles at the Yake-dake Volcano used in the present study.

に、ふもとから確認できる焼岳火山の噴煙はこの噴気孔の噴気である。この噴気帯は南北約 15 m、東西約 10 m の範囲に多数の噴気孔が分布し、一面灰色~黒色の付着物に覆われている。噴気孔の周りには黄色い硫黄の昇華物が観察できる。火口湖東側縁噴気孔帯 (Z) の温度観測の結果を図 27 に示した。特に、飛騨山脈の大規模な群発地震が 1998 年 8 月に始まり 1 ヶ月後には終息へと向かうのであるが、群発地震がほぼ終息した 1998 年 10 月においては一部の噴気孔の温度が 120℃ を超えた (図 27)。

インキョ穴火口 (U) インキョ穴火口 (U) は、山頂部にみられる 1911 年の噴火によって形成された火口内の噴気孔である。この観測点は通常立入禁止地域内であり、また足場が悪く大変危険性が高いためこの噴気孔については望遠観測をおこなったが、2000 年以降は観測をとりやめた。インキョ穴火口 (U) の温度観測の結果を図 28 に示した。

7. 考察とまとめ

焼岳およびその周辺地域の地殻変動については、1992 年~2008 年の 16 年間、飛騨山脈の群発地震活動 (1998 年) の時期を除き、系統的な変化はあるものの特異な変動は認められなかった。特に、焼岳 (YKD) の変動について、栗尾 (KRO) を固定した場合、焼岳 (YKD)-栗尾 (KRO) は直線距離が 4 km 弱と短く、かつ標高差が 23 m (表 1) ときわめて小さいため、電離層や大気による電波遅延誤差の影響が少なく、その結果、相対的に精度の高い観測結果が得られた。焼岳-栗尾の基線長の経年変化は、1996 年から 2002 年まで年平均約 7 mm という大きな割合で縮んでいたが、2002 年以降は変化のない状態

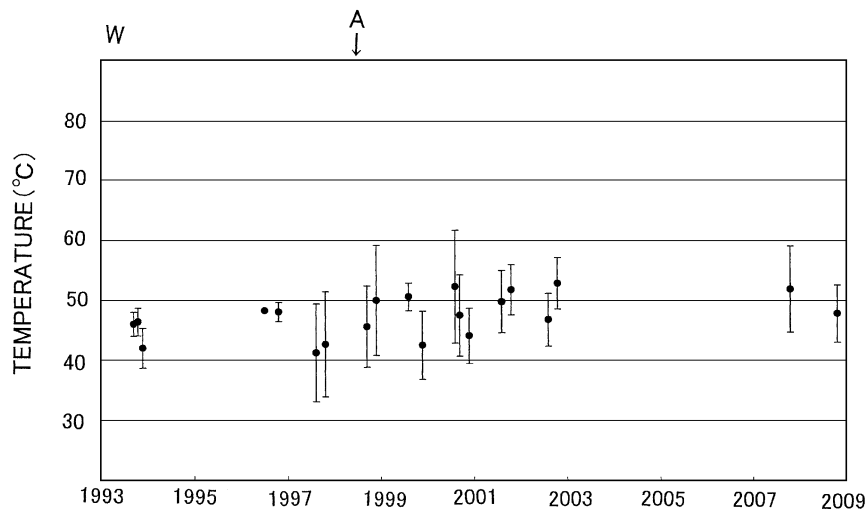


Fig. 21. Temporal changes of temperatures at the fumaroles zone (W) for 1993-2008. A shows the beginning of the 1998 Hida earthquake swarm.

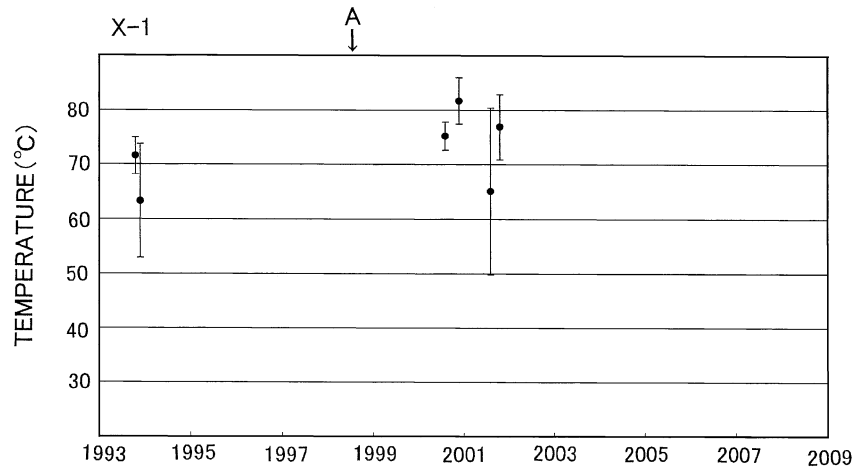


Fig. 22. Temporal changes of temperatures at the fumaroles zone (X-1) for 1993-2002. A shows the beginning of the 1998 Hida earthquake swarm.

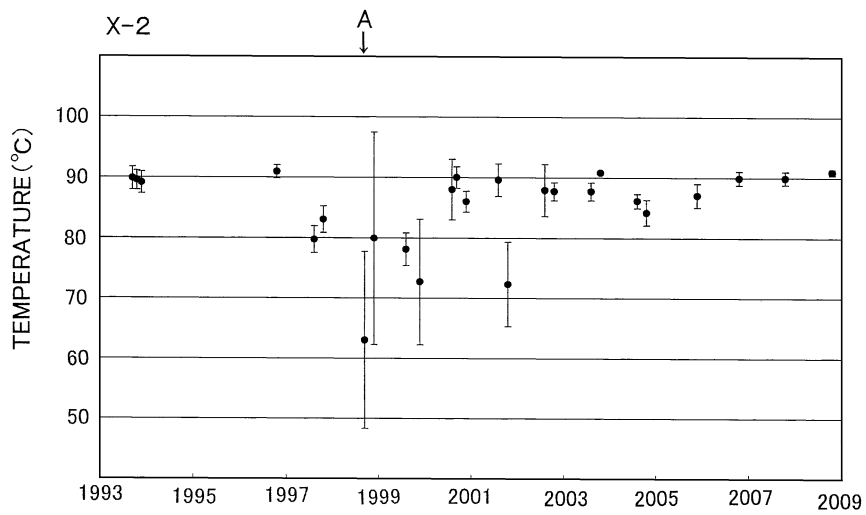


Fig. 23. Temporal changes of temperatures at the fumaroles zone (X-2) for 1993-2008. A shows the beginning of the 1998 Hida earthquake swarm.

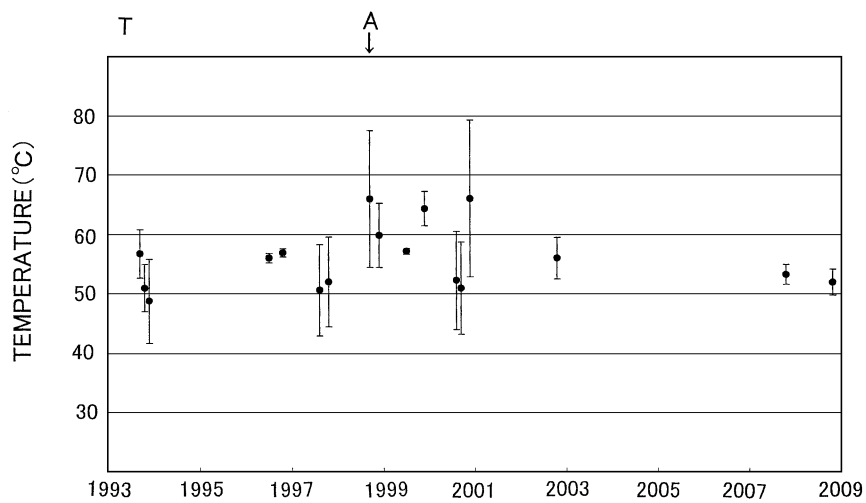


Fig. 24. Temporal changes of temperatures at the fumaroles zone (T) for 1993-2008. A shows the beginning of the 1998 Hida earthquake swarm.

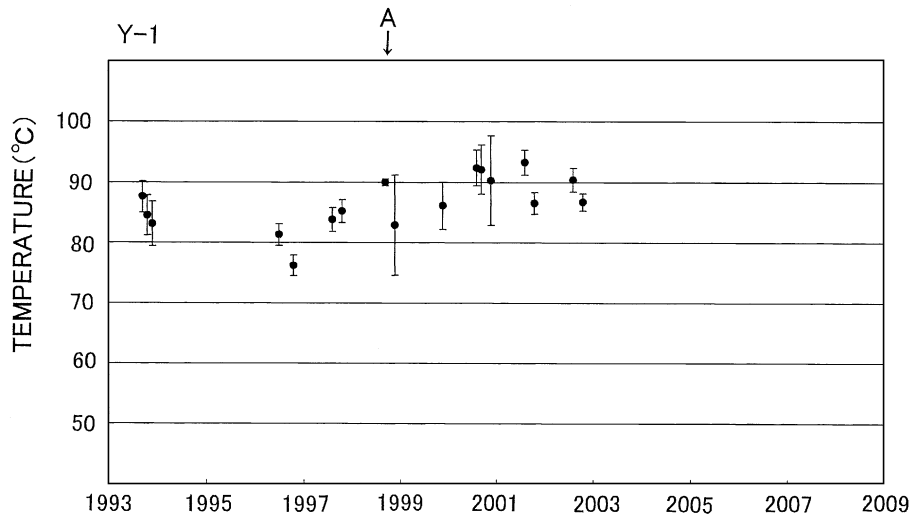


Fig. 25. Temporal changes of temperatures at the fumaroles zone (Y-1) for 1993-2002. A shows the beginning of the 1998 Hida earthquake swarm.

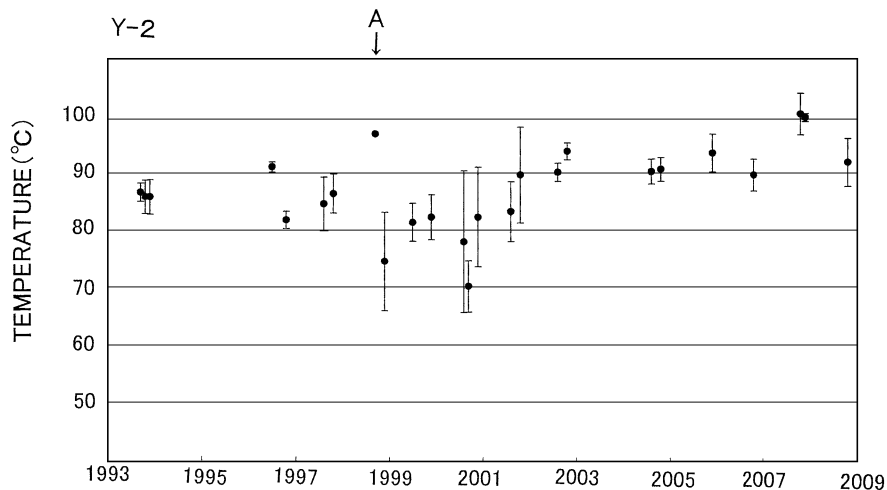


Fig. 26. Temporal changes of temperatures at the fumaroles zone (Y-2) for 1993-2008. A shows the beginning of the 1998 Hida earthquake swarm.

が続いている(図8)。また、焼岳(YKD)の水平変動は栗尾(KRO)を固定したとき、2000年までは北西へ移動する傾向が認められたが、2000年頃を境に、北東方向へと向きが変化している(図9, 図10)。焼岳(YKD)の上下変動は、栗尾(KRO)を固定したとき、1997年から2008年にかけて、4 cm程度とわずかながら上昇傾向が見られた(図11)。

一方、焼岳山麓の変動については、焼岳の東山麓で大規模な飛騨山脈群発地震が1998年8月に始まったが、その直前の1998年6月に上高地(KMK)-中尾(NKO)の基線(約5 km)において1 cmを超える顕著な短縮が認められた(図14)。特に、上高地(KMK)の東西成分の動きは中尾(NKO)を固定したとき、1994年から1996

年まで西方向へと変化する傾向にあったが、飛騨山脈の群発地震発生の直前1998年6月に1 cmを超える顕著な動きが加速された。その約1ヵ月後に上高地観測点(KMK)から北東側へわずか1 km離れた地域で最大マグニチュードが4を超える群発地震の活動が始まった(和田ほか, 1999, 2000; 気象庁, 1999)。この上高地観測点(KMK)の西方向の動きは、地震の発生メカニズム、すなわち震源断層が東西走向の右横ずれ断層であることと調和的であり、すでに地震が発生する1ヶ月前には地震断層のごく近傍において前駆的な動き、すなわち前兆すべりがあったものと考えられる。

本地域の広域的な地殻変動を見ると、松本盆地にある信大観測点(SHU)からみた飛騨山脈の焼岳(YKD)、

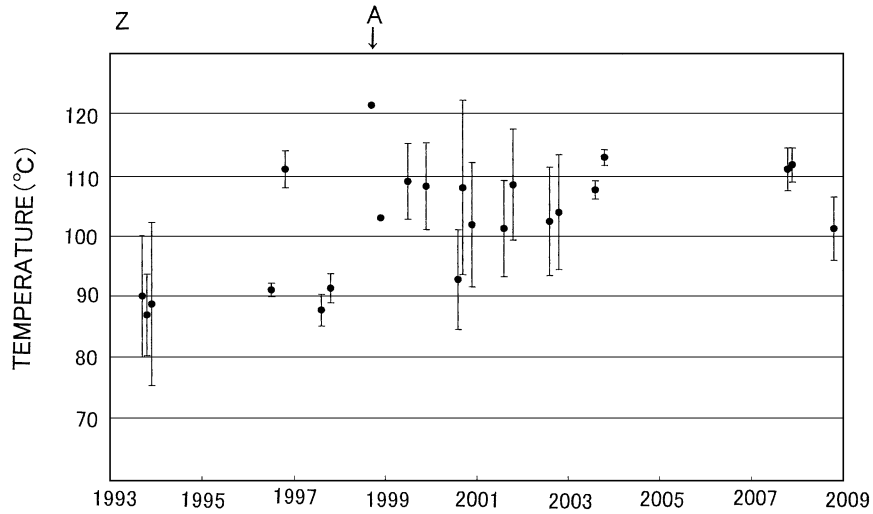


Fig. 27. Temporal changes of temperatures at the fumaroles zone (Z) for 1993-2008. A shows the beginning of the 1998 Hida earthquake swarm.

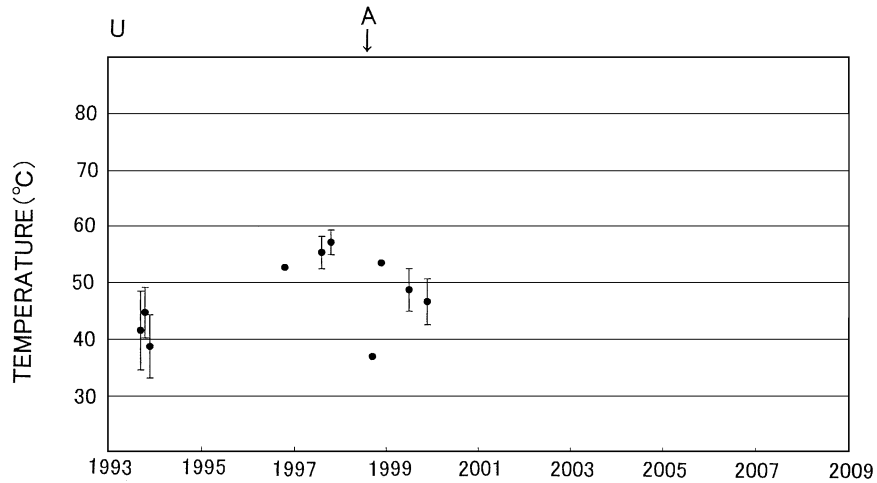


Fig. 28. Temporal changes of temperatures at the fumaroles zone (U) for 1993-2000. A shows the beginning of the 1998 Hida earthquake swarm.

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"	686.101m
Nakao (NKO)	N 36° 15' 27.84281"	E 137° 34' 27.03098"	1199.198m
Yake-Dake (YKD)	N 36° 14' 06.75464"	E 137° 35' 32.93994"	2176.279m
Kamikochi (KMK)	N 36° 13' 23.97857"	E 137° 36' 54.94562"	1553.071m
Kurio (KRO)	N 36° 16' 04.67046"	E 137° 36' 07.59497"	2199.390m

中尾 (NKO), 上高地 (KMK), 栗尾 (KRO) の各観測点の変動は, 基線長の経年変化に着目すると, 2000 年頃を境に, 変動パターンに変化が認められた. この経年変化の変動パターンが変化したことについては, 飛騨山脈および松本盆地の GPS 地殻変動観測の結果にも報告されている (角野ほか, 2008a, 2008b). この原因については, 1998 年の飛騨山脈の大規模な群発地震による広域的な応力場の変化が, 経年変動のパターンの変化に大きく影響していたものと考えられる.

焼岳の噴気孔温度については, 1992 年~2008 年の 16 年間, 飛騨山脈の群発地震活動 (1998 年) の時期を含め, 経年的な変化について特異な変化は認められなかった. しかし, 飛騨山脈の大規模な群発地震が始まる 1998 年 8 月の 2 ヶ月後の観測では, 焼岳の噴気活動が全体的に活発になり, 噴気量も増加し, 特に火口湖東側縁噴気孔帯 (Z) の一部の噴気孔の温度が 120℃ を超えた (図 27). この原因は, 群発地震の揺れにともない, 噴気が山頂部の一部の噴気孔から出やすくなり, その結果, 噴気活動が一時的に活発になったものと考えられる. 一方, それぞれの噴気孔帯の噴気温度については, 地域差による温度の違いが大きいものの, 噴気温度の時間的な経年変化に着目すると, ほとんど変化が見られなかった. そして, 2000 年以降は噴気孔の数も徐々に減少する傾向にあった.

以上の観測結果, すなわち焼岳の GPS 測位と噴気孔温度の観測結果により, 1992 年~2008 年の 16 年間, 焼岳は定常かつ安定な状態が続いていると考えられる. しかし, 焼岳は 1907 年以前の長期の活動休止期間の後, 1911 年と 1925 年の活発な時期を含む 1907~1939 年まで約 30 年続いた噴火活動期間と, その後, 大きな前兆もないまま 1962 年に再び噴火したことを考慮すると, 遠くない将来に活動を再開する可能性も十分考えられる.

謝 辞

京都大学防災研究所流域研究センター穂高砂防観測所の沢田豊明先生, 堤 大三先生, 志田正雄氏, 及び国土交通省松本砂防工事事務所上高地防災管理センターの方々には観測機材の設置と商用電源の使用を快諾していただくとともに, 観測に便宜を図っていただいた. 奥飛騨観光開発(株) 新穂高ロープウェイの方々にはロープウェイによる観測機材の運搬や観測機器の設置, そして商用電源の提供など様々な面でご協力をいただいた. また焼岳小屋の宮本康博氏, 青木進二氏, 及び松本市安曇支所 (旧安曇村役場) のの方々には焼岳の観測の際に宿泊などの便宜を図っていただいた. また, 焼岳の山頂観測では, 東京大学地震研究所の村田一郎先生, 加藤照之先生,

中尾 茂先生, 名古屋大学地震火山・防災研究センターの山岡耕春先生, 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観測機材などの便宜をはかっていただいた. そして, 山頂観測には信州大学理学部地質科学教室の多数の学生諸君に協力していただいた. 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. そして, この特定共同研究 (A) をとおして, 東京大学地震研究所の佃為成先生に大変お世話になった. これらのすべての方々に深く感謝します.

参考文献

- 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, 1994, 世界一若い露出プルートの冷却史—北アルプス, 滝谷花崗閃緑岩の年代と冷却モデル—, 地質学論集, **43**, 87-89.
- 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.
- 原山 智・大塚 勉・酒井潤一・小坂共栄・駒澤正夫, 2009, 松本地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 産業技術総合研究所地質調査総合センター, pp. 1-63.
- 細川盛樹・嶋田庸嗣・角野由夫, 1995, 焼岳における GPS 観測 (1992-1994), 測地学会誌, **41**, 409-412.
- 加藤鉄之助, 1912, 硫黄岳 (焼岳) 火山地質調査報告, 震災予防調査会報告, **75**, 27-73.
- 気象庁, 1982, 焼岳, 火山機動観測実施報告 (昭和 56 年 6 月~10 月), **18**, 19-29.
- 気象庁, 1991, 焼岳, 火山機動観測実施報告 (平成 2 年 7 月~10 月), **27**, 31-70.
- 気象庁, 1996, 焼岳, 火山機動観測実施報告 (平成 8 年度), **33**, 33-62.
- 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.
- 気象庁, 2005, 日本の活火山総覧 (第 3 版), pp. 306-311.
- 小平孝雄, 1932, 焼岳の最近の活動, 火山, **1**, 52-64.
- 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.
- Murai, I., 1962, A brief note on the eruption of the Yake-Dake Volcano of June 17, 1962, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **40**, 805-814.
- 及川輝樹・紀岡秀征, 2000, 飛騨山脈南部, 焼岳火山群の K-Ar 年代, 火山, **45**, 33-36.
- 及川輝樹・奥野 充・中村俊夫, 2002, 北アルプス南部, 焼岳火山の最近約 3000 年間の噴火史, 地質学雑誌, **108** (2), 88-102.
- 小坂次予・小沢竹二郎, 1966, 1962 年焼岳活動の噴出物とその噴火様式について, 火山, 第 2 集, **11**, 17-29.

- 角野由夫・小林和典・池田直人・近藤奈津子・川合俊二・藤巻ひろみ・細川盛樹・伊藤彰浩・嶋田庸嗣・和田博夫・伊藤潔, 1997, 焼岳の GPS 地殻変動観測 (1992–1996), 地球科学, **51** (4), 292–299.
- 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, 2008a, 飛騨山脈西穂高岳の GPS 地殻変動観測 (1994–2007), 地震研究所彙報, **83**, 183–191.
- 角野由夫・秋山侑輝・秋山知生・小林 亘, 2008b, 松本盆地の GPS 地殻変動観測 (1992–2006), 地震研究所彙報, **83**, 175–182.
- Trimble Navigation, 1991, TRIMVEC-PLUS GPS 測量ソフトウェア使用説明書, Trimble Navigation Ltd., 326 p.
- 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・梅田康弘・角野由夫, 1993, 焼岳火山付近の群発地震観測, 京都大学防災研究所年報第 36 (B-1), 291–303.
- 和田博夫・伊藤 潔・小泉 誠, 1994, 飛騨山地の地震活動—1993 年槍ヶ岳付近の活動—, 京都大学防災研究所年報第 37 号 (B-1), 365–380.
- 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.
- Yamada, T., 1963, Report of the 1962 activity of Yakedake Volcano, central Japan. Jour. Fac. Liberal Arts and Sci., Shinshu Univ., 12, 47–68.
- Yamazaki, F., 1996, A wall-like low-Q zone beneath the Yakedake volcano, Central Japan, *J. Phys. Earth*, **44**, 23–38.

(Received July 12, 2010)

(Accepted November 2, 2010)