

草津白根火山観測システムの構築とその運用について

森 健彦¹・平林順一²・野上健治²・鬼澤真也²

1：京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設火山研究センター

2：東京工業大学火山流体研究センター

Construction and application of observation system in Kusatsu-Shirane volcano.

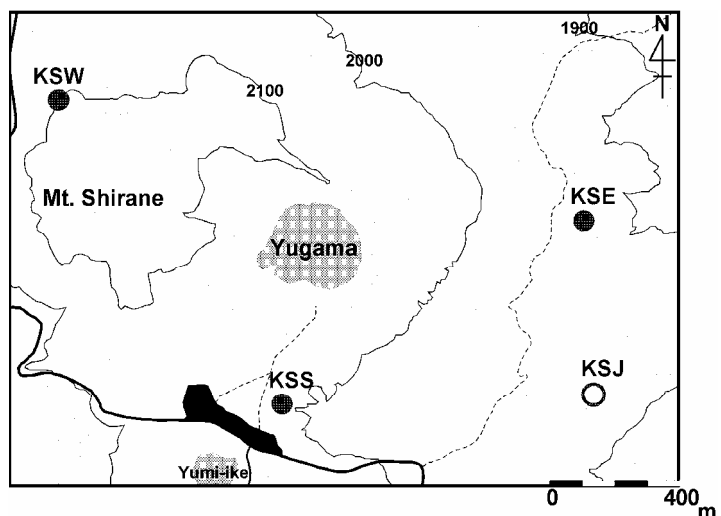
Takehiko Mori¹, Junichi Hirabayashi², Kenji Nogami², Shinya Onizawa²

1: Aso Volcanological Laboratory, Institute for Geothermal Sciences,
Graduate School of Science, Kyoto University.

2: Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology.

1. はじめに

草津白根山における噴火予知研究は、火山化学的手法の研究が活発に進められており、1976年の水釜噴火の直前には火山ガス組成の変化と噴出量の増加を観測して、世界で初めて噴火の化学的予知に成功した(Ossaka et al., 1983)。そして、1985年には化学的観測研究を遂行する目的で東京工業大学草津白根火山観測所が設立され、草津白根山における火山ガスの継続的な観測研究に取り組んでいる。一方で、草津白根山における地震観測はMinakami(1939)による1937~1939年の観測が始まりである。当時は観測点が一点のみで地震観測を行っており、震源を決定するまで至らなかった。しかし、地震の継続時間を根拠として、湯釜周辺が震央であると推察している。1967年には噴火予知特定研究班による多点の臨時観測が始めて行われ、湯釜・涸釜・水釜の近傍と、白根山の南東斜面の地下で微小地震が発生していることが明らかになった(Minakami et al., 1969)。その後、臨時の多点観測が1974, 1976, 1983, 1984, 1987年に火山噴火予知計画の集中総合観測(下鶴他, 1978)や気象庁の火山機動観測等で行われている。常時観測は1973年からの気象庁による1点の観測が始まりである。そして、第3次火山噴火予知計画で、東京大学地震研究所による多点の常時観測が1987年から始められ、1989年1月に発生した湯釜火口の小噴火に伴う地震活動の様子が井田・他(1989)によって報告されている。一方で、東京工業大学草津白根火山観測所では、地震活動及び地殻変動をモニターするため、1990年に湯釜の南約400mの地点(湯釜南観測点(KSS))で110mの深さにボアホール型地震計及び傾斜系を設置して運用を始めている。

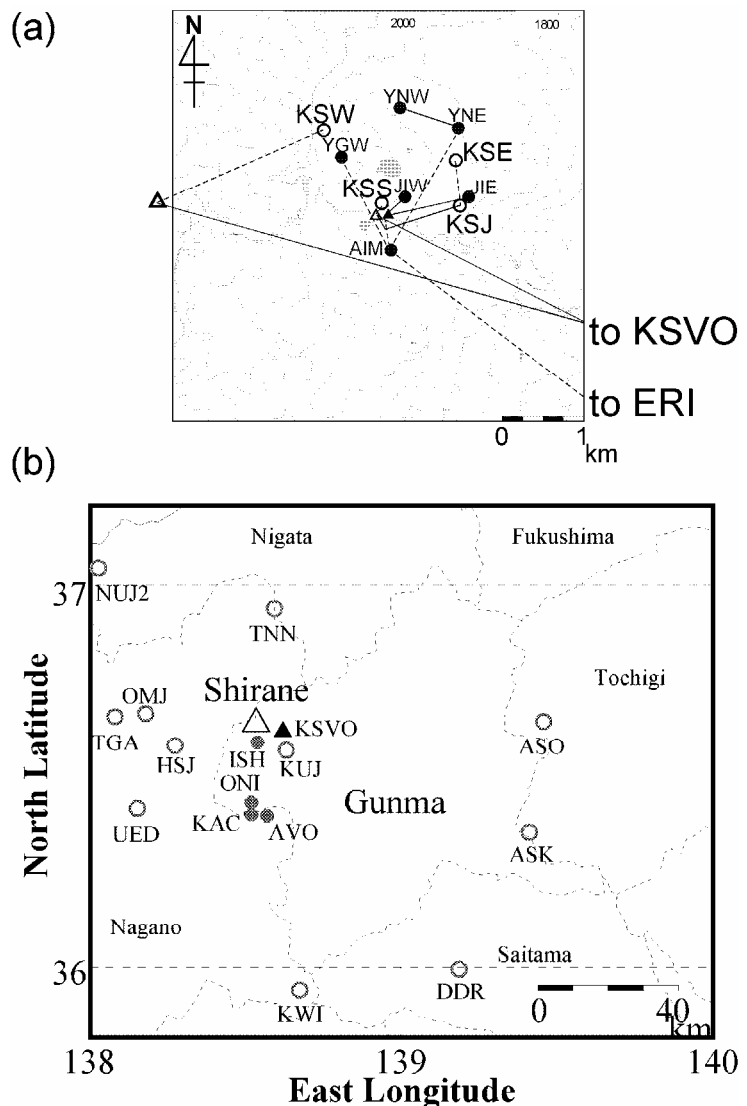


第1図 草津白根山(湯釜)と観測点の位置

東京工業大学では、2000年の草津白根火山観測所から火山流体研究センターへの改組以後、水蒸気爆発の発生と関係の強い火山体地下の流体の特性・構造・流動等を総合的に研究するため、比抵抗観測などの電磁気学的な観測を始めると共に、草津白根山山頂域に地中地震傾斜観測網を新たに整備した。さらに、草津白根山周辺域で東京大学地震研究所が実施している地震観測データを衛星データ受信装置によって取り込むことにより、地震観測の精度を上げ、草津白根山の浅部火山流体貯留層の位置や規模、地熱流体の流動現象の解明に取り組んでいる。本報告では、新たに整備された観測網についての詳細と、観測開始から2003年3月末までの草津白根山における地震活動について述べる。

2. 観測システムの概要

草津白根山においては、1987年より、東京大学地震研究所（以後ERIと記す）によって6点の地震観測点が設置され、運用が始まった。一方、東京工業大学火山流体研究センター（以後VFRCと記す）は1990年にボアホール型地震計及び傾斜計を1点設置して運用を始めた。草津白根山にERIとVFRCが設置した地震観測点は1990年の時点で計7点である。しかし、ERIの設置した6点の地震観測点は地表設置であり、天候や人工振動（車やロープウェイ）によるノイズレベルが高く、精度の良いデータが常時記録されていない。一方で、VFRCの観測点はボアホール型であり、ノイズレベルは低く観測精度は高いが、ERIの観測網のデータとの複合処理はなされていない。このような現状から、VFRCでは、草津白根山における精度の高い地震波形の観測及び震源決定を行うことを目指して、2箇所のボアホールタイプ観測点の新設を含んだ新しい地震・傾斜観測システムを2001年に構築した。



第2図 (1)：草津白根山周辺の地震観測点
 (○：東京大学地震研究所火山センター； △：KSVO)
 (2)：KSVOで受信されている広域観測点
 (○：東京大学地震研究所火山センター； △：東京大学地震研究所)

新たなボアホールの観測点は、草津白根山の最近の噴火活動は湯釜で発生している、地震の震源域は主に湯釜東部である(井田・他, 1989; 及川・他, 1996)、既存のボアホール観測点が湯釜の南(KSS)にある、の3点を考慮した結果、湯釜の北西約800m(湯釜西観測点(KSW))と東約800m(湯釜東観測点(KSE))の地点を選定した(第1図)。当初の計画では、地震計の設置深度を200mに設定し、掘削作業を行った。しかし、KSEでは深度約100mから坑内温度が上昇し、地震計の耐熱基準を上回る状態となった。そのため、最初の掘削孔を放棄し、隣接地において深度50mまで新たな掘削を行い、地震・傾斜計を設置した。KSWでは深度200mが粘土層であったため、さらに掘り進み、深度220mの岩層に設置した。これで、既存のKSS(設置深度110m)と合わせて、3地点のボアホール型観測点が湯釜周辺で運用されることになった。また、VFRC独自のネットワークを用いて地震の震源決定を行うためには、さらに1点の観測点の設置が望ましいことから、VFRCの神社映像送信局に地表埋設型の地震計(Mark Product: L-4 上下動型)を設置し、計4観測点のVFRCによる観測網を構築した。

VFRCによる草津白根山の地震・傾斜観測システムのデータ処理は群馬県草津町にある東京工業大学草津白根火山観測所(以後KSVOと記す)で行われる。VFRCの観測データは、観測局舎内に設置されたLS7000(白山工業製)によってデジタル化(20bitの分解能)された後、レストハウス局舎及び万座中継点へ有線もしくは無線テレメータで伝送され、そこからKSVOまではPowerComの光通信ケーブルによって1秒パケットとして準リアルタイム伝送されている。また、ERIの観測点のデータは、逢ノ峰観測中継局へ有線もしくは無線で集約された後、東京大学地震研究所へ無線伝送されている(第2図-(a))。そして、観測データは衛星通信地震観測テレメータシステムに取り込まれ、全国にデータ配信されている。VFRCでは、KSVOに衛星データ受信システムを設置することにより、VFRCとERIの観測データを統合処理している。また、草津白根山体内での地震と周辺部の地震を区別するため、衛星通信地震観測システムによって配信されている近接点の観測データも取得し、データ処理に取り込まれている(第2図-(b))。

この観測システムは、Winシステム(卜部・束田, 1992; 卜部, 1994)によって自動処理される。Winシステムによる自動処理で、湯釜からの水平距離が20km以内(パラメータの設定で変更可能)に震源が決定された場合、VFRC関係者及び気象庁火山センターに、震源情報(発震時、位置、マグニチュード)と湯釜からの水平距離の情報がe-mailで自動送信される。地震発生からメール到達までかかる時間は約10分である。ま



第3図 草津白根火山観測所(KSVO)内に設置された地震観測システム(:自動震源解析装置, :ランニングスペクトル表示装置, :連続波形表示装置)

た、湯釜周辺の観測点におけるトリガー回数が1時間あたり20回以上(パラメータの設定で変更可能)に達した場合、群発地震発生の可能性があると見なして、「群発地震情報」のメールが発信される。草津白根山の地震活動に関する情報をメールで送信する理由は、VFRCのスタッフが少なく、KSVOが無人となる状態が度々発生することがあり、草津白根山の火山活動に何らかの変化が生じた場合、国内何処にいても準リアルタイムで情報を取得する必要があるからである。さらに、草津白根山の火山活動を常時モニターするため、KSVOのデータ処理室に準リアルタイムの連続波形表示装置とランニングスペクトル解析装置を設置し、CRTモニター上に表示している。リアルタイムの連続波形表示装置は、2時に前日の24時間の波形記録が指定したチャンネル毎にプリント出力される。ランニングスペクトル解析装置は、青山・他(2000)によって開発されたソフトを参考に作られたが、スペクトル強度を白黒濃淡で表現し、最大6日前までの振動の変化をCRT上に表示できる機能とした(設定によりプリント出力も可能)(第3図)。システムは、2001年10月16日から試験稼働を始め、トリガー設定や波形表示のスケール等のパラメータを確定した後、11月から本格運用を開始した。

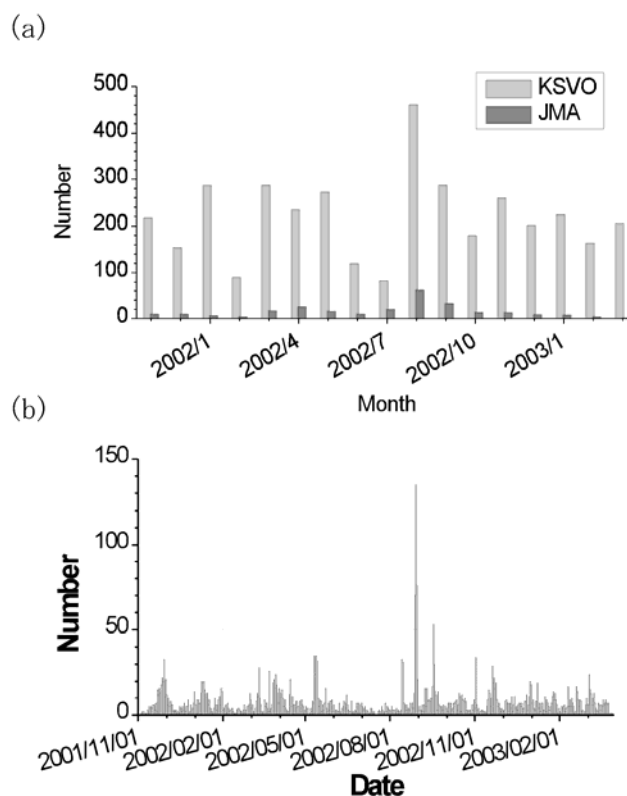
3. 草津白根山の地震活動(2001年11月~2003年3月)

3-1. 地震活動度

気象庁は1978年以降、湯釜の北東約1kmに設置した観測点(A点)のみで、草津白根山の地震活動を監視している。気象庁の平成14年年報(2002)によると、1982年から1983年までの噴火活動期と1989年の小規模噴火後の期間を除けば、月平均20回程度の発生回数で地震活動は推移しており、地震活動度が高い火山とはいえない。

VFRCの新システムでは、KSE、KSW、KSJ、KSSの4観測点のうち3観測点で、0.3秒間の震動の平均値が60秒間の震動平均値の2倍以上に1秒間継続した時、地震として判定されて自動収録される。その自動収録された地震イベントの記録から、P-S時間が1秒程度までの地震を抽出し、地震数のカウントと震源決定を行っている。

第4図-(a)に2001年11月から2003



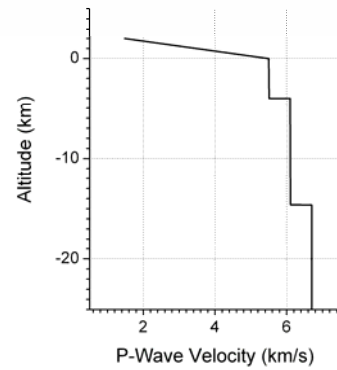
第4図 (a) 気象庁(JMA)とKSVOがそれぞれ観測した地震の月別回数

(b) KSVOで観測された日別地震発生回数

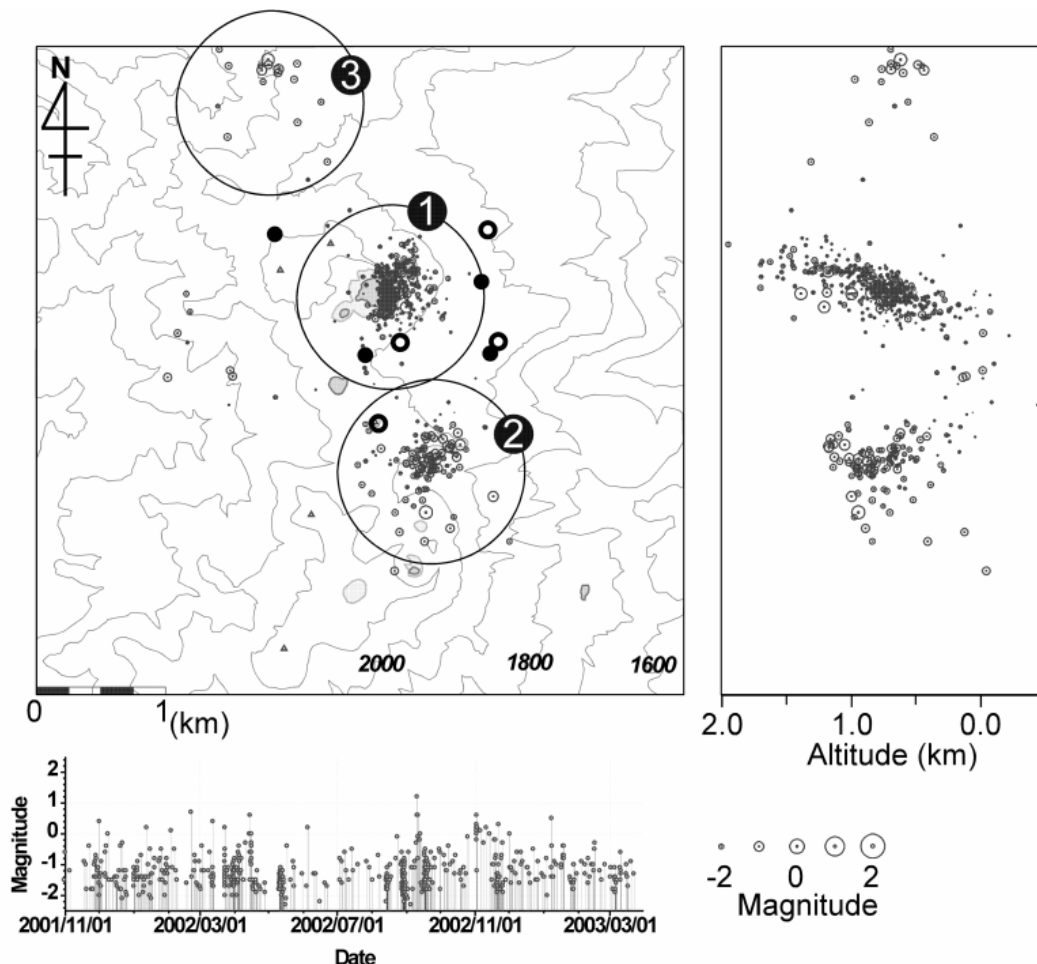
年3月までのVFRCと気象庁によってそれぞれ観測された地震の月別発生回数を示す。VFRCの

システムで検知された地震数は、震源決定まで至らなかった極微小な地震を含めて毎月数百個に及ぶが、同期間の気象庁の月別地震発生回数は10分の1程度にすぎない。これは、VFRCの設置した地震計がボアホール型でノイズレベルが低いことと、観測点が地震の震源域により近いことが要因と考えられる。これにより、これまで低いと考えられていた草津白根山の地震活動度が、実際は高い活動度であることが明らかとなった。

2002年の8月29日から31日に期間中の最大の地震活動が発生した。この活動は、連続的なA型地震の発生が特徴である。また、N型地震としての分類には至らないものの、通常発生している同規模のA型地震より、若干長いモノクロマティックなコーダ波を持った地震の発生が観測された。但し、火山性連続微動や湯釜及び湯釜北側の噴気領域における表面活動の



第5図 草津白根山の震源計算に用いているP波速度構造



第6図 2001年11月から2003年3月までにKSVOの観測システムで震源決定された地震の震央分布図と南北軸の深さ断面。下は同期間のM-T分布

変化及び火山ガスの急激な組成変化は観測されておらず、火山活動が活発化したとは考えにくい。

しかし、地震回数が一日あたり 100 回を越えたことは、平均的な活動度から考えると特異な活動期間といえる（第 4 図-(b)）。

3-2. 震源分布

草津白根山で発生した地震は、自動収録された地震イベントの記録から、草津白根山周辺の VFRC と ERI の観測点の P 波、S 波到達時刻及び最大振幅を用いて、震源とマグニチュードを決定している。草津白根山では、連発型の地震や N 型地震（長尾地震）もたびたび発生し、地震動が収束した時間（F-time）が地震の規模を示す係数として使えないことがあるため、マグニチュードの計算には最大振幅のみを用いている。また、震源計算に用いた速度構造は、海拔 0km 以下を周辺域での自然地震観測に用いられている構造を使い、海拔 0km 以上の標高では、海拔 1.5km で 2.0km/sec まで線形に減少する P 波速度とした。また、S 波速度は $V_p/V_s=1.73$ として震源計算に用いている（第 5 図）。

第 6 図に震源決定された地震の分布図と領域内で発生した地震の M-T 図を示す。図中の 及び は震源決定の計算に用いられた観測点で、それぞれは VFRC と ERI の観測点である。2001 年 11 月から 2003 年 3 月までに第 6 図の領域内に震源決定された地震は 602 個で、主な発生領域は水釜周辺（湯釜東側）、本白根山北側（逢ノ峰南東）、渋峠近傍の北北西から南南東にのびる 3 つの領域であった。ただし、 の領域は、2002 年 4 月 14 日から 15 日にかけて群発的に発生した地震のみであり、定常的な地震活動は と の領域で発生している。また、噴気地帯や温泉などがある殺生河原地域及び万座温泉地域、最後のマグマ的噴火を引き起こしたとされる本白根山の直下での地震は観測されなかった。

4. まとめ

東京工業大学火山流体研究センターは、2001 年 11 月より、草津白根山にボアホール型の地震傾斜計を 2 カ所設置した。この新規観測点と東京大学地震研究所の地震観測点のデータを取り込む、新たな火山観測システムを草津白根火山観測所内に構築した。この火山観測システムによって、草津白根山で発生する地震活動の詳細として、以下の点が明らかになった。

- (1) 気象庁が計測している月別発生回数（約 20 個）の約 10 倍の地震（約 200 個）が草津白根山で発生している。これは、高精度の地震観測点（3 カ所のボアホール型）を整備によって、極微少な火山性地震が計測されるようになったからである。
- (2) 2002 年 8 月に、日回数 100 回を超える群発地震活動が発生した。これは、気象庁の観測でも特異な活動として注目されたが、VFRC による地球化学的な観測では、この地震活動に関連した変化は見られなかった。
- (3) KSV0 の観測システムによって震源決定された草津白根山周辺の地震は、主に 3 つの領域で発生していた。このうち、定常的な活動領域は、水釜周辺と本白根山北側である。また、2002 年 8 月に発生した群発地震は水釜周辺で発生している。

2003 年度の草津白根山集中観測によって、浅部の地震波速度構造の解明が進むと考えられる。これにより、震源分布の再考や震源メカニズムの解明が進むと考えられ、熱水活動の発達した草津白根山の地震活動の詳細が明らかになることが期待される。

謝辞

本報告は筆者の一人である森健彦が東京工業大学火山流体研究センター研究機関研究員に在任当時に行った研究の一部である。草津白根火山流体観測システムの設計に当たり、北海道大学大学院理学研究科附属地震火山研究観測センターの大島弘光博士、京都大学防災研究所附属火山活動研究センターの井口正人博士から多大な指導と助言をいただいた。また、火山流体研究センターの小川康雄博士、大場武博士、2000年から2003年当時、東京工業大学大学院理工学研究科大学院生であった鈴木隆氏、大和田道子氏、中村一茂氏、水橋正英氏にシステム運営に関してご協力をいただいた。衛星データの受信に関しては、東京大学地震研究所共同研究プログラム(1999-S-01)の援助を受けました。ここに記して感謝いたします。

引用文献

- 青山裕・武尾実・渡辺秀文(2000)リアルタイム地震波データを用いるランニングスペクトル解析ソフトの開発, *火山*, **45**, 323-329.
- 井田喜明・長田昇・沢田宗久・小山悦郎・鍵山恒臣(1989)草津白根山における常設地震観測と1989年1月6日の小噴火, *地震研究所彙報*, **64**, 325-345.
- ト部卓・束田進也(1992)win - - 微小地震観測網波形験測支援のためのワークステーション・プログラム(強化版), *地震学会講演予稿集*, **2**, 331-331.
- ト部卓(1994)多チャンネル地震波形データのための共通フォーマットの提案, *日本地震学会講演予稿集*, **2**, 384-384.
- 気象庁(2002)平成14年火山年報.
- Minakami, T. (1939) Explosive activities of volcano Kusatsu-Shirane during 1937 and 1938 (Part 1), *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **17**, 590-623.
- Minakami, T., Hiraga, S., Miyazaki, T. and Utibori, S. (1969) Fundamental Research for predicting Volcanic Eruptions (Part 2), *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **47**, 893-949.
- Ossaka, J., Ozawa, T., Nomura, T., Ossaka, T., Hirabayashi, J., Takaesu, A. and Hayashi, T. (1980) Variation of chemical compositions in volcanic gases and waters at Kusatsu-Shirane Volcano and its activity in 1976, *Bull. Volcanolog.*, **43**, 207-216.
- 及川純・井田喜明・行田紀也・辻浩・長田昇・山本圭吾・藤田英輔・羽生毅・山岡耕春・奥田隆・金嶋聡(1996)草津白根山における火山性地震・微動の稠密観測, 第3回草津白根山の集中総合観測報告書, 13-26.
- 下鶴大輔・行田紀也・小山悦郎・宮崎努・沢田宗久・長田昇・萩原道德・竹田豊太郎(1978)草津白根山の1976年水蒸気爆発とそれに関連した集中火山観測, *地震研究所彙報*, **53**, 569-580.