

GPS 測量および水準測量結果が示唆する草津白根山の収縮源

村上 亮¹・加川 亮³・山田晃子²・佐藤博行²
横川正憲²・木村俊明²・川本利一³・森 克浩¹・鈴木平三³

1：国土地理院地理地殻活動研究センター

2：国土地理院測地部機動観測課

3：国土地理院測地部機動観測課（2003年9月当時）

A Deflation Source beneath Kusatsu-Shirane Volcano Inferred from Repeated Campaign Measurements of GPS and Precise Leveling

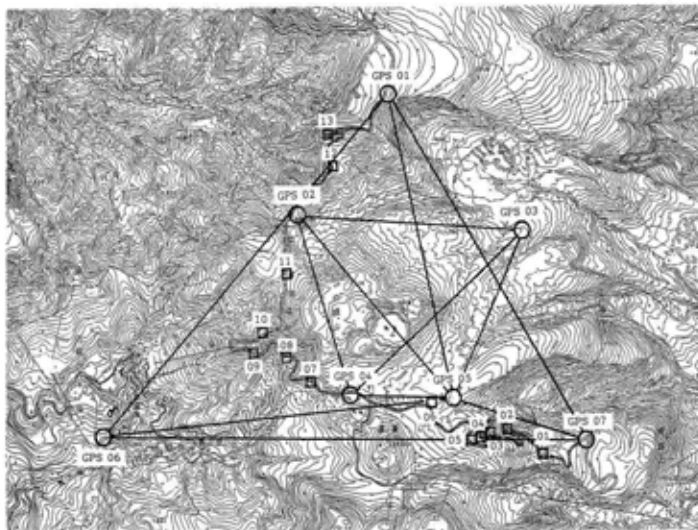
Makoto Murakami¹, A. Kagawa³, A. Yamada¹, H. Satoh²,
M. Yokokawa², T. Kimura³, T. Kawamoto³, K. Mori¹ and A. Suzuki³

1: Geography and Geodynamics Research Center, The Geographical Survey Institute

2: Mobile Observation Division, The Geographical Survey Institute

3: Mobile Observation Division, The Geographical Survey Institute as of September 2003

1. はじめに



第1図 観測点配置図

火山の周囲では火山活動に伴う特有の地殻変動が発生する機会が多く、精密な測量を繰り返し地面の微小な変化を検出することによって、活動のメカニズムを理解するための極めて有効なデータを取得することができる。有史以来、現在まで活発に活動を続けている草津白根火山の火山性地殻変動検出を目的として、国土地理院では、1992年に第3回草津白根山の集中総合観測に参加して観測点を設置した。その概要は、多田ほか（1996）に報告されている。それを含めてこれまでに、計3回の測量が実施されており、徐々にデータ

が蓄積されてきた結果、この間の地殻変動の推移を見ることができるようになった。本稿では、

これらの結果について報告する。

第 1 表 2003 年 GPS 観測結果

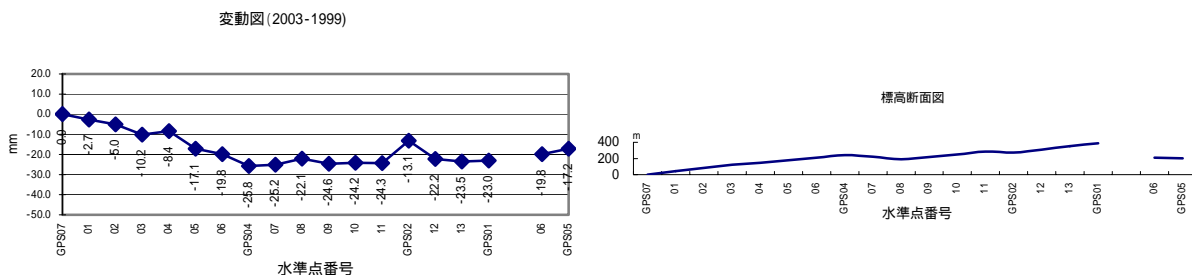
	成分	1st Set	2nd Set	2nd - 1st	成分	2nd - 1st	結果
GPS07 ~ GPS03	x	1106.230	1106.232	0.002	Δn	0.001	
	y	-232.327	-232.328	-0.001	Δe	0.000	水平 0.001
	z	1486.914	1486.913	-0.001	Δu	-0.002	高さ -0.002
GPS07 ~ GPS05	x	855.851	855.852	0.001	Δn	0.000	
	y	878.074	878.073	-0.001	Δe	0.000	水平 0.000
	z	417.763	417.762	-0.001	Δu	-0.002	高さ -0.002
GPS05 ~ GPS03	x	250.379	250.379	0.000	Δn	0.000	
	y	-1110.401	-1110.401	0.000	Δe	0.000	水平 0.000
	z	1069.151	1069.151	0.000	Δu	0.000	高さ 0.000
GPS05 ~ GPS04	x	567.137	567.136	-0.001	Δn	0.000	
	y	646.146	646.144	-0.002	Δe	0.001	水平 0.001
	z	64.261	64.261	0.000	Δu	-0.001	高さ -0.001
GPS05 ~ GPS02	x	1557.550	1557.552	0.002	Δn	0.000	
	y	430.655	430.648	-0.007	Δe	-0.003	水平 0.003
	z	1304.542	1304.537	-0.005	Δu	-0.008	高さ -0.008
GPS04 ~ GPS02	x	990.413	990.417	0.004	Δn	-0.002	
	y	-215.491	-215.497	-0.006	Δe	0.002	水平 0.003
	z	1240.282	1240.275	-0.007	Δu	-0.009	高さ -0.009
GPS04 ~ GPS03	x	-316.758	-316.757	0.001	Δn	0.000	
	y	-1756.546	-1756.545	0.001	Δe	-0.001	水平 0.001
	z	1004.891	1004.891	0.000	Δu	0.001	高さ 0.001
GPS04 ~ GPS06	x	1563.861	1563.862	0.001	Δn	-0.001	
	y	1642.384	1642.379	-0.005	Δe	0.002	水平 0.002
	z	-452.451	-452.455	-0.004	Δu	-0.006	高さ -0.006
GPS03 ~ GPS01	x	1153.361	1153.365	0.004	Δn	-0.002	
	y	591.507	591.502	-0.005	Δe	0.002	水平 0.003
	z	1123.128	1123.121	-0.007	Δu	-0.008	高さ -0.008
GPS03 ~ GPS02	x	1307.170	1307.173	0.003	Δn	-0.001	
	y	1541.056	1541.050	-0.006	Δe	0.003	水平 0.003
	z	235.391	235.386	-0.005	Δu	-0.008	高さ -0.008
GPS02 ~ GPS06	x	573.447	573.445	-0.002	Δn	0.000	
	y	1857.875	1857.876	0.001	Δe	0.001	水平 0.001
	z	-1692.733	-1692.730	0.003	Δu	0.004	高さ 0.004
GPS02 ~ GPS01	x	-153.810	-153.809	0.001	Δn	-0.001	
	y	-949.548	-949.547	0.001	Δe	-0.002	水平 0.002
	z	887.737	887.736	-0.001	Δu	0.000	高さ 0.000

2 . GPS 観測

今回の GPS および水準測量の観測は、1992 年に設置された観測点上で実施した。測量を実施した計 7 点の GPS 点及び 13 点の水準点の位置は第 1 図に示されている。GPS 観測は 2003 年 7 月 23 日と 24 日に行い、それぞれ一日分のデータを使用して独立に 2 つの解析結果を得た。第 1 表に観測結果を示すが、2 回の観測結果を比較したところ、高さ成分の再現性が水平成分のそれに比べてやや悪いものの、観測の差は水平、上下成分とも 1cm 以内に収まっており、良好に観測が行われたことが確認できた。

3 . 水準測量

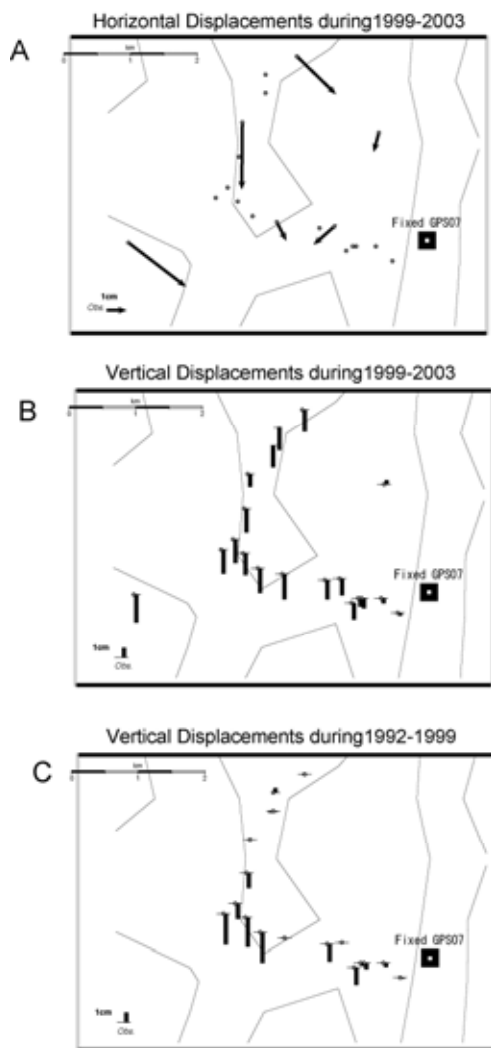
第 1 図の水準路線において 2003 年 7 月 24 日 ~ 29 日と 9 月 8 日 ~ 12 日に測量を実施した。当初の予定では 7 月に観測作業を終了させることにしていたが、天候不順のため測量を完了できなかったため計画を変更し、ほぼ 1 ヶ月後に追加の測量を実施して全路線の測量を完成させた。この間、大きな地殻変動が進行している様子はなく、1 月程度の中断が測量結果へ及ぼす影響はほとんどないと考えられる。これまでの測量と同様に GPS07 を参照点とした標高差を第 2 表および第 2 図に示す。



第 2 図 水準測量による 1999-2003 間の標高変化

水準点番号	観測月 日	距離 km	往復 点数	比高 m	今回(03) m	前回(99) m	差(mm) 03-99
GPS07	9.10	0.611	48	41.5980	0.0000	0.0000	0.0
01	9.10	0.525	40	41.3671	41.5980	41.6006	-2.6
02	9.10	0.485	40	37.9865	82.9651	82.9700	-4.9
03	7.24	0.528	32	25.3909	120.9516	120.9617	-10.1
04	7.24	0.486	38	32.3242	146.3425	146.3508	-8.3
05	7.24	0.723	38	31.4492	178.6667	178.6837	-17.0
06	9.11	0.785	36	31.4433	210.1159	210.1356	-19.7
GPS04	9.11	0.411	24	-18.8840	241.5592	241.5849	-25.7
07	7.25	0.493	32	-31.9782	222.6752	222.7003	-25.1
08	7.25	0.438	32	26.9775	190.6970	190.7193	-22.3
09	7.28	0.577	44	33.6714	217.6745	217.6992	-24.7
10	7.29	0.508	36	33.2236	251.3459	251.3702	-24.3
11	7.29	0.715	44	-12.6825	284.5695	284.5939	-24.4
GPS02	9.09	0.604	40	35.0512	271.8870	271.9004	-13.4
12	9.09	0.601	44	43.6825	306.9382	306.9607	-22.5
13	9.09	0.696	44	39.2525	350.6207	350.6445	-23.8
GPS01					389.8732	389.8965	-23.3
06	9.10	0.165	12	-9.1748	210.1159	210.1356	-19.7
GPS05					200.9411	200.9582	-17.1

第2表 2003年水準測量結果



第3図 草津白根山周辺の地殻変動

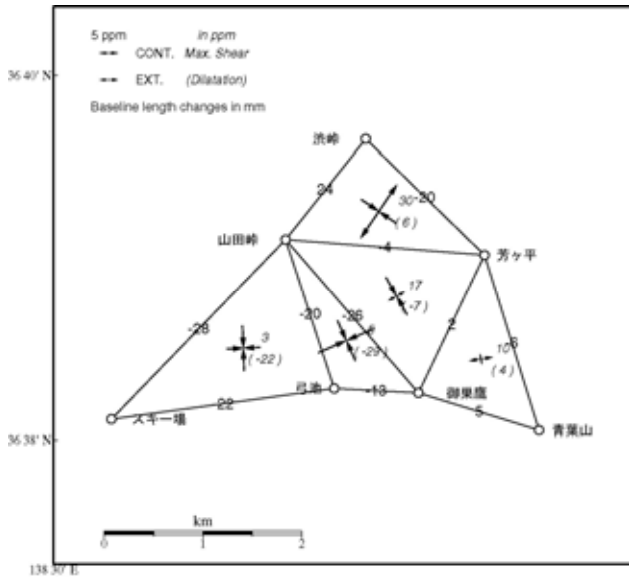
4. 結果

1999年と2003年に実施したGPSおよび水準測量結果を比較して求めた水平変動ベクトルおよび上下変動図を第3図A, BおよびCに示す。まず、GPSによる水平変動(第3図A)は、白根山東麓のGPS07を参照点としている。これらの観測値を用いて水平歪を計算した結果を第4図に示す。ベクトルの向きに、ややばらつきはあるものの、この4年間で、白根山の南麓付近を中心として山体が収縮したように見える。一方、GPS測量と同じ不動点(GPS07)を参照点とした水準測量結果である第2図および第3

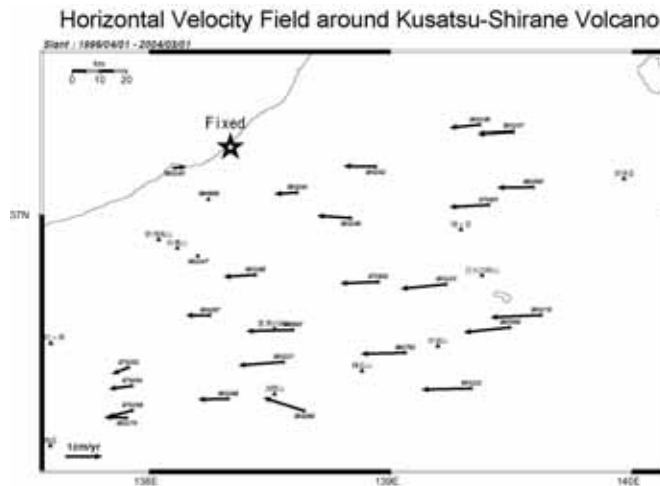
図Bからも、山体の南側が沈降している様子がよみとれ、GPSと同様、白根山山体の収縮を示唆する結果が得られた。

5. 考察

国土地理院は1994年以降、GEONETとよばれるGPSの連続観測施設を日本各地に設置し、2004年4月時点で、全国約1200の地点において地殻変動観測を行っている。草津白根山の周囲では山体に近い観測点はないが、広域の観測結果から草津白根山を含む広い地域の地殻変動の傾向を探ることができる。第5図は、新潟県の大潟を固定した1996年-2004年間の水平変動の平均速度ベクトル分布である。草津白根山周辺では、全体的な傾向として東西圧縮の場にあることが見てとれる。草津白根山付近では、ベクトルの分布が周囲の全体的な傾向と異なる様子はなく、当火山固有の変動があるようには見えない。しかし、草津白根山に関しては、山体ごく近傍には観測点はなく、火山固有、特に地下の浅部に力源がある局所的な変動については、現状のGEONETは検知能力がないと見るべきである。なお、場合によってはGEONETで、火山固有の変動の微小変化が捉えられる場合もあり、実際、第5図でも浅間山の



第4図 GPSによる水平歪図
(1999-2003)



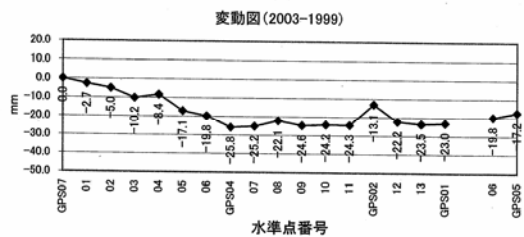
第5図 平均水平歪速度図

第3表 1992-1999年間のGPS基線長変化

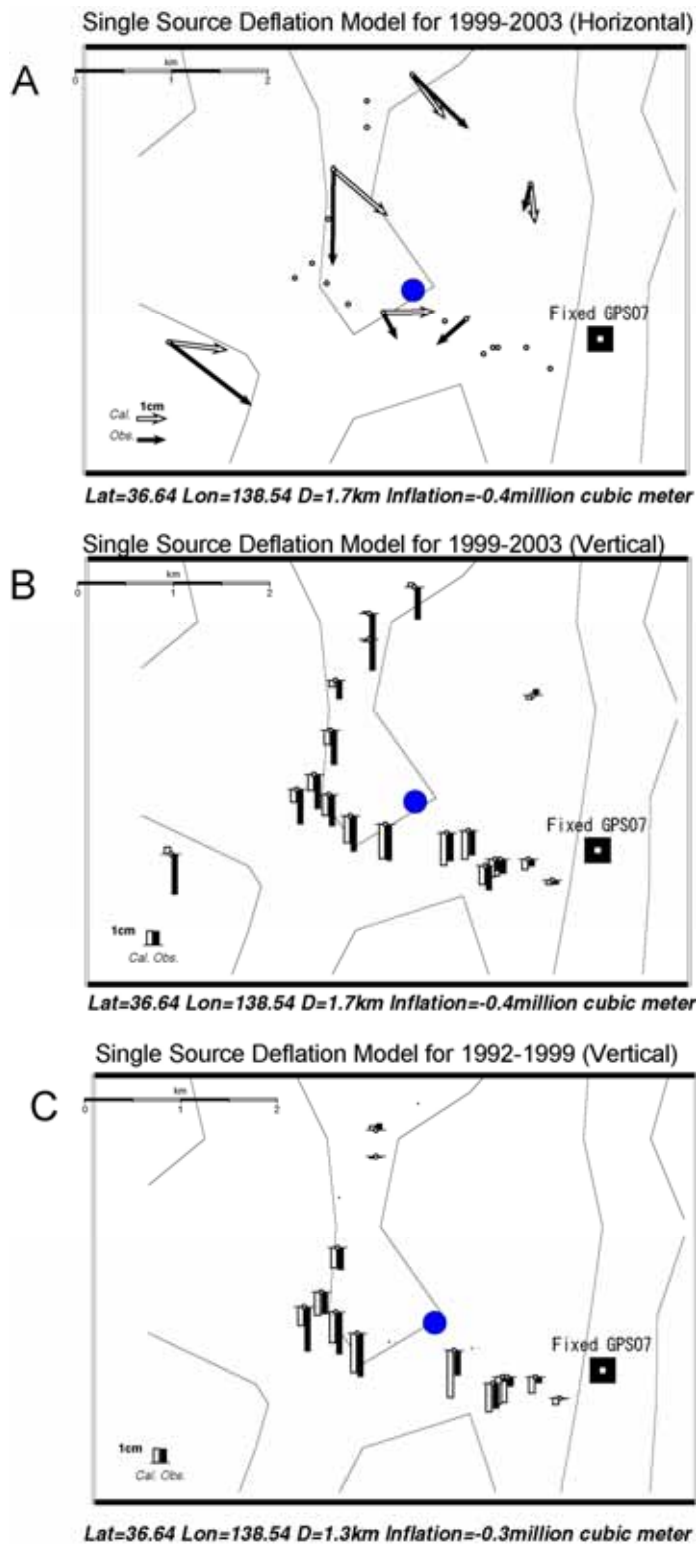
端点1	端点2	距離変化 (m)
GPS01	GPS06	-0.017
GPS01	GPS07	-0.019
GPS06	GPS07	-0.046
GPS05	GPS01	-0.028
GPS05	GPS06	-0.059
GPS05	GPS07	0.016
GPS03	GPS02	-0.007
GPS04	GPS02	-0.043
GPS04	GPS03	-0.021
GPS05	GPS02	-0.043
GPS05	GPS03	-0.011
GPS05	GPS04	-0.019

付近では、ベクトルの向きにやや揃いが見られる。村上(2003)は、この変動を詳細に調べて、地震数の増減に呼応した地殻変動が発生していると報告しており、この図で見られるベクトル方向の乱れもそれを反映したものである。

広域の地殻変動を示す第5図からわかるように、この地域は広域的に東西圧縮の場にある。その大きさは、平均して約0.5ppm/年のオーダーであり、その影響を受けて草津白根山周辺でも観測期間の4年間で蓄積した東西圧縮の歪は2ppm程度には達しているはずである。今回のGPS観測では観測されている短縮は、第3図Bおよび第4図に示されるように、20から30ppm程度であり、明らかにこの地域の平均的な短縮率を超えている。このことは、全体として山体が収縮したことを示唆している。また、水準測量結果も、第2図および第3図Bのように、山体の南西麓が不動点(GPS07)に比べて沈降していることを表しており、このこともGPS同様山体の収縮を示唆している。



第6図 1999年水準測量結果



第 7 図 収縮源位置の推定結果

さらに、長期間の変動の推移を調べるため、1992-1999 間の地殻変動を見ることにする。第 3 表は GPS 測量結果による距離を比較したものであるが、ほぼ全ての基線について、距離の短縮の傾向が見られる。両方の観測とも 2 日分の観測値が 1cm 程度に揃っており、信頼性が高いことから、距離の短縮は十分有意なシグナルであるとみなすことができる。短縮率は、数 ppm ~ 20ppm 程度であり、総量としては 1999-2003 間と同程度であるが、観測期間を考慮すると 1999-2003 年間に比べて収縮速度は半分程度であったことになる。

一方、水準測量による 1992-1999 間の上下変動図を第 3 図 C および第 6 図に示す。草津白根山の南麓の水準点 07 および 08 付近が沈降しているという全体としての傾向は 1999-2003 間の第 3 図 B と共通しており、収縮が両期間を通じて進行していたことが示唆される。また、GPS07 から見た水準点 07 の沈降量は -25.2mm (1999-2003)、-30.5mm (1992-1999) と、総量としては同程度であり、観測期間を考慮すると、沈降速度は最近の 4 年間に以前の 7 年間に比べて倍程度と計算され、この点についても GPS と水準測量の結果は整合している。

それぞれの期間の収縮の力源を求めるため、球状圧力源（茂木モデル）を仮定したモデル計算を行った。1992-1999 間は、GPS による距離変化および水準測量による標高変化、また、1999-2003 間は、GPS による座標の 3 成分変化と水準測量による上下変化を用いている。それぞれの結果を第 7 図

第4表 球状圧力源の位置および体積変化量

期間	緯度(度)	経度(度)	深さ(km)	収縮量
1992-1999	36.64	138.64	1.3	$0.3 \times 10^6 \text{m}^3$
1999-2003	36.64	138.64	1.7	$0.4 \times 10^6 \text{m}^3$

A,BおよびC並びに第4表に示すが、両期間を通じて、ほぼ同じ位置に力源が求まり、いずれ期間も山頂付近の地下1.5km程度の深さに収縮源があることがわかった。観測値のフィッティングの程度であるが、1999-2003間の水準測量において、路線の北側の部分で観測された沈降量のほうがモデルよりやや大きい等、若干のずれも見られるが、全体として、一つの球状圧力源を仮定することで観測値がよく説明できている。観測点間に高度差が余りないことから、様な半無限の弾性体を仮定し計算を行っている。したがって、ここで求めた深さは、観測点付近から測った深さと考えてよく、ほぼ海拔300m程度に相当する。体積に換算した収縮量はほぼ $0.4 \times 10^6 \text{m}^3$ 程度である。

地殻変動から求めた収縮源の位置が、電磁氣的観測結果の解析から大場(2001)が存在を示唆している白根山直下の熱水溜りと近い場所にあることは興味深い。今回の観測の結果、収縮の時間変化も見えてきたので、他の観測との比較や統合的な検討により、草津白根山の火山システムについて理解が深まることが期待される。

7. 結論

1992年の第3回草津白根山の集中総合観測に参加してから現在までに、3回のGPS観測および水準測量を行った。それらの結果の比較から、我々が観測を始めた1992年以降、白根山の山頂付近を中心として収縮しており、その収縮速度は最近になって速まっていることを示唆する結果がえられた。地殻変動のパターンは、山頂付近の地下1.5km程度にある球状圧力源の収縮によってよく説明でき、何らかの減圧のメカニズムが進行していると考えられる。

謝辞

第4回草津白根山の集中総合観測への参加の契機を与えてくださった東京工業大学火山流体研究センター平林順一教授および、観測の実施にあたって便宜を図っていただいた林野庁関東森林管理局吾妻森林管理署に感謝します。

引用文献

多田 堯・他6名(1992)草津白根山における火山変動測量観測点の設置, 第3回草津白根山の集中総合観測報告書(平成4年9月~11月), 31-36.

村上 亮(2003), 浅間山火山の活動の消長に同期した地殻変動, 地球惑星科学関連学会2003年合同大会予稿集, V055-014.

大場 武(2003), 草津白根山の火山熱水系, 大学防災研究所研究集会「火山の浅部構造と火山流体」(表者: 鍵山恒臣)報告書, 161-168.