

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

測地部 平岡喜文・三森庸里江・横川正憲・根本盛行

Geodetic Department

Yoshifumi HIRAOKA, Yurie MITSUMORI, Masanori YOKOKAWA
and Moriyuki NEMOTO

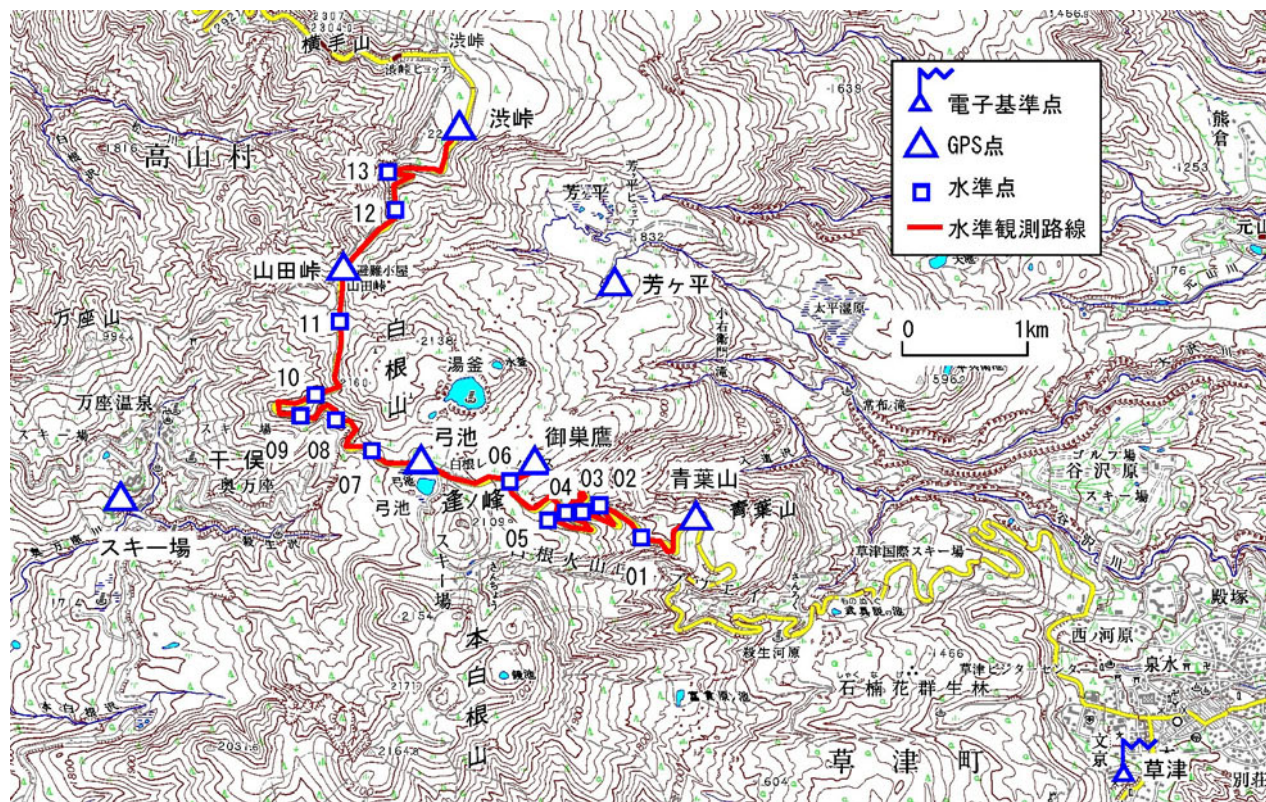
要 旨

草津白根山における火山性地殻変動の検出を目的として、1992 年から 2009 年の間に、4 回の GPS 測量および水準測量を実施した。本稿では、これまでの測量結果と 2009 年の測量結果と合わせて、力源とこの間の地殻変動の推移を再検討したので、これらの結果について報告する。

測量を始めた 1992 年以降、草津白根山は山頂付近を中心として収縮しており、収縮源の 1 つは山頂の南東側にあることが確認された。地殻変動パターンは、地下 1.0km 程度にある球状圧力源の収縮によって説明が可能であり、この収縮源は 1992 年以降、一定速度で収縮してきたと思われる。また、水準測量の結果から、1999-2003 年の間は山頂の北側にも収縮源がもう 1 つ存在していたことを示すことができる。

1. はじめに

草津白根山は、有史以来、現在まで活発に活動を続けている火山の 1 つである。国土地理院は、草津白根山における火山性地殻変動の検出を目的として、1992 年に実施された第 3 回草津白根山の集中総合観測と同時期に測点を設置し、GPS 測量および水準測量を開始した。その測量における観測点の設置状況と測量結果については、多田ほか(1996)に詳細が報告されている。その後、1999 年と 2003 年に繰り返し測量を実施し、これらの計 3 回の測量結果から求められた収縮源と、この間の地殻変動の推移について、村上ほか(2004)に報告されている。2009 年は 4 回目となる GPS 測量および水準測量と、この地域では国土地理院としては初めてとなる重力測量を合わせて実施した。



図－1 GPS 測量および水準測量の観測点の配置

2. GPS 測量、水準測量および重力測量

2. 1 GPS 測量および水準測量

1992 年、1999 年および 2003 年の GPS 測量および水準測量は、図－1 に示す草津白根山を中心に半径約 3 km の範囲に設置した測点において実施した。

GPS 測量は、草津白根山を取り囲むように設置した 7 測点において実施した。また水準測量は、国道 292 号線の青葉山から渋峠に至る全長約 10km の L 形の路線上に約 500m 間隔に設置した水準点 13 点と、路線の近傍にある GPS 点の 5 点を加えた計 18 点において実施した。

測点の埋設形式は、凍上現象や凍結の影響が軽減されることを期待して、水準点は道路沿いのコンクリート工作物（よう壁、ガードレール土台等）の上面に金属標を取り付けた。また、GPS 点は、標石に炭素繊維補強コンクリート製の柱（縦横 15cm、長さ 100cm）の上部に金属標を埋め込んだものを使用し、地表面に金属標の部分が出るようにし、標石下方に厚さ 30cm の基礎コンクリートを打ち、地表面の標石周囲にもコンクリートで上面舗装を施している。（多田ほか、1996）

GPS 測量は 2 周波 GPS 測量機を用いて実施した。また、水準測量は電子レベルを用いた一等水準測量を実施し、レフラクション誤差の影響を抑えるよう、標尺の地面に近い部分では読定しないように測量した。

2009 年の測量は、GPS 測量はこれまでと同じ測点において 8 月に実施した。また、水準測量はこれまでの路線を延長して、浅間山麓にある一等水準点 No. 10823 と結合させた。延長した部分と草津白根山山頂部の従前の路線を二等水準測量路線として登録し、一等水準点 No. 10823 から渋峠までの間に新たに 31 点の二等水準点を埋設した。なお、草津白根山山頂部に新たに設置した二等水準点のうち 4 点は、従前の水準点のすぐ脇に設置して、水準測量終了後、従前の水準点を撤去した。水準点の新旧の対照を表－1 に示す。

表－1 水準点の新旧対照表

旧点番号	新点番号
03	10805
06	10806
09	10807
12	10808

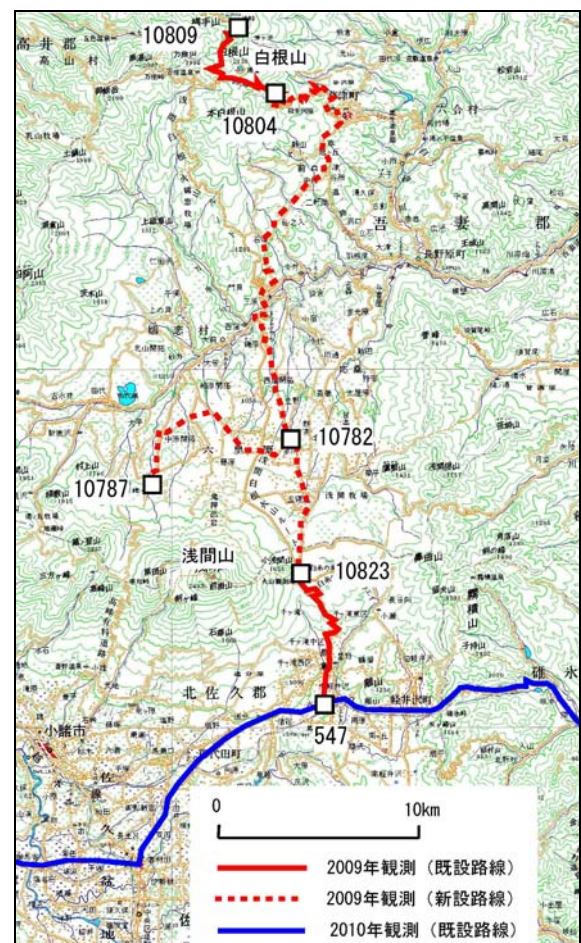
測点の埋設は、二等水準点 No. 10800 から南側の水準点は通常の二等水準点埋設形式とし、二等水準点 No. 10801 から No. 10808 の間の水準点は、凍上現象や凍結の影響が軽減されることを期待して、これま

でと同様、道路沿いのコンクリート工作物の上面に金属標を取り付けた。

渋峠に設置した二等水準点 No. 10809 は、付近が日本の国道最高地点（標高：2,172m）となっている所でもあり、国内の水準点として最も標高が高い所に設置される水準点となった。そのため、モニユメント的な意味も含めて標石に御影石を用いた通常の埋設形式とした。ただし、標石は通常のものよりも長いものを使用した。

2009 年の水準測量は 9 月から 10 月にかけて、一等水準点 No. 547 から二等水準点 No. 10809 の間と、二等水準点 No. 10782 から No. 10787 の間の全長 75km において実施した。水準測量では既設および新設の一・二等水準点のほか、草津白根山山頂部の従前の水準点 13 点と、路線の近傍にある電子基準点（嬬恋）（草津）および GPS 機動連続観測点（M 浅間鎌原）（M 浅間砂塚）にも取り付けた。

2010 年 8 月には軽井沢町を通る一等水準路線において定期改測が実施され、2 年にわたりこの地域において広域的な水準測量が実施されたことになる。2009 年および 2010 年の水準測量実施状況を図－2 にまとめる。



図－2 一・二等水準測量路線

2. 2 重力測量

2009 年は、これまでの GPS 測量および水準測量に加えて重力測量を実施した。測量は 10 月に実施し、草津白根山と浅間山に跨り、水準点、GPS 点、電子基準点および GPS 機動連続観測点の計 25 点において、相対重力測定を実施した。この測点のうち、渋峠測点、山田峠測点、弓池測点、御巢鷹測点および青葉山測点の 5 点は、1992 年の第 3 回および 2003 年の第 4 回草津白根火山集中総合観測において重力測量がされている。また、第 4 回草津白根火山集中総合観測において絶対重力測定が実施された東京工業大学火山流体研究センター草津白根火山観測所コア保管庫および東京大学地震研究所浅間山観測所資料室にも取り付けた。

重力計はラコスト重力計 (G-553, G-564) とシントレックス重力計 CG5 (300200022) の計 3 台を用いた。測量は、1 日の間で往復観測が完結するようにした。また、磁場の影響による設置方向に依存する

誤差を小さくするようにと、重力計のクロスレベルが南北を向き、かつ上端が北方を向くように全点設置した。観測点の配置を図-3 に示す。

3. 観測結果

3. 1 GPS 測量

GPS 測量による水平変動は、1992-1999 年の間は辺長変化として、また 1999-2003 年の間および 2003-2009 年の間は、草津白根山山頂から東南方に約 5km 離れた場所にある電子基準点 (草津) を固定点として見た。この地域は広域的に東西圧縮の場であり、遠い場所を固定点にするとその影響が現れてしまうので、近隣の場所を固定点として見た。



図-3 重力測量の測点の配置

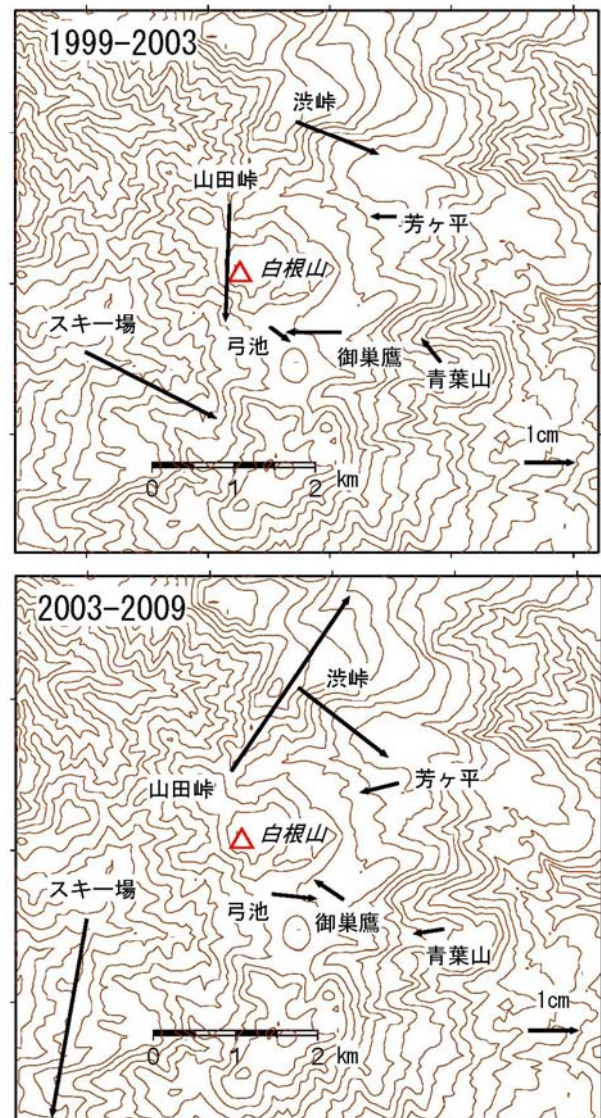


図-4 水平変動ベクトル図

電子基準点（草津）は1996年に設置されている。そのため、1992-1999年の間は同点を固定点として見るができないので、水平変動は辺長変化として見た。

1999-2003年の間および2003-2009年の間の水平変動ベクトルを図-4に示す。渋峠測点、山田峠測点、スキー場測点は他の測点と比べて変動量が際立って大きい。

測点の土地条件は、国土地理院(1991)によると図-5に示すように渋峠測点は崩壊地の脇、スキー場測点は地滑り地内に位置する。両測点とも水平変動方向が地面の最大傾斜方向とよく一致しているの、地滑りの影響を受けていると思われる。

山田峠測点は2009年に大きく傾斜しているのが確認され、改埋後に測量を実施した。2009年の測量時、この測点だけが雨の降った翌日に地面に水が浮いていたことがあった。他点と比べて水はけが悪く、凍上現象の影響をより強く受けたと思われる。

地滑りや凍上現象の影響を受けたと思われる3点を除いた測点からは、1999-2003年の間と2003-2009年の間は、山頂の南東側あたりに向かって測点変動しているように見える。

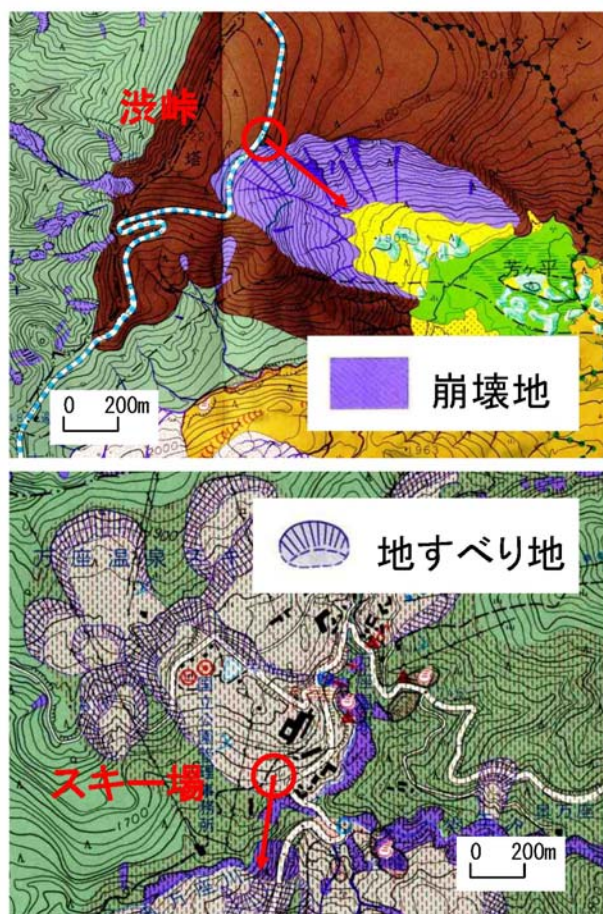


図-5 測点の土地条件

3. 2 水準測量

No. 01 を固定点とした上下変動を図-6に示す。1992-1999年の間および2003-2009年の間は、山頂の南側あたりを中心に摺鉢状に沈降しているが、1999-2003年の間は様子が異なり、沈降が山頂の北側の渋峠にまでおよんでいる。

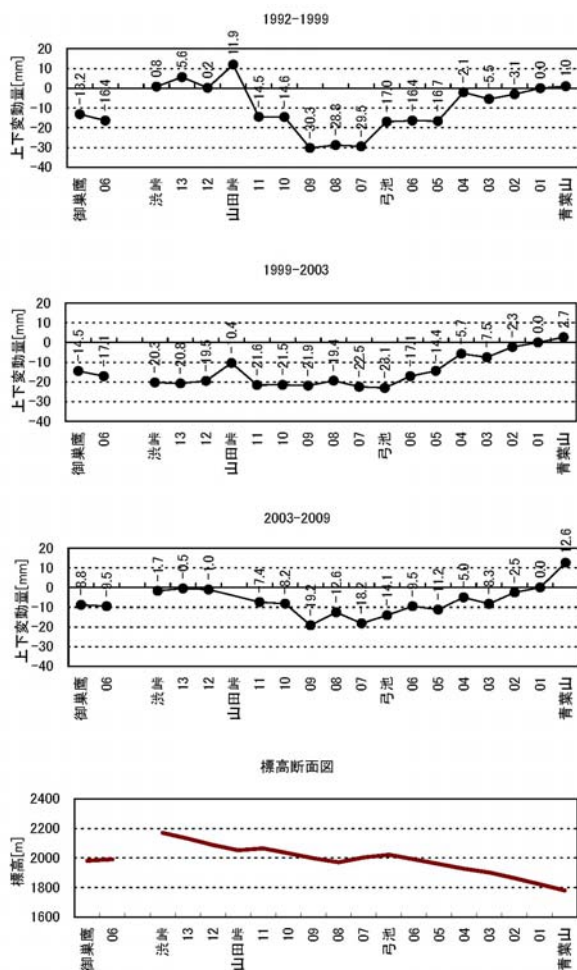


図-6 上下変動図

急傾斜地での水準測量であることからレフラクション誤差の影響が懸念された。しかし、測量結果にはレフラクション誤差特有の地形に相関のある変動が見られておらず、標尺の地面に近い部分では読定しないように測量した対策の効果があったと思われる。

山頂周辺の水準点は、凍上現象や凍結の影響が軽減されることを期待して、道路沿いのコンクリート工作物（よう壁、ガードレール土台等）の上面に金属標を取り付けた。その結果、隣接する測点との間で変動傾向が大きく異なる測点は、水準点では見られず、また、測点の傾斜も確認されていない。一方、GPS 点の山田峠測点は、設置当初から隣接する測点と比べて変動傾向が異なっており、また、測点が傾斜した。

3. 3 重力測量

データ処理手順について説明する。ラコスト重力計の読み取り値であるダイヤル値から重力値への換算は、各重力計に付属している製造会社提供のスケール定数表を用いた。シントレックス重力計は読み取り値を重力値とした。これに重力値の鉛直勾配を -0.3086mGal/m として器械高補正を施し、潮汐定数を 1.20 として求めた固体地球潮汐値の補正を加えたものを各重力計による重力測定値とした。この測定値にはスケール定数の誤差とバネの伸びの誤差（ドリフト誤差）が含まれている。そこで、スケール定数の誤差は、ダイヤルの一次関数であると仮定し、ラコスト重力計(G-553)とシントレックス重力計CG5 (300200022) については、帯広－筑波－那覇間および釧路－筑波－那覇間において、2008 年および 2009 年に定数検定を実施して求めた定数を用い、また、ラコスト重力計(G-564)は Nakai et al. (1997) による定数を用いて、スケール定数の誤差を補正した。さらに、ドリフト誤差は日々の測量開始からの経過時間の一次関数であると仮定し、測量日ごとに、未知点の重力値とともに最小二乗法により推定した。なお、既知点は KSV0-FG5 と 7000A の 2 点とし、KSV0-FGS は植木ほか(2004)による 2003 年観測値を、7000A は東京大学地震研究所による 2009 年観測値とした。

重力測量結果を表－2 に、スケール定数の誤差の補正に用いた定数を表－3 にまとめる。

表－2 重力測量結果

測点名	重力値[mGal]	標準偏差[mGal]
KSV0-FG5	979625.709	—
KSV0_R	979625.648	0.008
(電基) 草津	979589.644	0.005
10798	979590.531	0.008
10799	979574.483	0.008
10800	979554.965	0.008
10801	979534.613	0.007
10802	979516.756	0.009
10803	979498.143	0.009
青葉山	979478.747	0.009
10805	979454.582	0.009
御巢鷹	979438.573	0.009
弓池	979430.524	0.007
10807	979437.485	0.009
山田峠	979427.507	0.009
渋峠	979398.663	0.009
7000A	979528.461	—
10823	979528.487	0.008
(機連) M 浅間砂塚	979545.454	0.008

10782	979604.614	0.010
(電基) 嬬恋	979633.157	0.008
10785	979599.038	0.010
10786	979591.537	0.010
10787	979563.870	0.010
(機連) M 浅間鎌原	979538.208	0.008

表－3 スケール定数の誤差の補正に用いた定数

重力計	定数
G-553	0.999 983
G-564	1.000 496
CG5 (300200022)	0.999 811

4. 考察

それぞれの期間の地殻変動は、地下の力源の圧力変化によるものと考え、球状圧力源（茂木モデル、Mogi (1958)）を仮定したモデル計算を実施して力源の位置を求めた。測点間に標高差があまりないことから、一様に平面な半無限弾性体を仮定し、山頂の東側にある湯釜を中心に南北 $\pm 1\text{km}$ 、東西 $\pm 1\text{km}$ 、深さ $0.5\sim 2.5\text{km}$ の範囲をグリッドサーチし、観測値と計算値の最小二乗誤差が最小になる場所を求めた。

観測値には、1992-1999 年の間は GPS 測量により得られた辺長変化と、水準測量から得られた上下変化、また、1999-2003 年の間および 2003-2009 年の間は、GPS 測量により得られた水平変動ベクトルと、水準測量により得られた上下変化を用いた。なお、地滑りや凍上現象の影響を受けたと思われる渋峠測点、山田峠測点、スキー場測点のデータは除いた。計算の結果を図－7～9 に示す。1992-1999 年の間および 2003-2009 年の間は 1 つの力源で説明可能であり、山頂の南東側に収縮源が求められた。しかし、1999-2003 年の間は力源を 1 つとすると GPS 測量と水準測量のそれぞれに、観測値と計算値に乖離が見られる測点が生じた。

GPS 測量結果から、1999-2003 年の間は、1992-1999 年の間および 2003-2009 年の間と同様、収縮源は山頂の南東側の深さ 1km 程度に求まるのに対し、水準測量結果からは収縮源は山頂の北側に求められた。

収縮源の位置の乖離の原因として、GPS 測量では地滑りや凍上現象の影響を受けたと思われる測点を除いたことにより、山頂の北側の変動に対する感度が低いと考えられる。GPS 測量の結果から、1999-2003 年の間は他の期間と同様、山頂の南東側に収縮源が存在していたと思われる。一方、水準測量では得られた沈降域が山頂の北側まで広がっているので、1999-2003 年の間は、山頂の南東側のほかに北側にも収縮源が存在していたことが示唆される。

しかし、山頂の北側の収縮源の位置を良い精度で求められるほどのデータは取得されていない。そこ

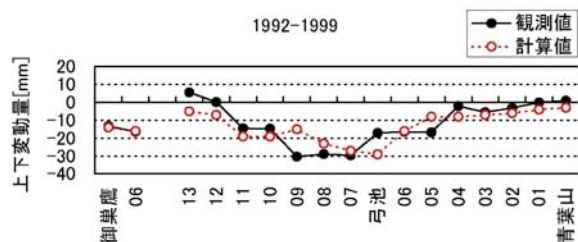
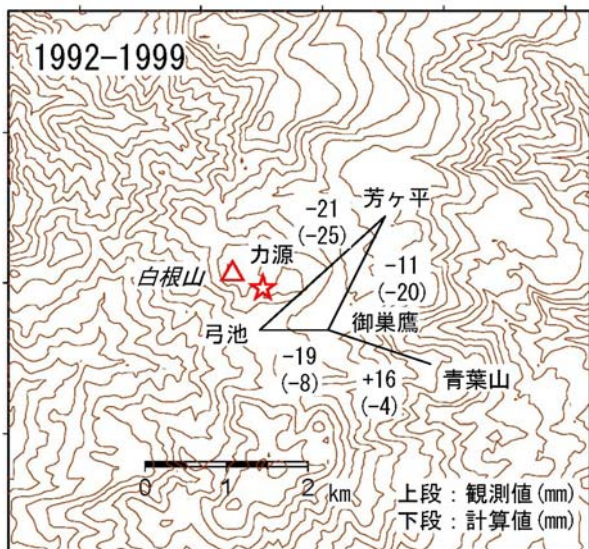


図-7 観測値と計算値の比較(1992-1999)

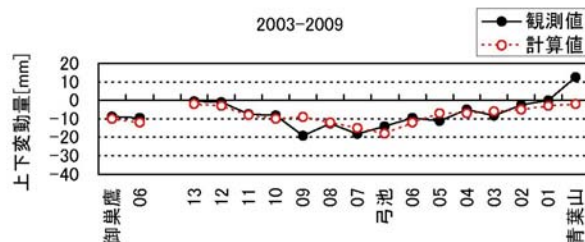
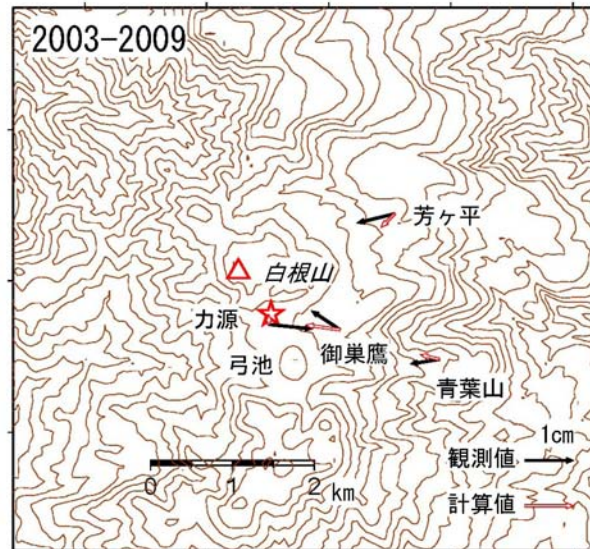


図-9 観測値と計算値の比較(2003-2009)

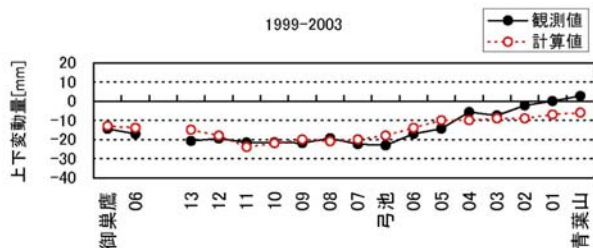
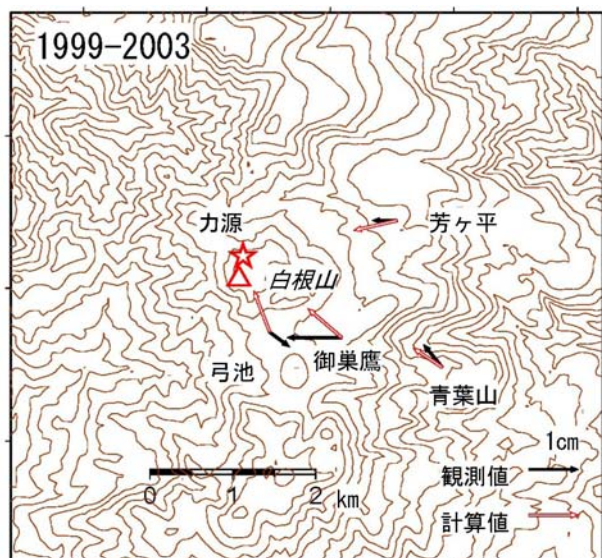


図-8 観測値と計算値の比較(1999-2003)

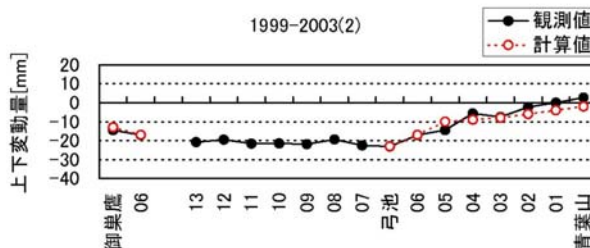
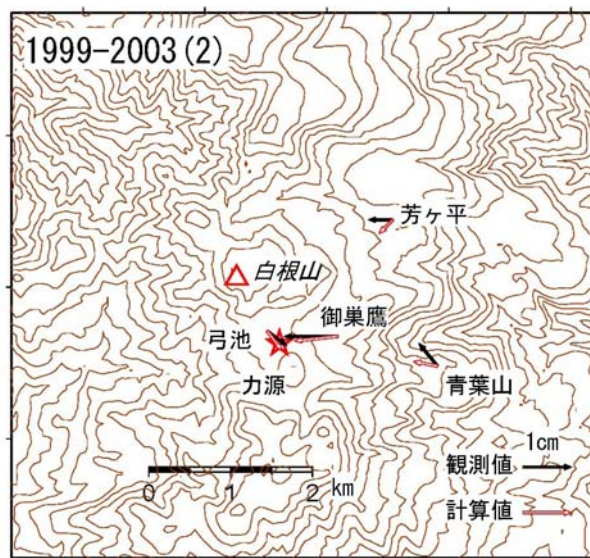


図-10 観測値と計算値の比較(1999-2003(2))

で、山頂の南東側の力源だけを良い精度で求めるために、山頂の北側の収縮源に対する感度を持つ弓池測点より北側の水準測量結果を使わずに、残りの水準測量結果と GPS 測量結果から収縮源を推定し直した。その結果、図-10 に示すよう、力源は 1992-1999 年の間および 2003-2009 年の間と同様、山頂の南東側の深さ 1.0km 程度の 1 つの収縮源であることがわかる。

これらのことから、山頂の南東側の収縮源は、測量を開始してからこの間、継続して活動しており、それに対し、山頂の北側の収縮源は 1999 年から 2003 年までの間に限定した活動であったと思われる。

山頂南東側の収縮源の、各期間の位置を表-4 にまとめる。また、山頂南東側の収縮源の体積に換算した収縮量を図-11 に示す。体積変化は測量を開始してからこの間ほぼ一定で、年間 $0.02 \times 10^6 \text{ m}^3$ の減少であった。

また、草津白根山全体としての収縮量は、1999 年から 2003 年の間は山頂の北側にも収縮源が存在していたと思われ、この期間は他の期間よりも多く収縮していたと思われる。

表-4 山頂東南側の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 (m^3)
1992-1999	36.64	138.53	0.9	0.2×10^6
1999-2003	36.64	138.53	0.9	0.1×10^6
2003-2009	36.64	138.53	1.2	0.1×10^6

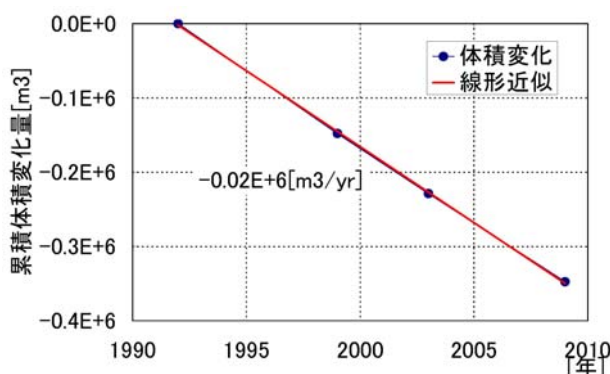


図-11 山頂南東側の力源の体積変化

草津白根山では複数の機関により地震観測がされており、地震の推移および震源分布等が明らかにされている。そのうち、気象庁地震火山部火山課(2010)による地震活動の報告を見ると、2006 年 4 月から 2009 年 5 月の間に発生した地震の震央は、湯釜から逢ノ峰の周辺と、渋峠の周辺の 2 つのブロックに集中しているように見える。また、地震の深さは湯釜から逢ノ峰の周辺がごく浅いところから深さ 2km、

渋峠周辺が深さ 2~3km に集中している。今回、GPS 測量および水準測量により求められた力源の 1 つである山頂の南東側の収縮源は、湯釜周辺のブロックの中に求められており、深さも地震活動域の中心とよく一致している。また、1999 年から 2003 年の間は、位置までは特定できないが、山頂の北側にも収縮源が存在していたことを水準測量結果が示唆しており、渋峠周辺の地震活動との関連に興味を持たれる。

GPS 測量および水準測量結果が示唆する山頂の南東側の力源の収縮のメカニズムは、冷却による体積の収縮と地下物質の移動の 2 つが予想される。この問題を考える糸口として地磁気観測のデータがある。気象庁地磁気観測所では草津白根山において連続観測と繰り返し観測により地磁気全磁力観測が実施されている。気象庁地磁気観測所(2010)によると、2004 年から 2009 年の間は湯釜付近の地下での帯磁(冷却)傾向が継続していると推定されている。

収縮のメカニズムが冷却による体積の収縮であれば、地下物質は場所を大きく移動することはないと思われるので、力源の周辺の測点の重力変化は単に高さだけが変わったことによるフリーエア勾配的な変化になると予想される。そこで、1992-2009 年の間の重力実測値の変化と、フリーエア勾配を仮定して上下変動から計算した重力変化を比較し、その結果を図-12 に示す。



図-12 重力変化の比較

なお、1992 年の重力値は前川ほか(1996)を、フリーエア勾配は弓池測点近隣にて 2009 年 10 月にラコスト重力計(G-553)を用いて実測した値(-0.39 mGal/m)を、上下変動は水準測量により得られた結果を用いた。重力変化、上下変動とも青葉山

を固定点として見た。重力変化の観測誤差は 0.01～0.02mGal 程度と考えられ、現時点では観測値と計算値の両者は一致しているとはいえなかった。収縮のメカニズムの解明には、今後の測定の継続と重力測定の精度向上が求められる。

5. まとめ

1992 年から 2009 年の間に、4 回の GPS 測定および水準測定を実施した。これらの結果の比較から、測定を始めた 1992 年以降、草津白根山は山頂付近を中心として収縮しており、収縮源の 1 つは山頂の南東側にあることが確認された。地殻変動パターンは、地下 1.0km 程度にある球状圧力源の収縮によって説明可能であり、この力源は 1992 年以降、一定速度で収縮してきたと思われる。また、水準測定の結果から、1999–2003 年の間はまだ 1 つ、山頂の北側にも収縮源が存在していたことが示唆される。収縮のメカニズムの解明には、観測の継続と特に重力測定の

精度向上が求められる。

急傾斜地での水準測定であることからレフラクション誤差の影響が懸念されたが、測定結果にはレフラクション誤差特有の地形に相関のある変動が見られておらず、標尺の地面に近い部分では読定しないように測定した対策の効果があったと思われる。

2009 年には水準路線を延長したので、今後の測定データの蓄積により草津白根山および浅間山の深部力源の解明が進むことを期待する。

謝辞

本研究は、東京大学地震研究所共同研究プログラムの援助を頂きました。

重力測定では、東京工業大学火山流体研究センター草津白根火山観測所および東京大学地震研究所浅間山観測所のご協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 気象庁地磁気観測所(2010): 草津白根山における地磁気全磁力変化, 火山噴火予知連絡会会報, 103, 20–23.
- 気象庁地震火山部火山課(2010): 草津白根山の火山活動(2009 年 1 月～2009 年 5 月), 火山噴火予知連絡会会報, 103, 14–19.
- K.Mogi(1958): Relations between the Eruptions Various Volcanoes and the Deformations of the Ground Surfaces around them, Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol.36(1958), 99–134.
- 国土地理院(1991): 1:15,000 火山土地条件図草津白根山.
- 前川徳光, 植木貞人, 渡辺秀文, 大久保修平, 沢田宗久(1996): 草津白根山・浅間山周辺の重力精密測定(1992 年 9 月 28 日～10 月 3 日), 第 3 回草津白根山の集中総合観測報告書, 45–52.
- 村上亮, 加川亮, 山田晃子, 佐藤博行, 横川正憲, 木村俊明, 川本利一, 森克浩, 鈴木平三(2004): GPS 測定および水準測定が示唆する草津白根山の収縮源, 第 4 回草津白根山の集中総合観測報告書
- S.Nakai, K.Yamaguchi, K.Nitta, H.Yamamoto, K.Matsuo, M.Machida, M.Murakami, M.Ishihara, R.Shichi, A.Yamamoto(1997): Data Processing for the Japan Gravity Standardization Net 1996, submitted to proceedings of the GraGeoMar96.
- 多田堯, 中川勝登, 根本盛行, 平井英明, 佐野伸明, 真野宏邦, 田中和之(1996): 草津白根山における火山変動測定観測点の設置, 第 3 回草津白根山の集中総合観測報告書, 31–36.
- 植木貞人, 大久保修平, 大島弘光, 前川徳光, 須藤靖明, 孫文科, 小山悦郎(2004): 草津白根火山・浅間火山地域における重力精密測定(2003 年 9 月), 第 4 回草津白根山の集中総合観測報告書.