

GPS 観測で捉えられた吾妻山の地殻変動

Crustal Deformation Observed by GPS around Azuma Volcano

吉田友香¹, 舟越実², 西田誠³, 近江克也⁴, 高木朗充⁵, 安藤忍⁶

Yuka YOSHIDA¹, Minoru FUNAKOSHI², Makoto NISHIDA³,
Katsuya OHMI⁴, Akimichi TAKAGI⁵ and Shinobu ANDO⁶

(Received March 30, 2011; Accepted December 9, 2011)

ABSTRACT: Azuma volcano is located in the southern part of Tohoku, Japan. At this volcano, the inflation-deflation process has repeated several times at intervals of two to three years since 2003, accompanied by changes in seismic activity. This deformation has been detected by our GPS observation campaigns. According to previous GPS research, the pressure source was estimated only by horizontal displacement because the vertical component of the GPS baseline solution includes a larger error than the horizontal component does due to the inhomogeneity of the atmosphere. In this research, we evaluated pressure sources using 3-D displacement components, among which the vertical component was corrected to remove tropospheric and ionospheric inhomogeneities. We then estimated the location of the source of repeated inflation and deflation, assuming spherical geometry. The location of the source is estimated to be 200 to 600 meters beneath the O-ana crater in Azuma volcano. The depth obtained in the previous study without vertical component displacement is a few hundred meters shallower than that estimated in this study. Besides GPS observation, the geomagnetic total force has been measured repeatedly since 2003. According to this observation, the location of the thermal source that causes the demagnetization or magnetization of the surrounding area is estimated to be 300 to 400 meters beneath the O-ana crater. This is a few hundred meters shallower than the pressure source estimated in this study. With regard to seismic observation since 2003, hypocenters are distributed 500 to 2,000 meters beneath the O-ana crater. Although the locations of the pressure source, thermal source, and hypocenters do not coincide with each other, they are likely to be located near the shallower part beneath O-ana crater of Azuma volcano.

Adopting estimated pressure source parameters, we calculated the tilt change expected at Jododaira (JOD) where we installed the borehole-type tiltmeter in 2010. A tilt change of a few hundred microradians was obtained, which indicates the tiltmeter will be able to detect volcanic tilt change.

¹ 仙台管区気象台火山監視・情報センター, Volcanic Observations Information Center, Sendai District Meteorological Observatory
現所属: 地震火山部火山課, Volcanological Division, Seismological and Volcanological Department

² 仙台管区気象台火山監視・情報センター, Volcanic Observations Information Center, Sendai District Meteorological Observatory
現所属: 地震火山部地震予知情報課, Earthquake Prediction Information Division, Seismological and Volcanological Department

³ 仙台管区気象台火山監視・情報センター, Volcanic Observations Information Center, Sendai District Meteorological Observatory

⁴ 地震火山部火山課, Volcanological Division, Seismological and Volcanological Department

現所属: 仙台管区気象台火山監視・情報センター, Volcanic Observations Information Center, Sendai District Meteorological Observatory

⁵ 文部科学省研究開発局地震・防災研究課, Earthquake and Disaster-Reduction Research Division, Research and Development Bureau, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology

現所属: 気象研究所地震火山研究部, Seismology and Volcanology Research Department, Meteorological Research Institute

⁶ 気象研究所地震火山研究部, Seismology and Volcanology Research Department, Meteorological Research Institute

現所属: 文部科学省研究開発局地震・防災研究課, Earthquake and Disaster-Reduction Research Division, Research and Development Bureau, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology

1 はじめに

吾妻山は、東北地方南部、山形・福島県境に位置し (Fig. 1), 多数の成層火山や単成火山などからなる玄武岩～安山岩質の火山群である (気象庁編, 2005). 吾妻小富士や桶沼の火砕丘が形成された約 5,000～6,000 年前以降の活動は、水蒸気爆発ないしマグマ性爆発が主体であったが (藤縄・鴨志田, 1999), 有史におけるマグマ噴火の記録はなく、水蒸気爆発

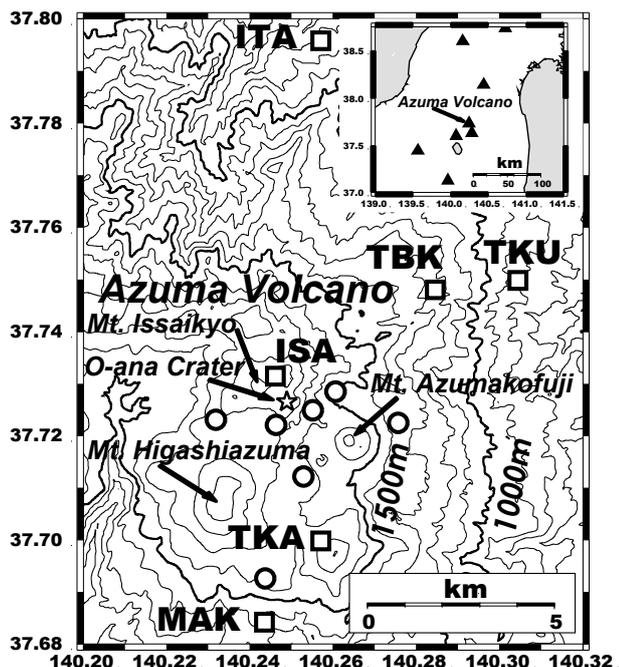


Fig. 1 Topographic map of Azuma volcano and the distribution of GPS stations. □ : GPS continuous observation stations, ○ : GPS campaign observation stations.

が主体である。

吾妻山の直近の噴火は 1977 年までさかのぼり、同年 12 月に小規模な水蒸気噴火が発生した。火口周辺には極少量の降灰が認められ、噴気活動は 1987 年まで盛んだった。それ以降噴火には至っていない (気象庁編, 2005)。2001 年頃からは 2～3 年周期で地震活動の活発化と静穏化を繰り返すようになり、仙台管区气象台が GPS 観測を開始した 2002 年以降、地震活動の活発期には膨張、静穏期には収縮傾向を示す地殻変動が観測されている (Fig. 2)。なお、GPS 連続観測および繰り返し観測の結果から、隆起と沈降のピークを読み取ることで、膨張期と収縮期の活動期間の区分をおこなった。2003 年 9 月から 2004 年 11 月を膨張期 I、2004 年 11 月から 2006

年 5 月を収縮期 I、2006 年 5 月から 2007 年 5 月を膨張期 II、2007 年春から 2008 年夏を収縮期 II 及び 2008 年 8 月から 11 月を膨張期 III とした。

これまで吾妻山の地殻変動を説明する圧力源推定では、GPS 測位解析の上下成分には大気に起因する解析誤差を多く含む等の理由から、水平成分のみを用いて行われてきた (山崎他, 2008)。しかし、より精度の高い圧力源パラメータを推定するためには、上下成分も加えて解析する必要があった。

そこで本研究では、GPS 測位解析で電離層及び対流圏で生じる誤差を補正し、3 成分の変位分布から圧力源推定を行った。また、地殻変動により推定した圧力源と、火山性地震の震源分布や全磁力変化により推定された圧力源とを比較し考察した。最後に、推定した圧力源パラメータを用い、2010 年 JOD (浄土平) に設置したボアホール型の傾斜計で期待される傾斜変化量を試算した。

2 GPS データ

GPS 連続観測は 3 か所の恒久観測点、及び 3 か所の機動観測点 (簡易設置型) で行われており、繰り返し観測は 7 点で行われている (Table 1, Fig. 2D)。連続観測点のうち TKU のみ 2 周波型の GPS 受信機であり、他は 1 周波型である。データサンプリングは 30 秒である。

Table 1 Description of GPS stations around Azuma volcano.

Site	Latitude (degree)	Longitude (degree)	Altitude (m)	Note
TKU (高湯)	37.7498	140.3044	837	Continuous. Permanent. 2-frequency-type.
ITA (板谷)	37.7958	140.2570	864	Continuous. Permanent.
MAK (幕川)	37.6842	140.2435	1346	Continuous. Permanent.
TKA (高山)	37.6998	140.2570	1849	Continuous. Temporary.
TBK (つばくろ谷)	37.7480	140.2845	1255	Continuous. Temporary.
ISA (一切経山)	37.7314	140.2461	1920	Continuous. Temporary.
JOD (浄土平)	37.7249	140.2551	1647	Repeated.
TSW (高山南西)	37.6926	140.2437	1611	Repeated.
NUR (微湯登山口)	37.7285	140.2606	1539	Repeated.
USA (兎平)	37.7122	140.2529	1639	Repeated.
AZA (吾妻山A点)	37.7225	140.2756	1343	Repeated.
HOR (蓬莱山東)	37.7221	140.2463	1697	Repeated.
UBA (姥ヶ原)	37.7231	140.2318	1824	Repeated.

連続恒久観測点データは 2002 年以降、また、連続機動観測点データは 2002 年 12 月から 2003 年 3 月まで、及び 2003 年 11 月以降に得られている。基線解析は観測点の任意の 2 点からなる基線の一方の点を基準点とし、他方の点のスタティック相対測位を行った。

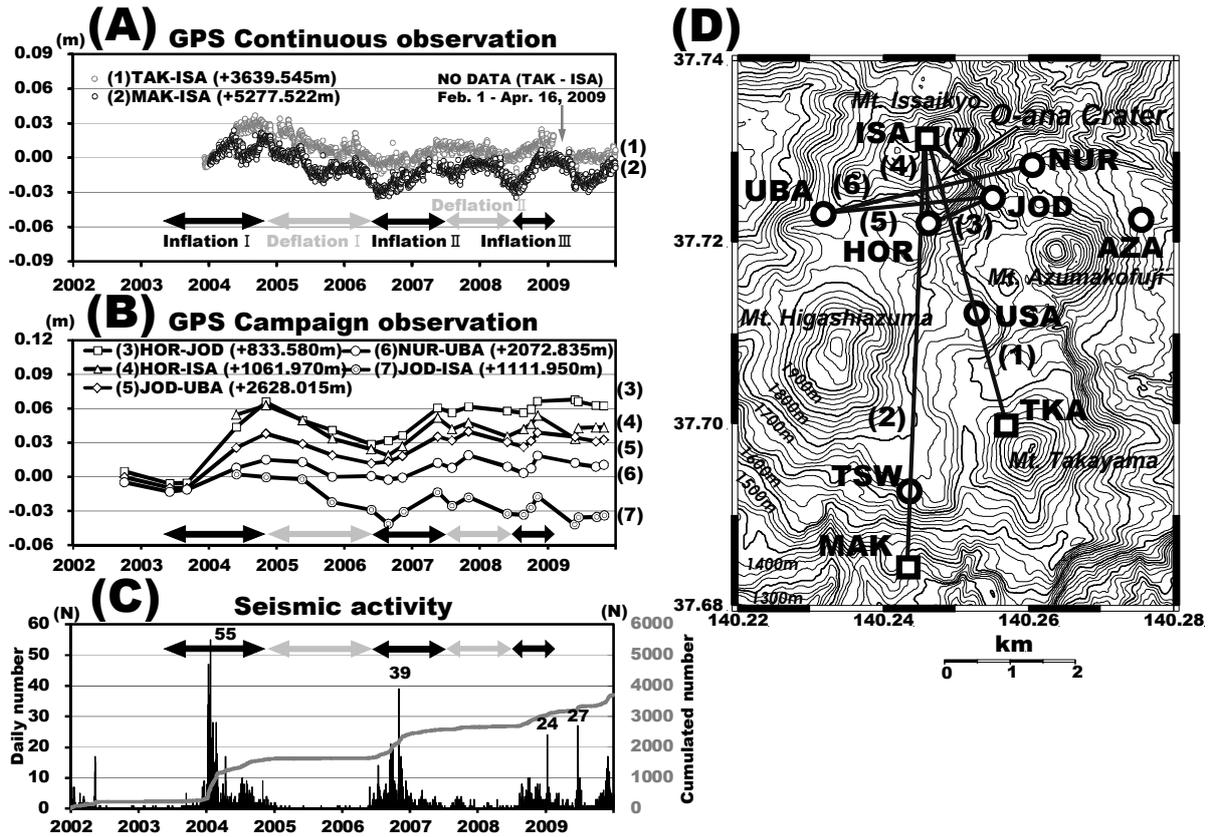


Fig. 2 Relationship between ground deformation and seismic activity in Azuma volcano from 2002 to 2009. The inflation-deflation process, accompanied with seismicity, has repeated several times at intervals of two to three years.

(A) Time series of two slope distances by GPS continuous observation (TKA – ISA).

(B) Time series of six slope distances by GPS campaign observation around O-ana crater.

(C) Seismic activity in Azuma volcano. Number of daily earthquakes and cumulative total.

(D) Distribution of GPS stations and baselines.

繰り返し観測は 2002 年から実施し、データを取得している。基線解析では TKU を基準点とし、その他の観測点のスタティック相対測位を行った。繰り返し観測は開始年の 2002 年は 1 回、2003 年から 2005 年までは 2 回、2006 年から 2007 年は 3 回、2008 年以降は年 4 回実施している。

3 GPS データを用いた圧力源の推定

3.1 GPS データの電離層・対流圏補正

GPS 測位精度に大きく影響する要因として、電離層及び対流圏における電波伝搬遅延が挙げられる。気象庁においてこれまで利用されてきた GPS 基線解析ソフトウェア CapWin2 (古野電気社製) は、電離層及び対流圏における電波伝搬遅延量を適切に見積もって基線解析を実施するものではなかった。そ

こで、これらの補正に対応可能な基線解析ソフト MG2120 (古野電気社製) を利用した。

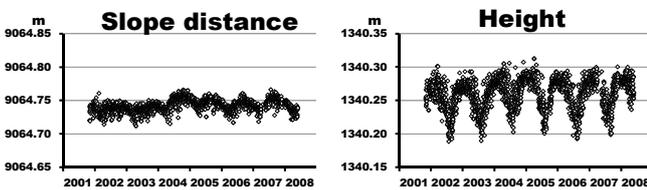
一般に、GPS 基線測位解析ソフトウェアは測位と対流圏の電波伝搬遅延量を同時に推定することが可能であるが、CapWin2 では対流圏の伝搬遅延量をある条件で固定したうえで測位計算を行っていた。MG2120 においては、基線解析プログラムにベルン大学の解析ソフトウェア Bernese Ver.5.0 (Dach et al., 2007) を使用することで、測位と対流圏の電波伝搬遅延量を同時に推定することが可能となり、対流圏に起因する測位誤差を低減することができた。

また、2 周波型の GPS 受信機によるデータでは、2 つの周波数を同時に観測する事により、理論的に電離層の遅延量を見積もり、補正することが可能である (Hofmann-Wellenhof et al., 2004) が、気象庁に

おける GPS 観測網は 1 点を除きすべて 1 周波型であるので、電離層遅延を見積もり適切な測位結果を算出することが困難であった。しかし MG2120 を使用することにより、周辺の国土地理院の 2 周波型 GPS 観測網 (GEONET) を利用して電離層遅延量の空間分布を把握し、1 周波型の各 GPS 観測点における電離層遅延量を近似的に算出することによって、補正することが可能となった (高木・他, 2010)。

吾妻山の GPS 連続観測点の基線長には、対流圏及び電離層において電波伝搬遅延量を適切に見積もることができないことに起因する、測位誤差の季節変動が重畳している。特に上下成分に重畳する測位誤差は顕著であった。このため、MG2120 を用いて、吾妻山の 1 周波 GPS データに補正を行った結果、標高差の大きな観測点間の基線変化に重畳していた季節変動ノイズが除去され、上下成分の精度が向上した。Fig.3 に、補正前と補正後の TKU-MAK 基線の基線長と高さの変化を示す。この補正を GPS 繰り返し観測のデータにも適用した。以後の GPS 解析結果はこの補正を行ったものである。

(A) Without correction TKU - MAK



(B) With correction TKU - MAK

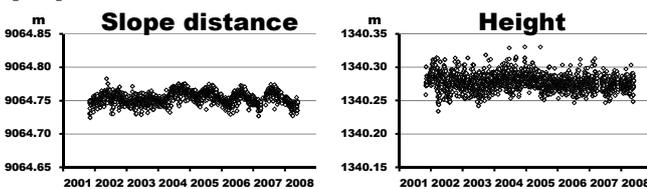


Fig. 3 Precision improvement of GPS baseline length (TKU - MAK) in Azuma volcano by new correction method.

- (A) Slope distance and height without the new correction.
- (B) Slope distance and height with the new correction.

3.2 茂木モデルによる解析結果

圧力源推定の解析には火山用地殻活動解析支援ソフトウェア MaGCAP-V (気象研究所地震火山研究部, 2008) を用いた。MaGCAP-V における圧力源推定に

は球核モデル (茂木モデル) (Mogi, 1958) とディスロケーションモデル (Okada, 1992) が用意されている。MaGCAP-V では、茂木モデルにおける圧力源の深さを、圧力源の深さにそれぞれの GPS 観測点の標高を加えた値で置き換えた「標高補正茂木モデル」を用いている。標高補正茂木モデルは特別急峻な地形でなければ地形の影響を良く除去でき、茂木モデルよりも高い精度で圧力源モデルを推定できることが分かっている (福井, 2008)。

圧力源モデルの解析期間は、膨張期 I・II・III 及び収縮期 I の 4 期間とする。なお、収縮期 II については、GPS データから収縮傾向が読み取れるものの、圧力源の推定解析が可能な変位量ではなく解析は行わなかった。また、解析のための基準点については局所的な変動によって全体の変位分布にオフセットが生じないような観測点を固定点とし、膨張期 I は TKU、膨張期 II 及び収縮期 I は TKA、膨張期 III は TSW と、解析期間によって変更した。モデルの最適化計算はグリッドサーチにより、水平格子間隔 20m、標高間隔 10m、体積変化量の間隔は $0.01 \times 10^6 \text{m}^3$ で解析を行った。

膨張期 I～III 及び収縮期 I の推定された圧力源の水平位置、大穴火口 (海拔約 1,700m) からの深さ、体積変化量及び観測変位分布と推定された圧力源により計算された変位分布を Fig. 4 に示す。各 4 期間の圧力源の水平位置はいずれも大穴火口付近であり、大穴火口からの深さは膨張期 III を除くと 200～600m、体積変化量は $-0.10 \times 10^6 \sim 0.15 \times 10^6 \text{m}^3$ と見積もられた。なお、膨張期 III の圧力源は、これらの中で最も深く、950m と求められている。しかし、この期間は変動量が小さいため、他の期間に比べて深さと体積変化量の推定誤差が大きいと考えられる。

4 議論

4.1 地震活動や全磁力変化との比較

吾妻山における震動観測は、5 か所の定常観測点で実施している。火山性地震の検出基準は、AZA の上下成分速度振幅 $0.2 \text{mkine} [= 0.2 \times 10^{-5} \text{m/s}]$ 以上で S-P 時間が 2.0 秒以内の地震としている。ただし、吾妻山周辺で発生した地震であっても構造性地震であると明確に判断できた地震は除外している。震源計算には吾妻山の震動観測点 5 点に加え、隣接する

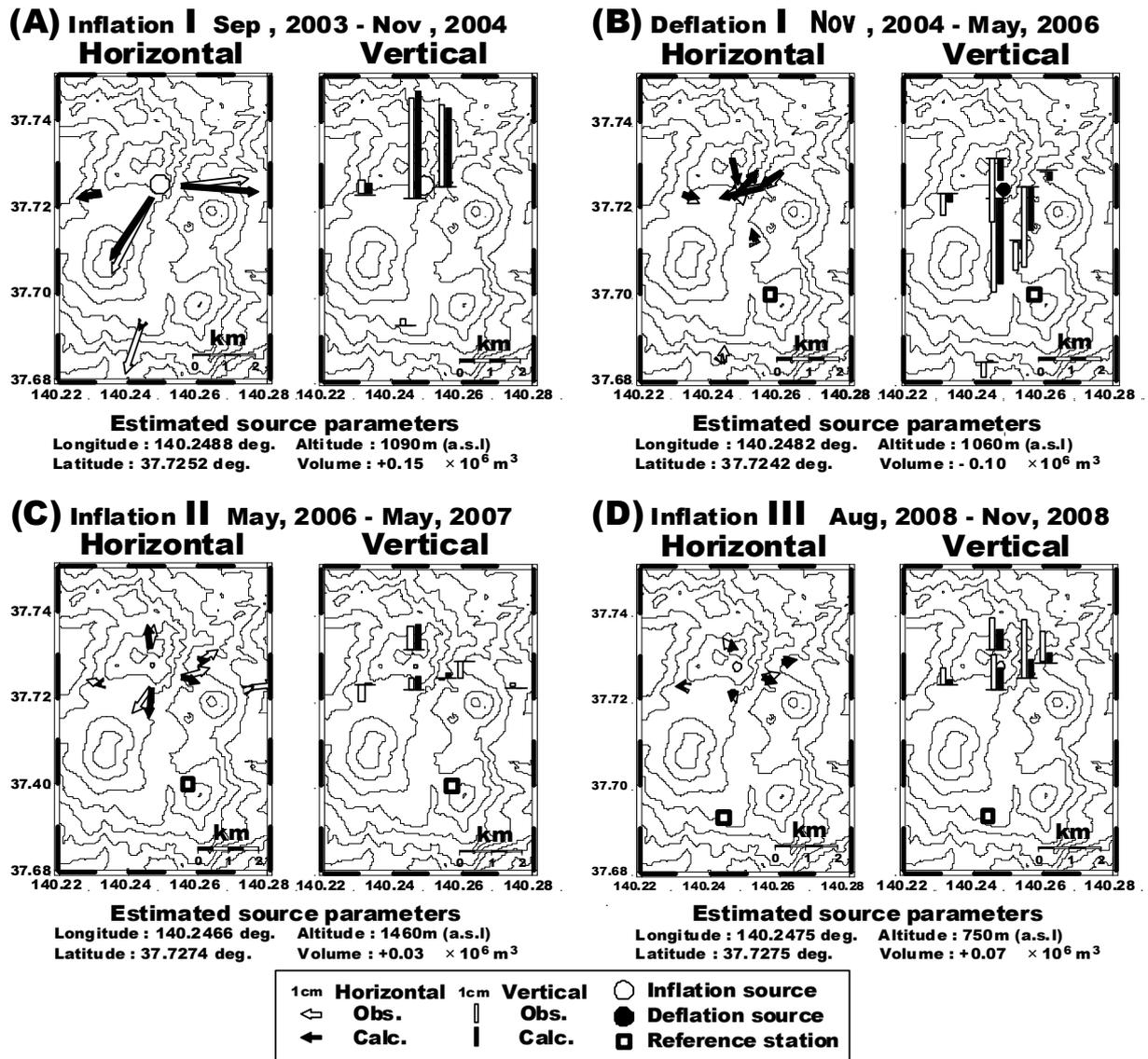


Fig. 4 Estimation of the pressure sources and the distribution of observed and calculated displacement for four episodic stages.

(A) Inflation I, September, 2003–November, 2004.

(B) Deflation I, November, 2004–May, 2006.

(C) Inflation II, May, 2006–May, 2007.

(D) Inflation III, August, 2008–November, 2008.

安達太良山観測点2点の計7点を用いている。震源計算の方法は、吾妻山周辺の観測網の内側の地震については半無限等方均質媒質を仮定し（P波速度 3.1km/s （若生・他，2002）， $V_p/V_s=1.73$ ），観測網の外側の地震については成層構造（表層部分のP波速度 2.5km/s ， $V_p/V_s=1.73$ ）と仮定している。震源は仙台管区気象台火山監視・情報センターが、観測点4点7相以上を検測できたものを決定し、震源リストに登録する。

この震源リストのうち、7相以上を用いて決定さ

れ、かつ緯度経度の誤差 ± 0.2 分以内、深さ誤差 $\pm 0.5\text{km}$ 以内の条件を満たす、2003年9月以降の精度の高い震源分布をFig. 5に示す。震源域は大穴火口付近の深さ500~2,100m（海拔-400~1,200m）に分布する。この場所はGPSデータにより推定された圧力源よりやや深部に位置する。

一方、吾妻山では、2003年9月以降、繰り返し全磁力観測も実施している。観測は年に1~2回の頻度で2009年までに11回行った。観測にはプロトン磁力計を使用し、観測点は大穴火口を囲むように

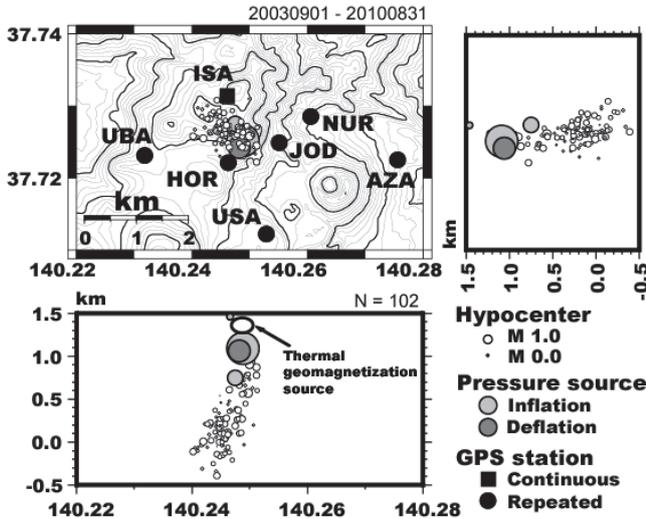


Fig. 5 Hypocenter distribution of volcanic earthquakes that have occurred in Azuma volcano and pressure sources estimated by ground deformation. Both sources are beneath O-ana crater. The seismic region is located 400 m below sea level to 1,200 m above and the pressure source is located 1,100–1,500 m above sea level.

配置した 12 点で行っている。2004 年から 2009 年までの全磁力変化から求められた熱消磁域は、大穴火口直下の深さ 300～400m と推定され(山崎・他, 2010)、これは GPS データにより推定された圧力源よりやや浅部に見積もられている。

吾妻山で観測された地殻変動と同規模の地域的な浅部膨張は、近年十勝岳(札幌管区気象台, 2010)や御嶽山(高木・他, 2007)などいくつかの火山で確認され、その多くで水蒸気爆発や噴気異常を伴ったことが報告されており、熱水の活動と関連した現象と推定されている(山里・宮村, 2009)。2003 年以降、間欠的に観測されている吾妻山の地殻変動も熱水活動の高まりによるものと仮定し、震源分布や全磁力変化より推定された熱消磁域との関係について次のように推測した。

地殻変動から推定された圧力源は、大穴火口付近の深さ 200～600m と極めて浅く、マグマの充填に伴う現象であると考え難い。むしろ、大穴火口付近の地下浅部の熱水だまりの圧力変化によって、地表での膨張・収縮の地殻変動が観測されたと考える方が自然である。熱水だまりの圧力変化は、深部から熱水だまりへの熱供給が間欠的であること

によって生じると考えられる。繰り返し観測による全磁力変化では、2004 年以降熱消磁傾向が続いていることが分かっているが、繰り返し観測の間隔が長く時間分解能が低いため、必ずしも定常的な熱供給が継続していたと断定できない。また、これらの現象を定常的な熱供給で説明しようとするのであれば、収支を合わせるため収縮期に噴気や火山ガスの放出量が多いはずであるが、そういった観測事実はない。これらのことから、吾妻山の地殻変動は深部からの間欠的な熱供給によるものであると推測した。

深部から浅部への熱供給過程において火山性地震が発生しているとするれば、熱供給が間欠的であるために活発化と静穏化を繰り返していることや、火山性地震の震源域が圧力源の深さよりも相対的に深いことと調和的である。しかし、小論で推定された GPS による圧力源の深さ 200～600m、全磁力観測により推定された熱消磁域の深さ 300～400m、及び地震観測により求められた震源の深さ 500～2,000m の推定誤差を考えると、これらの相対的な位置関係をこれ以上ここで詳細に議論することは困難である。今後は、それぞれの観測種目におけるソースの推定精度を一層吟味し、さらに噴気活動や熱活動など吾妻山における現象をそれぞれ精査し追加情報を取得したうえで、現象発生メカニズムの理解を目指すことが課題である。なお、2009 年頃から地震活動の活発化・静穏化と GPS データによる膨張・収縮の対応がやや不明瞭になってきている (Fig. 2)。このことも加えて考慮して研究を進めることで、現象発生メカニズムの理解へつながるであろう。

4.2 圧力源モデルを用いた傾斜変化の見積もり

2010 年に吾妻山の火口近傍 JOD に傾斜計が整備された。傾斜計は 100m 深のボーリングによって埋設されている。今後の吾妻山における活動評価の指標のひとつとするため、浅部での局所的な膨張・収縮によりこの傾斜計で観測される傾斜変化量を見積もった。3.2 節で推定した膨張期 I、II 及び収縮期 I の圧力変化に伴う傾斜変化量を Mogi (1958) を用いて (1) 式から算出した。

$$T = \frac{9 \Delta V}{4 \pi} \frac{Dr}{(D^2 + r^2)^{2.5}} \quad (1)$$

ここで T は傾斜変化量、 ΔV は圧力源の体積変化

量, D は圧力源の深さ, r は圧力源から観測点までの水平距離である. 計算の結果, 膨張期 I では $110 \mu \text{ rad}$, 膨張期 II では $20 \mu \text{ rad}$, 収縮期 I では $60 \mu \text{ rad}$ の傾斜変化が期待される.

膨張期 I や II の変動継続時間は 10^2 day のオーダーであり, この程度の時間を費やす地殻変動は GPS において検知することは可能であるが, 傾斜計においては降水等のノイズを拾うため検知可能かどうかは不明である. しかし, この程度の傾斜変化量であれば, これまでの同種同環境の観測から $10^0 \sim 10^3 \text{ day}$ では検出できる可能性の高い量である. つまり, 噴火現象に至るにはより大きなフラックスの熱活動と地殻変動が必要になるものと考えられるが, 膨張期 I や II で見られた程度の変化量が 10^0 day 程度の短時間に起きるのであれば, 噴火発生中あるいは噴火発生前に検出することも可能である.

今後は圧力源パラメータの推定に傾斜計のデータを加える工夫に取り組み, モデルの精度を高めていくことが重要である. また, 圧力源の挙動監視に傾斜計を十分活用するため, 傾斜計のデータを蓄積したうえで, ノイズレベルの把握や検知可能な変動範囲の検証が必要である.

5 まとめ

吾妻山では, 地震活動の活発化・静穏化を伴いながら, 大穴火口を中心とした地殻変動の膨張・収縮が GPS 観測データにより確認された. GPS データは特に上下成分で測位誤差が大きいことから, 電離層及び対流圏補正を施し, 3 成分変位分布から茂木モデルを仮定して圧力源の推定を行った. その結果, 膨張及び収縮の圧力源は大穴火口付近の地下 $200 \sim 600 \text{ m}$ と求められた. この圧力源の位置は, 観測された火山性地震の震源や, 全磁力観測により推定された熱消磁域とほぼ同じ大穴火口直下であり, 深さは震源域より浅く, 熱消磁域より深いと推定されたが, 今後より決定精度を高めて推定する必要がある.

また, 推定された圧力源パラメータをもとに, 大穴火口近傍に新設された傾斜計により期待される傾斜変化を計算した結果, 数十～数百 $\mu \text{ rad}$ であることがわかった. これは絶対量としては十分検出可能であり, 今後のモデル精度や監視手法の向上のためには GPS データだけではなく傾斜計のデータを含めた地殻変動の監視・評価が非常に重要である. そ

のため, これからは傾斜計のデータを含めた総合的な地殻変動源の推定に取り組み, その他の物理現象との理解を深める必要がある.

謝辞

本論文を作成するにあたり気象研究所地震火山研究部第三研究室の皆様には大変お世話になりました. また, 2名の匿名の査読者からは適切なコメントを頂きました. 記して感謝の意を表します. 作図には GMT ソフトウェア (Wessel and Smith, 1995) を使用しました.

文献

- 気象研究所地震火山研究部 (2008): 火山活動評価手法の開発研究, 気象研究所技術報告, **53**, 306pp.
- 気象庁編 (2005): 日本活火山総覧(第3版), 635pp.
- 札幌管区气象台(2010): 十勝岳 GPS 観測で捉えられた 62 火口群周辺の地殻変動, 火山噴火予知連絡会会報, **101**, 16-24.
- 高木朗充, 北川貞之, 宮村淳一 (2007): GPS で捉えられた御嶽山の地殻変動, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 予稿 CD-ROM, V156-P002.
- 高木朗充, 福井敬一, 小司禎教 (2010): 火山周辺での GPS 観測における数値気象モデルを用いた対流圏補正, 火山, **55**, 1-12.
- 福井敬一 (2008): 標高補正茂木モデルの有効性と適用範囲, 気象研究所技術報告, **53**, 105-122.
- 藤縄明彦, 鴨志田毅 (1999): 吾妻火山—雄大な爆裂カルデラと中央火口丘を歩くフィールドガイド, 日本の火山④—東北の火山—, 89-104.
- 山崎明, 中島新三郎, 田口陽介, 海東恵美, 芥川真由美, 増子徳道, 清水淳平, 大和田毅, 山崎伸行, 長町信吾, 大川隆志, 仙台管区气象台火山監視・情報センター (2010): 吾妻山における地球電磁気観測, Conductivity Anomaly 研究会 2010 年論文集, 5-11.
- 山崎伸行, 近江克也, 高木朗充 (2008): 吾妻山の地震活動に伴う地殻変動, 日本火山学会 2008 年度秋季大会講演予稿集, B25.
- 山里平, 宮村淳一 (2009): 近年の様々な火山地殻変動—異常未経験火山における活動評価に向けて—, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 予稿 CD-ROM, V159-016.

若生勝, 宮岡一樹, 鈴木達也, 関根一男, 橋本徹夫
(2002): 吾妻山の火山性地震:特徴的な地震波形を持つ地震の震源について, 日本火山学会 2002 年度秋季大会講演予稿集, B01.

Dach, R., U. Hugentobler, P. Fridez and M., Meindled
(2007): Bernese GPS software Version 5.0. Astronomical Institute of University of Berne, 612pp.

Hofmann-Wellehof, B., H.Lichtenegger and J. Collins
(2004): Global Positioning System:theory and practice, 5th, rev. ed., Springer Wien New York, 99-105.

Mogi, K. (1958): Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surface around them. Bull. Earthq. Res. Inst., **36**, 99-134.

Okada, Y. (1992): Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seism. Soc. Am., **82**, 1018-1040.

Wessel, P. and Smith, W.H.F. (1995): New version of the generic mapping tools. EOS Trans. Amer. Geophys. Union, **76**, 329.

(編集担当 坂井孝行)