

# 阿蘇カルデラにおける水準測量(2008年9月-10月)

京都大学大学院理学研究科 大倉 敬宏・吉川 慎  
井上 寛之・宇津木 充  
鍵山 恒臣・寺田 暁彦  
加納 将行・由井 智志  
京都大学防災研究所 山本 圭吾・高山 鐵朗  
山崎 友也・多田 光宏  
立尾 有騎  
九州大学大学院理学研究院 松島 健・内田 和也  
中元 真美・山下 裕亮  
国土交通省国土地理院 平岡 喜文・三森庸里江  
根本 盛行

## 1. はじめに

阿蘇火山周辺では、京都大学火山研究センターにより 1937 年から繰り返し水準測量が行われてきた<sup>1,2,3)</sup>。その結果として、中岳火口の西南西約 2km の地点を中心とした沈降が観測されている。そして、この沈降の原因は中岳火口の西 3km(草千里)の地下 4-6kmを中心とする収縮力源であると考えられている<sup>3)</sup>。また、地震波トモグラフィーの結果からは、草千里の地下 6km には直径 2-3km の低速度領域が存在することが明らかにされており<sup>4)</sup>、低速度領域の位置が収縮力源の位置とほぼ一致することから、この領域がマグマ溜まりに対応すると考えられている<sup>3)</sup>。一方、2003 年には国土地理院の GPS 観測網(GEONET) によりカルデラ中央部が盛り上がる地殻変動がとらえられ、その変動源は須藤・他<sup>3)</sup> が求めた力源よりも深部にある可能性の高いことが示されている<sup>5)</sup>。また、GEONET の 1997 年-2002 年データの解析からは、阿蘇カルデラは全体として沈降していることが明らかとなっており<sup>6)</sup>、その変動源の一つの位置は 2003 年の変動源の位置とほぼ一致する<sup>7)</sup>。

この様な変動が明らかになっている阿蘇カルデラにおいて、第 4 回阿蘇火山の集中総合観測の一環として 2008 年 9 月-10 月に水準測量を実施した。本稿では、この測量の概要および結果を示し、1998 年と 2004 年に行われた過去の水準測量結果と比較して求めたこの期間の阿蘇カルデラにおける上下変動量について報告する。

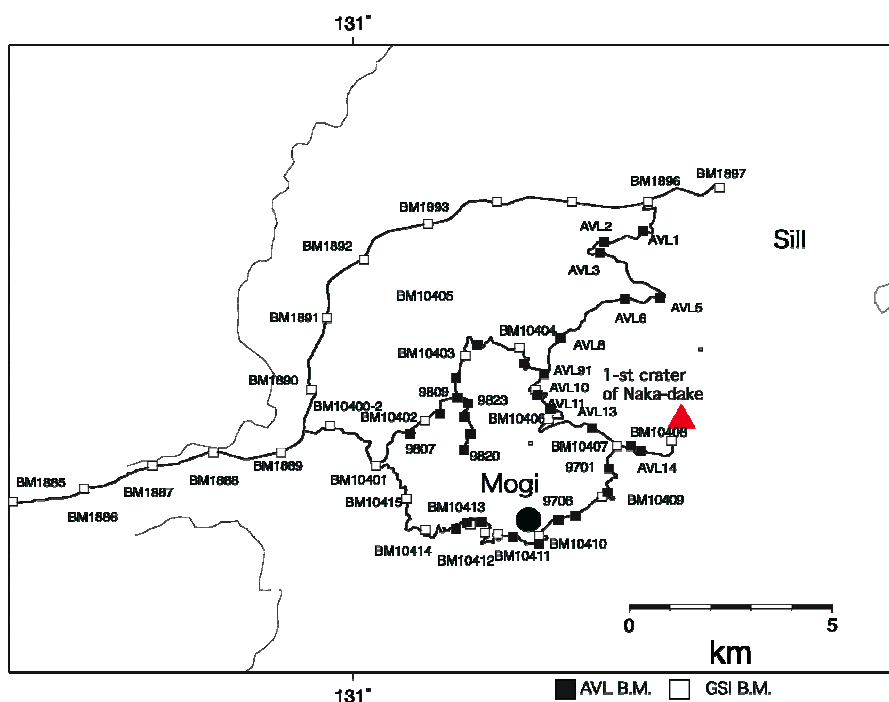


図 1. 2008 年度集中総合観測において測量を行った水準点(■と□)。■は京都大学的水準点, □は国土地理院の水準点(一等および二等)を表す。▲は中岳第一火口の位置を示す。須藤・他<sup>3)</sup>による Mogi ソースと国土地理院<sup>4)</sup>によるシルの位置も示されている。

## 2. 水準測量および測量結果

今回水準測量を実施した路線は、国道 57 号路線 (BM1885～BM 1897)、阿蘇登山道路坊中線 (BM1896～AVL91～BM10408)、赤水線 (BM1890～BM10401～AVL91)、地獄温泉から阿蘇登山道路吉田線 (BM10401～BM10410～BM10407)、そして湯ノ谷路線 (9809～9820) であり、これらの総延長は約 63km である (図 1)。これらの路線を、国土地理院 (測量期間: 2008 年 9 月 15 日～10 月 4 日) と大学合同班 (測量期間: 2008 年 9 月 15 日～9 月 27 日) で分担して測量した。これまでに、国道 57 号路線では 2003 年および 2004 年 (BM1885～BM 1893) に、阿蘇登山道路赤水線では 2004 年にそれぞれ国土地理院が水準測量を実施し、また、京都大学が 2004 年に阿蘇登山道路坊中線を、1997 から 1998 年に坊中線と赤水線の一部および地獄～吉田線を水準測量したが、同時期に合同で測量を実施したのは今回が初めてである。

測量に使用した機材は、大学合同測量班が自動読み取りデジタルレベル (Wild NA3003, NA3000) およびインバーンバーコード標尺 (Wild GPCL3)、国土地理院はデジタルレベル (Zeiss DiNi12) およびインバーンバーコード標尺 (Zeiss LD13) である。測量方法は、各水準点

間の往復測量であり、すべての往復差は水準点間距離を  $S$  km としたときの一等水準測量の許容誤差である  $2.5 \times \sqrt{S}$  mm 以内である。

今回の測量では 2 つの閉合環が形成されている。57 号線-坊中線-赤水線 (BM1890- BM1896- AVL91- BM10401- BM1890: 約 33km) と地獄-吉田線-坊中線-赤水線 (BM10401 - BM10407- AVL91- BM10401: 約 27km) である。前者における環閉合差は 5.97mm であり、後者のそれは 8.15mm であった。これらの値も一等水準測量の基準(総距離  $L$  km の環閉合差が  $2\sqrt{L}$  mm 以下)を満たしている。2 つの閉合環では路線の一部 (AVL91- BM10401) が共有されていることから、2 つの環閉合差がゼロになるという条件方程式を、各水準点間距離の重み付き誤差の2乗和を最小にする条件で解き、各水準点間の高低差を求めた。閉合環を形成しない路線については、往路と復路の読み取り値の平均を各水準点間の高低差とした。そして、中央火口丘北麓に位置する水準点 AVL1 を不動点(基準)とし、坊中路線の水準点の比高値を

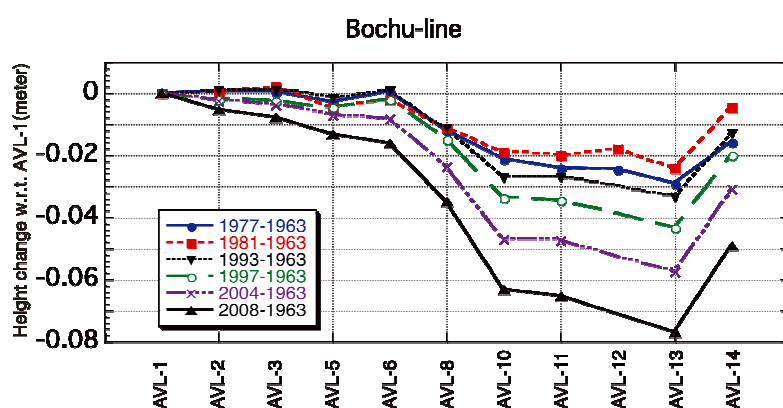


図 2. 水準点 AVL1 を基準にした 1963 年以降の坊中路線における水準点の上下変動量。

1963 年以降に京都大学により行われた水準測量結果と比較したのが図2である。

この図から、草千里近傍において (AVL10-AVL13) 2004 年に比べて 2-3cm の沈降が観測されていること、この変動はこれまでの測量結果と同じパターンであることがわかる。これまでの変動パターンは中岳火口の西南西約 2km の地点を中心としていることが報告されており<sup>3)</sup>、この変動が長期間にわたって同一の変動源により引き起こされていることが示唆される。

### 3. 解析

この節では、Mogi<sup>8)</sup>による球状圧力源モデルや Okada<sup>9)</sup>によるシル(またはダイク)モデルを適用し、水準測量でとらえられた沈降の変動源の位置および変動量を求める。

須藤・他<sup>3)</sup>は 1993 年から 2004 年までの坊中線の上下変動に関して、Mogi<sup>8)</sup>による球状圧力源モデルを適用し、圧力源の位置と体積変化を求めた。しかし、計算された圧力源の諸要素(北緯 32.8657 度, 東経 131.0447 度:JGD2000 座標系, 海面下 5km,  $-4.19 \times 10^6 \text{m}^3$ )には大きな不確実性があった。そこで、須藤・他<sup>3)</sup>は、1989 年に国土地理院がおこなった赤水・吉田路線の測量結果と 1997 年から 1998 年に京都大学がおこなった坊中線と赤水・吉田線の測量結果を併合することにより、1993 年から 1997 年までの上下変動に対する圧力源を求めた(図1. に示されている Mogi ソース: 北緯 32.8640 度, 東経 131.0467 度, 海面下 5.83km,  $-3.66 \times 10^6 \text{m}^3$ )。

しかし、今回の観測では、坊中・赤水・吉田線を同一期間に測量しているため、特別な併合処理を施すことなく、1997 年から 2008 年までの変動量を求める事ができ、その変動に対する圧力源を推定することができる。そこで、Mogi ソースの諸要素として、北緯 32.840 から 32.905 度, 東経 131.02 から 131.085 度, 海面下 3.5 から 6.4km, 体積減少量  $2$  から  $6 \times 10^6 \text{m}^3$  の範囲でグリッドサーチをし、AVL1 に対する各水準点における上下変動量と観測された上下変動量の差の

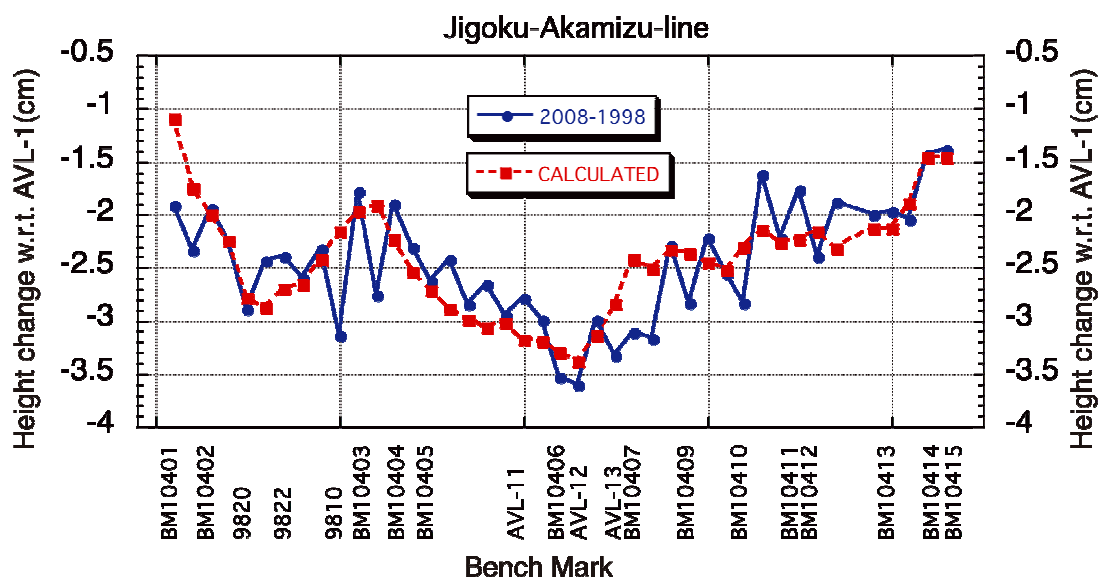


図 3. 赤水線—坊中線—地獄吉田線—湯の谷線における 1998 年から 2008 年までの上下変動量(実線)と Mogi ソースを仮定した時の計算値。ともに AVL1 を基準としたときの変動量。両者は概ね一致している。

二乗和が最小になる圧力源の諸要素を求めた。求めた圧力源の位置は北緯 32.8810 度, 東経 131.0470 度, 海面下 5.11km, 体積減少量は  $5.2 \times 10^6 \text{m}^3$  である。図 3 には、赤水線, 坊中線, 地獄吉田線および湯の谷線における 1998 年から 2008 年までの上下変動量(実線)と上述の Mogi ソースを仮定した時の計算値が示されている。この図より、両者が概ね一致していることがわかる。

1998 年と 2008 年までの上下変動に対する圧力源は 1993 年から 1997 年までの上下変動に対する圧力源(須藤・他<sup>3)</sup>)より約 1.6km 北に位置し、700m 浅い。圧力源の位置が時間変化して

いる可能性もあるが須藤・他<sup>3)</sup>の結果も吟味する必要がある。なぜならば、地獄吉田路線では1993年には水準測量がおこなわれていないからである。須藤・他<sup>3)</sup>は1989年から1997年までの力源体積変化率が一定であるとの仮定のもとに、1989年と1997年の赤水・吉田路線の測量結果から同路線の1993年から1997年の変動値を作成し、坊中路線の測量結果と併合処理している。しかし、須藤・他<sup>3)</sup>に示されているように、力源の体積変化量は1981年から1993年が正で、1993年から1997年が負であるので、1989年から1997年までの力源体積変化率が一定という仮定が間違いである可能性が高い。したがって、須藤・他<sup>3)</sup>が行った力源の見積には不正確さが存在する。1998年から2008年の体積変化の中心は須藤・他<sup>3)</sup>の結果より北に位置し、トモグラフィによる低速度領域<sup>4)</sup>のほぼ中心に位置している。ただし、GPS観測の結果から2003年の中頃にマグマ溜まりでの体積増があったことが解っている<sup>7)</sup>が、今回の結果はその増加分を含んでおり、体積増と体積減の位置が同じであるかどうかは解らない。

次に深部に存在する変動源の影響を見積もる。AVL1を基準にした場合では、坊中線などの上下変動は深部シルの変動により影響されない<sup>7)</sup>、深部シルにおける変動を検出するためには、より広い範囲での水準測量が必要となる。そこで、今回測量した水準点のうちカルデラから一番遠いBM1885を基準にして、2004年から2008年の上下変動量を計算した(図4)。

図4にはMogiソースのみに体積変化を仮定した場合とMogiソースと深部のシル両方の変動を考えた場合の計算結果も示されている。Mogiソースのみに体積変化を仮定した場合、坊中線

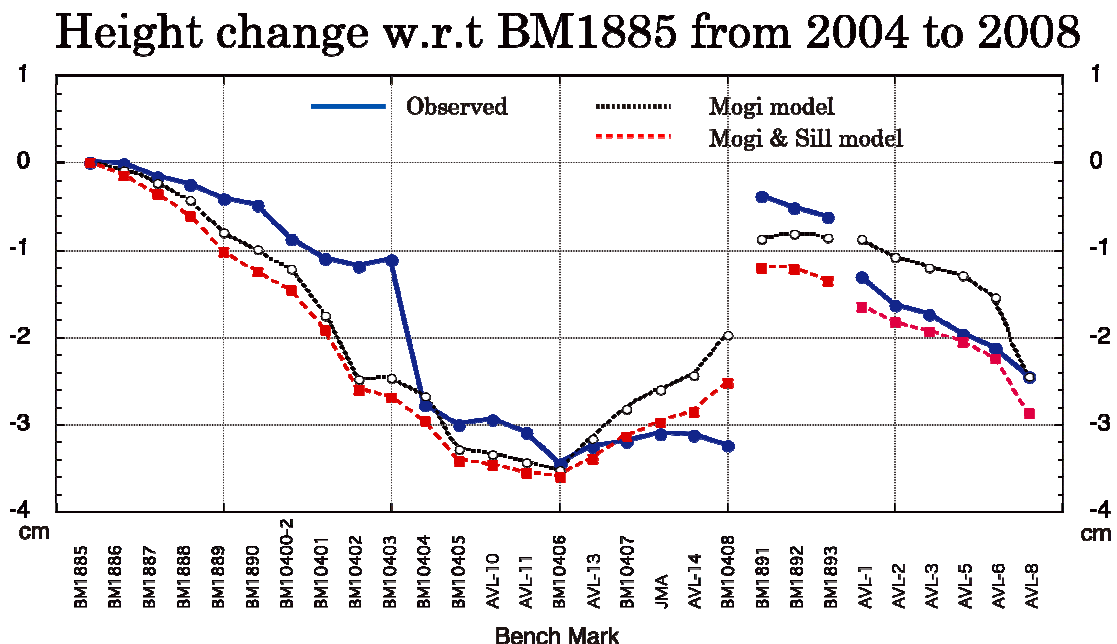


図4. BM1885を基準にした国道57号路線、赤水線、坊中線の上下変動(2004年から2008年)。Mogiソースで4.2million m<sup>3</sup>の体積減を仮定した時の計算値(点線)。深さ5.11kmのMogiソースでは3million m<sup>3</sup>の体積減、深さ15.5kmのシルは0.35m閉じると仮定した時の計算値(破線)。

の上下変動が説明できず、Mogi ソースと深部のシル両方の変動を考えた場合の方が全体的にあっていることがわかる。ただし、Mogi ソースと深部のシル両方の変動を考えた場合でも国道 57 号路線や赤水線の一部があてない。この理由として測量時期に差のある(京都大学が 2004 年の 7 月, 国土地理院が同年 10-11 月)データを併合したことがあげられる。国土地理院は 2003 年 10 月にも 57 号路線を水準測量しており, その結果も合わせると, 2003 年~2008 年の変動量(沈降水量)は 2004 年~2008 年の変動量よりもかなり大きい。すなわち, 2003 年 10 月から 2004 年 10 月の変動が大きい。このことから, 2004 年 7 月から 2004 年 10 月にもある程度の沈降があったと考えられ, 2004 年の比高値として地理院の 2004 年 10 月測量データを使用している国道 57 号路線や赤水線の一部の水準点については 2004 年から 2008 年の変動量が小さくなっているであろう。

#### 4. 議論

前節で述べたように阿蘇カルデラにおける 2004 年から 2008 年の上下変動を説明する変動源として, 深さ 5.11km の Mogi ソースでは 3 million m<sup>3</sup> の体積減, 深さ 15.5km のシルが 0.35m 閉じるとするモデルが考えられる。図5に示されている様に, このモデルにより同時期の GPS の

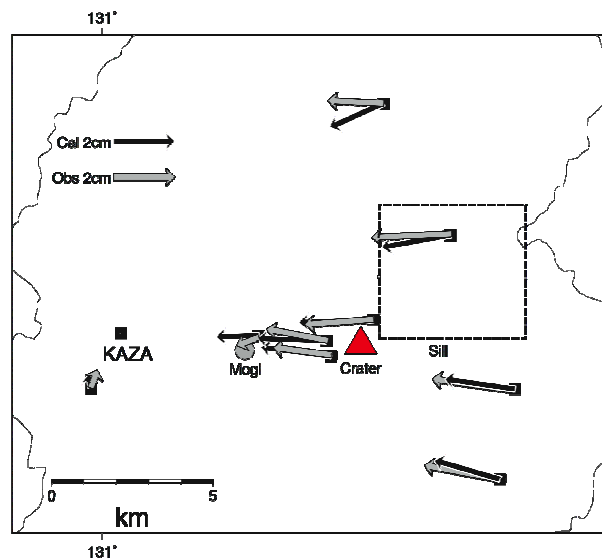


図5. 2004年4月から2008年4月までのGPS変位ベクトルとMogiソースとシルを仮定して計算された変位ベクトル(火山研KAZA固定)。図4のMogi&Sillモデルと同じく深さ5.11kmのMogiソースでは3 million m<sup>3</sup>の体積減, 深さ15.5kmのシルは0.35m閉じると仮定して変位を計算している。

変位場もおおむね説明できる<sup>7)</sup>。また, 1998年から2008年までの体積減少量は $5.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ であったので, 1998年から2004年までの体積減少量が $2.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ となる。ただし, この値には2003年の体積増加量が含まれている。

ここでは、Mogi ソースにおける 2004 年から 2008 年までの体積減少量と火口からのガス放出量の関係について議論する。COMPUSS により測定された阿蘇中岳第一火口からの  $\text{SO}_2$  放出量はおおよそ 300ton/day である<sup>10)</sup>。また、中岳第一火口の高温噴気中のガスのモル比が  $\text{H}_2\text{O}:\text{SO}_2=50:1$  である(篠原:私信)ことから、これを重量比に換算すると  $\text{H}_2\text{O}:\text{SO}_2=14:1$  となる。すなわち、 $\text{H}_2\text{O}$  の放出質量は  $\text{SO}_2$  の 14 倍であり、4200ton/day $\div$ 1.5 百万 ton/年となる。一方、メルト中の  $\text{H}_2\text{O}$  のモル体積が 12–22cc/mol である<sup>11)</sup>ことから、メルト中の  $\text{H}_2\text{O}$  は 1g あたり 0.67–1.29cc すなわち 1ton あたりでは 0.67–1.29 m<sup>3</sup> の体積をしめる。したがって、1.5 百万 ton の  $\text{H}_2\text{O}$  の放出により、マグマ(メルト)の体積は 1–2 million m<sup>3</sup> 減少することになる。上下変動量から推定された 2004 年–2008 年の 1 年あたりの体積減少量はおおよそ 0.75 million m<sup>3</sup> であり、ガス放出量から類推されるマグマの体積減少量とほぼ同じオーダーであるが若干小さい。ただし、 $\text{H}_2\text{O}$  のメルト中でのモル体積の温度圧力依存を考慮していないなど、ガス放出によるマグマの体積変化の見積りに不正確さはある。また、2004 年から 2008 年までの上下変動量から地下での体積変化量を求める際には、シルの位置や形状、Mogi ソースの位置を固定したフォーワードの計算しかしていないなどの問題がある。しかし、ガス放出によるマグマの体積変化量より上下変動量から推定される体積変化の方が小さいことは、それを補う分のマグマの供給があることを示している可能性がある。このことを検証するためにも、今後も火口からのガス放出量を正確に測定するとともに、草千里周辺域の地殻変動量を正確に測定することが重要である。また、地殻変動から変動源での体積変化量を正確に見積もる際には、シルの位置、形状および体積変化量、Mogi ソースの位置や体積変化量を未知数としたインバージョンなどを行うことが今後の課題である。

#### 4. まとめ

第 4 回阿蘇火山の集中総合観測の一環として 2008 年 9 月–10 月に一等水準測量を実施した。その測量結果過から以下のことが明らかになった。

(1) 1998 年から 2008 年の間に草千里周辺部では山麓部に比して最大で 3.5cm 沈降していた。この沈降を引き起こした変動源は、草千里直下の約 5km の深さに位置し、須藤・他<sup>3)</sup>が求めた位置より約 1.6km 北にずれている。

(2) 2004 年から 2008 年に間にカルデラ内では、最大で 3.5cm 沈降していた。この変動は 1) の変動源および中岳の直下に存在する深部変動源により引き起こされた。

(3) 2004 年から 2008 年に火口から放出された火山ガスがマグマ中で占めていた体積は上下変動量から推定される Mogi ソースでの体積減少量とほぼ同じオーダーである。

## 謝 辞

過去の水準測量に携われた京都大学および国土地理院のスタッフに感謝いたします。変動源における体積減少量と火口からのガス放出量の関係を議論する際には産業技術総合研究所の篠原宏志博士に助言をいただきました。ここに厚く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 菊池茂智・外輝明・山田年広 (1978): 阿蘇火山の精密水準測量(1977 年)について, 阿蘇火山の集中総合観測(第1回 1977)報告, 16-18.
- 2) 菊池茂智・江藤敏治・迫幹雄・外輝明 (1984): 阿蘇火山の精密水準測量(1981 年)および近年のデータのまとめ, 阿蘇火山の集中総合観測(第2回 1981)報告, 22-28.
- 3) 須藤靖明・筒井智樹・中坊真・吉川美由紀・吉川慎・井上寛之(2006): 阿蘇火山の地盤変動とマグマ溜まり-長期間の変動と圧力源の位置-, 火山, 51, 291-309.
- 4) Sudo, T. and Kong, L. (2001): Three-dimensional seismic velocity structure beneath Aso Volcano, Kyushu, Japan. Bull. Volcanol., 63, 326-344.
- 5) 国土地理院(2004): 阿蘇山周辺の地殻変動, 火山噴火予知連絡会会報, 88, 106-110.
- 6) 村上 亮・小沢慎三郎(2004): GPS 連続観測による日本列島上下地殻変動とその意義, 地震2, 57, 209-231.
- 7) 大倉敬宏・及川純(2008): 阿蘇火山における GPS 観測, 日本火山学会 2008 年度秋季大会講演予稿集, 149.
- 8) Mogi, K. (1958): Relations between the eruption of various volcanoes and deformations of the ground surfaces around them, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 36, 99-134.
- 9) Okada, Y. (1992): Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bull. Seism. Soc. Am. , 82, 1018-1040.
- 10) 気象庁(2009):火山活動解説資料(平成 21 年 3 月) 阿蘇山, 1-7.
- 11) Lange, R. A. (1994): The effect of H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> and F on the density and viscosity of silicate melts, Volatiles in magmas, Reviews in Mineralogy, 30, 331-369.