

副本

平成29年(ウ)第62号

債権者 [REDACTED] 外3名

債務者 四国電力株式会社

平成30年1月31日

補充書 (1)

広島高等裁判所第2部 御中

債務者訴訟代理人弁護士 田代 健



同弁護士 松繁 明



同弁護士 川本 賢一



同弁護士 水野 絵里奈



同弁護士 福田 浩



同弁護士 井家 武男



目 次

第 1 はじめに	1
第 2 測地学的手法による火山活動の観測に関する大倉教授の研究結果は信頼性が高いこと	2
第 3 測地学的手法による火山活動の観測により、火山活動の状態を確認することが可能であること	4
1 測地学的手法による火山活動の観測について（大倉（2017）・3頁）	4
2 測量の方法に関する基礎知識について（大倉（2017）・4～10頁）	5
(1) 三角点の測量（2点間の水平方向の距離の測量）	5
(2) 水準測量（2点間の垂直方向の距離の測量）	10
3 火山活動の観測に係るGNSS測量データの利用について	12
(1) GNSS測量の観測結果について（大倉（2017）・10～12頁）	12
(2) 火山活動の観測にGNSS測量の観測結果を利用する際に考慮すべき事項について（大倉（2017）・12～15頁）	14
4 火山活動による地殻変動をもたらすマグマ溜まりのモデリングについて（大倉（2017）・15～19頁）	19
(1) マグマ溜まりのモデリングについて	19
(2) 茂木モデルについて	19
(3) その他のモデル（板状割れ目モデル）	23
第 4 測地学的手法による火山活動の観測を踏まえると阿蘇は大規模なカルデラ噴火が起こるような状態ではないと推定されることに	

について	24
1 阿蘇カルデラの概要 (大倉 (2017) · 20~21頁)	25
2 阿蘇火山における測地学的手法を用いた地殻変動源の研究について (大倉 (2017) · 21~22頁)	27
3 長期間の水準測量データからみた火山活動の見通し (大倉 (2017) · 25~26頁)	29
4 ガス放出とマグマ溜まりの収縮から推定されるマグマ供給率 (大倉 (2017) · 26~27頁)	32
5 結論 (大倉 (2017) · 28頁)	33
第5　まとめ	33

第1 はじめに

原決定は、火山事象の立地評価では、(a)現時点の火山学の知見では検討対象火山の活動の可能性が十分小さいと判断できないため、火山活動の規模と設計対応不可能な火山事象の到達可能性を評価することになるが、(b)検討対象火山の調査結果からは原子力発電所運転期間中に発生する噴火規模もまた推定することはできないとし、(c)検討対象火山の過去最大の噴火規模（本件では阿蘇4噴火）を想定し、これにより設計対応不可能な火山事象が本件発電所に到達する可能性が十分小さいかどうかを評価する必要があるとした（原決定・359頁）。そして、相手方主張の根拠からは、検討対象火山である阿蘇の噴火として過去最大規模の阿蘇4噴火による火碎流が本件発電所の敷地に到達していないと判断することはできないとして、立地不適と結論付け（原決定・362頁），さらには、相手方が影響評価で考慮した降下火碎物の堆積厚さ及び大気中濃度についても過小であるとした（原決定・367頁）。

しかしながら、平成29年12月21日付け保全異議申立書（以下「異議申立書」という。）で述べたとおり、上記判示には、明らかな事実誤認がある。その主たる要因は、「現時点の火山学の知見を前提とした場合に、上記①ないし③の調査（債務者注：①将来の活動可能性を評価する際に用いた調査（文献調査並びに地形・地質調査及び火山学的調査）、②地球物理学的調査、③地球化学的調査）により原子力発電所の上記運用期間中における検討対象火山の活動可能性が十分小さいかどうかを判断できると認めるに足りる証拠はない。」（原決定・350頁）などとして、「本件では、検討対象火山の活動の可能性が十分小さいと判断できない」（原決定・359頁）と認定している点（上記(a)）であり、この認定は、明らかに

現時点の火山学の知見に対する認識を誤っている。

そこで、本書面では、上記認定が明らかに現時点の火山学の知見に対する認識を誤っていることを示すため、阿蘇に常駐して常に阿蘇の状況を観測しており、阿蘇に関する極めて豊富なデータを有する火山物理学¹の権威である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の大倉敬宏教授（以下「大倉教授」という。）による最新の調査研究に基づく報告書「測地学的手法による火山活動の観測について」（以下「大倉（2017）」という。乙438）に基づき、阿蘇は大規模なカルデラ噴火が起こるような状態ではなく、したがって、阿蘇において大規模なカルデラ噴火が起こる可能性は十分小さいと判断できることを明らかにする。

具体的には、以下、第2において、大倉教授が我が国における火山物理学の権威であり、測地学的手法による火山活動の観測に関する同教授の研究結果は信頼性が高いことについて、第3において、測地学的手法による火山活動の観測により、火山活動の状態を確認することが可能であることについて、第4において、測地学的手法による火山活動の観測を踏まえると阿蘇は大規模なカルデラ噴火が起こるような状態ではないと推定されることについてそれぞれ述べる。

なお、本書面で述べる論点も含め、追って、保全異議の具体的理由の詳細を補充することについては、平成30年1月22日付け上申書で述べたとおりである。

第2 測地学的手法による火山活動の観測に関する大倉教授の研究結果は信頼性が高いこと

1 地球物理学の観点から、測地学的、地震学的方法を用いて火山の構造、成因、噴火とのメカニズムを解明しようとする研究分野

- 1 大倉教授は、日本火山学会、日本測地学会等に所属し、日本火山学会の理事、気象庁の火山噴火予知連絡会の火山活動評価検討会委員、原子力規制委員会の原子炉安全専門審査会原子炉火山部会の委員等を務める火山物理学の専門家であり（乙439～442），同分野における我が国の権威である。
- 2 大倉教授は、京都大学教授として、2000年から熊本県阿蘇市に設置された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に常駐して阿蘇の活動を常時観測し、火山物理学に関する研究を行ってきた（乙443）。火山物理学に関する大倉教授の論文や発表内容は多数あり（乙439），以下に代表的なものを示す。
- ① 「Structure of the upper part of the Philippine Sea plate estimated by later phases of upper mantle earthquakes in and around Shikoku, Japan（債務者訳：四国周辺の上部マントルで発生した地震の後続波から推定されるフィリピン海プレートの上部構造）」
Tectonophysics
- ② 「Long-term variation of the shallow tremor sources at Aso Volcano from 1999 to 2003（債務者訳：1999年～2003年の阿蘇火山における浅部の火山性微動の長期変動）」Journal of Volcanology and Geothermal Research
- ③ 「阿蘇火山における重力測定」東京大学地震研究所技術研究報告
- ④ 「Crustal structure beneath Aso Caldera, Southwest Japan, as derived from receiver function analysis（債務者訳：レシーバー関数解析から得られた阿蘇カルデラの地殻構造）」Journal of Volcanology and Geothermal Research

- ⑤ 「Low-velocity zones in the crust beneath Aso caldera, Kyushu, Japan, derived from receiver function analyses (債務者訳：レシーバー関数解析から得られた阿蘇カルデラの地殻における低速度領域)」 Journal of Geophysical Research: Solid Earth
- ⑥ 「Shear wave splitting, V_p/V_s , and GPS during a time of enhanced activity at Aso caldera, Kyushu (債務者訳：阿蘇カルデラにおける火山活動期の S 波スプリッティング, V_p/V_s 及び G P S)」 Journal of Geophysical Research: Solid Earth

3 このように火山物理学の権威である大倉教授が、阿蘇に常駐して収集した阿蘇の活動に関する観測データや既往の研究成果等に基づいて、阿蘇の活動可能性について評価し、カルデラ噴火のような大規模な火山活動が近い将来発生するような状況にはないと見解を示したものが大倉（2017）である。したがって、大倉（2017）は、まさに現時点での火山学（火山物理学）の知見が反映されたものであるし、阿蘇の活動可能性に関する知見として、その信頼性は極めて高い。

第3 測地学的手法による火山活動の観測により、火山活動の状態を確認することが可能であること

- 1 測地学的手法による火山活動の観測について（大倉（2017）・3頁）
測地学とは、地球の形と大きさ及び地球の重力の状態を、物理学の手法を用いてできるだけ精密に求めるための学問とされ、また、把握した地球の様子が時間とともにどのように変化するかを物理学の方法を使って調べることも重要なテーマとなっている。測地学的手法を用いた火山活動の観測の目的は、火山の形、大きさ及び重力の変化をできるだけ精密に求めることである、といえる。

火山の地下にあるマグマ等の物質の移動又は噴火等による地表からの流出により、地表では様々な現象が引き起こされる。そのうち、測地学の観点から重要な現象として、地表面の変形があり、これを地殻変動又は地盤変動と呼ぶ。例えば、火山の地下にあるマグマ溜まりの圧力又は体積が増大すると、火山体の膨張という地殻変動が引き起こされる。逆に火口からマグマや火山ガスが噴出することでマグマ溜まりの圧力又は体積が減少すると、火山体の収縮という地殻変動が引き起こされる。

火山活動に伴うこれらの地殻変動を観測することができれば、マグマ溜まりの場所を推定することやマグマの増減等を捉えることなどが可能となり、火山活動の予測に役立てることができる。

2 測量の方法に関する基礎知識について（大倉（2017）・4～10頁）

地殻変動の観測には、一般的な測量を用いることができる。以下では、一般的に利用されている測量のうち、三角点の測量（2点間の水平方向の距離の測量）及び水準測量（2点間の垂直方向の距離の測量）の具体的な方法について説明する。

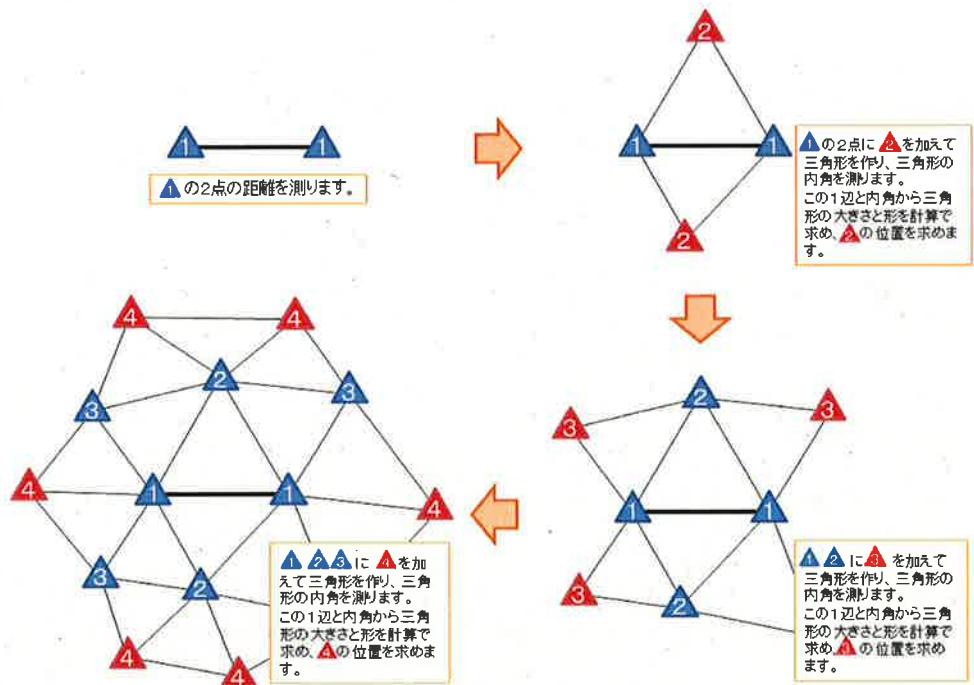
(1) 三角点の測量（2点間の水平方向の距離の測量）

三角点の測量は、水平方向の距離を測量するもので、三角測量、三辺測量、G N S S 測量と進歩してきた。

ア 三角測量

三角測量は、三角形の一辺とその両端の角の大きさを測定することにより、三角形の形を決める測量法である。最初に、3 km～10 km離れた2点間の距離を正確に測る。この2点に別の1点を加えて三角形を作り、三角形の内角を測定し、三角形の形を決定する。三角形は、三角形の内角と長さが判明している1辺から、他の2辺の長さを計算

することができるので、これにより、3辺の長さ及びそれぞれの内角の大きさを知ることができる。そして、さらに別の1点を加えて新しい三角形を作る作業を繰り返すことにより、三角形の網を順次増やし、三角形の各点の位置を求めていく（図1）。



（国土地理院ウェブサイトより）

図1 三角測量概要

イ 三辺測量

三角点の測量には永らく前記アの三角測量が用いられてきたが、1970年代以降は三角点間の距離が光波測量（EDM）により測られるようになった。光波測量とは、遠方に置いた高性能の反射鏡に向けてレーザー光線を発射し、それが反射して戻ってきたところを受信し、鏡までの距離を求めるものである。3辺の長さを求ることでも、三

角形の形を決定することができるので、三角測量は三辺測量に置き換えられている。

ウ G N S S 測量

1980年代に入ると、アメリカ合衆国によって、G P S²が開発された。これは、航空機・船舶等の航法支援用として開発されたシステムであり、上空約2万kmを周回するG P S衛星からの電波を受け、4個以上のG P S衛星からの距離を同時に知ることにより、計算によってG P S受信機の位置等を決定するものである。G P Sやロシアの運用するG L O N A S S、日本の運用する準天頂衛星などを総称して、G N S S³（全球測位衛星システム）という。現在の三角点の測量はG N S S測量に置き換えられている。

G N S Sは、人工衛星から送られてくる電波を受信している地点の位置を測る測量方法であり、走行中の船や自動車、飛行機等の位置を知る手段として発展してきた。もともとG P Sは、米軍が開発した軍事技術であったため意図的な精度劣化措置が加えられていたが、この措置は2000年に解除され、測位の精度が向上した。測量用に使われる装置では、上空の四つ以上の人衛星からの電波を長時間記録し、これを比較するための別の観測点の記録とともに解析して、受信点の精密な位置を割り出す（図2）。数cmの動きはもちろんのこと、条件が良ければ、数mm以下の変動も捉えることができる。

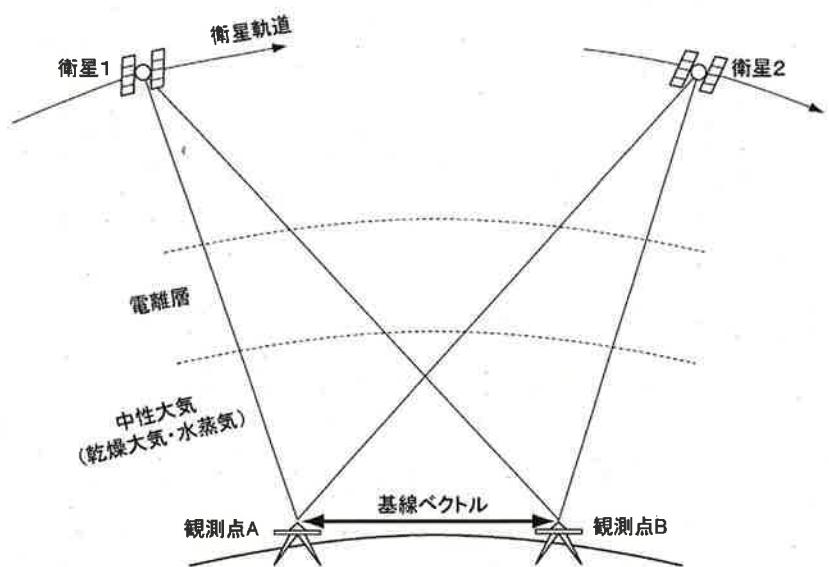
国土地理院によって、測量網の構築と広域の地殻変動の監視を目的

2 Global Positioning System

3 Global Navigation Satellite System

としたGNSS連続観測システムであるGEONET⁴が運用されている。

GNSSの連続観測点は電子基準点と呼ばれ、全国約1300箇所に設置されている。電子基準点には高さ約5mのステンレススピラ（図3）が立てられ、その上部にGNSS衛星からの電波を受けるアンテナ、内部には受信機とデータ通信のための機器などが格納されている。この電子基準点は、およそ20km間隔で設置されており、阿蘇カルデラ（東西18km、南北25km）内には中央火口丘を取り囲む形で3箇所の電子基準点が存在している。全国の電子基準点で取得された観測データは、茨城県つくば市のGEONET中央局に送信され、そこで集積や解析処理が実施される。また、位置情報等は国土地理院のウェブサイトで公開されている。



(日本測地学会「w e b テキスト測地学新装訂版」より)

図 2 GNSS 測量イメージ



(国土地理院ウェブサイトより)

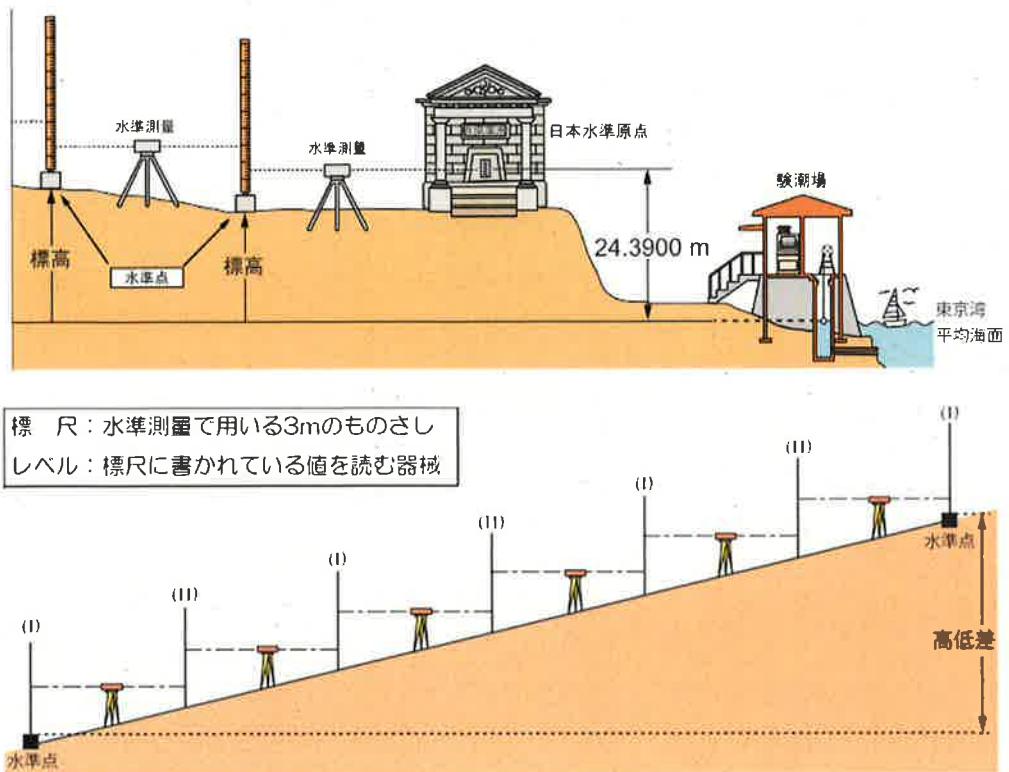
図 3 ステンレスピラー

(2) 水準測量（2点間の垂直方向の距離の測量）

水準点間の高さの差を測るのが水準測量である。水準測量では、少し（数mから2～30m）離れた2地点に正確な目盛りの付いた標尺を立て、中間に水準儀（「レベル」とも呼ばれる。）を置いて、2地点間の高さの差を精密に測る。そして、この作業を積み重ねて行き、遠く離れた地点間の比高（高度の差）を知ることができる（図4及び図5）。

水準測量は古い技術ではあるが、現在でも最も信頼度の高い比高データを得ることができる測量法⁵であるため、よく利用される。また、水準測量は明治時代から実施されているので、現在の測量結果と併せて長期間の地殻変動を捉えるのにも最適である。

5 G N S S 測量でも2地点間の高さの差を測ることはできるが、衛星からの電波が大気中の水蒸気により擾乱を受けるため、高さの決定精度は悪いとされる（大倉（2017）・8頁）。



(国土地理院ウェブサイトより)

図4 水準測量概要



(国土地理院ウェブサイトより)

図5 水準測量作業

3 火山活動の観測に係るG N S S 測量データの利用について

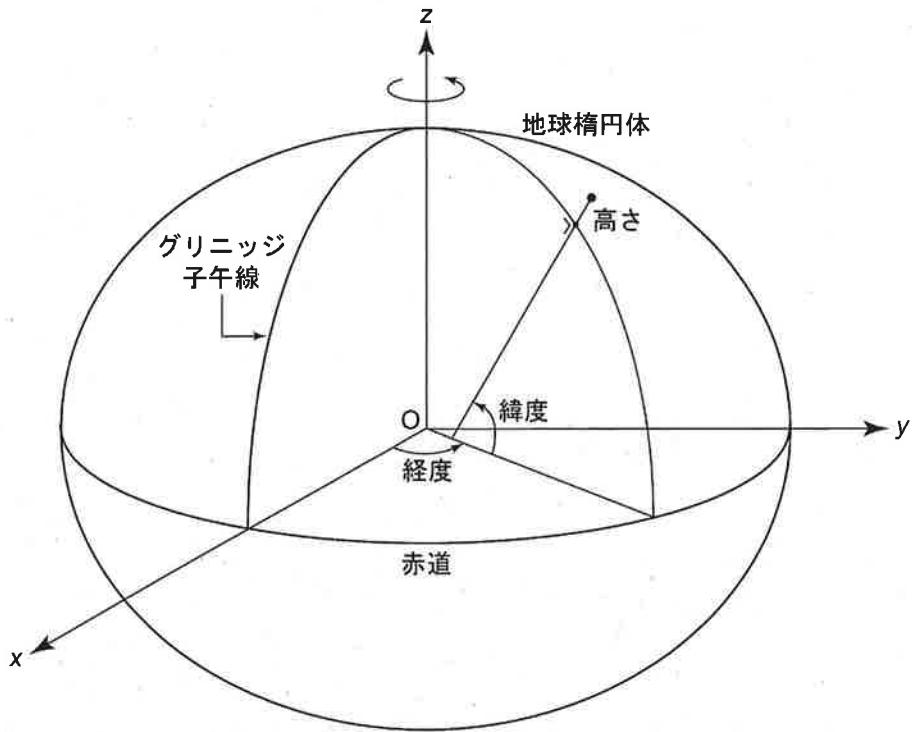
(1) G N S S 測量の観測結果について(大倉(2017)・10~12頁)

G N S S 測量では衛星からの電波を受信して、観測点の位置や観測点間の相対位置が決定される。正確な位置を求めるためには、精密な衛星の軌道情報が必要となる。精密な衛星軌道情報を得るには2週間程度の時間を要するため、G E O N E T が公開する最終解析値も観測のおおよそ2週間後である。それまでの間には、衛星軌道の精度に応じた迅速解析値や速報解析値が公表される。通常、長期的な火山活動の変化による地殻変動を捉えるには最終解析値が利用される。

最終解析値は、電子基準点の日々の座標値として提供される。緯度・経度・高度及び3次元直交座標系⁶(地球の重心を原点とし、z 軸は地球の自転軸に一致させる。x, y 軸は赤道面内にあり、そのうちの x 軸はグリニッジ子午線⁷の方向にとったもの)(図 6)による位置が記述されている。これら座標の時間変化が広い意味での地殻変動に相当する。ただし、この地殻変動には、プレートの移動による変動等も含まれているので注意を要し、そのような地殻変動データの補正については、後記(2)で説明する。

⁶ x 軸y 軸z 軸の3つの座標軸が原点で互いに直交した座標系をいう。

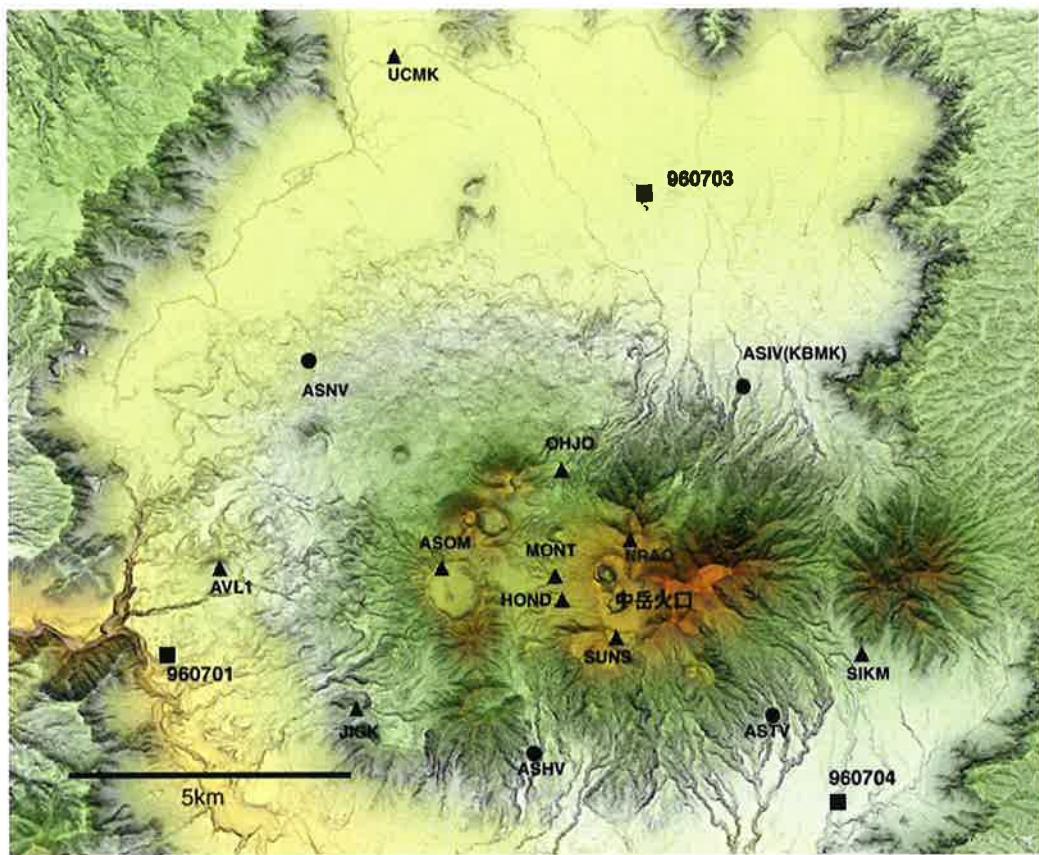
⁷ イギリスのグリニッジ天文台を通る経度0度の経線



(日本測地学会「Webテキスト測地学新装訂版」より)

図6 3次元直交座標系

また、阿蘇では、電子基準点以外にも、気象庁や大学等がG N S S 測量の観測点を設けており、各機関でより詳細な観測結果を利用した研究等が行われている（図7）。



(大倉 (2017)・12頁より)

■: G E O N E T の観測点(電子基準点), ●: 防災科学技術研究所の観測点,
 ▲: 京都大学の観測点。なお、京都大学の観測点は、G P S の電波のみを受信
 するG P S 観測点。これ以外に気象庁も観測点を設けている。

図7 阿蘇火山周辺のG N S S 観測点分布図

(2) 火山活動の観測にG N S S 測量の観測結果を利用する際に考慮すべき事項について (大倉 (2017)・12~15頁)

G N S S 測量の観測結果で得られるデータは、電子基準点等の座標値であり、その座標値は、地殻変動等の要因により変動する。

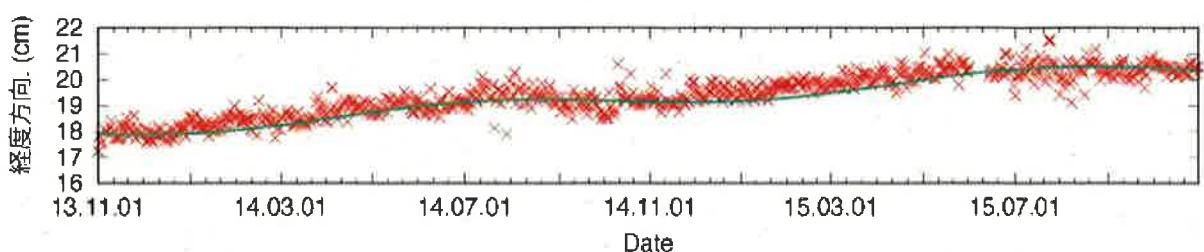
2つの電子基準点間の距離(基線長)の時間変化をグラフにすると、地表の膨張又は収縮の地殻変動があれば、それがグラフの傾きや時間変

化として検出される。地殻変動等の要因は、マグマ溜まりの膨張等の火山活動に起因するもの以外にも存在するが、火山活動に起因するもの以外の地殻変動要因を除いたとしても、なお、グラフの傾きや時間変化があるならば、それが火山活動によるものと推察できる。

火山活動に起因するもの以外の地殻変動には、主として以下のようないくつかの要因が考えられる。

ア 年周変動

日々の座標値の時系列には、衛星から発せられた電波が大気圏を通過する際に遅延することに伴う誤差が、季節変動として現れる。これを年周変動という。年周変動は1年や半年の周期を持つ。精密な地殻変動を求める場合には、日座標値の時系列に1年及び半年の正弦波(図8の緑色の曲線)を重ね合わせ、その分を差し引くことでデータを補正する。



(大倉(2017)・13頁より)

2013年11月1日～2015年10月31日の2年間分のGEONET
960701の経度の時間変化に正弦波(緑色の曲線)をちょうど重なるよ
うに記した例。年周変動が1年又は半年の周期の波であるため、このような
年周変動分の正弦波を誤差として差し引く。

図8 GEONET 960701の経度の時間変化

イ 日本列島の定常的な地殻変動

日本列島は、四つのプレート（太平洋プレート、フィリピン海プレート、北アメリカプレート及びユーラシアプレート）の境界域に位置し、活発な地殻変動がみられる。2011年以前、日本列島の大部分では、東西方向の縮みが観測されており、この縮みは太平洋プレートの沈み込みによると考えられていた。この縮みの量は、1年で、1m当たり 1×10^{-7} m（すなわち100km離れた2地点間が年間1cm縮む）程度であり、長期間のデータを扱う場合や長距離離れた観測点間の地殻変動を議論する場合には、特に補正が必要である。

また、九州から沖縄にかけては、沖縄トラフの拡大によるものと考えられる地殻変動が見られる。九州南部のこの変動量は、緯度と経度との関係から求めることが可能であり、それを日座標値の時系列から差し引くなどの補正方法を用いる。

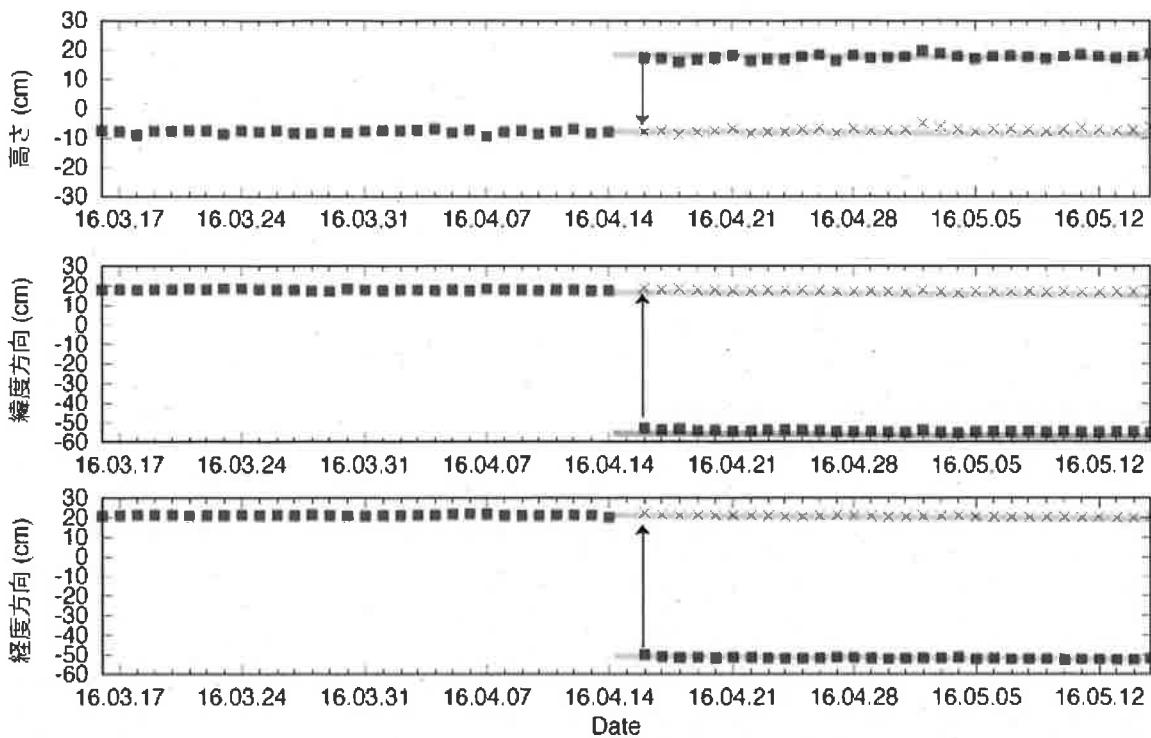
ウ 地震による地殻変動

地震は急激な断層運動により発生する。地下で生じた断層面のずれにより、地表では地殻変動が生じる。この変動は、電子基準点の日座標値の時系列に、ステップ⁸として現れることが多い。地下で断層が動いたときの地表での地殻変動は、モデル計算で求めることが可能なので、それで求めたステップ値を補正して時系列を描く。または、データ処理の時点でステップ除去を行う（地震前後10日間の平均値を差し引くなどの処理を施す。）（図9）。

太平洋プレートやフィリピン海プレートの沈み込む場所では、スロースリップ⁹と呼ばれる地震が発生することがある。この地震は数日から数か月の時間を掛けて断層面がずれることにより発生する。こうした地震の断層の位置や断層でのズレの量、スロースリップが発生している期間などは、震源域に近い観測点データを解析して求められる。そこで明らかになった断層の大きさとズレの量から、火山地域での地殻変動を計算することは可能であり、スロースリップの断層が火山に近い場合、火山活動の変化による地殻変動を捉えるには、スロースリップによる地殻変動の影響を評価することが必要である。

8 ここでは、時系列上の値が急激に変動して現れる、値の段差（図9参照）のことを指す。

9 通常の地震と異なり、ゆっくりと断層が動いて地震波を放射せずに歪みエネルギーを解放する現象



(大倉 (2017)・14頁より)

図9 GEONET 960701の座標に対する

2016年熊本地震によるステップの除去

工 地震の余効変動

規模の大きな地震が発生した後、余効変動と呼ばれる地殻変動が観測される場合がある。2011年の東北地方太平洋沖地震による余効変動は2017年5月現在でも東日本の広い範囲で観測されている。

これらの変動はステップではなく、ゆっくりとした変動なので、火山性の地殻変動との区別が困難な場合がある。余効変動には、断層面上でゆっくりとした滑りが生じたもの（余効滑り）と地殻やマントル

の粘弾性¹⁰変形により生じるもののが2種類がある。火山活動による地殻変動を取り扱う場合には、余効変動の影響を差し引いた解析が必要になるが、いずれの余効変動も断層モデルや地殻物質の粘弾性を取り入れた変形モデルにより計算可能である。

4 火山活動による地殻変動をもたらすマグマ溜まりのモデリングについて (大倉(2017)・15~19頁)

(1) マグマ溜まりのモデリングについて

前記2のような測地学的手法による観測で分かることは、火山活動による地表の膨張又は収縮の地殻変動である。この地殻変動のデータを基に、その地殻変動をもたらすマグマ溜まりが、どのような形でどのような深さに存在しているかを、数値解析を行うことでモデル化することができる。

また、マグマ溜まりがモデル化されており、その位置に変化がなければ、地殻変動のデータだけからマグマ溜まりにおける体積の変化量を推定することができる。

(2) 茂木モデルについて

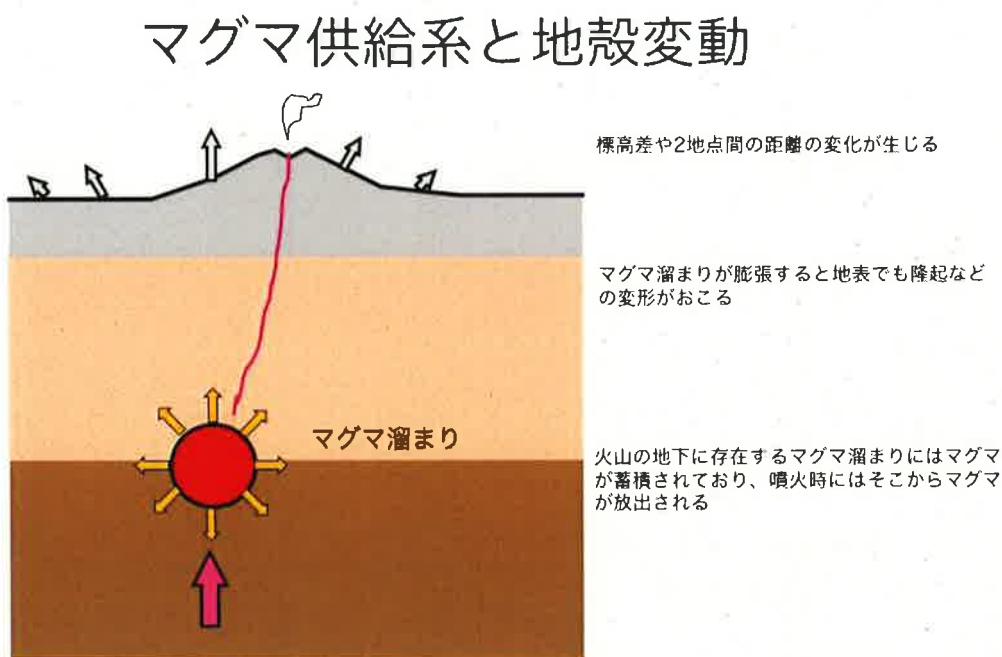
ア 茂木モデル（球状圧力源モデル）について

同心円状の隆起や沈降が噴火前後の火山でしばしば観測されることから、隆起や沈降の変動源が球状のマグマ溜まりであることが推測される。この球状圧力源モデルは茂木モデルと呼ばれ、計算の簡単さと

10 弾性とは、加えられた力に比例して変形(伸びや縮み)が生じ、力を取り除くと元の形に戻る性質のことであり、粘性とは、力を加えている間は変形が増大し、力を取り除いても元に戻らない性質である。そして、両者を合わせた性質を粘弾性といい、物体に外力を与えると時間経過に伴って変形し、外力を除くと原形付近まで回復してひずみが残る性質をいう。

実際の火山活動に伴う地殻変動をよく表現できることから、最も多くの火山に適用してきた。

Mogi (1958)¹¹は、火山で観測された地殻変動データに球状圧力源モデルを適用し、桜島など幾つかの火山について圧力源（マグマ溜まり）の深さを推定した。



(大倉 (2017)・16頁より)

図10 マグマ供給系の概念図

茂木モデルでは、垂直方向の地殻変動量は、マグマ溜まり直上で最大となり、マグマ溜まりから遠ざかるにつれて小さくなっていく。

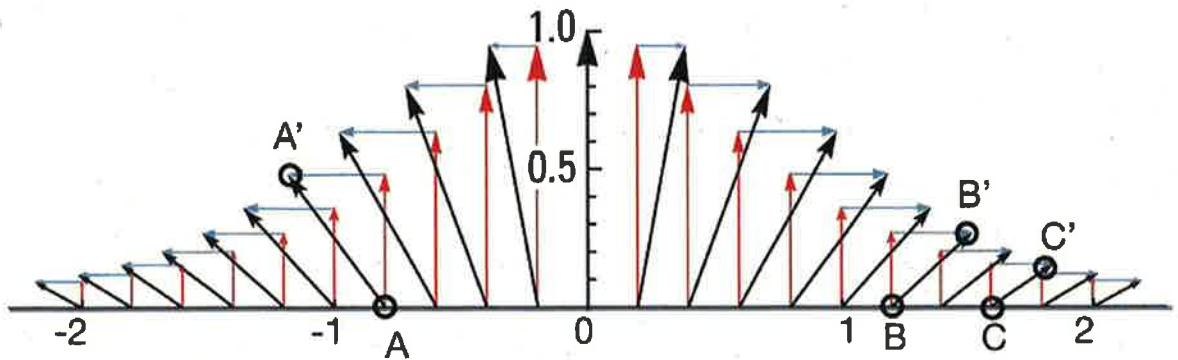
11 「Relation between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surface around them」 Mogi, K., Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, 36, 99-134.

また、マグマ溜まりの存在する場所が2倍深くなれば、直上の垂直方向の変動量は4分の1になる一方、広い範囲になだらかな変動を生みます。

一方、水平方向の地殻変動量は、マグマ溜まり直上では0であり、マグマ溜まり直上から離れるにつれて大きくなり、マグマ溜まり中心からマグマ溜まりの深さの約70%離れたところで最大となり、それより遠い場所では次第に小さくなっていく（図11）。

マグマ溜まりの直上を挟んでGNSS観測点が設置されている場合、マグマ溜まりから遠い観測点と比べると、マグマ溜まりに近い観測点は隆起する。また、マグマ溜まりの膨張あるいは圧力増加により、基線長が伸びることになる。ただし、マグマ溜まりの直上を挟まない基線の場合は、マグマ溜まりが膨張しているにもかかわらず、基線長が短縮する場合があるので注意を要する。

具体的には図11に示すとおりである。横軸はマグマ溜まりの深さを1とした時の距離であり、マグマ溜まり直上を原点とする直線上での変位を表している。球状のマグマ溜まりが膨張することによりA, B, CはそれぞれA', B', C'に変位する。AB間やAC間の長さはそれぞれA' B'間とA' C'間となり、距離が伸びるが、BC間の長さはB' C'間となり、縮む。



(大倉(2017)・17頁より)

図11 マグマ溜まりを挟んだ基線における変動の様子

イ 茂木モデルを用いた、マグマ溜まりの位置及び体積の変化量の推定

茂木モデルでは、変動源と観測点の位置関係及び体積変化量で、上下及び水平の地殻変動量が決まる。そこで、変動源の座標と体積変化量を少しずつ変えて地殻変動量を計算し、観測された変動量を説明できる変動源の位置と体積変化量を求める作業を行い、変動源の位置を決定する。こうして決定された位置にマグマ溜まりが存在すると推定される。一旦決定されたマグマ溜まりの位置がその後に変化しなければ、基線長や比高の変化量だけからマグマ溜まりにおける体積の変化量を推定することができる。

なお、茂木モデルを用いた計算で把握できるのは、マグマ溜まりの「体積変化量」又は「体積と圧力変化量の積」のいずれかであり、マグマ溜まりの総体積を求めることはできない。

マグマ溜まりの直上の点を挟んでGNSS観測点が設置されている場合、基線長の伸びはマグマ溜まりの体積増加に、基線長の縮みは体積減少にそれぞれ対応する。基線長に変化のない場合は体積変化がな

いということを表す。

すなわち、火山体地下のマグマ溜まりへ深部からマグマが供給される場合や、マグマ溜まり内部の物理化学的な変化によってマグマ溜まりの圧力が増大する場合には、基線長の伸びが観測される。一方、マグマが地表へ噴出し、かつ地下深部からのマグマの供給が途絶えると、基線長の縮みが観測される。

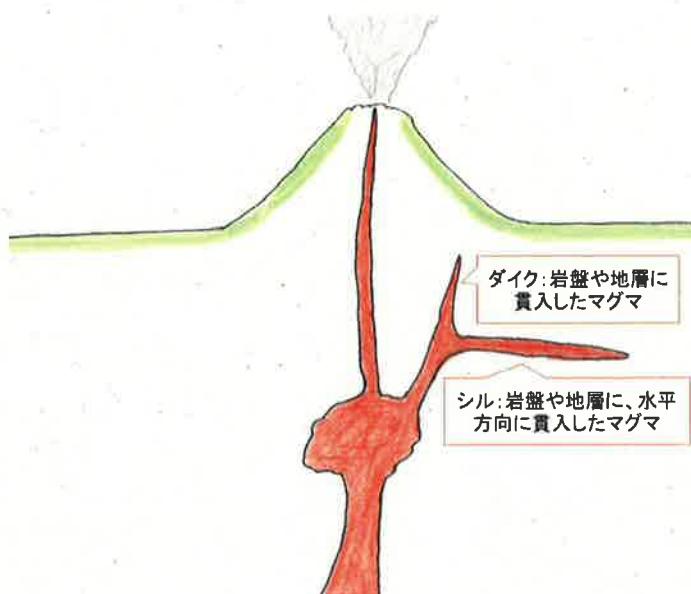
このように、マグマの体積変化により基線長の変化が引き起こされたり、体積変化量は、マグマ溜まりにおけるマグマの収支バランス（マグマ溜まりから放出されるマグマとマグマ溜まりに注入されるマグマの差）により変化する。マグマが地表へ噴出する場合でも、地下深部からのマグマ供給量が噴出量より多ければ、マグマ溜まりの体積は増え、基線長の伸びが観測される。また、マグマは火山ガス¹²の放出によっても消費されるので、マグマが噴出していなくても、二酸化硫黄（SO₂）や水蒸気（H₂O）等が盛んに放出されている場合はマグマ溜まりの体積が減少し、基線長の短縮が観測される場合がある。

基線長の変化だけでなく、水準測量などの上下変動の観測によってもマグマ溜まりの体積変化（又は圧力変化）を捉えることができる。マグマ溜まりの体積変化により、マグマ溜まりに近い観測点と別の観測点の標高差が変化する。マグマ溜まり側の隆起がマグマ溜まりの体積増加に、沈降が体積減少にそれぞれ対応する。

(3) その他のモデル（板状割れ目モデル）

12 マグマに含まれる水蒸気、二酸化硫黄、二酸化炭素等が、火口より気体となって放出されたもの。例えば、静穏期の阿蘇火山では、水蒸気と二酸化炭素が、年間約150万トン放出されている。

同心円状の変動とは異なる代表的な例として、板状の割れ目のふくらみ（開口）と縮み（閉口）がある。鉛直に立った地下の割れ目が口を開く場合、割れ目の横腹が押し広げられて大きく変動し、その影響が左右の地表の隆起となって表れている。その反面、割れ目の真上付近の地表では沈降が生じ、地表で観測される水平の動きもやや複雑な動きを示す。このように立った割れ目は「ダイク」と呼ばれ（図12）、マグマ貫入時の変動パターンが鉛直割れ目のふくらみで説明できる場合が多い。一方、水平な割れ目を生じて、地層の中にマグマが入り込むものは「シル」と呼ばれ（図12）、この場合、大きな変形は直上付近の比較的狭い範囲に限られる。



（大倉（2017）・19頁より）

図12 ダイク及びシルのイメージ

第4 測地学的手法による火山活動の観測を踏まえると阿蘇は大規模なカルデラ噴火が起こるような状態ではないと推定されることについて

上記のとおり、G N S S 測量等を用いることで、火山活動による地殻変動を把握することができ、その地殻変動による基線長、比高の変化を観測することにより、マグマ溜まりの深さやマグマの供給量等を推察することが可能である。

阿蘇カルデラ内では、複数の機関によって多数の観測点が設けられ、阿蘇カルデラ内の全域にわたる観測が行われている（図7参照）。大倉教授は、大倉（2017）において、これら観測点を用いた測地学的研究によって得られた阿蘇カルデラ内の地殻変動データと地下構造等に関する既往の知見及び自らの長年にわたる調査研究の成果とを合せて総合的に検討し、阿蘇は大規模なカルデラ噴火が起こるような状態ではないと推定している。

以下では、測地学的手法を用いて得られる阿蘇の火山活動に関する知見について具体的に説明する。

1 阿蘇カルデラの概要（大倉（2017）・20～21頁）

阿蘇カルデラは、東西約18km、南北約25km、その面積は約350km²に達し、カルデラ内には5万人が暮らす世界でも有数の規模のカルデラであり、カルデラ内には、主峰の高岳や中岳など十数座の中央火口丘¹³がほぼ東西方向に配列する。このうち、中岳だけが有史以降も噴火を繰り返している。

阿蘇カルデラでは、27万年前から9万年前にかけて4回（27万年前、14万年前、12万年前、9万年前）の巨大噴火が発生した。現在のカルデラは、約9万年前の巨大噴火で形成されたもので、この噴火で噴出した火碎流は阿蘇4火碎流と呼ばれており、カルデラの周囲の広大な火碎流台

13 大きな火口やカルデラの内側に後から生成された比較的小規模の火山

地を発達させた。この噴火で消費されたマグマの体積は、少なくとも 200 km^3 と見積もられており、噴火規模は日本で過去10万年間に発生したもののなかで最大である。

9万年前の巨大噴火のあとに中央火口丘が形成された。その間、約1万年前までにV E I¹⁴ 4以上の噴火が20回以上発生したが、そのうち、最大規模の噴火は、草千里ヶ浜軽石を噴出した噴火であり、その規模はV E I 5である（乙444（207頁））。

中央火口丘では、約2万年前に中岳の古期山体が形成された後、最近1万3000年間は中岳からの灰噴火を主体とする穏やかな火山活動が継続している。しかし、約8000年前や約5000年前の新期中岳山体形成に伴う溶岩流出や、約3000年前から約4000年前の中央火口丘北西山麓での噴火活動（杵島岳、米塚）など、時折、活発な火山活動も発生していた。中岳からの噴出物の化学組成は、北西山麓からの噴出物のものとほぼ同じものであり、同一のマグマ溜まりからの噴出物である可能性がある。これらのマグマは、鉄やマグネシウムの含有率の高い玄武岩～安山岩質玄武岩質のマグマであり、カルデラ噴火を引き起こす珪長質のマグマではない。

中岳火口は、合計7個の火口が南北に連なる長径1100mの複合火口で、近年は北端の第1火口のみが活動している。第1火口は、非活動期には「湯だまり」と呼ばれる火口湖が形成され、活動期には湯だまりが消失して火山灰を放出するとともに、スコリア¹⁵の噴出を伴うストロンボリ式

14 火山爆発指數（Volcanic Explosivity Index）。噴出物量に応じて「0」（噴出物量が $1 \times 10^{-5}\text{ km}^3$ ）から「8」（ $1 \times 10^3\text{ km}^3$ 以上）までの数字で分類する（乙339（8～10頁））。

15 火山噴出物の一種で、主に玄武岩質のマグマが地上に噴出した際、内包していた水蒸気

噴火¹⁶も発生し、活動末期には激しい水蒸気噴火やマグマ水蒸気噴火を起こすこともある。非活動期から湯だまりが消失した後に、マグマ噴火主体の活動期になり、水蒸気爆発を経て再び非活動期になるというサイクルは10年～20年の間隔で繰り返されてきた。

2 阿蘇火山における測地学的手法を用いた地殻変動源の研究について（大倉（2017）・21～22頁）

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。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。また、地震波トモグラフィー¹⁷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¹⁸が存在することが明らかにされており、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。

一方、2003年には、G E O N E Tによりカルデラ中央部が盛り上がる地殻変動が捉えられた。その変動源の深さは約15kmであり、上記の従

などの揮発成分が発砲することによって多孔質になった岩石

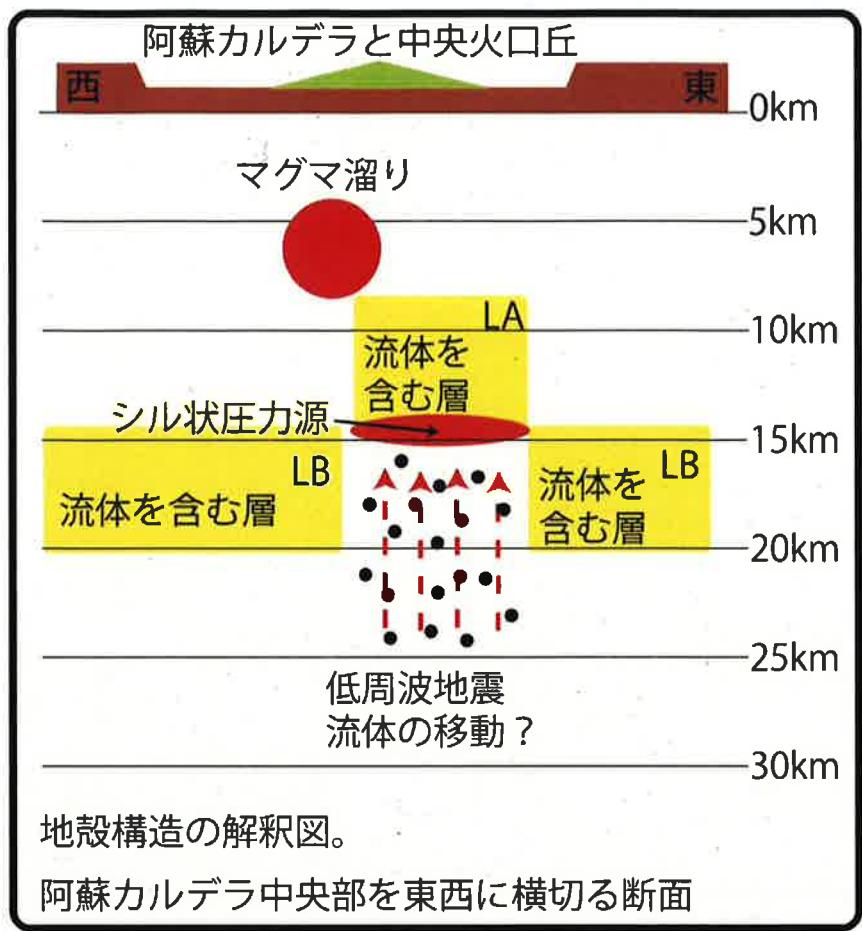
16 比較的粘性の低い玄武岩質のマグマが噴出される際に、間欠的に爆発を繰り返し、火口からはマグマの破片や火山弾などを吹き上げる噴火形式

17 伝播速度の構造を求める手法。地震波は、マグマや熱水が含まれる岩石の中を通るときは、速度が遅くなる（低速度領域）。この手法により、地球内部の波の伝播速度構造を3次元的に把握することで低速度領域を把握可能することが可能である。

18 大倉（2017）の注釈5（21頁）では、「低速度領域に「マグマが存在すると推察できる」との記載があるが、「低速度領域=マグマ溜まり」であることを意味するものではない。低速度領域は、岩石が部分的に溶融している領域や岩石の中に熱水が含まれる場合でも検出されることから、必ずしも低速度領域全体がマグマ溜まりに対応するものではないし、必ずマグマが含まれているとも限らない。このことは、大倉（2017）においても、低速度領域に「溶融しているマグマあるいは熱水が含まれる領域」とされ、また、「仮に熱水ではなく全て溶融しているマグマだったとしても、その量は、・・・15%程度・・・の領域である」との記載があること（大倉（2017）（21頁））からも明らかである。

前の研究から把握されていた変動源とは別に、有意に深い変動源が存在することが明らかになった。

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、その変動源の一つの位置は2003年の変動源(深さ約15km)の位置とほぼ一致する。また、地中を経由して届いた地震波を数値解析すること(レシーバー関数解析)により決定された地下のS波(地震波の一種で、波の進行方向に対して垂直の方向に変位する波)の速度構造によれば、この変動源の直上の位置に水平サイズ 5×5 kmの低速度領域が存在することが明らかになった。この低速度領域(300km³)は、溶融しているマグマ又は熱水が含まれる領域である。仮に、この低速度領域に含まれているマグマ又は熱水が、全て熱水ではなく溶融しているマグマと想定すると、その体積は、低速度領域の全体積のうちの15%程度(45km³)であると計算される(大倉(2017)・21頁)。これらの研究結果から、阿蘇カルデラの地下構造を模式図にすると、図13のようになる。



(大倉 (2017)・22頁より)

マグマ溜まりの位置は地震波トモグラフィーの結果から、またLAやLBなどで示した低速度領域はレシーバー関数解析により求められた。

図13 阿蘇カルデラ中央部を東西に横切る断面での地殻構造の模式図

3 長期間の水準測量データからみた火山活動の見通し(大倉(2017)・25~26頁)

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(1963年~2012年の水準測量の結果を図14に示す。)。その路線¹⁹(図14の右図のAVL1から同14

19 水準測量を行った道筋

までの道筋)は深部変動源(地下6kmのマグマ溜まり)のほぼ真上にあるので、その変動によって路線全体が上下する。したがって、路線内のAVL1を不動とするプロットでは、草千里下のマグマ溜まりの影響のみを見ることができる。

図15は草千里周辺の水準点のAVL1との標高差の時間変化である。測量開始以来、水準点が固定されているのはAVL1とAVL13のみであり、途中の1958年に改埋されたAVL11、同14のデータは補完して図示してある。この図から、測量開始直後は現在に比べて草千里側が10cm以上高かったことが分かる²⁰。

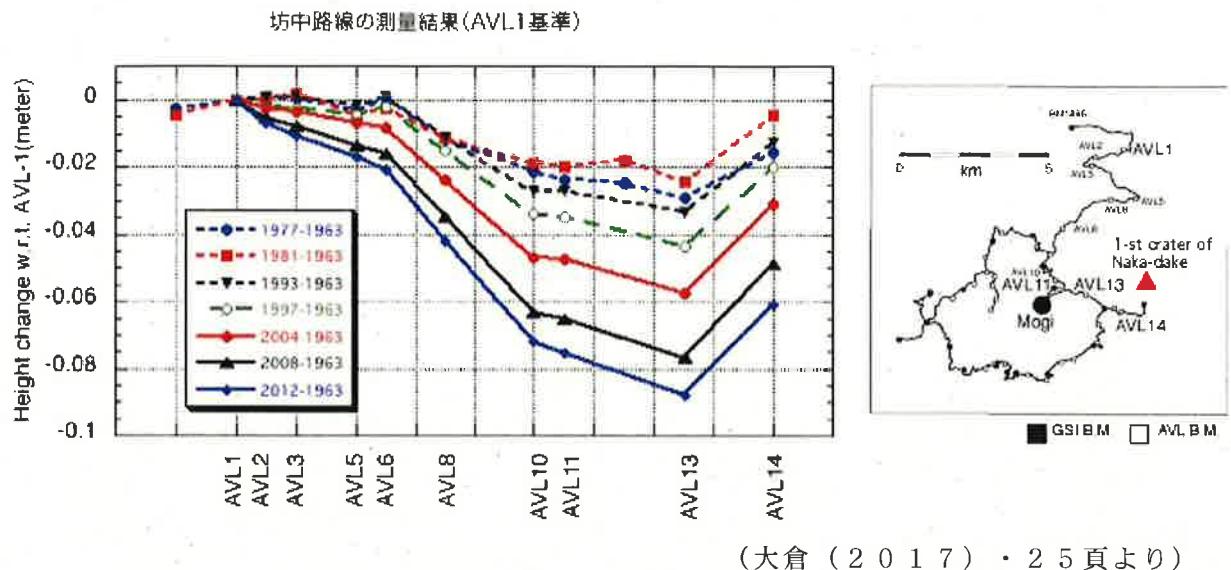
これは草千里下のマグマ溜まりが現在よりも1000万m³多ければ説明可能であり、噴火活動が活発だった1930～1950年代はマグマ溜まりへの供給レートが大きかったことが推定される。2012年以降水準測量は行われていないが、草千里のGPS観測点と阿蘇谷のGPS観測点(図7のASOMと960703)の高度差を代わりに使用することが可能であり、GPS観測点が設置された2004年以降の高度差も併せてこの図に示されている。

これを見ても、2017年現在の標高差は1930年代と比べると10cm以上低く、現在のマグマ総量は、1930年代と比べて1000万m³少ないことが推測される。

このことは、今後の火山活動を予測する上で重要であり、現在の地殻変動量を考慮すると、今後の火山活動は1930年代のような大規模なもの

20 図15を見ると、最初のプロット(一番左端のプロット)がある測量開始直後(1930年代の後半)の水準を0.00mとすると、2012年現在(一番右端のプロット)の水準は、-0.10mを下回っていることが読み取れるので、測量開始直後は、現在と比べて草千里側が10cm以上高かったことが分かる。

ではなく、ましてや大規模なカルデラ噴火が起こるような状態ではないと推定される。



A V L 1 1 など草千里に近い水準点で顕著な沈降が観測された。この沈降を引き起こす変動源が地図上に M o g i として記されている。その深さはおよそ 6 km である。

図 1-4 阿蘇火山の北登山道路沿いの水準測量結果(1963年～2012年)

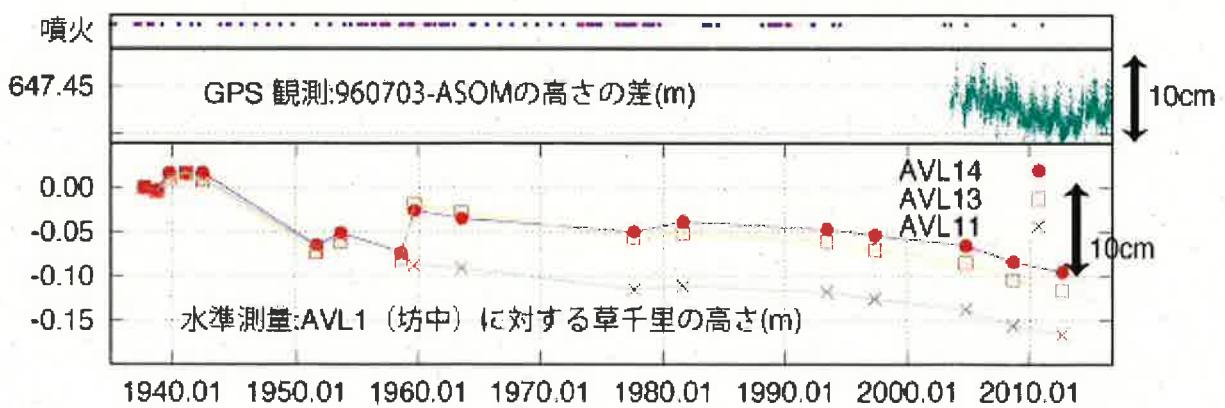


図 1-5 阿蘇における水準測量データ

4 ガス放出とマグマ溜まりの収縮から推定されるマグマ供給率（大倉（2017）・26～27頁）

草千里の下のマグマ溜まりの収縮量は、以下のとおり、ガスの放出によって説明できる。

リモートセンシング技術²¹により測定された阿蘇中岳第一火口からの二酸化硫黄（SO₂）放出量は、およそ300トン／日である。また、中岳第一火口の高温噴気中のガスのモル比²²がH₂O:SO₂=50:1であることから、これを重量比に換算するとH₂O:SO₂=14:1となる。すなわち、中岳第一火口からのH₂Oの放出質量はSO₂の14倍であり、4200トン／日=150万トン／年となる。一方、マグマ中のH₂Oのモル体積²³が1.2～2.2cm³/molであることから、マグマ中のH₂Oは1g当たり0.67～1.29cm³すなわち1トン当たりでは0.67～1.29m³の体積を占める。

したがって、150万トンのH₂Oの放出により、体積にして100万～200万m³（0.001～0.002km³）のマグマが消費されることになる。

水準測量による上下変動量から推定された2004年～2008年の1年当たりの体積減少量は、およそ75万m³（0.00075km³）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。このことは、この差を補う分のマグマが地下深部から供

21 物を触らずに調べる技術のこと

22 化学物質の分子の個数を数えるときの単位（mol）。1モルは、分子が 6.02×10^{23} 個あることをいう。モル比とは、分子の個数の比率であり、H₂O:SO₂=50:1であれば、二酸化硫黄（SO₂）分子1個に対して、水（水蒸気）（H₂O）分子が50個の割合で存在することをいう。

23 物質の1モルあたりの体積

給されていることを示唆している。ただし、その量は25万～125万m³/年(0.00025～0.00125km³/年)程度である。

5 結論(大倉(2017)・28頁)

阿蘇カルデラの地下約6km付近にはマグマ溜まりが存在し、また地下約15kmにもマグマ溜まりと考えられる変動源が存在する(前記2)。地下約15kmに存在する変動源は、水又は溶融したマグマの存在する領域の底部に当たるものであり、最大45km³程度のマグマの、その一部分が存在しているのみであろうと考えられる。また、地下約6km付近のマグマ溜まりは全体として縮小傾向にあり、長期間の水準測量データを踏まえると、1930年代と比べて約1000万m³(0.01km³)少なくなっている(前記3)，その縮小の理由は、火山ガスの放出によるものであることが分かる(前記4)。

これらのことから、今後の阿蘇の火山活動は、1930年代のような大規模なもの²⁴ではなく、ましてや大規模なカルデラ噴火が起こるような状態ではないと推定される。

第5 まとめ

以上述べたとおり、大倉(2017)は、阿蘇に常駐し、阿蘇に関する極めて豊富なデータを有する大倉教授の最新の調査研究の成果であり、信頼性の高い知見であり、その大倉(2017)において、今後の阿蘇の火山活動は、1930年代のような大規模なものではなく、ましてや大規模なカルデラ噴火が起こるような状態ではないと推定されるとしているので

24 1930年代の阿蘇は、噴火活動が活発で、毎年のように噴火が発生している。そのうち、最も活動が活発だった1933年2月～3月(乙445(137頁))における火山灰等の噴出量は0.0127km³とされ、噴火の規模はVEI3とされている(乙446)。

あるから、阿蘇については大規模なカルデラ噴火が起こる可能性は十分小さいといえる。にもかかわらず、全ての検討対象火山を一律に、現在の火山学の知見を前提にする限り、検討対象火山の活動の可能性が十分小さいと判断できないとする原決定の認定が誤りであることは明らかである。

そして、債務者の阿蘇の活動性についての評価は、大倉（2017）の知見と整合するものであるから、最新の科学的知見に照らして合理的であるといえる。

したがって、異議申立書で述べたとおり、原決定は、事実誤認に基づいてなされたものであり、この事実誤認が原決定の結論に影響を及ぼしたことは明らかであるから、速やかに取り消されるべきである。

以上