

ハイブリッド重力観測から見た，2000 年三宅島火山活動・伊豆諸島群発地震活動

大久保修平

1. はじめに

2000 年 6 月 26 日に三宅島の火山活動は始まった。この活動に先立つ過去 3 回の噴火(1940 年, 1962 年, 1983 年)が 21 年程度の規則的な間隔で生じているので，多くの研究者は「そろそろ」と考え，今回の噴火に備えるべく観測態勢を整備してきた。例えば，防災科学技術研究所のポアホール傾斜計連続観測や，国土地理院による GPS 連続観測の地殻変動観測の充実はずばらしく，これらの準リアルタイム・データは，2000 年火山活動が始まった初期の推移予測に大きな貢献をした。これらのデータについての解説は岡田(2000)に詳しく述べられているように，リアルタイム監視の威力が十二分に発揮されたものといえる。

しかしどんな観測であっても，それだけで全てがわかるというものではない。地震観測や地殻変動観測は地下の「力源」の推定に威力を発揮するけれども，「源(ソース)」の物性の推定には無力であることが多い。たとえば火山体の膨張をとらえる地殻変動データがあったとしよう。このデータを茂木モデルで説明する場合，力源の強さや向きは推定できても，それがマグマの発泡によるガス圧の上昇によるものなのか，それとも溶融した液状マグマの充填によるものかは区別ができない。両者は力源としては等価だから，地表変位およびその微分量を見ている限り，区別ができないのである。他方，電磁気や重力は，比抵抗や密度などに敏感な測定であるので，地殻変動観測からは得られないソースの「物性」に関する貴重な情報を与えてくれる。地震研究所の重力グループも 1998 年ごろから三宅島での観測態勢を整えていた。

本稿では，(1)火山活動状況，(2)現場での観測実施状況，及び(3)重力観測を通じて明らかになった事実について述べることにしたい。そこから，火山活動にともなう物質移動(マグマ等の流体移動)と地震の発生メカニズムについて，何らかの知見を得られれば幸いである。

2. 火山活動の経過 - きわめて特異な現象

過去の噴火はいずれも一週間程度の短期間の側噴火を行なった後にすみやかに終息している。したがって，今回の活動も早期に終息すると誰もが考えていた。実際，地震活動が開始した翌日の 6 月 27 日以降，震源は三宅島の西方にどんどんと遠ざかっていき，火山活動はシナリオどおりに早期に終息に向うかに見えたのである。この状況を受けて，6 月 29 日に火山噴火予知連絡会から終息宣言に近いコメント(臨時火山情報第 8 号)が発表された。多くの研究者は格別の違和感をもたずに，これを受け止めたのではないだろうか？例えば，筆者らのグループが絶対重力計を三宅島に送って観測を始めようとした 6 月 30 日には，「三宅の活動はもう，終わったんじゃないの(今ごろ行って，どうするの?)」と二人の著名な教授にひやかされていることも，その裏づけになるかもしれない。

ところが現実には，三宅島の活動が短期に終息するという予想は大きく裏切られ，本稿執筆中の 2001 年 3 月現在もなお火山活動は継続中である。この火山活動は，中田(2001)にしたがって 4 つの活動期に分けるのが妥当と思われる。最初のマグマ貫入期(2000 年 6 月 26 日-7 月 8 日)には，三宅島西方海域でのマグマ貫入にともなう海底噴火が生じている。ダイクの貫入によって生じる地殻変動も観測されている。2 番目の陥没期(2000 年 7 月 8 日-8 月上旬)は，小規模の水蒸気爆発を繰返しつつ，山頂カルデラの陥没が進行した時期である。3 番目の爆発期(2000 年 8 月中旬-8 月下旬)は，50cm 径の噴石を山頂から数キロ離れた人家まで飛ばすような大規模な爆発が発生したり，低温火砕流が流れ下ったりした時期である。最後の脱ガス期(2000 年 9 月以降)には，日量数万トンの二酸化硫黄が放出されている。以上の第 1 期および第 3 期の活動は，他の火山でも見られることであるのに対して，第 2 期と第 4 期のそれは，以下の点できわめて「特異」である。

- 1) 溶岩・火山灰などの噴出物がわずかししか放出されていないのに，直径 1500m もの巨大な山頂カルデラが形成されたこと。量的な比を考えれば，噴出物の体積(1000 万立米)に対する，山頂の陥没量(6 億立米)は 60 倍にもなっている。これは世界の火山活動全体からみても稀有の事例

である．陥没で失われた物質はどこへ行ったのだろうか？

- 2) 三宅島の山体サイズ (5-10km) に比して、15-35km と遠方に位置する神津島・新島・式根島海域で、2000年7月-8月に激しい群発地震活動が生じたこと．地震活動と火山活動とを結びつける要素は何なのだろうか？
- 3) 一日当たり 30000 トン程度の二酸化硫黄の放出を 2000年9月以降、2001年3月現在まで続けている．一日当たりの放出量が世界記録並であるばかりでなく、それが6ヶ月以上も継続することも、世界的にみて稀有の事例である．かくも長期に大量の火山ガスの放出が継続可能となるには、どのようなメカニズムがはたらいっているのだろうか？

これらの特異な現象に付随する数々の疑問に対し、従来とは一味違った重力観測を通じて、その一部なりとも解明することを目指す．

3．重力観測の概要

3.1 重力観測の新しい波 - ハイブリッド重力測定

従来から行なわれてきた重力測定では、変動域から離れた場所に不動点を仮定する必要があった．その仮不動点を基準として、小型軽量 (10kg 程度) のラコステ重力計などによる相対測定以外には、重力の時空間変動を求める手段がなかったからである．しかし三宅島火山の場合には、島内に不動点を求めることはできない．したがって島内の相対測定のみからでは、島全体として重力が増えているのか、減っているのかわからない．つまり、このままでは質量の移動の議論は無理ということになる．この問題をクリアーするために島外に不動点を設置しても、重力計のドリフト (ばねのクリープによる測定値の見かけ上の変化) があるために、高い精度での重力値を求めることは困難である．

幸い 1990 年代になって、1 マイクロガル ($=10^{-6} \text{ cm/sec}^2$) の精度を持つ、絶対重力計 FG5 が商業ベースで提供されるようになった．FG5 は小型 (といっても総重量 300kg) であるので、2 名の要員がいればワゴン車に積んで、日本全国どこでも測定が可能である．筆者のグループでは 1994 年から絶対重力測定と従来型の相対重力測定とを同時期に実施し、これをハイブリッド重力測定と称してきた (図 1)．ハイブリッド重力測定では絶対重力点での重力値を測定しつつ、その点を基準とした相対測定を周辺地域で実施する．こうすれば仮不動点を設定することなく、重力の時空間変動を「絶対値で」とらえることができる．とくに重力の時空間変動と稠密な地殻変動の観測とを組み合わせれば、地震・火山活動と流体移動との関わりについて手がかりがえられる．ハイブリッド測定によって初めて、火山活動にともなうトータルの物質移動量を議論することができるようになったといえる．



図 1．ハイブリッド重力測定の構成要素．FG5 本体 (最後部の三脚)、同コントローラ (左)、オペレータ、およびその手前にラコステ重力計．



図 2 海上保安庁航空機で絶対重力計を三宅島へ空輸．1 個 60kg 程度の部品に分解してコンテナに梱包．機内に人力で運び上げるのが大変だった．

3.2 三宅島における重力観測の実際

2000年三宅島火山活動が始まった際には、定期貨物船が運休する状況の中で、FG5絶対重力計をどうやって離島である現地に輸送するかが最大の懸案となった。幸いFG5は6-8個のコンテナに分割して梱包でき、重量も300kg程度なので、海上保安庁のSAAB機で輸送していただくことができた(図2)。

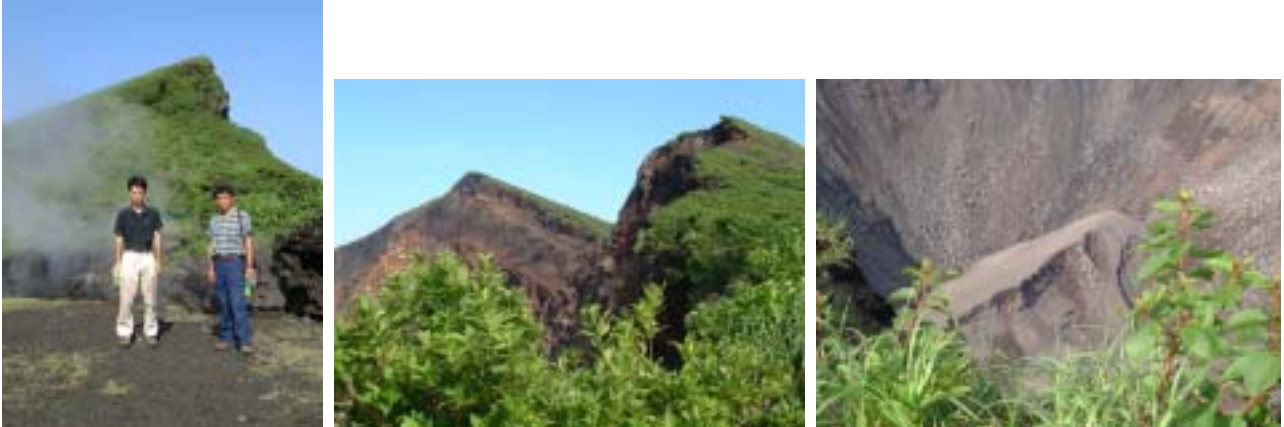


図3. 2000年7月6日に重力測定を行なった、カルデラ内の噴気地点「雄山サウナ」(左)は、その2日後の山頂陥没で火口に呑み込まれた。中央は抉り取られて残った地形。かつては見上げたピーク(左の写真)が、右の写真では眼下の陥没孔に見える(7月11日撮影)。

7月8日の山頂陥没以降は、測定点が崩落し火口に呑み込まれてしまう危険を考慮しつつ、細心の注意をもって進める必要が出てきた。実際、7月6日に測定したカルデラ内の点(雄山サウナ)は7月8日の陥没で失われていたし、山頂駐車場の水準点も8月初めには呑み込まれて失われている(図3)。同時に、噴火の危険には十分に注意しつつ、安全な観測計画を立案していった(図4)。



図4.(左)7月8日の陥没によって飛ばされた噴石が、登山道終点の駐車場(アスファルト舗装)にめり込んでいた。このときはまだ、アスファルト舗装面は95%露出し、トイレの建物も無事であった(7月11日撮影)。(中央)7月14-15日の水蒸気爆発で飛ばされた無数の噴石は、登山道終点の駐車場を爆撃した。アスファルト舗装面は厚さ50cmほど噴石で覆われ、トイレの建物および背後の立ち木の破壊が生々しい。(7月31日撮影)。引き続き陥没により、この場所も数日後には火口に呑み込まれて、今はない。(右)北部の三宅島測候所から見た8月10日の噴火。火砕サージが山腹を流れ下っている。中央には火山雷が写っている。

2000年9月に全島避難が始まると、事態は急転回した。これまでのような、商用電源や観測基地が確保された観測とは異なり、電力が遮断された中で、しかも陸域から孤立した島における観測という困難な状況となったのである。これ以後、研究者はみな、無人島における困難で効率の悪い観測研究を余

儀なくされている。FG5の主要構成要素であるレーザーも原子時計も、電源がなければただの箱に過ぎない。そんな中で、2000年10月には、72時間連続運転可能な大型発動発電機を気象庁の好意で設置していただくことにより困難を回避できたのは朗報であった(図5)。「発電機を設置」と簡単に書いたが、道路も泥流でズタズタに寸断された無人島での設置である。気象庁の払っていただいたご努力には、われわれ重力観測班の胸を熱くさせるものがあった。停電は9月以降、常態化し各種の地殻変動観測が途絶えている。この間も、われわれのハイブリッド重力測定は毎月1度というペースではあるにしても、火山活動推移予測の基礎データを提供し続けた。



図5. 絶対重力計のために、気象庁により設置された発動発電機(500kg)。泥流で荒れた無人島での設置のために、道路啓開用のパワーショベル1台、クレーン1台、大型トラック1台、連絡用4輪駆動車1台が投入された。

2000年9月中は各機関とも、三宅島に停泊させたチャーター船を基地としての観測を行なったが、気象・海況ともに日増しに厳しくなり、10月には神津島に現地災害対策本部を移した。これ以後の観測は、神津島を基地として、漁船(10月、11月)もしくは小型客船・ヘリコプター(12月-)による“通勤”を経て、行なわれることとなった(図6)。観測にともなう苦闘の様子は大学三宅島総合観測班報告<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/topics/MIYAKE/KANSOKUHAN.html>に日誌形式で述べられている。全ての観測グループとも、上陸時間に関する制限(2ないし6時間)と、上陸確率の低さに悩まされた。15時間の作業時間を確保するために、出張日数が9日に及ぶこともあった。長期間待機を余儀なくされる観測者にかかるフラストレーションは相当なものである。



図6.(左)2000年10月-11月は15人乗りぐらいの小型漁船で、基地とする神津島から三宅島まで片道1時間半程度かけて観測に出かける。波シブキを浴びつつ、激しい揺れに重力計も人もひたすら耐える。(右)12月から一部ヘリコプターが投入されると、重力計を輸送中の振動がかなり軽減され、測定精度も大幅に向上した。

それに加えて、泥流による道路状況の悪化(泥の堆積・路面陥没)により都道に甚大な被害が出ている。道路の損壊箇所は、現地対策本部によって随時補修されたが、一方で降雨の度に生じる泥流によって道路損壊も引き続いて生じている(図7)。通行不能箇所の迂回や、泥濘にスタックして脱出するのに

要する時間などに、観測時間が奪われていく。



図7. 山腹に積もった火山灰は、雨が降るたびに泥流となって流れ下る。数十 cm の厚さの泥で道路が覆われると、4輪駆動車でも通行が困難となる（ガードレール，人の足，車のタイヤに注目）。



図8. （左上）火口から山腹に流れ下る青白いガスは二酸化硫黄である。（右上）火山ガス濃度が一定値を超えるとガスマスクを着用。（左下）山頂に接近するときは、耐熱設備のある消防庁の防災機動車が同行した。（右下）島内の山麓での観測にも、防災関係者（警察，消防，東京都職員等）が同行し，安全確保の任にあたっていただいている。

また、島内の各地域には、火山ガスおよび火砕流・噴石に備えた立ち入り規制が引かれている。例えば、山頂付近に立ち入るには11月-12月にかけては、酸素ポンプを携行したレスキュー隊員および耐熱消防車が同行することとされた。一周道路沿いの比較的安全な場所での観測にも、警察・消防などの関係者が観測班に同行し、現地対策本部との連絡をとりながら、火山ガス濃度に注意を払いつつ慎重に進められている（図8）。その一方、三宅島を出航・離陸する時間は決められているし、気象条件で早められることも多い。限られた時間内にどこまで作業を進められるか、ぎりぎりの所で判断を迫られる場面も多い。

4. 重力データから見た火山活動の推移

2000年の活動の4つのフェーズについて、これまでに得られた重力データを見てみることにしよう(図9, 10)。

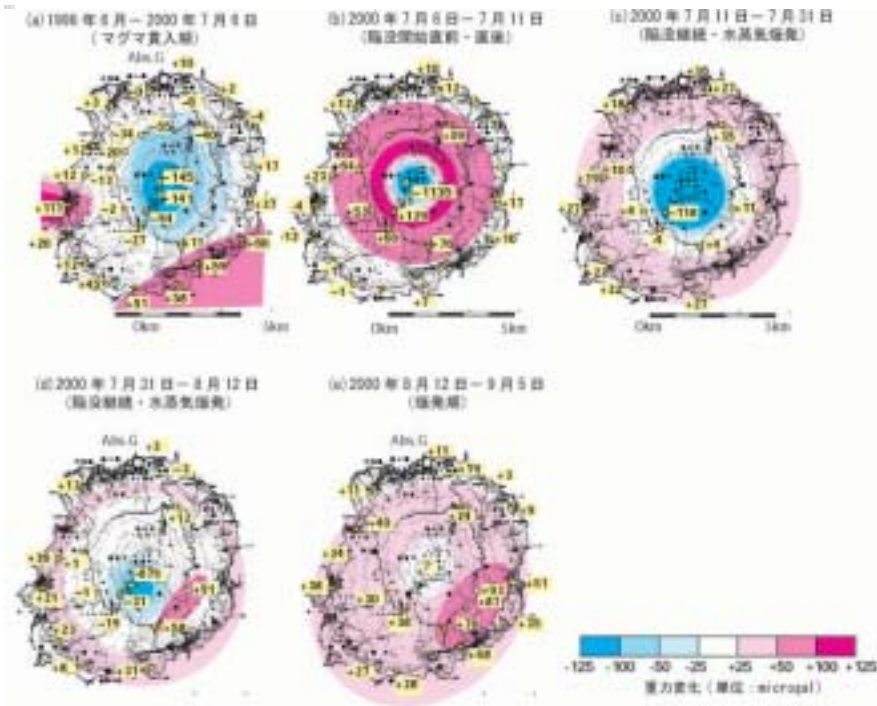


図9. 2000年9月までの三宅島火山の重力変動. 単位はマイクロガル. (a)ダイク貫入期. 山頂部の150マイクロガルの減少は陥没の前兆. (b)陥没期前期. 7月8日の陥没開始をはさむ前後数日(7月6日-7月11日)の重力変化. 山頂部で1000マイクロガルを超える超ド級の変化は, 陥没の一層の進行を指し示す. (c) 陥没期後期. 陥没地形の重心が下がるに連れて, 同心円状パターンが島の中心から拡散していく. (d)爆発期前期. 南東部の重力増加が顕著になってきた. (e)爆発期後期.

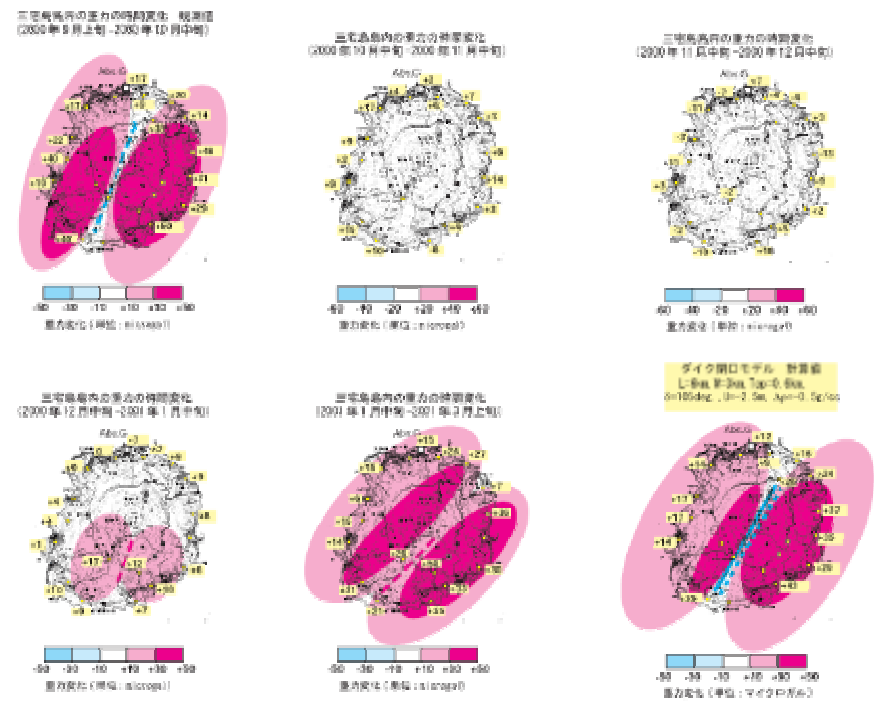


図 10. 脱ガス期の三宅島火山の重力変化(2000年9月から)およびそれを説明する一つのモデル. 単位はマイクロガル.

4.1 マグマ貫入期

マグマ貫入期の重力変化を図 9a に示す. これは 2000 年 7 月 1 日-7 月 6 日の間の島内 30 箇所の測定データと, 1998 年 6 月の測定結果とを比較して求めた変動量である. この変動パターンには 3 つの特徴がみとれる.

- (1) 山頂部に局在した (水平スケール 1-2km), 約 150 マイクロガルの重力減少.
- (2) ダイクが貫入したと推定される島の西海岸の軸対称な重力増加.
- (3) 島の南東部を中心とする, やや広い範囲 (水平スケール 5km 程度) の重力増加.

GPS 観測で見ても, この期間には数十 cm をこえる地盤の上下変動が島内各地で観測されている (図 11). したがって, 島内に重力不動点を求めることは不可能である. もし, FG5 による絶対重力測定がなければ, 重力変化には 100 ないし 200 マイクロガル程度のバイアス不確定性が残るので, 上述の 3 つの特徴を果たして指摘し得たかどうか, はなはだ疑問である.

さて, これらの変動を説明するモデルを構築してみよう. まず地震研究所の GPS 測量によって得られた島内の変位場を見ると, 山頂部は 1m 程度沈降している (図 11), 特徴(1)は山頂直下で空洞生成などの質量欠損が生じたことがいえる. 自然なモデリングとして球形の空洞を仮定すると, その深さは変動の水平スケールと同程度の 1-2km と見積もられる. そんなに簡単に, 地下に空洞が形成されるのだろうか? とところが, 測定のわずか 2 日後に自然は答えを出してくれた. 7 月 8 日 16 時ごろ, わずか 4 分程度のうちに, 山頂カルデラが一気に 200 メートル以上も陥没するという事件が生じたのである.

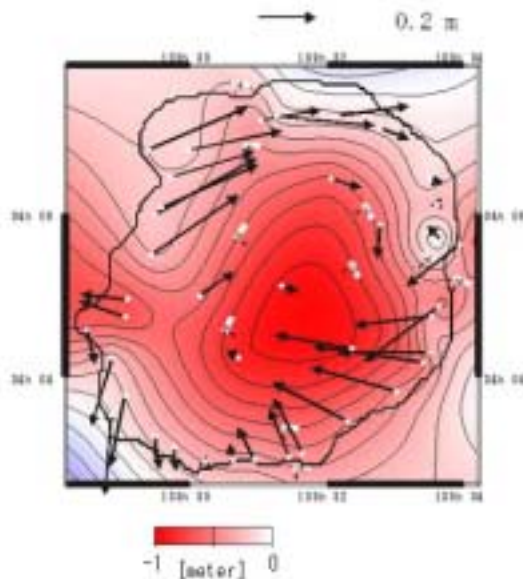


図 11. 1999 年 8 月から 2000 年 7 月 2 日までの変位. 東京大学地震研究所の GPS 観測による. 矢印は水平変位, コンターは上下変位.

次に特徴(2)からは, 北西-南東もしくは東西方向に走向を持つダイクの貫入が想定される. 活動初期の震源の分布からもこの走向のダイク貫入が示唆されるし (酒井ほか, 2001), 地表に生じた多数の亀裂も同じ走向を持っていた. また, 三宅島西方沖には変色海域が認められているし, 海底地形調査でも海底噴火が起きていることがわかっている (中田ほか, 2001). そこで, 矩形断層面上の一様な開口変位でモデル化することとした. 最後に特徴(3)は, 深さ 5km 程度におかれた圧力源の減圧によって, 島の広い範囲で沈降が生じたためと考えられる. 実際, 地震研究所の GPS 観測によると, 50cm の沈降が島の南部で生じている (図 11). また, 三宅島西方に貫入したマグマを蓄えていたマグマ溜りでは, マグマの流出で減圧が生じるはずであるから, 物理的にも自然な要請といえる.

GPS 観測で得られた変位および重力変化データにインバージョンを施して, このモデルのパラメータを決めたところ, 図 12 のような結果が得られた. 事態は, 次のようなシナリオにしたがって進行したと思われる.

- (1) 山頂下, 深さ 5km あたりのマグマ溜りから, マグマが三宅島西方海域へダイク状に貫入した.

マグマの流出によって、マグマ溜まりは減圧し収縮する。

- (2) マグマ溜まりの減圧は、それより上部の岩石を支える圧力の低下をひきおこし、山頂火道を中心とした崩落が始まる。7月初めに山頂直下で始まった筒状の震源分布をもつ微小地震活動は、これをみていると思われる。深さ2kmには、実質上、空洞とみなせる領域が形成される。
- (3) 空洞域は、ダルマ落しのように、次第に浅い部分に上昇する。これは地磁気の全磁力変化からも、裏付けられている（笹井ほか、2001）。また陥没直前の山頂直下の震源分布とも符合する（酒井ほか、2001）。

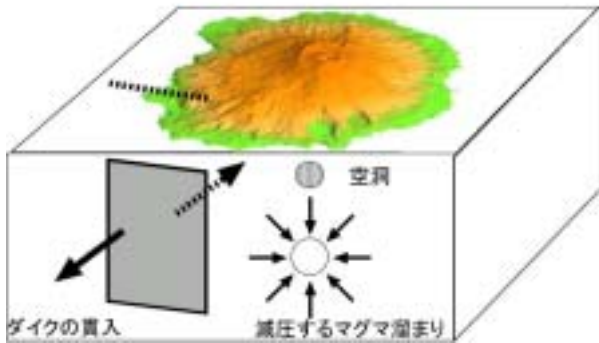


図 12. マグマ貫入期の地殻変動と重力変化とを説明するモデル。三宅島西方でのダイク貫入が起きた（長さ 10km、幅 15km、開口量 1.5m 程度）。山頂下 5km のマグマ溜まりはマグマの流出で減圧し、8 千万立米程度、体積が減少する。その結果、火道上部を支えきれずに崩落をはじめ、深さ 2km に空洞を生じる。この空洞はダルマ落しのように、次第に上方に移動し、ついに地表に陥没を起こす。

4.2 山頂陥没期

2000 年 7 月 8 日の山頂陥没については、陥没の 2 日前および 3 日後に測定データをとるという奇跡的な幸運に恵まれた。データの比較から、わずか 5 日間のうちに、山頂部で 1200 マイクロガルもの重力減少が生じていることが判明した（図 9b）。当初はこの異常な重力変動に単純に興奮していた。しかし、陥没にともなう地形変化がデジタルデータとして国土地理院から公表されると、意外な事実が判明した。当初の山頂陥没地形に基づいて重力変化量を計算してみると、山頂部での重力変化量は-100 マイクロガルにしかならなかったのである。山頂部では、陥没で失われた質量がほとんど真横に位置することとなるので、欠損質量はほとんど水平方向に引力減少をもたらすだけで、鉛直方向の重力成分に対する効果が小さいのである。現実には生じている陥没量だけでは観測された重力減少が説明できないことから、山頂下にはまだ空洞が伏在していることが考えられた。その量は 1 億立方メートル以上と推定された。

この指摘どおり山頂部は陥没を続けると共に、いわゆる「傾斜ステップ」が繰返され（Ukawa, et al., 2000）、また 7 月 14-15 日には水蒸気爆発が起こった。陥没による質量欠損が拡大し、その重心が深くなるにつれて、重力減少域・増加域も山頂から広がっていった（図 9b および c）。欠損重心より高い地点では、下向き引力の減少（=重力減少）がおり、低い地点では逆に上向き引力の減少（=下向きの重力増加）がもたらされるからである。この重力変動パターンの時間変化は、ちょうど恒星の最期に、中心から大量のガスを撒き散らす超新星爆発を見る思いがする（図 9b, c）。この後、8 月 10 日までは噴火を起こすことなく、陥没が進行したのである。これは、「溶岩・火山灰等の物質放出によって生じた質量欠損を埋めるようにカルデラ（山頂陥没地形）が形成される」という火山学の常識とは相容れない衝撃的な事実であった。

4.3 爆発期

2000 年 8 月 10 日に高度 6000m まで噴煙を上げて以来、大規模な爆発が 8 月末まで断続的に続いた。8 月 10 日には火砕サージが発生し、火山雷も起きている（図 4）。8 月 18 日の最大規模の噴火では、高度 15000m に噴煙が達し、1m サイズの噴石が火口から 1-2km の範囲に降り注いだ。幸い人命は失われなかったが、牛舎などの建物は噴石により、かなりのダメージが出た。また、8 月 29 日には低温（50 度以下）の「火砕流もどき」が北部の海岸まで流れ下っている。この間、山頂陥没は拡大を続けている。

爆発期初期には、島の南東部に顕著な重力増加地域が認められた（図 9d）。この南東部の重力増加は、噴火後期には、さらに顕著になっていることがわかった（図 9e）。これは二つの可能性を示している。一つは南東部の直下に流体（マグマか地下水）が充填された可能性である。他の一つは、噴火によって生じるマグマ溜まりの減圧で地表が沈降した可能性である。いずれが正しいのか、現在、さまざまな資料を検討しているところである。

4.4 脱ガス期

2000年9月初めから徐々に二酸化硫黄の放出量が増え、9月中旬には一日あたり数万トンの放出レベルに達した(図13)。二酸化硫黄の放出は、本稿執筆の2001年3月末現在も継続しており、住民の帰島を阻む最大の要因となっている。

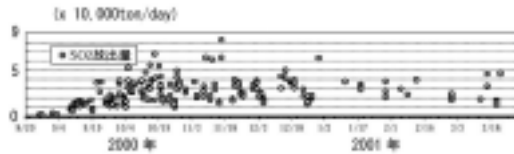


図13. (左)三宅島からの二酸化硫黄の1日あたりの放出量(気象庁火山情報による)。(右)神津島から望む三宅島(2000年10月)。三宅島山頂から放出される噴煙ブルームは南東の風により拡散しつつ、神津島方向へ移流した。この日は神津島でも強い刺激臭を感じた。

なぜ、これほどまでに長期にかつ大量の火山ガスの放出が続くのだろうか?恐らく、内部対流で浅部に上昇したマグマが減圧を受け、そのとき内部にマグマ中に溶融していた二酸化硫黄が脱ガスし放出されるからであろう。脱ガスに関与するマグマの位置および量を推定するために、大学総合観測班も全力をあげてきたが、3.3節で述べたような極めて厳しい環境下ではなかなかデータの集積が進んでいない。脱ガス期の重力変動パターンは、島の南東部に中心を持つ同心円パターンか、もしくは北東-南西方向に対称軸をもつバタフライ・パターンを示している(図10)。ほとんどの観測が火口から離れた一周道路沿いでなされており、山頂付近での観測データがほとんどないために、どちらのパターンが正しいのか見極めが難しい。島の南東山腹に見られる、大きな重力増加の目玉の存在は確実である。ちょうどこの地域の直下に地震波の減衰域が発見されているので、巨大なマグマ溜まりの脱ガスにともなう活動を図10はとらえているのかもしれない。残念ながら現時点では、山頂付近の地殻変動データが皆無であるので(ごく限られた期間の干渉合成開口レーダデータはあるが)、一意的な解釈をするのは難しい。限られた資料を鋭意、収集中である。

5. 地震学的な議論 - 山頂陥没で失われた物質は、群発地震活動域に移動したか?

2章で指摘したように、6億立方メートル(約12億トン)もの山頂陥没が生じた以上、空隙を作るためには三宅島山頂付近にもともとあった物質はどこかへ移動したはずである。2ヶ月程度の短期間に空隙が生成されているわけであるから、移動した物質は固体ではなく、流体であるのはほぼ確実である。火口から飛び出した噴出物の総量が高々1000万立方メートルであるから、固体地球内部での流体の移動が生じたに違いない。問題は、どこへ移動したかである。その手がかりは、三宅島の中でも比較的地殻変動が小さかった北部における、絶対重力観測データから得られる(図14)。

この時期の重力変動を引き起こす要因には、(1)陥没によって生じた質量欠損による引力減少、(2)観測点の隆起・沈降によって生じるブーゲー効果(2マイクロガル/cm)、(3)流体が移動先から及ぼす引力増加、(4)地殻変動で生じる地球内部の密度変化による引力変化がある。観測される重力変化は(1)から(4)の要因による効果の総和となるはずである。通常(4)は(2)の2割程度しか寄与がないので以下の議論では無視することができる。この場合には、観測値から(1)および(2)を差し引くと、流出先から及ぼす引力が得られることになる。その大きさは、陥没期全体を通してプラスマイナス2マイクロガルという小さな量であることがわかった(図14)。

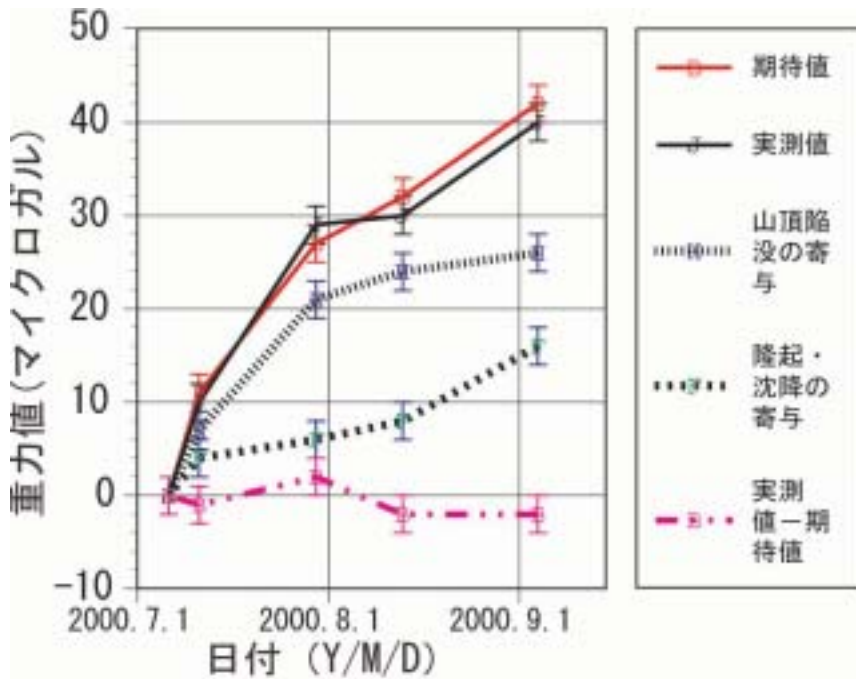


図 14. 三宅島測候所における絶対重力変化．縦軸には重力値を 979799740 マイクロガルからのズレとして表示．山頂陥没と隆起沈降の効果を足し合わせた期待値は、実測値と 2 マイクロガル以内で一致する．マグマが流出先から及ぼす引力は、実測値から期待値を差し引いた値となるはずである．

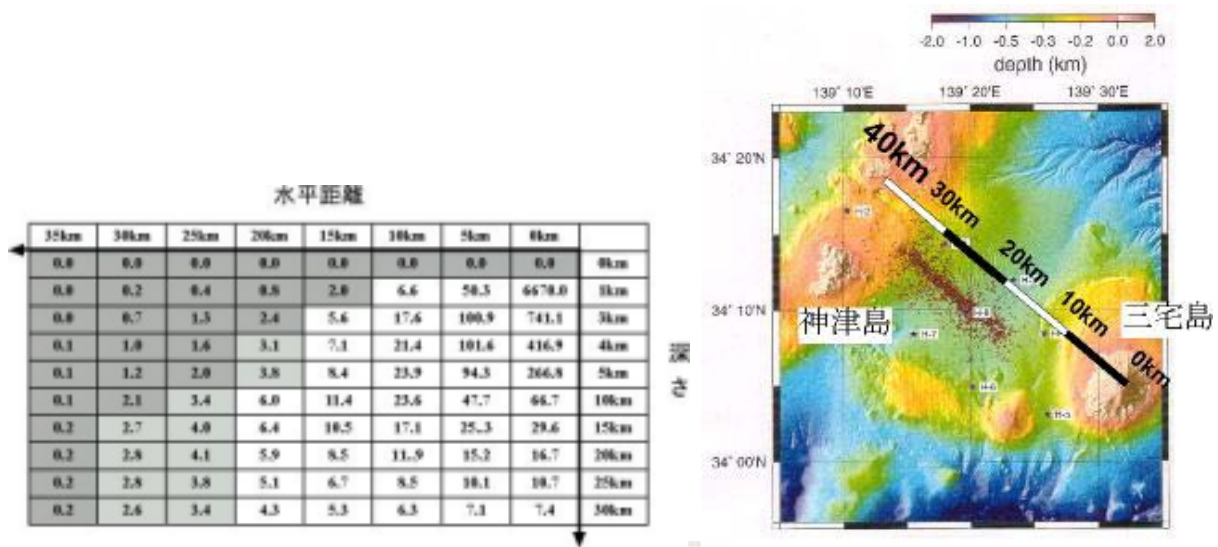


図 15 .(左) マグマがどこに流出するか行先別に見積もった、重力への寄与．想定質量は 10 億トン、単位はマイクロガル．影をつけた許容領域ならば、図 14 と矛盾しない．(右)2000 年 7 月 - 8 月の群発地震震源 (震源の深さは 5 - 20km)．震源域はちょうど左図の許容領域に収まる．

これは、以下に見るように流出先に関する強い拘束条件を与える．陥没によって失われた質量 10 億トン (陥没期をとおして平均した、質量欠損の概略値) が三宅島から水平距離 R、深さ D に移動した場合に、それが及ぼす引力を図 15 に示す．流出先として許される領域は、枠内の数字が 2 マイクロガル以下の値となる領域に限られることに注意しよう．図 15 からは、三宅島のマグマは山頂直下にドレインバックしたのではないことがわかる．なぜなら、三宅島直下 30km までドレインバックとした場合には、7 マイクロガルの引力が生じてしまうからである．これよりさらに深部にドレインバックさせようとしても、マグマ (密度 2-2.7g/cm³) はマントル (密度 >3g/cm³) よりも軽いので、浮力のために浮き上がってしまうだろう．したがって、図 15 のシャドウをつけた領域、すなわち三宅島から水平方向 15km 以遠にマグマの流出域を想定するのが妥当と思われる．面白いことにこの領域は、2000 年 7 月から 8 月に三宅島-神津島の海域で生じた群発地震域と重なるのである (図 16)．三宅島のマグマが群発地震域に流れ出したと考えると都合のよい事実はもう一つある．それは、この海域で生じ

た地殻変動（海上保安庁，2001）を説明するのに必要な，開口断層の開口体積である．GPS 測定からインバージョンで求めたパラメータとしては，水平方向の長さ 15km，深さは上端 3km，下端 10km で開口量 6m が想定されているので，開口体積は 6.7 億立米と見積もられる（加藤照之，私信）．この体積は三宅島で失われた 6 億立米と，気味悪いほど符合している．

三宅島のマグマが，神津島海域へと流れ出したとして，その原動力は何であろうか？すぐに思いつくのは，マグマの発泡による，三宅島のマグマ溜まりの圧力増加である．しかし，この考えには物理学的に難点がある．マグマ溜まりの増圧が原因なら，三宅島の火道を使った山頂噴火を起こすほうが，地殻をバリバリと割りながら水平方向に貫入させるよりも容易なはずだからである．百歩譲って，水平方向に流出するとしても，なぜ三宅島の北西方向に流出しなければならないか説明できない．これらのことから，むしろ，神津島海域にマグマが吸い出されていったと考えるほうが合理的である．これは，クラックの生成によって，その先端に生じた真空域が吸引源となっていると考えれば良い．マグマが水平方向に吸引されると，クラック先端では実効封圧が下がり，ますますクラックが成長し，真空領域も増殖する．このような正のフィードバックがはたらいって群発地震がおきるという可能性を示しているのではないだろうか．

6. まとめ

新世代のハイブリッド重力測定によって，火山活動および地震活動について，物理的な拘束条件を与えることができるようになった．いうまでもないが，電磁気データ，地震データ，地殻変動データなどのデータと重力データとがその持ち味を生かしながら，互いに補い合った総合観測をおこなうことが肝要である．総合的な解釈を今後は進めていくつもりである．

謝辞

重力観測には古屋正人・孫文科・渡辺秀文・田中愛幸・及川純（東京大学地震研究所）および前川徳光（北海道大学・有珠火山観測所）の各氏の参加を得た．絶対重力計の空輸および設置については，海上保安庁および気象庁三宅島測候所には格別のご支援をいただいた．全島避難後の三宅島での観測にあたっては，関係機関（気象庁，警視庁，消防庁，海上保安庁，防衛庁，内閣府，東京都庁，三宅村など）から成る，三宅島火山活動現地災害対策本部の支援を受けた．気象庁地震火山部には，無人の測候所に発動発電機を設置していただいた．また，地震予知総合研究振興会理事長の高木章雄先生，同地震調査研究センター長の平澤朋郎先生および日本大学教授の萩原幸男先生には，研究の遂行にあたって温かい励ましとご支援をいただいた．本研究の一部は，東京海上各務記念財団から受けた研究助成によって実施された（課題名 「重力変化の観測に基づく，マグマ活動と群発地震の相互作用に関する研究」）．以上の方々から心からの謝意を捧げる．

参考文献

- 海上保安庁，2001，<http://www.jhd.go.jp/cue/KOHO/kouhou/001214/oonohara.html>
- 国土地理院，2000，<http://www.gsi.go.jp/WNEW/LATEST/MIYAKE/tochijoken/kanbotsuryou.htm>
- 中田節也・長井雅史・安田敦・嶋野岳人・下司信夫・大野希一・秋政貴子・金子隆之・藤井敏嗣，2001，三宅島 2000 年噴火の経緯：山頂陥没口と噴出物の特徴，地学雑誌，110，印刷中．
- Niebauer, T. M., G. Sasagawa, J. E. Faller, R. Hilt and F.J. Klopping, 1995, A new generation of absolute gravimeters, *Metrologia*, 32, 159-180.
- 岡田義光，2000，伊豆諸島の地震・火山活動(2000 年)，地震ジャーナル，30，42-55．
- 酒井慎一・山田知朗・井出哲・望月将志・塩原肇・ト部卓・平田直・篠原雅尚・金沢敏彦・西澤あずさ・藤江剛・三ヶ田均，2001，地震活動から見た三宅島 2000 年噴火時のマグマの移動，地学雑誌，110，印刷中．
- 笹井洋一・上嶋誠・歌田久司・鍵山恒臣，2001，地磁気・地電位観測から推定される三宅島火山の 2000 年活動，地学雑誌，110，印刷中．
- Ukawa, M., E. Fujita, E. Yamamoto, Y. Okada, and M. Kikuchi, 2001, The 2000 Miyake-jima eruption: Crustal deformation and earthquakes observed by the NIED Miyakejima observation network, *Earth Planets Space*, 52, (in press).