

三宅島の地殻変動および降下ピストンの強制冷却による

三宅島の脱ガスモデル*

Crustal Deformations of Miyakejima Volcano and a Model of the Large Scale Degassing Induced by Caldera Collapse of Miyakejima

国土地理院

Geographical Survey Institute

1. 三宅島の地殻変動

第1-1図から第1-2図は、GPSによる2000年9月1日から最近までの三宅島島内の基線(抜粋)の変動である。2002年夏頃までは収縮が続いていたが、その後、停滞または若干の伸びの傾向が見られる。

2. 強制冷却脱ガスモデルの概要

三宅島山頂のカルデラ陥没により、低温の物質がマグマ溜りに突入する。その低温物質が、マグマ溜り内のマグマを強制的に冷却し発泡させることで、脱ガスが発生している第2図のようなモデルを考える。

2000年7月~8月にかけて、カルデラを形成しながら三宅島山頂部の陥没が進行した。これにより、低温の物質がマグマ溜りに突入し、マグマを急冷・固化させ、揮発性物質はメルトに濃集して、本来なら揮発性物質が不飽和である圧力下で発泡が生じていると考えられる。その結果生じた発泡マグマの浮力によって対流が維持され、マグマ溜りの揮発性物質が安定的に供給されるメカニズムが確立し、それによって三宅島の脱ガスが長時間継続していると考えられる。

このモデルが正しいとすると、崩壊物質は、マグマと熱平衡に達するため、最終的には、冷却による大規模な発泡が停止し、大規模な脱ガスも停止すると思われる。ただし、マグマヘッド上部のマグマが脱ガスすることによって生じる浮力の駆動力は残るので、他の火山で観測されている程度の小規模な脱ガスは継続するかもしれない。

3. モデルの量的検討

1) 突入物質の熱容量から推定される可能脱ガス量と観測から推定される脱ガス量との量的比較

第3図に気象庁および産業技術研究所によるCOSPECによる二酸化硫黄放出日量の変化グラフを示す¹⁾。この図からこれまでの総脱ガス量を計算すると約1500万トンとなる。三宅島マグマのSO₂含有率を0.25重量%¹⁾、脱ガス効率を100%として、脱ガスしたマグマ量(体積)を計算すると $2.4 \times 10^9 \text{ m}^3$ となる。

一方、山体およびその下部を構成する物質(温度200度、密度 2600 kg/m^3 、比熱 $800 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$)²⁾が、 $6 \times 10^9 \text{ m}^3$ に相当する量がカルデラ沈降とともに、1000度のマグマ(熱容量 $1500 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ 、潜熱 396 kJ/kg 、密度 2600 kg/m^3)²⁾に突入して、熱伝導により潜熱を奪ってマグマを固化させる場合を考える。なお、マグマは一定の融点で固化するとし、初期温度は融点に等しいとする。マグマは潜熱を放出するだけなので、温度は変化しない。

突入物質から計算される固化されるマグマ体積は、 $4.2 \times 10^9 \text{ m}^3$ となり、突入物質は、これだけの量のマグマを冷却して固化させる熱的可能性を有している。これまでに脱ガスしたマグマの体積($2.4 \times 10^9 \text{ m}^3$)と、熱容量から推定したマグマの固化量($4.2 \times 10^9 \text{ m}^3$)のオーダーはほぼつりあっている。

2) 脱ガス日量とその減少現象の長期減少傾向の説明

このモデルでは、マグマ溜りへの沈降物質のマグマの冷却により脱ガスが発生していると考えるので、脱ガスのスピードは、熱伝導による固化の効率に支配される。簡単のため、融点に等しい温度のマグマが低温の物質に接触し、潜熱を放出しながら固化するという仮定をおいた1次元の熱伝導問題の解(Stefan問題)³⁾を用いると、 $b \propto t^{1/2}$ であり、

* Received 6 Jan., 2003

固化する領域の厚さ b (m)は、時間の平方根に比例して増大する。 b の時間微分が時間あたりの脱ガス量に比例するから一日あたりの脱ガス量は $t^{-1/2}$ に比例して減少する。一方、地殻変動は脱ガスの総量に比例するから、収縮は、 $t^{1/2}$ にしたがって進行し、その速度は $t^{-1/2}$ に比例して減少すると考えられる。脱ガス量、地殻変動の観測値の時間変化はこれらと整合しているように見える。

なお、上述のTurcotte and Shubert(1982)³⁾は、三宅島と類似の条件下で、 $2b$ (m)の厚さのダイクが固化するまでの経過時間(日単位)を下式で与えている。

$$t_s(\text{day})=10.9 \times b^2$$

3) 初期の放出ガス量の時間的推移

第3図をみると、脱ガスは2000年8月から始まり、その量は10月頃まで、一旦増加しその後減少している。脱ガス量は、①冷却による発泡、②対流によるマグマ輸送、③マグマから放出後地中の経路を通じて大気への放出される過程の3つの要因によってコントロールされる。

固化は、突入直後から始まり時間と共に減衰する現象と考えられる。一方、対流や、ガス放出経路が確立する過程は、安定した定常状態に達するために一定期間を要すると考えられる。このことから、脱ガスが始まった当初は、マグマ溜り内部では相当量のすでに発泡が進んでいたが、輸送および放出のシステムが確立しておらず、マグマ溜りで発泡したマグマ中のガスの一部しか外に放出していなかったと考えられる。マグマから大気への輸送経路が確立してゆくにしたいが、脱ガス量が徐々に増加したと思われる。経路の確立した2000年11月頃以降は、固化のスピードによって脱ガス量が規制され、脱ガス量の時間変化は、 $t^{-1/2}$ 的な減少傾向にあると考えられる。

4) 脱ガスの効率

降下物質はマグマより比重が軽いいためマグマ溜り内で浮遊していると思われる。また、構造的には強くないため、一体的な構造を保てず、多数のブロックに分かれて浮遊している可能性が高い。細かいブロックに分かれるほど、マグマとの接触面積が増大し、熱伝導の効率が向上して、固化・発泡のスピードが増すが、継続時間は短くなる。時間あたりのマグマの固化量は、固化した領域の厚さ b の時間微分である db/dt と、接触面積の積で計算される。

先述の1次元のStefan問題の解によれば、 $t_s(\text{day})=10.9 \times b^2$ であるので、これから固化のスピードを計算すると、 $db/dt=0.15 \times t^{-1/2}$ (m/day)

となる。

脱ガスの観測は一旦増加し、その後減少傾向に転じている。脱ガスが安定して減少傾向を見せるようになった、2000年11月以降は、マグマ溜り内の発泡量に見合った量のガスが大気中に放出されていると考えられるので、この時期の放出量を用いて、ガス量と固化のスピードの関係を上式に基づいて考察する。

2000年11月は、カルデラ形成から約100日経過していることを考え、 $db/dt=0.15 \times t^{-1/2}$ (m/day)に、 $t=100\text{day}$ を代入すると、 db/dt は約1.5cm/dayとなる。

一方、2000年11月頃の、放出 SO_2 量は、日量35000トン程度である。これに関与するマグマ量は、脱ガスの効率が100%として計算すると $5.6 \times 10^6 \text{m}^3/\text{日}$ となる。

これから、マグマと突入物質の接触面の面積を計算すると、 $3.7 \times 10^6 \text{m}^2$ となる。突入物質の総量は、 $6 \times 10^8 \text{m}^3$ であり、それが、同じ大きさの球で構成されているとすると、その半径は約5mと計算される。これは、突入物質が分解した後のブロックの大きさとして妥当な範囲にあると考えられる。

5) 突入物質の温度

このモデルが成立するためには、突入物質がマグマを冷却・固化させる程度に低温である必要がある。梅田他(1999)⁴⁾は、マグマ溜りの周囲の温度を条件を変えながら推定しているが、彼等の結果のうち、半径1km、高さ2kmのマグマ溜りを深度5kmに設定し、マグマの供給、排出レートを $1\text{km}^3/\text{千年}$ にした場合の5万年後、10万年後、30万年後の地下の温度構造を第4図に示す。ほぼ平衡に達する30万年後でも、マグマ溜りとその周囲とは数百度の温度差があると考えてよさそうである。

6) 泡が途中消滅する可能性の有無

このモデルでは、冷却によるマグマの固化により揮発成分がメルトに濃集され、飽和に達した後、発泡してメルト

の密度を下げて浮力を獲得することにより対流が生じると考えている。したがって、揮発成分は、マグマ溜り内ですでに飽和に達するまで濃集しているので、上昇する過程でさらに発泡が促進されることはあっても揮発成分が再溶解することはないと考えられる。

7)対流は起こるか

風早ほか(2001)¹⁾は、Stevenson and Blake(1998)⁹⁾が行った、火道内の対流が維持されることによりマグマ溜りから揮発物質が外に放出されるメカニズムについての定量的な検討結果を用い、現在の三宅島の脱ガスを対流で説明するためには、直径9mの火道があればよいと考察している。強制冷却モデルでは、風早ほかが想定しているマグマヘッドにおける減圧脱ガスによるマグマの比重増大がもたらす負の浮力に加え、マグマ溜り内の固化によって生じた揮発成分が濃集し発泡したメルトの浮力という2重の駆動力で対流が励起されるため、より細い火道でもマグマの輸送が可能であると思われる。ただし、一方、結晶の晶出によりマグマの粘性が増すので、これらの効果が相殺される可能性もある。ただし、ここで考えている対流による搬送量は火道の半径の4乗に比例する¹⁾ので、火道の直径が9mより少し大きいと考えるだけで、十分な量の搬送量が期待でき、風早ほかの議論を踏襲して対流は可能だと思われる。

8)三宅島の収縮と脱ガスの関係

三宅島のマグマの含水率が不明であるが、ここでは、1重量%として、脱ガスによるマグマ溜り内の体積変化と、それから予想される地殻変動との整合性を検討する。マグマ溜りはガスの放出以外は閉鎖系であるとし、マグマの出入りはないものとする。また、マグマの体積減少は、水の影響のみを考えることとする。

これまでに放出されたSO₂の総量は1500万トンであり、メルト中のSO₂および水の含有率を重量%で、0.25および1.0とすると、水は6000万トン放出されたことになる。マグマ中の水の部分モル体積は15~25cc/molである⁶⁾ので、20cc/molとして議論を進める。

脱ガスによってマグマ溜りから失われた水がマグマ溜り内で占めていた体積は、 $6.7 \times 10^7 \text{ m}^3$ となる。

一方、GPSによる地殻変動観測から、脱ガス期には一貫して三宅島の収縮が観測されており球状圧力源の減圧を仮定して計算を行うと、茂木ソースは3km程度の深さに求まり、脱ガス期のマグマ溜りの収縮は、 $2.1 \times 10^7 \text{ m}^3$ 程度と計算される。地殻変動で推定される体積のほうが1/3程度となるが、オーダーは同程度である。

また、地殻変動の推移を見ると2001年9月を挟んで、2回の減衰性の現象に分けられるように見える。一方、脱ガス量も、2001年9月頃にはかなり少なくなっていたものが、一旦、再活性化し、再度、徐々に減衰したように見え、地殻変動と脱ガス量の推移には類似性が見られる。また、量的にも2001年9月前後の地殻変動の大きさの比は、概ね3:1程度であるのに対し、放出ガス量(期間累積値)の比も概ね3:1程度であるように見える。

これらのことから、地殻変動で観測されている収縮はマグマ溜りの脱ガスによる体積減少がその原因であると考えられ、ガスはマグマ溜りから対流によって供給されていると考える本稿のモデルと整合的である。

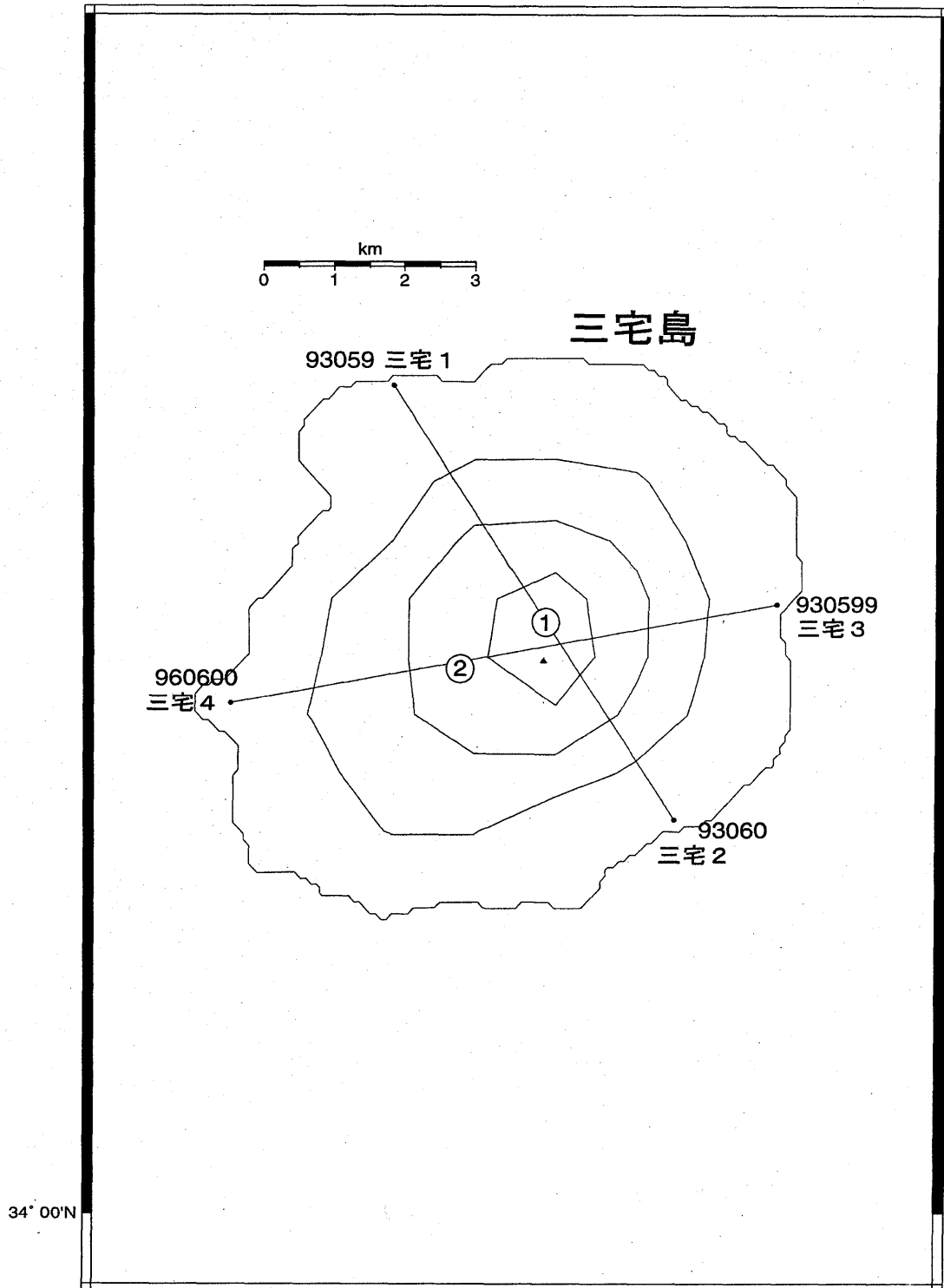
2001年9月頃に現れた、放出ガス量および地殻変動の推移の屈曲は、①新たな崩落による低温物質の再突入、②既にマグマ溜りに突入していた崩落物が崩壊して生じた、新たなマグマとの接触面の生成という2つの可能性が考えられるが、ヘリ等による火口観測から、2000年8月以降、カルデラ火口底の沈下は起きてない様子であるので、②の方がより可能性が高い。

なお、上の議論で使用した二酸化硫黄放出量のデータについて、気象庁から提供を受けた。

参 考 文 献

- 1) 風早康平・平林順一・森 博一・尾台正信・中堀康弘・野上健治・中田節也・篠原宏志・宇都浩三(2001):三宅島火山2000年噴火における火山ガス—火山灰の付着ガス成分およびSO₂放出量から推測される脱ガス環境—,地学雑誌,110(2),271-279.
- 2) 和田穰隆・糸田千鶴(2002):複合岩脈を形成する玄武岩マグマと流紋岩マグマの貫入時間間隙の見積もり,2002年地球惑星関連学会合同大会予稿集.
- 3) D.L.Turcotte and G.Shubert(1982): Geodynamics—Applications of Continuum Physics to Geological Problems—, p172-174,John Wiley & Sons,New York,450pp.

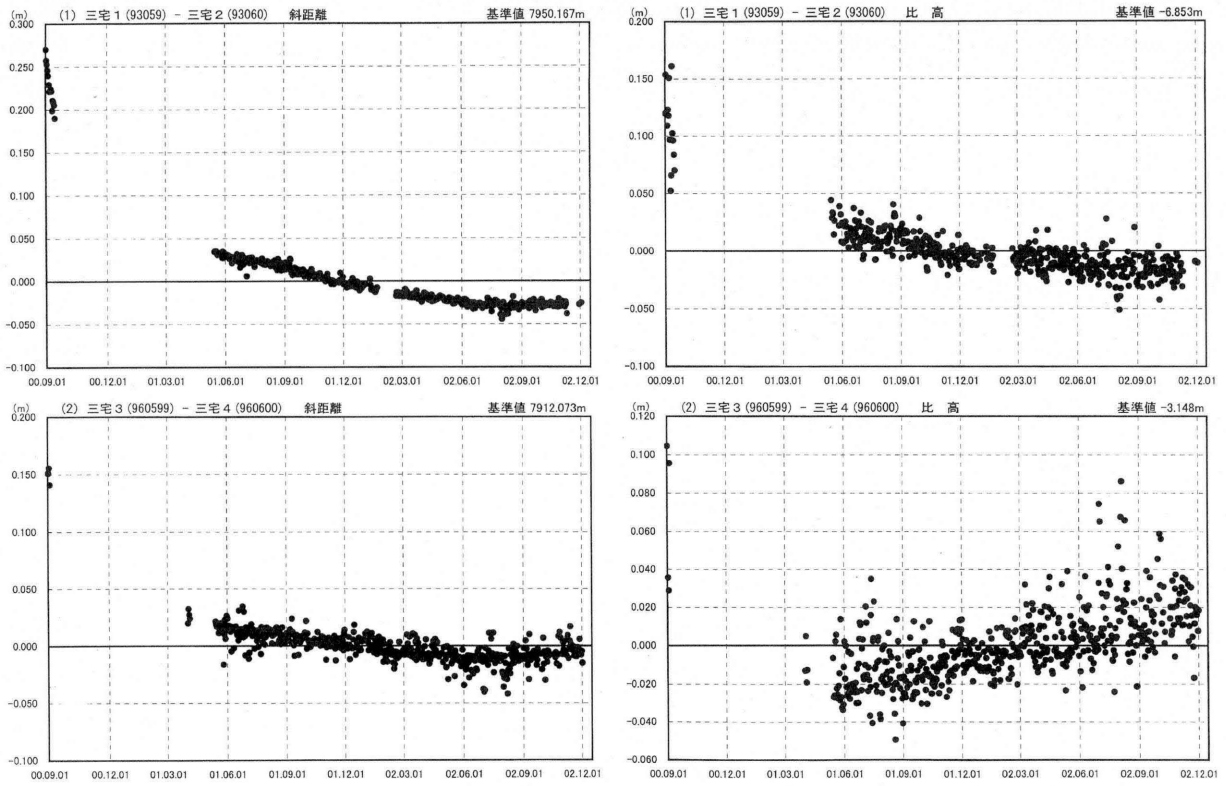
- 4) 梅田浩司・小松 亮・中司 昇(1999):坑井データによる地下温度構造の推定,サイクル機構技報,no.2,29-36.
- 5) Stevenson,D.S. and Blake, S.(1998): Modelling the dynamics and thermodynamics of volcanic degassing, Bull.Volcanol.,60,307-317.
- 6) Lange, R. L. and I.S.E. Carmichael(1990): Thermodynamic Properties of Silicate Liquids with Emphasis on Density, Thermal Expansion and Compressibility, Reviews in Mineralogy,Vol.24, p25-59,Mineralogical Society of America, Washington,314pp.



第1-1図 三宅島におけるGPS連続観測結果(抜粋)
 Fig.1-1 Results of Continuous Measurements of GPS in the Miyake-jima Island.

自期間2000年09月01日
至期間2002年12月02日

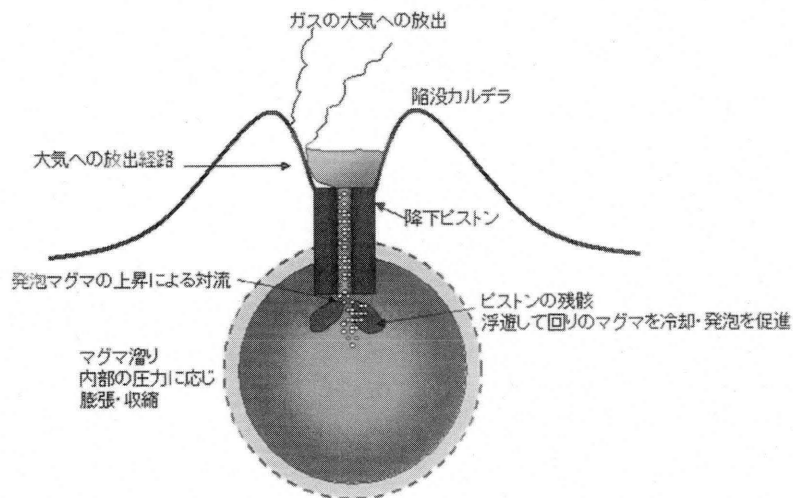
基線長・比高変化グラフ



国土地理院

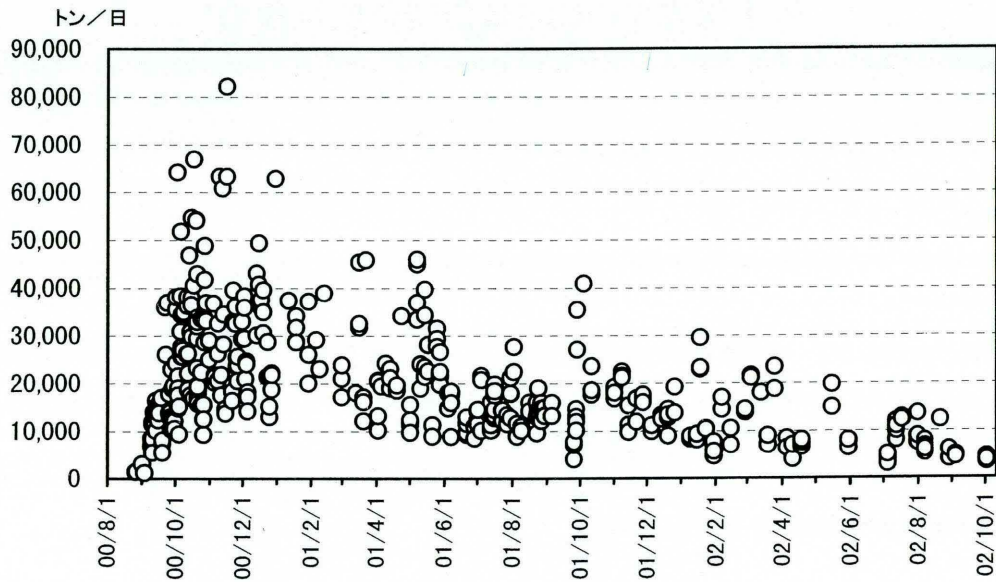
第1-2図 三宅島におけるGPS連続観測結果(抜粋)

Fig.1-2 Results of Continuous Measurements of GPS in the Miyake-jima Island.

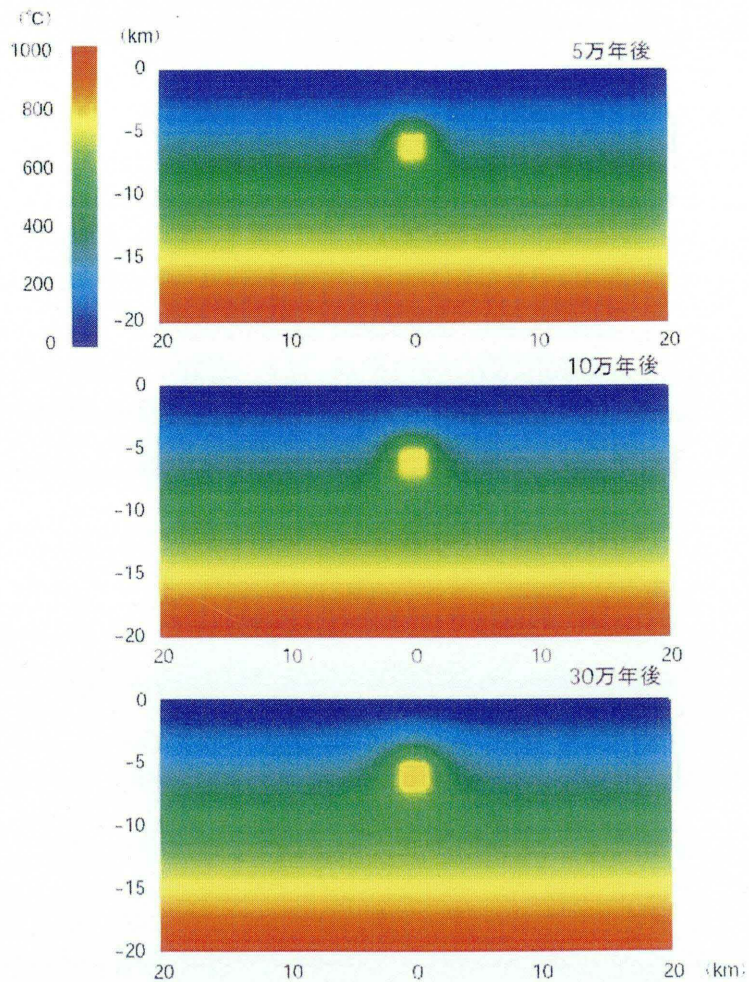


第2図 強制冷却による脱ガスモデル概念図

Fig.2 A Schematic Illustration of a Degassing Model of the Miyake-jima-a Large Scale Degassing Induced by the Cooling of Magma by Collapsed Caldera.



第3図 COSPEC観測による放出SO₂日量(気象庁提供資料)
 Fig.3 Daily Sulfur Dioxide Emission Measured by COSPEC (Data by Japan
 Metrological Agency and Geological Survey Japan).



第4図 マグマ溜り周囲の温度分布(梅田ほか(1999)⁴⁾による)
 Fig.4 Temperature Distribution around a Magma Chamber.
 Results of a Simulation by Umeda et al. (1999).