

硫黄島で 2006-2007 にみられた地殻上下 変動の閉口パイプによる解釈

Closed pipe signatures in vertical crustal movements observed 2006-
2007 in Iwojima

北海道大学理学部地球惑星科学科 4 年

宇宙測地学研究室

佐山 樹 (指導教員：日置幸介)

Tatsuki Sayama (supervisor: Kosuke Heki)

要旨

宇宙測地技術を用いて計測する火山活動に伴う地殻変動から、地下でのマグマの動きを推測することができる。本研究では Dzurisin (2003) のレビューで紹介されている火山性地殻変動から、地下の力源を 0 次元 (マグマだまりの膨張、茂木ソース)、1 次元 (上下に延びた火道の膨張)、2 次元 (岩脈の貫入など) にわけてその特徴を記載した。なかでも 1 次元の力源の一種である閉口パイプによる地表の変形は隆起の中心部に小さな沈降を生じる特徴的な上下変動のパターンを示す。それらを論文中で与えられている理論式を用いてモデル計算し、パラメータを様々に変化させて地表の上下変動パターンの変化を比較した。その結果、地表からパイプ上端までの距離が、その直上に現れる沈降域の半径にほぼ等しくなることを見出した。伊豆小笠原弧にある火山島である硫黄島には複数の GNSS 連続観測局が設置されており、設置当初から極めて激しい隆起を継続していることがわかっている。本研究では二千年代の半ばに行われた合成開口レーダの観測で明らかになった地殻変動パターンを調べた。その結果それらの中に上記の閉口パイプの特徴を持つ上下変動パターンが表れていることを見出した。島の中心に現れた沈降域の半径は次第に小さくなってゆくことが確認されたが、これは閉口パイプの上端が当時上昇しつつあったことを物語っている。

目次

1. はじめに	4
2. 火山性地殻変動	4
2.1 力源の形状による分類	4
2.2 様々な力源がつくる地上の上下変動パターン	5
2.3 0次元の力源（茂木ソース）がつくる地殻変動の計算例	7
2.4 1次元の力源（閉口パイプ）がつくる地殻変動の計算例	8
2.5 閉口パイプの直上に見られる沈降域について	9
2.6 閉口パイプ上端の上昇による地殻変動パターンの変化	10
3. 硫黄島の地殻変動	11
3.1 GNSS による観測結果	12
3.2 InSAR による観測結果	16
3.3 InSAR の結果に見られる閉口パイプ上端の上昇	16
4. おわりに	18
5. 謝辞	18
6. 参考文献	18
7. 付録	19

1. はじめに

宇宙測地技術には様々な手法が存在する。地上に予め観測点を配置し、それらの位置を、GNSS (Global Navigation Satellite System, 全球航法衛星システム)衛星等を用いて計測する方法や、撮影時期の異なる衛星からの画像データを用いて地殻変動を二次元的にとらえる InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar, 合成開口レーダ干渉計)解析などの方法が存在する。これらの宇宙測地技術を用いた観測によって火山性地殻変動を観測することができる。それらの事例は Dzurisin (2003)のレビュー論文に多数挙げられている。

例えば、アリューシャン弧中央部のウニマク島に位置する活火山であるウェッスダールの ERS-1 と ERS-2 の衛星を用いて得られたレーダ画像から作成した干渉画像から、1993 年から 1998 年にかけて山頂地域が 17cm 程度隆起し、さらに 1993 年から 1998 年にかけて、火山の中心から 9 km 下にあるマグマが 0.05 km^3 膨張したことがわかっている。

日本でも GNSS や InSAR が火山に伴う地殻変動の研究に役立てられている。本研究では、これらの宇宙測地技術の観測結果から、伊豆小笠原弧にある活動的な火山島である硫黄島における火山性地殻変動を議論する。特に 2006-2007 に国土地理院や防災科学技術研究所などによって InSAR でとらえられた特徴的な地殻上下変動の観測結果を取り上げ、それらを上下に延びた火道の膨張（閉口パイプモデル）によって解釈することを試みた。

2. 火山性地殻変動

2.1 力源の形状による分類

火山性地殻変動は火山の地下にあるマグマの状態の変化によって引き起こされ、またマグマの地下構造によってさまざまな様相を見せる。ここでは大きく 3 種類のモデルに分類してその特徴をみる。

1 つ目はマグマが点状（球状）に分布している 0 次元的なモデル、2 つ目はマグマが直線状（柱状）に分布している 1 次元的なモデルである。3 つ目はマグマが平面的に分布している 2 次元的なモデルである（図 2-1）。

0 次元的なモデルでは、地下にあるマグマ溜まりが形状を大きく変えることなく膨張することによって生じる地上の地殻変動のモデルである。このモデルは火山性地殻変動を議論するときに頻繁に用いられており、このモデルの力源はしばしば茂木ソースと呼ばれる (Mogi, 1958)。

1 次元的なモデルは、上下に伸びた火道が膨張することによって地上で地殻変動が起きるものであり、火道の両端が詰まっている閉口パイプや開いている開口パイプが仮定される。閉口パイプモデルでは、隆起域の中心部が沈降してすり鉢状の隆起を示すという特徴的な地殻変動を示す。

2次元的なモデルは岩脈や岩床の貫入などによる地殻変動に関するものである。岩脈は一般的に鉛直に立っているが、それを地上に延長した線を境に両側が開くように生じる水平変動が特徴的である。

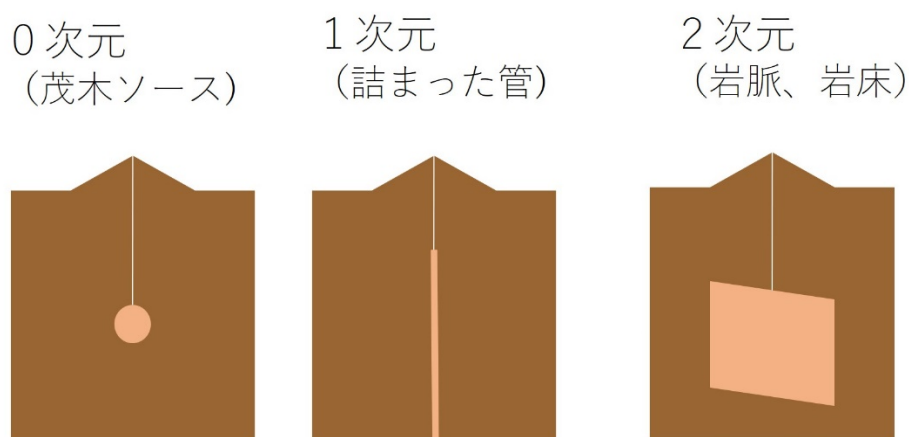


図 2-1. 火山性地殻変動をもたらす地下の力源をその形状で三種類に分類したもの。

2.2 様々な力源がつくる地上の上下変動パターン

ここでは力源（周囲に圧力を及ぼすマグマ）が0次元の場合と1次元の場合について、地表に生じる上下地殻変動のパターンの特徴を比較する。

Dzurisin (2003)において、9 km の深さに半径 595 m の球状のマグマが分布しているケース(0次元な分布)と 6.5km-11km の深さに半径 250 m 閉口パイプのマグマが分布しているケース(1次元的分布)について数値計算を行っている。その結果は、鉛直の変位(Vertical Displacement)、水平で力源と地点を結ぶ方向の変位 (Radial Displacement)、地表の傾き(Tilt)、体積膨張率(Dilatation)のそれぞれについて図 2-2 のように比較されている。

これを見ると0次元と1次元の違いは主に垂直変位と膨張率に現れることがわかる。特に垂直変位では0次元の場合、力源直上を山頂とする山型の変位を示す一方、1次元の場合、力源直上がやや凹むすり鉢状の変位を示しており、極めて特徴的な隆起のパターンを持つことがわかる。

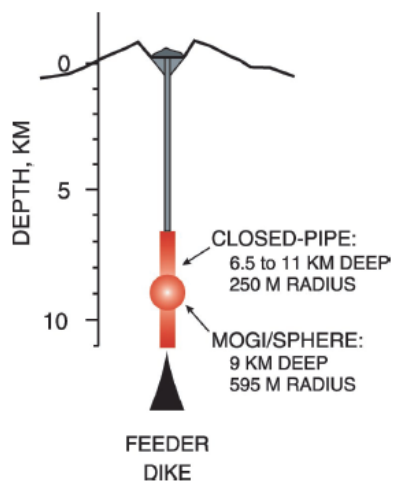
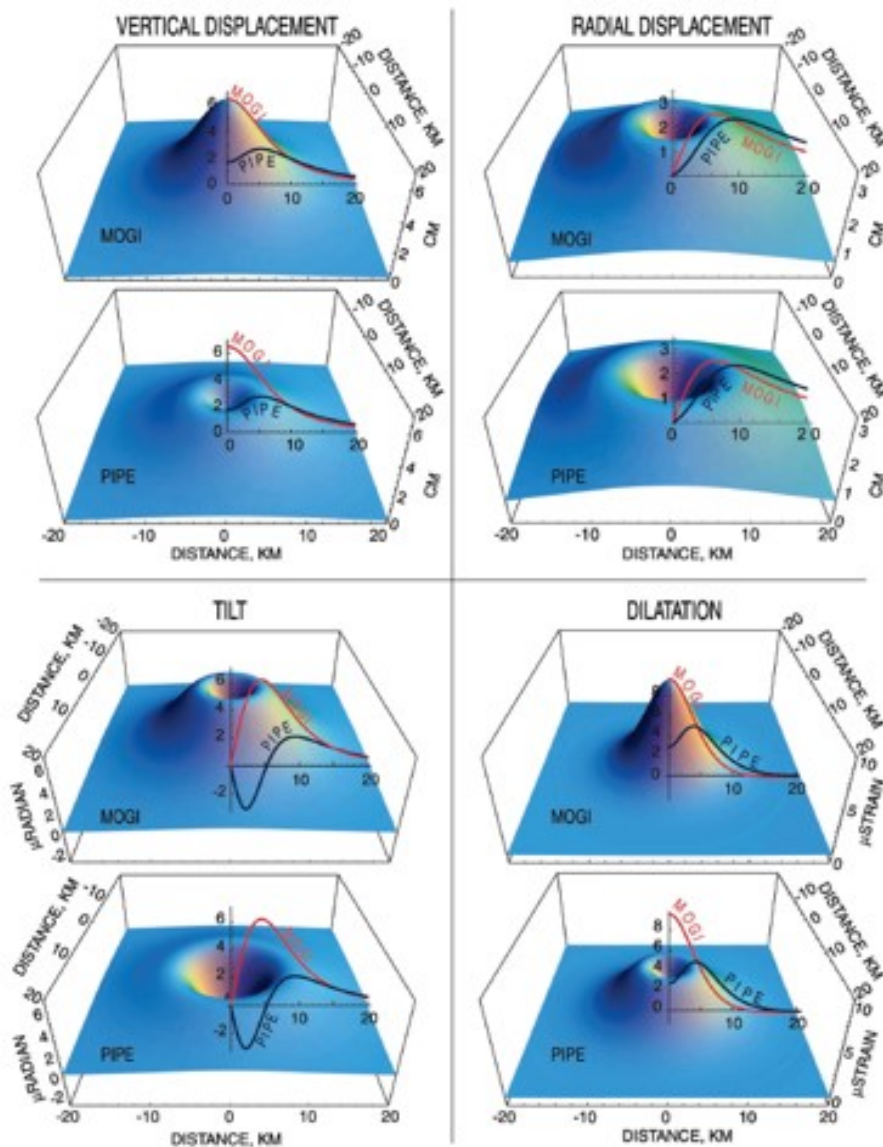


図 2-2 Dzurisin (2003)による茂木ソース (0次元) と閉口パイプ (1次元) の地下の力源がもたらす地表地殻変動を鉛直変位 (Vertical Displacement)、水平変位 (Radial Displacement)、地表の傾き (Tilt)、体積膨張率 (Dilatation) について比較したもの。

2.3 0次元力源（茂木ソース）がつくる地殻変動の計算例

0次元の力源が作る地殻変動は解析的に求められており、以下の式で表される。

垂直変位

$$u_z(r) = \frac{(1-\nu)a^3\Delta p}{\mu} + \frac{d}{(r^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}}$$

水平変位

$$u_r(r) = \frac{(1-\nu)a^3\Delta p}{\mu} + \frac{r}{(r^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}}$$

ただし、 μ は剛性率、 ν はポアソン比、 a はマグマの半径、 r は観測地点からマグマまでの水平距離、 d はマグマの地上からの深さ、 Δp は過剰圧力である。

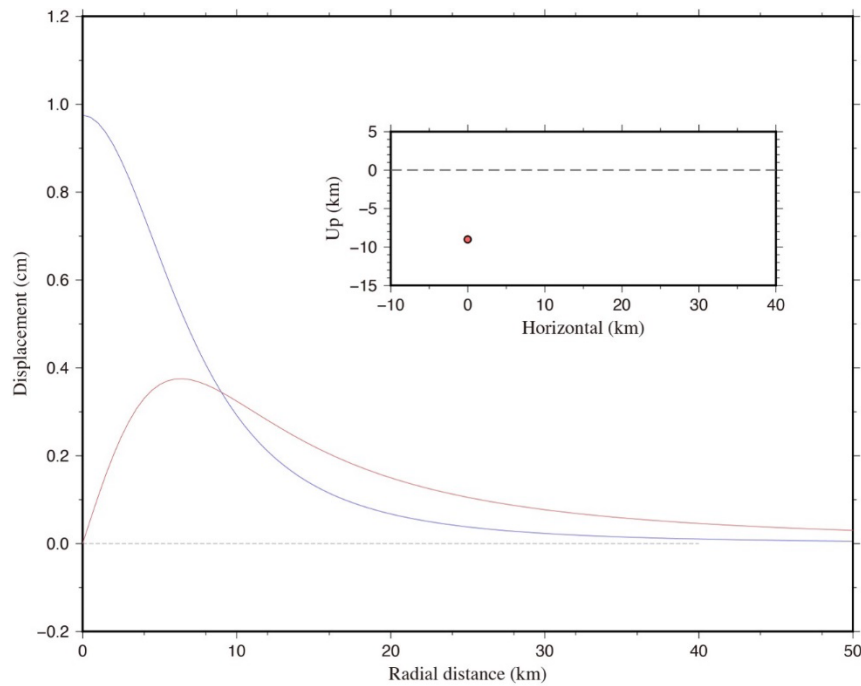


図 2-3 理論式を用いて茂木ソース（0次元の力源）が作る地表の鉛直変位（青）と水平変位（赤）を、力源の直上からの距離の関数として計算した結果。挿入図は力源（赤い点）の深さと位置を大地の断面上にプロットしたもの。

上式を用いて Dzurisin (2003)で検討されているモデル例($d = 9 \text{ km}$, $a = 595 \text{ m}$, $\nu = 0.25$, $\mu = 20 \text{ GPa}$, $\Delta p = 100 \text{ MPa}$)を計算すると図 2-3 のようになった。鉛直変位（隆起）は力源直上で最大となり、力源から離れると単調減少する。一方水平変位（力源から遠ざか

る方向) は力源直上ではゼロとなり、7 km ほど離れた地点で最大となることがわかる。

2.4 1次元の力源（閉口パイプ）がつくる地殻変動の計算例

Dzurisin (2003)では、1次元の力源（閉口パイプ）が作る地表の地殻変動は以下の式で与えられることが示されている。

垂直変位

$$u_z(r) = \frac{a^2 \Delta p}{4\mu} \int_{d_1}^{d_2} \left(\frac{1-2\nu}{(r^2 + c^2)^{\frac{1}{2}}} + \frac{r^2}{(r^2 + c^2)^{\frac{3}{2}}} \right) dc$$

水平変位

$$u_r(r) = \frac{a^2 r \Delta p}{4\mu} \int_{d_1}^{d_2} \left(\frac{(3-2\nu)c}{r^2(r^2 + c^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{c}{(r^2 + c^2)^{\frac{3}{2}}} \right) dc$$

ただし、 μ は剛性率、 ν はポアソン比、 c は閉口パイプの半径、 r は観測地点からマグマまでの水平距離、 d_1 は閉口パイプの上端の深さ、 d_2 は閉口パイプの下端の深さ、 Δp は過剰圧力である。

これを先程と同様に Dzurisin (2003)で計算されているモデル例($d_1 = 6.5 \text{ km}$, $d_2 = 11.5 \text{ km}$, $c = 250 \text{ m}$, $\nu = 0.25$, $\mu = 20 \text{ GPa}$, $\Delta p = 100 \text{ MPa}$)を計算すると図2-4のようになった。茂木ソースの結果である図2-3と比較してわかることは、鉛直変位が単調な関数ではない点である。パイプ直上から6 km程度の地点で隆起は最大となり、それより内側でも外側でも隆起は小さくなる。すなわちすり鉢状の隆起パターンを示す。

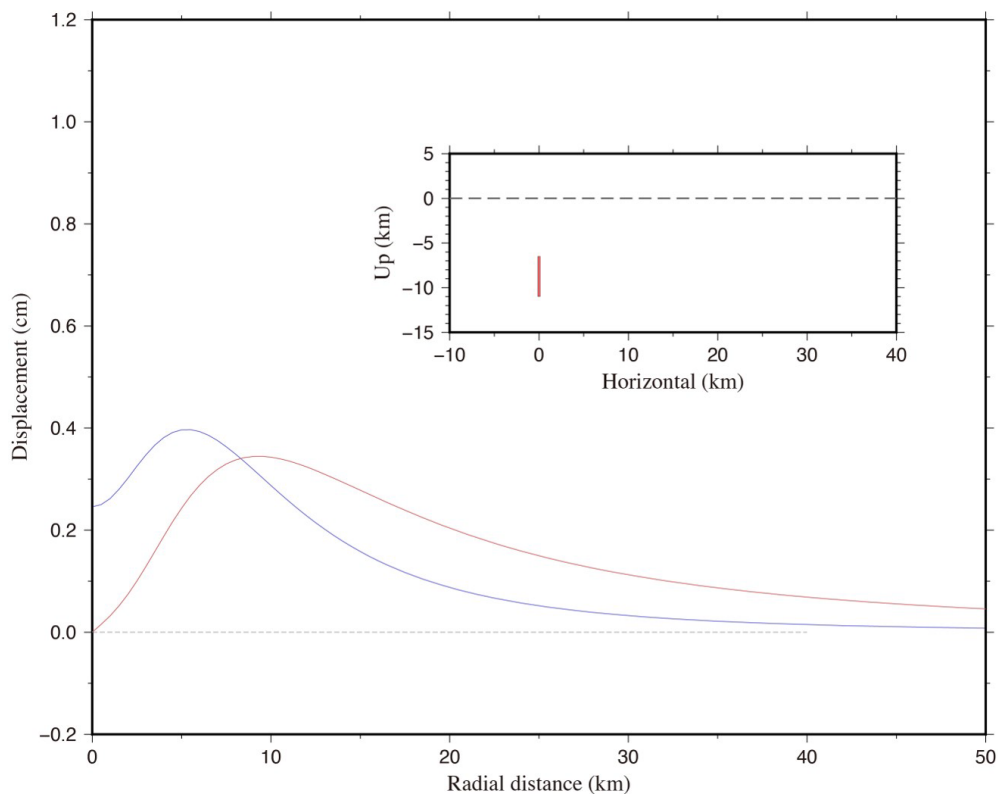


図 2-4 理論式を用いて閉口パイプ（1次元の力源）が作る地表の鉛直変位（青）と水平変位（赤）を、パイプ直上からの距離の関数として計算した結果。挿入図は力源としてのパイプ（赤い線）の深さと位置を大地の断面上にプロットしたもの。

2.5 閉口パイプの直上に見られる沈降域について

以上の数値計算の結果を用いて、閉口パイプ直上に見られる沈降域の大きさは何によって決まっているのかを考察する。ここで、先程図 2-4 で示した例を見ると、閉口パイプの地表までの距離が 6 km なのに対し、沈降域の半径もおおよそ 6 km となっていることがわかる。そこで沈降域の半径は閉口パイプの地表までの距離によって決まっていると予想し、図 2-4 の例で、パイプ上端の深さに相当する d_1 の値を変化させ、沈降域の半径はどのように変化するかを確かめた。数値計算の結果を図 2-5 に示す。上端の深さ以外の値は同一としている。

図 2-5 を見ると沈降域の半径（青い直線が最大を示す距離）はパイプ上端の深さとほぼ同じになっていることがわかる。一方、最大水平動はそれより約 2 倍遠い地点で生じていることもわかる。このことが意味するのは、マグマが火道を上昇するにしたがってパイプ上端の深さが浅くなると、最大隆起は高くなるとともに沈降域が狭くなることが予測できる。

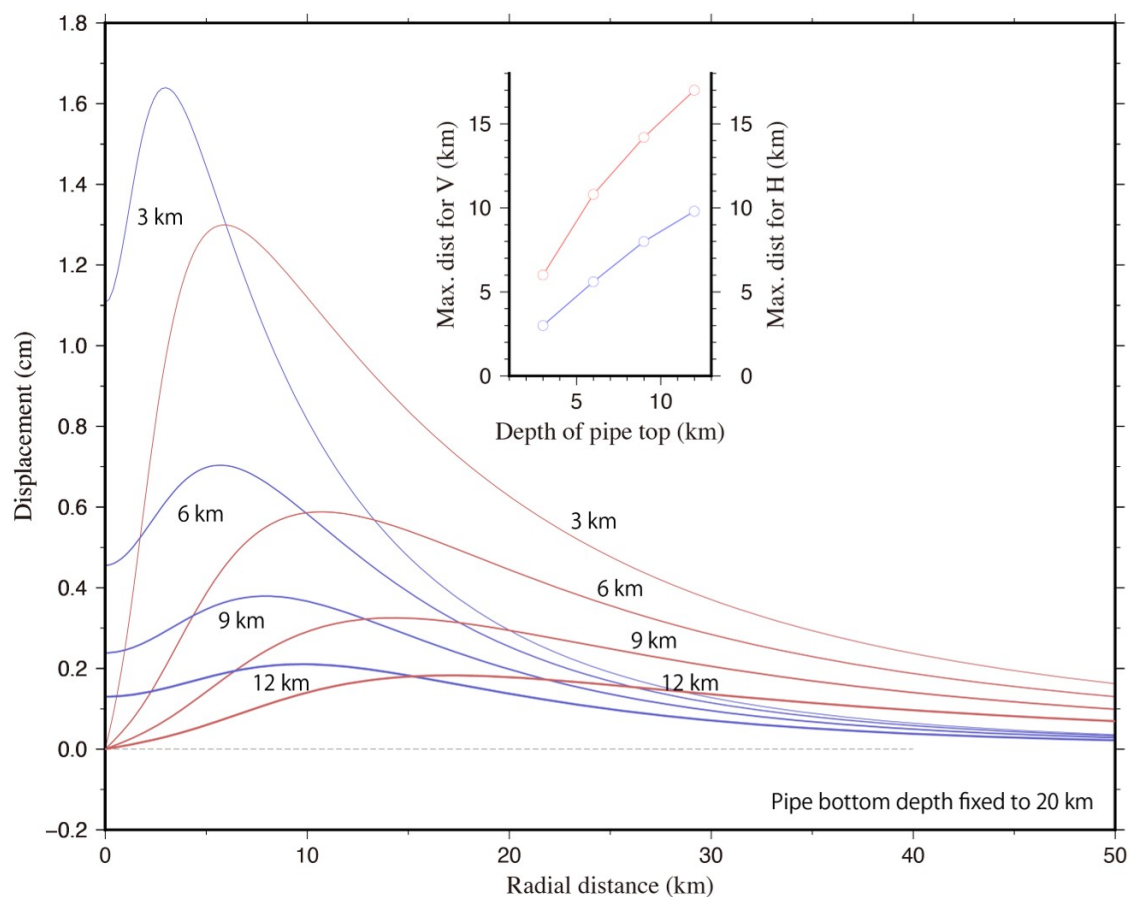


図 2-5 2.4 章に示した理論式を用いて閉口パイプ（1次元の力源）が作る地表の鉛直変位（青）と水平変位（赤）が、パイプ上端の深さのみを 3 km, 6 km, 9 km, 12 km と変化させたときどのように変化するかを示したもの。なおパイプの下端は 20 km で固定している。挿入図は閉口パイプ上端の深さを横軸に、上下（青）と水平（赤）のの最大が生じる位置のパイプ直上からの距離を縦軸にプロットしたもの。青い線はおおむね縦軸と横軸の値が等しい線上に乗ることがわかる。

2.6 閉口パイプ上端の上昇による地殻変動パターンの変化

以上のことをまとめると、パイプ上端の深さが浅くなる、つまり火道をマグマが上昇して噴火が近づくにつれ、最大隆起は高くなるとともに、沈降域の半径が小さくなっていくことがわかる。またマグマ上端の深さは沈降域の半径から推定できることがわかる。この結果を利用すると、InSAR などによって二次元的にとらえた地殻上下変動のパターンからマグマの火道中の上昇をモニターできる可能性が生まれる。第三章ではこれを硫黄島の火山性地殻変動に応用した例を示す。

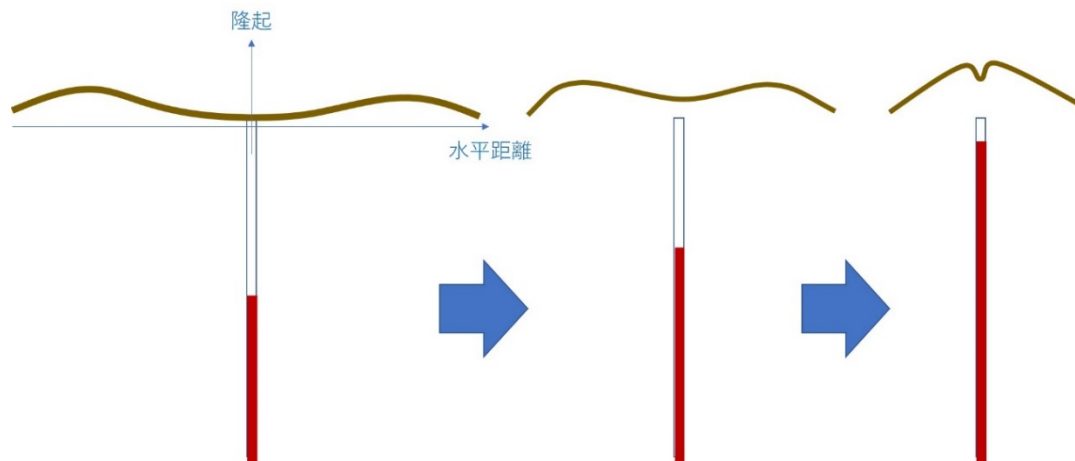


図 2-6 2.5 章に示した結果から、マグマ（赤い部分）が火道を上昇して閉口パイプ上端の深さが減少するとともに、全体の隆起量が増加するだけでなく沈降域の半径が小さくなることが予想される。すなわち隆起量だけでなく隆起の空間パターンからマグマ上端の深さを拘束できることを意味する。

3. 硫黄島の地殻変動

前の章で閉口パイプが作る地表地殻変動を概観し、火道を上昇するマグマがパイプ直上に生じる沈降域の半径からモニターできる可能性を示唆した。本章では、実際の例として伊豆小笠原弧にある活動的火山である硫黄島(図 3 - 1)の地殻変動、特に 2006-2007 に生じた変動について考察する。

気象庁の HP による硫黄島の説明は以下の通りであり、異常に速い隆起が強調されている。「別名中硫黄島。北東-南西方向 8.5km、幅 4.5km の島。島の中北部(元山)は台地状で標高 115m。南端に急傾斜の火砕丘摺鉢山(標高 170m)があり、元山と摺鉢山とは未固結礫層の低い台地(千鳥ヶ原、標高 70m 以下)でつながる。島は基底の直径 40km、比高 2000m の大型の海底火山の山頂部にあり、直径約 10km のカルデラを埋積した後カルデラ火山の山頂部である。元山は浅海底に流出・堆積した溶岩・火砕岩が隆起・陸化した部分、摺鉢山は陸上火山の溶岩と火砕丘。岩石は福徳岡ノ場とともに伊豆諸島では特異な粗面安山岩。構成岩石の SiO_2 量は 54.6~60.5wt.%である。島内は全体に地温が高く、多くの噴気地帯、噴気孔がある。2012 年 2 月から 5 月にかけて旧火口（通称ミリオンダラーホール）のごく小規模な水蒸気爆発など、島内各所で小規模の水蒸気爆発を起こす。島の隆起を示す海岸段丘や断層崖があり、**異常な速さで隆起が続いている**。2007（平成 19）年に「硫黄島」の呼称が「いおうとう」に変更された。」。1996 年の GEONET 点設置後の主な火山活動を表 2 - 1 に示す（その後 2012 年に北海岸付近で水蒸気噴火あり）。また硫黄島に関する包括的な研究報告が防災科研ニュース 200 号(2018)に詳しく与えられている(www.bosai.go.jp/sp/information/news/pdf/k_news200.pdf)。

表 2－1 GNSS 網整備後の主な火山活動 (www.jaxa.jp/press/2006/11/20061114_iou_j.html)

1999(平成 11)年 9 月	水蒸気爆発
2001(平成 13)年 9 月、10 月	海底噴火および小爆発(水蒸気爆発)
2004(平成 16)年 6 月	ごく小規模な水蒸気爆発



図 3.1 硫黄島（伊豆小笠原弧）の空中写真（気象庁 HP より）。北緯 $24^{\circ} 45' 02''$ 東経 $141^{\circ} 17' 21''$ 最高点（手前に見える摺鉢山山頂）の標高は 170m。

3.1 GNSS による観測結果

硫黄島には国土地理院が日本国内に展開している稠密 GNSS 網である GEONET (GNSS Earth Observation Network)の点が図 3－2 に示すように 3 点設置されている(960604, 960605, 149086)。それらの日々の座標値は F3 解として terras.gsi.go.jp から一般に公開されている。またこれらの生データは米国ネバダ大学リノ校(Univ. Nevada Reno UNR)においても精密単独測位の結果が日々の座標値として geodesy.unr.edu からオンライン公開されている(Blewitt et al., 2018)。なお UNR のデータベースではこれらの 3 局は J604, J605, X086 と呼ばれている。

本研究ではそれら 3 点のデータをダウンロードして、座標の絶対的な変動を時系列として図 3－2 の右側にプロットしてみた。またその中から取り出した 2 点のペアにおける、相

対的な変動量は図 3-3 のようになっている(www.gsi.go.jp/BOUSAI/ioto_kisen.html)。図 3-3 を見ると硫黄島は隆起がとても速く、観測開始からすでに何メートルという隆起が生じていることがわかる。さらに図 3-2 からそれらの隆起は一様ではなく、小さな島の 3 点の間でもそれらの違いが大きいこともわかる。島内での相対的な地殻変動量が大きいことから、島内の GNSS3 点だけを用いた部分的な観察では島の地殻変動の全貌を把握することは難しいことがわかる。

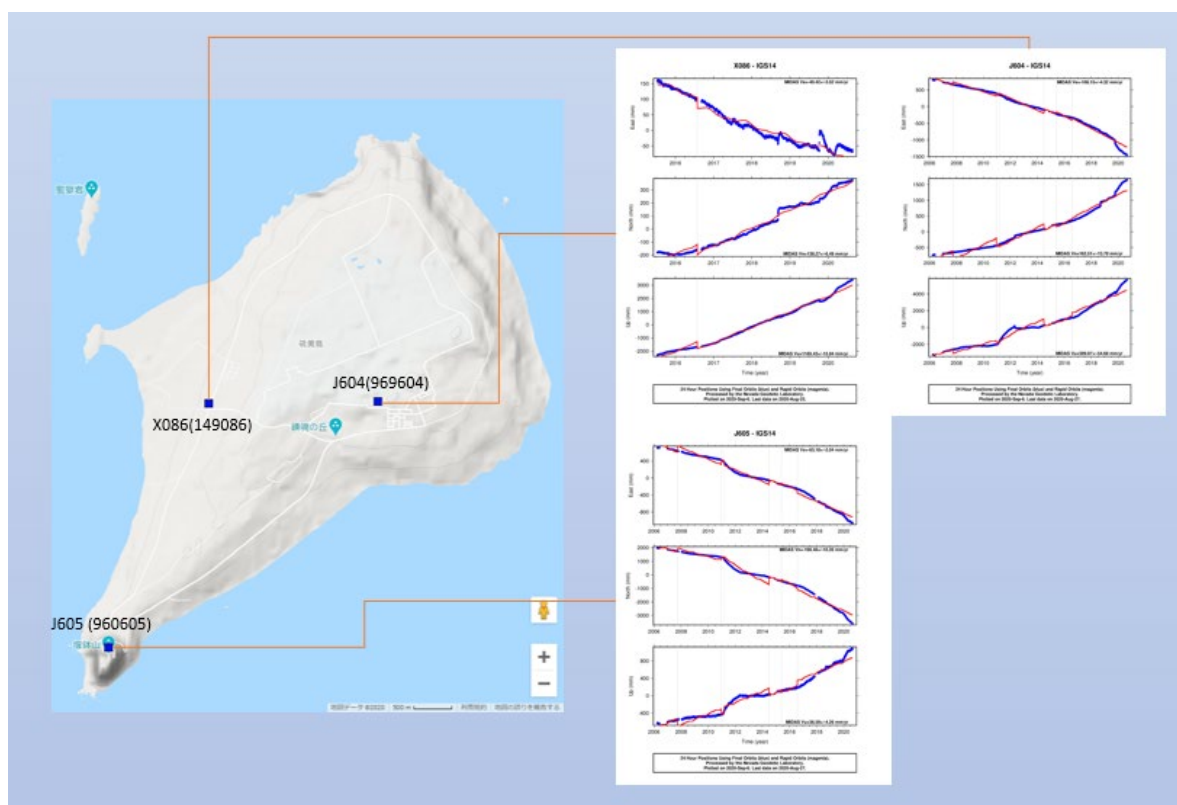


図 3.2 硫黄島（伊豆小笠原弧）に設置された 3 点の GNSS 点（左）、および精密単独測位法で求められたそれらの局の位置（東西、南北、上下）の時系列（右）。ネバダ大学のデータベースからダウンロードしたものでデータは 2006 年以降が利用可能。

硫黄島の GNSS 点はいずれも硫黄島を火山としたときにその山頂にあたる狭い地域に位置しているため、それらの相対運動から全体像を理解するのは難しい。2006 年に始まった特異な地殻変動は GNSS でもとらえられており、JAXA の発表に基づくその時系列を図 3-4 に示す。Iwo-1(960604)は現在の活火山である元山に、Iwo-2(960605)は島内最高地点であるが現在はあまり活発でない摺鉢山に位置した点である。後者を基準に前者の上下位置変化がプロットされている。数年間続いた元山の GNSS 点の摺鉢山に対する沈降（絶対的には隆起）が 2006 年夏に突然隆起に転じたことがわかる。ただしのちに InSAR で明らかになるように元山の GNSS 点は隆起域と沈降域の境界に位置しており、この図から硫黄

島の地下でどのようなマグマの動きがあったのかはわからない。島内の地殻変動を面的にとらえられる InSAR による観測の重要性がこの図から理解できる。

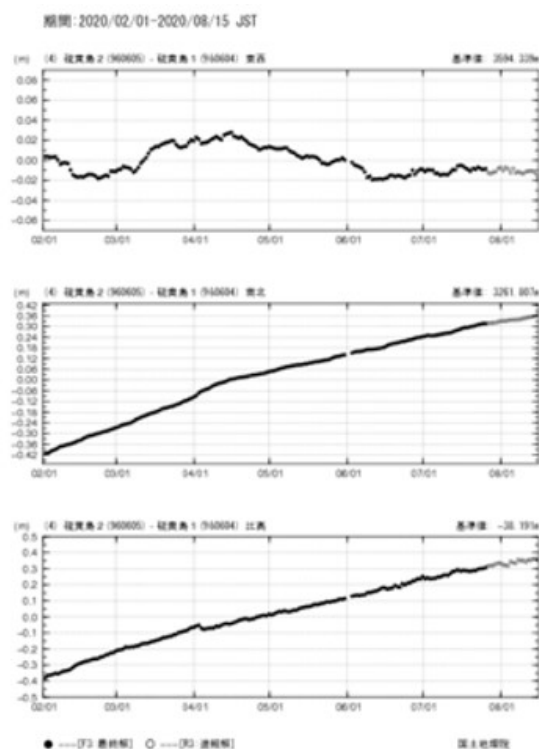
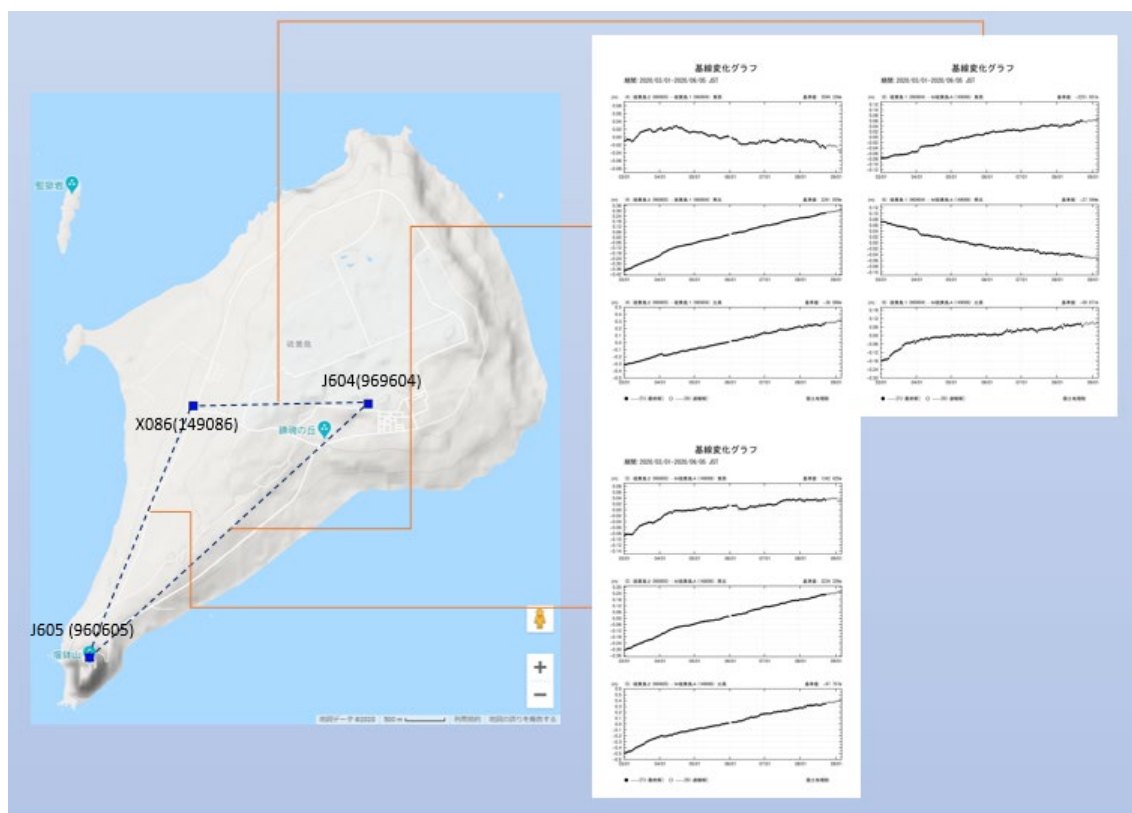


図 3.3 硫黄島（伊豆小笠原弧）に設置された 3 点の GNSS 点(左)、およびそれらのなかから 2 点を取り出してそれらの相対位置の時系列(2020/2/1-2020/8/15) (www.gsi.go.jp/BOUSAI/ioto_kisen.html)を上から東西、南北、上下の 3 成分についてプロットしたもの(右)。摺鉢山点に対する元山点の相対位置変化を拡大したものを左に示す。

Movement of Iwo-1 (Motoyama) relative to Iwo-2 (Suribachiyama)

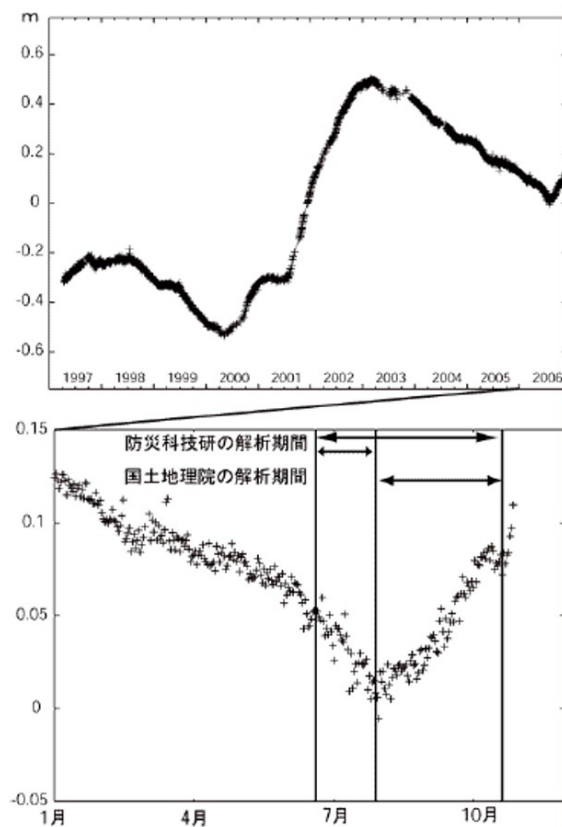


図 3.4 摺鉢山の GNSS 点(Iwo-2) に対する元山の GNSS 点(Iwo-1) の相対的な高さの変化 (上) とその 2006 年部分の拡大 (下)。元山点が 2006 年夏に隆起に転じたことがわかるが、この二点の相対変位から地殻変動の全貌はわからない。
(www.jaxa.jp/press/2006/11/20061144_iou_j.html)

また防災科学技術研究所は GEONET とは独立に三点の GNSS 点を維持している。2006 年に開始した隆起が 2011 年ころに加速し、その後加速減速を繰り返しながら現在に至っていることが報告されている (小澤, 2018)。

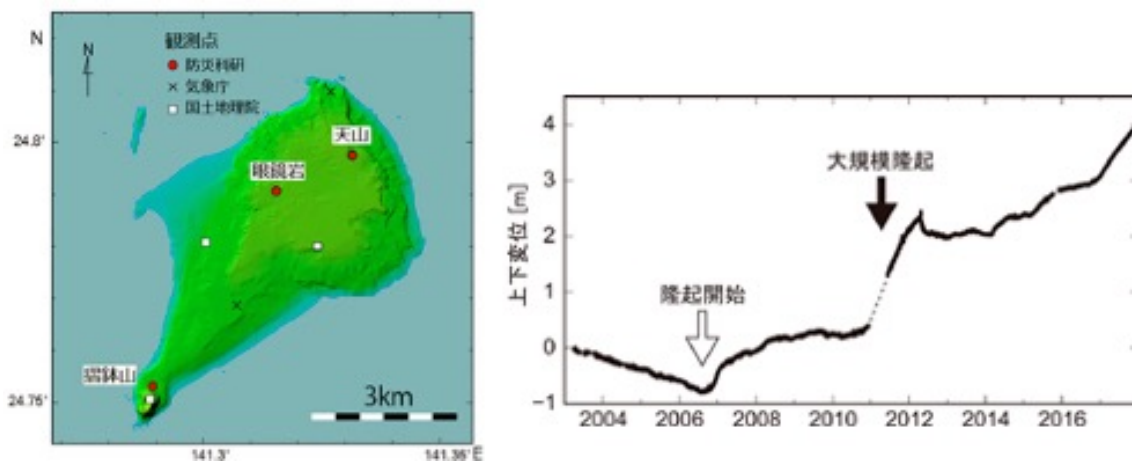


図 3.5 硫黄島に設置された防災科学技術研究所の GNSS 点 (左) (上田, 2018) および天山点の長期間にわたる上下変位 (小澤, 2018)。

3.2 InSAR による観測結果

防災科学技術研究所の小澤によって得られた、陸域観測技術衛星「だいち」に搭載された合成開口レーダ (PALSAR) のデータを用いた結果を紹介する。三つの画像の組み合わせで InSAR 解析を行って得られた硫黄島の面的な地殻変動の干渉画像を図 3-6 に示す。いずれも基準は 2006 年 10/30 であり、2007 年の三月、八月、十二月までの累積地殻変動が色で示されている。2007 年に元山を中心とするすり鉢状の上下変動が進行していった様子がわかる。

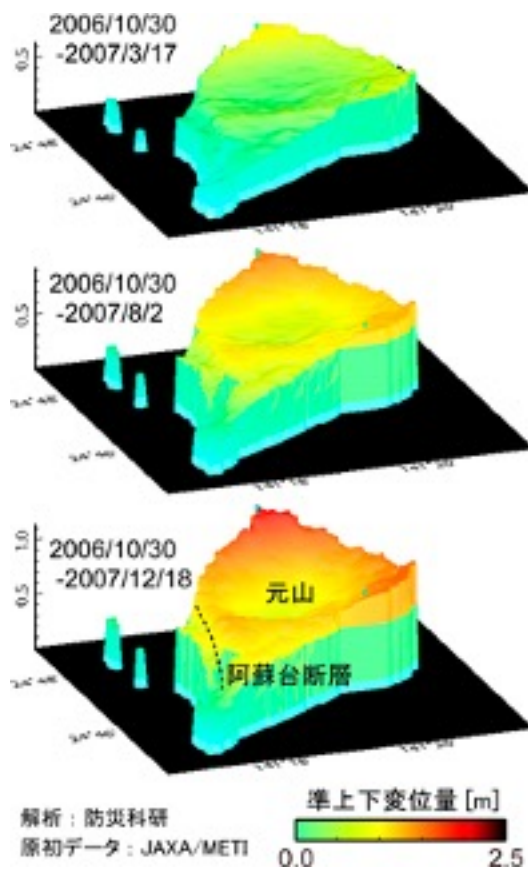


図 3.6 ALOS-PALSAR の InSAR 解析によって得られた硫黄島の面的な地殻変動。色はおおよその上下変位に相当する。小澤(2018)による結果

(www.bosai.go.jp/sp/information/news/pdf/k_news200.pdf)。

このパターンは閉口パイプによって起こるすり鉢状の隆起(図 2-2, 2-4)に似ており、硫黄島のマグマの地下構造が閉口パイプモデルで説明できる可能性を示唆している。

3.3 InSAR の結果に見られる閉口パイプ上端の上昇

図 3-6 に示す干渉画像の下の方(2006/10/30-2007/12/18)を図 3-7 に拡大して示す。島が全体として隆起しているが、相対的な沈降域が元山に見られる。これが閉口パイプの直上に相当すると考えられる。また隆起域が島内にあり、2007 年の年末にはパイプの上端は数キロの深さにまで迫ってきていることが示唆される。一方図 3-6 の上に見る 2007 年三

月までの地殻変動パターンを見ると相対的沈降域の中心は変わらないが、隆起のピークが沈降中心からやや遠いようにも見える。これは図2－6に示すように2007年の春から年末にかけて火道中をマグマが上昇していったことを示唆する。

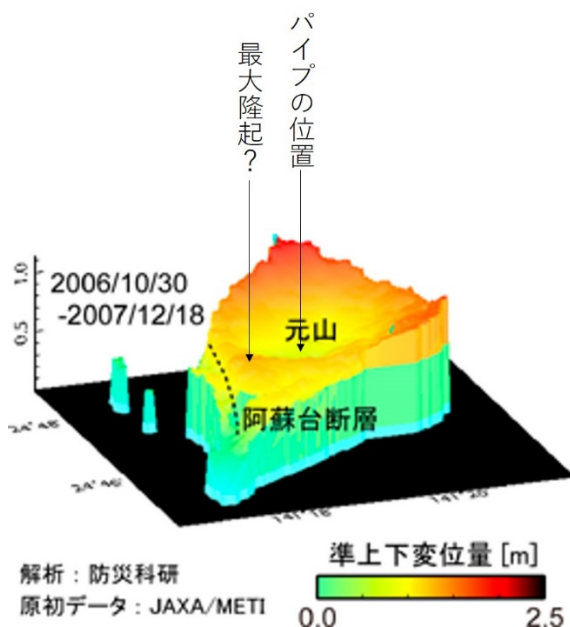


図3.7 図3.6の下図を取り出して、閉口パイプの直上の位置と最大隆起を示す点を矢印でしめしたもの

(www.bosai.go.jp/sp/information/news/pdf/k_news200.pdf)。

さらに古い時期の干渉画像として図3－8の左に2006年6/16-11/1の干渉画像を示す。この図では隆起のピークが島内に見当たらず、島外にあると考えられる。これは、閉口パイプの上端が2006年11月までの時点では3 km以上の深さにあったことを示唆している

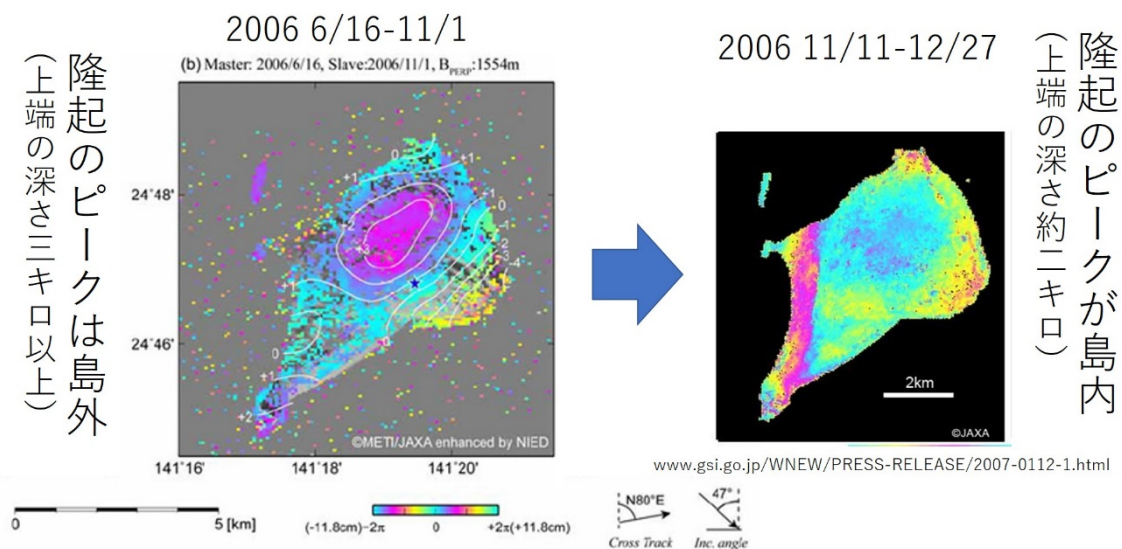


図3.8 2006年11/1以前の地殻変動（左）と以後の地殻変動（右）を反映するInSAR干渉画像の比較。

一方図の右側の 2006 年 11/11-12/27 の干渉画像では、隆起のピークが島内にあり、閉口パイプの上端がおよそ 2km のところにあることがわかり、マグマが上昇してきていることがわかる

4. おわりに

硫黄島ではその後 2012 年に北海岸付近で水蒸気噴火が観測され、2016 年まで毎年のように爆発や異常現象が見られた(図 4-1)。2007 年以降本格的な合成開口レーダ観測の結果は報告されていないが、閉口パイプモデルを用いて時間を追って面的な変動パターンの時間変化を解析すれば有用な知見が得られると考えられる。

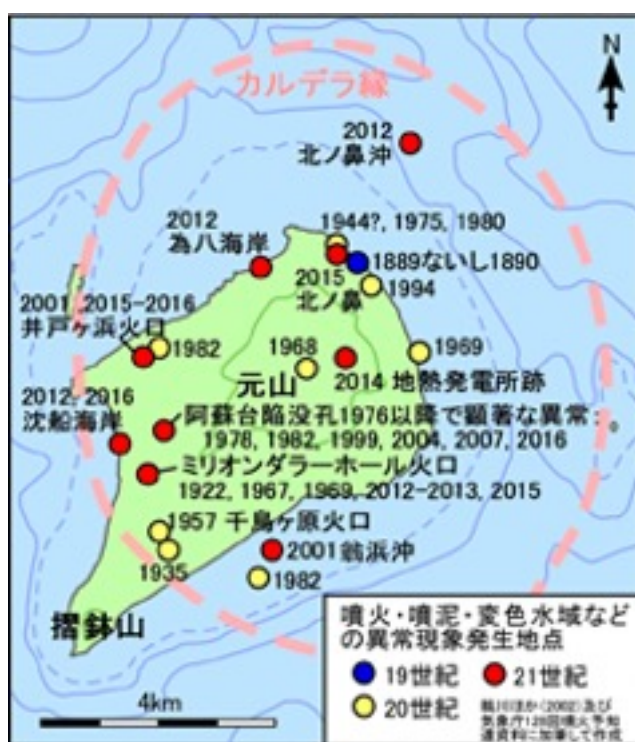


図 4.1 硫黄島で発生した噴火や異常現象の発生地点の分布 (長井、三輪、2018)

5. 謝辞

本研究で参照したデータは国土地理院、防災科学技術研究所、JAXA、ネバダ大学など様々な研究機関からダウンロードしたものである。ここで記して感謝する。

6. 参考文献

Blewitt, G., W.C. Hammond, C. Kreemer, Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science, *EOS*, 99, 2018.

防災科研ニュース No.200 硫黄島特集, 2018.

Dzurisin, D., A comprehensive approach to monitoring volcano deformation as a window on the eruption cycle, *Rev. Geophys.*, 41, 1, 2003.

Mogi, K., Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surface around them, *Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo*, 36, 99–134, 1958.

長井雅史、三輪学央、硫黄島の最近の噴火活動 日本で最も活発な水蒸気噴火地域、防災科研ニュース200号、12-13, 2018.

小澤拓、硫黄島の地殻変動 目に見えるほど大きな隆起、防災科研ニュース200号、6-7, 2018.

上田英樹、硫黄島の火山観測網 日本最南端の火山観測点、防災科研ニュース200号、4-5, 2018.

7. 付録

付録として図2-3, 図2-4を描くのに使用した茂木ソースおよび閉口パイプの計算に用いたフォートランプログラムを添付する。

茂木ソース mogi.f

```
c
      program mogi
c
c      calculate surface deformation by a Mogi source
c
      implicit real*4 (a-h,o-z)
      character lscr*16
c
      poisson_ratio = 0.25
      pi=4.0*atan(1.0)
      dp=pi/180.0
      stepkm = 0.5      ! in km
      step = stepkm*1.e3
      rangekm = 50.     ! horizontal range for calculation
      range=rangekm*1.e3
      a = 595.0          ! radius of magma chamber in m
      rigid = 20.0e9
```

```

dp = 100.e6 ! 100 MPa
c
call getarg(1,lscr)
read(lscr,*) jmode
c
call getarg(2,lscr)
read(lscr,*) depthkm
depth=depthkm*1.e3      ! convert to m
c
if(jmode.ne.0) then
  call getarg(3,lscr)
  read(lscr,*) jcomp      ! 1 for vertical, 2 for radial
endif
c
if(jmode.eq.0) then      ! source display
c
  write(6,100) -depthkm,0.3*a*1.e-3
100  format('0.0',f8.2,f8.4)
c
else if(jmode.eq.1) then  ! 1 dimensional model
c
  nn=nint(range/step)
  do i=0,nn
    r=i*step
    bumbo=r**2 + depth**2
    bumbo=sqrt(bumbo)
    bumbo=bumbo**3
    fact=(1.0-poisson_ratio)*dp*a**3/rigid
    uv=fact*depth/bumbo
    uh=fact*r/bumbo
    if(jcomp.eq.1) then
      write(6,*) i*step*1.e-3, uv*1.e2  ! output in cm
    else if(jcomp.eq.2) then
      write(6,*) i*step*1.e-3, uh*1.e2  ! output in cm
    endif
  enddo
enddo

```

```

c
endif
c
stop
end

```

閉口パイプ cpipe.f

```

c
program cpipe
c
c   calculate surface deformation by a closed pipe
c
implicit real*4 (a-h,o-z)
character lscr*16
c
poisson_ratio = 0.25
rigid = 20.0e9      ! rigidity 20 GPa
a = 250.0           ! radius of the pipe (250 m)
stepkm = 0.5       ! in km
step = stepkm*1.e3
rangekm = 50.      ! horizontal extent for calculation
range = rangekm*1.e3
dp = 100.e6        ! 100 MPa
c
call getarg(1,lscr)
read(lscr,*) jmode
c
call getarg(2,lscr)
read(lscr,*) d1km   ! in km
d1=d1km*1.e3
call getarg(3,lscr)
read(lscr,*) d2km   ! in km
d2=d2km*1.e3
c
depthkm=0.5*(d1km+d2km)
depth=depthkm*1.e3  ! convert to m

```

```

c
    dlengkm=d2km-d1km
    dleng=dlengkm*1.e3      ! convert to m
c
    if(jmode.ne.0) then
        call getarg(4,lscr)
        read(lscr,*) jcomp    ! 1 for vertical, 2 for radial
    endif
c
    if(jmode.eq.0) then      ! source display
c
        write(6,*) -0.5*a*1.e-3, -d2km
        write(6,*)  0.5*a*1.e-3, -d2km
        write(6,*)  0.5*a*1.e-3, -d1km
        write(6,*) -0.5*a*1.e-3, -d1km
c
    else if(jmode.eq.1) then  ! 1 dimensional model
c
        nn=nint(range/step)
        do i=0,nn
            r=i*step
c
            fact=dp*a**2 / (4.0*rigid)
            bumbo=sqrt(r**2 + d1**2)
            term1=(1.0-2*poisson_ratio)/bumbo
            term2=r**2/bumbo**3
            uv1=fact*(term1+term2)
c
            bumbo=sqrt(r**2 + d2**2)
            term1=(1.0-2*poisson_ratio)/bumbo
            term2=r**2/bumbo**3
            uv2=fact*(term1+term2)
c
            uv=uv1-uv2      ! different polarity from Aoki's equation
c
            fact=dp*r*a**2 / (4.0*rigid)

```

```

        bumbo=sqrt(r**2 + d1**2)
        term1=(3.0-2*poisson_ratio)*d1/r**2/bumbo
        term2=d1/bumbo**3
        uh1=fact*(term1+term2)
c
        bumbo=sqrt(r**2 + d2**2)
        term1=(3.0-2*poisson_ratio)*d2/r**2/bumbo
        term2=d2/bumbo**3
        uh2=fact*(term1+term2)
c
        uh=uh2-uh1
        if(i.eq.0) uh=0.0
        if(jcomp.eq.1) then
            write(6,*) i*step*1.e-3, uv*1.e2    ! output in cm
        else if(jcomp.eq.2) then
            write(6,*) i*step*1.e-3, uh*1.e2    ! output in cm
        endif
    enddo
c
endif
c
stop
end

```