

新しい地殻変動観測技術の噴火予知への適用

—新技術による実績と明らかになった課題—

村上 亮*

Application of New Technologies of Crustal Deformation Monitoring for
Prediction of Eruption —Achievements and Future Challenges

Makoto MURAKAMI*

1. はじめに

科学技術の進歩に伴い、さまざまな新しい技術が登場する。それらは質・量ともに革新的なデータをもたらす。自然に対するわれわれの知識を深めてくれる。しかしながら実際に火山現象の観測に応用する場合には、熱やガスにさらされる厳しい環境条件や、電気や通信設備の制約、またデータ取得や解析に要する時間などの制約から、必ずしも期待通りの成果をあげてくれるとは限らない。新しい手法を定着させるためには、実際に観測に応用し、場合によっては噴火時という自然条件的にも社会条件的にも極限的な状況の中で、現実的に利用可能であり有用な成果をもたらすかどうかの実証が必要である。噴火予知に利用可能性のある技術については、藤井(1997)が火山学の幅広い分野を概観しており、現在でも、項目について大きな修正が必要とは思われない。ここではそのフォローアップの意味で、実用化が比較的順調に進んだ技術の一つである地表変動の計測技術が、どのように実際の噴火の際の観測に応用され、どのような効果をあげ、また将来への課題がどのように残ったかについて紹介する。

2. 地殻変動と噴火予知

地下のマグマなどの物質の動きに伴い、さまざまな変化が地表面に生じる。これらの変化は、地下の物質の移動や応力の変化に対応しており、火山周辺の地殻変動の観測から、地下の力源の様子を知ることができる。GPS

連続観測による空間的・時間的高密度な地殻変動把握、合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar: SAR) による面的な観測、また航空機レーザースキャナーによる地表形状計測技術などが登場し、空間的にも時間的にも高い分解能で、高精度地殻変動観測を行えるようになった。また、特にGPSにおいては、観測および解析のリアルタイム性も格段に向上している。

地殻が半無限の弾性体により構成されているという比較的単純な仮定をおいて地殻変動を解析することによって、地下における力源の振る舞いを知ることが可能である(例えば、山科, 1997)。それらから得られる火山学的に重要な情報は次のようなものである。

1. マグマ溜まりの位置と深さ
2. マグマの移動とその量(より深部からの供給や、噴火にともなう流出)
3. ダイク形成とその位置、深さ、厚さ

ただし、地殻変動観測は状態の何らかの変化を測定の対象としているため、それが無い場合には、仮に、巨大なマグマ溜まりが地下に静かに存在していても捉えることはできないという大きな制約もあることには、常に注意が必要である。

これらの地殻変動観測の特徴を理解しながら、その有効性を十分に発揮させて、火山噴火予知に貢献する情報を提供できる状況は、おそらく次のような場合であろう。

1. 対象とする火山でマグマの蓄積が進んでいる場合、マグマ供給システムや蓄積レートを理解する。また、過去の噴火における噴出量などがわかっている場合には、現在がおおよそどのステージにあるのかを知る。
2. 対象とする火山で活動が始まり、ダイクが形成されたり、マグマや流体が移動している場合、その位

* 〒305-0811 つくば市北郷1番
国土交通省国土地理院地理地殻活動研究センター
Geography and Geodynamics Research Center, The
Geographical Survey Institute, 1-Kitasato, Tsukuba,
Ibaraki, 305-0811 Japan.
e-mail: mccoopy@gsi.go.jp

置や深さを推定する。

さらに、将来への期待として、リアルタイム観測が可能になればシミュレーション技術と融合して、新しい観測データを用いて次々とモデルを更新しながら活動の推移を予測したり、地震観測、地球電磁気観測など、他の観測事実を統合させ総合的なモデルを構築して予測の信頼性を向上させることが期待される。また、過去の活動のパターン、類似火山の活動パターンなどの情報をデータベースとして収集・体系化して、検索により瞬時に参考事例を探し出しそれとの比較を行うことにより、想定するシナリオの選択肢を増やし効率的に取捨選択を行えるようにすることも将来の重要な課題であろう。

もちろん、現実の火山噴火予知の実践においては、上であげたような理想的な状況で予知の取り組みがなされるのではなく、さまざまな制約の中で、可能な限り速やかに活動を理解し、予測を行う努力がなされるのが実情である。

地殻変動は、これまでも噴火現象を理解する上での重要な観測項目として位置付けられてきた。例えば、1986年の伊豆大島噴火(橋本・多田, 1988)や1991年の雲仙噴火において(西・他, 1995)噴火のメカニズムを理解するための重要な情報を提供している。しかし、従来の観測手法は、頻度やカバーする空間的範囲に限界があった。

最近になり、地殻変動観測技術はさらに飛躍的な進歩を遂げ、観測の精度、頻度、空間分解能、リアルタイム性などが、従来と比較して格段に向上している。2000年有珠山噴火や三宅島噴火は、このように地殻変動観測の新兵器の準備がある程度整っていた段階で発生した。新技術の成果を活用し噴火のメカニズムを理解し活動を予測する試みがなされ、相当の成果が上がったと思われるが、それと同時に、現段階の技術の限界や将来への課題も明らかとなった。

以下においては、それらの実例を紹介しながら、GPS連続観測、衛星および航空機SARによる地表観測、航空機搭載レーザースキャナーによる地表観測など、新しい手法によりどのような情報が得られ、どのように効果をあげたか、また、どのような課題が明らかになってきたかをとりあげ、火山噴火予知における新技術の導入の効果を検証する。

3. GPS連続観測

GPSは、受信機でNAVSTA/GPSとよばれる米国の衛星からの電波を受信し、受信アンテナの位置を正確に求める技術である(例えば、Leick, 1995)。現在では、観測を行いたい場所に固定した受信機により連続的に観測

されたデータを電話線などを通じて中央局に送信し、速やかに測位解析計算を行って、ほぼリアルタイムで観測局の位置の変化を連続的に観測することができるようになった。

GPS連続観測は、防災科学技術研究所による先駆的な成果があり、1989年に伊豆半島東方沖で発生した手石海丘の海底噴火に伴う地殻変動が見事に検出された(Shimada *et al.*, 1990)。

その後、国土地理院も、1994年に東海・南関東地域に110点からなる連続観測点網を構築し連続観測を開始した(多田・他, 1997; Miyazaki *et al.*, 1997; 宮崎・畑中, 1998)。その後何回かの拡張を経て、現在では約1000点規模の観測網が全国を覆っており、2003年3月末までに1200点となる計画である。

世界にも類をみない程に高密度なこの連続観測網によるデータから、プレート運動による日本列島の歪の蓄積の空間分布が明らかにされたほか、北海道東方沖地震、三陸はるか沖地震など、さまざまな地震のCoseismic地殻変動および余効変動の検出がなされている。また、豊後水道(Ozawa *et al.*, 2001)、2001年東海地方などにおけるサイレントアースクエークも検出された(小沢・他, 2002)。さらに、1998年岩手山活動(Nishimura *et al.*, 2001a; 西村, 2002)、2000年有珠山噴火(村上・他, 2001a)、2000年三宅島噴火(Kaidzu *et al.*, 2000; Nishimura *et al.*, 2001b)、神津島近海地殻活動など火山活動に伴う地殻変動が時間経過とともにモニターされ、GPSは、地震や火山活動などの地殻活動を理解するための不可欠のデータとなっている。

GPS連続観測の特徴は、連続的にしかも3次元的に地殻変動を計測することが可能であることである。火山活動に伴う地殻変動など、変動が急速に進展する場合でも、時々刻々、活動するマグマの動きに対応した地殻変動情報を検出し、活動をリアルタイムに捉えることも可能となりつつある。また、長期間のデータを解析することにより、伊豆大島(村上・他, 2002)、三宅島(2000年噴火以前)、桜島など、いくつかの火山において、マグマの蓄積過程と考えられる膨張性の地殻変動も観測されている。これらは、対象火山のマグマシステムを理解するための極めて重要なデータである。

データの観測精度は、水平成分1cm程度、鉛直成分2~3cm程度であるが、条件が整っている場合には数mm程度の変動(水平成分)の検出もできるようになった。現在は、最速でも3時間に一回程度の計算頻度であるが、時間分解能には向上の余地がある。GPSの観測自体は最高毎秒1回行うことは難しくないので、リアルタイムで連続的に観測・解析することにより、より急激に

変化する現象を追跡することも可能となり、活動のダイナミクスに対する理解がさらに深まることも期待される。

4. リモートセンシングによる観測

GPSの空間分解能には限界があるため、それを補う形で、空間的に密なデータ取得の手段として期待されているのが、リモートセンシングによる地殻変動計測である。

そのうち合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar: SAR) は、人工衛星や航空機から発射されたマイクロ波の地上からの反射を数値的に解析処理し、数 m から数 10 m の大きさの画素毎に強度と位相を測定する。観測を繰り返しデータを比較することによって、対象物の位置の時間的な変化を捉えることができる。

特に、干渉 SAR は、画素毎に位相の差をとることによって、1 cm 程度の精度で地殻変動を明らかにすることができる。衛星搭載のセンサーを利用する場合、1 回の観測で 100 km × 100 km 程度の広い範囲にわたって、数 10 m から数 m に 1 点という高解像度で測定がなされる。航空機の場合は、使用波長にもよるが、通常、撮影範囲は衛星より狭いものの計測の分解能は高い。

干渉 SAR は、時期や軌道をずらせて取得した 2 つの観測データの比較から情報を得る。同一の軌道から時期を変えて地表を観測し、それらを比較することによって観測時期に挟まれる期間中に発生した地殻変動を 1 cm 程度の精度で面的に明らかにする (リピートパス干渉) 場合と、位置をずらして機体に固定した 2 つのアンテナを用いて、一回の飛行で同時に観測する (シングルパス干渉) 場合がある。シングルパスでは、2 つのアンテナでのわずかな受信時間の差が地表の地形によることから、この時間差を解析して地形 (標高) を面的に精密に (標高の精度が数 m 程度) 明らかにする。変動が大きい場合には繰り返し観測から、地殻変動 (主に上下) を明らかにすることができる。これらの手法によって、地形変動や地殻変動を面的に捉えることができ、変動が狭い地域に集中して発生したり、複雑な空間パターンをとることが多い火山を対象とする場合、リモートセンシングは、極めて有効な手段となる (村上・他, 2000)。

これまでに、伊豆大島のカルデラの沈降 (村上・他, 2002) や、三宅島の火口陥没の時間推移の様子 (長谷川・他, 2000) などがこの手法によって明らかになっている。また、1998 年の岩手山の活動においては、火山性と考えられる隆起のあと、*Mj* 6.1 の岩手県内陸北部地震が発生したが、これらにともなう地殻変動も明らかにされている (西村, 2002)。この技術が登場した当初は、異

なる解析グループによる結果に若干の差異が見られた。その後の検討により、その差は、主として地形と関連のある大気伝播遅延による誤差の扱いの差であることがわかっていく。最近では地形と関連する成分を適切に取り除くことにより、大部分の伝播遅延誤差が消去され、結果として信頼度の高い計測が可能であることが確認されている (藤原・他, 2000)。

干渉 SAR によって、噴火間の定常状態にはマグマ供給システムの理解につながるデータが得られることが期待される。また、活動中は、高頻度な繰り返し観測が実施できれば、ダイクの成長など、マグマの移動を追跡するデータが得られる。ただし、衛星の場合は、噴火にあわせて衛星軌道を直ちに変更することは事実上不可能であり、観測周期は数十日から一週間程度に固定されている。このため、緊急な観測を随時行ったり、それを繰り返すことは難しい。一方、航空機搭載型の干渉 SAR は衛星のような制約がなく、高頻度に観測を繰り返すことが可能である。わが国の研究グループによって、航空機干渉 SAR の実用化に向けての研究が行われており、航空機の航路誘導技術や飛行経路推定技術が向上し、干渉を常に確保することが技術的には可能となってきた (宮脇・他, 2002)。しかしながら、経費がかかることや専用の航空機が必要であることなど、実用化に向けての課題はまだ残っている。

航空機搭載レーザースキャナーは、ヘリコプターなどの航空機にレーザーを搭載し、地上を走査しながら発射したレーザー光の伝播時間を計測し、地表の形状を明らかにする手法である。極めて高精度であることと、樹木の影響を取り除いて、直接の地表の形状を詳細に把握できることから、植生に覆われて判別しにくい細かい火山地形を明瞭に観察できるほか、繰り返し観測することによって、地殻変動を面的に捉えることも可能である。2000 年有珠山噴火では、潜在溶岩円頂丘の成長の様子が計測され、噴火時でも観測が可能であることが実証された (仲野・他, 2001)。

5. 2000 年有珠山噴火において地殻変動観測の果たした役割

2000 年有珠山噴火は、3 月 27 日の有珠山周辺の地震数の増加とともに始まった。

有珠山周辺では、3 点の GPS 連続観測装置が山体を取り巻くように山頂から約 5 km の距離に配置されていた。国土地理院は、通常は 24 時間ごとの解析に加え、6 時間分のデータを用いて 3 時間ごとに位置を計算し、変動を追跡する緊急的な解析を開始した。その結果、地震数が増加したのとほぼ同時に、観測点間の距離の伸び

が始まったことが確認された。この伸びは数日間継続した後、一転して急激な短縮を始めた。この直後の3月31日に、最初の噴火が発生している。地震数の急激な増加とともに、地殻変動が観測されたことは、地下においてマグマの移動が始まったことが強く示唆された。

主として地殻変動データを用いて推定されたマグマの移動モデルの一例を以下に紹介する(村上・他, 2001a)。マグマは、3月27日から活動を開始し、有珠山のほぼ直下の深さ約10 kmにあると考えられるマグマ溜りから、地震を発生させながら29日ごろにかけて上昇したと考えられる。その後29日から31日ごろまで、山頂の下2~3 kmの浅い場所にマグマが水平のシート状に貫入しながら、山麓西側に出口を求めて上昇し噴火した。マグマの本体は地表までは到達しなかったが、地下の極めて浅いところまで達し潜在溶岩ドームを形成したことが示唆される。

GPSで観測された最初の伸びは、マグマ溜りからのマグマの上昇に対応し、その後の短縮は、マグマ溜りの収縮と山頂直下のマグマのシートの形成に対応していると考えられる。

2000年有珠山噴火について、噴火予知の観点から見ると、連続的な地殻変動観測とそれに基づくモデル構築を準リアルタイムに行う最初の機会となった。一定の成果が上がったと考えられる部分があると同時に、課題が残っていることも明らかとなった。

今回の活動においてGPS連続観測による解析結果が果たした大きな役割は、

- 1) 活動の開始時点において地震数の顕著な増加と同時に発生した地殻変動を準リアルタイムで捉え、地下におけるマグマの移動が始まったこと強く示唆する情報が得られたこと。
- 2) 有珠山の直近だけでなく広く周囲に均等に分布した観測点によって、かなり遠地(50 km程度)でも有珠山活動に伴う地殻変動が観測され、マグマ溜り(深さ約10 km)の収縮が捉えられたこと。この収縮は4月には停滞し、地表での活発な水蒸気爆発や隆起現象とは対照的に、マグマ溜りからの新しいマグマの供給はないことが、早い時点で確認できたこと。

があげられる。このような情報は防災上の判断を速やかに行う上で重要な情報となったと考えられる。しかしながら、活動開始時点では、有珠山の周囲には山頂から5 kmの距離にGPS連続観測点が3点しか配置されていなかったため、力源の正確な位置が特定ができなかった。今回の活動でも明らかになったように、火山性の地殻変動は力源の深さに応じて、特定の狭い地域に集中し

て発生する(浅い)場合と、広範囲に現れる(深い)場合があり、マグマの活動を的確に捉えるためには、火山の周囲に展開する稠密な観測点の分布が不可欠であることがわかった。

また、GPSは相当高密度に配置したとしても、点ごとの離散的なデータである基本的な制約からは逃れられず、狭い地域に集中して発生するタイプの地殻変動を見逃さないためには、干渉SARやレーザースキャナなど面的な観測とGPS観測を組み合わせた形で観測を行うことが重要である。特に、機動的に観測できる航空機SARによる観測が加わることが望ましい。このような観測・解析を緊急に繰り返し実施することが可能になれば、地下のマグマの移動をかなりの精度で速やかに推定でき、その情報に基づき、どの地点でマグマが噴出しうるかという予測に対して重要な情報を提供できる可能性が開けると思われる。

有珠山噴火では、噴火の前に避難がなされたことや、終息の判断が比較的早期になされて短期間で避難が解除されたことから、噴火予知が適切に行われた事例と考えられる。GPS連続観測を主体とする地殻変動分野の貢献としては、地下のマグマの移動を敏速に観測しマグマの移動を早期に確認したこと、深部のマグマ溜りからの上昇は早期に停止し、浅部への再度の供給の兆候がないことを突き止め、火山活動の終息の判断に資する材料を提供できたことが大きかったと考えられる。GPS連続観測の成果は、従来から困難とされてきた火山活動の終息を判断するための重要な情報を提供することに大きな期待を抱かせるものであった。

なお、ここまでは、GPSの成果を主に紹介したが、2000年有珠山噴火に際しては、リモートセンシング技術も精力的に応用され、SAR(浦塚・他, 2001; 藤井・他, 2000; Tobita *et al.*, 2001; 矢来・他, 2000)や、レーザースキャナ(仲野・他, 2001)による観測結果が報告されている。これらは、即時性の観点からは、必ずしも満足できるものではないが、リモートセンシング観測がもたらす地殻変動の空間分布の詳細さは他の手段では得られないものであり、観測の機動性や解析の敏速性を向上させることにより噴火予知に十分貢献できる技術であることが実証されたと考えられる。

6. 2000年三宅島噴火および神津島近海地殻活動において地殻変動観測が果たした役割

有珠山噴火の余韻がまだ収まっていなかった2000年夏、最近のもう一つの大きな火山活動である伊豆諸島における地殻活動が始まった。これは、地震活動としても地殻活動としても、近年まれにみる大きな規模を持つ活

動である。これらの活動は顕著な地殻変動を伴っており、GPSの連続観測により、伊豆諸島北部を中心として広範囲の地殻変動が観測された。地殻変動は房総半島や東海地域にまで及んでいる (Nishimura *et al.*, 2001b)。また、直接の因果関係は必ずしも明らかでないが、東海地方では、この活動による広域地殻変動が観測され、その後しばらくして、プレート境界上でゆっくりすべりが始まり、その後も継続中であることも明らかになっている (小沢・他, 2002)。

今回の活動域は、島嶼部を中心としているため、活動域の大半を占める海域での地殻変動観測は大きな制約がある。これらの地域では、従来から地震や火山活動が活発であるため、この活動が始まる以前から、三宅島・伊豆大島にそれぞれ4点、神津島に2点、式根島、利島および御蔵島に1点のGPS観測点が設置され運用されていた。これらの観測点により、観測史上まれに見る地殻活動の推移を克明に観測することができた (Kaidzu *et al.*, 2000; Nishimura *et al.*, 2001b)。

三宅島内にあった4点のGPS点では、2000年6月26日の地震活動の発生とほぼ時期を同じくして急激な地殻変動が始まったことが観測された。この活動が始まる以前にも三宅島の地下にあるマグマ溜りへのマグマの供給を示唆するゆっくりとした膨張と島の南西部の緩やかな隆起が観測されており、噴火に向けての準備が着実に進んでいると考えられていた。

地震の急激な増加以後、島の西半分の南北への伸張と南西部の阿古にある観測点の顕著な沈降を特徴とする変動が見られ、阿古の直下から北西海域に伸びるダイクが形成されたことが示唆された。その後は、島内の観測点間の距離が急激に短縮する変動が7月から9月初旬までの間、継続したが、全島民の島外への避難のため停電となり観測が中断した9月中旬には、変動は、かなり鈍化していた。その後も緩やかな島の収縮が現在まで続いている。2000年9月中旬までの時点で、水平変動は、水平変動で最大80 cm、上下変動で最大70 cm (沈降) に達した。2000年8月下旬頃から、大規模な脱ガスが継続しているが、脱ガス量と収縮には関連があるように見え、脱ガスによるマグマ溜り内物質の体積減少を反映した収縮である可能性がある (村上・他, 2001b)。

さて、最初三宅島で始まった地震活動は、その後北西の方向に移動した。神津島の東方沖でもM6クラスを含む活発な地震活動があり、7月始め頃からは、神津島と新島間の距離が伸張する地殻変動が顕著となってきた。神津島、新島、式根島は、それぞれが火山であり、神津島の北部を中心として、2000年以前にも大きな地殻変動が継続して発生しており、その原因が火山性のものであ

る可能性が高いと考えられていた。神津島と新島の距離が伸び始めたことにより、神津島周辺における新たな噴火も懸念されたため、GPSにより変動の経過が注意深くモニターされた。結局、消長を伴いながらも、10月には、変動はほとんど収まった。ただし、変動は現在も僅かではあるが、継続しており、両島の距離は緩やかに伸びている (2002年7月時点)。変位量は、2000年10月の段階で、神津島と新島の距離の伸びが80 cm以上に達し、また、神津島の隆起は20 cmを超えている。

また、今回の三宅島噴火活動においては、山頂部で巨大な陥没孔が出現しそれが拡大するという極めて特異な現象が発生した。また、そこから放出されるガスは世界の他の火山においても類例がないほど膨大な量である。陥没孔の形成や継続する火山ガス噴出のメカニズムについては、未だにその全容が明らかとなっていないが、時間経過に伴う陥没の進行の様子を知ることが、そのメカニズムの解明と今後の予測にとって極めて重要であると考えられる。

陥没火口の地形計測は、空中写真測量、航空機干渉SAR、さらにレーザースキャナなどにより繰り返しおこなわれ、それらを集積することにより陥没孔の成長の様子が明らかにされた (長谷川・他, 2000)。時間的に離散的な観測であるので、時間変化の詳細な様子は不明であるが、陥没の主要な期間は、7月9日頃から8月の初旬までであり、8月以降は拡大が余り進んでいない様子が分かった。9月28日の段階では、陥没量が約6億立方メートルに達している。

さて、GPSの連続観測結果などを総合すると、今回の活動に伴う地殻変動は、三宅島のマグマ溜りの収縮、三宅島西方海域や、神津島近海のマグマの貫入、さらに神津島近海に存在するクリープ性断層の組み合わせで、地殻変動をほぼ説明できることがわかっている (Nishimura *et al.*, 2001b)。また、これらの力源は震源の分布など地震活動に関するデータとも整合的である。各力源の時間とともに変化する様子をGPS観測により把握することができ、地殻変動観測は、火山活動の推移を理解する上で有用な情報を提供できたと考えられる。

今回は、GPS観測の思わぬ弱点も明らかになった。通常のGPS観測点では、商用電源を用いGPSデータの回収には固定電話回線を用いているために、停電などの不測の事態が発生した場合、観測ができないという問題を抱えている。実際に三宅島では2000年9月初旬以降、全島避難のため、電力の供給や電話による通信が停止し、観測が継続できなくなった。このような状況にも対応するため、太陽電池と風力発電を併用した可搬型のGPS観測システムが開発されていた。全島避難後に設置され

た GPS 観測点には、これが用いられている。設置当初は、衛星によるデータ転送装置の不具合などにより観測が途絶えることも多かったが、現在ではその問題もほぼ克服され、安定した観測が継続している。ただし、多少の不具合は生じ、その都度現地での修理や調整が必要であるため、完全な無人化運用にはまだ改良が必要である。

今回の活動において GPS 連続観測による解析結果が果たした大きな役割は、

- 1) 活動の初期の時点において地震数の顕著な増加とともに地殻変動の発生を準リアルタイムで捉え、地下におけるマグマの移動が始まったことと、マグマは西方に移動し、主要な活動は三宅島の西方海域に移ったことを強く示唆する情報が得られたこと。
- 2) 7月初頭から始まった神津島と新島の距離の伸張をいち早く確認し、神津島東方沖海底にマグマの貫入が始まったことを明らかにしたこと。

があげられる。このような情報は防災上の判断を速やかに行う上で重要な情報となったと考えられる。

その一方で、以下のような問題点も明らかとなった。

- 1) 島内が停電して以降、GPS 観測に中断が生じ復旧までに長い時間を要した。
- 2) 7月に入ってから三宅島島内では顕著な収縮が続いていたが有効なモデルを提示できなかった。また、山頂での噴火の発生や、山頂カルデラの陥没、大量の火山ガスの発生などの展開を予測できなかった。
- 3) 他機関により、地震、傾斜など関係する(準)リアルタイム連続観測がなされていたが、噴火活動中に緊急に実施したモデル解析には、これらを包含できなかった。

これらについては、今回の経験を生かし、観測システムの運用性・信頼性を高める努力を続けることと、さまざまな観測の結果を総合的に火山を理解する体制を構築することが必要であると考えられる。

なお、藤井(1997)には、特に取り上げられてはいなかったが、三宅島の活動においては、絶対重力計による重力観測も行われた。重力は地下の物質の移動を万有引力の変化として直接計測できるため、マグマの振る舞いを推定する場合に重要な観測データを提供する。絶対重力計を用いることによって、従来に比べ観測の信頼度が向上し、地表で陥没が起こる前に地下ですでに空洞が形成されていたことやマグマの流出に伴うと考えられる地下の物質の欠損に関する情報が得られたと報告されている(古屋・他, 2001)。地震動の存在など、環境条件が必ずしも良好でない火山近傍でも絶対重力観測が可能と

なったことが実証され、マグマの挙動を理解するための新しい手段が加わった意義が大きい。ただし、重力変化は上下地殻変動からも生じるので、重力観測と地殻変動観測が同時に行われることが重要であり、各種の観測が総合的に行われる必要があることを示す一例である。

7. まとめと今後への課題

2000年には、有珠山噴火、三宅島噴火、神津島周辺の火山性活動に伴う群発地震活動が相次いで発生し、最新技術を用いた地殻変動観測が火山活動の理解に極めて有効であることが実証された。しかし同時に、これらの経験を通じて、観測体制や解析の方法に改善すべき要素があることも明確となってきた。

観測については、活動開始以前から火山周辺の稠密な観測網の充実させておくこと、活動開始後の降灰、停電、通信途絶などの障害に強いシステムであること、リアルタイム性をさらに高めることが必要である。さらに干渉 SAR、レーザースキャナー、空中写真など面的観測を高頻度を実施し、時間分解能、空間分解能の両面から総合的な観測が行われればさらに有効なデータが得られることなども明らかとなった。

解析については、対象とする火山の噴火履歴による個性・特徴の把握、世界の類似火山の活動推移の理解、対象火山が活動を始める前の定常的な地殻変動の把握とマグマ溜りの位置や、弱面の存在の事前の特定、傾斜、地震など他の観測データを速やかに入手し、総合的な解析を行うことの重要性が明らかとなった。

科学技術の進歩は目覚しく、同様の新技術がこれからも次々と登場してくることが予想される。また、それは火山学以外の分野から、突然現れる可能性も高い。例えば、今回紹介した GPS や SAR など、本来火山観測を特にめざして開発されたものではない技術が火山学に応用され効果を発揮している。今後も、幅広い分野を視野に入れて噴火予知に利用可能性のある技術の種を探す努力が必要であろう。また、既存技術の改良にも引き続き努力して、機動性や解析の迅速性を高め、より有効な手段として成熟させてゆくことも重要であると考えられる。これらには引き続き、藤井(1997)が参考になる。

最後に、改めて強調するまでもなく、火山学はさまざまな専門分野が関係する総合科学である。噴火予知をさらに高度なものにするためには、個々の専門分野における最先端の技術を開発するのみならず、往々にして、一見相矛盾する結果を与える個々の専門分野の知見を統合して、総合的な火山像の構築につなげていく技術・手法の高度化も必要である。今後これらの課題が克服され、火山に関するわれわれの理解が深まり、噴火予知の技術

もさらに向上することが期待される。

引用文献

- 藤井直之 (1997) 噴火予知の新たな展開を求めて—噴火予測のための革新的観測手法. 火山, 42, 467-471.
- 藤井直之・島田政信・小林茂樹 (2000) 衛星搭載合成開口レーダーによる有珠山周辺の地殻変動の時系列 (1992~2000年), 日本測地学会第94回講演会予稿集, 69-70.
- 藤原 智・飛田幹男・村上 亮・中川弘之・Paul A. Rosen (2000) 干渉 SAR における地表変動検出精度向上のための基線推定法と大気標高補正. 測地学会誌, 45, 4, 315-325.
- 古屋正人・大久保修平・田中愛幸・孫 文科・渡辺秀文・及川 純・前川徳光 (2001) 重力の時空間変化でとらえた三宅島 2000 年火山活動におけるカルデラ形成過程. 地学雑, 110, 217-225.
- 長谷川裕之・村上 亮・政春尋志・松尾 馨・小荒井衛 (2000) 三宅島山頂の陥没地形の計測. 国土地理院時報, 95, 121-128.
- 橋本 学・多田 堯 (1988) 1986 年伊豆大島噴火前後の地殻変動. 火山, 33, S136-S144.
- Leick, A. (1995) GPS Satellite Surveying 2nd edition. John Wiley & Sons, N. Y., 560 p.
- Kaidzu, M., Nishimura, T., Murakami, M., Ozawa, S., Sagiya, T., Yarai, H. and Imakiire, T. (2000) Crustal deformation associated with crustal activities in the northern Izu-islands area during the summer, 2000. *Earth Planets Space*, 52, ix-xviii.
- 宮脇正典・村田 稔・村上 亮 (2002) 航空機搭載リピートパス干渉 SAR による地殻変動検出. 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会予稿集, V03-002.
- Miyazaki, S., Hatanaka, Y., Sagiya, T. and Tada, T. (1997) The nationwide GPS array as an earth observation system. *Bulletin of the Geographical Survey Institute*, 44, 11-22.
- 宮崎真一・畑中雄樹 (1998) 国土地理院 GPS 連続観測システムの概要. 気象研究ノート, 192, 105-131.
- 村上 亮・飛田幹男・矢来博司・小沢慎三郎・西村卓也・中川弘之・藤原 智 (2000) 合成開口レーダを利用した地殻変動の検出とその地震・火山研究への応用. 地学雑, 109, 944-956.
- 村上 亮・小沢慎三郎・西村卓也・多田 堯 (2001a) 2000 年有珠山噴火にとまなうマグマモデル—GPS 連続観測を主とする地殻変動データによる推定. 国土地理院時報, 95, 99-106.
- 村上 亮・西村卓也・小沢慎三郎 (2001b) 2000 年 9 月以降の三宅島の収縮とガス放出との関係. 地球惑星科学関連学会 2001 年合同大会予稿集, V0-033.
- 村上 亮・奥山 哲・藤原 智・飛田幹男 (2002) 1986 年噴火以降の伊豆大島の地殻変動—1986 年噴火の余効過程と次の噴火に向けての準備過程—. 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会予稿集, V032-023.
- 仲野公章・清水孝一・山越隆雄・葛西勝栄・中村 剛・秋山幸秀・高貫潤一 (2001) 2000 年有珠山噴火時におけるヘリコプター搭載レーザーキャナーによる地形変化測定. 砂防学会誌, 53, 6, 88-94.
- 西 潔・石原和弘・加茂幸介・小野博尉・森 濟 (1995) GPS 測量による雲仙火山のマグマ溜まりの推定. 火山, 40, 43-51.
- Nishimura, T., Fujiwara, S., Murakami, M., Tobita, M., Nakagawa, H., Sagiya, T. and Tada, T. (2001a) The M 6.1 Earthquake triggered by volcanic inflation of Iwate volcano, northern Japan observed by satellite radar interferometry. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 635-638.
- Nishimura, T., Ozawa, S., Murakami, M., Sagiya, T., Tada, T., Kaidzu, M. and Ukawa, M. (2001b) Crustal deformation caused by magma migration in the northern Izu Islands, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3745-3748.
- 西村卓也 (2002) 伊東沖と岩手山における火山性力源による地震のトリガリング. 地学雑, 111, 166-174.
- Ozawa, S., Murakami, M. and Tada, T. (2001) Time dependent inversion study of the slow thrust event in the Nankai trough subduction zone, Southwestern Japan. *J. Geophys. Res.*, 106, B1, 787-802.
- 小沢慎三郎・村上 亮・海津 優・畑中雄樹・鷲谷威・矢来博司・西村卓也 (2002) 2001 年から見られる東海地方の異常地殻変動 II. 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会予稿集, G061-017.
- Shimada, S., Fujinawa, Y., Sekiguchi, S., Ohmi, S., Eguchi, T. and Okada, Y. (1990) Detection of a volcanic fracture opening in Japan using Global Positioning System measurements, *Nature*, 343, 631-633.
- 多田 堯・鷲谷 威・宮崎真一 (1997) GPS でみた変動する日本列島. 科学, 67, 917-927.
- Tobita, M., Murakami, M., Nakagawa, H., Yarai, H., Fujiwara, S. and Rosen, A. P. (2001) 3-D surface deformation of the 2000 Usu eruption measured by matching of SAR images. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 4291-4295.
- 浦塚清峰・梅原俊彦・灘井章嗣・佐竹 誠・前野英生・松岡建志・増子治信 (2001) 航空機搭載映像レーダによる有珠山の観測 (速報). 電子情報通信学会論文誌, J84-B, 134-136.
- 山科健一郎 (1997) 火山とマグマ. 兼岡一郎・井田喜明編, 東京大学出版会, pp 107-123.
- 矢来博司・村上 亮・飛田幹男・中川弘之・小沢慎三郎・鷲谷 威・西村卓也・多田 堯・藤原 智 (2000) JERS-1 の干渉 SAR により得られた有珠山周辺の 2000 年噴火以前の地殻変動, 日本測地学会第 94 回講演会予稿集, 71-72.