

## 富士山の火山活動の監視

### —宝永噴火シナリオと火山情報—

宮下 誠\*・中禮正明\*\*・宇平幸一\*\*\*・  
林 豊\*\*\*\*・瀧山弘明\*・藤井敏嗣\*\*\*\*\*・  
村上 亮\*\*\*\*\*・鵜川元雄\*\*\*\*\*・白土正明\*\*\*\*\*・  
山里 平\*・横田 崇\*

### Surveillance of activity of Fuji volcano, Japan — Scenario of the 1707 Hoei Eruption and Volcano Information —

Makoto MIYASHITA\*, Masaaki CHUREI\*\*, Kohichi UHIRA\*\*\*,  
Yutaka HAYASHI\*\*\*\*, Hiroaki KATAYAMA\*, Toshitsugu FUJII\*\*\*\*\*,  
Makoto MURAKAMI\*\*\*\*\*, Motoo UKAWA\*\*\*\*\*, Shomei SHIRATO\*\*\*\*\*,  
Hitoshi YAMASATO\*, and Takashi YOKOTA\*

During 2001-2003, the Fuji Working Group of the Coordinating Committee for Prediction of Volcanic Eruption (CCPVE) carried out an investigation into possible precursors of eruptions at Fuji volcano and proposed the appropriate way of issuing volcano information by the Japan Meteorological Agency (JMA) for Fuji volcano.

The Fuji Working Group compiled previous studies on the last eruption in 1707 (Hoei eruption) and applied a dike intrusion model in order to simulate the time sequence of precursors of the eruption. The group also evaluated the detection capability of present seismic and geodetic observation networks around the volcano and described how the volcanic activity of the 1707 Hoei eruption is observed by today's observation networks.

The sequence of precursors of the Hoei type eruption can be divided into three stages. The seismic swarm including earthquakes with magnitude ( $M$ ) of 1 to 2 starts 1 to 2 months before the eruption (Stage I). The seismic activity becomes vigorous ( $M = 3$ ) 2 weeks before the eruption and slight tilt changes might be observed several days before the eruption (Stage II). On the day before the eruption, big earthquakes ( $M = 5$ ) occurs and remarkable ground deformation must be observed also by GPS (Stage III).

JMA will issue Volcano Observation Information, Volcanic Advisory and Volcanic Alert corresponding to the Stages I, II and III, respectively, based on the scenario above.

\* 〒100-8122 東京都千代田区大手町 1-3-4  
気象庁地震火山部火山課  
Volcanological Division, Seismology and Volcanology  
Department, Japan Meteorological Agency,  
1-3-4 Otemachi, Chiyoda, Tokyo, 100-8122, Japan.  
\*\* 〒950-0908 新潟市幸西 4-4-1  
新潟地方気象台  
Niigata Local Meteorological Observatory,  
4-4-1 Saiwainishi, Niigata, 950-0908, Japan.  
\*\*\* 〒983-0842 仙台市宮城野区五輪 1-3-15  
仙台管区気象台  
Sendai District Meteorological Observatory,  
1-3-15 Gorin, Miyagino, Sendai, 983-0842, Japan.  
\*\*\*\* 〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1 気象研究所  
Meteorological Research Institute,  
1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki, 305-0052, Japan.

\*\*\*\*\* 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1  
東京大学地震研究所  
Earthquake Research Institute, University of Tokyo,  
1-1-1 Yayoi, Bunkyo, Tokyo, 113-0032, Japan.  
\*\*\*\*\* 〒305-0811 茨城県つくば市北郷 1 国土地理院  
Geographical Survey Institute,  
1 Kitagou, Tsukuba, Ibaraki, 305-0811, Japan.  
\*\*\*\*\* 〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1  
防災科学技術研究所  
National Research Institute for Earth Science and  
Disaster Prevention,  
3-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki, 305-0006, Japan.  
\*\*\*\*\* 〒422-8006 静岡県静岡市駿河区曲金 2-1-5  
静岡地方気象台  
Shizuoka Local Meteorological Observatory,  
2-1-5 Magarigane, Suruga, Shizuoka, 422-8006, Ja-  
pan.

## 1. はじめに

富士山は、1707年（宝永4年）に噴火して以来、約300年平穏を保っている。

現時点では、富士山の将来の噴火の時期や規模を予測することは非常に困難であるが、広大な山麓では多くの人々の生活や経済活動が営まれ、交通の幹線や首都圏も直近であるため、仮に噴火した場合には、他の火山とは比較にならない多大な被害や影響が生じるおそれがあり、防災対策に特に万全を期しておく必要がある。

そのため、気象庁では、1987年に富士山山頂に地震計を設置して以来富士山の火山活動の監視を行っている。現在は、東京大学地震研究所及び防災科学技術研究所の地震計や傾斜計のデータ分岐も受けて、富士山の火山活動を気象庁本庁火山監視・情報センターにおいて24時間監視している。

2000年10月から12月、及び2001年4月から5月にかけて、富士山直下深さ約15kmを震源とする深部低周波地震が多発した。浅部の地震活動や地殻変動等に特段の変化はなく、噴火が切迫している状況ではないと判断されたものの、改めて富士山が活火山であることが再認識されると共に社会的には大きな反響をもたらした。この年（2000年）は、有珠山や三宅島の噴火災害があり、全国的に火山防災に対する関心が高まっていた。特に有珠山の噴火においてはあらかじめ作成されていた火山防災マップ（ハザードマップ）の有効性が示されたこともあって、富士山の周辺自治体で火山防災マップ作成の気運が盛り上がった。そして、2001年7月に国及び関係する都県、市町村により富士山ハザードマップ作成協議会（2002年6月に富士山火山防災協議会に名称変更）が設置され、富士山の火山防災に関する本格的な検討が進められた。富士山火山防災協議会には、これらの内容を専門の見地から検討するため、学識委員と行政委員から構成される富士山ハザードマップ検討委員会が設けられ、火山防災マップの作成検討が行われた。

一方で、文部科学省科学技術・学術審議会測地学分科会火山部会は、富士山における観測研究体制の整備の検討を開始し、2001～2003年度に大学や研究機関、気象庁等によって富士山の火山観測研究体制が強化された。

気象庁・火山噴火予知連絡会は、2001年5月28日、富士山ワーキンググループ（以下、富士山WG）を設置し、富士山の火山活動の変化の現れ方や火山情報等に関する検討を開始した（気象庁、2003）。

本報告は、富士山WGにおいて議論された内容についてその概略を述べるとともに、その成果を具現化するものとしての噴火シナリオを想定した富士山の火山情報の発表の考え方や防災対策についても簡単に述べる。

## 2. 宝永噴火のシナリオ作成

富士山で将来想定される噴火における前兆現象に関する検討をおこなうため、まず、富士山WGは、活動の推移が比較的良好にわかっている宝永4年（1707年）の噴火（以

下「宝永噴火」）について古文書等の史料解析や地質調査等の研究成果に基づいて、宝永噴火前後の活動経過について整理し、噴火様式の変化を含む時間経過を推定するとともに、宝永噴火のマグマ供給系の考察を行った。

### 2-1 宝永噴火の概要と活動経過

宝永噴火に際しては、噴火以前にかなり明瞭な前兆現象が発生していたことが分かっている。富士山WGでは過去の宝永噴火の推移あるいは前兆に関する研究成果（例えば、小山、1998；2002；宮地、1993）に加えて未公表の最新の研究成果に基づき、その経過について、とりまとめた。その結果によると、宝永噴火前後の推移は以下のとおりである。

噴火発生の1～2ヶ月前には、山腹のみ有感となるような地震活動があり、十数日前からは山腹のみ有感となる地震が多発するようになり、ほぼ毎日鳴動もあった。1日前には山麓でも有感となる地震が増加し、半日前から噴火前にかけてさらに活発となり、規模の大きい地震も数回発生した。噴火は微動や空振を伴う大量の軽石等を噴出する噴火で始まり、噴煙は成層圏に達したと見られる。半日後には、噴出物が軽石からスコリアに移行した。噴出率は噴火初日（1707年12月16日）から翌朝まで最大で、その後は盛衰を繰り返しながら噴火が続いた。25日夕方から27日にかけて再び活発化し、この間の噴出量は一連の噴火の総噴出量の約半分に相当する。31日から1月1日未明にかけて数度の爆発的噴火の後、一連の噴火は終息した。

### 2-2 宝永噴火の火山活動プロセスの推定

富士山WGは、以上の史料解析・地質調査成果をもとに、宝永噴火においてどのような火山学的な現象が起こり、どのように推移してきたかを検討した。これは、前述したような宝永噴火と同等の前兆現象があったとして、現在の観測体制でどのようなタイミングで異常が捉えられ、火山情報が発表できるかを推定するために不可欠であり、様々な火山学的検討が行われた。

まず、宝永噴火におけるマグマ供給系のモデル化を試み、宝永噴火に前駆した地殻変動を見積もるため、富士山の山体直下のマグマ供給系を仮定した。他の火山では、静穏期に地下にマグマが蓄積される過程が地殻変動観測で捉えられている場合もある（例えば、伊豆大島や三宅島；渡辺、1998；西村・他、2002等）。しかし、富士山の場合は地下のマグマ供給系について、地球物理学的に明確な知見が得られていない。そこで、上述の宝永噴火における活動経過や低周波地震の活動域、他の火山の事例等を参考にして、図1に示したような富士山の山頂直下に球状のマグマ溜りと、山頂から宝永火口付近まで及ぶダイク（板状のマグマ）からなるモデルを想定した（図1、中禮・他、2002；鶴川・中禮、2002による）。

ここで、マグマ溜りは低周波地震の震源域である深さ15km（Nakamichi *et al.*, 2004）に存在するとし、南南東方向の長さ3km（走行は火口列の配列、長さは山頂直下から宝永第3火口までの水平距離に対応）のダイクが垂直に貫入するとした。ダイクの厚さは、宝永噴火の初期の噴

出率がかなり大きい(約 $7 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ DRE/h}$ )ことを考慮し、1 mとした。それでも噴火直前のダイクの総体積は $3 \times 10^7 \text{ m}^3$ となり、宝永噴火の総噴出物量(約 $7 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ DRE}$ )よりはかなり少ないが、噴火開始後も深部マグマ溜りからのマグマ供給が続くと考えれば説明可能である。そして、宝永噴火前に地震活動が加速的に活発化するという推移に対応するようにマグマの移動速度を仮定した。具体的には、次のようなものである。

- ・ステージⅠ：噴火の2ヶ月前から、マグマ溜りから既存の火道を通してマグマが上昇し始め、約2週間前に深さ10 km付近に達し、そこからダイク状に貫入する
- ・ステージⅡ：その後もダイクの貫入は継続し、噴火の十数日前にはダイク頭部が深さ5 kmに達する
- ・ステージⅢ：噴火前日には深さ1 kmに達する。
- ・ステージⅣ：マグマが地表に達し、噴火に至る。
- ・ステージⅤ以降：噴火に伴い大量の物質が地表から噴出し、ダイクやマグマ溜りの圧力が急激に減少する。

このモデルから期待される噴火開始直前における地殻変動量を図2、地殻変動の時間変化の一例を図3に示す。ここで、2002年当時の地殻変動観測網を仮定した場合には、観測される地殻変動量は、ステージⅡ(噴火十数日前から噴火前日)の後半で、傾斜計で検出し得る程度の微小な変化量(数 $\mu\text{rad}$ 程度、 $1 \mu\text{rad} = 1 \times 10^{-6}$ )に達し、ダイク頭部が深さ1 kmまで達する想定の前日(ステージⅢ)には、数点のGPS観測点で数cm程度の変化が現れ始めることになる。そして、噴火直前(ステージⅣ)には図2に示すように、大きな地殻変動が観測されることが想定される。

なお、上で示したモデルよりも浅部に宝永噴火相当の数億 $\text{m}^3$ オーダーのマグマ溜りがすでに存在していて、さらにそれが浅部に貫入して噴出するモデルも考えられるが、その場合はマグマ溜りからのマグマ貫入が上のモデルよりも浅部で始まることになるので、以上のシミュレーションよりも大きな地殻変動が観測されることが期待できる。

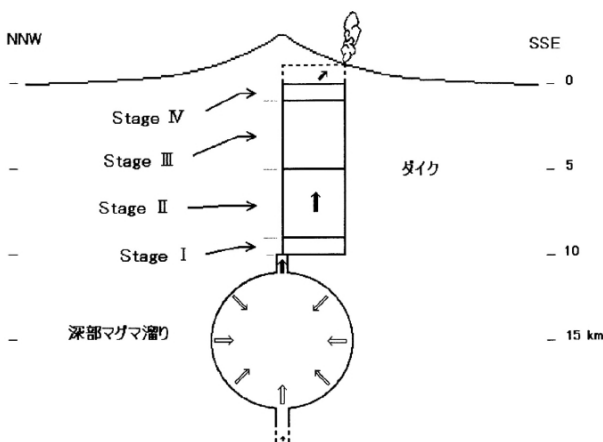


図1 宝永噴火のダイク貫入モデル模式図。  
Fig. 1. A magma intrusion model for 1707 Hoei Eruption.

噴火開始後(ステージⅤ以降)は、マグマ溜りの減圧によって山体は収縮に転じ、図3右に示すように地殻変動の変化傾向が反転する観測点も現れ始める。

一方、林・小山(2002)は、宝永噴火の前に発生した火山性地震の規模(マグニチュード)を史料から得られた震度に距離減衰式を適用して推定した。ここでは、上述のマグマ貫入モデルを仮定して応力変化が大きくなると考えられる領域を地震の震源域と想定した。すなわち、主として成長するダイクの先端付近で震央が山頂火口下の深部マグマ溜り直上から宝永火口付近直下に移動した浅い地震活動と仮定した。具体的には、ステージⅠの噴火の1~2ヶ月前では、マグニチュード(M)2級の地震を含む活動から次第にM3前後の地震を含むようになったが、ステージⅡの噴火十数日前から1日前にはM3前後の地震も起きるようになった。ステージⅢの噴火前夜から噴火当日の午前(噴火の数時間前)までの間の地震は、最大のものでM5前後が2回、このほかにM4程度の地震も十回程度発生した。噴火の数時間前から噴火開始直前までの地震活動は、最大の地震がM5前後で2回発生したと推定できる。

以上のシミュレーション等によって、宝永噴火時の様々な現象を概ね統一的に解釈できるようになり、それをもとに現在の観測網であればどのような現象が観測されるかを推定することができた。結果を表1~2にまとめて示した。

### 3. 宝永噴火シナリオに準拠した火山情報の発表形態とその活用法

気象庁は、火山活動に応じて、緊急火山情報、臨時火山情報、火山観測情報の3種類の火山情報を防災機関等に伝達する責任を負っている。活動的な火山においては、過去の経験則に基づいて、火山性地震の回数等の発表基準を定めている火山もある。しかし、富士山では、気象庁は火山情報を発表した経験がなく、明確な発表基準は定めていなかった。そこで、他の火山における事例等も参考に、富士山での火山情報発表の手がかりとなることが想定される現象をとりまとめた(富士山ハザードマップ検討委員会、2004)。それによると3種類の火山情報は以下のような場合に発表することになる。

火山観測情報は、火山活動の変化を周知する必要がある段階に発表する。浅部での規模の小さい火山性地震の一時的な多発や微動の発生があった場合、深部での規模の大きい地震の発生やゆっくりとした深部での膨張等がそれに相当する。

臨時火山情報は、火山活動が活発化して注意する必要がある段階に発表する。浅部での火山性地震が増加、微動の継続的な発生等がそれに相当する。

緊急火山情報は、中~大規模噴火の可能性が高く警戒が必要な段階で発表する。しかし、噴火前に気象庁が緊急火山情報を発表したのは2000年の有珠山噴火及び三宅島噴火だけである。これらの火山は噴火に至る前兆が比較的明確であるという経験則があり、いわば例外的な火山であるといってもよく、多くの火山では噴火前に緊急火山情報を発

表するのは容易ではない。しかし、富士山の場合でも、有感地震を伴うような群発地震と同時に地殻変動が加速するような現象が見られれば噴火前に緊急火山情報を発表することは可能であろう。

以上の考え方に基づいて、次に我々は、前述の地震活動の経緯やモデルで推定された地殻変動量を基に、もし宝永噴火が現地点で発生したとして、時間的推移を含め、噴火前に発表し得るであろう火山情報について検討した。その

結果、宝永噴火シナリオに準拠した火山情報の発表の流れは以下のとおりである。

まず、山中のみで有感となる地震活動（M2級）が活発化した時（宝永噴火の1~2ヶ月前、ステージI）は、火山観測情報を発表し、火山活動状況を周知する。気象庁や関係機関は火山観測体制を強化することになる。

M3程度の地震活動が活発になり、次第にそれが加速していく段階（噴火十数日前～、ステージII）では、臨時火

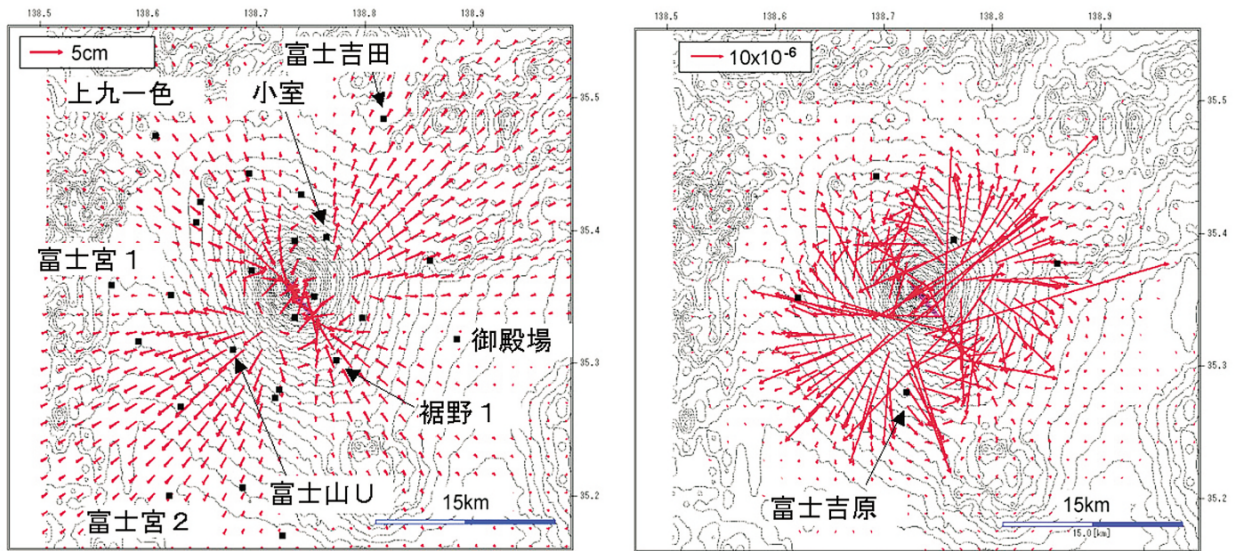


図2 宝永噴火マグマモデルに基づく噴火直前までの地殻変動量。左：水平変動。右：傾斜変動。■は2002年段階での観測点の配置。それぞれの格子点における変化方向と変動量、及び傾斜方向（下がる方向）と変動量を示す。

Fig.2. Horizontal displacements and tilt changes just before the 1707 Hōei eruption assuming a model shown in Fig. 1.

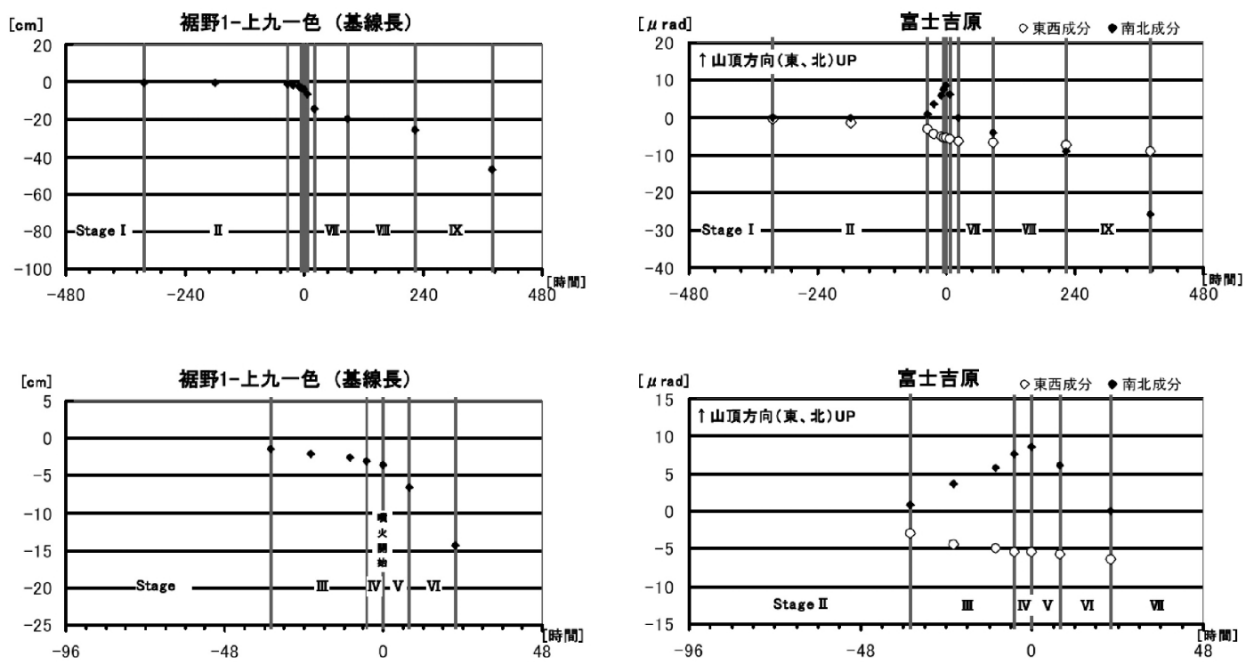


図3 宝永噴火マグマモデルに基づく噴火直前までの地殻変動量の時間変化の例。時間軸のゼロは噴火開始時刻。

Fig.3. Examples of temporal changes of a baseline and tilt change at a station before the 1707 Hōei eruption assuming a model shown in Fig. 1.

表 1 宝永噴火直前までのダイク貫入モデルに基づく地殻変動・地震活動の推定結果。  
Table 1. Crustal movement and seismic activity before the 1707 Hiei eruption simulated from a model shown in Fig. 1.

ステージ	年月日 <sup>1)</sup> 時刻	噴火開始時と 時間の時間	史実 <sup>2)</sup>	史実から解釈し た火山現象(推 定) <sup>2)</sup>	想定するダイク貫入モデル <sup>3)</sup>		地震活動と地殻変動の状況(推定)	
					マグマの動き	地震発生要因と震源		
I	1707年 10~11月 (12月2~ 3日)	1~2か 月前	富士の山中で地震 (10月時分は毎日幾 度も)。	山中のみで有感とな る地震活動が次第に 活発化。	深さ約15kmの深部 マグマ溜りからマグマ が上昇し、山頂直下の 深さ約10kmから南 南東方向にダイク状に マグマが貫入。	ダイク先端部付近の地 震、震源は山頂直下周辺 の深さ約10km付近。	マグマの動きに伴う 地殻変動 <sup>4)</sup>  ・検出されない程度の地殻 変動。  ・傾斜計にわずかな変化、 GPSによる地殻変動検知 されず。	地震活動 <sup>5)</sup>  マグニチュード(M) 2級以下の地震活 動、次第にM3前 後の地震を含むよう になる。  M3程度の地震を含 む地殻活動。
					ダイクの貫入が継続 し、ダイクの頭部は深 さ約5kmに達する。	ダイク先端部付近の地 震、震源は山頂南東数 km(今の宝永火口直下) 周辺の深さ約5km付近。	・富士宮1-御殿場間が約 3cmの縮み、富士山U- 小室間は変化なし。吉原等 で顕著な傾斜変化。  ・富士宮1-御殿場間約4 cmの縮み、富士山U-小 室間は約2cmの伸びが観 測される。吉原等での傾斜 変化継続。	M2級・M3級の地 震を半日で数回含む 地震活動。  M5程度の地震2 回、M4程度の地 震10程度、M3 級・M2級の地震数 十回以上を含む地震 活動。
III	15日夜 ~16日朝 (05時頃)	半日前	地震が数回(須山7 ~10回、吉原14時 過ぎから度々)。  地震多数(須山数知 れず、山之尻たえず 揺れる、小田原12 回)、夜中~未明に 東京・名古屋・下伊 那郡でも地震が2回。	山麓で有感となる地 震が増加。  ・山麓で有感となる 地震が増し、一日 に数十回となった。 夜中~未明にかけて 2回の規模の大きい 地震。	ダイクの貫入が継続 し、ダイクの頭部は深 さ約1kmに達する。	ダイク周辺での浅い地 震、震源は山頂南東数 km(今の宝永火口直下) 周辺の深さ約3km付 近、規模の大きい地震も 2回含む。	・富士宮1-御殿場間で約 5cmの縮み、富士山U- 小室間は約4cmの伸びが 観測される。吉原等での傾 斜変化さらに継続。  ・富士宮1-御殿場間で約 5cmの縮み、富士山U- 小室間は約7cmの伸びが 観測される。吉原等での傾 斜変化継続。	M5程度の地震2回 を含む地震活動。
					ダイクの貫入が継続 し、ダイクの頭部は地 表直下に達する。	ダイク形成の最終段階の 地震で、断面面走行北北 西-南南東の正断層型ま たは横ずれ型などの規模 の大きい地震2回を含 む、震源は山頂南東数 km(今の宝永火口直下) 周辺の深さ約3km付 近。		
IV	16日朝	数時間前	麓では大地震、下伊 那郡・東京でも地 震。	規模の大きい有感地 震が発生した。	再びダイクの貫入が継続 し、ダイクの頭部は地 表直下に達する。	再び規模の大きい有 感地震が発生した。		
					再びダイクの貫入が継続 し、ダイクの頭部は地 表直下に達する。	再び規模の大きい有 感地震が発生した。		

<sup>1)</sup> 新暦に換算した年月日。括弧内は、おおよそのステージI以前と比較した変動量。<sup>5)</sup> 林・小山(2002)による。

<sup>2)</sup> 小山(2002)、気象庁(2003)による。

<sup>3)</sup> 深さは標高1,000mを基準。<sup>4)</sup> 地殻変動量は、ステージI以前と比較した変動量。<sup>5)</sup> 林・小山(2002)による。

表2 宝永噴火過程のダイク貫入モデルに基づく地殻変動・地震活動の推定結果。  
Table 2. Crustal movement and seismic activity at the 1707 Hōei eruption simulated from a model shown in Fig. 1.

ステージ	年月日 <sup>1)</sup> 時刻	噴火開始時と 終了の時間	史実 <sup>2)</sup>	史実から解釈し た火山現象(推 定) <sup>2)</sup>	想定するダイク貫入モデル <sup>3)</sup>	地震発生要因と震源		地震活動と地殻変動の状況(推定)
						マグマの動き	マグマの動きに伴う 地殻変動 <sup>4)</sup>	
V	1707年 12月16日 10~12時頃 ~ 16日夕方 (18時頃)	噴火開始 から半日 後まで	・鳴動とともに黒雲 上がる。 ・東麓で降砂、降礫、 江戸で白い砂が降 る。	・噴火微動、空振を 伴って、軽石の噴出 から宝永第2・3火口 から噴火開始。 ・噴煙は成層圏に達 した。	プリニー式噴火開始。 大量のスコリア、火山 灰等噴出。深部マグマ 溜りから急激なマグマ 流出。 (0.048 km <sup>3</sup> DRE)	マグマ活動に伴う地震頻 発。規模の大きい北北西 -南南東走向のオーブン クラック型地震発生。震 源は山頂南東数 km (今 の宝永火口直下) 周辺の 深さ約 3 km 付近。	マグマの境に富士山全体が 急速に収縮する地殻変動。 ・17日朝までに、富士吉田 -富士宮2、富士宮1-御 殿場間でほぼ 10 cm の収 縮。	地震活動 <sup>5)</sup>
VI	6日夕方 ~ 17日朝 (08時頃)	半日 ~ 1 日	・火柱・空振・震 動・雷の目撃など。 江戸の降砂が黒くな る。 ・17日朝雷鳴一時 おさまる。	・火柱・空振・地 震・微動・火山雷が 発生。噴出物が軽石 からスコリアに移行 した。 ・宝永第2・第3火 口の噴火活動は17日 朝一時的に小康状態。	噴火継続。深部マグマ 溜りからのマグマの流 出継続。17日マグマの 流出量低下。 (0.168 km <sup>3</sup> DRE)	比較的大規模の収縮。 ・富士山全体が収縮する傾 向は少しゆるやかに継続。 ・18日朝までに、富士吉田 -富士宮2、富士宮1-御 殿場間で 10 cm 強の収縮。	比較的大規模の地震 (マグニチュード (M) 5 程度の) 地震 を含む地震活動。	
VII	17日朝~ 19日	1~3日	・17日夜頃地震頻 発・大地震。 ・江戸で断続的に降 砂や空振。	・17日夜に規模の大 きい有感地震が発生。 ・宝永第1火口から 噴火開始。ただし、噴 火は一樣でなく強弱 有り。	噴火再開。深部マグマ 溜りからのマグマ流出 再開。 (0.251 km <sup>3</sup> DRE)	・富士山全体が収縮する傾 向はゆるやかに継続。 ・20日夜半までに、富士吉 田-富士宮2、富士宮1- 御殿場間で約 15 cm の収 縮。		
VIII	20日~ 25日夕方 (18時頃)	4~9日	・江戸での空振や降 砂の量が減る。 ・21日から東麓で 連続的な地震。	宝永第1火口からの 噴火の規模が小さく なり、強弱の有る噴 火を繰り返した。	深部マグマ溜りからの マグマ流出継続。 (0.344 km <sup>3</sup> DRE)	・富士山全体が収縮する傾 向は継続。 ・25日昼までに、富士吉田 -富士宮2、富士宮1-御 殿場間で約 20 cm の収縮。		
IX	25日夕方~ 1708年1月 1日未明	9~16日	東麓で空振や地震が 激しくなる。江戸で も時折降砂がある が、28日以降はみ られなくなる。31 日夜~1月1日にや や爆発的噴火した後 に噴火終息。	宝永第1火口からの 噴出が活発化す る。31日夜までにス パター丘が形成され るが、その後の噴火 で中央部が吹き飛 ぶ。	深部マグマ溜りからの マグマ流出1月1日未 明まで継続。 (0.676 km <sup>3</sup> DRE)	・富士山全体が収縮する傾 向は25日夜半から再び拡大。 ・30日夜半までに、富士吉 田-富士宮2、富士宮1- 御殿場間で 30~40 cm の収 縮。	比較的大規模の地震 (M 5 程度の) 地震 を含む地震活動。	

<sup>1)</sup> 新暦に換算した年月日。括弧内は、およそそのステーション境界の日時。<sup>2)</sup> 小山 (2002)、気象庁 (2003) による。

<sup>3)</sup> 深さは標高 1,000 m を基準。噴出量合計は宮地 (1993) に基づき、岩石量 (DRE) に換算。ただし、テフラ層の堆積密度 1.0 g/cm<sup>3</sup>、岩石密度 2.5 g/cm<sup>3</sup> を仮定。

<sup>4)</sup> 地殻変動量は、(表1の) ステージ I 以前と比較した変動量。

山情報を発表し、注意喚起を行う。その後半には傾斜計にわずかな変化が観測されることも想定される。

さらに地震活動が活発になり、GPSでも明瞭な変化が観測され、震源の浅い山麓で有感となる地震（M5級を含む）が多発した時点（噴火前日、ステージⅢ）では、明らかにマグマが浅部に貫入してきていることがわかるので、緊急火山情報を発表することができるであろう。

以上の流れに基づいて富士山ハザードマップ検討委員会において、国・関係機関・県・市町村等がとる防災対策の基本的な考え方が検討された。その中で、広域での避難等の防災対策が必要な富士山においては、1日前の緊急火山情報発表時点で一気に全住民の避難等の防災対策をとることは問題が多く、それより前の時点で災害時要援護者を避難させる等の対策をとる必要があるとの意見が出た。気象庁はこれまでも火山活動が進行する中で新たに火山活動が活発化したと考えられる現象が観測された場合には臨時火山情報や緊急火山情報発表後に改めて同種の火山情報を発表することがある。つまり、臨時火山情報発表後に新たに噴火の可能性が高まったと判断されるような現象（ただし、緊急火山情報を発表するほどの現象ではない現象）が見られれば、改めて噴火の可能性が高まったとの臨時火山情報を発表することも想定可能であろうとの結論に達した。具体的には、火山性地震が増加して臨時火山情報をすでに発表している時点で、明瞭な地殻変動が観測されるようになったり、噴気活動が活発化する等の表面現象が見られたりして、噴火の可能性が高まったと判断される場合がそれに相当する。宝永噴火シナリオであれば、マグマが浅部に上昇して、地震活動の加速とともに傾斜計にマグマが浅部へ移動するような変化が認められると想定される噴火数日前（ステージⅡの後半）がそれに相当する。

以上のように、宝永噴火シナリオに準拠すれば、火山観測情報→臨時火山情報（注意喚起）→臨時火山情報（噴火の可能性高まり）→緊急火山情報の順に、噴火前に気象庁から火山情報が発表されることになる。

そして、富士山ハザードマップ検討委員会に引き続いて富士山の防災対策を検討した富士山広域防災検討会(2005)は、最終的に以下のとおり、気象庁のそれぞれの火山情報に対応する防災行動をとりまとめ、中央防災会議において決定された（中央防災会議,2006）。

○臨時火山情報（注意喚起）

登山自粛の呼びかけ。情報収集連絡体制。

○臨時火山情報（噴火の可能性高まり）

臨時火山情報避難範囲（ハザードマップにおける火口分布領域を包括する範囲）の避難勧告又は指示。災害時要援護者の事前避難。警戒体制の確立。

○緊急火山情報が発表された場合

緊急火山情報避難範囲（ハザードマップにおける溶岩流3時間以内到達可能性範囲等を包括する範囲）の避難勧告又は指示。地方自治体災害対策本部等の設置等。

当然ながら、富士山の将来の火山活動がどのように進行するかは現時点では不明確であり、上記の順番に噴火前に

必ず火山情報が発表されるとは限らないことに注意は必要である。

#### 4. 富士山における観測網と監視

前述した宝永噴火シナリオ以外の富士山の噴火プロセスについて検討するため、富士山WGは、宝永噴火以外の富士山の噴火事例や、海外の玄武岩質の火山で長い静穏期の後の噴火を近代的な観測で捉えた事例について調査した。

しかし、宝永噴火以外の富士山の噴火については、噴火に至る過程を詳細に示す資料はなく、海外の玄武岩質の火山で長い静穏期の後の噴火を近代的観測で捉えた事例もなかった。しかし、富士山に類似した、玄武岩の大型火山であるエトナ山や、マウナロア山などの多くの火山では、地震活動の活発化と地殻変動の異常が噴火直前2,3ヶ月前から1,2日前までに捕捉された事例が報告されている（Bonaccorso, 2001；Lockwood *et al.*, 1987）。したがって、富士山で将来起きる非爆発的な噴火についても、類似火山と同様に、（宝永噴火のときのように顕著なものではない可能性はあるが）地震活動の活発化や地殻変動の異常といった前兆現象が捉えられる可能性があると考えられる。

そこで、富士山WGでは、富士山の定常的な活動、あるいは噴火に至る過程でのマグマの貫入に伴う地殻変動や地震活動の検出に必要な地震及び地殻変動観測網についての検討を行った。

##### 4-1 地震観測網の検知能力

富士山WGでは、現在の観測網で山頂部を含めて富士山全域を対象にどの程度のマグニチュード以上の地震が捉えられるか、そしてそれは火山活動監視上十分であるか等を考察した。

富士山の地震活動は静穏であるため、実際に発生している地震活動のデータは少ないことから、シミュレーションによって地震検知能力を調べた。具体的には2002年当時計画していた観測網（現在の観測網におおむね相当）において、各観測点のノイズレベルを実測若しくは仮定した上で、水平緯経度2分刻みのグリッド上（深さは5, 10, 15 kmの3通り）に震源を仮定して、それが検知可能かどうかを計算した。ここで、P波着震時は、渡辺（1971）の式によって計算される最大振幅がノイズレベルの5倍以上となった場合、S波着震時は、渡辺最大振幅がノイズレベルの3倍以上となった場合に計測できるという条件（例えば、岡田・小原, 2000）で、それぞれの着震時に理論走時の2%以内の誤差をランダムに与えて、シミュレーション計算を行った。

その結果、深さ5 kmの場合M0.2、深さ10 kmの場合M0.5以上の地震の震源がほぼ富士山全域にわたって良好に決定できることがわかった。深さ15 kmの場合、M0.5の地震の震源決定誤差は大きい（±1 km程度）ものの地震の発生状況の把握は可能であることがわかった。

一方、富士山WGでは、マグマが新たな通路を形成しながら地殻変動と地震活動を伴いつつ貫入したと考えられ

る国内の火山周辺で発生した、地殻変動を伴う群発地震活動の事例12例について、地殻変動と地震活動の規模を調べた。その結果、マグマ貫入量が $10^6\text{m}^3$ オーダーの群発地震の場合は、地震活動としてモーメントマグニチュード $M_w=3\sim 6$ 程度のエネルギーが放出されていることがわかった。

前述したように富士山の現在の観測網は、 $M 0.5$ 程度の地震の震源決定が可能であることから、最大地震のマグニチュードが2クラスの規模の小さい地震活動であっても十分な数の震源を決定できると考えられ、前述した地震観測網は、この程度のマグマ貫入があれば、地震活動の変化としてそれをとらえる能力が十分にあると考えられる。

もちろん、地域によっては地震の検知能力に差があり、また詳細な地震活動の把握のためには、観測の強化を進める必要があることはいうまでもない。

#### 4-2 地殻変動観測の検知能力

伊豆半島東方沖の群発地震活動や三宅島の噴火の初期に貫入したマグマが約1千万 $\text{m}^3$ と考えられるので、富士山WGでは、富士山においても、噴火前にこれと同程度の量のマグマがマグマ溜りに蓄積し、噴火時に山体内の不特定の場所からダイクとして貫入することを想定し、地殻変動の観測網の検知能力を調べた。

その結果、マグマの深さが10 km程度よりも浅ければ、1千万 $\text{m}^3$ のマグマ蓄積あるいはマグマ貫入によって、地表における変位は最大で数mmを超え、また傾斜変化も最大で $1\ \mu\text{rad}$ を超えることがわかった。概ね5 km格子内に各1点GPS観測点があれば、マグマの蓄積あるいはダイクの貫入が富士山の山体のどこで起こったとしても、そのおおよその位置と大きさが把握できると考えられる。また、即時的にデータを評価できる傾斜計や歪計が適切に配置されていれば、速やかに異常を検出することができると考えられる。

なお、マグマ供給系やダイクの位置や形状をより詳細にモデル化するためには、マグマ活動による変位、傾斜、歪等をさらに稠密に観測することが重要である。また、火山活動の推移に応じた評価を行うため、準備過程から噴火までの全過程を連続的に把握できる観測網にすることが重要である。

#### 5. 今後の課題

富士山の将来想定される噴火に備え、観測体制がようやく整備されてきた。しかし、高地に設置した観測点は雷災等による欠測も多く、その維持には多大な労力を要している。今後も安定稼働のための様々な工夫を行いながら、データの精度を評価しつつ、地下のマグマの動きを評価するための観測網のあり方を検討し、観測体制強化を継続していくことが望ましい。

大学等研究機関によって富士山の火山体構造探査、低周波地震の研究等基礎的な研究が進められている。しかし、低周波地震の震源域とマグマだまりとの関係はまだ明らかとなっていないなど、富士山の地下の様子はまだ不明な点

が多く、富士山直下におけるマグマ蓄積過程を解明していく必要がある。その上で、来るべき噴火に向けたシナリオのより具体的な検討を進めていく必要がある。

富士山の火山防災の検討が進められ、気象庁の発信する火山情報と防災対策との関係が明確化される等、気象庁に対する期待は大きく、またその責任は重いものがある。今後も監視体制の強化とともに基礎研究成果の進展と防災への積極的な活用を進めていくことが望まれる。

#### 謝辞

富士山WGにおいて議論いただいた委員各位にお礼申し上げます。また、匿名査読者のコメントにより原稿の不備を改善できました。お礼申し上げます。

#### 引用文献

- Bonaccorso (2001) Mt Etna volcano: modeling of ground deformation patterns of recent eruptions and considerations on the associated precursors. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **109**, 99-108.
- 中央防災会議(2006)富士山火山広域防災対策基本方針. 40 p.
- 中禮正明・林 豊・瀧山弘明・小山真人・藤井敏嗣 (2002) 富士山宝永噴火マグマ貫入のモデルとシミュレーション. 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, V 032-P 027.
- 富士山ハザードマップ検討委員会 (2004) 富士山ハザードマップ検討委員会報告書. 240 p.
- 富士山広域防災検討会 (2005) 富士山広域防災検討会報告書. 182 p.
- 林 豊・小山真人 (2002), 宝永四年富士山噴火に先立って発生した地震の規模の推定, 歴史地震, No. **18**, 127-132.
- 気象庁 (2003) 火山噴火予知連絡会富士山ワーキンググループ報告書. 45 p.
- 小山真人 (1998) 歴史時代の富士山噴火史の再検討. 火山, **45**, 323-347.
- 小山真人 (2002) 史料にもとづく富士山宝永噴火の推移, 月刊地球, **24**, 609-616
- Lockwood, J. P., Dvorak, J. J., English, T. T., Koyanagi, R. Y., Okumura, A. T., Summers, M. L., and Tanigawa, W. R. (1987) Mauna Loa 1974-1984: A decade of intrusive and extrusive activity, in Secker, R. W., Wright, T. L., and Stauffer, P. H., eds., *Volcanism in Hawaii*, Washington, U. S. G. S. Professional Paper, **1350**, 537-570.
- 宮地直道 (1993) 富士火山1707年噴火の推移と噴出物の特徴. 文部省科学研究費重点領域研究「火山災害の規模と特性」(研究代表者 荒牧重雄), 111-119.
- Nakamichi, H., Ukawa, M. and Sakai, S. (2004) Precise hypocenter locations of midcrustal low-frequency earthquakes beneath Mt. Fuji, Japan. *Earth, Planets and Space*, **56**, e37-e40.
- 西村卓也・村上 亮・小沢慎三郎・石本正芳・鷺谷 威・矢来博司・多田 堯・海津 優・鶴川元雄 (2002) 三宅島2000年噴火前後の地殻変動と変動源の推定-1983年噴火後から2001年5月までの収縮・膨張源-. 東京大学地震研究所彙報, **77**, 55-65.
- 岡田義光・小原一成 (2000) 関東・東海地域の高感度地震観測点における地動ノイズの特徴. 防災科学技術研究所研究報告,



60, 15-29.

鶴川元雄・中禮正明(2002) それでは今富士山の地下で何が起  
こっているのか 噴火の観測と予知. 小山真人編, 「富士を  
知る」, 集英社, 162-172.

渡辺 晃(1971) 近地地震のマグニチュード, 地震 2, 24, 189  
-200.

渡辺秀文(1998) 伊豆大島火山 1986 年噴火の前兆過程とマグ  
マ供給システム. 火山, 43, 271-282.