

## 第6次火山噴火予知計画で何がわかったか

浜口博之\*

Progress in the Sixth National Project for Prediction of Volcanic Eruption

Hiroyuki HAMAGUCHI\*

The sixth national program for prediction of volcanic eruption has been conducting since 1999 in order to advance toward the higher stage of the prediction of volcanic eruption. The progress of prediction depends not only on the advance of basic knowledge of volcanology but also on the accumulation of successful and non-successful practical knowledge through the occurrence of volcanic eruptions. Among nine eruptions and three volcanic unrests that occurred during the last five years in 1997-2001, the predictions of two large eruptions at Usu and Miyakejima volcanoes in 2000 and of volcanic unrest at Iwate volcano in 1998-1999 were reviewed and evaluated mainly on the basis of geophysical point of view. Based on detection of some precursory phenomena, the prediction of the beginning time of the eruptions at Usu and Miyakejima volcanoes was successfully performed by the practical experience. The semi-real-time prediction of the beginning time at Usu volcano was also successfully operated, based on the application of rock fracture criterion to the seismic data that were automatically processed in the real-time operation. However, it became clear that the predictions of eruptive mode and sequence at Miyakejima volcano were still far beyond the grasp of the basics because of abnormally complicated behavior. It is confirmed that a tomographic imaging of the shallow volcanic conduit system together with a precise 3-D hypocenter distribution contributes significantly for deep understanding of what was going on the volcanic unrest at Iwate volcano.

### 1. はじめに

1974年に火山噴火予知計画が開始され、今日まで28年間が経過した。現在は第6次計画(1999~2003年)が実施の途上にある。第1次から第5次計画までの25年間の成果に関しては、レビューと外部評価が実施された(測地学審議会, 1997)。この時期までの達成度や問題点を踏まえ、第6次計画では、「火山観測研究の強化」、「火山噴火予知体制の整備」とともに、「火山噴火予知の高度化のための基礎研究の推進」という3つの柱をもとに計画が立案された(測地学審議会, 1998)。2001年の第4回シンポジウム開催時は、第6次計画の中間年に当たり、最終年度まで至っていない。そこで、第5次計画後半から第6次計画の実施期間中に発生した主な噴火を事例とし、達成度や問題点を検証する。この間に噴火した、あるいは、異常活動が認められた火山は、秋田焼山(1997)、

桜島(1997-2000)、雌阿寒岳(1998)、岩手山(1998-1999)、北海道駒ヶ岳(1998, 2000)、薩摩硫黄島(1998-2000)、硫黄島(1999, 2001)、諏訪之瀬島(1999-2001)、有珠山(2000)、三宅島(2000)、富士山(2000)、箱根山(2001)である。この小論では、比較的活発な活動を示した有珠山と三宅島の噴火、並びに、岩手山の異常地殻活動を対象に議論をする。

これら3火山は、最近の活動度によって2つに分類される。有珠山や三宅島は予知計画が実施されて2度目の噴火を迎えた火山である。言い換えれば、1回目の噴火をもとに、観測網の整備や監視体制の強化が図られるとともに、噴火史などのデータの収集などから、過去の噴火の規模や様式について詳しい情報が蓄積された火山である。一方、岩手山は、予知計画開始以降に噴火経験はなく、また、有珠山や三宅島に比べて1桁噴火間隔が長いため、噴火史などのデータの蓄積が乏しい火山である。表1には、これら3火山の最近の活動や噴火シナリオなどをまとめた。

噴火予知に対する社会の期待感(desirability)と噴火予知の技術的現状や可能性(feasibility)の間には、まだ大きなギャップが存在する。噴火予知計画の実行は、このギャップを徐々に埋め、実用的な予知の実現に1歩近

\* 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉  
東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター  
Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, Sendai 980-8578, Japan.  
e-mail: hama@aob.geophys.tohoku.ac.jp

Table 1. Recent eruptive history, characteristics of volcanoes and scenario of eruption by JMA (1999) at Usu, Miyakejima and Iwate volcanoes.

表1 有珠山, 三宅島, 岩手山の最近の活動歴, 特徴, 並びに, 気象庁(1999)による予測される噴火シナリオ.

	有珠山	三宅島	岩手山
気象庁の火山分類	常時観測火山	常時観測火山	その他火山
活動度	高	高	低
予知計画以降の噴火年	1977年, 2000年	1983年, 2000年	無
平均的噴火間隔	30年	22年(17年)	200~300年(?)
前回と今回の噴火間隔	23年	17年	—
前兆現象の特徴	地震, 地殻変動 数日間で噴火	地震, 地殻変動 数日間で噴火	地震 その他不明
長期的予測シナリオ	S1.山頂, 火砕流/ 溶岩ドーム S2.山頂, 火砕流なし/ 軽石・火山灰 S3.山麓, 溶岩ドーム	S1.山腹, 割れ目噴火 S2.海岸, マグマ水蒸気 S3.山頂, 火山灰	S1.山体崩壊(頻度少) S2.マグマ噴火
火山体構造探査	有(2001実施)	無	有(1999(自然地震), 2000(人工地震))

づくプロセスである。旧科学技術庁所管の政策研究所が、5年ごとに実施している技術予測調査結果は、「期待感」と「可能性」の間に横たわるギャップを計る指標となる。この調査は、科学技術の16分野について有識者を対象にデルファイ法によるアンケート調査である。第5回技術予測調査(1993年5月)は、第4次火山噴火予知計画の最終年度に実施され、地球・海洋分野の225名から回答をもとにしている。したがってこの結果は、今から10年前に、広義の地球物理学に関係した専門家集団の描く未来像、或いは、長期目標を反映したものと解釈できる。調査結果には、技術として実現する重要度とともに実現予測時期が示されている。地球・海洋分野で重要度の高い上位5位の項目には、火山噴火予知関係の2項目含まれている。1つは、「火山噴火の2~3日前に予測が確実にできるようになる」という課題(以下、第1課題と呼ぶ)で、その重要度は80%、実現予測年は2006年という結果である。2つめは、「火山噴火による火砕流、熱雲の発生と規模が予測できるようになる」という課題(第2課題)に対しては、その重要度は80%で、実現予測年は2005年という結果が出されている。これらの結果を社会の期待感と受け止め、第6次計画で何処まで達成できたか、その現状を検証するとともに問題点を明らかにする。

## 2. 有珠山2000年噴火

有珠山は17世紀以降7回の噴火を繰り返し、噴火場所、様式、休止期間、前兆現象などがかなり詳しく判っている火山である(勝井, 1988)。噴火間隔は30~60年で、前回の噴火(1977年)から20年以上経過したことから、予想される噴火シナリオや観測体制などの現状や問題点が検討された(気象庁, 1999)。今回の噴火は、2000年3月31日に有珠山北西山麓で発生した。2000年噴火の活動などの推移については(中田, 2000; 2001; 大島, 2000; 宇井・他, 2002a; 岡田・他, 2002)などを参照されたい。

噴火発生5日前の3月27日から群発地震活動が発生し、時間の経過とともに規模や回数が増大するとともに地表面の地割れが確認された(宇井・他, 2002a)。過去の噴火経験事例に基づき噴火の切迫度を判断し、緊急火山情報第1号が3月29日11時10分に出された(山里, 2001)。噴火発生前に警戒度のもっとも高い緊急火山情報が出され、住民は事前に自主避難を開始した(後に避難指示が出された)。その背景には、噴火に至る地震活動の推移が過去のパターンに類似していたため、経験則に基づき予知判断ができたことに加えて、ハザードマップの作成や防災訓練など、住民の火山に対する意識の高まりによるところが大きい。前述の技術予測調査に第1課

題である2~3日前の予測に対する実現予測年「2006年」を、この噴火では達成したといえる。また、第2課題の火砕流発生については、過去の事例から起こりうるシナリオとして現実に心配された。3月31日の最初の噴火や4月7日の噴火で小型の火砕サージの発生が確認されているが、経験則に基づき事前に予想された火砕流ではなく小規模の火砕サージの発生であった(宇井・他, 2002b)。したがって、規模の予測まで含めると第2課題が達成されているとはいえないと判断される。

今回の緊急火山情報の出された日時などを、少し掘り下げて検討すると問題点も浮かび上がってくる。有感地震の多発、割れ目の出現などをもとに「切迫度」が過去の経験をもとに判断され、緊急火山情報第1号の発信となっているが、「数日以内に噴火が発生する」との情報の背景は必ずしも明らかでない。今回の噴火発生日の予測はまだ経験則の域に止まっている。

われわれは、緊急火山情報が出された直後から、「数日以内に噴火が発生する」との噴火日時の予測の定量化を準リアルタイム的に試みた。その結果を以下に述べる。地震予知計画では、隣接観測網間で一部の地震波データの相互乗り入れが行われている。東北大学と北海道大学間では、短周期地震波形データがリアルタイムで交換され、ほぼリアルタイムで震源が決定される(長谷川・他, 1986)。北海道大学からは道南のデータが東北大学に伝送され、それらは地震・噴火予知研究観測センターのデータとマージされ自動震源が求まる。この自動処理データをもとに噴火日時の準リアルタイム的な予測を試みた。予測の基礎モデルは、Voight (1988) の破壊基準モデルと山本 (1998) の破壊強度分布モデルである。噴火は地殻中に破壊面が形成されマグマ等の火山性流体が、破壊面を上昇し地表に到達する現象であると解釈する。マグマ等の深さや粘性により地表まで到達する時間は異なり、噴火時間は上記のモデルから予測される時間に対して多少遅れることが予想される。緊急火山情報第1号の出た3月29日から予測計算を始め、有珠山周辺の地震を抽出し、マグニチュード(M)からベニオフ歪みを求め、歪み解放レートから目の子で最終破壊時刻(Q)を推定した。3月30日16時55分までのデータに基づき、Voight (1988) の方法で予測した結果は、同日17時45分に気象庁火山噴火予知連絡会に検討資料としてファックスで送付した(図1)。最終破壊の推定時刻(Q)は、3月31日02時と予測された。これは噴火発生(13時10分)より11時間早い時刻である。一方、山本(1998)の方法による予測は解析の都合上、準リアルタイム的には処理できなかったため、後処理として行った(図2)。この時には、マグニチュード(M)から地震エネ

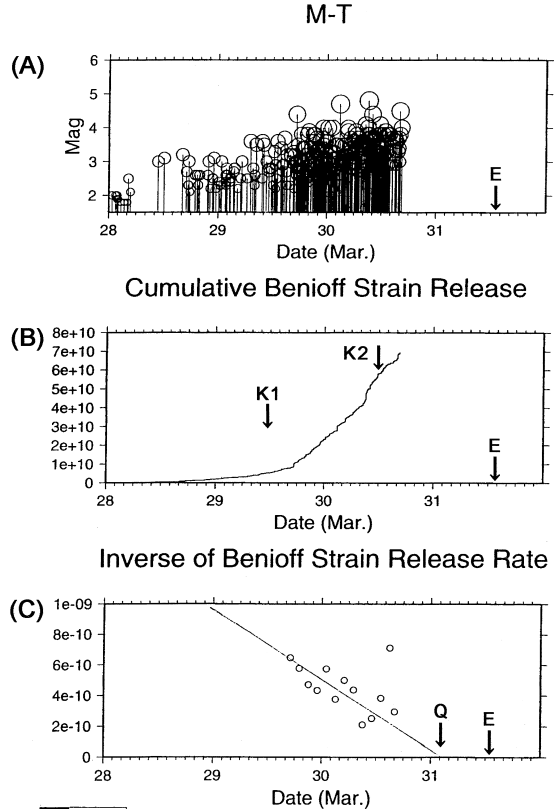


Fig. 1. Semi-real-time estimation of the final failure time ( $Q$ ) at Usu volcano, based on Voight (1988) model. (A) M-T diagram. Source data is based on the automatic hypocenter determination at RCPEV, Tohoku University. Letter  $E$  indicates a time of eruption. (B) Cumulative Benioff strain release.  $K1$  and  $K2$  mean the time of 1st and 2nd emergency volcano information issued by JMA, respectively. (C) Inverse of Benioff strain release rate versus time.  $Q$  is the estimated time of failure (Mar. 31, 02h).

図1 Voight (1988) モデルを適用した場合の有珠山に於ける最終破壊発生時刻 ( $Q$ ) の推定。(A) マグニチュードの時間変化。データは東北大学自動処理震源による。マーク  $E$  は噴火発生時刻。(B) ベニオフ歪の積算曲。  $K1$ ,  $K2$  はそれぞれ緊急火山情報第1号, 2号の発信時刻に対応。(C) ベニオフ歪の逆数の時間変化。目の子による直線当てはめから推定した最終破壊時刻 ( $Q$ ) は3月31日02時。

ルギー ( $E$ ) を求め、その累積曲線に破壊進行関数を当てはめ、最終破壊時刻を推定した。火山体への応力の掛かり始める最初の時刻を28日00時と仮定して求めた最終破壊予測時刻は、3月30日21時36分と見積もられた。この予測時刻は、噴火発生時刻の約15時間前に相当す

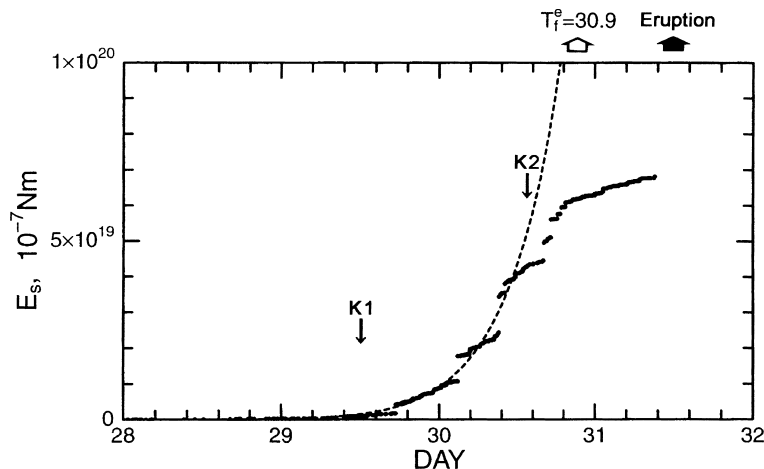


Fig. 2. The cumulative energy curve prior to the eruption at Usu volcano. Solid and dashed curves indicate cumulative energy and the theoretical values estimated based on the model by Yamamoto (1998), respectively. Applied stress is assumed to start on Mar. 28, 0 h. K1 and K2 are the same as in Fig. 1.

図2 山本 (1998) の破壊進行関数に基づくエネルギー放出曲線 (点線) から推定した有珠山での最終破壊時間 ( $T_f^e$ ).  $T_f^e$  は3月30日21.6時. 実線は観測されたエネルギーの積算曲線. 応力に印加は3月28日00時と仮定する. K1, K2は図1に同じ.

る。2つのモデルから推定された最終破壊予測時刻には、約4時間ほどの差異があるが、それは問題ではない。両者の予測時刻が3月30日の夜間であることが重要である。この3月30日には、ヘリコプターからの西山東麓の割れ目発見 (岡田・他, 2002) があり、13時20分に緊急火山情報第2号が出された。この第2号には、噴火時刻に関する情報は明示されずに発表された。モデルから推定された噴火時刻の推定 (30日夜間) は、緊急火山情報第2号の発信時刻 (30日13時20分) と実際の噴火時刻 (31日13時10分) の中間に位置し、モデルに基づく準リアルタイム処理が、今回の噴火時刻推定に有効であることがわかるとともに、緊急火山情報第2号の発信時の妥当性を検証したと言える。

今回の噴火では、有感地震活動や割れ目の出現のデータを礎にした経験則に即して、噴火時期や位置について予測が成功した。また、岩石破壊モデルを適用し準リアルタイム的に噴火時刻を予測することにより経験主義を乗り越えられる可能性が示された。これは第6次予知計画に掲げられた目標である第2段階「過去の事例をも考慮して噴火の発生や推移を定性的に予測する段階」から第3段階「物理化学的モデルを用いて、噴火の開始や推移を定量的に予測する段階」に移行できる可能性を現実のデータで実証したものと解釈出来る。

### 3. 三宅島2000年噴火

三宅島は、22年の整数倍の間隔で噴火するとの統計的な資料 (宮崎, 1984) などから、次期に噴火の発生が予

想され、シナリオなども検討されていた (気象庁, 1999)。三宅島2000年の噴火は、海底での小規模噴火 (6月27日) の発生段階までは、最近の経験から判断される推移をたどったが、マグマの西方への貫入による大規模な群発地震発生 (浜田, 2001; 酒井・他, 2001) 以降からは、経験則では計れない展開になり、異常な活動が継続し予測が不能な状態に陥った (井田, 2001)。この間、山頂で爆発が繰り返し発生し、8月29日には低温火砕流の発生が確認されるなど、予知や防災対応の面でも問題を残した (井田, 2001)。火山学的には、山頂カルデラ形成 (中田・他, 2001; 津久井・他, 2002)、特異な傾斜変動や超長周期地震の発生 (藤田・他, 2001; 山本・他, 2001; 菊地・他, 2001) や高濃度  $\text{SO}_2$  ガスの長期間噴出 (風早・他, 2001; 宇都・他, 2001) など多方面の観測から噴火過程の実体に迫る興味深い結果が提示された。しかし、学問的な成果とは別に、噴火予知の視点からは、いくつかの問題点が残された。

(1) 地殻変動観測から前兆的な山体膨張が検出されるなど、早い時期に緊急火山情報第1号 (6月26日19時33分) が出され、翌日に海底噴火が発生した。この第1号には噴火時間の情報は含まれていないが結果的には、前述の第1課題に答えたものと解釈される。しかし、第2課題の火砕流予測では全く無力であった。7月8日から始まる一連の山頂噴火の推移予測が、不可能であったことに由来することは自明である。

(2) 噴火シナリオ (気象庁, 1999) では、山腹割れ目噴火と海岸近傍でのマグマ水蒸気爆発の確率が高いとい

う予測がされている。これは、明らかに1962年や1983年に発生したごく最近の噴火事例に大きく影響されたシナリオである。三宅島の噴火史(津久井・他, 2001; 2002)からは、山頂噴火を含め多様な形態が知られているが、一般に発生頻度の低いもの(したがって発生間隔が長い現象)は、その機構が不明のため経験的シナリオに組み込まれず、無視される傾向がある。今回の山頂陥没などは、起こりうるシナリオとして無視されたため、異常な活動と判断されたと思われる。比較的頻繁に起きる噴火間隔の短い事象(側噴火など)と希にしか起きない長周期的事象(山頂陥没など)が重複した現象の予知の困難さを、今回の噴火から学ぶ結果となった。

(3) 3000年ぶりの山頂陥没にどのように対応するか。わが国の火山ではごく希にしか起きない噴火事象が、海外の火山ではしばしば経験されるような例は多い。視野を海外に広げると、陥没現象を伴う噴火は、それほど珍しいことではない(高田, 2001)。国際協力をもっと積極的に推進し、海外の多様な噴火を経験しておくことは、将来的のわが国の噴火予知に役立つとの認識が重要であろう(浜口, 1996)。

#### 4. 岩手山の異常活動

東北地方の火山は一般に静穏期が長く、噴火間隔は100年以上のものが多い。岩手山では、1732年の焼走り溶岩流を伴う側噴火以来、260年間本格的な活動が見られない。有珠山や三宅島のような20~30年間隔で噴火するものに比べて1桁間隔が長い(表1)。したがって、岩手山では、噴火の間隔や様式などに関するデータが乏しく、経験則に基づく判断はできない。予知の基本は、現状の火山活動度と火山の構造や状態をできるだけ正確に把握するとともに、微弱な前兆現象を確実に捕捉して予知に結びつける以外に道はない。静穏期の長い火山の噴火予知の戦略は、活動的な火山の場合と当然違ったものになる。深部から浅部へのマグマ上昇などに伴う微弱な火山性微動などを前兆活動として捉えることが必須である。そのためには、S/N比の良いデータが得られるような観測環境をまず整えることが要求される。この目標に向かって岩手山では、1995年までに、300m縦坑2カ所、100m縦坑1カ所、5m横坑1カ所の定常観測点を設置し、地震計、体積歪計、傾斜計、温度計などの多項目・高感度観測によるモニタリングを開始した。1995年9月には継続時間45分の火山性微動を観測史上初めて検知した。低周波地震を伴った微動活動は、下部地殻からのマグマ上昇活動に関連したものと解釈され、直ちに次の活動の高まりに向けて、地震計やGPSなど観測点の強化が大学や気象庁などで図られた。それから2年後

の1998年1月からは、モホ面の低周波地震、稍深部低周波地震、さらに、深さ5km以浅の高周波と低周波地震が連動的に発生し始めた。また、それに伴う一連の地殻変動も検出され、4月29日の活動のクライマックスに向けた活動が加速し、「噴火近し」との緊張感が社会に広まった(浜口, 1999)。結果的には、噴火発生はなく異常活動がその後継続するが、その活動も徐々に落ち着き、今日に至っている。これまでの地震活動や地殻変動の解析結果の詳細については(田中・他, 1999; 植木・他, 1999; 佐藤・浜口, 1999; Tanaka *et al.*, 2002a; Nishimura *et al.*, 2000; Miura *et al.*, 2000)を参照されたい。

上記の地震活動や地殻変動源を詳細に把握しても、地下構造が不明な場合には十分な解釈が出来ない。そこで、有珠山と岩手山での火山体構造探査予定年を変更し、1年早めて2000年10月に実施した(田中・他, 2002)。地下構造の分解能を上げるため人工地震数9点、臨時観測330点、周辺の定常観測観測点(35点)を加えたわが国で最大規模の稠密火山探査である。火山体浅部3次元地下構造が求められ、カルデラ直下には、地表から1kmの深さまでP波高速度域が上昇していることなど過去の山体形成に関係したマグマ貫入過程が明らかになった。また、カルデラ域から北東に伸びた高速度域と1732年の側噴火(焼走溶岩)が空間的に一致していることも明らかになった(図3)(Tanaka *et al.*, 2002b)。1次元の速度分布を仮定して求めた通常の震源分布(1D震源)(図3(B))と、3次元構造をもとに再決定した震源(3D震源)(図3(C))を地下構造図に投影すると、2つの震源分布から得られる情報には大きな違いがあることは一目瞭然である。3D震源分布(図3(C))からは高速度貫入物体と地震活動に明瞭な相関があることや、低周波地震域が特徴的な位置に集中して発生している様子などが見て取れる。このような情報は、地下浅部での火山性流体の動態把握に決定的な重要性を持ち、噴火位置の予測精度の向上に寄与することは間違いない。

岩手山で得られた重要な経験は次の3点に要約される。

(1) 高感度・多項目の観測データをもとに早期に微弱な前兆活動を捉え、地下深部のマグマ活動の高まりを知ることにより、噴火開始ないし活動のクライマックス到来までのリードタイムを長くとることが出来た。それによって観測点の増強などの時間的なゆとりが生まれ、その後の活動に関しては、より精度の高いデータが得られるとともに、データに基づく噴火シナリオを描く時間を確保出来た。

(2) 平常時に活動の静かな火山では、高感度・多項目観測が微弱な前兆現象把握に不可欠である。特に、体積

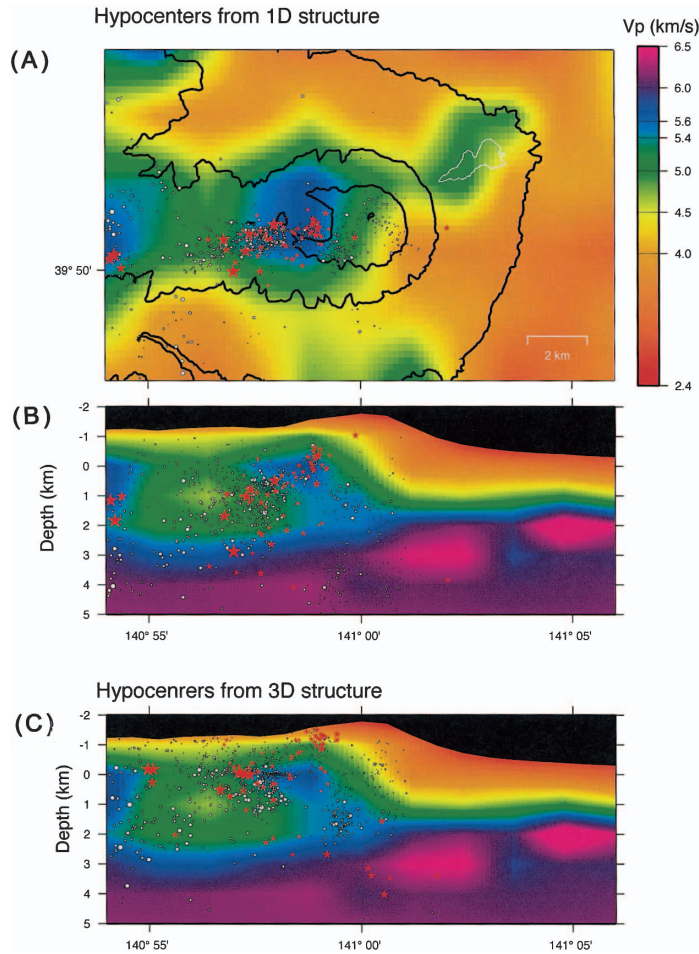


Fig. 3. Comparison of the 3-D P-wave velocity pattern (Tanaka *et al.*, 2002b) with the hypocenters in 1998–1999 at Iwate volcano. The red star indicates a low frequency earthquake and the open circle does high frequency earthquake. (A) Plain view of velocity perturbation at a depth of 0 km together with the 1-D hypocenters. (B) The vertical EW cross-section of P-wave velocity and 1-D hypocenters. The region with high velocity around 5.5 km/s intrudes obliquely beneath the caldera. (C) The vertical EW cross-section of P-wave velocity and 3-D relocated hypocenters. Low frequency earthquakes are concentrated around the tip of intrusion.

図3 岩手山浅部の3次元P波速度モデル (Tanaka *et al.*, 2002b) と震源分布 (1998–1999). (A) 深さ0 kmでのP波速度分布と1次元震央分布. 赤星印は低周波地震, 白丸印は高周波地震を示す. (B) 山頂を横切る東西断面での速度分布と1次元速度モデルによる震源分布. (C) 山頂を横切る東西断面での速度分布と3次元速度モデルによる再決定された震源分布.

歪計など高感度・多点地殻連動連続観測から数10~100ナノ・ストレイン (または, ラジアン) レベルの微小な前兆を捉え, その後のマグマなどの移動を地震データと併合して追跡することにより, 的確に地下の動態を把握出来る見通しを得ることができた. 経験則に頼れない火山では, 噴火時刻や位置などの推定に, このような情報を蓄積し, 将来の予測に役立てる姿勢が重要となる.

(3) 分解能の高い火山体の構造と地震などの活動状況を総合し, 来るべき噴火の発生機構と状態を推定するこ

とが, 噴火経験の少ない静穏期の長い火山の噴火予知の確度をあげることに大きく寄与する. 図3に示される構造と地震活動の西方への移行などの情報は, 入山規制処置のとられていた東岩手山を2001年に条件付きで登山可能にする1つの根拠となった (斎藤, 2001).

## 5. まとめ

有珠山2000年の噴火のように, 最近の噴火から予測されるシナリオと現実の展開が大きくずれない時には,

経験則から噴火発生時刻を2~3日以内に予測できることが確実にされた。これは2006年には2~3日前に噴火時刻を予測できるという第1課題を前倒し的に達成したといえる。一方、噴火発生時は、Voight (1988) や山本 (1998) の破壊モデルをもとにリアルタイム・データ処理から噴火発生まへ1日以内に予測できる可能性のあることが有珠山の事例で示された。

三宅島2000年噴火は、初期の海底噴火発生までシナリオに従って予測できたが、その後の複雑な噴火過程は予測の範囲を超えたものとなった。当初のシナリオに含まれない発生頻度の希な山頂陥没やその後の長期ガス噴出といった現象は、高精度の観測網が設置されているにもかかわらず、その予測は現状では難しい。

静穏期が200年以上の火山では、高感度・多項目・高S/N比の観測から微弱な前兆現象を活動のクライマックス到来のかなり前に把握することが岩手山で検証された。また、高分解能の3次元地下構造と高精度震源分布を組み合わせるにより、地下の火山性流体の動態を正確に推定することが可能となることが判った。これは噴火間隔が長く経験則の乏しい火山での予知の確度の向上に寄与する。

第6次火山噴火予知計画は、有珠山や三宅島の噴火、岩手山の異常地震活動の予測経験を踏まえて、噴火開始時間の予測や基礎的データの蓄積など着実に発展しつつあるものの、噴火様式や規模の予測などには進展がなく、未解明の大きな課題として残されている。

#### 謝 辞

有珠山の噴火発生日のモデル予測に際しては、山本清彦氏、佐藤峰司氏から多大なご協力を頂いた。また、植木貞人氏には、素稿の段階で議論して頂いた。有珠山のリアルタイム予測には、北海道大学地震噴火研究観測センターからのテレメーター・データの一部を使用した。九州大学清水 洋氏および編集担当者井口正人氏からのご指摘は、原稿の不備な点の改善に役立った。関係の皆様には謝意を表します。

#### 引用文献

藤田英輔・鶴川元雄・山本英二・岡田義光・菊池昌江 (2001) 三宅島2000年噴火に伴う火山性地震・火山性微動. 地学雑誌, **110**, 191-203.  
 浜田信生 (2001) 三宅島, 神津島, 新島周辺の過去の地震活動. 地学雑誌, **110**, 132-144.  
 浜口博之 (1996) 火山噴火予知と国際協力. 第3回火山噴火予知研究シンポジウム~21世紀への展望~, 69-70.  
 浜口博之 (1999) 1998年岩手山の噴火危機. 月刊地球,

**21**, 255-256.  
 長谷川昭・海野徳仁・山本 明・高木章雄 (1986) 微小地震観測網データの自動処理システム. 地震, **2**, 39, 381-396.  
 井田喜明 (2001) 火山噴火予知の最前線. 月刊地球, **23**, 745-748.  
 勝井義雄 (1988) 有珠山. その生い立ちと噴火史. 門村浩・他編「有珠山—その変動と災害」, 北海道大学図書刊行会, 226-234.  
 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SO<sub>2</sub>放出量から推測される脱ガス環境—. 地学雑誌, **110**, 271-279.  
 菊地正幸・山中佳子・瀧澤一起 (2001) 三宅島2000年噴火活動に伴う長周期地震のメカニズムとその解釈. 地学雑誌, **110**, 204-216.  
 気象庁 (1999) 火山噴火予知連絡会長期的予測に関するワーキンググループ. 第10回長期予測SG資料 (1999年2月2日).  
 Miura, S., Ueki, S., Sato, T., Tachibana, K. and Hamaguchi, H. (2000) Crustal deformation associated with the 1998 seismo-volcanic crisis of Iwate volcano, northeastern Japan, as observed by a dense GPS network. *Earth Planet Space.*, **52**, 1003-1008.  
 宮崎 務 (1984) 歴史時代における三宅島噴火の特徴. 火山, **29**, S1-S15.  
 中田節也 (2000) 有珠山噴火の推移. 日本地震学会ニュースレター, **12**(2), 21-23.  
 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**, 168-180.  
 中田節也 (2001) 有珠山2000年噴火の推移. 震研彙報, **76**, 203-214.  
 Nishimura, T., Nakamichi, H., Tanaka, S., Sato, M., Kobayashi, T., Ueki, S., Hamaguchi, H., Ohtake, M. and Sato, H. (2000) Source process of very long period seismic events associated with the 1998 activity of Iwate Volcano, northeastern Japan. *J. Geophys. Res.*, **105**, 19135-19147.  
 岡田 弘・大島弘光・青山 裕・森 濟・宇井忠英・膳井義雄 (2002) 2000年有珠噴火の予測と減災情報・助言の活用 (前兆地震発生から噴火開始まで). 「有珠山2000年噴火と火山防災に関する総合的観測研究」研究成果報告書, 34-48.  
 大島弘光 (2000) 2000年有珠山噴火に伴う地震活動. 日本地震学会ニュースレター, **12**(2), 23-24.  
 斎藤徳美 (2001) 岩手山の監視と防災体制. 月刊地球, **23**, 754-759.  
 酒井慎一・山田知朗・井出 哲・望月将志・塩原 肇・卜部 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**, 145-155.  
 佐藤峰司・浜口博之 (1999) 1998年2~8月の岩手火山の火山性地殻変動解析. 月刊地球, **21**, 312-316.

- 測地学審議会 (1997) 火山噴火予知計画の実施状況等のレビューについて (報告). 88 p.
- 測地学審議会 (1998) 第6次火山噴火予知計画の推進について. 15 p.
- 高田 亮 (2001) 玄武岩質火山成長に伴うカルデラ形成—重力崩壊モデル—. 地学雑, **110**, 245–256.
- 田中 聡・中道治久・浜口博之・植木貞人 (1999) 1998年の岩手山における地震活動. 月刊地球, **21**, 273–279.
- Tanaka, S., Hamaguchi, H., Ueki, S., Sato, M. and Nakamichi, H. (2002a) Migration of seismic activity during the 1998 volcanic unrest at Iwate volcano, northeastern Japan, with reference to P and S wave velocity anomaly and crustal deformation. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **113**, 399–414.
- Tanaka, S., Hamaguchi, H., Nishimura, T., Yamawaki, T., Ueki, S., Nakamichi, H., Tsutsui, T., Miyamachi, H., Matsuwo, N., Oikawa, J., Ohminato, T., Miyaoka, K., Onizawa, S., Mori, T. and Aizawa, K. (2002b) Three-dimensional P-wave velocity structure of Iwate volcano, Japan from active seismic survey. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 10.1029/2002GL014983.
- 田中 聡・浜口博之・山脇輝夫・西村太志・植木貞人・中道治久・宮町宏樹・筒井智樹・松尾綱道・及川純・大湊隆雄・宮岡一樹・鬼澤真也・森 健彦・相澤幸司・中原 恒・堀 修一郎・佐藤俊也・河野俊夫・仁田交市・立花憲司・鍵山恒臣・他 48 名 (2002) 岩手山における人工地震探査—観測および初動の読み取り—. 震研彙報, **77**, 1–25.
- 津久井雅志・新堀賢志・川辺禎久・鈴木裕一 (2001) 三宅島火山の形成史. 地学雑, **110**, 156–167.
- 津久井雅志・新堀賢志・川辺禎久 (2002) 三宅島火山 2000 年陥没カルデラ. 震研彙報, **77**, 27–42.
- 植木貞人・三浦 哲・佐藤俊也・立花憲司・浜口博之 (1999) 高密度 GPS 観測により解明された岩手火山の地殻変動. 月刊地球, **21**, 296–301.
- 宇井忠英・中川光弘・稲葉千秋・吉本充宏・総合観測班 地質グループ (2002a) 有珠山 2000 年噴火の推移. 火山, **47**, 105–117.
- 宇井忠英・池田保夫・小山真人・鎌田桂子・岡田 弘・新井田清信 (2002b) 有珠山 2000 年噴火で発生した火砕サージ. 火山, **47**, 333–337.
- 宇都浩三・風早康平・斎藤元治・伊藤順一・高田 亮・川辺禎久・星住英夫・山元孝広・宮城磯治・東宮昭彦・佐藤久夫・濱崎聡志・篠原宏志 (2001) 三宅島火山 2000 年噴火のマグマ上昇モデル—8 月 18 日噴出物および高濃度 SO<sub>2</sub> 火山ガスからの考察—. 地学雑, **110**, 257–270.
- Voight, B. (1988) A method for prediction of volcanic eruptions. *Nature*, **332**, 125–130.
- 山本英二・鶴川元雄・藤田英輔・岡田義光・菊池昌江 (2001) 三宅島 2000 年の火山活動におけるカルデラ形成期に発生したステップ状傾斜変動. 地学雑, **110**, 181–190.
- 山本清彦 (1998) 岩石試料の破壊予測と地震発生の予測可能性. 地震 **2**, **50**, 169–180.
- 山里 平 (2001) これからの火山監視. 月刊地球, **23**, 806–810.