

リアルタイム傾斜データを用いた火山性異常地殻変動の自動検出と 暫定変動源モデル自動推定手法の開発

上田英樹*・藤田英輔*・鵜川元雄*・山本英二**

Automated Technique for Anomalous Volcanic Crustal Deformation Detection and Source Estimation by Using Real Time Tiltmeter Data

Hideki UEDA*, Eisuke FUJITA*, Motoo UKAWA*, and Eiji YAMAMOTO**

**Volcano Research Department,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan
ueda@bosai.go.jp, fujita@bosai.go.jp, ukawa@bosai.go.jp*

***Earthquake Research Department,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan
yamamoto@bosai.go.jp*

Abstract

We developed an automated technique for detection of anomalous crustal deformation and its sources related with magmatic activity under a volcano. Using an automated processing system implemented the technique and real time observation data, we can monitor volcanic activity and provide practical information for short-term countermeasure against a volcanic disaster. The technique uses borehole tiltmeter data with high time resolution and accuracy to detect the anomalous crustal deformation. When it detects the deformation, it automatically searches an appropriate source model for the crustal deformation data and other parallel observation data. We can detect objectively anomalous tilt change by utilizing common time dependent noise properties of tiltmeter data. Applying the technique to NIED's continuous volcanic observation network of Mt. Fuji, we tested the automated system with a test data based on the estimated magmatic process of the 1707 eruption of Mt. Fuji. The system can automatically detect an anomalous tilt change about 2 weeks before the beginning of the eruption and succeeded to catch the magma movement related with the eruption. We confirmed that the technique has an efficient performance for automated monitoring of volcanic activities.

Key words: Crustal deformation, Tilt, detection method, GPS, Automated system, Volcanic Disaster Mitigation

1. はじめに

火山噴火による災害を軽減するための最も有効な手段の一つは、噴火を事前に予測して、十分に備えておくことである。しかし現時点では、地下のマグマの状態などが十分に明らかになっていないため、噴火を中長期的に正確に予測することは極めて困難である。火山噴火の基本的な原因は、火山活動の休止期に地下で力学的・化学的に安定な状態にあったマグマが、さまざまな要因により不安定になり、マグマ溜りから地表へ上昇することであると考えられており、正確な中長期的予測を行うため

には、火山ごとに地下でのマグマの状態、物性、構造などを解明する必要がある。ただし、マグマが上昇を始めてから、応力場・変位場等の変化を観測によって捉え、マグマの動きを定量的に迅速に把握すれば、噴火の発生を短期的に予測し、噴火の恐れがある場所を限定することは可能である。

本論では、短期的噴火予測を目的として新しく開発したデータ処理の手法について報告する。本手法は、防災科研の火山活動観測網のポアホール式傾斜計のリアルタイムデータを利用して、マグマの動きによる異常な地殻

*独立行政法人 防災科学技術研究所 火山防災研究部

**独立行政法人 防災科学技術研究所 地震研究部

変動を自動で検知し、自動で変動源モデルを推定する方法である。これによって、十分な観測データがあれば、地下のマグマの移動などの火山活動プロセスをリアルタイムでモニターすることができ、短期的な火山災害対策のための情報を提供することが可能となる。

これまでも桜島では、たびたび発生するブルカノ式の噴火に伴う変動の特徴をもとに水管傾斜計のデータを使用した噴火の自動警報システムが実用化されている(Kamo and Ishihara, 1989)。今回新しく開発した手法と従来の手法との主な違いは、過去に観測された異常変動の規則性に基づくのではなく、傾斜計のノイズ特性を利用した客観的な基準に基づいて異常検知を自動で行い、同時に変動源モデルの推定を自動で行う点である。異常検知と変動の解釈を行うことによって、火山性の異常変動の観測経験がない火山や、噴火が発生する場所が毎回異なり、それに伴う変動も毎回異なる火山にも適用することが可能である。

自動処理によってすばやく異常検知と変動源のモデル化を行い、火山活動と同時進行で地下のマグマの動きを把握できる点も特徴の一つである。これまでも三宅島や浅間山において噴火の前兆的な観測データの変化がとらえられ、噴火前に火山情報として公表された例がある(気象庁, 2002, 2005)。また同型の傾斜計によって実際に噴火の前兆となる変動が捉えられているが(山本ほか, 1988; Okada and Yamamoto, 1991; Ukawa *et al.*, 2000)、その変化が地下の何の活動によるものかは、その時点では不明であった。一方で、観測データの解析から噴火前の地下のマグマの動きが高い時空間分解能で推定されている(例えば, Okada and Yamamoto, 1991)。しかし、それは主に火山の研究を目的として行なわれているため、解析結果が公表されるのは研究者が十分に検討した後で、たいていは噴火後である。解析結果である変動源に関する定量的な情報を火山活動の進行と同時に知ることができれば、例えそれが暫定的なものであったとしても、火山災害対策のための情報の1つとして価値がある。特に、火山活動の活発化から噴火までの時間が比較的短い伊豆大島や三宅島などの玄武岩質火山については極めて重要な情報となる。

観測データから地下のマグマ活動を推定するためには、一般に①マグマ活動による異常な変動の発生を検知し、②変動を読み取り、③変動に最も適切な変動源モデルを選択する、の3つの手順が必要である。異常な地殻変動の検知には、ボアホール傾斜計のデータを使用する。傾斜計は、他の観測データに比べて精度と時間分解能が高く、異常な変動の検知に有効であるが、気象や地震、傾斜計固有の変動を含んでいる。そこでまず本論の第2章では、富士山の火山活動連続観測網を例として、使用する傾斜計のデータの特徴と火山性地殻変動以外の変動の補正方法について述べる。次に第3章では、異常な変動の客観的な基準を設け、傾斜データから異常な変動を自動で検知する方法について述べる。さらに、富士山の火山観測網の検知能力について考察する。第4章では、富

士山宝永噴火の推定火山活動プロセスに基づいてテストデータを作成し、開発した検知手法の試験を行う。異常な変動が検出された場合、傾斜データおよび他の観測データの変動量を読み取り、変動に最も適切な変動源モデルを探索する。試験の結果、このテストケースについて噴火の数日前に自動でマグマの移動を適切に検知し、さらに噴火発生時のマグマ活動の推移もモニターできることを確認できた。本論では傾斜とGPSデータのみ使用したが、地磁気、重力などの他の並行観測データがあれば、さらに精度が高い推定を行なうことができる。第5章では、本論のまとめと今後の展望について述べる。

2. 傾斜変動データ

2.1 傾斜観測の概要

事例として傾斜データを使用する富士山の火山活動連続観測網(鶴川, 2007)の位置を図1に示す。観測点は、標高約1,000mの山麓に4点、約2,000mの山腹に2点設置されている。傾斜計は、力平衡型振子式傾斜計(アカシ製, JTS-23, 33型)で、温度変化や騒音など地表付近のノイズを避けるため深度約200mのボアホールの底に置かれている。観測点では、傾斜変動観測の他に地震(短周期, 広帯域)、気圧、降水量、地中温度、GPS測位の観測が行われており、NTTの地上回線とJSATの衛星回線による2系統のテレメータにより、つくば市の防災科研にリアルタイムでデータが伝送されている。ただし、GPSデータは4時間毎に電話回線を通じて伝送されている。

傾斜計が設置されているボアホールはケーシングされ、ケーシングと孔壁の間はセメントが充填されている。傾斜計は直径110mmの耐水耐圧容器内に納められ、振子は直行2軸の自在継手(十字バネ)で容器から吊られている。振子には直交する2方向にそれぞれ極板と磁石

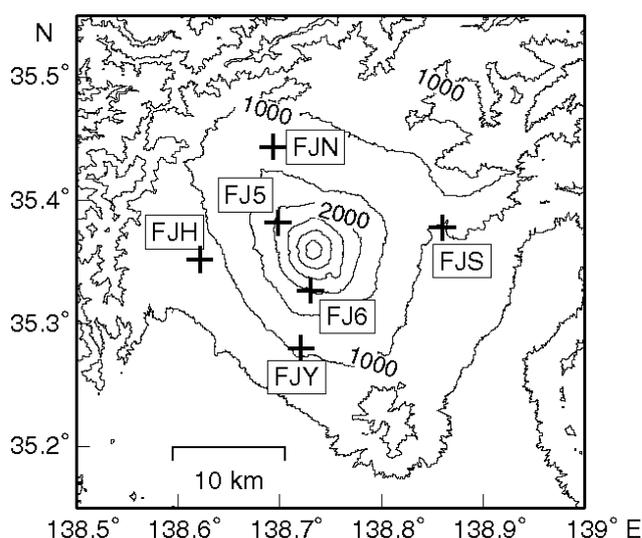


図1 富士火山活動連続観測点網の位置
Fig.1 Map showing the location of the continuous observation network of Mt. Fuji.

が付いており、それぞれに相対して容器側に極板とコイルが取り付けられている。極板間はコンデンサーを形成しており、振子が傾くとコンデンサーの容量変化により電流が流れ、その電流がコイルに流れることによって磁石に力を及ぼし振子が常に中立点に位置するようになっている。このフィードバックによって、バネにトルクが加わることによるクリープが生じないように設計されている。回路に流れる電流は、振子の傾きに比例し、電流に比例する電圧を傾斜計の出力として取り出している（佐藤ほか，1980）。

傾斜計の計測範囲は $\pm 240 \mu\text{rad}$ で、24ビットの分解能で1Hzでサンプリングされている。防災科研において、伝送されたデータから分値、時間値、日値データが作成されて生データとともに保存されている。なお、分値データは、1分間の60個のデータを大きさ順に並べたものの29~31番目のデータの平均値であり、時間値、日値は正時、午前0時の分値である。

2.2 傾斜データの特徴

2.2.1 ドリフト

図2に富士山火山観測網の2007年の時間値データを示す。あわせてFJYの6時間毎の降水量も示している。各観測点の1年間の総変動量は、FJSの $4.8 \mu\text{rad}$ が最大であり、平均で $2.6 \mu\text{rad}$ である。ただし、この値は後で述べる地震や降水による変動を含んだものである。これらの影響が比較的少ないFJNのEW成分のドリフトの大きさは $0.5 \mu\text{rad}/\text{year}$ ($1.6 \text{rad}/\text{day}$)であり、極めて安定している。

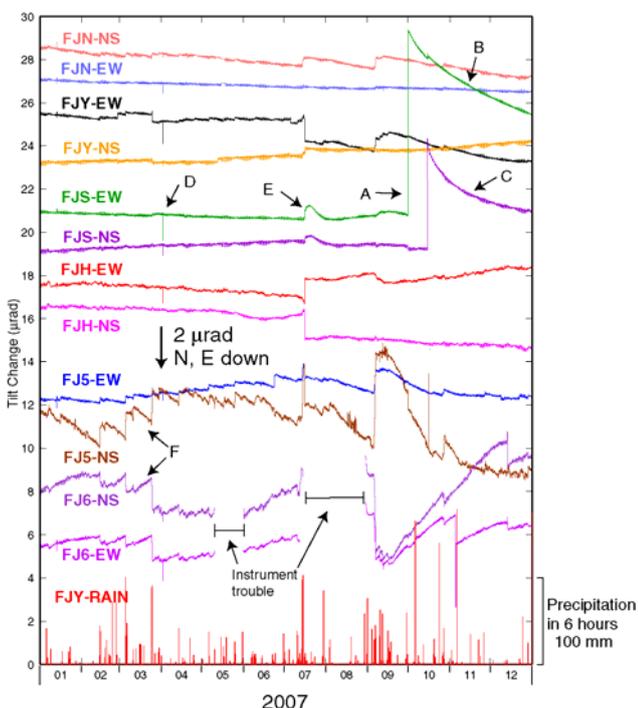


図2 2007年の傾斜計の時間値データとFJYの6時間毎の降水量

Fig.2 Hourly sampled tilt meter data and precipitation at FJY in 2007.

2.2.2 地震による変動

図2の矢印で示した変動Aは、2007年10月1日に神奈川県西部で発生した地震(M=4.9)とほぼ同時に発生したステップ状の変化である。FJ5のNS成分にも同時に変化が見られる。変化量は $8.5 \mu\text{rad}$ であり、この地震から期待される静的な傾斜変動の大きさ $0.1 \mu\text{rad}$ に比べて数十倍大きい。FJNのEW成分には、2003年5月26日宮城県沖地震(Mw7.0)の発生時も距離が460kmも離れているにもかかわらず $6.2 \mu\text{rad}$ のステップ状の変化が記録されている。このステップ状の変動は、一般に地震による強い振動を受けたときに発生し、地震の規模や震源距離から期待される変動量に比べて数倍以上大きいという特徴がある。しかし、強い振動を受けた場合でも地震によるパルス(変動D)のみでステップが発生しない場合もある。振動の大きさとステップの大きさには相関が見られず、地震の発生からステップの発生やその大きさ予測することは困難である。

このステップの原因として、地震による振動によって傾斜計本体がボアホール内で動いた可能性（佐藤ほか，1980）と、振子の中立点がずれてしまう可能性が考えられる。図2の変動Aは、NS成分にステップ状の変化がほとんど見られないことから、後者が原因である可能性が高い。

ステップ変動の後、変動Bのようなステップを緩和する変動が発生する場合がある。この緩和変動は、中立点がずれたことによって、振子を吊っているバネにトルクが掛かり、バネがクリープすることによって生じたと考えられる。FJSのNS成分には、その後もステップと緩和変動が見られる(変動C)。これは、10月15日に行われた観測点の保守点検時に中立点の位置がリセットされたために生じた変動である。他の記録も併せて調査した結果、観測例は少ないものの緩和変動は、おおよそ $A[1-\exp(-t/T)]$ に従う性質を持っており、フォークトモデルで表すことができる。ここで、Aは総変動量、tはステップからの時間、Tは時定数である。時定数は、各観測点、成分毎にほぼ一定であり、10~100日である。FJSのNS成分の場合は約30日である。

2.2.3 気象変動、潮汐の影響

FJNのNS成分について、BAYTAP-G (Tamura *et al.*, 1991)を適用し、潮汐成分と大気圧の応答成分を分離したものを図3に示す。大気圧の変動による傾斜変動は、1~2hPaで $0.01\sim 0.02 \mu\text{rad}$ 程度である。地球潮汐の成分の振幅は $0.15 \mu\text{rad}$ 程度であり、4つの分潮成分(S2, 12h; M2, 12.42h; K1, 11.97h; O1, 25.82h)が他の成分に比べて卓越している。

図2の変動E及び変動Fや図3の10月末頃に見られる変動は、降水に伴う変動である。一般に、降水時に急激に変化し、その後数日間でもとのレベルに回復する変動である。しかし、FJSの変動Eのように複雑な変動を示す観測点もある。降水による変動は、山腹のFJ5, FJ6で特に大きく、最大のノイズである。

2.3 火山活動以外の要因による変動の補正

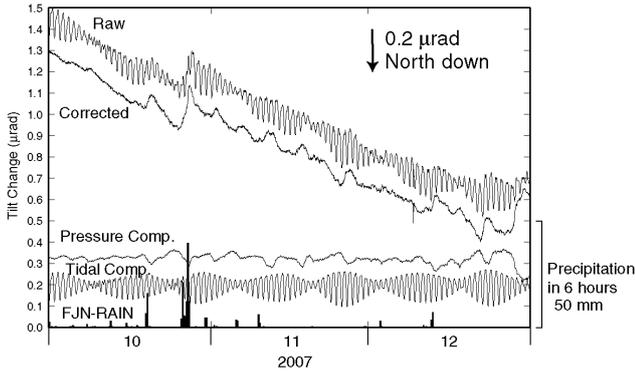


図 3 FJN の傾斜データの NS 成分に BAYTAP-G (Tamura et al., 1991) を適用した結果
 Fig.3 Result of the adoption of BAYTAP-G (Tamura et al., 1991) to the tilt data at FJN.

火山性の地殻変動を検知するため、傾斜計データに含まれる火山活動以外の様々な要因による変動をデータから取り除くことが必要である。潮汐、地震によるステップ、気圧の影響は、気圧データと上記の BAYTAP-G を用いて除去した。ただし、地震によるステップは地震の規模や振動の大きさなどから発生を予測することが困難であるため、最新の傾斜値を補正することは極めて困難である。そこで、過去のデータについてのみ、地震発生時に 0.1µrad 以上の変化が見られる場合に補正することとする。

最大のノイズである降水による変動の補正は、降水量のデータを用いて行なった。降水による変動の原因として、帯水層の水位や近くの河川・池の水位変化による地盤に加わる荷重の変化や、土壌の吸水膨張が考えられる。ここでは、最も簡単な場合として降水による帯水層の水位変化の影響のみを考え、図 4 に示した一次遅れ系を組み合わせたモデルを用いて補正を行なった。i 番目の帯水層の時刻 t_n における水位を $y_i(t_n)$ とし、水位は、

$$y_i(t_{n+1}) = \begin{cases} (1-r_i)y_i(t_n) + P(t_n) & \text{for } i=1 \\ (1-r_i)y_i(t_n) + r_{i-1}y_{i-1}(t_n) & \text{for } i \neq 1 \end{cases}, \quad (1)$$

にしたがって変化するとする。ここで r_i は i 層の浸透率、 $P(t_n)$ は時刻 t_n の降水量である。i 層では単位時間に水位に比例する $r_i \cdot y_i(t_n)$ が i+1 層に浸透するとする。帯水層の水位が一樣に上下すると仮定すると、i 番目の帯水層の荷重による下向きの力は水位に比例し、荷重による傾斜変動は半無限均質弾性体の場合はその力に比例するため、帯水層の水位変化による傾斜変動は、

$$T(t_n) = \sum_{k=1}^M A_k y_k(t_n), \quad (2)$$

と表すことができる。ここで A_k は比例係数、 M は層の数である。k の値が大きい層の影響ほど、降水に対する変動の応答は遅くなる。

ここでは、数時間から数日程度の降水の影響を補正す

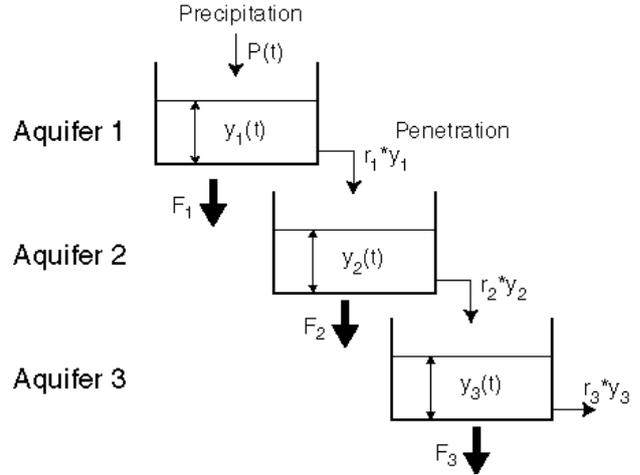


図 4 降水による傾斜変動の補正に用いた帯水層モデル
 Fig.4 Aquifer model used for correcting tilt change due to rainfall in tilt data.

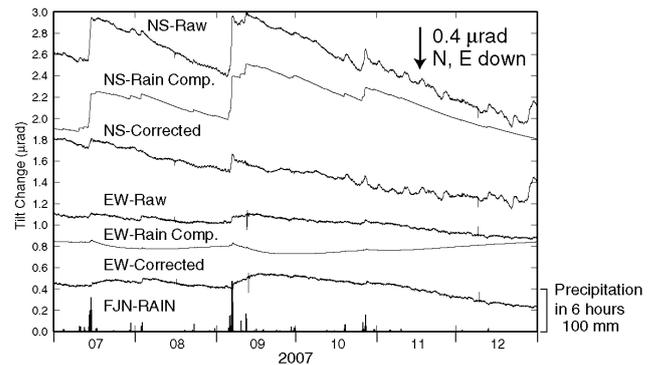


図 5 帯水層モデルを用いて FJN の傾斜データの降水による変動を補正した結果
 Fig.5 Result of correction of tilt change due to rainfall in tilt data at FJN by using the aquifer model.

ることを目的に、3 層のモデルを使用する。モデルパラメタである浸透率と比例係数は、降水の影響が見られる 15 日間のデータを実際のデータから選び、それに適合する値を選んだ。推定したパラメタと降水量データから傾斜変動を計算し、それを用いて補正した。FJN のデータに適用した例を図 5 に示す。FJ5 と FJ6 は降水量の観測を行っていないため、それぞれに最も近い観測点 FJN と FJY のデータを使用した。この簡便な方法によって、数時間から数日程度のノコギリ状の変動を再現することができ、概ね降雨の影響を軽減できていることがわかる。

帯水層の水位変化モデルによって、FJN, FJY, FJH, FJ5, FJ6 の降雨に伴う変動を再現することができ、補正することによって後で述べる異常変動の検知レベルを約 10% 程度改善することができた。しかし、FJS の変動

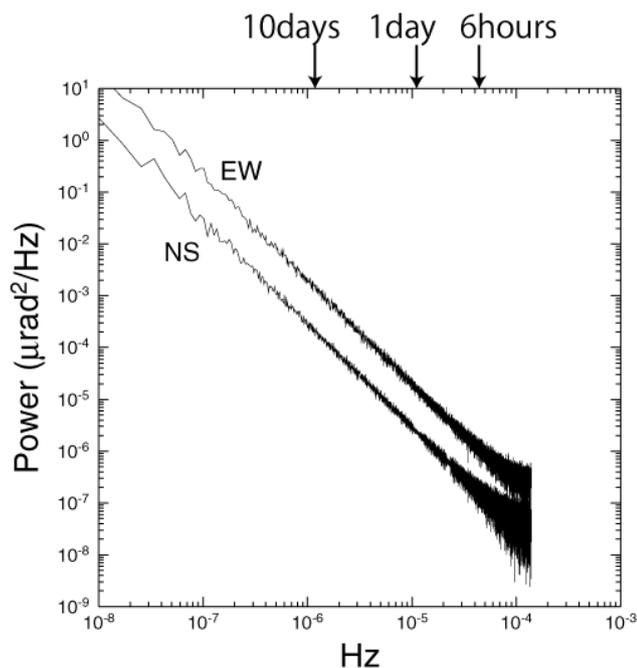


図6 補正を施した FJY の傾斜データ (2001-2007) のパワースペクトル
 Fig.6 Power spectrum of corrected tilt data at FJY during the period from 2001 to 2007.

(図2の変動E)を再現することはできなかった。この結果は、FJSの変動が帯水層の単純な水位変化によるものではないことを示唆する。FJSの南側には梨の木平と呼ばれる面積約1km²の平地が広がっており、その平地は南側以外の三方を山の斜面で囲まれていて、降水時に雨が集りやすい地形となっている。この平地一帯の複雑な水の流れがFJSの降雨に伴う変動をもたらしている可能性がある。

3. 異常変動の検出方法と検知レベル

3.1 検出方法

ここでは一般に、ある時刻の観測値が過去の観測値から予測される値と比較して有意に異なる時、その時刻の値を異常な変動であると定義する。この定義に基づいて、異常な傾斜変動の検出方法について検討する。

図6は、補正を施したFJYの時間値データについて、2001年から2007年までの長期間のパワースペクトルを示している。スペクトルは、6時間(4.6x10⁻⁵ Hz)より長い周期については周波数の2乗に反比例し、それより短い周期については周波数に依存しない特徴を持っている。これは、富士、伊豆大島、三宅島の全ての観測点に共通する特徴である。これは、6時間より長い周期については傾斜値がランダムウォークに従って揺らいでいることを示している。したがって、ランダムウォークノイズとホワイトノイズの大きさを過去のデータから測定することによって、将来の傾斜値を統計的に予測することができる。

傾斜値の予測とノイズの大きさの推定には、カルマンフィルタ(例えば、Brockwell and Davis, 2000)を使用する。上述の補正を行った時刻 t_n の傾斜値を観測方程式

$$T(t_n) = X(t_n) + w(t_n), \quad (3)$$

と表すことができると仮定する。ここで $X(t_n)$ は状態変数で

$$X(t_{n+1}) = X(t_n) + v(t_n), \quad (4)$$

と表され、ここでは傾斜値のランダムウォーク成分に相当する。 w と v は、他の時刻の値とは独立でそれぞれ平均0分散 σ_w^2 、 σ_v^2 を持つ正規分布に従うランダムな値である。(3)式の観測方程式と(4)式の状態方程式に基づいてカルマンフィルタを1年間の傾斜データに適用し、各時刻の $X(t_n)$ を推定した。なお、 σ_w^2 、 σ_v^2 は最尤法を用いて同時に推定した。

カルマンフィルタの結果から、 h 時間先の傾斜値を予測する。この場合は、予測値の値は常に一定で $X(t_n)$ である。予測誤差は、予測期間と共に大きくなり $\sigma = \sigma_w + \sigma_v \sqrt{h}$ である。表1に2007年のデータから推定した各観測点の傾斜データの精度を示す。 σ_w は0.001 μrad 程度、 σ_v は0.01-0.05 μrad である。

表1 傾斜計の精度
 Table 1 Accuracy of Tiltmeters.

観測点名	成分	σ_v (μrad)	σ_w (μrad)	1日の変動の精度 (μrad)
FJN	EW	0.020	0.002	0.098
	NS	0.034	0.001	0.169
FJY	EW	0.039	0.001	0.193
	NS	0.030	0.001	0.146
FJS	EW	0.025	0.002	0.125
	NS	0.022	0.001	0.107
FJH	EW	0.030	0.002	0.150
	NS	0.021	0.001	0.105
FJ5	EW	0.017	0.002	0.086
	NS	0.074	0.007	0.371
FJ6	EW	0.046	0.004	0.228
	NS	0.050	0.004	0.247

異常な変動の定義に基づいて、時刻 t_n の実際の傾斜値と時刻 t_{n-h} までの傾斜値から予測した h 時間先の予測値と比較して、予測誤差 σ の2倍以上異なる場合に異常な傾斜変動とする。検知レベルは、観測点毎に異なり、24時間先の予測値の場合で0.2-0.5 μrad である。マグマ溜まりからマグマが上昇して地表に至るまでの期間に対応すると考えられる数時間から数日程度の異常な変動を検出するため、異常値の判定には、1, 6, 12, 24時間先, 2, 3,

5, 10日先の予測値について行なうこととする。予測期間が短い方が検出感度が高いが、ゆっくりとした変動は検知することが難しいため、複数の予測値について判定を行う。

3.2 富士山火山連続観測網の検知能力

3.2.1 球状圧力源

この検出方法によって検出可能な変動源について調査する。まず、球状圧力源 (Mogi, 1958) を考える。検出可能かどうかは、変動源と観測点の相対的な位置関係だけでなく、変動源の変動レートと継続時間によって異なる。富士山と同じ玄武岩質の火山である伊豆半島東部火山群における1989年海底噴火の際のマグマ貫入レートは、 $2.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$ (Okada and Yamamoto, 1991), 2002年の群発地震の場合は、 $2.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$ (上田ほか, 2003) であった。さらに、2000年三宅島噴火活動の初期に島の南西斜面で発生したマグマ貫入の貫入レートは $1.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$ である (Ueda *et al.*, 2005)。そこで、玄武岩質火山の典型的な値として $1.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$ を球状圧力源の膨張レートとして仮定した。

図7は、その膨張レートで1日間膨張した場合、1つ以上の観測点で1日以内に傾斜変動が検知レベルを超える変動源の位置を示している。5km以浅では、観測点から水平距離で10km以内であれば検知可能であり、富士山体をほぼ網羅している。10kmの場合は、幾つかの観測点近傍では検知することができない。しかし、変動が

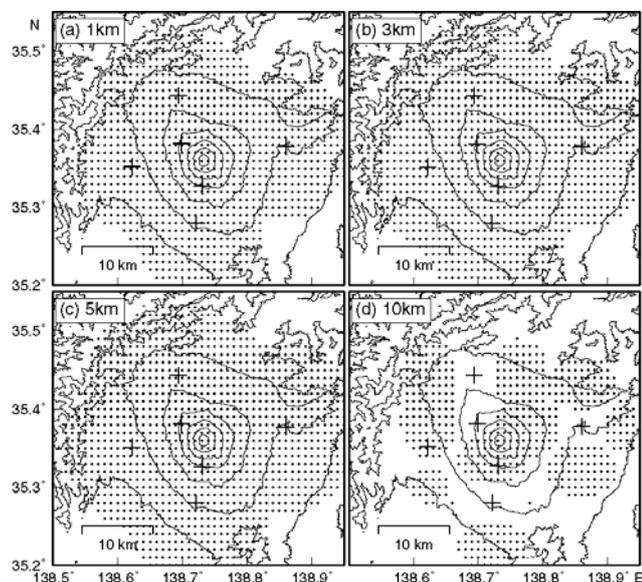


図7 球状圧力源の膨張レートを $1.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$ と仮定した場合、変動の開始から1日以内に異常な傾斜変動が検知される圧力源の位置

Fig.7 Locations of spherical sources with inflation rates of $1.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$ which can be detected by the tiltmeters within one day from the beginning of the inflation.

同じレートで n 日間継続すれば変動量は n 倍になるが検知レベルはおおよそ \sqrt{n} 倍となるため、変動がさらに長い間継続すれば、検知できる可能性はある。

3.2.2 ダイク

次にダイク貫入による変動を考える (Okada, 1992)。富士山では、山頂を中心として放射方向に割れ目噴火が発生する傾向がある (石塚ほか, 2003)。そこで、ダイクは鉛直で山頂から放射方向の向きを持ち $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ の大きさのモデルを仮定した。貫入レートは、球状圧力源と同じ $1.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$ を仮定した。これは、1日あたり25cmの開口に相当する。図8は、その貫入レートで1日間継続した場合1つ以上の観測点で1日以内に傾斜変動が検知レベルを超える変動源の位置を示している。ダイクの上端の深さが5kmの場合は、山頂から15km以内で検知可能である。10kmの場合は、いくつかの観測点の近傍のみで検知することができる。ただし、球状圧力源と同様に変動がさらに長期間継続すれば、検知できる可能性はある。

富士山では、山体直下10~20km付近でマグマの動きと関連すると考えられる低周波地震が発生しており、このあたりからマグマが上昇して地表に達し、噴火に至る可能性が高い。この傾斜計を利用した検知手法は、玄武岩質火山の典型的なマグマ貫入レートでマグマが深さ5km以浅に達すれば、1日以内に検知することが可能である。

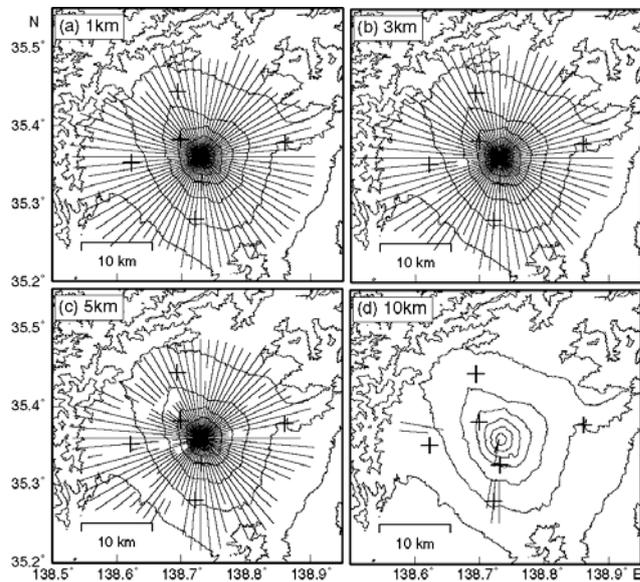


図8 ダイクの膨張レートを $1.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$ と仮定した場合、変動の開始から1日以内に異常な傾斜変動が検知されるダイクの位置

Fig.8 Locations of dike sources with inflation rates of $1.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$ that can be detected by the tiltmeters within one day from the beginning of the inflation.

4. 異常変動自動検知・暫定変動源モデルの自動推定手法の試験

4.1 テストケース

本検知手法の能力を調査するため、テストデータについて試験を行なった。富士山では、近代的な火山観測の開始以来、2000年の低周波地震の活発化（鶴川，2001）を除いて顕著な火山活動は観測されていない。そこで、火山噴火予知連絡会富士山ワーキンググループで推定された富士山宝永4年噴火の火山活動プロセス（火山噴火予知連絡会，2003）に基づいて、テストデータを作成した。このプロセスは、噴火（12月16日）の約2か月前から山頂直下15kmのマグマ溜りからダイクが徐々に上昇して地表に達し、その後噴火によって半月間に約0.7km³の噴出物を放出しながらマグマ溜りが収縮したというものである。この手法で噴火前のダイク貫入による地殻変動を検知できるかどうか検討した。さらに、異常な地殻変動が検知された場合、その変動から変動源モデルを推定してマグマの活動を明らかにすることができるか調査した。

この火山活動プロセスに基づき、図9で示したモデルを想定した。噴火前に貫入したダイクは山頂から宝永火口まで(4km)の長さとし、走向(N150°E)を持ち、幅10km厚

さ1m（貫入量0.04km³）と仮定した。図9に示した時間経過でダイクが上昇し、一定のレートで開口するとした。このモデルによる理論地殻変動を富士山6観測点の2007年の同じ日付の時間値データに加えたものをテストデータとした。

変動源の推定には、3観測点(FJH, FJ5, FJ6)のGPSデータも合わせて使用した。GPSの観測装置は、富士山山頂から南西方向に約19kmの距離にある高感度地震観測網(Hi-net)の富士宮観測点(FJMH)にも設置されており、この点を基準とした1時間毎の相対変位データを使用した。GPSデータについても上記のモデルによる理論地殻変動を用いてテストデータを作成した。

4.2 変動源の推定方法

ある時刻において h 時間予測値について異常と判定された場合、 h 時間前からその時刻までの期間の変動量を読み取り、変動源モデル推定のためのデータとした。GPSデータについても同じ期間の変動量を読み取る。ただし、複数の観測点あるいは複数の予測値について同時に異常と判定された場合は、最も予測期間が長いものに対応する期間の変動量を読み取った。

変動源モデルは、表2で示した球状圧力源（1つ、モ

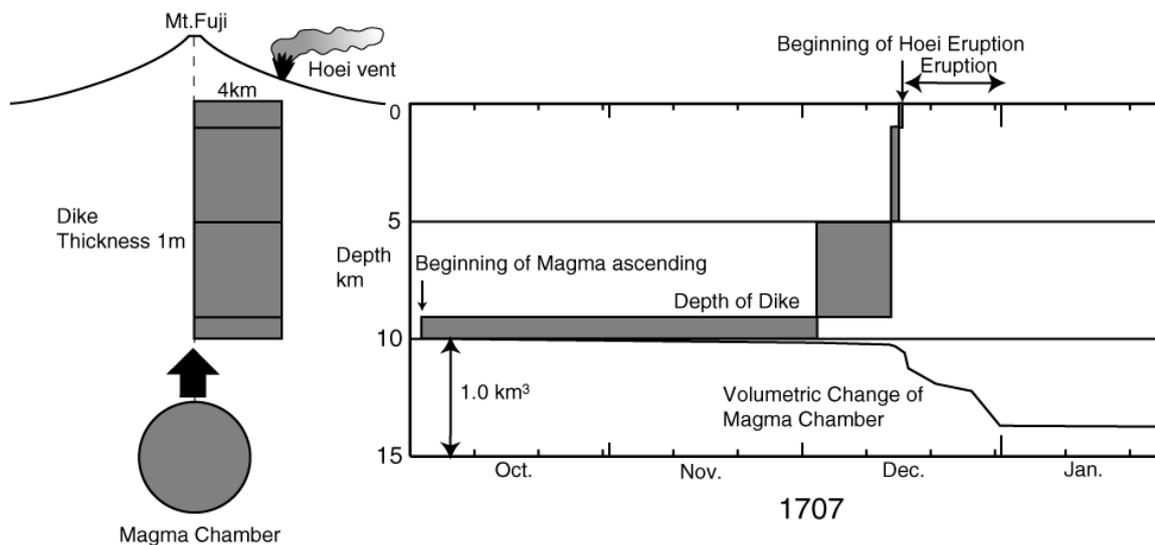


図9 想定した富士山宝永噴火のマグマ活動プロセスモデル

Fig.9 Assumed magmatic activity process of the 1707 eruption of Mt. Fuji.

表2 モデルパラメタの探索範囲

Table 2 Search area of model parameters.

モデル名	緯度(°N)	経度(°E)	深さ(km)	走向(°)	山頂からの距離(km)	長さ(km)	幅(km)	開口量(m)	体積変化量(10 ⁶ m ³)
球状圧力源	35.15~35.55	138.5~139	0~15	—	—	—	—	—	-500~500
ダイク	—	—	0~20	0~360	0~15	0~10	0~10	-5~5	—

デル A ; 2 つ, モデル B) とダイクモデル (モデル C), 球状圧力源とダイクモデルの組み合わせ (モデル D) について検討し, 赤池情報量基準(AIC) (Akaike, 1974) を基準としてそれを最小とするモデルを最適な変動源モデルとして選んだ. なお, ダイクモデルは鉛直で山頂から放射方向の走向を持つと仮定した.

各変動源のモデルパラメタは遺伝的アルゴリズム (GA) に基づく最適化法 (Ueda *et al.*, 2005) を使用して観測誤差の精度で重みをつけた観測値と計算値の残差の 2 乗和,

$$f = \sum_{i=1}^N [O_i - C_i(m)]^2 / \sigma_i^2 \quad (5)$$

を最小とするパラメタを選んだ. ここで N はデータ数, O_i は i 番目の観測値, C_i はモデルから計算した i 番目のデータについての計算値, σ_i は i 番目のデータの誤差である. この方法は, 未知パラメタの数が多い場合でも比較的短い時間で最適解を得ることができる. テストに使用したワークステーション Dell PowerEdge 2950 (CPU: Intel Xeon Dual Core 3GHz) では, 4 つのモデルについて計算を行なうのに必要な時間は 10 分以下である. さらにこの方法は, ランダムに生成した多数の初期モデルから計算を開始するので, 計算者が初期モデルを与える必要がなく結果も初期モデルにほとんど依存しない. したがって, リアルタイムでの自動解析に適した方法である.

4.3 異常変動の検知結果

図 10 に, テストデータについてこの検知手法によって異常な地殻変動が検知された観測点数の推移を示す. 噴火前のダイク貫入による地殻変動が異常な地殻変動としてはじめて検知されたのは, ダイクの上端が深さ 5km に達した 12 月 3 日 (噴火 13 日前) の 22 時である. 検知されたのは, 宝永火口に最も近い FJ6 で, 3 日後に FJ5 でも異常が検知された. その後, 数は徐々に増加し噴火が始まった 16 日 12 時頃に全ての観測点で異常が検知された. 火山活動による地殻変動は, 12 月末まで続くが, 異常な変動の検知は 1 月 10 日まで続いている. これは, 火山性の地殻変動を含まない 1 月以降のデータが, 火山性地殻変動が含まれた期間のデータを用いて計算された予測値と比べて「異常」であるからである.

本試験によって, この検知手法が噴火前のマグマ上昇による微弱な地殻変動を検知する性能を持つことがわかった. しかし, ダイクの貫入による地殻変動が検知される以前に, 異常な変動が検知された場合がある. 特に多いのは 10 月で, 主に台風による雨の影響である. 補正を行っていない FJ5 や補正を行っていないものの雨の影響を受けやすい FJ5, FJ6 で異常となった. 本検知手法の性能を向上させるためには, 火山性地殻変動以外の影響を補正する方法をさらに高度化する必要がある.

4.4 変動源モデルの推定結果

噴火前のダイク貫入による地殻変動が最初に検知された 12 月 3 日 22 時の変動源モデルの推定結果を図 11a に示す. 推定された 4 つのモデルのパラメタは表 3 に示す.

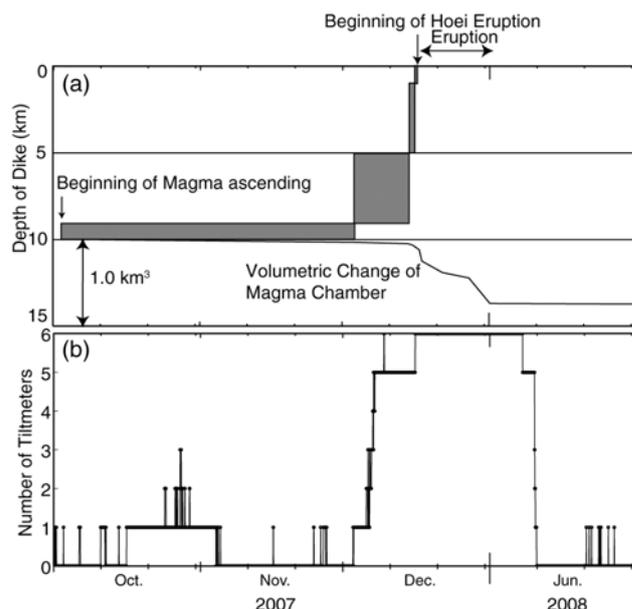


図 10 (a) テストモデルのダイクの深さとマグマ溜りの体積変化の推移. (b) 異常な傾斜変動が検知された観測点数の推移

Fig.10 (a) Temporal changes of penetration depth of the dike and volumetric change of the magma chamber. (b) Change of number of stations that detected the anomalous tilt change.

ノイズのない理想的な条件の場合, 最適モデルにはテストモデルと同じ宝永火口直下のダイクが選ばれるはずである. しかし選ばれた最適モデルは, 山頂のはるか南東の深さ 500 m に位置する収縮する球状圧力源である. これは, テストモデルと全く異なる結果である. この時点では顕著な地殻変動が検知されているのは FJ6 のみであり, おそらく変動量が小さいため間違った結果になったと考えられる.

しかし, 次点のダイクモデル (図 11b) は, 走向が山頂から南南東の方向で上端の深さは 6.2 km であり, テストモデルとほぼ一致している. 貫入量は $1.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ で, 同じ期間のテストモデルの貫入量 $2.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ とほぼ一致している. 上記の最適モデルは, 地殻変動データとの適合度のみを判断基準として選ばれたものである. 実際には, 富士山直下の深さ 5 km 付近にマグマが貫入した場合は, おそらく地震活動を伴うと考えられる. 他の観測情報が得られれば, それと併せて総合的に検討することによって, ダイク貫入による地殻変動であると判断できる可能性がある. したがって, 複数のモデルについて検討した場合は 1 つの最適モデルを結果として提示するだけでは十分でなく, 他の観測情報と併せて検討できるようにするために, それぞれのモデルの最適モデルも示すことが必要である.

図 12 a, b は, 12 月 8 日 12 時 (噴火 8 日前) の結果である. 推定された 4 つのモデルのパラメタは表 3 に示す.

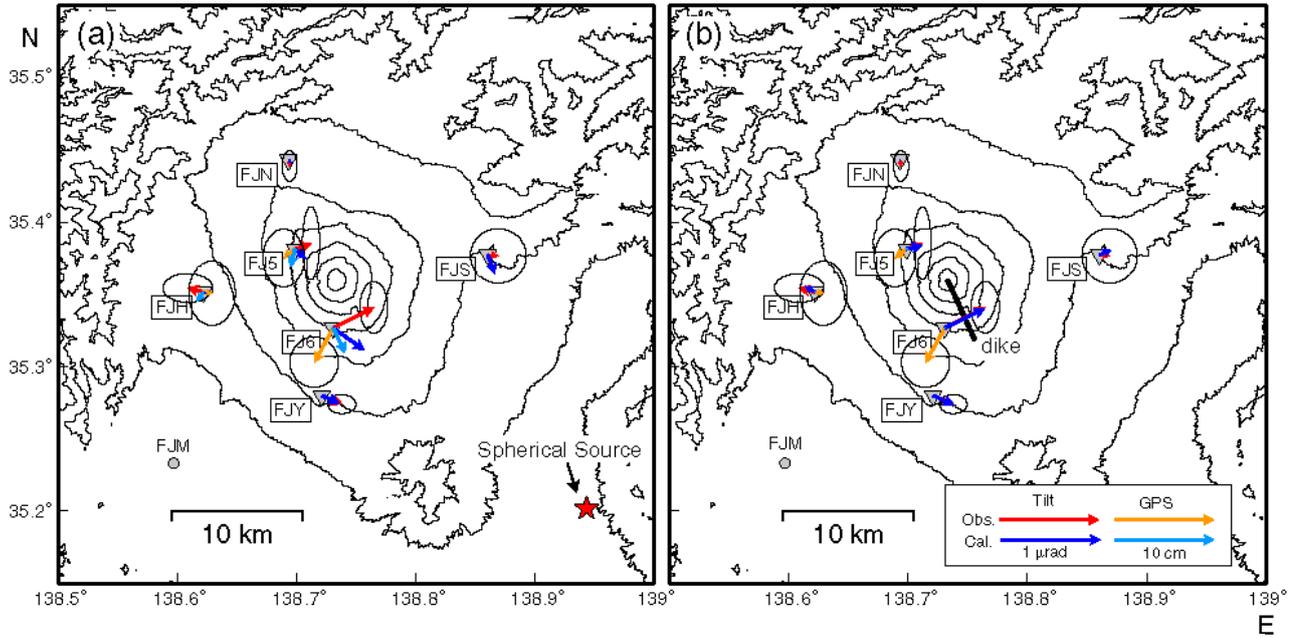


図 11 12月3日22時の変動源モデルの自動推定結果。(a) 球状圧力源 (b) ダイク

Fig.11 Result of automated estimation of the source model at 22h on Dec. 3rd. (a) spherical source, (b) dike source.

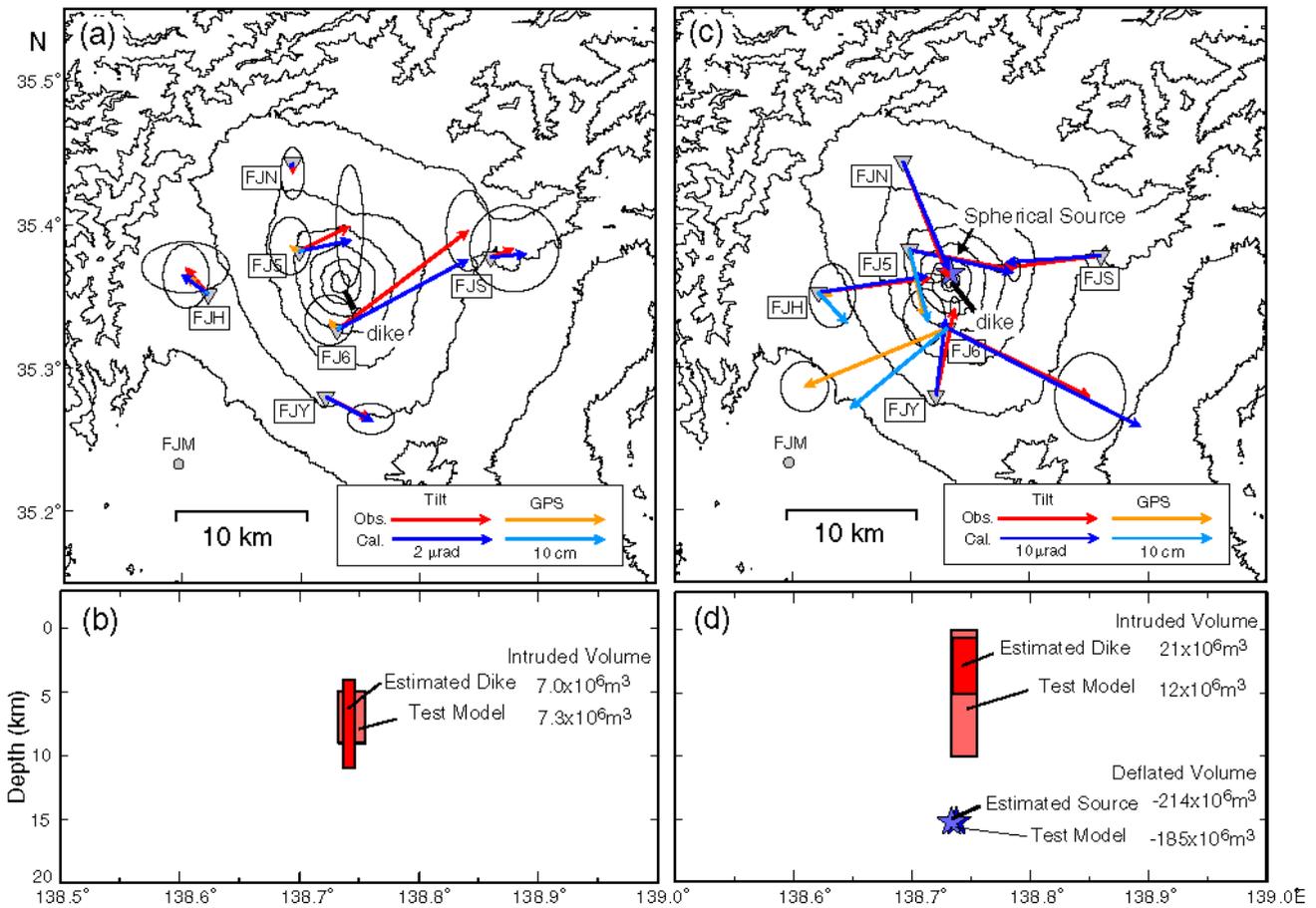


図 12 (a, b) 12月8日12時の変動源モデルの自動推定結果。(c, d) 12月19日12時の変動源モデルの自動推定結果

Fig. 12 (a, b) Result of automated estimation of the source model at 12h on Dec. 8th. (c, d) Result of automated estimation of the source model at 12h on Dec. 19th.

表 3 変動源モデルの推定結果
Table 3 Estimation results of model parameters.

日時・モデル名	変動源の種類	緯度 (°N)	経度 (°E)	深さ (km)	走向 (°)	山頂からの距離(km)	長さ (km)	幅 (km)	開口量 (m)	体積変化量 (10 ⁶ m ³)	AIC	順位
12月3日 22時・A	球状圧力源	35.201	138.943	0.5	—	—	—	—	—	-120	6.6	1
B	球状圧力源 x2	35.150, 35.274	138.978, 138.727	0.9,9.4	—	—	—	—	—	-250,0.	19.0	3
C†	ダイク	—	—	6.2	155.3	0.0	5.1	0.1	2.56	1.3	10.4	2
D	球状圧力源	35.150	138.927	0.4	—	—	—	—	—	-40	24.2	4
	+ ダイク	—	—	5.1	151.1	1.9	2.1	3.4	2.45	1.7	—	—
12月8日 12時・A	球状圧力源	35.359	138.765	0.5	—	—	—	—	—	-2.0	40.9	2
B	球状圧力源 x2	35.313, 35.357	138.700, 138.771	7.9,2.6	—	—	—	—	—	2.0,-2.0	48.7	3
C†	ダイク	—	—	3.9	151.1	0.8	2.3	6.5	0.72	7.0	38.4	1
D	球状圧力源	35.374	138.996	0.1	—	—	—	—	—	64.7	52.4	4
	+ ダイク	—	—	3.7	151.1	1.4	1.9	8.9	2.3	10.2	—	—
12月19日 12時・A	球状圧力源	35.367	138.741	12.1	—	—	—	—	—	-123.5	118.4	3
B	球状圧力源 x2	35.186, 35.367	138.765, 138.743	0.2,1.9	—	—	—	—	—	-80.4,-119.6	113.6	2
C	ダイク	—	—	0.0	62.1	2.1	6.4	5.3	-2.49	-56.7	317.6	4
D†	球状圧力源	35.365	138.733	14.5	—	—	—	—	—	-213.7	85.3	1
	+ ダイク	—	—	0.5	141.2	0.2	2.9	4.4	1.78	21.1	—	—
12月31日 12時・A†	球状圧力源	35.360	138.733	14.2	—	—	—	—	—	-315.7	50.0	1
B	球状圧力源 x2	35.360, 35.159	138.733, 138.555	15.0,0.0	—	—	—	—	—	-366.7,-17.6	59.2	2
C	ダイク	—	—	8.9	31.1	8.1	18.1	9.5	4.68	444.6	640.3	4
D	球状圧力源	35.362	138.733	12.765	—	—	—	—	—	-249.0	72.3	3
	+ ダイク	—	—	6.4	189.2	0.3	5.2	1.4	-1.27	-8.7	—	—

† テストモデルで仮定したモデル

4 つのモデルから正しいモデルが選ばれるために十分な地殻変動が生じ、最適モデルとしてダイクモデルが選ばれている。ダイクの上端の深さは3.9km、走向はN151°Eで、ほぼテストモデルと一致している。貫入量は $7.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ でテストモデル $7.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ と同程度である。なお、この時点での GPS 観測点の変動量は最大で 8mm であり精度 (2~3cm) に比べて小さく、GPS データから異常な変動を検知するのは難しい。

図 12 c, d は、12月19日12時（噴火開始後3日）の結果を示している。パラメタは、31日12時（噴火開始後15日）の結果も併せて表 3 に示す。19日の結果は、噴火前のダイク貫入と噴火開始後のマグマ溜りの収縮による地殻変動が含まれた期間のデータ（9日12時-19日12時）について得られたものである。最適モデルは、モデル D（球状圧力源+ダイクモデル）である。球状圧力源の深さは 14.5 km で、仮定したマグマ溜りの深さと

ほぼ一致している。31日の結果は、噴火時のマグマ溜りの収縮が続いていた期間のデータ(21日12時–31日12時)について得られたものである。マグマ溜りの収縮量は $315.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ で、同期間のテストモデルの収縮量 $358.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ とほぼ一致している。いずれの場合もテストモデルを適切に再現することに成功した。

以上の結果は、このテストケースの場合には噴火前の微弱な変動からダイクの貫入を自動的に検知し、マグマ活動の様子をリアルタイムでモニターできることを示している。富士山火山活動観測網は、山体を取り囲むように、おおよそ10km間隔で比較的均等に配置されており、この観測網と同等以上の観測網を持つ火山であれば、本結果と同様に異常変動を検知することができると考えられる。ただし、本テストケースでは比較的単純な茂木モデルとダイクモデルを仮定している。テストケースに比べて複雑なマグマ活動プロセスの場合や、観測網の外で活動が発生した場合は、変動源モデルの推定が困難となる可能性がある。より精度の高い変動源モデルの推定のためには、さらに多くの観測点および多項目の観測データが必要である。

5. まとめと今後の展望

防災科研が運用している火山活動連続観測網のリアルタイムデータを使用して、マグマの活動による異常な変動を自動で検知し、自動で変動源を推定する手法を開発した。この手法は、高精度の傾斜計のデータを使用し、潮汐・降雨の補正を行った上で、時間に依存するノイズ特性を利用した客観的な基準に基づき異常を検出する。テストケースによる試験の結果、本手法が噴火前の微弱な変動からダイクの貫入を自動的に検知し、地下のマグマ活動の様子をリアルタイムでモニターできることを確認できた。

本手法を利用した自動処理システムによって得られる火山直下のマグマ活動に関する定量的な情報をインターネット等を通じて公開することによって、他の研究者や防災の担当者もリアルタイムでマグマの活動の現状とその推移を把握し、火山防災に役立てることが可能である。これは、地殻変動や地震活動が始まってから短い期間(数時間から数日)で噴火することが多い玄武岩質の火山において、短期的な火山災害対策のための情報として特に有効であると考えられる。

本手法は、それ自体は火山活動の推移を予測することはできない。しかし、この出力に基づいて短期的な火山噴火災害の予測が可能となる可能性がある。解析結果からダイクの貫入によるものであると判断できれば、その活動はマグマの活動による可能性が高く、変動源の深さが浅ければその付近で噴火する可能性があることを知ることができる。つまり、変動源に関する定量的な情報が的確に迅速に得られれば、今後の推移の可能性について迅速に把握することが可能となる。さらに、変動源の位置から推定される噴火口ができる可能性が高い地域の情報と火砕流や溶岩流などの火山災害の数値シミュレ-

ーションを併せることによって、観測データに基づいた噴火災害予測が準リアルタイムでできるようになる可能性がある。

参考文献

- 1) Akaike, H. (1974): A New Look at the Statistical Identification Model. *IEEE Trans. Autom. Contr.*, 19, 716–723.
- 2) Brockwell, P. J. and Davis, R. A. (2000): *Introduction to time series and forecasting*, Springer-Verlag New York, Inc., New York, 434 pp.
- 3) 石塚吉浩・高田亮・中野俊・河村幸男・谷田部信郎 (2003): 富士山はどんな活動をしてきたか?—富士山の活動史—。地質ニュース, 590, 17-22.
- 4) Kamo, K. and Ishihara, K. (1989): A preliminary experiment on automated judgment of the stages of eruptive activity using tiltmeter records at Sakurajima, Japan. *Volcanic Hazards: Assessment Method and Monitoring*, IAVCEI Proceedings in Volcanology 1, Springer-Verlag, Heidelberg, 585–597.
- 5) 火山噴火予知連絡会 (2003): 富士山ワーキンググループ報告書。火山噴火予知連絡会会報, 85, 115–139.
- 6) 気象庁 (2002): 三宅島の火山活動—2000年6月～2001年5月—。火山噴火予知連絡会会報, 78, 4–8.
- 7) 気象庁 (2005): 浅間山, 第100回火山噴火予知連絡会提出資料。
- 8) Mogi, K. (1958): Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surface around them. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 36, 99-134.
- 9) Okada, Y., and Yamamoto, E. (1991): Dyke intrusion model for the 1989 seismovolcanic activity off Ito, central Japan. *J. Geophys. Res.*, 96, 10361–10376.
- 10) Okada, Y. (1992): Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 82, 1018–1040.
- 11) 佐藤春夫・高橋博・山本英二・福尾信平・上原正義・寺沢康夫 (1980): 孔井用傾斜計による地殻傾斜観測方式の開発。地震, 2, 33, 343-368.
- 12) Tamura, Y., Sato, T., Ooe, M., and Ishiguro, M. (1991): A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion. *Geophys. J. Int.*, 104, 507–516.
- 13) 上田英樹・山本英二・大久保正・村上亮・上野寛・宇平幸一 (2003): 2002年5月伊豆半島東部群発地震活動に伴った地殻変動の開口断層モデル。火山, 6, 471-477.
- 14) Ueda, H., Fujita, E., Ukawa, M., Yamamoto, E., Irwan, M., and Kimata, F. (2005): Magma intrusion and discharge process at the initial stage of the 2000 Miyakejima activity inferred from tilt and GPS data, *Geophys. J. Int.*, 161, 891–906.
- 15) Ukawa, M., Fujita, E., Yamamoto, E., Okada, Y. and Kikuchi, M. (2000) The 2000 Miyakejima eruption:

- Crustal deformation and earthquakes observed by the NIED Miyakejima observation network, *Earth Planets Space*, 52, xix-xxvi.
- 16) 鶴川元雄 (2001): 富士山の低周波地震と噴火予知・火山災害軽減. *月刊地球*, 23, 784-790.
- 17) 鶴川元雄 (2007): 富士山の低周波地震. 富士火山, 荒牧重雄・中田節也・宮地直道 編集, 161-172, 山梨県環境科学研究所.
- 18) 山本英二・熊谷貞治・島田誠一・福山英一 (1988): 伊豆大島の火山活動 (1986-1987) に伴う傾斜変動: 御神火及び波浮における地殻傾斜変動連続観測結果. *火山*, 33, S170-S178.
- (原稿受理: 2009年9月30日)

要 旨

地下のマグマの活動などによる火山性の地殻変動が発生した場合, すみやかにそれを自動で検知し, 変動源に関する定量的な情報を自動で推定する手法を開発した. 十分な観測データをリアルタイムで得ることができるならば, 本手法を実装した自動処理システムによってマグマ活動を常時監視し, 他の研究者や防災の担当者に短期的な火山災害対策のための有用な情報を提供することが可能となる. 本手法では, 異常な地殻変動の検知に時間分解能と精度に優れた傾斜計を使用し, 異常な変動が検知されると, 並行観測データとともに自動解析して多数の変動源モデルの中から適切なモデルを選択する. 傾斜計は, 時間に依存する共通のノイズ特性を持っており, それを利用して客観的な基準に基づいて異常な変動を検出する. 本手法を防災科研の富士山火山活動連続観測網に適用し, 富士宝永噴火の推定火山活動プロセスに基づいて作成したテストデータについて試験を行なった. その結果, 噴火開始の約2週間前にマグマ上昇による微弱な地殻変動を検知し, 噴火前後のマグマの動きを適切に捉えることに成功した. 本手法が火山活動自動監視のために十分な性能を持つことを確認した.

キーワード: 地殻変動, 傾斜, 検出方法, GPS, 自動システム, 火山防災