

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

気象庁地震火山部* 林 豊

静岡大学教育学部** 小山 真人

Estimated magnitudes of the earthquakes preceding the 1707 Hoei eruption of Fuji Volcano

Yutaka HAYASHI

Seismological and Volcanological Department, Japan Meteorological Agency,
1-3-4 Ote-machi, Chiyoda-ku, Tokyo, 100-8122 Japan

Masato KOYAMA

Faculty of Education, Shizuoka University, 836 Oya, Shizuoka, 422-8529 Japan

Volcanic earthquakes are generally felt in too small area to estimate their source localities and magnitudes from their intensity distribution. However, these parameters can be constrained using information about eruptive history and volcanic structure. This paper proposes an example of a method for estimating the magnitude of a historical volcanic earthquake, whose intensity has been recorded at only one or a few sites.

We have analyzed historical information on the precursory earthquakes of the 1707 Hoei eruption of Fuji Volcano and divided the period preceding the eruption into four stages (Stage I - IV). The largest earthquakes during each stage were summarized as follows: M2 or M3 class for Stage I (one to two months before the eruption), M3 class for the Stage II (one day to two weeks before the eruption), approximately two M5s for the Stage III (a half to one day before the eruption), and also approximately two M5s for Stage IV (less than several hours before the eruption).

§ 1. はじめに

火山性地震は、狭い震源域内で比較的似た規模の地震が多数発生し、火山活動に応じて震源域および地震の規模・種類が推移するという傾向が知られている。この性質を利用して、火山性地震の規模を推定するために、史料から得られた情報、震度の震央距離などの関係の経験式に、火山学的な知見を組み合わせる手法を検討した。

検討した手法は、宝永四年(1707年)の富士山の噴火(以下、宝永噴火)の前兆と考えられる地震に適用し、噴火に先立って発生した地震活動の推移を推定した。

§ 2. 史料から得られた情報によって火山性地震のマグニチュードを推定する手法

火山性地震は、火山近傍の浅い限られた場所で中小規模の地震が多数発生するという特徴がある。このため、個々の火山性地震のマグニチュード(以下、M)を求めるのではなく、ある期間に区切り、各期間中の代表的な地震から地震活動の特徴を整理する方

法が適切である。

一般に火山性地震は規模が小さく、有感地震や被害地震となる地域は狭い範囲に限られるため、史料から得られる情報は、おのずと一箇所あるいは数箇所での小さい地震動の記録のみに限定される。このため、一般には、史料から推定した震度分布から震源と地震の M を推定する経験的方法(例えば、宇佐美(1996)や、これを改良した松浦(2001)の方法)を適用するために必要な情報を得ることができない。

しかし、簡単な火山学的考察によって、火山性地震が発生しやすい範囲を比較的狭く絞り込める場合があり、火山近傍の浅い場所で、地震が発生しやすいと考えられる場所に震源を仮定できる場合がある。

ごく限られた地点での史料のみから得られる情報を積極的に活用し、震度と震央距離などの関係の経験式に、火山学的な知見と組み合わせ、火山性地震のおよその規模を推定する手法として、以下のとおり検討した。

* 〒100-8122 東京都千代田区大手町 1-3-4

** 〒422-8529 静岡市大谷 836

2.1 火山性地震の性質を利用した震源推定

各期間の火山性地震の震源は、次の方法で推定する。

- ・他に情報がない場合には、震央は、噴火活動があった火口の近傍に広がっており、震源の深さは数 km から十数 km に分布していると考えられる。
- ・噴火に至る過程のマグマの挙動、あるいは火口列等から岩脈やマグマ溜りの位置について、火山学的見地からの情報から推定できる場合には、震源域をその周辺に絞り込む。
- ・史実に残る地震動が震度 1 あるいは 2 相当と小さく、頻度も低い場合は、上頂の震源域の範囲で発生した地震の中には、比較的観測地点に近い場所に震源を持つ地震も少数発生するであろうから、このような地震で揺れを感じ、記録にとどめられたものと推定する。

2.2 小さい地震動の震度推定

各期間について、史料に残された小さい地震動の記録は、次の方法で震度を推定する。

- ・気象庁震度階級解説表によれば、震度 1 では体を感じない人がいるとされている(図1)。このため、史料に記録された地震の多くは震度 2 以上であったと解釈する。
- ・ただし、震度 1 の地震が多数あれば、多くの人はそのうちの一部を体を感じるであろうから、「数回以上の地震があった」と記録された地震活動は、主に震度 1 以上の地震についての記録であると解釈する。

なお、気象庁震度階級解説表の解説を厳密に適用すると、全ての震度 1 の地震を感じる人と、全ての震度 1 の地震を感じない人がいるとの解釈も理論的にはありえるが、そのような解釈は多くの人々の体験・経験からは程遠いと考えられ、実際的ではない。

- ・中小地震の規模を積極的に推定するため、一、二箇所のみで記録が得られる地震についても、地震の規模の推定対象とする。

2.3 震度からマグニチュードを推定

震度から M を推定するには、次の 2 つの経験式を併用する。

・宇津(1984)による震度 - 震央距離 - M の関係
$$l = 1.5M - 6.5 - b \quad (-100) \quad (1)$$

ただし、 $b = 0.0767 - 0.015M + 0.0008M^2$

は、震央距離(km)、 l は気象庁震度階級

・宇津(1988)による震央付近の震度 - 震源の深さ - M の関係式

$$M = 0.23l_0 + 0.105 l_0^2 + 1.2 \log_{10} h + 1.3 \quad (2)$$

l_0 は震央付近における震度、 h は震源の深さ(km)であるが、3km 以浅の時は $h=3$ (km) とおく

(1)式は、東日本の太平洋岸沖合を除く日本の浅発地震に対する気象庁震度階級、震央距離、気象庁方式の M の標準的關係を表す経験式で、M5~8 の地震の震度データを用いて導かれたものである[宇津(1984)]。本研究で対象とする火山性地震は、この経験式の基になった地震の規模に比べて小さいため、適用範囲を超えていることがあるが、(2)式と併用して、注意深く利用する。

(2)式は、日本の地震について、震央付近の気象庁震度階級、気象庁方式の M、震源の深さの標準的關係を表す経験式で、M2~8、 $h < 100$ (km)、 l_0 が 0~6 の地震を対象に導かれたものであり、震央距離が $h/2$ 、 $10^{0.5M-2}$ (km)、5(km)のいずれかを満たすものを震央付近としている[宇津(1988)]。

計測震度 4.5 未満では、計測震度の小数点以下を四捨五入した値が震度と定義される[震度問題検討会(1995)]ことを踏まえて、例えば、史料から得られた推定震度が 2 であれば経験式に代入する震度は 1.5 以上 2.5 未満として取り扱うこととした。

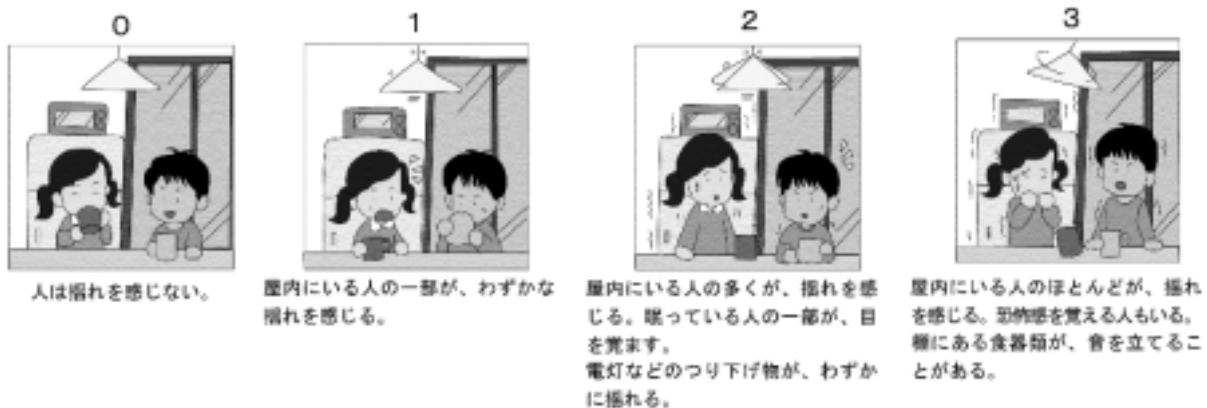


図1 震度0から3における人の揺れの感じ方

気象庁パンフレット「地震 火山のしごと」(1997年)から一部抜粋したイラストに、気象庁震度階級解説表の震度0から3の部分の解説の一部を加筆。

史料から得られた各地点での推定震度、火山学的に考えることができる震源の深さ、その震央から史料が記された場所までの震央距離をこれらの関係式に当てはめ、地震の M として考えられる範囲を推定する。

§ 3. 富士山の宝永四年の噴火への適用

3.1 解析に用いるデータ

富士山の宝永噴火は、宝永四年十一月二十三日(1707年12月16日)から約2週間に及び、大量の火山灰および火山礫の放出を伴う、日本の有史以来、最大級の噴火として知られている。

宝永噴火については、被害報告、復興期の関する数多くの記録・文書があるほか、噴火の前兆、噴火継続中に発生した諸現象に関する記録・文書も残されている。なかでも、宝永噴火の前兆現象と噴火活動の推移を知る上で重要な史料としては、信仰登山(富

士講)の案内役(御師)という職業に就き、富士山の自然を熟知していたであろう「土屋伊太夫」が書き留めた『土屋伊太夫噴火事情書』[小山(2002)]が挙げられる。なお、噴火の推移については、『伊東志摩守日記』に、江戸における宝永噴火の観察記録が詳しく記されている[小山・他(2001)]。

小山・他(2002)は、宝永噴火前から噴火の推移について、個々の史料の信頼性について吟味を行った上で、詳細な推移の復元を進めており、その成果の一部が小山(2002)に示されている。また、噴火後の二次災害である土砂災害の実態については、井上・他(2002)により解明が進められている。

本研究では、個々の史料の解釈については、これら史料火山学的研究の成果のうち、宝永噴火に先立つ地震に関係するもの(表1)を利用し、他の知見と組み合わせた解析を行う立場をとることとした。

表1 宝永噴火に先立つ地震活動についての古記録または古文書の記述

月日 ¹⁾ 時刻	場所: 古記録や古文書の記述にもとづいた各地点の状況
1707年 10月時分	裾野市須山: 富士の山中では毎日地震が幾度もあった。
10月30日~12月14日	裾野市須山: 富士山の中は毎日10~20度の地震。しかし里には地震なし。 東麓一帯: 12月3日頃より、1日3~4度ずつ鳴動。
12月15日昼	富士市吉原: 14時過ぎ頃から、たびたび地震。 忍野村内野: 午後後半から大地震。頻繁に地面の下が震動のように鳴りゆらいで身の毛もよだつ恐ろしさを感じる。 裾野市須山: 地震7~10回。
15日夜	名古屋: 22時~23時半に地震。4時半~6時にも地震。 長野県下伊那郡: 19時半~22時に少し強い地震。未明2~4時頃にも地震。 裾野市須山: 地震数知れず。 東麓一帯: 地震30回。 御殿場市山之尻: たえず揺れる。 沼津市原: 2度の顕著な地震。 元箱根: 暮より夜中にかけてたびたび地震。 小田原: 12度の小地震。 東京: 夜中~未明に2度の小地震。
16日朝	長野県下伊那郡: 明け方から10時頃までに少々の地震2~3度。8時半頃から昼過ぎまで東南東の方角に何度も雷のような山鳴り。 忍野村内野: 落ち着く暇もなく鳴り動いて限りない不安を感じる。 裾野市須山: 大地震。 東麓一帯: 大地震1回。 沼津市原: たびたび揺れる。 小田原: 夜明けに地震。10時頃までさらに3回。鳴動。 東京: 小地震が続く。
16日10~12時	富士市吉原: 富士山から激しい鳴動。 裾野市須山: 大地震。 東麓一帯: 大地震1回。 御殿場市山之尻: 強震。 小山町生土: 地震。 沼津市原: たびたび揺れる。 東京: 小地震が正午頃まで続く。

1)西暦に換算した年月日。

小山(2002)を一部抜粋し再編集。宝永東海地震とその余震についての記録と考えられる10月28日とその翌日(西暦換算)は、表から省いた。

3.2 期間の区分

宝永噴火の噴火開始前の前兆的地震活動は、小山(2002)の史料解析の結果から、特徴的な活動の変化があると判断した日時に区切りを設け、次の4期間に分けた。

期間	噴火の1~2か月前
	十数日前から1日前まで
	1日前から数時間前まで
	数時間前から噴火開始まで

3.3 火山性地震の震源の限定

中禮・他(2002)は、宝永噴火の際に生じた地殻変動量を見積もるため、史実に残された前兆地震活動の特徴などから、マグマ貫入モデルを想定している。このモデル(図2)は、鶴川・中禮(2002)に紹介されているように、深部マグマ溜りから、山頂火口直下を一端とし宝永火口方向に約3km延びる岩脈を上向きに形成しながら、マグマが次第に上昇するというものである。

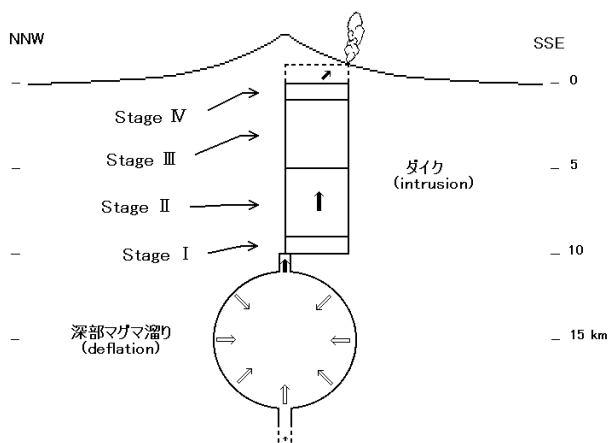


図2 宝永噴火直前までのマグマ貫入モデル模式図

中禮・他(2002)により提案され、鶴川・中禮(2002)に紹介されているモデル。Stage ~ は、3.2の期間 ~ に対応する。

これは、考えられる多数のモデルの一つを示したものであるが、このモデルのダイクの走向は、宝永噴火に伴って形成された3つの火口(宝永第1, 第2, 第3火口)と富士山山頂がほぼ一直線をなすことを説明するのに、都合がよい。また、積極的にモデルを否定する根拠が得られていないことから、3.2の各期間で発生する地震の震源域は、このマグマ貫入モデル[中禮・他(2002)]を仮定すると応力変化が大きくなると考えられる領域に想定した。つまり、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であると仮定した。

3.4 震源の不確定性の考慮

3.3の考察を行ってもなお、震源を正確に定めることはできないため、この不確定性を考慮する必要がある。式(1), (2)への適用にあたって、震央は、宝永火口直下、山頂火口直下のそれぞれの場合、震源の深さは、ダイク先端の深さ、ダイク先端よりも浅い標高0m付近のそれぞれの組み合わせ(図2の長方形のダイクの4つの頂点に相当する)について試算した。

§4. 富士山宝永噴火に先立つ地震活動の推移

§2の方法で、§3のデータとモデルを用いて、宝永四年十一月二十三日(1707年12月16日)から始まった宝永噴火の前兆地震について、その地震活動の推移を推定した。推定した過程の詳細を以下に述べ、推定結果を表2に示す。

4.1 宝永噴火の1日前まで

3.2で区分した、期間 : 噴火の1~2か月前、 : 十数日前から1日前までの2期間では、いずれも有感地震となったのが山中のみである(表1)ことから、両者を同時に検討する。

これらの期間、富士山を日々通っていたであろう御師の「土屋伊太夫」により、『土屋伊太夫噴火事情書』に、富士の山中では毎日地震が何度もあったことが記録されている(表1)。毎日の地震は震央付近で感じたものと考えて、経験式(2)を適用すると、震源の深さが10kmであればM2.6以上、3km未満であればM2.0以上でなければならない。

一方で、その史料に麓の裾野市須山での地震には言及されていないので、少なくとも麓で震度2に達する地震が発生していなかったと考えられる。そのような地震活動となる条件は、経験式(1)から求めると、震央が宝永火口直下であればM3.1以下、山頂火口直下であればM3.3以下である。

以上のように、震源域の想定により多少の違いはあるが、山中のみで有感地震となる地震の規模の条件は「M2級からM3前後まで」と推定できる。

ところで、期間 に比べて期間 では、12月3日頃から山中の地震も増え、東麓での鳴動も聞かれるようになっているが、急激に増えたと解釈できる記録は認められない。両期間とも麓での有感地震がないため、顕著な震央の移動はなく、地震活動が次第に活発になったことを示唆している。そこで、山中で有感地震となる地震の規模の範囲「M2級かM3前後」のうち、期間 では小さめの規模の地震であり、次第に期間 でこの条件の範囲で大きめの規模になったと判断するのが適切である。

以上のことから、噴火の1~2か月前では、最大でM2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、十数日前~1日前にはM3

前後の地震も起きるようになったと推定する。

表 2 宝永噴火に先立つ地震活動の推移の推定結果

期間	年月日 ¹⁾ 時刻	推定した地震活動の状況
	1707 年 10～12 月 2-3 日頃[1～2 か月前]	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
	12 月 3 日頃～14 日[十数日前～]	M3 程度の地震を含む地震活動
	15 日昼[1 日前]	M2 級・M3 級の地震を半日で数回含む地震活動
	15 日夜～16 日朝[半日前]	M5 程度の地震 2 回, M4 程度の地震十回程度, M3 級・M2 級の地震数十回以上を含む地震活動
	16 日朝[数時間前]	M5 程度の地震 2 回を含む地震活動
	16 日午前[噴火直前]	

1)西暦に換算した年月日.[括弧内]は,噴火開始時との時間。

4.2 宝永噴火の一日前から数時間前まで

期間 :1 日前から数時間前までには,期間 の前半にあたる宝永噴火の前日昼から,裾野市須山と富士市吉原で有感地震となっている(表 1)。

経験式(1)を適用すると,裾野市須山と富士市吉原で震度 1 以上になる地震の規模は,震央が宝永火口直下であれば M2.1 以上,山頂火口直下であれば M2.3 以上となる。複数の地点で地震の記録があることは,震央の顕著な移動があったと解釈するよりは,地震の規模が大きなものも発生するようになったためと考えた方が適切であることを示唆している。これらのことから,噴火前日の昼は,期間 , よりやや地震の規模が大きく,M2 級あるいは M3 級の地震が半日で数回発生したと推定する。

噴火前夜から噴火当日の朝までは地震の規模がさらに大きくなり,最大の地震では長野県下伊那郡,名古屋,東京でも 2 度の小地震となり,麓では大地震となっている。また,小田原でも十数回の地震が感じられている。

経験式(1)により,富士山からそれぞれ約 35km,約 95km,約 170km 離れた小田原,東京,名古屋で震度 1 以上になる地震の規模は,それぞれ,およそ M3 以上,M4.5 以上,M5.5 以上となる。また,裾野市須山などの山麓で地震による被害が記録されていないことから,震度 5 には至らなかったと考え,経験式(1)から,M6.5 を上回る地震は考えにくい。

以上のことから,噴火前夜から噴火当日の午前(噴火の数時間前)までの間の地震の規模は,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は発生したと推定する。

4.3 宝永噴火の数時間前から噴火開始直前

期間 :数時間前から噴火開始までに 2 回発生した大きな地震は,表 1 から,期間 :1 日前から数時間前までの最大規模の地震によく似た大きさの揺れが各地で記録されている。このことから,地震の規模も震源も,期間 の最大規模の地震とほぼ同じであ

ると判断できる。

すなわち,噴火の数時間前～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。

§ 5. 議論とまとめ

宝永噴火前に起きた地震の震源については,マグマ供給系をどう考えるかにも依存し,議論の余地がある。しかし,本調査例では,仮定する震源の位置を富士山頂火口付近から宝永火口付近の範囲で任意に変えても,推定される地震の規模の相違は小さく,マグニチュード(M)にして 1 以下にとどまることが確かめられた。

このように,一,二箇所での小さな地震動の記録のみが得られている,M2～5 という小中地震からなる群発地震についても,史実以外から震源範囲を狭く特定できる情報があれば,その成果を積極的に活用し,地震活動をおよそ推定できることを,富士山の宝永噴火に先立つ地震活動を例に示すことができた。

本研究で示した方法は,富士山の宝永噴火以外にも,噴火地点や地殻変動源が既知であるか,推定された火山活動に伴って発生した地震活動については,同様に適用できる場合があるだろう。また,局地的に体に感じられたり被害を生じたために,震源域をある程度推定できる群発地震活動についても,条件が整えば,この手法を準用できる可能性がある。

謝辞

本研究は,火山噴火予知連絡会において進められている富士山の今後の火山観測・研究体制等の検討に際し,過去の富士山の噴火事例を取りまとめる作業[火山噴火予知連絡会富士山ワーキンググループ(2002A,2002B)]の一貫として実施した。火山噴火予知連絡会富士山ワーキンググループの各位には,本研究を行うにあたりご助言をいただいた。査読者の松浦律子氏と編集者の佐竹健治氏からは,本論文の改善について適切なコメントをいただいた。記して謝

意を表する。

文献

- 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 2002 年
合同大会予稿集，V032-P027．
- 井上公夫・角谷ひとみ・小山真人・笹原克夫・中野泰
雄・花岡正明・安養寺信夫・高橋正昭・小川紀一
朗，2002，史料に基づく宝永四年(1707)富士山
噴火後の土砂災害の実態．地球惑星科学関連
学会 2002 年合同大会予稿集，V032-P026．
- 火山噴火予知連絡会富士山ワーキンググループ，
2002A，宝永四年(1707 年)富士山噴火の概要と
活動経過．火山噴火予知連絡会会報，**82**，
110-116．
- 火山噴火予知連絡会富士山ワーキンググループ，
2002B，宝永四年(1707 年)富士山噴火の火山活
動プロセスの推定と火山情報発表タイミングの想
定．火山噴火予知連絡会会報，**82**，117-125．
- 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．
- 小山真人・西山昭仁・井上公夫・今村隆正・花岡正明，
2001，富士山宝永噴火の推移を記録する良質
史料『伊東志摩守日記』．歴史地震，**17**，
80-88．
- 小山真人・西山昭仁・角谷ひとみ・井上公夫・笹原克
夫・安養寺信夫，2002，史料にもとづく宝永四年
(1707 年)富士山噴火の推移．地球惑星科学関
連学会 2002 年合同大会予稿集，V032-P025．
- 松浦律子，2001，江戸時代の歴史地震の震源域位
置および規模の系統的再検討作業について．
歴史地震，**17**，27-31．
- 震度問題検討会，1995，震度問題検討会検討結果
最終報告．「震度を知る - 基本知識とその活用
-」，ぎょうせい，216-225．
- 鶴川元雄・中禮正明，2002，それでは今富士山の地
下で何が起きているのか 噴火の観測と予知．
「富士を知る」，集英社，162-172．
- 宇佐美龍夫，1996，新編日本被害地震総覧[増補改
訂版 416-1995]，東京大学出版会，493pp．
- 宇津徳治，1984，震度 - 震央距離 - マグニチュード
の関係 その1.東日本太平洋岸沖合を除く日本
の浅発地震．地震研究所彙報，**59**，219-233．
- 宇津徳治，1988，震央付近の震度 - 震源の深さ - マ
グニチュードの関係．地震研究所彙報，**63**，
23-31．