

大正三年桜島噴火に先立って発生した地震の規模の推定

気象研究所地震火山研究部* 林 豊

Magnitude estimation of the earthquakes preceding
the 1914 Taisho eruption of Sakurajima Volcano

Yutaka Hayashi

Seismology and Volcanology Research Department,
Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency,
1-1 Nagamine, Tsukuba, 305-0052 Japan

Although volcanic earthquakes are generally felt in too small area to estimate their source localities and magnitudes from their seismic intensity distribution, those magnitudes can be estimated if suitable information on sources from volcanic viewpoints is available. Intensity and historical information on the precursory earthquakes of the 1914 Taisho eruption of Sakurajima Volcano were analyzed. The largest earthquakes during each stage were summarized as follows: less than M3 for Stage I (two to three days before the eruption), approximately M5 for both Stages II (one day before the eruption) and III (a half day before the eruption) and M4 class for the Stage IV (less than several hours before the eruption).

§ 1. はじめに

近代的な観測が行われる以前に発生した地震について、史料から推定した震度分布により、震源と地震のマグニチュード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)が広く用いられている。しかし、火山性地震のように規模が小さく、有感地震や被害地震となる地域が狭い範囲に限られる地震活動に対しては、これらの経験的方法適用に必要な情報を得ることができない。

史実に関する情報が少ない地震からなる火山性地震活動の推移を推定する手法として、林・小山(2002)は、史料から得られた情報、震度と震央距離などの関係の経験的に、火山学的な知見を組み合わせる手法を提案し、宝永四年(1707)の富士山の噴火の前兆地震活動に適用した。これは、火山性地震が火山活動の推移に応じて狭い震源域内で比較的似た規模で多数発生すること、簡単な火山学的考察により、地震が発生しやすい範囲を火山体近傍の浅部に比較的狭く絞り込める場合があるという性質を活用して、およそその地震の規模を推定するものである。ただし、これまでの適用例は一例のみであり、他の例への適用を通じて手法の問題点を洗い出し、場合によっては改良を図る必要がある。

ところで、噴出量では日本で二十世紀最大の噴火である大正三年(1914)の桜島の噴火(以下、大正噴火)では、噴火の経過とその前後の活動について、

中央气象台(1914)や金井(1914)の概報など、多くの報告書が残されている。また、これらを近年の知見を加えて再検討した研究[例えば、山科(1998)]もあり、大正噴火に先立って有感地震が多数発生する顕著な地震活動があったことは、よく知られている。これまでは、各地の地震計での検測成果が各府県の気象月報あるいは震災予防調査会の報告書[Omori(1914, 1920)]に記録されている比較的規模が大きい地震が研究対象とされ、例えば Abe(1979)により 11 個の噴火前兆地震に限って、表面波マグニチュードが求められている。

大正噴火に先立って発生したこれらの地震活動の定量的な推定が困難であるのには、大正噴火前後の時期に各地から中央气象台に報告された地震調査原簿等の資料が、その後の関東大震災で焼失した[津村(2001)]ことに一因がある。このため、大正噴火に先立つ地震活動の推移は、中央气象台と各地の測候所等による地震計と体感震度による近代的な地震観測成果を活用する研究アプローチに加えて、史実から現象を可能な限り定量的に解析を試みるべき研究対象である。

本稿では、大正噴火に先立って発生した地震活動について、体感による震度観測の成果と史実から林・小山(2002)の手法を用いて、地震活動の推移を推定するとともに、地震計での検測成果に基づいて求められた推定結果と比較した。

* 〒305-0052 つくば市長峰 1-1

§2. 方法

大正噴火(大正三年(1914)の桜島の噴火)に先立って発生した地震活動を対象に、その規模の推移を以下の方法で推定する。

2.1 史実から地震活動の推移を推定

大正噴火開始前の桜島の前兆的地震活動は、

- 期間 1月9~10日(噴火の約2~3日前)
- 1月11日午前(噴火の約1日前)
- 1月11日午後(噴火の約半日前)
- 1月12日午前(噴火の直前数時間)

の4期間に分けて、それぞれについて地震活動の概要を推定する。推定は、林・小山(2002)の手法(以下、HK法)に準じ、

- (1) 観測または史実による震度
- (2) 火山学的な知見から推定される震源
- (3) 震度と震央距離などの関係の経験式

から、各期間の典型的な地震の規模を含めて、およそその地震活動の推移を求める。気象台・測候所における震度の観測値を使える場合がある点だけが、HK法と異なる。

(1)~(3)の詳細は、それぞれ2.1.1~2.1.3に示す。この段階では、地震計により推定された地震の規模に関する情報は用いず、それ以外の観測・史実のみから、推定する。

2.1.1 観測または史実による震度

震度に関するデータには、各地の気象台・測候所における観測値が明らかなものはそれを用いた。明治四十一年(1908)から昭和十年(1935)の有感地震は、微震、弱震、強震、烈震の4階級に分けられ、弱震と強震はそれぞれを震度弱キ方とそれ以外に区別されている。この観測結果は、三浦(1964)によりまとめられた震度階の変遷のとおり、表1により震度を0~6の7階級の震度階級に換算して用いる。

表1 大正三年の震度観測成果の換算

当時の震度記録	換算した震度階級
無感覚地震	震度0
微震	震度1
弱震(震度弱キ方)	震度2
弱震	震度3
強震(震度弱キ方)	震度4
強震	震度5
烈震	震度6

三浦(1964)による

鹿児島測候所で無感覚だった地震のうち桜島島内で体感された地震動の記録がある。本研究では、そのような記録については、個々の史料の再解釈はせず、既往の報告書[中央気象台(1914), Omori(1914, 1920)]とそれらを取りまとめた研究成果[山科(1998)など]を利用した。既往の報告書に記録された史実から震度を求める基準は次のとおりとした。

- ・ 気象庁震度階級解説表によれば、震度1では体に感じない人がいるとされているため、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に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。

2.1.2 火山学的な知見から推定される震源

火山活動に伴うマグマが移動する場合には、成長中のダイクの先端付近で応力変化が大きくなることから、各期間の地震はこの付近で発生したものと仮定する。つまり、Hashimoto and Tada(1992)のモデルに基づいて、震央が始良カルデラ下の深部マグマだまりの直上から桜島島内の間付近にある浅い地震活動であると仮定する。

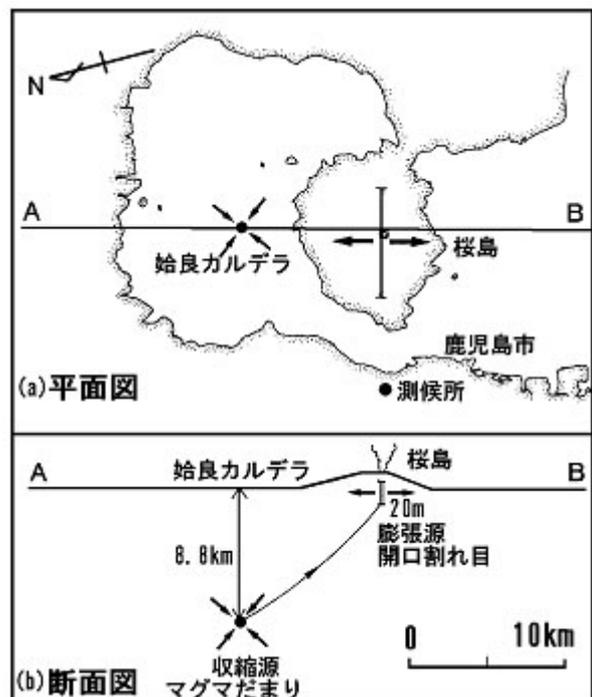


図1 大正噴火のマグマ供給モデルの概念図 Hashimoto and Tada(1992)の図に文字を加筆。海岸線は大正噴火以後のものである。

表2 大正噴火に先立つ地震活動で体感された地震動の概要

期間	年月日 時刻	場所:記録または観測に基づいた各地での地震動の概要 ¹⁾
	1914年1月 9日16時頃から	桜島島内 ^[1] : 東部と北部で何度も体に感じる地震. 鹿児島市 ^[2] : 測候所では有感地震なし
	10日夕方から	桜島島内 ^[1] : 夕方から全島で体に感じる地震が発生するようになる. 鹿児島市 ^[2] : 測候所では有感地震なし
	11日午前	鹿児島市 ^[2,3] : 測候所で03時41分に最初の有感地震.以降,有感地震が頻発.09時57分には震度5の地震があり,市内に被害が発生. この12時間の測候所での有感地震の回数は, 震度1:13回,2:4回,5:1回(09時57分).(平均1.5回/時間) 宮崎と熊本 ^[2] : 測候所では有感地震なし
	11日午後	鹿児島市 ^[2,3] : 有感地震が増加. この12時間の測候所での有感地震の回数は, 震度1:69回,2:18回,3:5回(12時27分,13時24分,17時24分, 19時51分,22時58分),5:1回(12時43分).(平均約8回/時間) 宮崎と熊本 ^[2] : 測候所では有感地震なし
	12日00~10時 (噴火開始直前まで)	鹿児島市 ^[2,3] : 有感地震が引き続き発生. この10時間の測候所での有感地震の回数は, 震度1:101回,2:7回,3:3回(00時40分,05時49分,08時27分). (平均約11回/時間) うち,揺れが緩やかな有感地震2回(06時03分の震度2と07時41分の震度 宮崎と熊本 ^[2] : 測候所では有感地震なし
	(参考) 12日10~18時 (噴火開始頃以降)	鹿児島市 ^[2,3] : 有感地震が急激に減少.12時06分より後に有感地震なし. この8時間の測候所での有感地震の回数は, 震度1:9回.(うち12時までの2時間に8回,その後の6時間で1回のみ) 宮崎と熊本 ^[2] : 測候所では有感地震なし
	12日18時過ぎ	鹿児島市 ^[2] : 18時29分に震度6の地震(桜島地震)があり,市内で13名が死亡.その後,余震が発生. 各地の震度 ^[4] 震度3:熊本・佐賀・宮崎,震度2:長崎,震度1:佐世保・大分・広島・浜松

1) 震度は,当時の震度階級を表1により換算.

[1] 山科(1998)による. [2] 気象要覧[中央気象台(1914)]による.

[3] 震災予防調査会欧文彙報[Omori(1920)]による. [4] 「震度を知る」[気象庁(1996)]による.

2.1.3 震度からマグニチュードを推定

震度からマグニチュード(以下, M)を推定するには, HK法と同じく次の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

$$I = 1.5M - 6.5 - b(-100) \quad (1)$$

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

は, 震央距離(km), I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

$$M = 0.23I_0 + 0.105 I_0^2 + 1.2 \log_{10} h + 1.3 \quad (2)$$

I_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, $M5 \sim 8$ 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, $M2 \sim 8, h < 100$ (km), I_0 が $0 \sim 6$ 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。

2.2 地震計の解析結果との比較

2.1 で推定された結果を、これとは独立な情報で近代的な手法で得られた M と比較する。大正噴火の前兆地震のうち比較的規模の大きなものは、鹿児島に加えて長崎・大阪などの地震計の記録を用いて、Abe(1979)により表面波マグニチュード(Ms)が求められている。これを比較の対象とする。

§3. 推定結果

§2の方法で大正噴火に先立つ地震活動の規模を推定した結果は、2.1 で分けた 4 期間についてそれぞれ以下の通りであり、それをまとめて表 3 に示す。

なお、便宜上、M 級という表現は小数点以下を切り捨ててその値となる規模、M 程度とは小数点以下を四捨五入してその値となる規模を表すものと定義して用いる。例えば、M2 級とは M2.0 以上 3.0 未満を、M4 程度は M3.5 以上 M4.5 未満を指すこととする。

3.1 期間 - 1月9~10日(噴火の約2~3日前)

2.1 で区分した、期間 :1月9~10日(噴火の約2~3日前)は、桜島島内のみで体を感じる地震となった。鹿児島測候所では有感地震を観測していない(表2)。

仮に、この段階では始良カルデラ下の深部マグマだまりからマグマがほとんど移動しておらず、大正噴火前後の地殻変動からの逆解析で求められた Hashimoto and Tada(1992)のモデルによる始良カルデラ下 8.8km の収縮源(図1)周辺に震源域があったと推定する。この場合、震央距離約 5~10km の桜島北岸と東岸で震度 1 に達する地震である条件は経験式(2)から求めて、M2.6 以上である。震央距離約 15km の測候所で無感あるいは震度 1 でたまたま観測者が感じなかったという条件は、経験式(1)から求め、M3.3 以下となる。

今度は、震源域に広がりがあり、桜島島内ではごく近くを震央とした揺れを感じた地震があったと仮定する。経験式(2)を適用すると、震源の深さが 9km であれば M2.6 以上、3km 未満であれば M2.0 以上と求められる。

以上のように、震源域の想定により M の推定に約 0.5 の違いはあるが、おおむね M2 級以下の地震で構成される地震活動であったと推定できる。

表3 大正噴火に先立つ地震活動の推移 - 震度からの推定と表面波マグニチュードの比較 -

期間	年月日・時刻 ¹⁾	体感された地震動から推定した地震活動の状況 ²⁾³⁾	主な地震について地震計から求められた表面波マグニチュード ³⁾⁴⁾
	1914年1月9日16時頃~10日[約2~3日前]	マグニチュード(M)2級以下の地震の活動	なし
	11日午前[約1日前]	M5程度の地震1回、M4程度の地震数回を含む地震活動	04時03分 Ms4.8, 05時09分 Ms5.0 10時03分 Ms5.1
	11日午後[約半日前]	M5程度の地震数回、M4程度からM4級の地震十数回を含む地震活動	12時48分 Ms4.9, 15時01分 Ms4.9 18時29分 Ms5.0, 20時29分 Ms5.0 21時14分 Ms5.1, 22時29分 Ms4.9
	12日10時まで[噴火直前数時間]	M4級の地震数回、M3級の地震十回程度を含む地震活動。	06時09分 Ms5.2, 08時33分 Ms5.0

1) [括弧内]は、噴火開始時との時間。

2) M 級は小数点以下を切り捨てて、M 程度とは小数点以下を四捨五入して、M となる地震の規模。

3) ゴシック体は鹿児島測候所で震度 5(当時の震度階級を表1により換算)を観測した地震。期間 については、「M5 程度の地震数回」のうちの 1 回が震度 5。最右列の地震との対応は、Abe(1979)には明示されておらず、3.5 に示した解釈による。

4) Abe(1979)による。表2の時刻とは数分のずれがあると考えられる。

3.2 期間 - 1月11日午前(噴火の約1日前)

期間 :1月11日午前(噴火の約1日前)には、03時41分を最初として、測候所では有感地震が頻発したが、それ以外の震度観測点のうち少なくとも宮崎と熊本では有感地震が観測されていない(表2)。

桜島付近からでは震央距離が約90kmであったはずの宮崎で、無感地震あるいは震度1に相当するが観測者がたまたま揺れを感じなかったことから、経験式(1)を適用すればM5.2以下と推定される。

一方で、Hashimoto and Tada(1992)のモデルで推定される始良カルデラ直下の収縮源直上から鹿児島測候所までは約15km、桜島南岳からでは約10kmとなる。震央が始良カルデラと桜島南岳の間であった場合のこの10~15kmという震央距離をもとに、測候所での震度が1,2,3,4,5となる境界の目安となるMは、経験式(1)から求めて、それぞれM3.0~3.3, M4.5~4.6, M5.6~5.7, M6.6である。

これらの推定結果は、鹿児島で震度4または5を観測した地震について、宮崎での無感から推定されるM5.2以下と、震央距離10~15kmと仮定して推定されるM5.6~5.7以上で矛盾する。つまり、「震源が依然として収縮源付近にあり地震の規模が大きくなった、あるいは桜島直下に震源が移動したために、桜島だけでなく鹿児島でも揺れを感じるようになった」という仮定は、鹿児島で震度4または5を観測した地震が、宮崎で無感であることをうまく説明できず、別の解釈をした方がよい。

そこで、次は測候所から震央距離が近い場所で地震が発生していたと仮定する。つまり、(2)式で震央付近の地震とする条件(震央距離(km)が $h/2$, $10^{0.5M-2}$ (km), 5(km)のいずれか)を満たしているとする。鹿児島測候所での震度から経験式(2)をもとに推定できる地震の規模は、震源の深さが9km未満として、震度4ではM4.0~5.6, 震度5ではM5.0~6.9で、上述の矛盾は解消する。このことは、今期間において震央の分布がある拡がりを持っていたと考えれば、うまく観測値を説明できることを意味する。

以上のことから、鹿児島測候所で震度5を観測した09時57分の地震は、観測点から近い場所を震央としていたと考え、その規模をM5程度と推定する。上述した震度の境界の目安となるMから、鹿児島測候所で震度2を観測した地震についてはM4程度、震度1の地震についてはM3級程度の地震であったと推定する。

従って、12時間で震度1:13回、震度2:4回、震度5:1回を観測した期間の地震活動は、「M5程度の地震1回、M4程度の地震数回を含む地震活動」であったと推定する。

3.3 期間 - 1月11日午後(噴火の約半日前)

期間 :1月11日午後(噴火の約半日前)には、鹿児島測候所では有感地震を観測した頻度は、期間以上であった。しかし、それ以外の震度観測点のうち少なくとも宮崎と熊本では有感地震が観測されていない(表2)。

期間 同様に、鹿児島測候所で震度5を観測した12時43分の地震については観測点から近い場所を震央としていたと仮定して、その地震がM5程度であったと推定する。3.2で述べた震度の境界の目安となるMから、鹿児島測候所で震度1,2,3を観測した地震の規模はそれぞれ、M3程度以下、M4程度、M5程度の地震であったと推定する。

従って、12時間で震度1:69回、震度2:18回、震度3:5回、震度5:1回を観測した期間の地震活動は、「M5程度の地震数回、M4程度からM4級の地震十数回を含む地震活動」であったと推定する。

3.4 期間 - 1月12日午前(噴火の直前数時間)

桜島は1月12日10時頃に噴火を開始したが、この日の噴火直前までの期間 :1月12日午前には、鹿児島測候所では有感地震を観測した頻度は、期間よりもやや多かった。しかし、それ以外の震度観測点のうち少なくとも宮崎と熊本では有感地震が観測されていない(表2)。

期間 同様に、3.2で述べた震度の境界の目安となるMから、鹿児島測候所で震度1,2,3を観測した地震の規模はそれぞれ、M3級以下、M4程度、M5程度の地震であったと推定する。

従って、10時間で震度1:101回、震度2:7回、震度3:3回を観測した期間の地震活動は、「M4級の地震数回、M3級の地震十回程度を含む地震活動」であったと推定する。

なお、この期間では、地震の性質として揺れが緩やかな(Omori(1920)に記された地震の性質が"Slow")有感地震が2回あった(表2)。一連の前兆地震活動のうち、このような性質の有感地震は、この期間だけに観測されていることから、あるいは、体を感じる規模の低周波地震が発生していた可能性を示唆している[岡田(1982)]。

3.5 地震計から求められた地震の規模との比較

Abe(1979)により求められた比較的規模の大きい前兆地震と、本稿で HK 法により求めたものを比較した(表 3)。両者で推定した M の差は平均的にはおおむね 1 以下と考えられる。これは、期間 ~ の合計で、Abe(1979)による Ms5.0 以上の地震が計 7 回、HK 法による本稿の結果では M5 以上となるのは M5 程度の地震数回中の一部、M4 程度以上の地震は少なくとも十数回であることによる。

一方、鹿児島測候所で震度 5 を観測した 2 回の地震に限れば、推定された M がほぼ一致するため、上述の M の差が系統的なものとは言えない。この 2 回の地震は、HK 法では M5 程度と推定したが、以下の理由で、Abe(1979)が Ms5.1 と 4.9 と推定した地震に対応すると考えられるためである。

Abe(1979)が Ms を求めた地震の時刻(表 3)のほとんどは、中央气象台(1914)や Omori(1920)に記された鹿児島で観測されたどの地震(無感地震を含む)の時刻とも一致せず、発震時でも鹿児島での観測値でもない何らかの時刻らしいが、明示はされていない。しかし、Ms を求めることができる地震は、長崎や大阪の地震計に検出可能な振幅で表面波が記録されたものに限定されるため、前後の時刻から地震から対比を試みることができる。少なくとも 2 月 11 日 10 時 03 分 M5.1 と 12 時 48 分 M4.9 の地震については、地震の継続時間と地震波の走時から考えて、それぞれ鹿児島測候所で震度 5 を観測した地震 2 回(09 時 57 分と 12 時 43 分)以外には、対応する可能性のある地震が見当たらない。

§ 4. 議論とまとめ

大正噴火に先立って発生した地震の震源については、マグマ供給の時間経過をどう考えるかに依存し、議論の余地がある。しかし、本例では、観測された震度分布を説明できる範囲で、仮定する震央の位置を始良カルデラから桜島中央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大きい場合でマグニチュード(M)の差が 0.5 程度にとどまることが確かめられた。

一方で、Abe(1979)により求められた比較的規模の大きい前兆地震と、本稿で林・小山(2002)の方法(HK 法)により求めたものを比較した結果、M の差は 1 以下であった。上述の仮定した震源の位置の不確定性に起因する誤差と同程度以上である。

このように、Abe(1979)の表面波マグニチュード

(Ms)と HK 法で求めたものに差が生じる理由としては、次のような要因が考えうる。

要因 1: マグニチュードの性格の違い

HK 法により求められる値は、その方法が震度と震源距離・M の関係式に立脚するものであるため、震度分布により求められた河角マグニチュード(M_K) [河角(1943)]に近い性質を持っていると考えられる。

噴火後に発生した桜島地震と呼ばれている最大地震については、震度分布から求められた M_K は 6.2 [CMO(1952)]であり、これは、地震の表面波から求められた Ms7.0 [阿部(1981)]より 0.8 も小さい。一般に、 M_K と Ms がこのように互いに大きく異なることは少なくない(阿部, 1979)。特に、九州地方の地震には、千々石湾の地震(1922 年 12 月 8 日, M_K 6.5, Ms6.9)や種子島近海の地震(1923 年 7 月 13 日, M_K 6.5, Ms7.1 と 7 月 14 日, M_K 6.1, Ms6.6)のように、 M_K が Ms に比べて小さい M7 前後の地震がある(宇津, 1979)ことが知られている。逆に M_K が Ms に比べて 0.5 以上大きい地震も、宇津(1979)のカタログで多く見つかる。

大正噴火に先立って発生した一連の地震活動にも、Ms と M_K が 0.5 以上異なる地震が含まれていた可能性が考えられる。

要因 2: 火山性地震で経験式(1),(2)を用いる限界

火山地域では、内陸のそれ以外の地域では稀なほど浅い地震や、マグマ・熱水が関係した特有の発震機構・周期の地震がしばしば発生する。経験式(1),(2)はいずれも、国内で発生した浅い地震で観測された震度から導かれたものであるが、このような火山性地震特有のメカニズムを特別に反映されたものではない。このため大正噴火に先立って発生した一連の地震においても、震源の深さ・震央距離と M の関係が経験式(1),(2)から大きく異なるものが含まれていた可能性が考えられる。

以上のように、大正噴火への適用例では、HK 法の推定精度は、 M_K と Ms の性質の違いによる差を大幅に上回るほどではないことが分かった。つまり、M で 1 の誤差を許容できる場面において、HK 法は実用に耐えうる推定法であるといえそうだ。例えば、過去の噴火事例の分析を通じて、大噴火に至るような火山活動をどの時点でどのように異常として検知できるかを考察し、火山監視あるいは火山情報発表の戦略を立てる際の道具の一つとして、活用できるであろう。

§5. 最後に

本稿は、歴史地震研究会での発表の内容をまとめたものである。予稿(林, 2003)には、導いた地震の規模の推定結果に計算の誤りによる不適切な結果が一部含まれていたが、本稿ではそれを訂正している。

謝辞

査読者の西村裕一氏と編集者の佐竹健治氏からは、本論文の改善について丁寧で適切なコメントをいただきました。記して謝意を表します。

文献

- 阿部勝征, 1979, 日本付近の地震(1901-1925年)のマグニチュード, 地震, **32**, 341-353.
- Abe.K., 1979, Magnitudes of Major Volcanic Earthquakes of Japan 1901 to 1925. J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., VII, **6**, 201-212.
- 阿部勝征, 1981, 桜島地震の震源とマグニチュード, 北海道大学地球物理学研究報告, **39**, 57-62.
- Central Meteorological Observatory of Japan, 1952, The catalogue of major earthquakes which occurred in Japan (1885-1950). Seism. Bull. for the year 1950, 99-183.
- 中央气象台, 1914, 桜島山噴火概況. 気象要覧, no.170(臨時増刊), 16pp. + 図.
- Hashimoto.M. and Tada.T., 1992, A model for crustal deformations associated with the 1914 great eruption of Sakurajima volcano, Kagoshima, Japan. Tectonophysics, **205**, 427-436.
- 林 豊, 2003, 大正三年桜島噴火に先立って発生した地震の規模の推定. 第20回歴史地震研究会研究発表会講演要旨集, 18.
- 林 豊・小山正人, 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, **18**, 127-132.
- 金井眞澄, 1914, 桜島噴火略報. 地学雑誌, **26**, 369-378. + 写真.
- 河角 廣, 1943, 震度と震度階, 地震, **15**, 6-12.
- 気象庁, 1996, 主な地震の震度分布. 「震度を知る - 基本知識とその活用 -」. ぎょうせい, 125-191.
- 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.
- 津村建四朗, 2001, 明治・大正時代の地震資料の整理について. 歴史地震, **17**, 156-157.
- 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.
- 三浦武臣, 1964, 気象庁震度の変遷 - 明治 17 年以降 -. 測候時報, **31**, 134-138.
- 岡田 弘, 1982, 桜島 1914 年の噴火前兆地震群再考, 火山, **27**, 340-341. (日本火山学会 1982 年度秋季大会講演要旨)
- Omori.F., 1914, The Sakura-jima Eruptions and Earthquakes. . [General Account.]. Bull. Imp. Earthq. Inv. Comm., **8**, 1-34.
- Omori.F., 1920, The Sakura-jima Eruptions and Earthquakes. . Seismographical Observations of the Fore-shocks, After-shocks, and After-outbursts of the Great Sakurajima Eruption of 1914. Bull. Imp. Earthq. Inv. Comm., **8**, 353-466.
- 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, 3-12.
- 宇津徳治, 1979, 1885 年～1925 年の日本の地震活動 - M6 以上の地震及び被害地震の再調査 -. 地震研究所彙報, **54**, 253-308.
- 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.
- 山科健一郎, 1998, 資料からみた 1914 年桜島大正噴火の開始と噴火に先立つ過程. 火山, **43**, 385-401.