

火山で生じる異常現象と近隣地域で起きる大地震の関連性

—その事例とメカニズムにかんするレビュー—

小 山 真 人*

Mechanical Coupling Between Volcanic Unrests and Large Earthquakes: A Review of Examples and Mechanisms

Masato KOYAMA *

Abstract

Previous studies have reported many examples of possible mechanical coupling between volcanic unrests and large earthquakes, which occurred around the volcano. This paper reviews these studies and reorganizes the types of mechanical coupling into the following five cases (cases A-1, A-2, B-1, B-2, and C) and 10 mechanisms:

In case A-1, in which a large earthquake triggers activation of a volcano, the following four mechanisms can explain their coupling: (A-1-1) an increase in compressional stress, which was produced by earthquake source faulting, squeezes magma up to the surface; (A-1-2) an increase in differential stress (or magma pressure), which was produced by earthquake source faulting, promotes dike intrusion; (A-1-3) increase in tensional stress, which was produced by earthquake source faulting, triggers gas bubbling in magma; and, (A-1-4) dynamic stress change, which was associated with seismic wave, triggers gas bubbling in magma.

In case A-2, in which a large earthquake triggers deactivation of a volcano, the following three mechanisms can explain their coupling: (A-2-1) increase in compressional stress, which was produced by earthquake source faulting, chokes a vent or prevents gas bubbling in magma; (A-2-2) decrease in differential stress (or magma pressure), which was produced by earthquake source faulting, prevents dike intrusion; and, (A-2-3) increase in tensional stress, which was produced by earthquake source faulting, drains magma back toward a chamber.

In case B-1, in which a volcanic unrest triggers a large earthquake, coupling can be explained by mechanism B-1-1: change in stress, which was produced by dike intrusion (or pressure change in a magma chamber), promotes earthquake source faulting. In case B-2, in which a volcanic unrest prevents a large earthquake, coupling can be explained by mechanism B-2-1: change in stress, which was produced by dike intrusion (or pressure change in a magma chamber), prevents earthquake source faulting.

In case C, in which a change in plate motion causes a stress change and then triggers (or

* 静岡大学教育学部総合科学教室

* Department of Integrated Sciences and Technology, Faculty of Education, Shizuoka University

prevents) a large earthquake (or a volcanic unrest) coupling can be explained by mechanism C: stress change promotes (or prevents) earthquake source faulting or ascending / intrusion of magma.

Key words : review , coupling , triggering , volcanic unrest , large earthquake , mechanism

キーワード : レビュー , 関連性 , トリガリング , 火山 , 大地震 , 事例 , メカニズム

I. はじめに

大きな地震の直前・直後にその近隣地域で火山噴火(あるいは噴火には至らない異常)が生じる場合のあることが、古くから指摘されてきた。これらの現象は、火山が地殻応力(あるいは地殻歪)の変化に感応して生じた結果と解釈される場合がほとんどである。本報告では、これらの火山異常と大地震間の連動とみなされる現象について、どのような研究が世界的になされてきたか、そこで提唱されたメカニズムにはどんなものがあるかについての整理と一般化を試み、今後の研究発展に資するものとする。

本論で扱うのは、特定の火山異常と大地震同士の因果関係を指摘し、そのメカニズムを議論した研究に限る。ある地域内あるいは全地球規模の範囲を取り上げて、噴火あるいは地震(またはその両方)の活動期の存在を総観的に(あるいは統計的に)指摘する研究は多いが(木村, 1991; 上杉, 1992; 小山, 1992; Cambray and Cadet, 1994; 山崎, 1998 など), ここでは立ち入らない。また、地球潮汐・海洋潮汐・海面変動などの現象と火山異常の関連性を扱った研究も数多くなされており(Mauk and Johnston, 1973; Shimozuru, 1976; McNutt and Beavan, 1984, 1987; 大竹・鶴岡, 1992; 小山ほか, 1995 など), それらの中には地殻歪を介した火山・地震の連動メカニズムを考えるためのヒントを与えるものもあるが、それらについてもここでは立ち入らないこととする。なお、火山と地震の連動現象全般については小山(1992), 連動も含めた火山テクトニクス全般については高橋(1994)のレビューもある。

II. 研究史

日本における古典的な研究としては、火山噴火同士の連動や移動現象を指摘した種子田(1948, 1975), Sameshima(1953)などがあるが、地震と噴火の連動は明示されていない。火山異常と大地震の連動にかんする本格的な研究は、プレートテクトニクスの登場によって地震・火山観が変革した1970年代になってからおこなわれるようになった(表1)。

1970年代の個別事例の研究としては、1970年秋田県南東部地震と1970~1971年秋田駒ヶ岳火山噴火(中村, 1971), 伊豆大島火山と相模・駿河トラフ大地震(中村, 1971; Kanamori, 1972; Ando, 1974; Yamashina and Nakamura, 1978), 伊豆大島・三宅島火山と周辺の地震(木村, 1973 など), 1974年伊豆大島火山噴火と1974年伊豆半島沖地震(中村・田沢, 1974)の関連性を論じたものなどがある。また、より広域を扱った総括的なものとしては、横山(1971), Latter(1971), 神沼(1973), 中村(1975), Kimura(1978)などがある。いずれの研究も、実例をあげて歴史時代における火山異常と大地震の連動の存在を主張している。

1980年以降の同種の研究は数としてはいったん下火になったが、1990年以降は定量的なメカニズムの検討を含めた形で勢いが盛り返したようにみえる。1980年以降の個別事例研究として、1975年以来の伊豆半島東部の異常隆起を火山性とみなして周辺地震との関係を調べた Thatcher and Savage(1982), 1989年7月9日の伊東沖の地震(M5.5)がその4日後の手石海丘の噴火を誘発したと論じた Oura *et al.* (1992), 伊豆大島

表 1 両者の火山の異常と近隣地域で起きる大地震の関連性にかんする主要な研究．
運動を誘発した歪または応力変化量が推定されている場合には，それを記した．

Table 1 Previous studies, which treat mechanical coupling between volcanic unrests and large earthquakes in adjacent areas.

研究	対象	運動のタイプ	メカニズム	歪または 応力変化量
Blot (1965)	日本の火山と周辺の大地震	深発地震→火山活発化	震源からの何らかのエネルギー移動が火山を活発化	
Katsui & Katz (1967)	1960 年チリ地震と 1960 年 Puyehue 火山噴火	地震→噴火	地震が何らかのメカニズムでマグマ溜りを刺激	
横山 (1971)	北海道 (+ 本州 , 南米) の火山と周辺の大地震	主として地震→火山活発化 (+ 温泉変動)	震源断層変位による体積歪変化が火山を活発化	$10^{-8} \sim 10^{-6}$
Latter (1971)	全世界の地震と火山	深発地震→火山活発化	深発地震によって生じた異常な張力場がマグマの生成や上昇を促す	
中村 (1971)	伊豆大島火山と相模トラフ周辺の大地震	噴火→地震→マグマ頭位低下	限界近くに達した圧縮歪によるマグマのしぼり出し→地震発生→歪の減少にともなうマグマ頭位低下	10^{-6} 程度
	1970 年秋田県南東部地震と 1970-71 年秋田駒ヶ岳火山噴火	噴火→地震→噴火活動低下	同上	10^{-7} 程度
Kanamori (1972)	伊豆大島火山と相模・駿河・南海トラフ周辺の大地震 (+ 和歌山地域の地震活動)	噴火→地震	フィリピン海プレートの運動に絡んだ応力変化が火山を刺激 (和歌山地域の地震とプレート境界域の地震間の関係には定量的モデルを提示)	
神沼 (1973)	九州および伊豆・小笠原弧の火山と地震	噴火や微小地震活動→大地震	圧縮歪の蓄積がマグマのしぼり出しや微小地震活動を引き起こし，その後には大地震の原因ともなる	
木村 (1973) 木村・豊田 (1975) Kimura (1976) 木村 (1978 , 1983 , 1988 , 1989 , 1994)	伊豆大島および三宅島火山と周辺の地震	噴火→大地震	圧縮歪によるマグマのしぼり出し→大地震による歪の解放にともなうマグマ頭位の低下	
		群発地震→噴火	圧縮歪増加による微小破壊→さらなる圧縮歪増加によるマグマ上昇と噴火	
中村・田沢 (1974)	1974 年伊豆大島火山噴火と 1974 年伊豆半島沖地震	噴火→地震→噴火活発化 + マグマ頭位上昇	圧縮歪によるマグマのしぼり出し→地震によるさらなる圧縮歪増加がマグマ頭位上昇と噴火活発化を誘発	$10^{-7} \sim 10^{-6}$
Ando (1974)	1923 年大正関東地震と伊豆大島火山のマグマ頭位	地震→マグマ頭位低下	震源断層変位にともなう膨張歪増加によるマグマ頭位低下	10^{-5} 以下
安藤 (1974)	1703 年元禄関東地震・1707 年宝永東海地震と 1707 年富士火山噴火	地震→噴火	震源断層変位にともなう圧縮歪増加によるマグマしぼり出し	
中村 (1975)	世界各地 (日本 , 千島 , ハワイ , 中南米 , ガラパゴス) の火山噴火と地震	噴火→地震	地震に先立って限界近くに達した (1) 圧縮歪によるマグマのしぼり出し (2) 圧縮歪によるマグマ圧増加をもたらした岩脈貫入 (3) 最小主応力の減少による差応力増大をもたらした岩脈貫入 , (4) 膨張歪による減圧をもたらすマグマの発泡	
		地震→噴火	震源断層変位にともなう (1) 圧縮歪増加によるマグマのしぼり出し , (2) 圧縮歪増加によるマグマ圧増加をもたらした岩脈貫入 , (3) 最小主応力の減少による差応力増大をもたらした岩脈貫入 , (4) 膨張歪増加による減圧をもたらすマグマの発泡 . あるいは (5) 地震動の刺激をもたらすマグマの発泡	
Swanson <i>et al.</i> (1976) Tilling and Dvorak (1993) Dvorak (1994)	キラウエア火山と周辺の地震	火山活発化→地震	岩脈貫入による山体内の歪増加が , 山体南部ブロックの南方移動をもたらす地震を誘発	
Yamashina & Nakamura (1978)	伊豆大島火山と周辺の地震	地震→マグマ頭位上昇 / 低下	震源断層変位にともなう体積歪の増大 / 減少によるマグマ頭位の上昇 / 低下	$10^{-6} \sim 10^{-5}$
		地震→火山活発化 / 沈静化	震源断層変位にともなうせん断 / 伸長歪がマグマだまりに影響	$10^{-8} \sim 10^{-7}$
Kimura (1978)	東北日本 , 千島・カムチャッカ弧 , 伊豆・小笠原弧の火山と周辺の大地震	噴火活発化→地震 地震→噴火活発化 地震→1 年以内に噴火	地震に先立つ , あるいは震源断層変位にともなう圧縮歪増加によるマグマのしぼり出し 地震動による刺激	

研究	対象	運動のタイプ	メカニズム	歪または 応力変化量
木村 (1978)	全世界の火山噴火と地震	主として噴火→地震	地震に先立って蓄積した、(1)圧縮歪によるマグマのしぼり出し、あるいは(2)圧縮応力が引き起こす地殻の曲りによるマグマしぼり出し	
Gudmundsson and Saemundsson (1980)	アイスランドの火山と周辺の地震	噴火→地震	プレート運動の変化が噴火と地震を誘発(噴火が地震を直接誘発した可能性もあり)	
Thatcher and Savage (1982)	伊豆半島東部の異常隆起と周辺の地震	異常隆起(火山性)→地震	マグマだまりの膨張による応力場変化が震源断層変位を誘発	0.5MPa 以下
本谷 (1989)	北海道の火山と周辺の群発地震・大地震	火山活発化→地震 地震→火山活発化	地殻応力による何らかのカップリング	
石橋 (1988, 1994) 小山・早川 (1996)	伊豆大島火山と神奈川県西部地震	噴火→地震	伊豆大島の中・大噴火を神奈川県西部地震のテクトニク的前兆ととらえる	
井田 (1989)	伊豆大島火山と周辺の群発地震	群発地震→火山活発化	群発地震が応力状態を変化させてマグマを刺激	
尾池 (1991)	1990 年フィリピン地震と環フィリピン海の地震および火山	地震→火山活発化	(1)応力場変化による差応力の増大,(2)歪変化による破壊強度の低下,(3)プレート運動の加速	
つじ (1992)	富士火山と南海トラフ大地震	地震→火山活発化		
Oura <i>et al.</i> (1992)	1989 年 7 月 9 日の伊東沖地震と 7 月 13 日手石海丘噴火	地震→噴火	応力降下による減圧がもたらしたマグマの発泡	10 ⁻⁵ 程度
Marzocchi <i>et al.</i> (1993)	ベスビオ火山と周辺の地震	地震→噴火	島弧の後退にともなう張力場の変動パルスが岩脈貫入を誘発	
Hill <i>et al.</i> (1993, 1995) Linde <i>et al.</i> (1994)	1992 年ランダース地震とアメリカ北西部の火山	地震→火山活発化	地震動によるダイナミックな歪変化がマグマだまり中の脱ガスを促進し、火山性地震を誘発	
大倉・安藤 (1994)	1990 年フィリピン地震と 1991 年ピナツボ火山噴火	地震→噴火	圧縮歪によるマグマのしぼり出し→上昇したマグマの発泡による密度減少がさらに上昇を加速する	10 ⁻⁶ 程度
山岡 (1994)	伊豆大島火山と周辺の地震	地震→火山活発化	震源断層変位にともなう北東-南西方位の法線歪の増加または減少がマグマを刺激	10 ⁻⁸ ~ 10 ⁻⁵
		マグマ溜りの収縮→群発地震	マグマだまりの収縮にともなう圧力変化が、周囲の地殻の差応力を増大させ地震を誘発	10 ⁻⁶ ~ 10 ⁻⁵
		岩脈貫入→地震→岩脈進行の阻害	岩脈の先端部分の応力集中が地震を誘発→その地震による応力緩和が岩脈の進行を阻止	
土井 (1998)	岩手火山・秋田駒ヶ岳火山・秋田焼山火山と三陸沖地震・内陸地震	三陸沖地震→火山活発化・内陸地震(またはその逆)	地殻応力による何らかのカップリング	
中禮 (1998, 2000)	東北地方の火山・内陸地震と日本海溝付近の巨大地震	日本海溝付近の巨大地震→火山活発化・内陸地震(またはその逆)	地殻応力による何らかのカップリング	
小山 (1998, 2000)	富士火山と近隣地域のプレート境界地震	地震→火山異常	(1)震源断層変位にともなう歪変化によるマグマのしぼり出し,(2)震源断層変位にともなう歪変化がマグマ発泡を促進,(3)地震動にともなうダイナミックな歪変化がマグマ発泡を促進	
		火山異常→地震	(1)限界近くに達した地殻歪によるマグマのしぼり出しまたは岩脈貫入の促進(2)マグマ活動にともなう歪変化が震源断層変位を誘発	
Nostro <i>et al.</i> (1998)	ベスビオ火山と周辺の地震	地震→噴火	震源断層変位による歪変化が、マグマだまりの増圧と岩脈貫入を促進して噴火を誘発	0.01 ~ 0.1MPa
		噴火→地震	噴火にともなうマグマだまりの収縮と岩脈貫入による歪変化が、震源断層変位を誘発	0.01 ~ 0.1MPa
Linde and Sacks (1998)	全世界の火山噴火と地震	地震→噴火(2 火山以上の場合も)	地震動によるダイナミックな歪変化がマグマだまり中の脱ガスを促進し、火山を活発化	
国土地理院 (1999) 村上ほか (2000) Nishimura <i>et al.</i> (2001)	1998 年岩手山の火山異常と 1998 年岩手県内陸北部地震	火山活発化→地震	マグマ貫入にともなう歪変化が震源断層変位を誘発	0.33MPa

の火山活動と周辺の地震の関連性を指摘した石橋 (1988, 1994), 小山・早川 (1996), 井田 (1989), 山岡 (1994), および木村の一連の研究 (木村, 1983 など), 富士山の噴火・異常と周辺地震の関連性を論じた上杉・米澤 (1987), つじ (1992), 上杉 (1993, 1998), 小山 (1998, 2000), 東北地方の歴史時代の火山噴火と内陸地震・三陸沖地震の関係を調べた土井 (1998) および中禮 (1998, 2000), 1998 年の岩手山火山異常が 1998 年岩手県内陸北部地震の引き金を引いたとする Nishimura *et al.* (2001) などがある。

日本以外に目を向けると, アイスランドにおける火山噴火と大地震の関係を調べた Gudmundsson and Saemundsson (1980), 1990 年フィリピン地震が引き金となってフィリピン海西縁の沈み込み帯に沿う地震・火山が広域的に活発化した可能性を示した尾池 (1991), 1990 年フィリピン地震がピナツボ火山の 1991 年噴火を誘発したとする大倉・安藤 (1994), ペスビオ火山の噴火と周辺の地震の関連性を調べた Marzocchi *et al.* (1993) および Nostro *et al.* (1998), 1992 年ランダース地震が米国北西部の複数火山での火山性地震の活発化を引き起こしたとする Hill *et al.* (1993, 1995) および Linde *et al.* (1994), 全世界の火山と地震に目を向けて地震・噴火の誘発関係をさぐった Linde and Sacks (1998) などがある。

なお, 震源断層破壊や岩脈貫入の結果生じる新たな断層破壊の可能性を評価するための歪変化図示手法として, とくに最近 ΔCFF (クーロン破壊関数の変化値) を用いた可視化手法が採用されることが多くなってきた (たとえば, 橋本, 2000)。Nostro *et al.* (1998) および Nishimura *et al.* (2001) はこの手法を用いた歪変化図を描いており, 地震・火山異常の相互関係が理解しやすい。

III. 富士山での研究

火山異常と大地震の関連性についての富士山での事例研究について, やや詳しく述べる。宝永四年十一月二十三日 (1707 年 12 月 16 日) から始まって 16 日間におよんだ富士山の宝永噴火は,

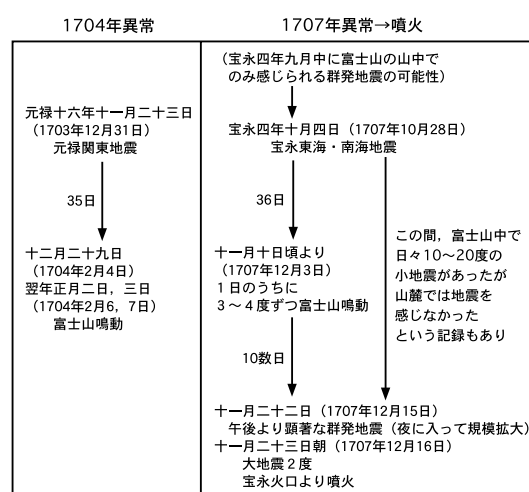


図 1 元禄関東地震後の富士山鳴動事件 (1704 年異常) と, 宝永東海・南海地震後の宝永噴火に至るまでの事件 (1707 年異常→噴火) の推移比較。
小山ほか (2002) の成果を含める形で, 小山 (2000) を一部修正。

Fig. 1 Correlation between the sequences of two volcanic events of Fuji Volcano: the 1704 rumbling and the 1707 Hoei eruption.

宝永四年十月四日 (1707 年 10 月 28 日) に南海および駿河トラフを震源域として起きた $M8$ クラスのプレート境界地震 (宝永東海・南海地震) のわずか 49 日後に発生した (たとえば, 小山, 1998)。この事実は研究者の関心を集め, 地震が火山噴火を誘発した典型例としてたびたび指摘・議論されてきた (安藤, 1974; 中村, 1975 など)。さらに, 宝永噴火を含めた歴史時代全体における富士山の噴火・異常と近隣地域で生じた大地震との時間的近接関係についても議論されてきたが (木村, 1978; 浜田, 1992; 上杉, 1993 など), それらのほとんどは原史料の信頼性や史料欠落期間の有無を検討しておらず, 問題の多いものであった。

都司嘉宣は, 富士山の歴史時代の噴火史研究において初めて本格的に史料の信頼性吟味をおこない, 富士山頂に望見された煙の消長と大地震の関

係を議論した(つじ, 1992)。そして, 1361 年の正平地震, 1498 年の明応地震, 1605 年の慶長地震, 1707 年の宝永地震, 1854 年の安政地震の 5 回の大地震(いずれも南海トラフ地震)を境として富士火山が活発化したと主張した。しかし, 都司は相模トラフ地震を考慮に入れていない上に, 煙の望見記事の収集・検討が主体となっており, 噴火記事の収集と吟味については十分でなかった。

小山(1998)は, 富士山の歴史時代の噴火・異常記録について個別史料の信頼性を吟味し, 新たな噴火や鳴動事件を見出すとともに大地震との時間的近接関係を検討した。その結果, 史料不十分で判断不能の 1605 年地震と 1944 年地震を除いた残りの 11 地震のすべてについて, 時間的に近接して(±約 25 年以内)富士山の火山異常(噴火, 鳴動, あるいは地熱活動の高揚)が生じたと結論づけた。また, 南海トラフ東部で起きる地震だけでなく, 相模トラフで生じる大地震も富士山の火山異常と関連があるようにみえる点を指摘した。

これらの事例のうち, 小山(2000)が最も象徴的なものとして取り上げた 1703 年と 1707 年の 2 事件について説明する(図 1)。1703 年元禄関東地震の 35 日後から 4 日間にわたって富士山麓で鳴動が発生したことを, 当時沼津にいた僧が書き残している。また, 1707 年宝永東海・南海地震の際に, 地震発生から 36 日過ぎた頃から富士山麓で鳴動が聞こえ, 48 日めに有感地震が起き始め, 49 日めの宝永噴火に至ったことを記録する富士山北麓～東麓の史料がある。つまり, 1703 年事例と 1707 年事例は, 大地震から 35 日程度経過した後鳴動事件があったという点で類似する。1707 年事例では噴火に至ったが, 1703 年事例では何らかの理由で噴火にまで至らなかった。

しかし, これら 2 事例のように必ずしも地震の後に火山異常が生じるわけではなく, 地震の前に火山現象に変化が生じたケースもある。たとえば, 1293 年関東地震(石橋, 1991)の 25 年ほど前から, それまで 100 年以上にわたってほぼ連続的に望見されていた山頂付近の煙が途絶えている。

なお, 最近の詳細な古記録の検討によれば, 富士山の山体内部でのみ感じられる小規模な群発地

震が 1707 年宝永地震の少し前から起きていた可能性も判明している(図 1: 小山ほか, 2002)。これが事実ならば, 富士山の 1707 年事例は大地震の前から火山に異常が生じていたケースの方に含まれることになる。

いずれにしる富士山の例だけを見ても, 火山異常と大地震の関係は単純なものではないことがわかる。今後の詳細な検討が望まれる。

IV. 連動メカニズムは何か

火山で生じる異常現象と近隣地域の大地震の連動メカニズムについて, これまで様々なモデルが提唱されている(表 1)。これら既出のモデルを整理した上で, 今後新たに観測・実証される可能性があるモデルも加えて一般化を試みたものが図 2 である。

図 2 の初期条件として, 火山とその下のマグマだまり, および近隣地域の震源断層を考える(図 2 の 0)。また, 図 2 を描くにあたって, 火山の異常として活発化だけを考えるのでは地殻歪の影響を一面でしか見ないことになるため, より一般化して火山が沈静化するケースも考慮した。火山の沈静化を図示するための便宜上, 地熱活動の存在を初期条件に加えた。同様に, 図 2 では震源断層の破壊(大地震)だけを考えるのではなく, (現在の技術では直接観測が困難だが)震源断層が安定化するケースも考慮に入れている。

A) 大地震が火山異常に先行する場合

まず, 大地震が火山の活発化(あるいは沈静化)に先行する場合を考える(図 2 の A)。震源断層変位によって静的な歪の再配置が生じ, マグマだまりと火道・火山体に加わっていた歪が変化する。また, 大地震にともなう強震動が, マグマだまりに動的な歪変化をもたらす。以上の結果として, 1) 火山の活発化と, 2) 火山の沈静化の 2 通りのケースが考えられる。

1) 大地震が火山の活発化に先行する場合(図 2 の A-1)

大地震が火山の活発化に先行するケースを説明するメカニズムとしては, (A-1-1) 圧縮歪の増加によるマグマのしぼり出し(安藤, 1974; 中村,

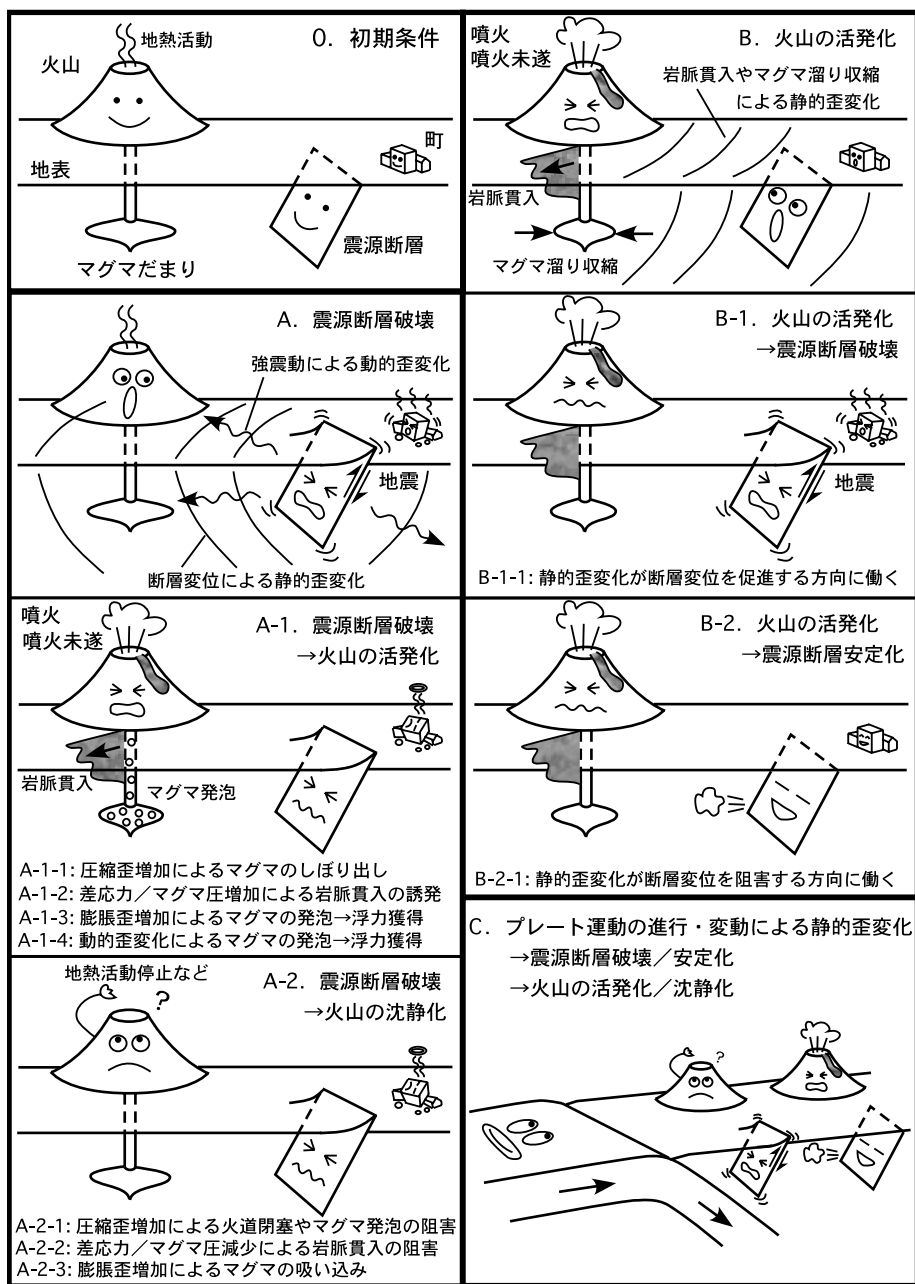


図 2 火山の異常と近隣地域で起きる大地震の関連性を説明するメカニズムのまとめ。
これまで提唱されたものに加え、従来あまり注目されなかった火山の沈静化と大地震の運動についても含める形で一般化して描いた。詳細については本文参照。

Fig. 2 Summary of mechanisms, which can explain coupling between volcanic unrests and large earthquakes in adjacent areas.

1975; Yamashina and Nakamura, 1978; 大倉・安藤, 1994 など), (A-1-2) 差応力 (あるいはマグマ圧) の増加による岩脈貫入の誘発 (中村, 1975; Nostro *et al.*, 1998), (A-1-3) 膨脹歪の増加によるマグマだまり中のマグマ発泡の促進 (中村, 1975; Oura *et al.*, 1992 など), (A-1-4) 強震動にともなう動的歪変化によるマグマ発泡の促進 (中村, 1975; Hill *et al.*, 1993; Linde and Sacks, 1998 など) の4つがこれまで提唱されている。なお, このうちのモデル A-1-1 については, 歪変化にともなうマグマだまりの体積変化が小さく, 実際にはマグマを火口まで上昇させることは困難 (つまり, 地表へのしぼり出しには至らない) という計算結果も得られている (Rikitake and Sato, 1989)。

2) 大地震が火山の沈静化に先行する場合 (図2のA-2)

大地震が火山の沈静化に先行するケースを説明するメカニズムとしては, (A-2-1) 圧縮歪の増加による火道の閉塞やマグマ発泡の阻害, (A-2-2) 差応力 (あるいはマグマ圧) 減少による岩脈貫入の阻害, (A-2-3) 膨脹歪の増加によるマグマの吸い込み (マグマ頭位低下), の3つが考えられる。このうち, (A-2-2) については伊豆大島 (山岡, 1994), (A-2-3) については伊豆大島と秋田駒ヶ岳 (中村, 1971; 木村, 1973 ほか; Ando, 1974; Yamashina and Nakamura, 1978) での事例報告がある。

B) 火山異常が大地震に先行する場合

次に, 火山の活発化 (あるいは沈静化) が大地震に先行する場合を考える (図2のB。図上では便宜上, 火山の活発化の場合だけを描いている)。火山の活発化 (あるいは沈静化) にともなう岩脈貫入やマグマだまりの膨脹 (あるいは収縮) によって静的な歪の再配置が生じ, 震源断層面に加わっていた歪が変化する。この結果として, 1) 震源断層変位の誘発 (大地震) と, 2) 震源断層変位が阻害されることによる震源断層の安定化, の2通りのケースが考えられる。

1) 火山の活発化 (あるいは沈静化) が大地震に先行する場合 (図2のB-1)

火山の活発化 (あるいは沈静化) が大地震に先行するケースを説明するメカニズムとしては, (B-1-1) 静的歪変化による震源断層変位の促進 (Dvorak, 1994; 山岡, 1994; Nostro *et al.*, 1998; Nishimura *et al.*, 2001 など) が, これまで提唱されている。

2) 火山の活発化 (あるいは沈静化) が震源断層の安定化をもたらす場合 (図2のB-2)

火山の活発化 (あるいは沈静化) が震源断層の安定化をもたらすケースを説明するメカニズムとしては, (B-2-1) 静的歪変化による震源断層変位の阻害が唯一のものとして考えられるが, 震源断層の安定化を観測によってとらえること自体が困難であるため, これまで報告例がない。

C) プレート運動が火山異常や大地震をもたらす場合

以上述べたメカニズムのほかに, プレート運動の加速によって広域的な地震・火山の活発化を説明するモデル (図2のC) が提唱されている (Kanamori, 1972; Gudmundsson and Saemundsson, 1980; 尾池, 1991; Marzocchi *et al.*, 1993 など)。先出のAとBの場合には近距離にある火山と震源断層同士の力学的相互作用を考えるのに対し, より広域的な歪変化の影響を考えるわけである。ただし, 具体的な地震・火山の活発化のメカニズムとしては, 静的歪変化によるA-1-1 ~ 3 (火山の活発化の場合) あるいはB-1-1 (地震の活発化の場合) を考えることになる。火山異常と地震のどちらが先行するかは, 当然のことながら個々のケースで異なるだろう。

さらに一般化して考えれば, 歪変化の仕方によっては火山・地震の活発化だけを招くとは限らず, 逆に火山の沈静化や震源断層の安定化をもたらすケースがあるだろう (図2のC)。また, プレート運動の加速だけが歪変化をもたらすとは限らず, 減速についても同様な効果をもたらし得るだろう。

なお, 火山の活発化が大地震に先行するメカニズムのひとつとして, 限界近くに達した地殻歪が, 臨界状態にある火山のマグマをしぼり出す作用として働くモデル (仮に中村モデルと呼ぶ) が提唱されてきた (中村, 1971, 1975; 神沼, 1973;

木村, 1973; 中村・田沢, 1974 など)。しかしながら, 図2に示した整理と一般化から明らかなように, 「限界近くに達した地殻歪」がいつも火山の活発化をもたらすとは限らず, それがいつも大地震に先行する必然性も考えにくい。しかも, 中村モデルは, 火山の活発化に先行する地殻歪増加の原因として, 広域的なもの(プレート運動)を暗示的に想定している。よって, 中村モデルは図2Cの特殊例としてとらえるのが適当と考える。

V. ま と め

本論では, 火山の活発化(あるいは沈静化)が近隣地域の大地震と連動したとみられる事例について既存研究のレビューをおこない, 連動メカニズムの整理と一般化ならびに若干の考察をおこなった。

大地震が火山の活発化に先行するケースを説明するメカニズムとしては, (A-1-1) 圧縮歪の増加によるマグマのしぼり出し, (A-1-2) 差応力(あるいはマグマ圧)の増加による岩脈貫入の誘発, (A-1-3) 膨脹歪の増加によるマグマだまり中のマグマ発泡の促進, (A-1-4) 強震動にともなう動的歪変化によるマグマ発泡の促進, の4つが考えられる。

大地震が火山の沈静化に先行するケースを説明するメカニズムとしては, (A-2-1) 圧縮歪の増加による火道の閉塞やマグマ発泡の阻害, (A-2-2) 差応力(あるいはマグマ圧)減少による岩脈貫入の阻害, (A-2-3) 膨脹歪の増加によるマグマの吸い込み(マグマ頭位低下), の3つが考えられる。

火山の活発化(あるいは沈静化)が大地震に先行するケース(あるいは, その逆として震源断層の安定化をもたらすケース)を説明するメカニズムとしては, (B-1-1) 静的歪変化による震源断層変位の促進(逆の場合は(B-2-1) 静的歪変化による震源断層変位の阻害), が考えられる。

近距離にある火山と震源断層同士の力学的相互作用を考える上記9つのモデルのほか, (C) プレート運動の加速(あるいは減速)による広域的な歪変化の影響として, 広域的な地震・火山の活発化(あるいは沈静化)を説明するモデルも考え

られる。

ここで取り上げた従来の多くの研究に共通する問題点として, 定量的かつ実証的な検討をした例が少ないことがあげられるだろう。実際に定量的モデル計算をしている場合にも, 推定されたマグマだまり位置における地殻応力(あるいは歪)変化のセンスと量を求めただけのことが多い。火山や地震のモデル化に困難な面が多いとはいえ, もう一歩進んでその変化が実際に噴火(あるいは地震)を引き起こし得たか否かまでを計算・検証した研究はほとんどない。

しかしながら, 火山の活発化(または沈静化)と近隣地域の大地震発生の間に何らかの因果関係があることについては, 多くの研究者が合意するところである。そのことは, 2000年6~9月に生じた伊豆諸島のマグマ活動と地震活動の時間的・空間的關係を見ても明らかである。今後, モデルのしぼり込みや, さらに一歩進んで地殻活動予測にまで発展させるためには, 偶発的な研究事例の積み重ねを待つだけではなく, 観測とモデル計算の両面からの戦略的な研究プロジェクトも必要であろう。

謝 辞

橋本 学さんには本論発表の機会を与えていただきました。早川由紀夫さんともう一人の匿名査読者から頂いたコメントは, 本論文の内容改善に大いに役立ちました。記して感謝いたします。

文 献

- Ando, M. (1974) Seismo-tectonics of the 1923 Kanto Earthquake. *J. Phys. Earth*, **22**, 263-277.
安藤雅孝(1974) 東海沖か房総沖で大地震。科学朝日, **34**, No. 3, 34-37.
Blot, C. (1965) Relations entre les séismes profonds et les éruptions volcaniques au Japon. *Bull. Volcanol.*, **28**, 25-63.
Cambray, H. and Cadet, J.P. (1994) Testing global synchronism in peri-Pacific arc volcanism. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **63**, 145-164.
中禮正明(1998) 日本海溝付近の巨大地震と東北地方の火山噴火及び内陸地震の発生に見られる時空間分布の特徴。地球惑星関連学会1999年合同大会予稿集, 390.
中禮正明(2000) 火山活動予測に向けた観測・研究。将来予測シンポジウム—日本列島の過去・現在・未来—

- (核燃料サイクル開発機構・東濃地科学センター主催) 予稿集, 55-59.
- 土井宣夫 (1998) 有史時代における岩手山・秋田駒ヶ岳・秋田焼山の火山活動と三陸沖地震との相関. 地球惑星関連学会 1998 年合同大会予稿集, 410.
- Dvorak, J. (1994) An earthquake cycle along the south flank of Kilauea Volcano, Hawaii. *J. Geophys. Res.*, **99**, 9533-9541.
- Gudmundsson, G. and Saemundsson, K. (1980) Statistical analysis of damaging earthquakes and volcanic eruptions in Iceland from 1550-1978. *J. Geophys.*, **47**, 99-109.
- 浜田和郎 (1992) 巨大地震と富士山・伊豆大島・三宅島の噴火の時間相関についての確率論的考察. 地震学会 1992 年春季大会講演予稿集, 184.
- 橋本 学 (2000) 続・地殻活動の中長期シミュレーション—バックスリップ・モデルと ΔCFF —. 日本地震学会ニュースレター, **10**, No. 3, 9-13.
- Hill, D.P., Reasenber, P.A., Michael, A., Arabaz, W.J., Beroza, G., Brumbaugh, D., Brune, J.N., Castro, R., Davis, S., dePolo, D., Ellsworth, W.L., Gomberg, J., Harmsen, S., House, L., Jackson, S.M., Johnston, M.J.S., Jones, L., Keller, R., Malone, S., Munguia, L., Nava, S., Pechmann, J.C., Sanford, A., Simpson, R.W., Smith, R.B., Stark, M., Stickney, M., Vidal, A., Walter, S., Wong, V. and Zollweg, J. (1993) Seismicity remotely triggered by the magnitude 7.3 Landers, California, Earthquake. *Science*, **260**, 1617-1623.
- Hill, D.P., Johnston, M.J.S. and Langbein, J.O. (1995) Response of Long Valley caldera to the Mw=7.3 Landers, California, Earthquake. *J. Geophys. Res.*, **100**, 12985-13005.
- 井田喜明 (1989) 伊豆大島にみる火山学の進歩. 科学, **59**, 737-745.
- 石橋克彦 (1988) “神奈川県西部地震”と地震予知. 科学, **58**, 537-547, 771-780.
- 石橋克彦 (1991) 1293 年永仁鎌倉地震と相模トラフ巨大地震の再来時間. 地震学会 1991 年秋季大会講演予稿集, 251.
- 石橋克彦 (1994) 大地動乱の時代—地震学者は警告する—. 岩波書店.
- 神沼克伊 (1973) 地震・火山活動の互関性. 関東大地震 50 周年論文集, 東京大学地震研究所, 185-197.
- Kanamori, H. (1972) Relation between tectonic stress, great earthquakes and earthquake swarms. *Tectonophysics*, **14**, 1-12.
- Katsui, Y. and Katz, H.R. (1967) Lateral fissure eruptions in the southern Andes of Chile. *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. 4*, **11**, 433-448.
- 木村政昭 (1973) 相模湾に発生する巨大地震予知に関する考察. 地学雑誌, **82**, 171-188.
- Kimura, M. (1976) Major magmatic activity as a key to predicting large earthquakes along the Sagami Trough, Japan. *Nature*, **260**, 131-133.
- Kimura, M. (1978) Significant eruptive activities related to large interplate earthquakes in the northwestern Pacific margin. *J. Phys. Earth*, **26**, S557-S570.
- 木村政昭 (1978) 噴火と大地震. 東京大学出版会.
- 木村政昭 (1983) 伊豆大島および三宅島火山の活動の規則性. 火山, **28**, 160-162.
- 木村政昭 (1988) 噴火の規則性—伊豆大島・三宅島—. 火山, **33**, S319-S329.
- 木村政昭 (1989) 群発地震と噴火の時空関係—伊豆大島火山—. 火山, **34**, 61-66.
- 木村政昭 (1991) 九州-琉球弧の地震活動と噴火. 月刊地球, **13**, 668-672.
- 木村政昭 (1994) 地殻歪の指示者としての火山噴火. 地学雑誌, **103**, 488-497.
- 木村政昭・豊田純一 (1975) 伊豆大島三原山火口底最近の変動. 火山, **20**, 65-78.
- 国土地理院 (1999) 東北地方の地殻変動. 地震予知連絡会会報, **62**, 16-34.
- 小山真人 (1992) フィリピン海プレート北縁で起きる火山噴火・地震の同時発生の可能性. 月刊地球, 号外, **5**, 137-144.
- 小山真人 (1998) 歴史時代の富士山噴火史の再検討. 火山, **43**, 323-347.
- 小山真人 (2000) 史料にもとづく富士山の火山活動史と災害予測. 月刊地球, **22**, 558-563.
- 小山真人・早川由紀夫 (1996) 伊豆大島火山カルデラ形成以降の噴火史. 地学雑誌, **105**, 133-162.
- 小山真人・山岡耕春・早川由紀夫・白尾元理 (1995) 雲仙火山の 1991 年噴火に見られた潮汐との同期現象とそのメカニズム. 平成 6 年度文部省科学研究費補助金 (試験研究 B, 研究代表者: 小山真人) 研究成果報告書, 58-77.
- 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. 地球惑星関連学会 2002 年合同大会予稿集. (印刷中)
- Latter, J.H. (1971) The interdependence of seismic and volcanic phenomena: Some space-time relationships in seismicity and volcanism. *Bull. Volcanol.*, **35**, 127-142.
- Linde, A.T. and Sacks, I.S. (1998) Triggering of volcanic eruptions. *Nature*, **395**, 888-890.
- Mauk, F.J. and Johnston, M.J.S. (1973) On the triggering of volcanic eruptions by earth tides. *J. Geophys. Res.*, **78**, 3356-3362.
- Linde, A.T., Sacks, I.S., Johnston, M.J.S., Hill, D.P. and Bilham, R.G. (1994) Increased pressure from rising bubbles as a mechanism for remotely triggered seismicity. *Nature*, **371**, 408-410.
- Marzocchi, W., Scandone, R. and Mulargia, F. (1993) The tectonic setting of Mount Vesuvius and the correlation between its eruptions and the earthquakes of the Southern Apennines. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **58**, 27-41.
- McNutt, S.R. and Beavan, R.J. (1984) Patterns of earthquakes and the effect of solid earth and ocean load tides at Mount St. Helens prior to the May 18, 1980, eruption. *J. Geophys. Res.*, **89**,

- 3075-3086.
- McNutt, S.R. and Beavan, R.J. (1987) Eruptions of Pavlof Volcano and their possible modulation by ocean load and tectonic stresses. *J. Geophys. Res.*, **92**, 11509-11523.
- 本谷義信 (1989) 群発地震活動と大地震および火山噴火との関連. 月刊地球, **11**, 184-189.
- 村上 亮・西村卓也・藤原 智・飛田幹夫・中川弘之・小田切聡子・小沢慎三郎・鷲谷 威・多田 堯 (2000) 地殻変動解析が明らかにする地震と火山活動の関連性について. 国土地理院時報, **93**, 28-33.
- 中村一明 (1971) 地殻歪の指示者としての火山—火山のテクトニクス例—. 火山, **16**, 63-71.
- 中村一明 (1975) 火山の構造および噴火と地震の関係. 火山, **20**, S229-S240.
- 中村一明・田沢堅太郎 (1974) 1974 年伊豆半島沖地震と三原山小噴火の関係. 火山, **19**, 159-160.
- Nishimura, T., Fujiwara, S., Murakami, M., Tobita, M., Nakagawa, H., Sagiya, T. and Tada, T. (2001) The M6.1 Earthquake triggered by volcanic inflation of Iwate volcano, northern Japan, observed by satellite radar interferometry. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 635-638.
- Nostro, C., Stein, R.S., Cocco, M., Belardinelli, M.E. and Marzocchi, W. (1998) Two-way coupling between Vesuvius eruptions and southern Apennine earthquakes, Italy, by elastic stress transfer. *J. Geophys. Res.*, **103**, 24487-24504.
- 尾池和夫 (1991) 1990 年フィリピン地震前後のフィリピン海プレート沈み込み帯地域における地震活動の変化. 月刊地球, **13**, 650-656.
- 大倉敬宏・安藤雅孝 (1994) 1991 年ピナツボ火山噴火は 1990 年フィリピン地震に引き起こされたか? 地学雑誌, **103**, 464-470.
- 大竹政和・鶴岡 弘 (1992) 固体および海洋潮汐による 1991 年雲仙火山噴火のトリガー作用 地球惑星関連学会 1992 年合同大会共通セッション・シンポジウム予稿集, 132.
- Oura, A., Yoshida, S. and Kudo, K. (1992) Rupture process of the Ito-oki, Japan, earthquake of 1989 July 9 and interpretation as a trigger of volcanic eruption. *Geophys. J. Int.*, **109**, 241-248.
- Rikitake, T. and Sato, R. (1989) Up-squeezing of magma under tectonic stress. *J. Phys. Earth*, **37**, 303-311.
- Sameshima, T. (1953) On the regularity of the activities of Fuji volcanic zone. *J. Geol. Soc. Japan*, **59**, 75-78.
- Shimozuru, D. (1976) Lava lake oscillations and the magma reservoir beneath a volcano. *Bull. Volcanol.*, **39**, 570-580.
- Swanson, D.A., Duffield, W.A. and Fiske, R.S. (1976) Displacement of the south flank of Kilauea Volcano: The result of forceful intrusion of magma into the rift zones. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, **963**, 39p.
- 高橋正樹 (1994) 火山活動と地殻応力場—わが国における研究の現状と今後の課題—. 地学雑誌, **103**, 447-463.
- 種子田定勝 (1948) 本邦の火山について—活動の波及性 (豫察) —. 地質学雑誌, **54**, 1-5.
- 種子田定勝 (1975) 本邦火山の活動の波及性. 九州大学理学部研究報告 (地質), **12**, 101-109.
- Thatcher, W. and Savage, J.C. (1982) Triggering of large earthquakes by magma chamber-inflation, Izu peninsula, Japan. *Geology*, **10**, 637-640.
- Tilling, R.I. and Dvorak, J.J. (1993) Anatomy of a basaltic volcano. *Nature*, **363**, 125-133.
- つじ よしのぶ (1992) 富士山の噴火—万葉集から現代まで—. 築地書館.
- 上杉 陽 (1992) 南関東テフラから見た天変地異. 月刊地球, 号外, **5**, 102-106.
- 上杉 陽 (1993) 富士火山のテフラ層序学的噴火予測. 第四紀研究, **32**, 271-282.
- 上杉 陽 (1998) 地史・富士吉田市史・史料編第一巻, 富士吉田市, 139-399.
- 上杉 陽・米澤 宏 (1987) 伊豆半島北縁平山断層の活動期. 地震 2, **40**, 122-124.
- 山岡耕春 (1994) 地殻応力からみた火山活動と地震との関係—伊豆大島での観測から—. 火山, **39**, 141-153.
- Yamashina, K. and Nakamura, K. (1978) Correlations between tectonic earthquakes and volcanic activity of Izu-Oshima Volcano, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **4**, 233-250.
- 山崎晴雄 (1998) 南関東・伊豆周辺地域の 3000 年前の地殻変動集中期とその成因. 平成 9 年度東京都立大学特定研究費研究成果報告書「南関東の地殻変動活発期とその原因—三千年前に何が起きたか—」(研究代表者: 山崎晴雄), 67-84.
- 横山 泉 (1971) 大地震によって誘発された噴火. 北海道大学地球物理学研究報告, **25**, 129-139.

(2002 年 1 月 8 日受付, 2002 年 3 月 18 日受理)