HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	巨大地震は火山の大噴火を励起するか？
Author(s)	小山, 順二
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 78, 53-68
Issue Date	2015-03-19
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.78.53
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/58249
Type	departmental bulletin paper
File Information	GBHU_78_p53-.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学地球物理学研究報告
Geophysical Bulletin of Hokkaido University, Sapporo, Japan
No. 78, March 2015, pp. 53 － 68
doi : 10. 14943 / gbhu. 78. 53

論説

巨大地震は火山の大噴火を励起するか？

小山　順二
北海道大学大学院理学研究院自然史科学部門

（2015 年 1 月 31 日受理）

Is it true that great earthquakes induce large volcanic eruptions worldwide?

Junji KOYAMA
Division of Natural History of Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

（Received January 31, 2015）

After the 2011 Tohoku-oki megathrust earthquake of Mw 9.0, one of the great concern is whether or not the megathrust earthquake induces large volcanic eruptions and disastrous aftershocks in Japan. There exist 110 active volcanoes in Japan and large eruptions including historical events of each volcano have been compiled in terms of Volcanic Explosivity Index（VEI; Newhall and Self, 1982）from 0（Non-explosive）to 8（Mega-colossal）.

According to "*Volcanoes of the World*" by Siebert et al.（2010）, we could find 50 eruptions in Japan since 600 A.D. classified as VEI 4（Large）and 5～（Very Large）. Speaking about great earthquakes whose earthquake（moment）magnitude M（Mw）is equal to or larger than 8.0, there occurred 34 times since 684 A.D. in Japan.

I have compared the time of occurrences of Large volcanic eruptions and large earthquakes（M>7.5）at first, taking examples of Mt. Fuji, Tokachidake, Hokkaido Komagatake and Sakurajima volcanoes. Since I could not find any systematic correlation between them, I decided to compare all the Large（and Very Large）volcanic eruptions and the great earthquakes（M>8.0）in Japan. In order to develop the quantitative discussion, we need to introduce cross-correlogram analysis（Perkel et al., 1967; Grun, 2009）for these two discrete point-processes.

All that I could find was very poor correlation between great earthquakes and Large volcanic eruptions in Japan. It is true that many papers have been showing us the correlation between large earthquakes and volcanic eruptions. However, speaking about Large eruptions（not speaking about volcanic disasters）, it is not true for the correlation between them. The reason is that some small-scale volcanic activity out of many volcanoes has been activated by great earthquakes almost all the time in the world. Even just after the 2011 Tohoku-oki megathrust, it has been reported that the volcanic activity of about 20 volcanoes in Japan has been enhanced. It is also true that some volcanoes are activated in the present, about 4 years after the megathrust.

The evidences should be added, which are the eruptions of Mt. Fuji in 1707（VEI 5）, 49 days after the 1707 Hoei earthquake of M 8.6 and of Bezymianny in Kamchatka in 1956（VEI 5）, 4 years after the 1952 Kamchatka earthquake of Mw 9.2. Both of the volcanoes have spent

about 900 ～ 1200 years of quiescence in the volcanic activity. All these would suggest that great earthquakes might induce Large volcanic eruptions nearby, however it is totally dependent on its own potential and preparedness to erupt of each volcano and the earthquakes just play a role of a trigger.

Ⅰ．は　じ　め　に

2011 年 3 月 11 日に東北地方太平洋沖にモーメントマグニチュード Mw 9.0 の超巨大地震が発生した．日本の自然災害の歴史では最大級の地震である．高々百年をこえる程度の科学的・定量的な地球物理学観測はこのようなまれにしか発生しない現象には無知であり，地震学はその発生にも背景の理解にも学問的基盤を欠いていた．今また，1896 年明治三陸地震後に 1933 年昭和三陸地震の引続いた地震発生を考え，再び同様な地震活動がくり返すと言う予測がある（例えば，Lay et al., 2011）．これは Kanamori（1971）の沈み込み帯進化の仮説を踏襲したものである．もちろんこのような仮説を今後検証することは重要であることには異論はない．しかし，今までの研究成果を無批判に重ねるだけでは，今後発生するかもしれない大きな余震やその被害対策に対して警鐘を与えることはあっても，科学研究として巨大地震発生の物理やそれに伴う災害の予測を深化させるものではない（小山・都筑，2014）．

また，巨大地震が火山の大噴火を誘発するという主張もある（例えば，Walter and Amelung, 2007；Bebbington and Marzocchi, 2011；藤井，2012；鵜川，2013）．実際，日本に 110 ある活動的な火山のうち 20 の火山が，2011 年東北沖超巨大地震の発生直後に噴煙や火山性地震など，火山周辺での何らかの活動を活発化させた（気象庁；火山噴火予知連絡会会報，2011）．地震と火山噴火の関連性は，古くから数多く指摘されている．深発・中／大・群発地震の様々な地震活動と，火山活動にも地殻変動・噴火を含む多種多様な小規模から大規模までの規模の大きさを問わない活発化との関連性の指摘がある．時間的な前後関係や時間間隔の議論や関連性の統計的な研究などもある．さらに，藤井（2012）によれば，火山噴火の励起メカニズムには，地震による地殻応力の増加または減少，差応力変化があり，瞬時に噴火するものから数年の時間を要するメカニズムも考えられている．このような定量的なモデル評価を持たないメカニズムに基づき，大きな地震が火山噴火を励起した世界中の例を数多くあげ，藤井（2012）は東北沖地震後に日本列島での火山噴火・巨大カルデラ噴火の危険性を指摘している．

2011 年東北地方太平洋沖超巨大地震後，想定外の規模の様々な自然災害の発生を予め指摘することは，災害に強い国土の構築・社会の防災対策上意義のあることである．しかし，従来の地震と火山噴火に関する多くの研究に欠けているのは，関連するとされる地震の規模と火山噴火の規模，さらにそれらの距離的な依存性の議論，そして地震発生後火山活動の顕著な変化や大きな噴火をしなかった，まったく関連を示さなかった数多くの火山が存在したことに関する議論がほとんどないことである．ここでは，上の議論を踏まえて，巨大地震が火山の大噴火を励起するのか，

という問いを再検討してみる．注意しておきたいのは，ここで調べる火山噴火の規模とその噴火によって生じる災害の規模は全く異なる規模評価であり，ここでの議論をそのままで，地震規模と火山災害規模の関係に敷衍することはできない．

Ⅱ．地震の規模・火山噴火の規模とその頻度

地震予知は，いつ・どこで・どれくらいの規模の地震が起きるだろうか，に答えることを目指してきた（例えば，力武，2001）．地震の規模はマグニチュード M で表現される．比較的大きな地震の規模評価には，従来 Gutenberg（1945）が定義した表面波マグニチュード Ms が用いられてきた．これは遠地で観測される周期 20 秒の表面波最大振幅から決定されるマグニチュードで，従来の気象庁マグニチュードも Ms に準拠したものである．周期 20 秒の表面波は波長が 100 km 以下程度で，有限な波長である．Ms ≧ 8 となるような巨大地震の破壊領域はその長さが数百 km にもなる大きな断層破壊である．そこでは震源の大きさが M を決める地震波の波長を有意にこえ，Ms の値が正しく地震の規模を反映しなくなるという欠点があった（Koyama and Shimada, 1985）．近年，その欠点を解消し，M が 7 ～7.5 より小さな地震規模の範囲で Ms と矛盾しないように，M が 8 を超える巨大地震にも適用できるマグニチュードスケールとして，モーメントマグニチュード Mw が導入された．その定義は，地震の全体的規模を表す地震モーメント Mo を用いて

$$\log\ Mo = 1.5\,Mw + 9.1$$

の関係式で評価される（Hanks and Kanamori，1979）．近年，気象庁も 2011 年東北沖超巨大地震のように特に大きな地震に関しては，Mw に対応するマグニチュードを発表している．このように地震評価が新たになされるようになり，Mw ≧ 9.0 となる特に大きな地震を超巨大地震，従来日本周辺でも発生してきた 9.0 ＞ Mw ≧ 8.0 の地震を巨大地震，8.0 ＞ Mw ≧ 7.0 を大地震，7.0 ＞ M ≧ 5.0 を中地震，5.0 ＞ M ≧ 3.0 を小地震，3.0 ＞ M ≧ 1.0 を微小地震，1.0 ＞ M を極微小地震と区別して呼んでいる（小山・都筑，2014）．

火山噴火に関しては，いつ・どこで・どれくらいの規模に加えて，どのような噴火様式でどれほどの噴火継続時間であるかが問われる（例えば，井田，2012）．ここでは火山噴火の素過程の議論に踏み込むものはないから，噴火の規模だけに着目し，その規模評価を近年広く用いられている VEI（Volcanic Explosivity Index；Newhall and Self, 1982）で考えよう．この VEI 評価は気象庁が日本活火山総覧（2013）で，また現行の世界の火山活動に関しては，Smithsonian 研究所 * が，さらに過去の世界中の火山噴火に関しては Siebert et al.（2010）にその評価が記載されている．

VEI 評価は近代的な定量的な観測からも，また歴史的な記録からも火山噴火の規模を評価できるように，火山噴火の際の噴出物体積や噴煙柱の高さなどから 0 から 8 の段階に区分される（Siebert et al.，2010）．知っておかなければならない点は，噴火噴出物には火山灰，火山礫，溶岩流，

*http://www.volcano.si.edu/

火砕流など様々なものがあり，それらの噴出に必要なエネルギーはそれぞれ異なる．したがって，噴出物の体積に依存するVEI評価は，火山噴火の全エネルギーを表すものではない．噴火に伴う既存の山体崩壊，ホットスポットや中央海嶺などの火山から静かに流れ出すマグマの量がどれほど大きくとも，それらはVEI評価に正しく反映されていないし，ましてや火山噴火に起因する人的・経済的な火山災害の大きさを表すものではない．気象庁（2013）では，VEI 1を小規模，VEI 2，VEI 3を中規模，VEI 4以上を大規模噴火と日本語で分類している．ここでは歴史的にも規模の大きな噴火は見逃すことがないように，主にVEI 4以上の噴火について深く考え，規模が比較的小さく数の多いVEI 2以下の噴火に関しては参考とする

このスケールで最大のVEI 8と分類されているYellowstoneカルデラを形成した噴火はYellowstoneホットスポットから供給されたものであるとする考えもあり（Smith et al., 2009），一度の噴火で形成されたカルデラではなく，更新世の繰り返し噴火により形成されたものと理解されている（USGS, 2014）．このような超巨大な噴火は，Supervolcanoの噴火（破局噴火）と呼ばれ，いったん噴火した時に人間社会に及ぼすインパクトが計り知れないくらい大きい（藤井，2012）．破局噴火は近年特に注目され（Mason et al., 2004；Silva, 2014），その噴火メカニズムが研究されている（例えば，Malfait et al., 2014；Caricchi et al., 2014）．日本周辺では，Yellowstoneほどの大規模な噴火は記録されていないが，VEI 7のカルデラ噴火（姶良カルデラ，阿蘇カルデラ，喜界カルデラ）が知られている．

Siebert et al.（2010）の集計をまとめると，全地球規模の災害をもたらすVEI 8程度の破局噴火は約10万年に1回，VEI 7を越えるものだけでも2万年程度に1回発生している．日本では，およそ7300年前の喜界カルデラ噴火で，南九州から四国一帯の縄文人が約1000年間ほど，その生活基盤を失ったとある．藤井（2012）の危惧は，このような稀に起こる想像を越える規模の火山噴火が日本周辺でも過去に発生していること，過去7000年以上にわたりそのような壊滅的な噴火がなく日本の歴史が刻まれていることにあるのかもしれない．日本周辺で調べると，VEI 4以上の大規模な火山噴火はA.D. 600以後50回，Mが8.0以上の巨大地震はA.D. 684年以降34回発生している（宇佐美・他，2013）．

Ⅲ．巨大地震と火山噴火の関連性

地震活動や火山活動が共に活発な日本では，古くから地震と火山噴火の関連性は指摘されている．小山真人（2002）のまとめ[¥]によれば，(1)時間的に近接して発生した地震と噴火した火山を例に関係性を主張するもの，(2)火山噴火のメカニズムを地震による応力場変化から考察したもの，さらに(3)地震に伴う火山活動の変化を近代的な観測に基づき定量的に議論するもの，のように時代的にも変遷してきた．(1)は地震・火山噴火の前か後かやそれらの規模に関係なく，現

[¥]小山真人（2002）にある文献は，直接議論にかかわらない限り重ねて参照しない．

象の同時性のみの比較，(2)は地震による地殻変動から単に地殻応力場の変化と噴火とを関係づけるものである．(3)は近年の豊富な観測結果を定量的に用いた議論をするもの（例えば，Pritchard et al., 2013；Takada and Fukushima, 2013）で広域な応力場を定量的に考えるものである．(1)や(2)に共通して言えることは，地震の規模は問わず，噴火した火山，火山活動が変化した火山だけを，火山活動の変動規模の大小を考慮せずに発生時間の関係性だけを問題視している点である．それは近年でも，2011 年東北沖超巨大地震前後の火山活動の議論でも見られる（例えば，Manga and Brodsky, 2006；Watt et al., 2009；Chesley et al., 2012）．

20 世紀以降，超巨大地震に数えられる地震は世界中で 5 回発生している．古い地震は地震規模の評価に多少の不確定性はあるが，1952 年 Mw 9.2 Kamchatka，1960 年 Mw 9.5 Chile，1964 年 Mw 9.2 Alaska，2004 年 Mw 9.3 Sumatra，2011 年 Mw 9.0 東北沖の各地震である．これらに，1957 年 Mw 8.6 Andreanof（改定前は，Mw 9.1），1965 年 Mw 8.6 Rat Island と 2010 年 Mw 8.8 Maule 地震が考慮されることもある（Koyama et al., 2012）．ここでは，先ずこれらの地震火山活動とその後の火山活動について検証してみる．

3.1 2011 年東北沖超巨大地震後の火山活動

日本での歴史上最大の地震は 1707 年宝永地震（M 8.6）と言われている（宇佐美・他，2013）．地震発生の 49 日後に富士山が大規模噴火（宝永噴火 VEI 5）した．Fig. 1a は，日本周辺の火山（小さな三角）と 1900 年以後何らかの火山活動が知られている火山（ふくらんだ丸）を示す．2011 年東北沖超巨大地震直後，110 ある日本の火山うち 20 の火山が何らかの火山活動を活発化させた（気象庁，2011）．Fig. 1b にそれらを示す．Fig. 2 に Fig. 1b の震源域中心からの距離を横軸に，その距離の 100 km 幅の範囲で火山活動が地震直後に活性化した火山と火山活動に変化がなかった火山の数を示す．これらの図から，(1)震源に最も近い東北地方の火山は地震直後に顕著な活動を示さなかった．(2)北陸や震源から遠い九州・沖縄の火山に活動の変化が見られた．(3)20 世紀以降に活動した多くの火山が活発化したわけではなかった．また，気象庁（2011）によれば，(4)火山活動の変化は高々 2 か月位で終了した．(5)最近の日本列島での火山活動の活発化は顕著なものではあるが，地震後 4 年になろうとする現在でも日本付近でその規模は VEI で 3 程度以下であり，大規模火山噴火は観測されていない．

上の(1)は震源に近く，地殻ひずみの変化が最も大きい地域の火山が最も強い影響を受けて，火山噴火に至るわけではないことを示している．(2)も，地震後の火山活動の活性化は，震源距離に強く依存しているわけではないことを示している．Fig. 2 から，圧倒的に数多くの火山は地震の影響をなんら受けていないことも見て取れる．この点は改めて議論する．(3)から言えることは，上に述べたことが従来から不活発な火山ばかりではなく，近年活動的であった火山でも同様であることである．今後 10 年，20 年，100 年後に大規模噴火するかもしれないが，それはそれはまた別の物理過程・別の因果関係の話である．

富士山の歴史的噴火を詳しく見ると，有史以来大噴火（それに近い規模の噴火）と呼べる噴火は，

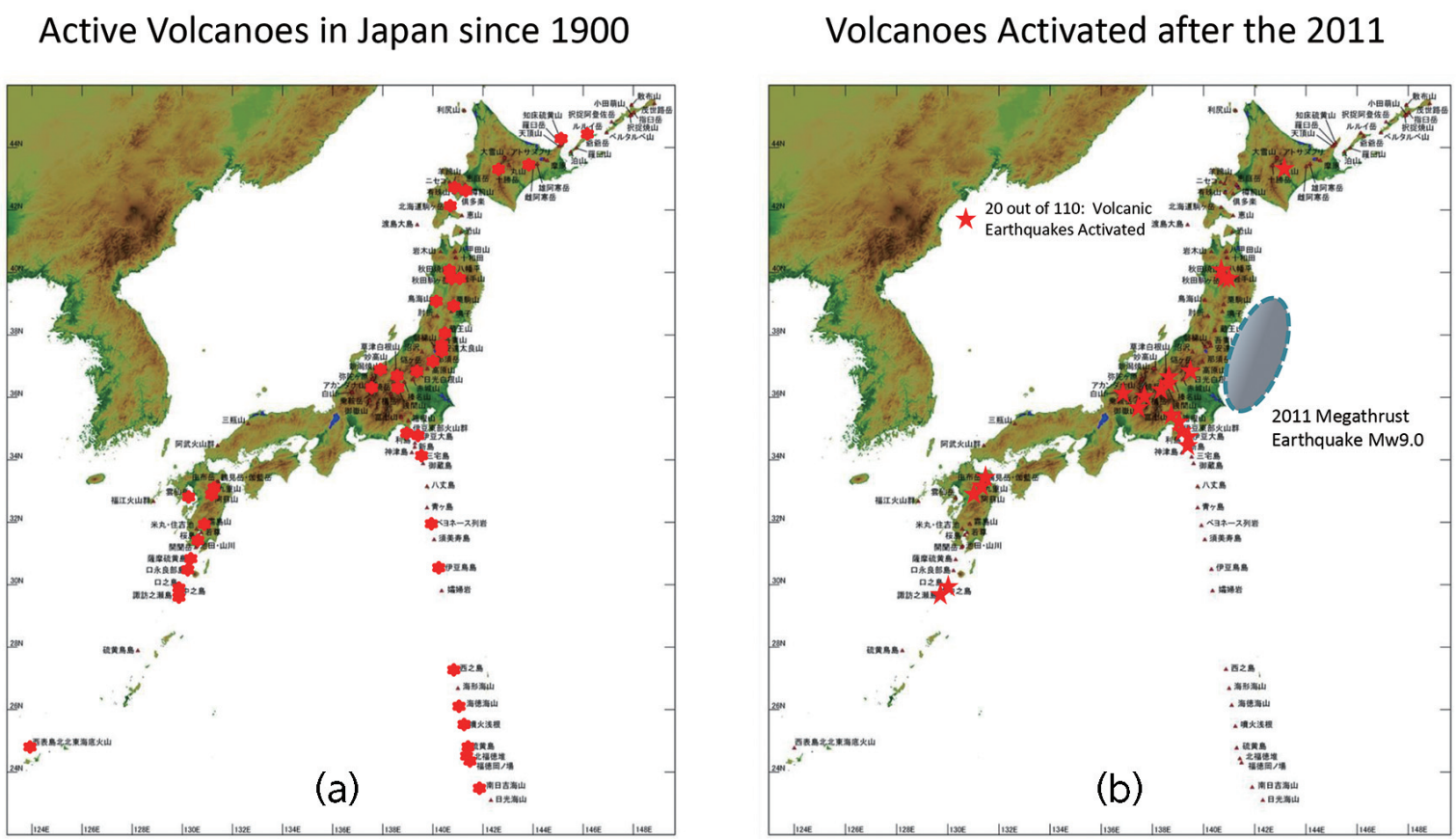

Fig. 1. Left(a): Active volcanoes since 1900 by blow-up red circles in the vicinity of Japan. Small triangles indicate the location of volcanoes which were not active in this period. The name in Kanji (in Japanese) is attached to each symbol. Right(b): Volcanoes activated after the 2011 Tohoku-oki megathrust earthquake of Mw 9.0 are plotted by red star-symbols. The aftershock region of the 2011 Tohoku-oki megathrust earthquake is illustrated by a grey-colored ellipse.

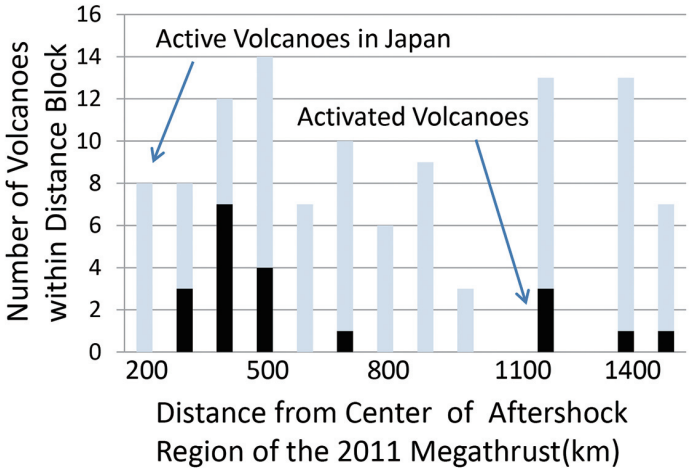

Fig. 2. Number of active volcanoes since 1900 in the vicinity of Japan (by grey bars) and that of activated volcanoes after the 2011 Tohoku-oki megathrust earthquake (by solid bars) within each 100 km-interval from the center of the aftershock region.

800 年 VEI 4，864 年 VEI 3 と 1707 年 VEI 5 の 3 回である（Siebert et al., 2010）．我々はかぐや姫の昔から，富士山は噴火を続けていると勘違いしているが，その記述のほとんどは，噴煙とか地熱とかの小規模な火山活動（つじ，1992）で，大きな噴火を示すものではない．

また，南海トラフ沿いの数ある巨大地震が発生した後に富士山が噴火したとされるのは，上に述べた宝永噴火だけで（鵜川，2013），南海トラフ沿いの巨大地震と富士山や周辺火山では，宝永噴火を除き，地震発生後 5 年以内に発生した大噴火の記録はない．800 年代富士山，伊豆大島，三宅島，神津島，新島の大規模噴火（津久井・他，2006）が 869 年貞観地震（M 8.3；三陸沖）や 887 年仁和地震（M 8.5；南海トラフ）に先行しているが，この地震と噴火の時間の逆関係はその他の日本の大噴火と巨大地震の発生順には見いだせないし，また世界の他の地域では古い巨大地震の発生やその規模評価が不明であるため，検証できない．

3.2 統計処理の有意性とその意味

このような議論をすると，統計処理をしたらどうなるか？との質問を必ずうける．地震の発生と火山の噴火は共に離散過程で，そのままでは 2 つの時系列の相関を調べることはできない．そのようなインパルスからなる離散型時系列の相関を調べるには Cross-correlogram 解析法がある（例えば，Nikolic et al., 2013；Donoghue Lab., 2013）．これは，時間軸を例えば 5 年ごとの期間に区切り，その期間内に発生した地震数を数える．同様に区切られた時間軸で火山噴火の回数を各期間ごとに数え上げる．それら二つの離散的な期間毎の数からなる時系列で，地震発生の特定の期間を基準に，区切られた期間をずらして火山噴火の回数を数え，そのすべてを地震発生の期間で足し合わせ，その総数で表すものである．すべての地震と火山噴火が同期していると，0 から

5 年の期間にだけ特に大きな振幅となり，地震・火山噴火が共に異なり完全にランダムなら，期間区分ごとの回数の振幅は特定の期間だけ特別大きな振幅となることはなく，5 年の期間ごとの噴火回数は適当にランダムなばらばらな振幅となる．もし 2 つの時系列に時間差があり同期したものなら，その時間差に対応した期間区分に特に大きな振幅があらわれる．2 つの時系列に周期性があり時間差があれば，その周期・時間差に対応した大きな回数の振幅があらわれることも同様に理解される．

Fig. 3 は日本で発生した歴史上の大地震（M ＞ 7.5）の発生年を基準に富士山の VEI 3 以上と VEI 2 以上の噴火について，その発生間隔の差を上に述べた Cross-correlogram 解析したものである．計算では，噴火の大きさに重みをつける意味で，噴火を一回二回と数えるのではなく，それぞれの噴火の VEI の値を用いた．Fig. 3 には，噴火回数の振幅に顕著なピークが 2 つみられる．地震発生時に対して火山噴火が＋ 5 年遅れる期間と 85 年噴火が先立つ場合である．前者は 1703 年元禄地震と 1707 年宝永地震が 1707 年宝永噴火に先立つ場合で，後者は 800 年頃の噴火が 887 年五畿七道の地震に，宝永噴火が 1793 年陸前・磐城の地震に先立つ場合である．しかし，864 年頃の大規模な噴火に近接する地震は 869 年貞観地震だけである．しかし，それは大きな相関を示してはいない．つまりこのように時系列の相関関係だけからは時間的な関係を議論することはできても，空間的な因果律を特定することは難しいこと示し，物理的な因果律を特定できないことを示している．Fig. 3 で考えている地震火山活動が 1707 年で終わっているのは，1707 年宝永噴火以後，富士山では VEI 2 以上の噴火はないからである．

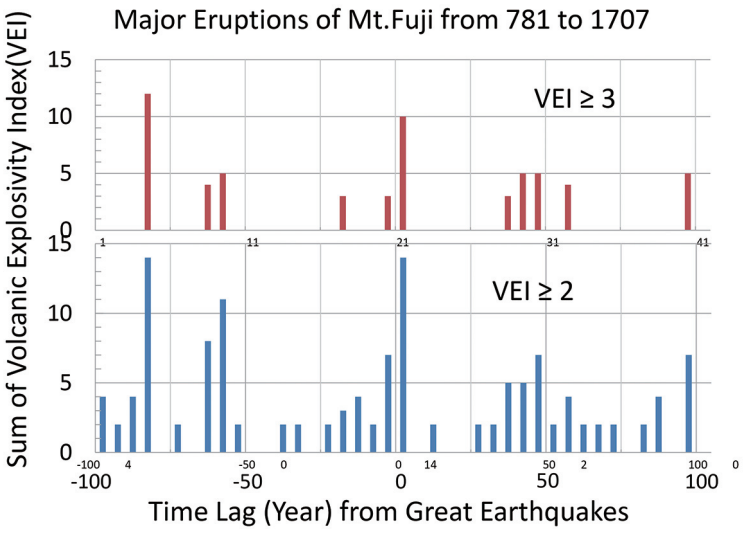

Fig. 3. Cross-correlogram of the number of volcanic eruptions of Mt. Fuji weighted by corresponding each VEI value as a function delay time lag (year) from large earthquakes (M>7.5) in Japan. Upper trace is for eruptions equal to or larger than VEI 3 and Lower for all eruptions equal to or larger than VEI 2. There is no volcanic eruption eruptions equal to or larger than VEI 2 in Mt.Fuji since after 1707.

3.3 1952 年 Kamchatka 地震後の火山活動

§ 3.1 で述べたことは，そのまま Kamchatka 半島でも同様で 1952 年 Kamchatka 地震後 5 年以内に火山活動が活発化（VEI ≧ 2）したのは半島内に 114 ある火山（そのうち 3 火山は名前が付けられていない）のうち 6 火山であった（Fig. 4）．Zhupanovsky（1956 VEI 2），Kamrymsky（1952 から VEI 2），M Semiachik（1952 VEI 2），Tolbachik（1954 から VEI 2），Bezymianny（1955 から VEI 5），Kliuchevskoi（1953 から VEI 2）である．図を見ればわかるように，それらは震源域の北方に離れて分布し，1952 年 Kamchatka 地震の震源域に近い火山ではなかった．Fig. 4 には，Fig. 1 と同様に，20 世紀以降に何んらかの火山活動を示した火山，噴火後に活動した上の 6 火山，1952 年 Kamchatka 地震の震源域を示す．活動的であった火山が，震源域に近い火山が噴火したわけではないことが一目で理解される．特筆すべきは地震後 3 年で噴火した Bezymianny 火山である．規模も VEI 5 と大規模噴火であった．この火山の 1955 年以前の大噴火は 950 年頃とされている．火山活動が見られなかった期間が約 1000 年間あったことになる．

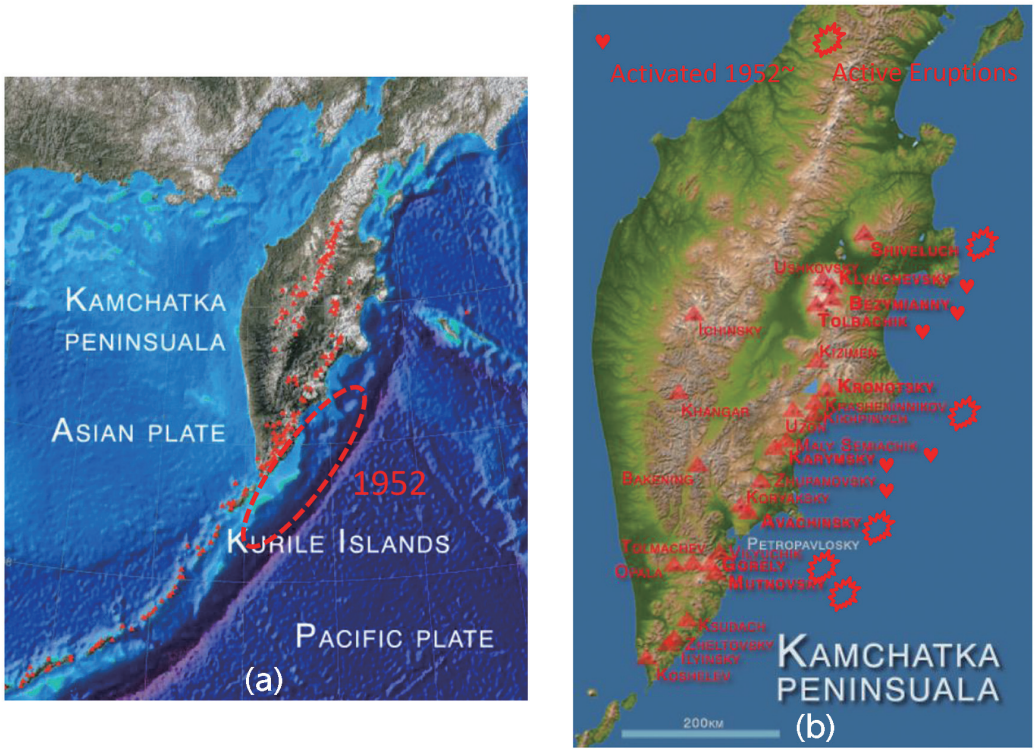

Fig. 4. Left (a): Volcanoes in the Kamchatka peninsula and the Kurile Islands (indicated by red small triangles). Aftershock area of the 1952 Kamchatka earthquake of Mw 9.1 is illustrated by a broken ellipse.
Right (b): Active volcanoes since 1900 are marked by fire symbols and six volcanoes activated within five years after the 1952 Kamchatka earthquake are by heart-shaped symbols. Bezymianny volcano which registered the eruption of VEI 5 locates in the northern part of the volcanic range.

3.4　1960 年・2010 年チリ地震後の火山噴火活動

2010 年に発生した Chile（Maule）地震 Mw 8.8 の 1 年 3 カ月後，2011 年 6 月 Puyehue-Cordon Caulle 火山群の Cordon Caulle 火山が噴火した．一連の噴火で VEI 5 の大規模噴火を記録している．この噴火活動で，南半球上空に火山灰をまき散らし，メルボルンでの IUGG 総会で 2011 年東北地方太平洋沖超巨大地震の研究発表に出かける人々を困らせた．この火山は 1960 年 Chile 地震 Mw 9.5 の後にも VEI 3 の噴火をし，巨大地震が火山噴火を励起した例としてあげられる．

チリ・ボリビア・アルゼンチン周辺の沈み込み帯には，127 の火山が知られている（Siebert et al., 2010）．Fig. 5 にその一部と近年活発な活動をしている火山の名前と共に図示した．Puyehue-Cordon Caulle 火山は 1960 年 Chile 地震の震源域中央に位置するが，2010 年 Maule 地震の震源地からは 400 km 程度離れている．噴火の規模はそれぞれ VEI 3 と VEI 5 であるから，地震と火山の距離が短いから，噴火規模が大きいわけではない．この図には，規模の小さな VEI 2 や VEI 1 の噴火をした火山も示してある．小山真人（2002）を参考に Darwin が航海の途中で見聞きしたと言われる 19 世紀前半の火山噴火も記した．1960 年・2010 年ともに，必ずしも震源近くの火山噴火を励起しているわけではないのが見て取れる．Cordon Caulle 火山の噴火は，18・19 世紀に各 1 回，20 世紀に 8 回の噴火が記録されているが，1921 年 12 月の噴火が大きく，VEI 3 であった．その後 1922 年 11 月に M 8.5 の巨大地震が Chile・Argentina 国境で発生している．特に大規模な噴火では 860 年前後にまでさかのぼり（Siebert et al., 2010），Puyehue 火山が VEI 5 の大規模噴火を記録している．この頃（9 世紀）の地震の歴史記録はない．このように巨大噴火だけを取り出して考えれば，2011 年と同規模の噴火は約 1150 年前後の時間間隔があることになる．

3.5　2004 年 Sumatra 地震後の火山噴火活動

Fig. 6 に 2004 年 Sumatra 超巨大地震 Mw 9.3 以後の巨大地震の余震域と，活発化した火山を示す．ほとんどの噴火はその規模が VEI 2 以下の規模である．特筆すべき噴火活動をあげると，Sumatra 島北部にある Sinabung 火山は噴火規模こそ VEI 2 であるが，2004 年 Sumatra 地震以前に噴火の記録はなく，Sumatra 地震が強く影響していると考えられる（吉本充宏私信，2014）．Marapi 火山は Sumatra 地震以前から，規模が VEI 1，2 程度の噴火を 18 世紀から多数発生している（Siebert et al., 2010）．Krakatau 火山も 1883 年の大爆発・噴火（VEI 6）以後，20 世紀に 37 回の噴火を記録している．そのうち最大規模は 1932 年と 1938 年の VEI 3 である．

Fig. 6 の範囲にはないが，Java 島東部にある Kelud 火山（Kelut）は，1586 年 VEI 5 の大規模噴火の後，1826，1919，1957，1966，1990，2014 年と VEI 4 の大噴火を 6 回繰り返している．2014 年の噴火をのぞき，これら過去の噴火と時間的に近接した巨大噴火との関係は見られない．この火山は一番近い 2007 年 Bungkulu 地震の震源域から 1200 km 以上離れていて，Sumatra 島南東部や Java 島には数多くの活動的な火山が存在している．それらが Fig. 6 に図示した複数の地震後に大噴火したわけではない．

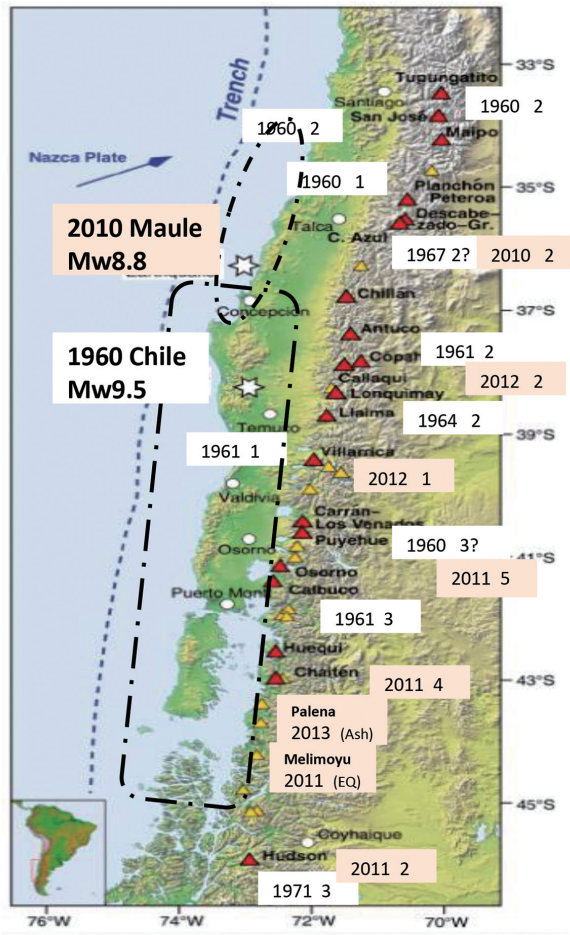

Fig. 5. Volcanoes with the name of each mountain near the Chile-Bolivia-Argentina border are located by red triangles. Volcanoes with yellow triangles have little records of eruptions. Volcanoes which erupted after the 1960 Chile earthquake are indicated by the year of eruption with VEI value in open box, those after the 2010 Maule earthquake are the same in shaded box. Epicenter and aftershock area of both earthquakes are shown by stars and illustrated by dot-dashed curves. Dotted line with Trench indicates the Chilean trench.

3.6 1964 年 Alaska 地震後の火山活動

1957 年 Andreanof 地震以後から 1964 年 Alaska 地震後 30 年間までに Alaska 半島周辺で発生した大噴火は，1974 年 Augustine 火山（VEI 4）と 1992 年 Spurr 火山（VEI 4）だけである．その間 Aleutian 列島周辺では VEI 3 の火山噴火が 10 か所ある．名前のない火山も含めてこの地域には 84 の火山があるが，1965 年 Rat Island 地震の震源域を含むその西側には活発な火山はない．これは太平洋プレートがこの地域で斜め衝突しているためである[6]．したがって，ほとんどの噴火は 1957 年 Andreanof 地震の震源域付近の島々で起こり，地震発生に時間的に一番近い噴火は 1960

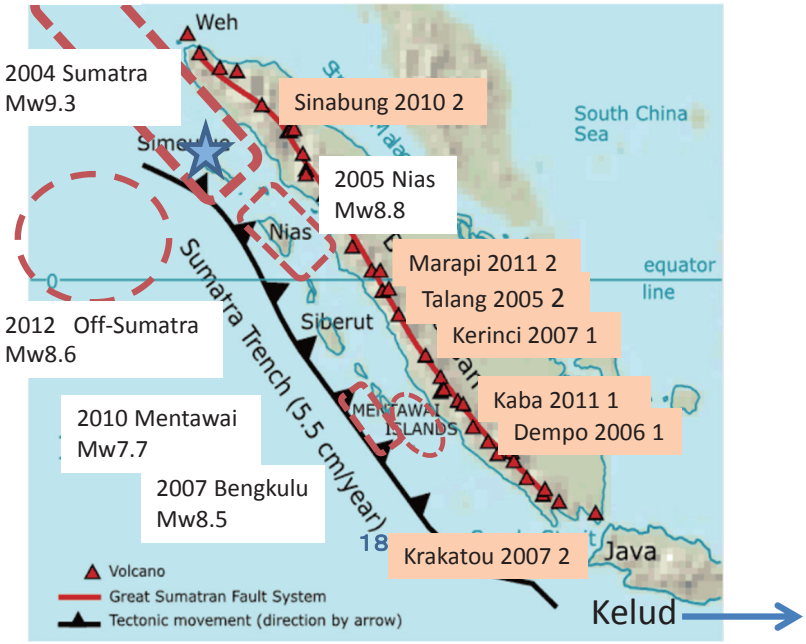

Fig. 6. Volcanoes in the Sumatra Island are shown by triangles on the curve of the Sumatra great fault. Volcanoes which erupted after 2004 are attached by the name of volcano and the year of eruption with each VEI value. Aftershock areas of the 2004 Sumatra earthquake of Mw 9.3 (with epicenter by a shaded star), the 2005 Nias earthquake of Mw 8.8, the 2007 Bengkulu earthquake of Mw 8.5, the 2010 Mentawai earthquake of Mw 7.7 and the 2012 Off-Sumatra earthquake of Mw 8.6 are illustrated by broken curves.

年 Okmok 火山噴火 VEI 3 であった．Alaska 半島周辺に数多くの火山が存在し，Trident 火山・Redoubt 火山の VEI 3 の噴火を考慮しても，1957 年からの 37 年間に発生した Alaska・Aleutian 列島周辺での巨大地震後に上の 2 例をのぞき VEI 4 をこえるような特に大規模噴火が誘発されたとは言えない．

Ⅳ．巨大地震後の大規模火山噴火

火山の活動は人間の歴史が及ぶ長さをはるかに超える悠久の時間経過をたどっている．有限な時間の長さで生きている我々は，したがって，個々の火山の活動史を完全に理解することは決してできない．ある物理現象の長時間平均は，多くの実現可能な部分的な時間の長さの現象から求めた性質の平均値に等しいとする，エルゴード性の考えがある．このような立場に立ち，本研究では，世界中の巨大地震と火山の大規模噴火の時間的・空間的関連性を調べてみた．

2011 年東北地方太平洋沖超巨大地震後に，20 か所にも及ぶ日本周辺の火山が何らかの火山活

[d]同様な火山活動とプレート運動の関係は Nicobar・Andaman 諸島付近にもみられる．

変化を示したことは良く周知されている．霧島新燃岳や西ノ島新島，今また地震後 4 年近くを経過し，御嶽山の，阿蘇・桜島火山の噴火活動が活発化している．このような活動は，ここで調べたように，いずれの巨大地震の後にも見出せる火山活動の変化であり，1) 規模の比較的小さな火山噴火であり，2) 震源域に距離的に近い火山に限らない，いわば地震と火山の強い距離依存性が見いだせないような，しかし時間的には近接した活動である．これは地震による直接的な応力変化が火山噴火を誘発するのではなく，地震動が長い時間火山体をゆらすことによる（Linde et al., 1994）影響かも知れない．

もちろん，1707 年富士山宝永噴火，1955 年 Bezymianny 火山，また 2011 年 Puyehue-Cordón Caulle の噴火のように，地震後に非常に大規模な火山噴火活動を誘発したと思われる巨大地震もある．これらは震源域に近い噴火もあるし，遠く離れた噴火活動もある．ただ，共通していることは，それぞれの火山で先立つ大規模噴火をたどれば，約 900 年から 1200 年程度の時間間隔が存在することである．それぞれの火山で，噴火のエネルギーが十分蓄えられ，地震により誘発された噴火が大規模に発展したものと考えられる．数多く存在する周辺の火山が噴火に至らなかったのは，噴火に至るエネルギーの蓄積が足りなかったからである．

数ある火山の中には，周辺域に大地震の発生がなくとも，大噴火を起こす火山が沢山あることである．これは前に述べた大噴火に至るにはエネルギーの長年にわたる蓄積が火山独自に必要であることと等価である．このように考えれば，火山噴火にも，定常的なプレート運動によるひずみエネルギーの蓄積で発生する地震の発生過程で Shimazaki & Nakata（1980）が考えた，時間予測モデル（Time Predictable Model）やすべり量予測モデル（Slip Predictable Model）を考えることができるのではないだろうか．火山の場合ではそれぞれ噴火時期，噴火規模にあたるものだろう．その考えが単純に応用できないのは，火山噴火の場合，1) 噴火様式と噴火の継続時間の予測もどうしても必要な予測項目になる，2) 破局噴火のような大規模な火山活動には長期間の準備過程が先行すると考えられているが（Malfait et al., 2014；Caricchi et al., 2014），噴火規模が小さくなるにつれ，噴火のエネルギー蓄積が，噴火直前に急激に行われるのか，主たる蓄積が火山体の深い場所で進行し，地表近くでの観測ではその変動の検出が難しくなるからである．

マグマや噴火エネルギーの蓄積過程を個々の火山で知ることは急務の重要性を持っている．しかし，火山監視の観測体制がそれなりに整っている日本の火山は数が限られているのも現実である．今後の観測体制を強化するにしても，個々の火山の数値解析にたえる定量的な内部構造モデル，地殻変動モデルを考慮する必要がある．また，Kelud 火山でも指摘したが，大噴火が短い時間間隔で頻発する火山，1000 年にも及ぶ静穏期を経て初めて大規模噴火をする火山，と定常的な噴火エネルギーの蓄積による予測には無理がある火山活動現象も見受けられる．我々は，そこにも検証可能な火山噴火の物理モデルが必要であると考えるから，このようなエネルギー解放の本質的な違いを定量的に明らかにすることが先ず必要と考えている．

我々は，火山噴火予知，その観測体制の整備を叫び，いたずらに来たるべき次の大噴火の性質を論じるのではなく，その性質を科学的に定量的に噴火の物理モデルで議論すべきであると考えてい

る．2000 年有珠山の噴火は前兆現象とみられる有感地震が引き続き発生し，噴火が近いことを示唆していた．それは，その前の 1977 年の噴火でも同様の前震活動があったからである．2000 年の噴火では，そのような経緯を記憶している我々世代が居り，火山観測に直接関係していない者でも，これは噴火するに違いないと判断し独自の観測を準備した（小山・他，2002；Yamamoto et al., 2002）．2000 年の場合は，火山噴火予知研究から科学的な噴火の時期や噴火の規模，噴火の継続時間が予め予測されたものではなかった．2000 年の三宅島噴火でも活発な前震活動や周辺海底での噴火活動から，住民の避難指示がなされたのが現状で，火山噴火の科学的な予測（時期，規模，継続時間）があってのことではない．近隣住民の避難が噴火前に行われたことは事実ではあるが，この 2 例を持って火山噴火予知に成功したとするのは（例えば，井田，2012）科学的に妥当なものかはわからない．卑近な例では，この二つの火山噴火以後，日本では同程度の規模の噴火が，諏訪瀬島 2 回，喜界島 3 回，浅間山・鳥島が各 1 回の計 7 回ある．そのうちいずれも避難勧告・指示がなされたとは聞き及んでいない．もちろん去年 2014 年に噴火した御嶽山の戦後最大の人的な被害を予測するものでもなかった．

火山噴火災害の軽減のためにそれぞれの火山で災害規模を予測するハザードマップが作成されている（http://vivaweb2.bosai.go.jp/v-hazard/HMlist.html）．これはそれぞれの火山で様々な噴火形態を想定した場合の予測であり，実際にどのような噴火がいつ予測されるかの具体性がないために，御嶽山の災害が明瞭に示しているように，それが有効に活用されているとは思えない．個々の火山で定量的な噴火予測が，その物理モデルが構築されていないから，せっかくのハザードマップも現実的な利用価値が認識されていないのだろう．

謝辞　本研究は 2013 年 8 月の桜島噴火の新聞記事をベッドの上で読んだことに始まる．大規模噴火で噴煙高は今までの最高であるとあった．この噴火が本当に 2011 年東北沖超巨大地震によるものだろうかを先ず疑った．論文にまとめる機会を可能にしてくれた恵佑会札幌病院の医師・看護師の皆さんに深く感謝いたします．著者は火山噴火研究には全く関与していない．そういう立場だからこそ，火山の噴火規模と火山災害・経済的人的損失の規模とは全く違う，と主張することが許されると考えている．それでも昨年末の御岳山噴火で犠牲になった人々を心深く痛み，それが故にも文中に多くあるだろう逸脱や誤謬を恐れるものである．

文献

Bebbington, M.S. and W. Marzocchi, 2011, Stochastic models for earthquake triggering of volcanic eruptions, *J. Geophys. Res.*, **116**, B05204, doi:10.1029/2010JB008114.

Caricchi, L., C. Annen, J. Blundy, G. Simpson and V. Pinel, 2014, Frequency and magnitude of volcanic eruptions controlled by magma injection and buoyancy, *Nature Geosci.*, **7**, 126-130.

Chesley, C., P.C. LaFemina, C. Puska and D. Kobayashi, 2012, The 1707 Mw 8.7 Hoei earthquake triggered the largest historical eruption of Mt Fuji, *Geophys. Res. Let.*, **39**, L24309, doi:10.1029/2012GL053868.

Donoghue Lab., 2013, Cross-correlograms tutorial, http://donoghue.neuro.brown.edu/library/CCH3.htm

Grün, S., 2009, Data-driven significance estimation for precise spike correlation, *J. Neurophysiol.*, **101**, 1126-1140.

Gutenberg, B., 1945, Amplitudes of surface waves and magnitudes of shallow earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **35**, 3-12.

藤井敏嗣，2012，大地震は火山噴火を誘発する !?，NHK そなえる防災｜コラム，http://www.nhk.or.jp/sonae/column/20120622.html

Hanks, T. and H. Kanamori, 1979, A moment magnitude scale, *J. Geophys. Res.*, **84**, 2348-2350.

井田喜明，2012，地震予知と噴火予知，ちくま学芸文庫，pp.253.

Kanamori, H., 1971, Seismological evidence for a lithospheric normal faulting; the Sanriku earthquake of 1933, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **4**, 289-300.

気象庁，2011，火山噴火予知連絡会会報，**108.**

気象庁，2013，日本活火山総覧（第 4 版），pp.1497.

Koyama, J. and N. Shimada, 1985, Physical basis of earthquake magnitudes: An extreme value of seismic amplitudes from incoherent fracture of random fault patches, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **40**, 301-308.

小山順二・都筑基博，2014，超巨大地震発生前後の顕著な地震活動，地震 II，**66**，83-95.

Koyama, J., K. Yoshizawa, K. Yomogida and M. Tsuzuki, 2012, Variability of megathrust earthquakes in the world revealed by the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Earth Planets Space*, **64**, 1189-1198.

小山順二・蓬田清・森谷武男・高田真秀・一柳昌義・古屋正人，2002，2000 年有珠山噴火活動の時定数，火山，**47**，587-594.

小山真人，2002，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，地学雑誌，**111**，222-232.

Lay, T., C.J. Ammon, H. Kanamori, M.J. Kim and L. Xue, 2011, Outer trench-slope faulting and the 2011 Mw 9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, **63**, 713-718.

Linde, A.T., I.S. Sacks, M.J.S. Johnston, D.P. Hill and R.G. Bilham, 1994, Increased pressure from rising bubbles as a mechanism for remotely triggered seismicity, *Nature*, **371**, 408-410.

Maison B.G., D.M. Pyle and C. Oppenheimer, 2004, The size and frequency of the largest explosive eruptions on Earth, *Bull. Volcanol.*, **66**, 735-748.

Malfait, W.J., R. Seifert, S. Petitgirard, J.P. Perrillat, M. Mezouar, T. Ota, E. Nakamura, P. Lerch and C.S. Valle, 2014, Supervolcano eruptions driven by melt buoyancy in large silicic magma chambers, *Nature Geosci.*, **7**, 122-125.

Manga, M. and E. Brodsky, 2006, Seismic triggering of eruptions in the far field: Volcanoes and geysers, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **34**, 263-291.

Newhall, C.G. and S. Self, 1982, The volcanic explosivity index (VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism, *J. Geophys. Res.*, **87**, 1231-1238.

Nikolic, D., R.C. Muresan, W. Feng and W. Singer, 2013, Scaled correlation analysis : A better way to compute a cross-correlogram, *Europ. J. Neurosci.*, **35**, 742-762.

Perkel, D.H., G.L. Gerstein and G.P. Moore, 1967, Neuronal spike trains and stochastic point processes I. The single spike train, *Biophysical J.*, **7**, 391-418.

Pritchard, M.E., J.A. Jay, F. Aron, S.T. Henderson and L.E. Lara, 2013, Subsidence at southern Andes volcanoes induced by the 2010 Maule, Chile earthquake, *Nature Geosci.*, **6**, 632-636.

力武常次，2001，地震予知：発展と展望，日本専門図書，pp.617.

Siebert, L., T. Simkin and P. Kimberly, 2010, *Volcanoes of the world* (Third Edition), Smithsonian Inst./Univ. California Press, Berkeley, pp.551.

Shimazaki, K. and T. Nakata, 1980, Time-predictable recurrence model for large earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, **7**, 279-282.

Silva, S., 2014, Arc magmatism, calderas, and supervolcanoes, *Geology*, **36**, 671-672.

Smith, R.B., M. Jordan, B. Steinberger, C. Puskas, M. Christine, J. Farrell, G. Waite, S. Husen, W.L. Chang and R. O'Connell, 2009, Geodynamics of the Yellowstone hotspot and mantle plume: Seismic and GPS imaging, kinematics and mantle flow, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **188**, 26-56.

Takada, Y. and Y. Fukushima, 2013, Volcanic subsidence triggered by the 2011 Tohoku earthquake in Japan, *Nature Geosci*., Pub. Online, DOI：10.1038/NGEO1857.

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，pp.261.

津久井雅志・斎藤公一・滝林幸一郎，2006，伊豆諸島における９世紀の活発な噴火活動についてーテフラと歴史資料による層序の改定，火山，**51**，327-338.

鵜川元雄，2013，大地震と噴火の連動性について，地震ジャーナル，**55**，13-25.

宇佐美龍夫・石井寿・今村隆正・武村雅之・松浦律子，2013，日本被害地震総覧　599-2012，東京大学出版会，pp.694.

USGS, 2014, Volcano Hazard Program, Yellowstone Volcano Observatory, http：//volcanoes.usgs.gov/volcanoes/yellowstone/yellowstone_geo_hist_52.html

Walter, T.R. and F. Amelung, 2007, Volcanic eruptions following M≧9 megathrust earthquakes：Implications for the Sumatra-Andaman volcanoes, *Geology*, **35**, 539-542.

Watt, S.F.L., D.M. Pyle and T.A. Mather, 2009, The influence of great earthquakes on volcanic eruption rate along the Chilean subduction zone, *Earth Planet. Sci. Let*., **277**, 399-407.

Yamamoto, M., H. Kawakatsu, K. Yomogida and J. Koyama, 2002, Long-period（12sec）volcanic tremor observed at Usu 2000 eruption：Seismological detection of a deep magma plumbing system, *Geophys. Res. Let*., **29**, 10.1029/ 2001GL013996.