

巨大地震により火山活動が長期的に活性化される可能性について

Possible interaction between mega-earthquake and long term volcanic activity

*高橋 栄一¹*Eiichi Takahashi¹

1.東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

1.Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science and Technology, Tokyo Institute of Technology

2011年3月11日に発生したM9東北地方太平洋沖地震の結果、日本列島にかかる強い水平圧縮がほとんど取り去られ、一部地域は引張場に移行した。その結果地殻内のマグマ移動は容易となったと考えられるため、日本列島全体で休眠中の火山が活動を再開するなど火山活動の長期にわたる活発化が懸念される。地震と火山活動の関係としては地震発生から数時間～数か月の近接された活動例が従来注目されてきたが、地殻応力場の変化に火山が応答するメカニズムからは数年～数10年の長い時間間隔を経た相互作用を考慮する必要がある（高橋2012、連合大会）。

巨大地震により広域的に且つ長期的に火山活動が活発化した例としては、17世紀の中盤に開始した北海道駒ヶ岳〔1640年～〕、有珠〔1663年～〕、樽前〔1667年～〕の火山活動がある。これら3火山の17世紀から現在に至る火山活動は1618年に北海道東方沖で起きたM9地震により励起された可能性が極めて高い。本セッションでは、この因果関係について中川（本セッション）と佐竹（本セッション）の講演でなされる予定である。2011年の東北地方太平洋沖地震の1100年前に起きた貞観地震（西暦869年）後の鳥海火山噴火（871年）、十和田-a噴火（915年）も巨大地震による励起噴火である可能性が考えられる。

日本列島の第4紀火山の多くは噴火間隔が数100年以上あるため、火道や浅部にあるマグマだまりは冷却され結晶度が高いマッシュ状態にあるものが多い（竹内、本セッション）。地震から火山活動活発化までに要する時間は、それぞれの火山の地下マグマ供給系の熱的状态に応じて数年から数10年の幅があるものと考えられる。数千年に渡って休眠していた北海道駒ヶ岳、有珠、樽前、十和田においては、地震後から噴火が起こるまでに30～50年の時間間隔が必要だった。これはマントルから注入した玄武岩マグマが半ば固化した火道を温めたり、マグマだまりの温度を上げてマグマの粘性を下げたりするのに時間を要するからであろう。反対に鳥海火山のように玄武岩マグマがそのまま噴火した例では時間間隔は2年と短かった。

3.11地震後の影響で地殻応力場が変化した日本列島においては、これまで休眠中であった火山がマントルからのマグマ注入を受けて活動に向かっている可能性がある。それぞれの火山における地下のマグマ供給系がいかなる状態にあって、今後どのような時間内にいかなる噴火を起こす可能性があるかを学際的に検討することが必要である。本セッションは2014年度から東大地震研究所特定研究課題に採択された「巨大地震が励起する火山活動の活性化過程の研究」（世話人代表：高橋栄一・栗田敬）を母体としている。この研究課題では、我が国の火山活動の予測に資するため、それぞれの火山のマグマ供給系の実態解明を目指す。火山物理、火山化学、火山地質学、岩石学、地震トモグラフィー、MT観測など多方面の研究者の参加を広く呼びかけた。日本列島の火山活動の長期的な推移を予測するためには、それぞれの火山のマグマ供給系の実態をできる限り正確に把握し、火山体深部で起きている噴火の予備的過程を正確に読み取ることが重要である。

キーワード：巨大地震、長期的火山活動、火山深部構造

Keywords: mega earthquake, long term volcanic activity, deep structure of volcano

東日本、中部日本における9世紀の噴火・地震集中について

Simultaneous Eruptions and Earthquakes in the 9th Century, in the East and Central Japan*津久井 雅志¹*Masashi TSUKUI¹

1. 千葉大学大学院理学研究科地球科学コース

1. Department of Earth Sciences, Graduate School of Science, Chiba University

9世紀の巨大地震と火山活動の概要

歴史時代の文献記録をまとめると、9世紀、15世紀末～16世紀、17世紀半、18世紀後半の噴火集中、19世紀半ばの地震・噴火などに「活動の集中期」があるように見える。ただし、発現のしかたは一様ではなく、時代ごとに違いが見られる。発表者は、9世紀の東日本～中部日本の地震・噴火活動を、2011年東北地方太平洋沖地震前に、地質、考古、文献に基づき以下のようにまとめた（津久井ほか、2007（地球惑星関連合同大会）；津久井ほか、2008（火山））。

1) 富士山（800AD延暦噴火、838～864AD頃、864AD貞観噴火）・伊豆弧（伊豆大島（838ADころ～886ADにN3, N2, N1の3噴火）、新島（857ADころ、886ADの2噴火）、神津島（838AD）、三宅島、832AD?, 850ADころ山頂噴火→山腹割れ目噴火の2噴火）の火山活動が極めて活発であり、鳥海山（810～823AD, 871AD）、新潟焼山（887AD?）でも噴火があった。

2) 日本海東縁沿い（秋田平野（830AD）、庄内平野（850AD）、越後平野（863AD））、糸魚川 - 静岡構造線活断層系中～北部（841ADないし762AD）、長野盆地西縁（887AD）?、関東内陸（818AD）、北伊豆（841AD）、伊勢原（878AD）、南海トラフ（887AD）および東北沖（869AD, 貞観地震）などで規模の大きな地震活動があった。

3) 20世紀後半以降、9世紀の地変と重なる地域で地震・噴火が起きている、

アムールプレートの東進が駆動力か？

地震・噴火集中の直接的な原因は明らかではないが、連動したと考えられる噴火・地震はアムールプレートの境界に沿って800kmに及ぶ。大局的にはアムールプレートの東進（東日本に対して2cm/yr）による東西圧縮（石橋、1995、地質ニュース）に起因していると理解できる。日本海東縁ではアムールプレートは東日本（オホーツクプレートないし北米プレート）に対して沈み込み、糸魚川 - 静岡構造線活断層系北部では東日本がアムールプレートに対し衝上する。一方、南海トラフではアムールプレートはフィリピン海プレートに沈み込まれる。その間にある糸魚川 - 静岡構造線活断層系中部は、左横ずれ成分を持ちながらアムールプレートを断ち切って沈み込み方向転換をする役割を担っている。9世紀の地震のうち起震断層を推定できたものは、東西圧縮と調和的な逆断層成分、横ずれ成分を持っている。このような条件下で固有の再来間隔が百数十年（南海トラフ）から千年以上（内陸地震）であるそれぞれの起震活断層が、短い期間に相次いで変位したのであろう。

地震と火山活動の関連についての視点からみると、巨大地震のあとに火山活動が活発になった例は、869AD貞観東北沖地震のあとの871AD（貞観十三年）鳥海山噴火や、887AD仁和南海トラフ地震・長野盆地西縁断層地震直後?の新潟焼山噴火が挙げられ、これに915AD十和田を含めることができるかもしれないが、必ずしも巨大地震の後に一斉に火山活動が活発になるわけではない。伊豆諸島の噴火や864AD富士山貞観噴火は貞観東北沖地震や仁和南海トラフ地震に先立って噴火しているように見えるので、9世紀の場合は、巨大地震で圧縮応力が開放されてマグマの上昇が容易になる、というモデルで統一的に説明することは難しい。

20世紀後半以降の地震・噴火

20世紀後半には伊豆諸島（三宅島（1962AD, 1983AD, 2000AD（大規模貫入と2500年ぶり山頂カルデラ形成））、伊豆大島（1986AD（560年ぶり山腹割れ目噴火））、伊東沖噴火（1989AD（有史初めて））の噴火、日本海東縁沿い（新潟（1964AD, M7.5）、日本海中部（1983AD, M7.7）、北海道南西沖（1993AD, M7.8）、新潟県中越（2004AD, M6.8）、能登半島（2007AD, M6.9）、新潟県中越沖（2007AD, M6.8））で地震があり、9世紀との類似性を指摘していた（津久井ほか2007, 2008前出）ところ、2011年3月11日に9世紀の貞観地震とよく似た東北地方太平洋沖地震（M9.0）、翌日に長野盆地西縁断層北東延長で長野県北部地震（M6.7）、2014ADに糸魚川 - 静岡構造線活断層系北部で長野県神城断層地震（M6.7）が発生した。改めて9世紀の地変との類似性を意識して検討すべきである、と考えるに至った。しかし、9世紀の伊豆諸島の噴火ではマグマの頭位が高かったのに

北海道における慶長三陸沖地震（1611年）の火山活動への影響

The effect of the 1611 Sanrikuoki earthquake on volcanic activity in Hokkaido, Japan

*中川 光弘¹*Mitsuhiro Nakagawa¹

1.北海道大学大学院理学研究院自然史科学部門地球惑星システム科学講座

1.Department of Natural History of Science, Faculty of Science, Hokkaido University

数千年に及ぶ噴火活動休止期の後、南西北海道の3火山（北海道駒ヶ岳、有珠山および樽前山）は、西暦1640～1667年にかけてVEI=5の大噴火を起こし、噴火活動期に入った。この3火山の噴火活動の再開については、その約30年前に起こった慶長三陸沖地震（西暦1611年）の影響が指摘されている。特にその震源域については、三陸沖だけではなく北海道十勝～色丹沖まで連動していた可能性が指摘されており、地震による影響が北海道南西部に及んだ可能性は十分に考えられるが、一方で摩周や雌阿寒などの北海道東部の火山は噴火していない。本研究では、まず北海道全域の活火山の完新世の噴火活動履歴をまとめ、特に17世紀前後の噴火活動度の地域差を明らかにする。さらに上記3火山のマグマ供給系の構造と噴火過程をまとめ、北海道における地震と火山活動の関係について検討する。北海道は東北日本弧と千島弧の2つの島弧の会合部であり、火山活動は更新世を通じて活発である。そして完新世では、まず1万年前後に比較的大規模な噴火が全域で起こっていた。千島弧に属する北海道東部では1.3万年前の雌阿寒岳（VEI=5）、7000年前の摩周（VEI=6）の大噴火があり、また東北日本弧の南西北海道では1.2万年前の濁川、9000年前の樽前山、そして約7000年前に駒ヶ岳がそれぞれVEI=5の大噴火を起こした。東部では知床半島の諸火山、摩周～アトサヌプリ、雄阿寒～雌阿寒1000年前頃までは定期的にマグマ噴火を起こしており、噴火活動は活発であったといえる。一方、道南の火山は樽前山が約2500年前にVEI=5の噴火を起こしているが、その他の活火山ではVEI<3程度の噴火が散発する程度であり、活動度は低い状態が続いていた。会合部である北海道中部では、完新世ではVEI=5に達する噴火はなく、大雪山と十勝岳においてVEIが3以下の噴火が散発している。そして17世紀になって前述したように、南西北海道では3火山が大噴火を連動したかのように起こし、その後も現在まで噴火活動は継続している。さらに3火山だけではなく、周辺の恵庭岳や恵山などでも活動が活発化した。一方、北海道東部では約1000年前頃の摩周（VEI=5）、雌阿寒岳（VEI=4?）および700年前の羅臼岳（VEI=3）のマグマ噴火を最後に、活動は低調になったようである。特に17世紀以降に限ると、北海道中部の十勝岳で小規模なマグマ噴火が散発する程度で、北海道東部ではマグマ噴火は発生していない。以上の北海道全域での火山噴火活動履歴を考えると、仮に慶長三陸地震のような大地震が北海道の火山活動に影響を与えたとすると、北海道東部の活動を低下させて、逆に南西北海道の諸火山の噴火を誘発させたことになる。つまり17世紀に起こった現象は北海道全域の応力場に影響を与えたと考えるべきであり、これは北海道が2つの島弧会合部にあることと調和的である。次に17世紀に噴火活動を再開した、南西北海道の3火山のマグマ系について検討する。これまでの研究をまとめると、これらの火山の噴火履歴およびマグマ供給系にはいくつかの共通点が認められる。それは、1) いずれも2000～5000年あるいはそれ以上の長い休止期の後に噴火活動を再開したこと、2) 主に活動したマグマは珪長質で、その全岩化学組成はデイサイト質安山岩～流紋岩質マグマと組成差があるが、それらのメルト組成はいずれも流紋岩質であったこと、3) この珪長質マグマ溜りに噴火の数年前以内の時期にマフィックマグマが貫入して噴火した点、の3点である。このことからこれら3火山では休止期の間に、十分な量のマグマを蓄積していたと考えられる。そのため大地震で噴火を誘発することはあり得るが、例えば大地震によりマフィックマグマの活動が活発になって上昇を開始する、あるいは地殻内の応力場の変化により珪長質マグマが活発になるという可能性は、慶長地震の後に約30年の間隔をおいて、3火山の噴火が始まったことの説明が困難である。

キーワード：火山噴火、地震、北海道、慶長三陸地震、マグマ溜り

Keywords: volcanic eruption, earthquake, Hokkaido, 1611 Sanriku earthquake, magma chamber

17世紀に千島・日本海溝で発生した巨大地震と道南3火山の一斉噴火

Great earthquakes in Japan and Kuril Trenches and eruption of three volcanoes in Southwest Hokkaido in 17th century*佐竹 健治¹*Kenji Satake¹

1.東京大学地震研究所

1.Earthquake Research Institute, University of Tokyo

北海道東部沖の千島海溝ではM8クラスの大地震が約70年程度の繰り返し間隔で発生しているが、17世紀にはより大規模な地震が発生したことが、北海道東部の太平洋沿岸における津波堆積物調査から明らかにされている(Nanayama et al., 2003, Nature)。17世紀には北海道南西部の3火山、駒ヶ岳(1640年Ko-d, 1694年Ko-c2)、有珠山(1663年Us-b)、樽前山(1667 Ta-b, 1739 Ta-a)が一斉に噴火している。じっさい、17世紀の津波によって運ばれた砂層は、これらの火山灰層の直下に位置しており、海岸で標高約20 m(平川, 2012, 科学)に達したほか、海岸から数kmまで追跡された。

17世紀に発生した巨大地震のメカニズムを調べるため、Satake et al. (2008, EPS)はプレート境界断層(深さ50kmまでと深さ85kmまで)と海溝付近の津波地震モデルについて津波シミュレーションを行い、沿岸5か所の湿地帯における浸水域と津波堆積物の分布を比較した。その結果、十勝沖~根室沖の長さ300 km, 幅100 km, 深さ17-51kmの断層面上で、すべり量は十勝沖で10 m, 根室沖で5 mというモデル(十勝沖と根室沖のプレート間地震の連動モデル, Mw 8.5)が、津波堆積物の分布をほぼ説明できるとしたが、海岸での津波の高さは最大10m程度であった。Ioki and Tanioka (2016, EPSL)は、上記のモデルに加えて、海溝軸付近のすべりを25 mとすれば、沿岸での津波高さが20m以上になり、17世紀の津波堆積物をすべて説明できるとした。このモデルのMwは8.8である。

北海道の沿岸部では、17世紀よりも古い津波によるとされる砂層が、10世紀の火山灰層(B-Tm)の上にもう1枚、B-TmとTa-c2(樽前火山の約2500年前噴火による火山灰)との間に3-4層あることから、17世紀と同様な津波はおおよそ500年間隔で発生したとされている(Nanayama et al., 2003)。Sawai et al. (2009, JGR)は、過去6000年間に発生した15回の津波の間隔が、平均約400年だが100-800年とばらつくことを示した。

道南の3火山は、千島弧でなく東北日本弧に属することから、17世紀の一斉噴火に関連するのは、千島海溝の巨大地震ではなく、日本海溝の巨大地震かもしれない。日本海溝北部では1611年慶長地震が発生し、津波によって多くの死者が発生した。この地震による津波は三陸沿岸や仙台平野では2011年と同様な被害を生じている一方、地震動による被害は知られていないことから、津波地震であるとされている。しかし、他の津波地震(例えば1896年三陸津波地震)のように海溝付近のみで断層運動が起きた場合、それが火山活動に影響するとは考えにくい。1611年慶長地震が17世紀の千島海溝の地震ではないかという考えもあるが、千島海溝の波源で三陸海岸や仙台平野の津波高さ・浸水域を再現するためには、上記のモデルの3倍程度のすべり量が必要である(岡村・行谷, 2011, 活断層・古地震研究報告)。また、釧路市春採湖湖底コアの年縞からは、17世紀の津波の発生は1636年とされている(石川他, 2012, 連合大会)。なお、北東北(盛岡や弘前)では、1650年頃からは藩の日記が残っており、千島海溝の地震は有感地震として記録されているはずである(佐竹, 2002, 歴史地震)。

17世紀の北海道南部の3火山の一斉噴火と千島あるいは日本海溝の巨大地震の関連性を議論する際、一斉噴火は過去数千年間で唯一の現象であるのに対し、津波堆積物をもたらした巨大地震はおおよそ500年間隔で繰り返してきたことにも注意する必要がある。

キーワード：巨大地震、火山噴火、千島海溝、日本海溝、津波

Keywords: great earthquakes, volcanic eruption, Kuril Trench, Japan Trench, tsunami

噴火がトリガーされやすいマグマ溜まりの条件：有珠火山・樽前火山などの比較から

Conditions for a magma reservoir that is easy to activate: a comparison between Usu and some other volcanoes

*東宮 昭彦¹

*Akihiko Tomiya¹

1.産業技術総合研究所地質調査総合センター

1.Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

マグマ溜まりおよび噴火直前マグマプロセスとその時間スケールに関しては、近年理解が進んでいる[たとえば東宮(2016:火山特集号)のレビューとそこで引用した各文献を参照]。熱的に維持されていないマグマ溜まりは、冷却固化しやすいためにマッシュ状(結晶含有量が40~50%以上で高粘性のためほとんど流動できない状態)にあることが多い。この場合、噴火するためには、マッシュ状マグマ溜まりを「再流動化」(例えば加熱)させ、「噴火可能なマグマ」(地表に向け上昇できるほど低粘性のもの)を用意する必要がある。こうした火山では、何らかのトリガー(深部からの高温マグマの供給など)が与えられても、ただちに噴火はしにくい。逆に、噴火可能なマグマが既に溜まっている火山では、トリガーがあれば短時間で噴火が可能であろう。従って、噴火休止期間と噴火トリガーの時間スケールとは正相関し得る。Passarelli and Brodsky (2012: Geophys. J. Int.) が指摘した噴火休止期間と前兆期間の正相関の一部は、これに対応するかもしれない。数十年以内の間隔で噴火を繰り返す活火山には、噴火可能なマグマが溜まっている可能性が高い。例えば、有珠火山の歴史時代の噴火(1663年~)の場合、各噴火の斑晶の累帯構造の比較から、この間のマグマ溜まりは斑晶の成長および元素拡散が効果的に起こる温度以上にあったことが分かっている(Tomiya and Takahashi, 2005: J.Petrol.)。また、斑晶(磁鉄鉱)の元素拡散から見積もった噴火直前過程(直前のトリガーから噴火まで)の時間スケールは数日程度であり、これは記録・観測された前兆地震期間と整合的であった。マグマ溜まりに「噴火可能なマグマ」が存在していたために、トリガーから数日以内に噴火が起こったと考えることができる。

噴火の間隔(休止期間)が数百年になると、噴火可能なマグマは存在しても少量であろう。例えば新燃岳2011年噴火は、前回のマグマ噴火から約200年が経過していた。岩石学的解析から、噴出物の主体をなす混合マグマはマッシュの再流動化できていること、その生成には数十日以上、おそらく前兆地殻変動期間である1年程度を要したと見積もられた(Tomiya et al., 2013: Bull.Volcanol.)。[なお、噴火を最終的に引き起こした直前トリガーは噴火のおよそ3日以内と見積もられ、この時点では噴火可能な状態が整っていたと考えられる。]

休止期間が数千年になると、噴火可能なマグマはほぼ無くなっているだろう。例えば有珠火山1663年、樽前火山1667年、北海道駒ヶ岳1640年噴火が該当する。このうち有珠火山1663年噴出物中の斑晶は、自形かつ均質でマグマから平衡に晶出したと考えられるので、結晶サイズ分布(CSD)からマグマ中の滞留時間を見積もったところ、およそ $10^2 \sim 10^3$ 年(ただし誤差が1ケタ程度ありうる)であった(Tomiya and Takahashi, 1995: J.Petrol.)。つまり、噴火可能なマグマの準備におそらく数十年程度は要したと考えられる。[なお、樽前や北海道駒ヶ岳の斑晶はきわめて不均質/非平衡であるため同じ手法が使えない。]

休止期間以外にも、たとえばマグマ溜まりの深さ(圧力・含水量)が噴火直前過程に影響を与え得る。高圧・高含水量の条件では、より低温でマッシュの融解が進行し、多くの珪長質メルト(e.g., 流紋岩マグマ)を効率的に生産できる。高含水量では珪長質メルトの粘性も低く、融解で結晶粒間に生じたメルトが分離・集積しやすい。逆に、低圧・低含水量では、マッシュの融解に高温が必要で、珪長質メルトの生産効率は低い。前述の有珠火山1663年マグマのマグマ溜まりの条件は、高温高圧実験により 約250MPa (10km)・780°Cと見積もられた(Tomiya et al., 2010: J.Petrol.)。一方、樽前火山1667年および北海道駒ヶ岳1640年マグマについて、MELTSでマグマ溜まりの条件を予想的に求めたところ、いずれも約100MPa (4~5km)・900~950°Cと低圧・高温になった。有珠火山1663年は斑晶に乏しい流紋岩マグマであり、高圧・高含水量・低温で効率的に流紋岩質メルトが生成・分離・集積して噴火した可能性がある[均質な斑晶はメルト分離後に成長した]。一方、樽前と北海道駒ヶ岳は斑晶に富む安山岩マグマであり、低圧・低含水量のもと、「噴火可能なマグマ」の

生産に高温を必要としたとともに、珪長質メルトが分離せずマッシュの結晶ともども噴火したと考えられる。

キーワード：噴火トリガー、噴火可能なマグマ、マグマ溜まり、有珠火山、タイムスケール、マッシュの再流動化

Keywords: eruption trigger, eruptible magma, magma reservoir, Usu volcano, time scale, crystal mush remobilization

応力場の変化が休眠中の火山へ与える影響

Effects of stress change on activity of a volcano with a long-time quiescence

*高田 亮¹*Akira Takada¹

1.産業技術総合研究所 活断層火山研究部門

1.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology Geological Survey of Japan

マグマの移動は、上部地殻では岩脈を使って行われるので、応力場の変化とマグマ活動には、密接な関係がある。(1) 水平方向の応力場の変化の影響は、割れ目噴火位置の変化に現れる。火山体周辺の地震活動により、例えば、地震により開放された山腹側への割れ目噴火位置のシフトなどとして、観察される

(Takada,1997)。世界の活動的な火山について、火山周辺の地震活動と割れ目噴火位置の時系列の変化を紹介する。(2) 垂直方向の応力場の変化は、最小圧縮主応力軸の変化や、マグマの浮力と同等の応力勾配の変化として、マグマの上昇を抑制したり促進したりすることができる(Takada,1989;1999)。つまり、“休眠中の火山”下のマグマ供給系に対して、ある条件の応力場変化が、深部ないし横からマグマだまりに新たにマグマを注入したりや、マグマだまり上部の地殻でマグマ上昇を促進する方向に働く。(3) 休眠中の火山の例として、富士火山1707年宝永噴火に至る、応力場変化のモデルを紹介する。また、フィリピンピナツボ1991年噴火に至るプロセスをレビューする。(4) 応力変化がマグマ上昇に与える影響について、ゼラチン中の液体で満たされたクラックを使ったアナログモデル実験を紹介する。

キーワード：応力変化、岩脈、割れ目噴火、富士火山、ピナツボ

Keywords: Stress change, earthquake, fissure eruption, Fuji volcano, Pinatubo volcano

蔵王山・吾妻山周辺の火山性地殻変動

Recent Volcanic deformation around Zao and Azumayama Volcanoes

*三浦 哲¹、太田 雄策¹、出町 知嗣¹、立花 憲司¹、山本 希¹、市來 雅啓¹

*Satoshi Miura¹, Yusaku Ohta¹, Tomotsugu Demachi¹, Kenji Tachibana¹, Mare Yamamoto¹, Masahiro Ichiki¹

1.東北大学大学院理学研究科

1.Graduate School of Science, Tohoku University

Mt. Zao is an active volcano located in northeastern Honshu and has histories of phreatic or phreato-magmatic eruptions in the last 2 ka. Unrest of Zao volcano started in January, 2013 with a volcanic tremor (JMA, 2013) followed by activated seismicity mainly in the lower crust and very -long-period seismic events (VLP) up to today. Since a burst of shallow volcanic earthquakes initiated in April 2015, JMA announced a Volcanic Warning for the area near crater, which was lifted in June because of the quiescence of the seismicity.

Mt. Azumayama is an active volcano located in northeastern Honshu and has repeatedly erupted around the Oana crater within recorded history, and currently a fumarolic area extends across its southern and eastern flanks (JMA, 2013). Recent seismicity between 2001 and 2009 are characterized as repetition of active and quiet periods with intervals of around 2 to 3 years, while it shows steady activity after 2010 (JMA, 2014a). Seismic activity looks gradually increasing since October 2014. A volcanic tremor with a duration of about 35 minutes occurred on December 12, 2014, and the monthly number of volcanic earthquakes in December 2014 counted 576, and a volcanic alert (Level 2) was applied by JMA and is lasting at present.

GNSS data obtained around the two volcanoes are processed using the precise point positioning strategy (Zumberge et al., 1997) of GIPSY-OASIS II ver. 6.2 with IGS08 precise ephemerides and GMF mapping functions (GMF, Boehm et al., 2006). Since the wide area of northeastern Honshu still suffers the long lasting postseismic deformation following the 2011 Tohoku-oki earthquake (M9.0), we extract volcanic deformation related to the unrest of the volcano by fitting an approximation function of time consisting of linear, logarithmic, annual, and semi-annual terms. The coefficients of each term are estimated by the least-squares method.

Resulting displacements around Zao and Azumayama volcanoes show radial expansion and uplifting, and suggest the existence of pressure sources for the periods between January 2015 and May 2015, and October 2014 and May 2015, respectively. These deformations can be modeled with a point pressure source at a depth of around 5 km and 3 km, respectively beneath the summit, and related to raised volcanic activity.

References

Boehm et al. (2006), GRL, 33, L07304, doi:10.1029/2005GL025546.

JMA (2013), http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/souran_eng/menu.htm

JMA (2014a), http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/shiryo/130/130_no06.pdf

JMA (2014b), http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/sendai/14m12/213_14m12.pdf

Zumberge et al. (1997), JGR, 102, 5005-5017.

キーワード：火山、地殻変動、GNSS

Keywords: Volcano, deformation, GNSS

蔵王火山の過去約800年間のマグマ供給系

Past ca. 800 years magma feeding system beneath Zao volcano

*伴 雅雄¹、足立 辰也¹、廣上 千尋¹、武部 義宜¹*Masao Ban¹, Tatsuya Adachi¹, Chihiro Hirokami¹, Yoshinori Takebe¹

1.山形大学理学部地球環境学科

1.Department of Earth and Environmental Sciences, Faculty of Science, Yamagata University

東北日本弧火山フロントの中央部に位置する蔵王火山は、東北地方の中で噴火記録が最多の活火山である。火口湖・御釜からの最新の噴火活動は1894~97年であり、1940年には御釜の北東2.1km地点から小噴火が発生している。その後も、噴火には至らなかった噴気活発化や群発地震などの前兆的現象が1949年、1962~72年、1984年、1990年、1992年などに発生している。3.11地震以後は、深部低周波地震活発化、火山性微動の発生、山頂部の微小隆起など認められており、今後の推移を注視する必要がある火山の一つである。蔵王山の噴火の歴史は約100万年間と長い、時期毎に噴火活動やマグマの特徴に違いが見られる。ここでは、火口が現在の御釜に移った約800年前以降の噴火史とマグマ供給系の構成や進化プロセスについての研究結果を紹介する。現在の火口である御釜は、蔵王山の中央部に位置する五色岳の西部に位置する。五色岳は約2千年前から度重なる噴火により形成された火砕丘である。テフラ層序学的調査の結果、過去約800年間には7回の噴火エピソードが認められた。それらは13世紀~16世紀の間に4回、17世紀、18世紀、19世紀に各1回である。6回目までは、水蒸気噴火に始まり、繰り返されるマグマ噴火に移行したことが多い。エピソードは各々数十年以上続いた可能性が高い。最後のエピソードは1894~1897年の複数回の水蒸気噴火に対応するものである。過去約800年間の近傍相は御釜を囲む崖壁に良く露出している。水蒸気噴火堆積物あるいはそれに類似した堆積物の層→火砕サージ堆積物とそれに伴うアグルチネートの累重が5回繰り返し認められ（ユニット1~5とする）、最上位には複数のレイヤーからなる厚い水蒸気噴火堆積物が認められる。最大層厚は約90mに達する。ユニット1~5はテフラ層序学的調査によって推定された最初の5つのエピソードに、最上位の水蒸気爆発堆積物は最後の2つのエピソードによるものと考えられる。なお、最上位の水蒸気噴火堆積物の上部には本質火山弾と考えられるものも含まれる。本質火山弾を系統的に採取できるユニット1~5について岩石学的研究を行い、噴出物をもたらしたマグマ供給系の構成と進化過程を検討した。噴出物は全て中間カリウム・カルクアルカリ安山岩（ $\text{SiO}_2=57\sim59\%$ ）で、汚濁帯、逆累帯構造を持つ斑晶や非平衡的斑晶組み合わせが認められる混合岩である。混合端成分は、高An斜長石とかんらん石を持つ高温マグマ（1150°C）と低An斜長石と低Mg#輝石などを持つ低温マグマ（950~1000°C）で、浅部（地下約6km程度）に位置する低温マグマに深部由来の前者が注入・混合して噴出したと考えられる。各ユニットの全岩 SiO_2 量の範囲はおおよそ同じであるが、それ以外の幾つかの元素でユニット間に相違が認められ、ユニット毎の混合端成分組成の僅かな相違が示唆される。また、ユニット内（ユニット4を除く）では、上位に向かって全岩組成は苦鉄質に変化し、それと同時にリム付近に汚濁帯を持つ斜長石や逆累帯の幅が広い輝石斑晶の割合が増え、また An 量が非常に低い斜長石も認められるようになる。このことは、これらのユニットをもたらした一連の噴火において、苦鉄質マグマの混合への寄与率が累進的に増大し、それと共に浅部マグマ溜まりの周縁部も混合に関与するようになったためと推測される。すなわち、これらの噴火エピソードは深部由来の高温マグマの一連の累進的な上昇パルスに対応すると考えられる。また、噴火開始と収束時の混合率がどのエピソードでも概ね同じであることは興味深い。

キーワード：蔵王火山、マグマ供給系、マグマ進化、火山噴火、巨大地震

Keywords: Zao Volcano, Magma Feeding System, Magma Evolution, Volcanic Eruption, Large Earthquake

島弧火山の深部構造

Deep seismic structure beneath volcanic arcs

*中島 淳一¹*Junichi Nakajima¹

1.東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

1.Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

The subduction zone system on the Earth is over 40,000 km long. The active processes -brittle deformation, metamorphism, convection and volcanism- beneath volcanic arcs are all linked with slab-derived fluids. Here I review seismological observations in subduction zones and show that a low-velocity zone is observed in the mantle wedge beneath all volcanic arcs. Interestingly, geometries of the low-velocity zone, however, vary depending on the dip and age of the subducting slab. I also present deep crustal structure in NE Japan and discuss how the crustal structure changes along the volcanic front, providing a clue to understand deep origins of arc magmas and ongoing processes beneath volcanic arcs.

キーワード：火山、東北、上昇流

Keywords: volcano, Tohoku, upwelling flow

粘性の観点からのマグマ活動活性化の検討に向けて

Toward an examination of magmatic activation from viscosity-perspective

*竹内 晋吾¹*Shingo Takeuchi¹

1.一般財団法人 電力中央研究所 地球工学研究所 地圏科学領域

1. Central Research Institute of Electric Power Industry, Civil Engineering Research Laboratory, Geosphere Sciences

火山活動の活発化の原因をマグマ活動に求めた場合、重要な支配要因の一つはマグマの粘性である。マグマに内在、あるいは外在する駆動力によって、マグマが運動する際の抵抗としてマグマ粘性は働き、活発化過程のタイムスケールに大きく関わると考えられるからである。本論では、噴出マグマの粘性の推定例や粘性の観点から行われたマグマ活動活性化過程に関する研究をレビューし、今後の研究を考える。

噴出物解析から推定される噴火直前のマグマ溜まり条件でのマグマの粘性 (pre-eruptive magma viscosity) は 10^1 から 10^8 Pas に及ぶ広い範囲にわたる (Scaillet et al., 1998, JGR; Takeuchi, 2011, JGR; Andújar and Scaillet, 2012, Lithos)。このような推定は、メルト粘性モデル (例えば Giordano et al., 2008, EPSL) と多相マグマの粘性モデル (例えば Marsh, 1981, CMP) を用い、斑晶を含むマグマの粘性として岩石学的データに基づき計算することで可能である。岩石学的に推定されたマグマの粘性は、玄武岩から流紋岩になるにつれ、 10^1 から 10^5 Pas と高くなる傾向がある一方、安山岩からデイサイト質マグマの一部で 10^8 Pas まで粘性が高くなる (Takeuchi, 2011, JGR)。このような安山岩からデイサイト質マグマは、約 50 vol% におよぶ高濃度の斑晶を含む。また、高濃度の斑晶が原因となり、メルト組成が全岩組成よりも珪長質側にずれ、流紋岩組成 (約 75 wt% SiO_2) になっている。これらのことが、高い粘性を持つ理由である。日本のような島弧で普遍的に活動する安山岩からデイサイト質のマグマの粘性の範囲は 10^3 から 10^8 Pas の 5 桁にわたる。この範囲の広さは、マグマ活動の活性化過程を考える上で、重要な観点の一つとなる。

噴火直前のマグマ粘性の観点から検討されたマグマ活性化に関わるモデル研究がいくつかある。注入高温マグマからの加熱による結晶質マグマの再流動化と対流のモデル化 (例えば Burgisser and Bergantz, 2011, Nature) から、これらの現象のタイムスケールは結晶質マグマの粘性が高いほど長くなることが示されている。また、噴火初期過程と位置づけられるマグマ溜まりからの岩脈形成の可能性が議論されている (例えば Rubin, 1995, JGR)。粘性が高いほど、岩脈形成のために必要なマグマ溜まり過剰圧の大きさが大きくなる。今後は、火山の噴火史と粘性の時代変遷との関係 (例えば Gardner et al., 1995, Geology; White et al., 2006, G3)、マグマ混合のタイムスケール (例えば Tomiya et al., 2013, BV) と粘性の関係、噴火直前の地球物理学的現象と粘性の関係 (例えば Passarelli and Brodsky, 2012) など、粘性の観点からのマグマ活動活性化過程に関する実証的な研究が考えられる。その際、メルト粘性スケール (Takeuchi, 2015, BV) が簡便なマグマ粘性推定に役立つ。

キーワード：噴火直前マグマ粘性、メルト粘性スケール、マグマ活動活性化

Keywords: pre-eruptive magma viscosity, melt viscosity scale, magmatic activation

富士宝永噴火は宝永地震に伴うスロッシングで起きたと思うと色々説明できる

Sloshing of a bubbly magma reservoir as a mechanism of triggered eruptions

*並木 敦子¹、Rivalta Eleonora²、Woith Heiko²、Walter Thomas²

*Atsuko Namiki¹, Eleonora Rivalta², Heiko Woith², Thomas R Walter²

1.広島大学 総合科学研究科 環境自然科学講座、2.Helmholtz Centre Potsdam, GFZ German Reserch centre for Geosciences

1.Graduate School of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University, 2.Helmholtz Centre Potsdam, GFZ German Reserch centre for Geosciences

Large earthquakes sometimes activate volcanoes both in the near field as well as in the far field. One possible explanation is that shaking may increase the mobility of the volcanic gases stored in magma reservoirs and conduits. Here experimentally and theoretically we investigate how sloshing, the oscillatory motion of fluids contained in a shaking tank, may affect the presence and stability of bubbles and foams, with important implications for magma conduits and reservoirs. We adopt this concept from engineering: severe earthquakes are known to induce sloshing and damage petroleum tanks. Sloshing occurs in a partially filled tank or a fully filled tank with density-stratified fluids. These conditions are met at open summit conduits or at sealed magma reservoirs where a bubbly magma layer overlays a newly injected denser magma layer. We conducted sloshing experiments by shaking a rectangular tank partially filled with liquids, bubbly fluids (foams) and fully filled with density-stratified fluids; i.e., a foam layer overlying a liquid layer. In experiments with foams, we found that foam collapse occurs for oscillations near the resonance frequency of the fluid layer. Low viscosity and large bubble size favor foam collapse during sloshing. In the layered case, the collapsed foam mixes with the underlying liquid layer. Based on scaling considerations, we constrained the conditions for the occurrence of foam collapse in natural magma reservoirs. We find that seismic waves with lower frequencies < 1 Hz, usually excited by large earthquakes, can resonate with larger magma reservoirs whose width is > 0.5 m. Strong ground motion > 0.1 m/s can excite sloshing with sufficient amplitude to collapse a magma foam in an open conduit or a foam overlying basaltic magma in a closed magma reservoir. The gas released from the collapsed foam may infiltrate the rock or diffuse through pores, enhancing heat transfer, or may generate a gas slug to cause a magmatic eruption. The overturn in the magma reservoir provides new nucleation sites which may help to prepare a following/delayed eruption. Mt. Fuji erupted 49 days after the large Hoei earthquake (1707) both dacitic and basaltic magmas. The eruption might have been triggered by magma mixing through sloshing.

キーワード：巨大地震、気泡の合体と消滅、マグマ混合

Keywords: Large earthquake, Foam collapse, Magma mixing

マグマ溜まりの活性化における流体力学

Basic fluid dynamical processes in rejuvenation of magma chamber

*栗田 敬¹、熊谷 一郎²、黒川 愛香¹、金 芳隆¹

*Kei Kurita¹, Ichiro Kumagai², Aika Kurokawa¹, Yoshitaka Kon¹

1.東京大学地震研究所、2.明星大学理工学部

1.Earthquake Research Institute,University of Tokyo, 2.Meisei University

Large earthquakes are expected to activate magma chamber to induce eruptions. Up to now only phenomenological correlation between occurrence of earthquake and the timing of eruption has been suggested and the linking physical process is still unknown. When we evaluate probable long-term effects of the Great Tohoku Earthquake on the volcanic activity the lack of models for the linkage is crucial. From the lessons from historical eruption cases time scale up to 50 years is suggested for the linkage(Takahashi 2012), which indicates involvements of lower crustal processes because of the long term nature. We strongly need for conceptual models which link between the large earthquake and eruptions in the lower crustal situations. The models should be presented in a testable,observable style. Material scientific investigations on various eruption cases have revealed injection of fluidic magma into crystal-rich mushy magma chamber could be a direct trigger for the eruptions. In this presentation we summarize basic fluid dynamical processes associated with this injection process to induce rejuvenation of magma chamber.

In the pioneering works on the modeling (Burgisser and Bergantz,2011,Huber et al 2011) importance of fluidization has been addressed. Both works are an approach from numerical simulation. Since the process is essentially dynamical two-phase system and the relevant rheology is complicated experimental supports are necessary further on the simple numerical simulations. Here we report three cases of fluidization from experimental approaches:1) fluidization of packed beds, 2) switching permeable/gross flows in deformable gel system, and 3)shear-induced fluidization of yield-stress fluid system. When fluid is injected to the aggregate of particles and liquid fluid usually flows through the space between particles as a permeable flow. Above the critical injection flux both the particles and the fluid begin to flow together. This is fluidization process, which could be a kind of phase transition. As an example of 1) we demonstrate the initiation process of fluidization in a conventional experimental setup of fluidizing beds(Kon & Kurita 2016). The initial state is the packed bed formed by homogenous sized particles of sodalime glass,polystyrene and acryl. Injection of water induces disintegration of the particles. The propagation velocity of fluidized zone is controlled by free-fall velocity of the particles and the injected fluid velocity. This basically controls the time scale of fluidization. When the particles become soft and irregular shaped the system begins to behave as a yield stress fluid and peculiar cyclic behavior switching permeable flow and gross flow appears(example 2, Kumagai et al 2010). This suggests pressure oscillation phenomena in rejuvenation process. As an example of 3) we show fluidization process induced by shear in terms of development of shear-banding(Kurokawa et al 2015). Curious stress fluctuation phenomena found in this experimental study is suggested for the origin of low frequency earthquakes.

キーワード：火山噴火、流動化、固液2相系

Keywords: volcanic eruption, fluidization, solid-liquid two-phase system

地震と火山噴火 過去に学ぶ自然界からのメッセージ

Relation between Earthquakes and Volcanic Eruptions -Messages from the Natural History -

*大島 治¹*Osamu Oshima¹

1.なし

1.none

地震と火山噴火の関係、これはプレートテクトニクス成立以来提起された古くて新しい問題である。中村一明(1971)以来、(1)プレートの圧縮応力の高まりによりマグマが絞り出されて火山噴火が起きる>それでも不十分で圧縮応力により逆断層を生じ地震が起こる、(2)プレート内の圧縮により地震が起きる>受け手側のプレートの圧縮により噴火が起きる、2つの可能性が「鶏と卵」の関係のように捉えられたまま、個々の事例に明解な回答が与えられてきてはいないように見受けられる。

2011. 3. 11の巨大地震直後から「巨大地震の後には必ず大噴火が起きる」との声が少なくない。近過去の事例が添えられている。1960年チリ地震の際は両者の関係は特に明瞭であった。しかし2004年スマトラ地震の例はどうだろうか。かなり遠方の火山まで関与が考慮されている。2011東日本大震災の際は、これまで圧縮場にあり長期にわたり逆断層の卓越地域だった東北地方が一気に「開放」されて一時的にせよ正断層地域に転じ、日本海溝付近の海底は50m余りも東に動いたことが示された。これだけの大きな変動に地下のマグマはどう対応するのか。個人的直観は、「マグマは地下で拡がるスペースを与えられた。カルデラづくりの準備が一步進んだ」であったが、正解は如何なものだろう。東北地方の地下に熱い指先が多数上昇しているとする、そのうちの何本かは地表への出口を求め、また何本かは地下空間でマグマ溜まりを拡げる作業に移り、どちらも「正解」なのかもしれない。

日本の地震・火山噴火の歴史を見ていると、近くは18世紀、遡れば9世紀の状況がより現在に参考になるところが多い。地震(+津波)において、869年貞観地震津波(東北、日本海溝)>878年元慶地震(関東直下)>887年仁和地震津波(近畿、南海トラフ)の9年間隔の事例は歪み開放の連鎖として理解し易い一方、火山噴火では、1100年以上沈黙を続ける神津島(838年)、新島(886年)や、活発な三宅島・伊豆大島、そして富士山が大噴火しており、地震との対応を考えると、むしろ、この時期に伊豆・小笠原海溝沿いの巨大地震はなかったのか?地震の見落としはないか?の疑問も生じさせる。三宅島・八丈島の東岸に津波堆積物の可能性を秘める隆起円礫層が見出されることは、今後精査に値するかもしれない。

伊豆諸島方面における最近の火山動向、即ち、約2500年ぶりにカルデラを生じた三宅島(2000年)、約565年ぶりに割れ目噴火を起こした伊豆大島(1986年)、連鎖的に小規模ながら海底割れ目噴火を起こした東伊豆(手石、1989年)、そして最近の西之島の噴火などは、伊豆小笠原海溝を境とする太平洋プレートのフィリピン海プレートへの圧縮、やがて巨大津波地震の前兆として捉えられないだろうか。南ほど沈み込みの角度が高く、津波地震発生の確率は低いながらも、過去を精査しつつ推移を見守る必要があるのではなかろうか。日本・世界の地震・噴火史の関連を出来る限り紐解いてみたい。

キーワード：地震、火山噴火、自然史、火山地質

Keywords: earthquake, volcanic eruption, natural history, geology

白頭山2002年～2005年火山活動と2011年東北地方太平洋沖地震とは関係があるのか？

Is there any causality between the 2002-2005 volcanic activity of Baitoushan volcano and the 2011 Tohoku M9 earthquake?

*谷口 宏充¹

*Hiromitsu Taniguchi¹

1.東北大学東北アジア研究センター

1.Center for Northeast Asian Studies, Tohoku University

はじめに

2003年ごろ、中国や朝鮮からの連絡を受けて、白頭山で火山活動が活発化していることを知るようになった。国内外の協力を得て検討を進めたが、一つ気になることがあった。以前、869年の貞観地震と白頭山10世紀噴火との関連を耳にしたことが有る。無関係ではないと言うのだ。そのような中で3.11巨大地震が身近で発生した。そこで生まれたのは2002年～2005年の白頭山における火山活動と3.11巨大地震との関係、また、両者の過去はどうであったのかと言う疑問である。

日本、中国、朝鮮やロシアなど、広大な東北アジアにおける地震や噴火などの時間的な関係に焦点をあてた研究は少ない。しかし宇佐美（1974）は日本と朝鮮半島における有感地震を古文書に基づいて整理し、弱いながら両者の間には相関があることを示唆した。その中で最も明瞭な1700年頃には日本、朝鮮や中国でも史上最大規模の地震や富士山・白頭山での噴火が発生していた。

近年の白頭山噴火の歴史

町田（1981）による10世紀噴火に関する研究以降、東北アジアの研究者たちによって古文書や年代測定に基づき近年の噴火年代が報告された。“10世紀噴火”の年代についてはウイグルマッチング法や湖底堆積物などから940年前後の値（奥野他、2010など）が報告されている。また中国における噴出物の¹⁴C年代測定（Chichagov et. al., 1989）や地質調査（中川他、2004）に基づき、10世紀噴火の前860年頃に噴火（9世紀噴火）があったことが示されている。この噴火の火山灰は北海道森町においても発見されている（中川他、2012）。また10世紀以降の活動を調べるため、古文書に基づき確実だと思われる噴火年代を選び出した。その結果、最近の噴火は1373年、1597年、1702年、1898年、1903年の5回である。これらの内、1373年噴火は山麓からの玄武岩マグマによるものである。他の4回は外来水が関与した可能性の高い山頂噴火で、その内、1597年は規模が大きいが、残りのより新しい3回は極めて小規模な噴火と判断した。

日本の巨大地震と白頭山噴火活動との時代的相関

先に示した5回の噴火の内、1898年から一連と判断される1903年を除いた1373年、1597年、1702年と1898年の4回の活動について、日本における最近接巨大地震との時代的相関の検討を行った。どれだけ時間的に近接しているかを見るため、地震と噴火との前後関係は軽視した。その結果、年代差（噴火年代－地震年代）の平均値は1.3年、標準偏差は7.2年であり、3σでの年代差は - 20.4年～22.9年となった。東アジアで懸念された近い将来の白頭山噴火については、“日本における巨大地震と白頭山噴火との歴史経緯”、“最近のマグマ蓄積”、“日本と同じ広域応力場の変化”に基づき、可能性はあると判断した。もし2011年東北地方太平洋沖地震に関連して噴火が発生するならば、それは3σの確率で1991年～2034年となる。現実には今までに発生していないので、残りの2034年までが99%とした。しかしこの判断は、2002年からのマグマ性流体上昇による異常をどう評価するかで異なる。過去4回のケースと同じ時間関係は成立していたが、マグマ量が少ないなどの理由で噴火未遂に終わった、と考えるべきかも知れない。もう少し量が多かったら、最近3回と同じ小規模噴火になっていたのではないだろうか。この時間関係を869年の貞観地震にも適用すると、貞観地震に対応する白頭山噴火の年代は849年～892年であり、今まであまり知られていなかった“9世紀噴火”の存在とも調和的であった。

キーワード：白頭山、東北地方太平洋沖地震、時代相関関係

Keywords: Baitoushan volcano, 2011 Tohoku earthquake, Time correlation

東北日本弧、後期新生代カルデラ群の特徴

The characteristics of the Late Cenozoic calderas in the northeastern Japan arc

*吉田 武義¹、プリマ オキ²、工藤 健³

*Takeyoshi Yoshida¹, Oky Dickey A. Prima², Takeshi Kudo³

1.東北大学大学院理学研究科地学専攻、2.岩手県立大学ソフトウェア情報学部、3.中部大学工学部共通教育科
1.Institute of Earth Science, Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Faculty of Soft, and Inf. Science, Iwate Prefectural University, 3.Department of Natural Science and Mathematics, Chubu University

The uplift of the present Ou Backbone Range began in the island-arc period at 10 Ma, and was associated with an increase of horizontal compression. Between 8 and 1.7 Ma, active felsic volcanism created more than 80 calderas associated with subordinate andesites to basalts in the northeastern Japan arc (Ito et al., 1989; Yamamoto, 1992; Sato and Yoshida, 1993; Sato, 1994; Yoshida et al., 1999; Prima et al., 2012). There are two peaks in caldera formation interrupted by a short period of dormancy at 5-4 Ma, which is related to a short transgression, and the number and size of collapse calderas decreased from the late Miocene to the Pliocene.

These late Cenozoic calderas have an average diameter of about 10 km and an average aspect ratio of 1.24 in diameter. They are divided into three groups related to their diameter size (about 5, 10 and over 14 km), and are mainly classified into piston-cylinder type with subordinate funnel type. The spatial and size distributions of calderas are comparable with those of the Cretaceous granitic plutons from the Kitakami Mountainland in northeast Honshu. The collapse of such calderas would have formed in a neutral to weakly compressive stress field (Sato and Yoshida, 1993; Sato, 1994), and this would have resulted in the rise of felsic magmas into the crust where large intra-crustal magma chambers were formed (Yoshida et al., 1993; Aizawa and Yoshida, 2000; Aizawa et al., 2006). It has been argued that the regional stress field controlled the volcanic activity in the northeast Japan arc (Sato and Yoshida, 1993; Yoshida et al., 1993, 1997, 1999, 2014; Acocella et al., 2008), and that basaltic magmas derived from the mantle wedge, underplated and stagnated near the Moho, which acts as a density barrier (e.g. Ryan, 1987; Takada, 1989). These magmas would then have fractionated, re-mobilized or re-melted from solidified mafic precursors or the pre-existing arc crust, to form the felsic magmas in the inland area of the northeast Japan arc, with a thick crust (Sato and Yoshida, 1993). Such an event is confirmed by the existence of large felsic effusives in the eastern margin of the back-arc basin rift system (Yamada et al., 2012). During the neutral stress condition between 13.5 and 10 Ma, the felsic magmas would have risen diapirically through the ductile lower crust owing to their buoyancy (Aizawa and Yoshida, 2000; Aizawa et al., 2006), and the mode of ascent would have changed in the brittle upper crust to dyke or sheet. An increase in the compressional stress field occurred between 10 and 8 Ma, and it is likely that this increase led to the formation of sills and laccolithic shallow reservoirs in the upper crust (Sato and Yoshida, 1993; Aizawa and Yoshida, 2000). The regional change in the stress field was, therefore, the major control of caldera-dominated volcanism with laccolithic shallow reservoirs that occurred in the earlier half of the island-arc period. Felsic magma at this level could then have intruded along subsurface low-angle thrust sheets, and it is possible that magma migration along the thrust sheets caused the uplift of the Ou Backbone Range (Sato and Yoshida, 1993; Sato, 1994; Yoshida et al., 1993, 2014).

The clockwise rotation of SW Honshu (Otofujii and Matsuda, 1983) and the collision with the Kuril forearc sliver (Kimura, 1986) caused an oblique (NE-SW trending) compression of the northeast Japan arc during the Miocene to Pliocene, and triggered felsic magmatism along the areas of localized

extension (Acocella et al., 2008). After about 5 Ma, the Pacific plate accelerated (Pollitz, 1986). Pollitz(1986) suggested that the change in Pacific plate motion introduced a large component of compression normal to the Japan trench. This strong ENE-WSW compression closed the caldera-feeding systems and favoured the development of stratovolcanoes with deeper magma plumbing systems directly connected to the basaltic mantle source region.

キーワード：後期新生代カルデラ群、東北日本弧、珪長質火山活動

Keywords: Late Cenozoic calderas, northeastern Japan arc, felsic volcanism

雲仙火山1991-1995年噴出物中の苦鉄質包有物の鉱物化学組成の多様性の起源とマグマ供給系
Variation of mineral chemistry of mafic inclusions in the 1991-1995 dacite of Unzen volcano: variable degree of annealing of microlites in low temperature stagnant magma reservoir and its implications for the magma plumbing system

*佐藤 博明¹、ホルツ フランソワ²、ボツチャルニコフ ローマン²、中田 節也³、ベーレンス ハラルド²
*Hiroaki Sato¹, Francois Holtz², Roman Botcharnikov², Setsuya Nakada³, Harald Behrens²

1.神戸大学、2.ハノーバー大学、3.東京大学地震研究所
1.Kobe Univ., 2.Hannover Univ., 3.Univ. Tokyo, ERI

Mafic inclusions in the 1991-1995 dacite of Unzen volcano show chemical and textural variability, such that bulk SiO₂ contents range from 52 to 62 wt.% and fine to coarse microlite textures. In this paper we show variations of mineral chemistry of hornblende and plagioclase and classify the mafic inclusions into type-I, type-II and type-III; i.e., type-I includes high-Mg plagioclase and low-Cl hornblende as microlites, and type-III includes low-Mg plagioclase and high-Cl hornblende, and type-II has intermediate mineral chemistry. Type-I mafic inclusions tend to show finer-grained in the matrix, have slightly higher bulk rock SiO₂ contents (56-60 wt%), compared with the type-III mafic inclusions (SiO₂=53-59 wt%), but overall bulk rock compositions are similar to the basalt-dacite eruption products of Quaternary monogenetic volcanoes around Unzen volcano. The origin of the variation of mineral chemistry in mafic inclusions is interpreted to reflect the different degree of diffusion relaxation of minerals in low temperature dacitic magma reservoir; i.e., older intrusion produced mafic inclusions, whose constituent minerals were subsequently annealed at low-temperature to be in equilibrium with the rhyolitic melt (type-III), whereas the latest intrusion retained high-temperature mineral chemistry corresponding to those of the type-I mafic inclusions. Mg contents of plagioclase are modeled in terms of temperature and X(An) for hydrous Unzen magma, suggesting that plagioclase microlite in type-III initially crystallized at high temperature subsequently reequilibrated in low temperature stagnant magma reservoir. Compositional profiles of MgO in plagioclase suggest that older mafic inclusions spent at least several hundred years for annealing at ca. 800°C in the stagnant magma reservoir before incorporation into mixed dacite of the 1991-1995 eruption of Unzen volcano. A magma plumbing system that afforded variably annealed mafic inclusions in 1991-1995 dacite of Unzen volcano is discussed and illustrated.

キーワード：雲仙火山、苦鉄質包有物、マグマ供給系

Keywords: Unzen volcano, mafic inclusions, magma plumbing system

岩石学的に見た伊豆大島火山のマグマ供給系

Petrological constraints on magma plumbing system beneath Izu-Oshima volcano

*浜田 盛久¹*Morihiisa Hamada¹

1. 国立研究開発法人海洋研究開発機構地球内部物質循環研究分野

1. Department of Solid Earth Geochemistry, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

[はじめに]

伊豆大島火山は、伊豆弧の火山フロント上の活火山である。伊豆大島火山の噴出物の層序は3つに大別され、40,000年よりも古い噴出物から成る泉津層群、40,000~1,500年前（カルデラ形成時）までの噴出物から成る古期大島層群、それ以降現在までの噴出物から成る新期大島層群である。新期の伊豆大島火山においては、18世紀までは噴出量が数億トン規模の噴火がおよそ100年から150年に1回の割合で12回起こった。これらのうち、巨大地震と密接な関係があると考えられている噴火は、838年ごろから886年ごろにかけての9世紀の約50年間に相次いで起こった3回の噴火である（津久井ほか, 2008）。19世紀以降は、噴火量が数千万トン以下という、従来よりも規模が一桁以上小さい噴火が30年から40年に1回の割合で起こっている。このサイクルに従えば、直近の噴火である1986~1987年噴火から既に30年が経過しているため、近い将来、再び噴火する可能性が高まっている。ただし、その噴火が、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震が引き金となって噴火することになるのかどうかは不明である。本講演では、伊豆大島火山の火山岩の岩石学的研究から、伊豆大島火山のマグマ供給系についてどこまで分かっているかを概説し、近い将来に予測される噴火に備えるための基礎的な情報を整理する。

[伊豆大島火山のメルト組成のバリエーション]

伊豆大島火山の噴出物には、高Al/Siトレンドと低Al/Siトレンドを見出すことができ、火山岩の組成バリエーションはこれら2つのトレンドの間にある。このことから、液は、高Al/Siトレンド上の液と低Al/Siトレンド上の液の混合物であるか、高Al/Siトレンドを導く結晶分化作用の条件と低Al/Siトレンドを導く結晶分化作用の条件の中間的な条件下で導かれたか、のいずれかであると考えられる(Hamada et al., 2014)。実験的研究(Hamada and Fujii, 2008)に基づくと、高Al/Siトレンドは~3 wt% H₂Oを含む未分化メルトの、低Al/Siトレンドはほとんど無水の未分化メルトの結晶分化作用として説明することが可能である。

[伊豆大島火山のマグマの含水融解実験]

伊豆大島火山の火山岩をはじめとする島弧ソレアイトは、しばしば、Caに富む斜長石 (An>90, ただしリムはAn~75) を斑晶にもつ。Hamada and Fujii (2007)は、伊豆大島火山の比較的未分化な2種類のマグマ (MA43とMA44, MgO~5 wt%) の含水融解実験 (1~6 wt% H₂O) を行い、晶出する斜長石の組成に及ぼすメルトの組成と含水量の効果を調べた。MA43は高Al/Siトレンド上の比較的未分化な液組成であり、MA44は低Al/Siトレンド上の比較的未分化な液組成を代表する。MA43試料を含水融解したところ、1~6 wt% H₂Oの条件下で斜長石がリキダス相であり、含水量の増加に伴って、斜長石の晶出温度が低下する結果が得られた。斜長石の組成は、無水に近い条件下ではAn80であったが、含水量の増加に伴ってCaに富むようになり、メルトの含水量>3 wt%ではAn>90であった。MA44試料を含水融解したところ、低含水量 (<2 wt%) 下では斜長石がリキダス相であったが、さらに含水量が増加すると単斜輝石がリキダス相として晶出した。斜長石の組成は、無水に近い条件下ではAn70であり、含水量の増加に伴ってCaに富むが、メルトの含水量が~4 wt% H₂OでAn80に留まった。すなわち、Caに富む斜長石 (An>90) は、高Al/Siトレンド上の液からはメルトの含水量>3 wt%で晶出できるが、低Al/Siトレンド上の液からは、含水量に関わらず晶出できない。一方、Caに乏しい斜長石リム (An~75) は、高Al/Siトレンド上の液からは晶出できないが、低Al/Siトレンド上の液からは晶出できる。従って、Caに富む斜長石は、高Al/Siトレンド上の液から晶出した後に低Al/Siトレンド上の液に取り込まれたものと考えられる。

[結論]

伊豆大島火山の液組成には、高Al/Siトレンドと低Al/Siトレンドを見出すことができ、火山岩の組成バリエーションはこれら2つのトレンドの間にある。高Al/Siトレンドは3 wt% H₂Oを含む未分化メルトが、低Al/Siトレンドはほぼ無水の未分化メルトが結晶分化作用を行うことによって導くことが出来る。地下4 kmの深

度にあるマグマ溜まり（含水量～3 wt%）から地表付近（ほぼ無水メルト）に至るまでの火道中で、メルトは H_2O に飽和しており、深度に応じて含水量の異なる条件下でそれぞれ結晶分化作用が同時進行していると考えれば、伊豆大島火山のマグマ供給系を岩石学的に説明することができる。

キーワード：伊豆大島火山、マグマ供給系、実験岩石学

Keywords: Izu-Oshima volcano, Magma plumbing system, Experimental petrology

富士火山のマグマ溜りと深部構造

Deep Structure of Fuji volcano

*高橋 栄一¹、中島 淳一¹*Eiichi Takahashi¹, Junichi Nakajima¹

1. 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

1. Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science and Technology, Tokyo Institute of Technology

2011年3月11日に起きた巨大地震の影響で日本列島の火山の多くが活動を再開する準備段階にあると推察される。比較的速やかに活動を開始する玄武岩質火山がある一方、数10年かけてマグマ溜りの温度を上げ大規模な噴火を起こす珪長質マグマの火山もあるだろう。来るべき火山活動の活性化過程を読み解くためには我々は火山の深部構造とそのダイナミクスに関する理解をそれぞれの火山について高めることが何より重要であると考えられる。

火山活動史と噴出物の岩石学的研究を結びつけることにより火山のマグマ溜りについてある程度の推定を行うことが可能である。マグマ溜りの時間発展をも推定できる場合がある(例: 有珠火山に関する東宮の一連の研究など)。しかしながら、島弧成層火山においては斑晶鉱物の示すマグマ溜りの位置は地殻浅部(深さ3~10 km)がほとんどで地震学トモグラフィーから推定される下部地殻の巨大なマグマ溜りの情報を得ることは極めて困難である。

富士火山はプレート境界に位置する巨大な成層火山で火道がフィリピン海プレートとユーラシアプレートをまたぐ位置に存在するという意味で世界的見ても極めてユニークな存在である。宝永噴火の噴出物を実験岩石学的に研究した結果、噴火前の玄武岩マグマは深さ25 kmの下部地殻マグマだまりに位置したことが判明した(浅野ほか、2012年火山学会)。この講演では富士火山の深部構造を地震トモグラフィー、実験岩石学、富士火山活動史から検討し、富士火山の噴火とテクトニクスの関係を考察する。

キーワード: 富士火山、プレート境界、深部構造

Keywords: Fuji volcano, plate boundary, deep structure