

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22253005

研究課題名(和文) 島弧型玄武岩質マグマ噴火のマグマ系と噴火機構解明のための日ロ共同研究

研究課題名(英文) Joint research of Japan and Russia for investigation of magma system and its eruption mechanism of the arc-type basaltic eruptive activity

研究代表者

中川 光弘 (Nakagawa, Mitsuhiro)

北海道大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50217684

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,400,000円、(間接経費) 10,920,000円

研究成果の概要(和文)：カムチャッカのクリチェフスコイ火山において地球物理学的および岩石学的研究を実施した。研究期間中に4点の傾斜計を設置し、既存の地震計を合わせた観測網を構築・維持させることができた。そして2010年の噴火活動中に10～20分の周期でのサイクリックな傾斜変動を観測し、ストロンボリ式噴火モデルを構築した。特に過去3000年間の噴火堆積物の物質科学的解析を行った結果、3000年間で2タイプの初生玄武岩質マグマが存在し、ひとつのタイプから別のタイプへと次第に入れ替わっていることが明らかになった。また最近80年間の噴火では火山直下のマグマ供給系が噴火活動期毎に更新されていることも明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Geophysical, geological and petrological research of Klyuchevskoy volcano, Kamchatka, was carried out. We installed four tiltmeters to construct the network with seismographs for monitoring of activity of the volcano. We have also continued to maintain the network, which has been working during our research period. Continuous tilt measurements detected cyclic deformation with every 10 - 20 minutes. This monitoring result enables to construct the model for the Strombolian type eruptions. On the other hand, petrological and geochemical analysis reveals that eruptive materials during the last 3000 years can be divided into two types of basaltic magma, one of which had been gradually replaced by another type of basaltic magma. In addition, although eruptive activity has continued intermittently during the last 80 years, magma system beneath the volcano has changed after each dormant period.

研究分野：火山学

科研費の分科・細目：数物系科学A・固体地球惑星物理科学

キーワード：噴火機構 玄武岩質マグマ 傾斜観測 マグマ供給系 火山岩岩石学 クリチェフスコイ火山 カムチャッカ

1. 研究開始当初の背景

(1) 活動的火山の研究

火山深部のマグマ生成、移動、蓄積そして噴火過程を解明することは、地球内部の物質循環や火山システムを理解するために重要なだけでなく、噴火予測や噴火推移予測のための基本的なデータとなり、噴火災害軽減にも貢献できる。このためには噴火活動中の火山を研究対象とするのが最も効果的である。そして火山観測技術が飛躍的に進歩したこの20年間、雲仙岳、有珠山、三宅島、浅間山そして新燃岳での噴火活動で、研究成果が蓄積されてきた。さらに現在噴火活動中の桜島では、地球物理学的観測研究だけではなく地質・物質科学的研究を加えた研究が実施され大きな成果があがっている。しかしこれらの火山は安山岩～デイサイト質マグマによる噴火であり、玄武岩質マグマを主体とする火山では2000年の三宅島の噴火だけであった。またその噴火は数1000年に1回程度の稀な噴火様式であった。将来の噴火により大きな災害が予測されている富士山や伊豆大島のような、玄武岩質マグマの噴火に備えるためには、決定的に事例研究が不足している。そのためには海外において、日本のような沈み込み帯であり、かつ玄武岩質マグマにより頻繁に噴火を繰り返している火山での研究を行うことが重要であると考えた。

(2) カムチャッカ火山の研究

前記の観点からカムチャッカ半島の火山帯の北部にあるクリチェフスコイ火山を研究対象とすることとした。カムチャッカ半島では多くの活動的火山があり、クリチェフスコイ火山周辺でもベズミアニーやシュベルチなどの火山が噴火活動中であり、地球物理学的観測研究だけではなく地質学・物質科学的研究も進展していた。しかしこれらの火山は安山岩質マグマ主体であり、玄武岩質マグマ主体のクリチェフスコイ火山の研究はこれらの火山と比べて、特に物質科学的研究が十分ではなかった。一方、我々はカムチャッカの火山を観測・研究しているロシア科学アカデミーとは15年以上にわたり共同研究やワークショップ開催など、密接な協力関係を構築していた。その中でクリチェフスコイ火山での地球物理学的観測だけではなく、火山地質および氷河研究者から情報を得て、現地での地質調査および岩石試料採取が実施できるとの確信を得た。

2. 研究の目的

アジア地域で最も活動的なカムチャッカ・クリチェフスコイ火山で、地球物理学的観測と噴出物の物質科学的解析を同時に実施し、マグマ溜りからマグマが浅部に貫入し噴火に至る噴火過程の高精度モデル化を行い、玄武岩質マグマの火山のマグマ供給系の一般化を目指す。

新たに傾斜計観測網を構築して噴火時の地殻変動を多数観測するとともに、日本のALOS衛星のSAR干渉画像解析を組み合わせ、それぞれの噴火での浅部へのマグマ貫入過程の力学的モデルを構築する。それぞれの噴火の噴出物の岩石学的解析から、マグマの深度・滞留時間・混合度等を明らかにするとともに、その時間変化の有無についても調査する。力学的モデルと岩石学的制約から、それぞれの噴火での統合モデルを作成するとともに、その普遍性と特異性について区分けし、モデルの一般化の可能性について検討する。これらのデータおよび既存の地震観測網から得られる震源データから、マグマ溜りの位置・体積変化・地震活動・浅部貫入活動との関連を明らかにし、岩石学的制約を加味してマグマ溜りから浅部に貫入過程の一般的モデル化を行う。具体的には、中央火口噴火になる条件、側噴火になる条件等を明らかにする。広域地震観測網ネットから決められた広域地震波速度構造・減衰構造・深発地震活動・プレート内部構造などのパラメータを一元的に整理し、推定されたマグマ供給システムと同時にマッピングすることにより、クリチェフスコイ火山の深部構造と異常に高いマグマ噴出率のモデル化にも挑戦する。

3. 研究の方法

(1) 地球物理学的手法

ロシアの観測所が所有する地震観測点4点に傾斜計を設置し噴火に伴う地殻変動を高精度に連続的に観測する。傾斜計での観測を継続してデータを蓄積するとともに、個々の噴火について地殻変動データのモデル化を行って、マグマ貫入パターンを明らかにする。また、長期的な傾斜変動についても検討し、その力学的モデルについて検討する。日本のALOS衛星の干渉SAR画像解析を行い広域な地殻変動データを取得し、傾斜データとのマッチングを行う。またロシア側の地震観測網で得られている震源分布・自身は速度構造・減衰構造などを一元的に調査してマッピングを行う。

(2) 物質科学的手法

噴火年代の明らかな噴出物について、火山地質学的手法により噴火推移を復元し、代表的試料を採取する。また周辺の関連した岩石試料の採取を行う。岩石試料は代表者の機関で主・微量成分の全岩化学組成分析、同位体比分析および鉱物化学組成分析を行う。さらにそれらのデータからマグマ混合プロセスの解析、端成分マグマの温度・深度などを求め、マグマ供給系の構造の検討を開始する。

(3) 多項目データの統合

噴火ごとの力学的・岩石学的モデルから、統合モデルを作成するとともに、その統計的あるいは物理的パラメータの類似性・特異性を明らかにすることでモデルの一般化を図る。特に、噴火位置・噴出量・噴出形態（爆発的か、非爆発的か）を規定する条件を明らかにすることで、例えば中央火口噴火になる条件、あるいは側噴火になる条件等を明確にし、日本の玄武岩質火山の噴火にも対応できるようなモデルの構築を目指す。また、広域的かつ深部の地殻変動・地球物理データから与えられる制約から、島弧型玄武岩質火山としては異常な高い噴出率を誇るクルチェフスコヤ火山の上部マントルから下部地殻にかけても深部マグマ供給系モデルの作成にも挑戦する。

4. 研究成果

(1) はじめに

クリチェフスコイ火山は研究期間中では、2010年度では噴火活動が継続していたが、2011～2012年では活動は停止し、最終年度の2013年では噴火活動が再開した。このため当初のように噴火活動を長期にわたり観測することはできなかったが、活動期から休止期へ、そして活動期と一連の活動の変化を経験した。また逆に噴火休止期もあったことで試料採取は順調であった。主要な成果は以下のとおりである。

(2) 傾斜計観測網の展開

火山活動にともなう地殻変動や長周期微動などを観測するために、2010年に傾斜計を3か所に設置するとともに、2011年度に1か所を追加し合計4か所の傾斜計網による観測を実施した。観測点は山体の東側だけであるが、おおよそ180度のカバレッジをもって、いるため力源の異方性についてもある程度検討が可能である。センサーには気泡式地上設置型2成分傾斜計を使用し、2か所は温度が安定している深さ10m程度の立坑底に設置

したが、他の2か所は既設の地震観測点および標高2500mの山小屋内の設置となった。データは超低消費電力型ロガーで100Hzでサンプリングされた後32GBのコンパクトフラッシュに蓄積された。大容量の空気積層電池とCFカードを併用することにより、1年間に1度のバッテリー交換のみで通年運用することが可能であった。孔低設置観測点で短周期で0.1 μ ラジアン程度の観測精度となっている。データカードの交換は、毎夏および春先の積雪時に実施した。極低温下かつアクセスが困難な場所での観測であったが、本計画で立案した観測システムでほぼ連続してデータを取得することに成功したことは、火山のような観測の制約条件が大きい場所での観測に対する大きな実績となった。

(3) 傾斜計データの解析

傾斜計観測網から得られたデータの解析を実施した。100Hzサンプリングデータは北海道大学に設置された地殻変動データベースシステムにオリジナルサンプリングのほかデシメーションされたものが格納された。遠地地震の波形を用いて、すべてのセンサーが正常に作動していることを確認した。

クルチェフスコイ火山は、観測を始めた2010年8月から11月までほぼ連続的にストロンボリ式噴火を行っていたが、それ以降は活動が低下し山頂火口内ではドレインバックが見られた。活動に変化が見られた2010年9月から2011年2月までの傾斜計データについて、3600秒から14400秒のバンドパスフィルターをかけたところ、活動の消長に対応する常時振動の振幅変化が見られることがわかった。カムチャツカ火山監視チームが出す活動度との比較では、活動期でも特に活動度が高い時期には振動振幅も大きくなり、活動低下とともに振幅も小さくなる。噴火活動が休止期に入った2010年11月からは、常時振動が消滅した。これらのことから、観測された非常に長周期の振動は、マグマ活動に関連するシグナルである可能性が高いことが示唆された。

活動期に観測された常時振動のパーティクルモーションについて検討したところ、火口方向に直行する方向を向く10分から20分の周期でのサイクリックな傾斜振動を行っていることが明らかになった。振幅分布は火口からの距離減衰を示さないため、非等方的な力源により励起されていることが示唆された。振動振幅の空間分布および変動を説明可能なモデルの1つとして、北西—南東方向

に長軸をもつ膨張力源が提案された。クルチエフスコイ火山では、活動期には10分から15分おきにストロンボリ式噴火を行っている。推定された力源は、火道内をガスポケットが上昇することでサイクリックな地殻変動を励起している可能性を示唆するものである。マグマ溜りから一定の周期でガスポケットが上昇することでストロンボリ式噴火が発生し、同時にガスリフト効果でマグマを火口からゆっくりと噴出させているモデルが示唆された。

ガスポケットの上昇にともなう傾斜変動を時空間的にモデル化するには、半径方向に観測点を設置し力源の時間移動を観測する必要がある。今後は、傾斜観測点の増設をはかるとともに、より長周期な変動が検出可能なGNSS観測を併用することが期待される。

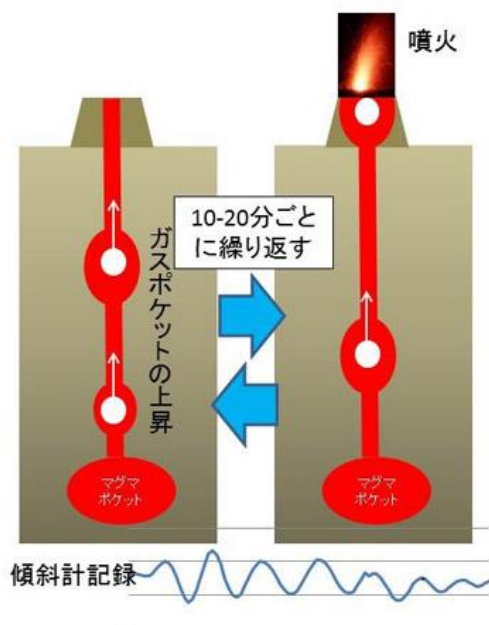


図1. 傾斜計で観測された10-20分周期の振動は火道をゆっくりとガスポケットが上昇することにより発生していると考えられる。上昇したガスポケットが火口に到達するとストロンボリ式噴火となる。この振動が観測されている間は噴火が継続し、活動が弱まると信号が消える特性を利用することで、噴火活動度の監視が出来るかもしれない。

(4) 過去3000年間のマグマ変遷

物質科学的解析では特に過去3000年間の噴出物について、200以上の試料の全岩主成分・微量成分化学組成を求めた。噴火年代は隣接するシュベルチ火山などの年代既知のテフラとの被覆関係で推定している。その結果、過去3000年間では全てSiO₂<55%の玄武岩質マグマが活動していること、またK₂O含有量の異

なるlow-Kとhigh-Kの2タイプのマグマが並行して活動していることが判明した。low-KタイプはSiO₂<53.5%でhigh-KはSiO₂>52.5%とSiO₂量に差があるがSiO₂-K₂O図で両者はK₂Oレベルに差がある。さらに両者はTiO₂、MnO、Ba、Rbでも差が認められる。両者は初生玄武岩質マグマに大きな組成差があり、このことは起源物質あるいは生成深度・温度などが異なるためと考えられる。さらに3000年前にはlow-Kタイプが卓越しているが、噴火年代が新しくなるほどhigh-Kの比率が増加し、最近80年間の活動では1937年溶岩を除き、全てhigh-Kタイプが活動していることが明らかになった。このことはマントルでのマグマ発生プロセスが3000年足らずという、比較的短い時間スケールで変化したことを示している。今後は希土類元素や多くの同位体比を求めて、より詳細にマグマ生成プロセスを解明することが必要である。

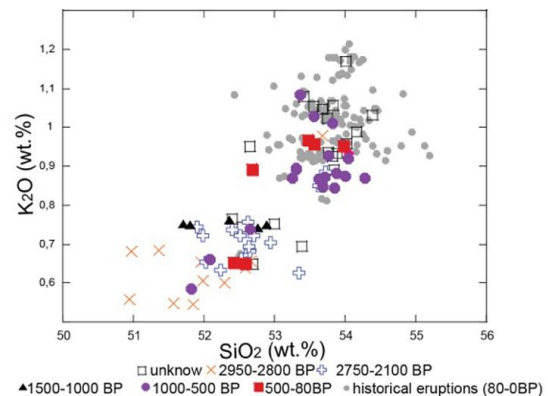


図2. クリチエフスコイの新しい噴出物のSiO₂-K₂O図。K₂O=0.8%を挟んで、K₂Oの低いタイプ(low-K)と高いタイプ(high-K)に区別できる。過去3000年間で噴出年代が推定できるものについてみると、活動年代が新しくなるとhigh-Kタイプに卓越することがわかる。

(5) 最近80年間のマグマ変遷

過去80年間に起こった噴火では、既に述べたように1937年噴火を除いて、全てhigh-Kタイプのマグマが活動した。つまりマントルで発生した初生マグマは共通あるいは類似していたと考えられる。しかしながら噴出物組成は噴火活動年代間で区別でき、同じSiO₂量で比較してもAl₂O₃、MgOやFeO値が明瞭に異なる。またその差は結晶分化などの浅所マグマ内のプロセスだけで説明できない。過去80年間の噴出物は、鏡下観察によるとマグマ混合の証拠が見出され、その端成分はともに玄武岩質マグマであると推定できる。したがって、深部からの玄武岩質マグマが頻繁に上昇して浅

所のマグマ系に供給され、噴火毎にマグマ系が更新されていると考えられる。例えば研究期間中に活動が再開した2013年噴出物は、その直前の2010年噴出物と化学組成が明瞭に異なっており3年足らずの静穏期を挟んで、マグマ系が更新されたと推定できる。今後は鉱物組成を検討して、噴火毎の端成分マグマを特定し、その時間変化によりマグマ系の時間変化がより具体的に議論できると考えられる。

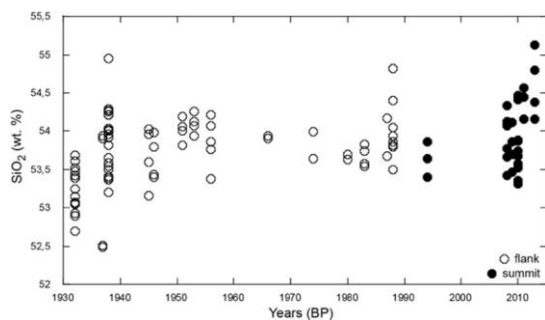


図3. 最近80年間の噴出物の全岩SiO₂量の変化。1990年以降は山頂噴火が続いていることがわかる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 18件)

- ① 中川光弘, 長谷川健, 松本亜希子, 北海道東部, 阿寒～屈斜路火山群の成り立ち: 小型カルデラが複合した大型カルデラの形成. 岩波科学, 査読無, 84, 2014, 97-102
- ② Nakao, S., Y. Morita, H. Yakiwara, J. Oikawa, H. Ueda, H. Takahashi, Y. Ohta, T. Matsushima, and M. Iguchi, Volume change of the magma reservoir relating to the 2011 Kirishima Shinmoe-dake eruption -Charging, discharging and recharging process inferred from GPS measurements, Earth Planets Space, 査読有, 65, 2013, 505-513.
- ③ Takahashi, R., Nakagawa, M., Formation of a compositionally reverse zoned magma chamber; Petrology of the AD 1640 and 1694 eruptions of Hokkaido-Komagatake Volcano, Japan. Jour. Petrol., 査読有, 54, 2013, 815-838.
- ④ Matsumoto, A., Nakagawa, M., Miyasaka, M., Iguchi, M., Temporal variations of the petrological features of the juvenile materials since 2006 from Showa crater, Sakurajima volcano, Kyushu, Japan, Bull. Volcanol. Soc. Japan, 査読有, 58, 2013, 191-212.
- ⑤ Hasegawa, T., Nakagawa, M., Kishimoto, H., The eruption history and silicic magma systems of caldera-forming eruptions in eastern Hokkaido, Japan. Jour. Mineral.

Petrol. Sci., 査読有, 107, 2012, 39-43.

- ⑥ Takahashi, H., T. Shibata, T. Yamaguchi, R. Ikeda, N. Okazaki and F. Akita, Volcanic strain change prior to an earthquake swarm observed by groundwater level sensors in Meakan-dake, Hokkaido, Japan, J. Volcano. Geotherm. Res., 査読有, 215-216, 2012, 1-7.
- ⑦ Hasegawa, T., Nakagawa, M., Yoshimoto, M., Ishizuka, Y., Hirose, W., Seki, S., Ponomareva, V., Alexander, R. (2011) Tephrostratigraphy and petrological study of Chikurachki and Fuss volcanoes, western Paramushir Island, northern Kurile Islands: Evaluation of Holocene eruptive activity and temporal change of magma system. Quaternary International, 査読有, 246, 2011, 278-297.
- ⑧ Nakagawa, M., Hiraga, N. and Furukawa, R., Formation of a zoned magma chamber and its temporal evolution during the historic eruptive activity of Tarumai Volcano, Japan: Petrological implications for a long-term forecast of eruptive activity of an active volcano. Jour. Volcanol. Geotherm. Res., 査読有, 205, 2011, 1-16.
- ⑨ Takahashi, H., Coseismic strain and stress changes in eastern Japan due to the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake as derived from GPS data, Earth Planets Space, 査読有, 63, 2011, 741-744.
- ⑩ Matsumoto, A. and Nakagawa, M., Formation and evolution of silicic magma system: Petrology of the volcanic rocks of Usu volcano, Hokkaido, Japan. Jour. Volcanol. Geotherm. Res., 査読有, 196, 2010, 185-207.

[学会発表] (計 38件)

- ① 高橋浩晃, 青山裕, 中川光弘, 松島健, 宮町宏樹, E.ゴルデイエフ, Y.ムラビヨフ, S.セロベトニコフ, カムチャッカ, クリチェフスコイ火山のストロンボリ式噴火活動期に傾斜計で観測された超長周期微動. 日本火山学会 2013年秋季大会, 2013年9月30日, 猪苗代町体験交流館「学びいな」(福島県)
- ② 中川光弘, 古川竜太, 松本亜希子, 北方四島, 択捉島中央部での萌消カルデラ(L'vinaya Past caldera)形成噴火のテフラの発見. 日本火山学会 2013年秋季大会, 2013年9月30日, 猪苗代町体験交流館「学びいな」(福島県)
- ③ Nakagawa, M., Kitagawa, J., Wakasa, H., Takeda, K., Amma-Miyasaka, M., Hasegawa, T., Kishimoto, H., Simultaneous generation of multiple silicic magmas and their zoned magma chamber related to a caldera-forming eruption: Case studies of Shikotsu and Mashu volcanoes, Japan,

IAVCEI 2013 Scientific assembly, 2013年7月23日, 鹿児島県文化交流センター(鹿児島市)

- ④ Takahashi, H., Aoyama, H., Matsushima, T., Goto, A., Miyamachi, H., Nakagawa, M., (他3名), Tiltmeter observation in Klyuchevskaya volcano, Kamchatka. IAVCEI 2013 Scientific assembly, 2013年7月23日, 鹿児島県文化交流センター(鹿児島市)
- ⑤ Kuvikas, O., Nakagawa, M., Avdeiko, G., Origin of spatial variations of volcanic rocks from northern Kurile Islands: Geochemical studies of active volcanoes on Paramushir, Atlasvoa, Antsiferova islands and submarine volcanoes. IAVCEI 2013 Scientific assembly, 2013年7月23日, 鹿児島県文化交流センター(鹿児島市)
- ⑥ Nakagawa, M., Nishimoto, J., Miyamoto, T., Taniguchi, H., The structure of magma system and its eruption processes during the 10th century eruption of Baitoushan volcano at the border of China and N Korea. AOGS-AGU Joint Assembly 2012, 2012年8月17日, Resorts World Convention Centre (Singapore).
- ⑦ 中川光弘, 小杉安由美, 長谷川健, 石井英一, 石塚吉浩. 北海道における後期更新世の火山活動の時空変遷と関連テクトニクス: 火山活動の長期予測に向けて. 地球惑星科学関連学会2012年連合大会, 2012年5月21日, 幕張メッセ国際会議場(千葉).

[図書] (計4件)

- ① 石塚吉浩, 中川光弘, 藤原伸也, 十勝岳火山地質図(1:30000)および説明書. 2010, 地質調査所.

[産業財産権]

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

中川 光弘 (NAKAGAWA Mitsuhiro)
北海道大学・大学院理学研究院・教授
研究者番号: 50217684

(2)研究分担者

高橋 浩晃 (TAKAHASHI Hiroaki)
北海道大学・大学院理学研究院・准教授

研究者番号: 30301930

松島 健 (MATSUSHIMA Takeshi)
九州大学・大学院理学研究院・准教授
研究者番号: 40222301

宮町 宏樹 (MIYAMACHI Hiroki)
鹿児島大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 30182041

(3)連携研究者

長谷川 健 (HASEGAWA Takeshi)
茨城大学・理学部・准教授
研究者番号: 00574196

青山 裕 (AOYAMA Hiroshi)
北海道大学・大学院理学研究院・助教
研究者番号: 30333595

石塚 吉浩 (ISHIZUKA Yoshihiro)
産業技術総合研究所・地質情報研究部門・グループリーダー
研究者番号: 80356443

宮城 洋介 (MIYAGI Yousuke)
防災科学技術研究所・地震火山防災研究ユニット・研究員
研究者番号: 40435970