

平成 21 年 5 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18540420
 研究課題名（和文） 熱水流動を考慮した火山体磁化構造時間変化モデルの構築
 研究課題名（英文） Attempts to construct spatiotemporal variation models for magnetization structure of volcanic massif accounting for hydrothermal fluid flow
 研究代表者
 神田 径（KANDA WATARU）
 京都大学・防災研究所・助教
 研究者番号：00301755

研究成果の概要：マグマ貫入後の火山体内部の熱水流動のシミュレーションを行い、得られる温度圧力分布から磁化分布を見積もることによって、地表での地磁気がどのように変化するかを数値的に評価した。期待される地磁気変化に大きく影響を与えるパラメータは、母岩の浸透率とマグマ貫入の深さであった。また、口永良部島火山およびインドネシアメラピ火山で観測された火山性磁場変動に対し、それぞれ熱磁気効果および圧磁気効果での説明を試みた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,300,000	0	1,300,000
2007年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	600,000	3,900,000

研究分野：火山電磁気学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学(4401)

キーワード：火山、地磁気、熱水系、モデル化、磁化構造

1. 研究開始当初の背景

(1) 火山体浅部の熱的状态を把握するために、多くの活動的火山で全磁力観測が行われるようになった。これは、火山体を構成する岩石が、高温の熱の供給によって過去に獲得した磁化を失う性質を利用したものである。しかしながら、火山活動に伴う地磁気変化の主原因には、この熱磁気効果の他にも、圧磁気効果および界面動電効果の二つが考えられる。観測データから三者を区別する術はなく、圧磁気効果については、噴火時における短時間の可逆的变化など特別な場合を除いて評価されることは稀であった。

(2) 解釈のための熱磁気効果のモデルは、多くの場合、完全消磁した球などの非常に限定的なモデルが用いられ、観測データを切り出した符号付変化量を説明することによってモデル化されている。しかし、これは時系列で観測しているデータを積分値でしか見えないことに他ならず、変動データの大部分は無視されていることが多かった。

(3) 小型で高性能の測定装置が普及したことにより、活動的火山で比抵抗構造探査が精力的に行われるようになった。その結果、火山体浅部には、地下水を多量に含むと考えられ

る低比抵抗層が普遍的に存在し、多くの場合、熱源からの熱供給を受けて火山体内部に熱水対流系が発達していると推測される。火山活動に変化があった場合、安定的に存在していた熱水流動系も当然その擾乱の影響を受けるはずであり、周囲の岩石のもつ磁化の値にも影響が及ぶことが期待された。

2. 研究の目的

(1) 本研究の最終目標は、火山活動に伴って観測された地磁気全磁力変化を時系列で定量的に説明することにある。火山体を構成する岩石には、高温の熱の供給によって過去に獲得した磁化が失われる性質があり、これまで多くの火山で観測された地磁気変化が熱磁気効果として解釈されている。しかし、火山活動に伴う地磁気変化の主原因には、他にも圧磁気効果や界面動電効果が考えられ、地磁気変化の原因を熱磁気効果のみに求める現状は、地下の熱的狀態を過大評価あるいは過少評価している危険性がある。

(2) 本研究では、火山体内部の熱水流動に着目する。熱水流動シミュレータを利用し、安定状態にある熱水対流系に何らかの擾乱が与えられた後の、火山体内部の温度・圧力変化に基づいて岩石磁化の分布を計算し、その時間変化から熱磁気効果、圧磁気効果、界面動電効果に起因する地表での地磁気変化を評価することを目指す。モデルの基礎となる火山活動や物理パラメータについての検討を十分に行った上で、実際に取得されたデータの時系列フィッティングを試み、定量的な解釈を行うことを達成目標とした。

3. 研究の方法

(1) 熱水流動シミュレータが計算する火山体内部の流体の温度・圧力分布の時間変化を用いて、火山体内部の磁化分布の時間変化を推定し、地表で期待される磁場変化のシミュレーションを行う。その基礎となる熱水流動シミュレータとして、米国地質調査所が開発した HYDROTHERM ver.2.2 (Ingebristen and Hayba, 1994) を選定した。間隙流体として純水しか扱えず、潜熱やマグマ性流体の寄与が考慮されないという制限はあるが、温度が 1200°C、圧力が 1000 MPa までの高温高圧の状態変化が扱える利点があるので、マグマ貫入などのイベント後の流動分布を計算することができる。

(2) 温度については、間隙流体と周辺岩石が熱平衡にあると仮定できるので、間隙流体の温度=岩石の温度とできる。岩石の温度が決まれば、熱磁気曲線から磁化の値が決められる。熱磁気曲線は、研究開始当初は温度に関する三次式で近似していたが、実際に研究対象とする安山岩質の火山（口永良部島火山）

で採取した最近の噴火による火山岩を熱消磁実験することにより作成した。

(3) 圧力に変化があった場合、岩石の受ける応力変化で磁化変化が発生する。一方、熱水流動シミュレータが計算するのは間隙流体圧の分布であるので、これを有効応力の概念を用いて岩石に作用する応力分布に焼きなおす必要がある。有効応力の分布は、Iverson and Reid (1992) による 2 次元 seepage-force approach の手法と Rice and Cleary (1976) の理論に基づいて、3 次元有効応力平衡方程式をたて、有限要素法を用いて数値的に解いた。地形の影響を評価するため、8 節点 6 面体のアイソパラメトリック要素を使用することとし、任意形状を表現できるようにした。数値の精度は、Savage et al.,(1985) と Liu and Zoback (1992) による Gravitational stress の解析解と比較することで検証した。

(4) 熱水流動のシミュレーションは、火山を想定しているので、二次元軸対称モデルを採用した。地表における熱磁気効果の計算は、地形を考慮するため、円錐台の磁場公式 (Rikitake, 1951) を一般化した笹井 (1991) の手法を用いた。すなわち、温度分布から推測される磁化分布をもとに、一様磁化した円錐台の重ね合わせで地表磁場を計算した。有効応力場の計算には、膨大な計算メモリが必要となるため、熱水流動モデルの対称性を利用して一象限のみの計算を行い、最後に、線形ピエゾ磁気効果 (Sasai, 1980) から全ての象限に対する磁化変化の分布を求め、Sasai & Ishikawa (1978) の手法を用いて、地表での磁場変化を求めた (図 1)。任意形状要素に対する磁気ポテンシャルを求めるために、Bott (1963) が定式化した、任意形状の磁性体による磁気ポテンシャルの計算式を応用した。

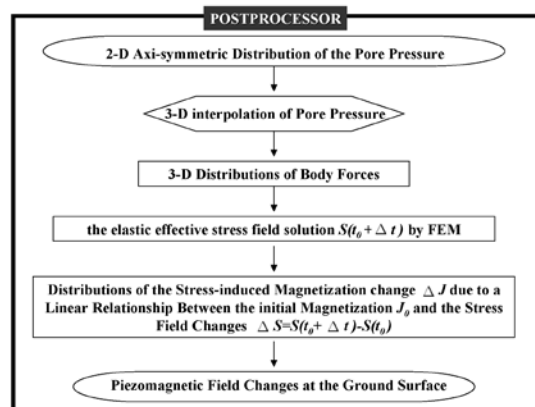


図 1: 熱水流動シミュレータの出力からピエゾ磁気効果を計算するフローチャート。

(5) 数値シミュレーションは、時刻ゼロでマグマが貫入し、定常的な熱水流動系に擾乱を与えた後の地表における磁場変化を計算する。ケーススタディとして、マグマ貫入の深

さ、母岩の浸透率、キャップロックの有無、などについて多くのシミュレーションを行い、期待される火山性磁場変動の時間変化を計算した(図2)。その後、実際の火山で観測された磁場変動を定性的に説明することを試みた。

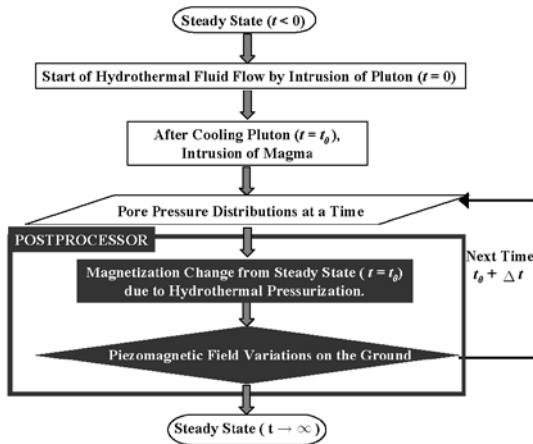


図2: 熱水流動に基づく火山性磁場変動の評価のための全体の計算手順の一例。ポストプロセッサ部分の計算コードを新たに開発した(図1)。

4. 研究成果

- (1) 母岩の浸透率、マグマ貫入の深さをキーパラメータとしてケーススタディを行った。その結果、より浅くマグマが貫入の方が、地磁気変化が大きく、地磁気変化が観測される時間が短いこと、また、母岩の浸透率が小さい方が、地磁気変化が大きく、地磁気変化が観測される時間が長いことがわかった。これは、熱水循環系が広い範囲で長期にわたり維持されるためである。観測可能なピエゾ磁気異常を発生させるためには、低い母岩の浸透率(10^{-15}m^2)を仮定する必要がある。
- (2) 火山体浅部では、長期間熱水流体に晒されることによって、熱水変質帯が形成される場合が多い。変質帯は低浸透率であるので、熱水上昇流にとっては、キャップロックとして作用するため、その直下には圧力の高まる領域が形成されることが期待される。そこで、低浸透率のキャップロックの有無によって期待される地磁気変化の違いが現れるかどうか調べた。その結果、キャップロックが存在する場合は、存在しない場合と比べて地磁気変化が観測される時間が長く、分布も異なったが、地磁気変化量自体には大きな変化はみられなかった。
- (3) 口永良部島火山で2001年頃から観測されている火山性地磁気変化の要因を探るため、山頂部で採取した11岩石について、自然残留磁化(NRM)と帯磁率、および段階熱消磁によるそれらの温度依存性を測定した(表1)。すべての測定は、残存磁場50nT以下の

磁気遮蔽室で行った。その結果、NRMは05~18A/mの値を示したが、5A/m以上の大きなNRMを持つものは3岩石しかなく、残りは2A/mより小さい値を示した。小さなNRMを示す岩石のいくつかは熱水変質を受けていた。また、測定した帯磁率から誘導磁化を計算したところ、弱いNRMを示した岩石の中には、NRMと同程度の誘導磁化を持つ($Q=0.4\sim 1.3$)ものがあった。一方、NRMの大きな岩石は、誘導磁化は小さいことがわかった($Q=4.3\sim 12$)。

sample	n	J_r	err	χ	J_i	Q	J_t
SD-2	7	17.89	0.38	41.3	1.51	11.8	19.4
SD-SW	4	6.44	0.79	1.52	0.56	11.5	6.99
SD-1	3	5.20	1.16	32.7	1.20	4.34	6.40
SD-4	6	1.45	0.90	34.4	1.26	1.15	2.71
FD-1	5	0.53	2.02	3.57	0.13	4.04	0.66
SD-W	4	1.93	1.14	2.14	0.78	2.46	2.72
SD-3	6	1.77	1.05	5.38	0.20	9.00	1.97
FD-2	4	1.27	1.36	27.5	1.01	1.26	2.27
SD-E	4	0.95	1.49	3.68	1.35	0.70	2.30
FD-21	4	0.74	1.39	19.2	0.70	1.04	1.44
SD-C1	6	0.61	1.19	43.6	1.60	0.38	2.20

表1: 岩石サンプルに対するNRM(J_r A/m)および誘導磁化(J_i A/m)の測定値(サンプル数での平均値)。n: 1岩石あたりのサンプル数。err: 相対誤差(%). χ : 帯磁率(10^{-3}SI). Q: ケーニヒスベルガー比(J_r / J_i). J_t : 全磁化(A/m)。

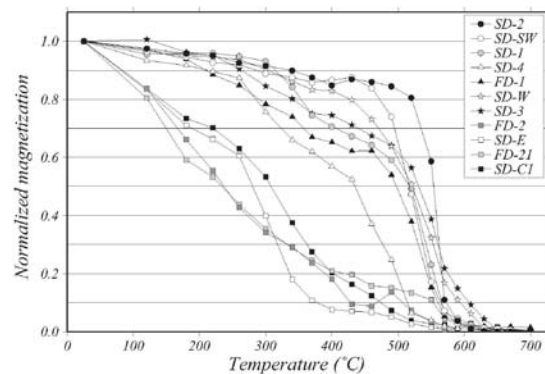


図3: 初期磁化で規格化した11岩石の熱消磁曲線。

これらの岩石に対して段階熱消磁実験を行った結果を図3に示す。キュリー一点温度により大きく3つのグループ(磁鉄鉱に富む岩石(●)、チタン磁鉄鉱に富む岩石(■)、両者の中間(▲★))に分けられる。噴火時に高温酸化を受けたと考えられる岩石(★)も見られた。チタン磁鉄鉱に富む岩石(■)は、120°Cで約20%、400°Cでは80%以上の磁化を失うが、NRMは0.6 - 1.2 A/mと小さいため、完全消磁した

としても 2 A/m の磁化変化は起こせない。一方で、磁鉄鉱に富む岩石(●)は、5-18 A/m の NRM を持つことから、期待される磁化変化を得ることは可能で、500°C程度まで加熱される必要があることがわかった。この温度は、火山ガス観測から推定されている地下浅部の温度 (450-550°C) と整合する。この結果をもとに、口永良部島において 2001 年より観測された火山性地磁気変動に対し、熱磁気効果での説明を試みたところ、2003 年以降、火口直下深さ 300m にある高温領域が拡大する、というモデルに良い一致を見せた(図 4)。

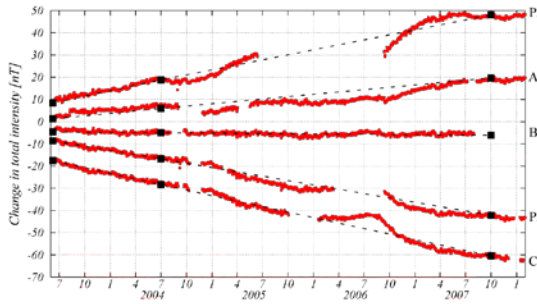


図 4: 口永良部島において観測された火山性地磁気変動 (赤色) と熱磁気効果によるフィッティング (黒色)。

(4) メラピ火山では、1992 年の噴火に先立つ磁場変動が圧磁気効果であると解釈されていたが、これを再現するシミュレーションを試みた。その結果、観測された火山性地磁気変動を説明するためには、深さ 8km 程度に想定される深部マグマ溜りへのマグマ貫入のみでは説明できず、深さ 1.5km 程度の浅部マグマ溜りへも貫入する必要があることが示された。

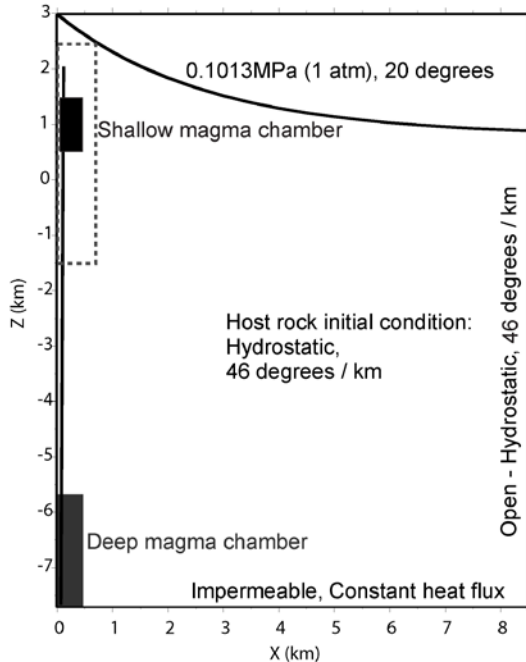


図 5: メラピ火山における熱水流動モデルのジオメトリと初期・境界条件。

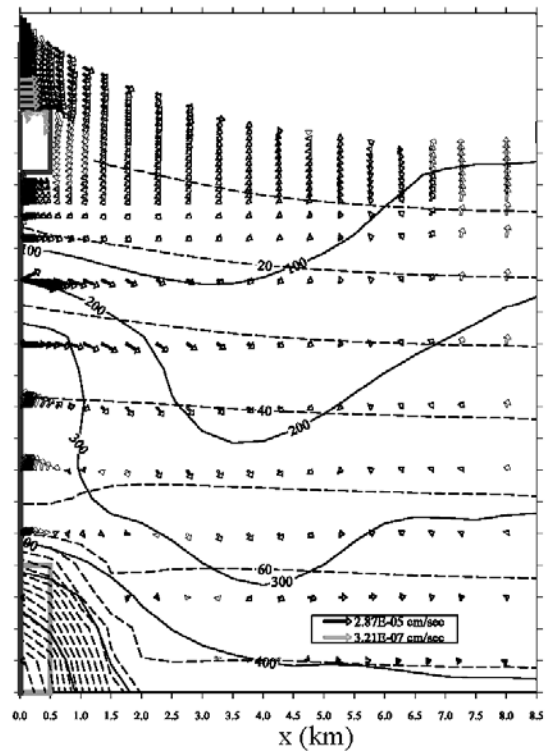


図 6: メラピ火山における計算結果の一例。マグマ貫入後 1.4 年経過後の温度、圧力、流体流量の分布。実線が温度(°C)、破線が間隙流体圧力(MPa)、矢印は流体の流速ベクトル(灰色は蒸気相)を示す。

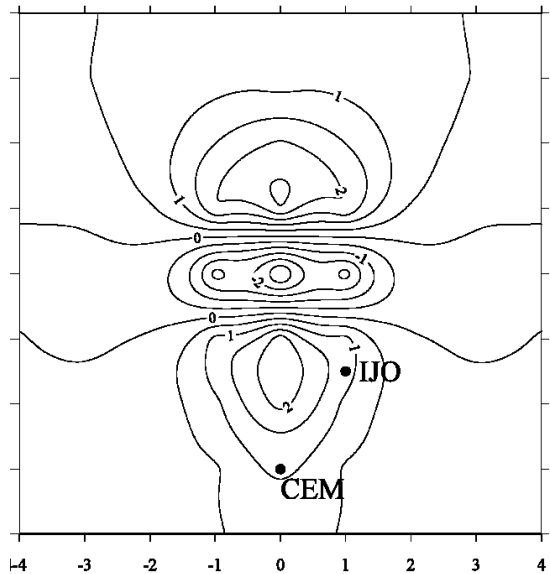


図 7: マグマ貫入後 1.4 年経過後 (図 5 の温度・圧力分布に対応) に地表で期待されるピエゾ磁気異常の分布。単位は nT。横軸は km。CEM と IJO は火山性地磁気異常が観測された地磁気観測点 (Zlotnicki and Bof, 1998)。

(5) 一方で、問題点も浮かび上がった。熱水流動シミュレータ Hydrotherm は、熔融マグマが冷却・結晶化する際の潜熱の発生を扱えない。また、結晶化に伴う火山流体の放出

(脱ガス)も考慮されていない。両者とも、マグマ貫入後の冷却過程において無視できない重要因子である。前者については、Hayba and Ingebritsen(1997)で提案されたように、熱容量を温度の関数とし、マグマのソリダスより高い温度では、熱容量を通常の2倍にすることで対応した。脱ガスについては、マグマ貫入直後に多くの流体が放出されることが期待されるが、Hydrothermでは任意の流体ソースを作ることはできないものの、流量を時間変化させることが難しい。また、純水しか扱えないという制限もあり、現実的な脱ガス過程を再現することは困難である、との結論に達した。

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 6 件)

- ① Fujii, I. and W. Kanda, New procedures to extract geomagnetic field variations caused by volcanic activity, *Geophysical Journal International*, Vol.175, 400-414, 2008, 査読有
- ② 大久保綾子, 神田 径, 中塚 正, 大熊茂雄, 地形の影響を考慮した熱水流動に伴う熱磁気・圧磁気効果モデルの開発, *CA研究会 2008年論文集*, 67-72, 2008, 査読無
- ③ Okubo, A., W. Kanda, and K. Ishihara, Numerical simulation of volcanomagnetic effects due to hydrothermal activity (2), *京都大学防災研究所年報*, 50C, 157-164, 2007, 査読無
- ④ 大久保綾子, 神田 径, 石原和弘, 熱水流動に伴うピエゾ磁気効果のモデリング, *CA研究会 2007年論文集*, 167-174, 2007, 査読無
- ⑤ Okubo, A., W. Kanda, and K. Ishihara, Numerical simulation of volcanomagnetic effects due to hydrothermal activity, *京都大学防災研究所年報*, 49C, 211-217, 2006, 査読無
- ⑥ 大久保綾子, 神田 径, 石原和弘, 熱水流動を考慮した火山体磁化構造時間変化モデル, *CA研究会 2006年論文集*, 89-93, 2006, 査読無

[学会発表] (計 8 件)

- ① 大久保綾子, 神田 径, 熱水流動に伴うピエゾ磁気効果の評価モデルの開発とメラピ火山への適用, *日本火山学会 2008年秋季大会*, 2008年10月11日, 岩手大学(盛岡市)
- ② Okubo, A., W. Kanda, T. Nakatsuka, and S. Okuma, Numerical experiments

on geomagnetic variations due to the piezomagnetic and thermomagnetic effects associated with hydrothermal fluid circulation, *IAVCEI 2008 General Assembly*, 2008年8月19日, アイスランド大学(レイキャビク市)

- ③ 大久保綾子, 神田 径, 中塚 正, 大熊茂雄, 地形の影響を考慮した熱水流動に伴う熱磁気・圧磁気効果モデルの開発, *日本地球惑星科学連合 2008年大会*, 2008年5月26日, 幕張メッセ(千葉市)
- ④ 大久保綾子, 神田 径, 中塚 正, 大熊茂雄, 熱水流動に伴うピエゾ磁気効果の数値シミュレーション(2), *日本火山学会 2007年秋季大会*, 2007年11月18日, 島原復興アリーナ(島原市)
- ⑤ Okubo, A. and W. Kanda, Piezomagnetic modeling associated with hydrothermal pressurization, *IUGG XXIV General Assembly*, 2007年7月5日, ペルージャ大学(イタリア)
- ⑥ 大久保綾子, 神田 径, 石原和弘, 熱水流動に伴うピエゾ磁気効果の数値シミュレーション, *日本地球惑星科学連合 2007年大会*, 2007年5月21日, 幕張メッセ(千葉市)
- ⑦ Okubo, A., W. Kanda, and K. Ishihara, Numerical simulation of volcanomagnetic effects associated with hydrothermal activity, *AGU Fall meeting*, 2006年12月5日, モスコーンセンター西(サンフランシスコ市)
- ⑧ 大久保綾子, 神田 径, 石原和弘, 熱水流動による火山地磁気効果の数値的アプローチ, *日本地球惑星科学連合 2006年大会*, 2006年5月16日, 幕張メッセ(千葉市)

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
神田 径 (KANDA WATARU)
京都大学・防災研究所・助教
研究者番号: 00301755
- (2) 研究分担者
【2006-2007年度】
大久保綾子 (OKUBO AYAKO)
産業技術総合研究所・地質情報研究部門・産総研特別研究員
研究者番号: 80420404
- (3) 連携研究者
【2008年度】
大久保綾子 (OKUBO AYAKO)
産業技術総合研究所・地質情報研究部門・産総研特別研究員
研究者番号: 80420404