

京都大学における空中磁場観測への取り組み

宇津木 充¹⁾

1. はじめに

京都大学ではヘリコプターを用いた火山域での空中磁気観測に取り組んでいる。これまでに観測・解析システムの構築を進め、様々な火山において観測を実施してきた。

元々、京都大学では地上に設置したプロトン磁力計での連続磁場観測を実施し、火山活動に伴う磁場変化を検出するための観測を行っていた。

一般に、地下の岩石には磁石の性質(磁化)を持ったものがある。特に火山には磁化の強い岩石が多く存在する。ところで、岩石の磁化は温度依存性があることが知られている。一般に、岩石は暖められ温度が高くなるとその磁化強度が弱まり、逆に温度が低くなると強くなる。この性質から、火山活動の推移に伴い地下の温度が変化すると、温度変化域周辺の岩石磁化が変わり磁場変化が生じる。こうしたことから、地上で磁場を連続的に観測し、その時間的な変化を捉えることで、地下の磁化変化を見積もり、さらにその情報を温度変化に換算することで地下温度状態をモニタリングすることが可能となる。

しかし、磁化変化を温度変化に換算するためには元々地下の岩石がどの程度の磁化を有していたかを知らなければならない。こうした情報を得るには、観測対象となる地域を含む広範な領域で磁場観測を行う必要があるが、それには膨大な労力が必要となる。

さらに、磁場は減衰が激しいため、火山活動に起因した磁場時間変化を観測するためには、火山の活動域の極近傍に連続点を設置しなければならない。しかも磁場はポテンシャル量なので、地下のどの辺りで、どの程度の磁化変化が起こったかを見積もるためには複数の観測点を設置しなければならない。しかし、火山の活動域はアクセスが難しいことが多く、

そのため多点の連続点設置には多大な労力を要する。さらに活動域近傍は、火山ガスなどの影響で計測機器を連続稼働させるには劣悪な環境にあることが多く、そのため観測点の維持も極めて難しくなる。

こうしたことから我々は、空中磁気観測の観測システムの構築を始めた。空中磁気観測を行うことができれば、広範な領域の磁場の空間的分布を短時間のうちに、少ない労力で得ることができる。

ところが、実際観測システムをいざ構築しようとしたところ、様々な問題があることが分かった。

火山域における観測では、低高度で稠密な観測を行う必要があるため、ヘリコプターを用いた磁場観測が多く行われている。その際、ヘリコプターの機体自体が磁性を持つので、その影響を避けながらどのように磁力計をヘリコプターに搭載させるかが問題になるが、その方法の一つがスティンガー方式と呼ばれるものになる。この方法では、ヘリコプターに長い竿を設置し、その先に磁力計センサーを設置する。竿の分センサーが機体から離れるので、これにより機体磁気の影響を軽減させることができる。しかし、そうした計測システム構築について航空会社に問い合わせたところ、機材を設置するにはヘリコプターの機体改造が必要で、なおかつ国の厳しい審査も経なければならない。スティンガー方式の観測を行うには、殆どそれ専用のヘリコプターを持たなければならない、驚くほどお金が掛かるものであることを知らされた。

それでは、と、今度はバード方式のシステム構築を模索した。この方式では、バードと呼ばれる小型の曳航体に磁力計を搭載し、それをヘリコプターで曳航させながら磁場を計測する。磁力計をヘリコプター本体から離すことができるので、機体磁気の影響を避けることができる。こうした観測用バードは商品化され購入することもできたのだが、どのメーカーでも受注

1) 京都大学 大学院 理学研究科 附属地球熱学研究施設 火山研究センター

キーワード: 空中磁気観測, 岩石磁気, 磁化構造解析, 磁場時間変化



第1図 京都大学火山研究センターの観測バード。
様々な試行錯誤の結果、水道管に使われる塩化ビニルパイプをベースに、手作りで磁場観測用バードを完成させた。

生產品でコストも高く、当時の我々の予算では購入することが難しいものばかりだった。

そのため、前京都大学火山研究センター教授の田中良和先生は自分達でバードを作ってしまうと模索を始めた。様々な試行錯誤、幾度も失敗を経て、最終的に水道管に使われる塩化ビニルパイプをベースに、木材やプラスチック、アルミニウムなど非磁性の素材でバードを完成させた(第1図)。部品の欠落などが起これば惨事を引き起こす危険もはらむため、航空会社の方々のご協力の下、数度にわたる安全試験・運用試験も行い、ついに2000年8月、初めての实地観測を阿蘇火山で行った。購入すれば数百万円を軽く超えるバードも、自分達で作ることで数万円のコストで作ることができた。外国の方は「日本の家屋が木と紙でできている」と驚く、という笑い話があるが、「京都大学のバードは水道管でできている」とい

つも驚かれる。しかし、我々の手作りのバードはこれまで、阿蘇山、口永良部島、岩手山、雲仙、草津白根山、九重山、浅間山、桜島、ホワイトアイランド(ニュージーランド)など、国内外の火山で調査を行い、実績を積み上げてきた。以後、これまでの観測から得られた成果の一部を紹介する。

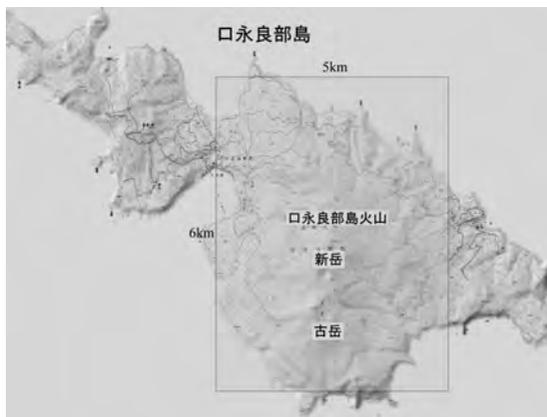
2. 口永良部島火山における空中磁気観測

ここでは、火山体の磁化構造を求めるために京都大学が行った観測の一例として、2001年1月に口永良部島火山における空中磁気観測について紹介する。

口永良部島は、屋久島の西14kmに位置する火山島で、記録に残されている最も古い噴火は1841年とされる。以後、数年から数十年の間隔で新岳山頂火口及びその東側の割れ目において水蒸気爆発が発生しており、近年では1933年に始まる噴火活動で新岳南東部の七釜集落が全滅し死傷者30名以上を出す災害が発生している。また、最も新しい活動では1980年9月に新岳火口東側の割れ目において水蒸気爆発が発生した。この活動以降現在まで噴火は見られないが、火山性地震の活発化等が観測されており依然注意を要する火山である。こうしたことからこの火山では、京都大学桜島火山活動研究センターなどにより、地震観測、GPS観測等、火山活動の監視が行われている。また磁場連続観測点も設置されており、地下の温度状態のモニタリングも行われている。我々の観測では、磁場の時間変化から地下温度状態を議論する際に不可欠な火山浅部の磁気構造を把握することを目的として2001年1月に口永良部火山における空中磁気観測を行った。このフライトに関しては、鹿児島県防災航空隊の全面的な協力の下に、消防・防災ヘリコプター「さつま」を使用させていただいた。

2.1 観測の概要

磁気観測の領域は、口永良部火山を含む東西5km、南北6kmの領域(第2図)で南北19本(約250m間隔)、東西10本(約500m間隔)の計29本の側線について高密度な磁場観測を行った。総飛行距離はおよそ110km、フライト時間は2時間、フライトの際の対地高度は、南北側線が地形に沿って対地200m、東西側線は海拔500mの等高度を目安とした。



第2図 口永良部島火山における空中磁気観測実施領域。

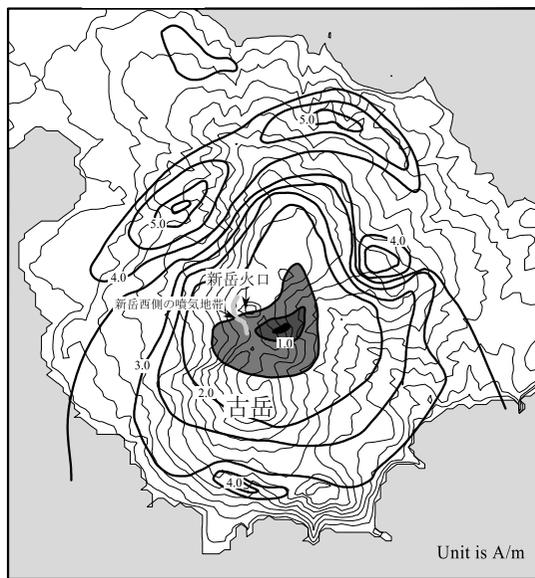
ヘリコプターの機体磁気の影響を避けるため、バードをヘリコプターから40m吊り下げて測定を行った。観測された磁場の値には、地球外部に原因を持つ短周期の磁場時間変化が重なって観測されており、地下構造を反映した磁気異常分布を調べるためにはそれらの影響を除去する必要がある。地球外部起因の磁場変化は、ある程度広域で同様な変化が観測される性質を持つことから、島内にリファレンスとなる磁気観測点を設け、空中観測から得られた磁場値と単純差をとることで短周期の時間変化の除去を行った。また磁場観測の際のバード位置の補足のために、バード内にGPS (Ashtech社製Z-Survey) を搭載し、測定サンプリング1秒で計測を行った。

2.2 インバージョンによる磁化構造解析

こうして得られたデータを元に、インバージョンにより火山体浅部の岩石磁化の分布を求めた。この解析では火山体を角柱に分割し、各々の角柱が一様な磁化を持つと仮定する。その上で観測データを元に各々の角柱の磁化強度を求めた。1つの角柱のディメンションはNS=150m, EW=250mとした。各ブロックの磁化方向は、この地域の地磁気方向 (dip=45deg., inclination=N8E deg.) に一致していると仮定し、磁化の強度のみを未知変数とした。

この結果得られた口永良部島火山の磁化分布を第3図に示す。

この結果から、山体のふもとの部分で磁化が強く、山頂に向かい弱くなる傾向が見られる。口永良部島火山では、山頂部で山体岩石の変質がかなり進んで



第3図 インバージョンから求められた口永良部島火山の浅部磁化分布。実線は求められた磁化分布のコンターライン、コンター間隔は0.5A/m。

おり、磁化のこの傾向はこうしたことを反映しているものと考えられる。また、山体北側斜面に最も磁化の強い領域が見られるが、表層地質からはこの領域に溶岩流など、対応する磁化の強い構造等は見られない。あるいはこの付近が山頂部の熱源による熱変質作用が及ぶ領域の限界、ひいては熱水対流系の作用域の北限に当たっているといったことが考えられる。また、山頂の新岳火口の南東側で特に磁化が弱くなっているのが見られる。現在、噴気等の顕著な表面現象が見られるのは新岳の西側付近であり、また、地震活動の震源の水平位置も新岳よりも西側に偏っていて、今回得られた弱磁化域とは位置的には一致しない。しかし、本年度口永良部島で行われた地殻変動集中観測の結果、山体全体が膨張するセンスの地殻変動が観測されており、その力源の水平位置は新岳南東側の磁化の弱い領域に一致している (井口ほか, 2001)。また、深さもごく浅い(300~500m)位置に求められている。こうしたことから、新岳南東の弱磁化域は熱源の存在を示唆するものである可能性が考えられる。口永良部島火山の熱源は新岳の東側に存在し、そこから西側に地下の亀裂などを通して供給されており、その際の副次的な熱水活動で微小な地震

が発生している、といったシナリオを考えることもできるかもしれない。いずれにしても、このように地殻変動に対して、航空磁気観測から非常に調和的な結果が得られることは大変珍しく、ヘリコプターを用いた低高度・高密度の磁場観測の潜在力の高さを物語っていると考えられる。

3. 空中磁気観測からの磁場時間変化検出の試み ～九重火山における空中磁場観測～

この節では、火山活動に伴う磁場時間変化を検出することを目的とした九重火山における空中磁気観測について紹介する。

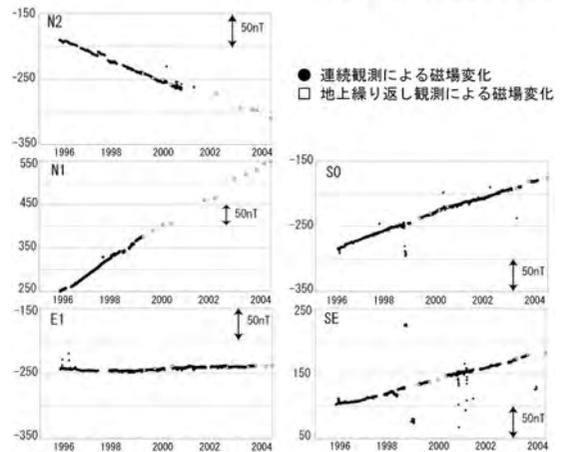
九重火山では、1995年10月に水蒸気爆発が発生した。この火山で噴火が生じたのは257年ぶりのことである。噴煙は上空約1,000mに達し、降灰は大分県久住町や熊本県南小国町のほか、南西に約60km離れた熊本市でも観測された。この活動で、九重連峰の一つ、星生山の東部に、東西に並んだ火口列が生じ、そのうちの幾つかの火口では高温の水蒸気を長期にわたって噴出し続けた。京都大学では、この噴火直後から、地下の温度状態の推移を把握しようと星生火山山麓及びその東の九重硫黄山周辺で地上観測による地磁気全磁力の連続・繰り返し観測を行ってきた。九重火山における磁場観測からは、硫黄山周辺において最大で年変化率30nTを超える顕著な地磁気の経年的変化が観測された(第4図)。

その全磁力変化の傾向は、硫黄山の北側で減少、南側で増加していることから、硫黄山の地下で冷却・地下岩石が帯磁する現象が進行していると推定された。帯磁源の位置は、新火口列の北側、硫黄山南西麓付近の深さ200mの位置に求められ、半径230mの等価球領域が、200℃の冷却によって2A/mの磁化を獲得したと推定できるので、冷却率に換算すると約140MWと推察されている(田中ほか, 1996; 坂中ほか, 2001; 橋本ほか, 2002)。

この火山における磁場時間変化についてその空間的な広がりを捕らえることを目的に、京都大学では2004年に九重火山において空中磁気観測を行った。九重硫黄山周辺では、噴火後の1996年9月、気象庁・気象研究所がヘリコプターを用いた空中電磁探査を実施している(山本ほか, 1996)。この時期から2004年までの間に、地上での磁場変化は最大で



○は京都大学の地磁気連続観測点



第4図 九重硫黄山周辺における地磁気全磁力変化。
九重硫黄山周辺では、1995年の噴火直後からほぼ直線的な全磁力変化が観測されている。硫黄山西側の噴気地域を中心にして、北側で減少(N2)、南側で増加(N1, S0, SE)しており、噴気地域の冷却に伴い岩石が磁化を獲得していることを示している。N1での変化量は300nTに達する極めて大きなものである。

250nTを超える極めて大きなものとなる。従って1996年のデータとの比較から、磁場変化を検出できないかと考えた。

3.1 空中磁場観測の概要

2004年12月の空中磁気観測領域は、九重硫黄山を含む東西2km、南北2kmの領域(第5図)で、南北方向の40測線(東西方向のスペーシング100m)について測定を行った(第5図)。使用した磁力計は、高速サンプリングが可能なG858セシウム磁力計(Geometrix社

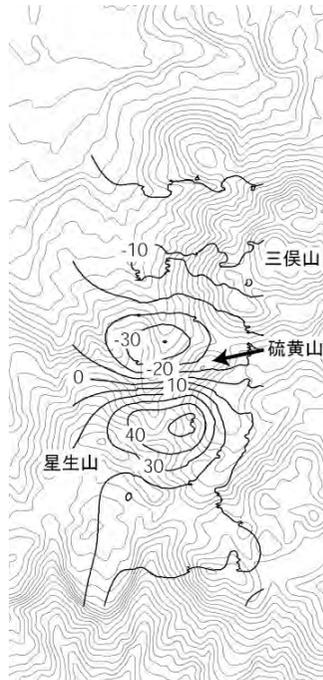


第5図 2004年12月の空中磁気観測実施領域.

製)を用いた。ヘリコプターの機体磁気の影響を軽減するため磁場センサーはバードに収納し、ヘリコプターから約40m吊り下げた。またバード尾部にはGPSを取り付けた。磁場の測定サンプリングは0.1秒、GPSの測定間隔は1秒、飛行高度は90m(バードの対地高度50m)を目安とした。また、硫黄山の2km北側の長者原ヘリポートにリファレンス磁気点を設置し、飛行中の地球磁場時間変化を除去するとともに、地上GPSをも設置して、バードGPSとのディファレンシャル処理により正確な飛行航跡を決定した。位置決定精度は水平方向で数センチ、高さ方向で1m以下であった。総飛行距離は約100km、測定点数は85,000点、ヘリコプターの平均時速は約60km/hであった。

3.2 データ解析と過去のデータとの比較

磁場時間変化の解析には、全磁力の上方接続と呼ばれる手法を応用した。一般に、面的に得られた全磁力データを用いることで、磁場観測面周辺における磁場の値を推定することができる。このテクニックは等価磁気源法 (equivalent anomaly method) と呼ばれている (Dampney, 1969 ; Nakatsuka, 1981 ; Hansen and Miyazaki, 1984 ; Nakatsuka and Okuma, 2006など)。この手法では、まず実際の磁化分布とは



第6図 繰り返し空中磁気測定による九重火山の磁場変化.

今回の測定磁場から硫黄山周辺地域の磁場三次元空間分布を求め、1996年の気象研究所による空中磁気測定との差を求めた。硫黄山の西側を中心として北側で負、南側で正のダイポールの磁気異常が検出された。

無関係な「等価」な磁気源を導入する。次にその磁気源の強度を、観測値を良く表すように適当に求める。そうして求められた等価磁気源が磁場観測面周辺に作る磁場は、実際の磁場分布と良く一致することが知られている。

我々の時間変化検出の解析ではこの方法を応用し、1度目の観測が行われた1996年の磁場分布を表現する等価磁気源と、2004年までの間に生じた時間変化項を表現する等価磁気源という2種類の磁気源を導入した。その上で、1996年、2004年の両者のデータを用い、これら2種の等価磁気源を同時に求めるという手法を適用した。

この解析から、硫黄山西側を中心として北側で全磁力の減少、南側で増加のダイポールの磁場変化が検出された(第6図)。この変化は地上観測の結果と整合的で、変化量は最大40nT程度、地上50m程度上空で観測した場合に期待できる変化量としては、

オーダー的に一致している。このように、今回の繰り返し空中磁気観測との比較解析によって、九重火山における磁場の時間変化を検出できた。空中磁気観測の繰り返し観測で磁場の時間変化を検出した例は Nakatsuka *et al.* (2009) のほかには極めて少なく画期的なことと言える。

4. おわりに

本論で紹介したように京都大学ではこれまで、自作のバードを用い、火山における空中磁気観測を行ってきた。その観測結果を用い、火山体の構造調査のほかにも、磁場の時間変化検出といった新たな観測・解析技術の開発にも取り組んできた。特に時間変化検出の技術開発は重要な課題である。この観測・解析技術が実用化できれば、地上の定常観測点を維持するコストと時間を大幅に削減できることが期待される。また、従来の地上観測では少数の観測点から地下の現象を推定するしかなかったが、ヘリコプター等を利用した空中観測からは、空間的な測定密度の高いデータを容易に得ることができるため、より詳細な推定が可能になる。さらに、火山が活動的状態になり地上からのアプローチが困難な状況でも、無人ヘリコプターなどを用いれば観測を行うことも可能である。九重火山の観測では時間変化の検出に成功したが、より検出精度を高めるための技術開発を今後も進めていく必要がある。

文 献

- Dampney, C.N.G. (1969) : The equivalent source technique: *Geophysics*, 34, 39-53.
- Hansen R.O. and Y. Miyazaki (1984) : Continuation of potential fields between arbitrary surfaces: *Geophysics*, 49, 787-795.
- 橋本武志・宇津木 充・坂中伸也・田中良和 (2002) : 九重硫黄山の熱放出過程と地磁気変化, 京都大学防災研究所年報, 45, B, 617-625.
- 井口正人・山本圭吾・味喜大介・高山鐵朗・寺石真弘・園田保美・鬼澤真也・八木原 寛・平野舟一郎 (2001) : 口永良部島火山における地盤変動観測, 薩摩硫黄島・口永良部島の集中総合観測報告書, 99-108.
- Nakatsuka, T. (1981) : Reduction of magnetic anomalies to and from an arbitrary surface: *Butsuri-Tanko (Geophysical Exploration)*, 34, 332-340.
- Nakatsuka, T. and S. Okuma (2006) : Reduction of magnetic anomaly observations from helicopter surveys at varying elevations, *Exploration Geophysics*, 37, 121-128.
- Nakatsuka, T., M. Utsugi, S. Okuma, Y. Tanaka and T. Hashimoto (2009) : Detection of aeromagnetic anomaly change associated with volcanic activities -Application of generalized mis-tie control, *Tectonophysics*, 478, 19-33.
- 坂中伸也・田中良和・宇津木 充・橋本武志 (2001) : 九重硫黄山での地磁気変化による噴気火道の形状推定, 秋田大学工学資源学部研究報告, 22, 25-38.
- 田中良和・茂木 透・橋本武志・増田秀晴・行武 毅・大羽成征 (1996) : 九重硫黄山における電磁気観測, 平成7年度科学研究費研究成果報告書, 125-140.
-
- UTSUGI Mitsuru (2011) : Approach of the aeromagnetic observation in Kyoto University.

< 受付 : 2010年8月9日 >