

伊豆大島における全磁力観測の進展

浅利晴紀・長町信吾（気象庁地磁気観測所）

Recent progress in the magnetic observations on Izu-Oshima Island

S. ASARI and S. NAGAMACHI

Kakioka Magnetic Observatory, Japan Meteorological Agency

Abstract

We report the recent development of our new method to effectively eliminate the DI-effect by directly measuring the declination (D) and inclination (I) at the vicinity of a scalar magnetometer sensor. The practical utility of the method has been corroborated by using total intensity data (2007-2022) obtained from the twin sensors of Miharayama-Kita (MIK) magnetic station on Izu-Oshima Island. We also discuss the essential importance of acquiring both the D and I at every observation point of scalar magnetometer sensor, and present a prospect of producing a new declino/inclinometer that would make the measurement easy enough for any observers to perform.

1 はじめに

有史以前より大小の噴火を頻繁に繰返している伊豆大島は、明治以降も4度の中規模噴火を含むマグマ噴火・マグマ水蒸気噴火を発生させていることから、国内で最も活発に活動し警戒を要する火山の一つと位置付けられている。最後の中規模噴火（1986年11月）では、噴火開始の5日後には全島避難に至っており、一度の噴火で甚大な社会的・経済的影響が及ぶことも懸念される。このため、気象庁では伊豆大島火山防災連絡事務所を設置して地元自治体と連携して有事の対応に備えるとともに、多項目の観測（地震計、傾斜計、空振計、GNSS、光波距離計、監視カメラ）による火山活動監視体制を展開している。上述の中規模噴火は1876, 1922, 1950, 1986年に発生しており、いずれの間隔も 37 ± 1 年と驚くほどに周期的である。この規則性を単純に当てはめると、最後の噴火から37年後の2023年に噴火が発生するということになる。しかし、現時点（本稿執筆時点の2023年1月）までに、気象庁の活動解説資料に掲載される観測項目に予兆が現れたという報告はない。マグマ供給を反映するとされる山体の膨張が2018年以降はむしろ停滞している状況である（2022年12月活動解説資料）。

気象庁では伊豆大島の火山活動監視のために全磁力による繰返し観測（2003年～）及び連続観測（2007年～）も行っている。その観測と解析の成果は、解説資料には含まれないが、火山噴火予知連絡会に対しては東京大学地震研究所との連名の評価資料として提供されている。地震研究所の全磁力観測は歴史が古く、特に1986年噴火より5年ほど先立つ1981年頃を起点として全磁力減少トレンドが観測されていたという報告[1]が最もよく知られ、三原山ストロンボリ式噴火に至るマグマ上昇の過程で生じる消磁の進行を示唆する観測の「標準的ケース」と見なされている[2]。これを考慮し、地磁気観測所は2007年に三原山A火口の北側の縁に三原山北（MIK）全磁力連続観測点を設置し、現在まで運用している。MIKは、カルデラの南側の地震研究所による全磁力連続観測を補足するよう配置され（図1）、消磁の進行に伴う全磁力の上昇トレンドの検知を期待するものである。その後2014年には、気象庁地震火山部もカルデラ内の2点に全磁力連続観測点を設置している（三原山北東（MHR_NE）と三原山南西（MHR_SW））。火山における地磁気の連続観測では、水蒸気噴火の前兆としての急変化（例えば、雌阿寒岳[3]）や、地殻応力場の変化に伴うピエゾ磁気効果に伴う急変化（例えば、三宅島[4]）の検出を目的とするものもあるが、気象庁の伊豆大島における全磁力観測では、基本的に全磁力トレンドの変化を早期に検出し、噴火警戒に役立てることに主眼を置いている。

本稿では、噴火の予兆が現れていない伊豆大島をテストフィールドとして地磁気観測所が取り組んできた調査研究のうち、特に近年の取り組み — MIK全磁力データに潜在するDI効果の評価 — に焦点を絞って報告する。本報告

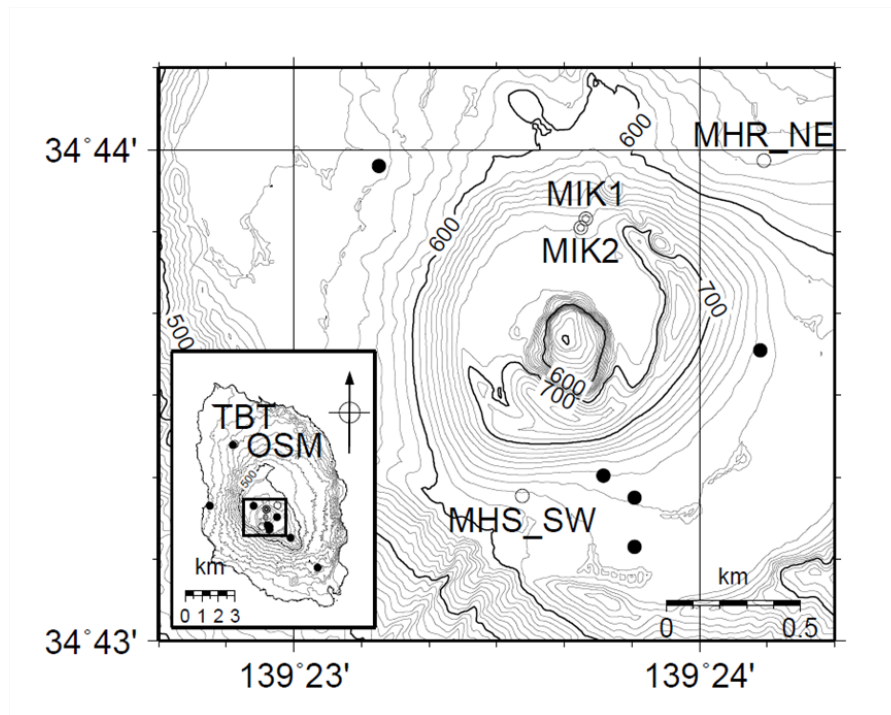


Figure 1 Locations of the magnetic stations on Izu-Oshima Island. Those of Japan Meteorological Agency and Earthquake Research Institute, University of Tokyo, are marked by open and closed circles, respectively.

では割愛するが、地磁気観測所はカルデラ内で三原山を周回するような地点で全磁力繰返し観測も実施しており、こちらでも直近までの変化に噴火の兆候を示唆するような変化は現れていない。なお、連続観測と繰返し観測の参照には、伊豆大島の北西に位置する東京大学地震研究所の伊豆大島地磁気観測所 (OSM) の全磁力連続観測データを利用させて頂いている。

2 三原山北 (MIK) 全磁力連続観測点

2007年に新設されたMIKはプロトン磁力計(国際電子PMP-608E)と、これを制御する収録伝送装置(テラテクニカDTM-FK1)から構成される。PMP-608Eは3センサー型の磁力計で、1台に3つのセンサーを同時に接続し、10秒ごとに各センサーのチャンネルが輪番で切り替えられ計測が行われる。ただしMIKにおいては、チャンネルの1つは使用されず2センサーのみが接続され、DTM-FK1から5分毎の励磁トリガーを受けて得られた5分値が1日1回の伝送により柿岡の地磁気観測所に蓄積されている。つまり、MIKは互いに近接する2観測点(MIK1とMIK2)を有する状態で運用されている。図2の写真は剣ヶ峰を背景としたMIK観測点の全景である。MIK1とMIK2センサーの間の距離はおよそ40mほどであり、ポールの先端に設置された各センサーの地表高は約2.5mである。図2の写真奥に見られる磁力計・収録伝送装置の収納箱は2021年に高床式の設計に更新されており、その効果として従前に繰返していた浸水による観測障害の回避に成功している。

OSMを基準としたMIK1とMIK2の連続観測値を図3に示す。両地点での全磁力の時間変化には(a)トレンド、および、(b)年周変化、において少なからずの相違が見られる。(a)に関しては、特に2012年までMIK1に比べてMIK2の方が増加傾向が大きい。地磁気永年変化を基準としたMIK1のトレンドはほぼ平坦であるが、MIK2のそれは異常な増加傾向となっている[5]。MIK2だけに見られる異常なトレンドを三原山A火口の下での磁化の変化に求めるには、余りにも遠方にある。その原因はMIK2近傍の経年的な磁気的環境変化に見出すしかないが、近年までは具体的に議論されることは無かった。他方、(b)に関しても早くから両地点の差に半年周期の成分があることは早くか

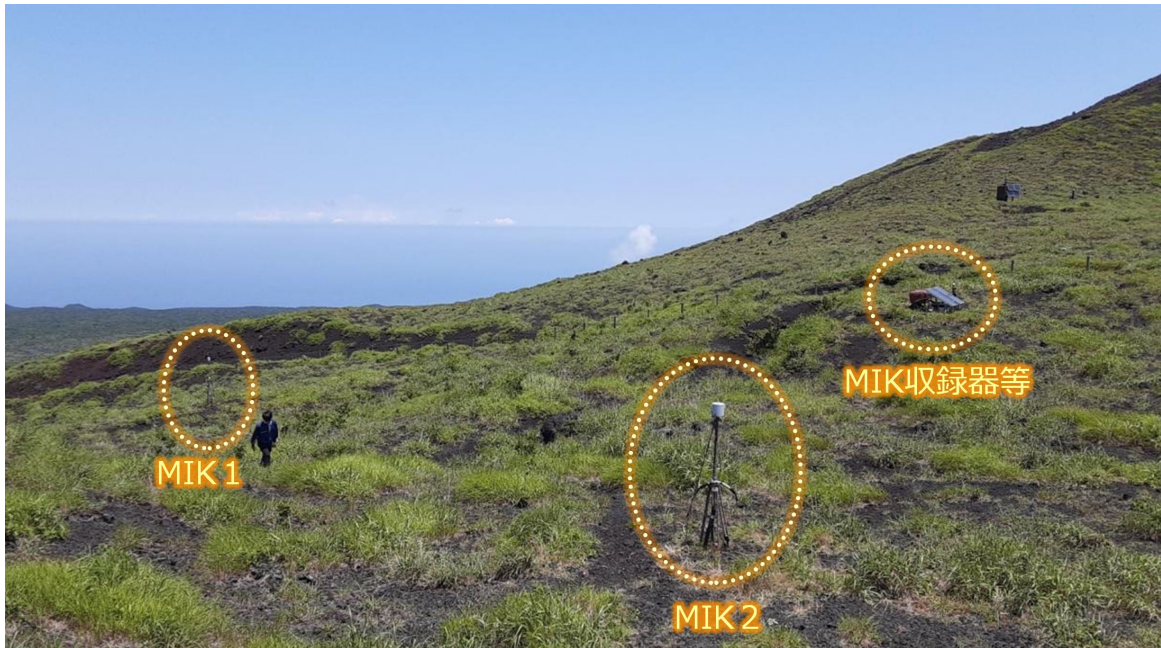


Figure 2 MIK with Kengamine Peak on the background.

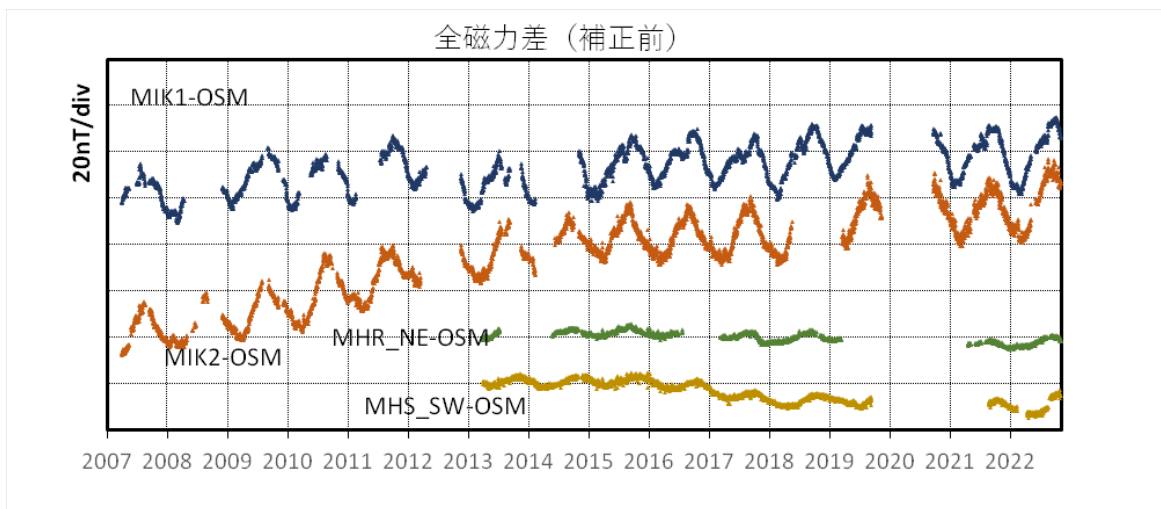


Figure 3 Daily total intensity data at MIK1, MIK2, MHR_NE and MHR_SW with respect to the reference station OSM.

ら知られている。その原因は明確に特定されておらず、降水量（土壌雨量）の変化 [6]、或いは太陽活動による地磁気擾乱等の変化 [5] が、両地点の全磁力において異って発現しているものと考えられている。

MIK1 と MIK2 周辺の磁気的な環境は、玄武岩質の伊豆大島における多くの観測点と同様に必ずしも理想的ではない。MIK 設置の予備調査として実施された磁気測量の報告によると、MIK1 のセンサーは数 10nT/m ほど、MIK2 のセンサーに至っては、100nT/m 近い水平傾度のある環境に置かれている。通常であれば、このような地点は設置場所としての対象とならないが、少なくとも MIK 周辺ではどの地点も同様であったと思われる。地形的には、MIK1 はやや傾斜のある平坦な領域に位置するが、MIK2 は西側の数 m 離れた辺りから小高く盛り上がる斜面に近接している（図 2 写真の撮影地点）。

火山の活動監視・活動評価を目的とした地磁気観測において、2 観測点をほぼ同一の地点に置くことのメリットは

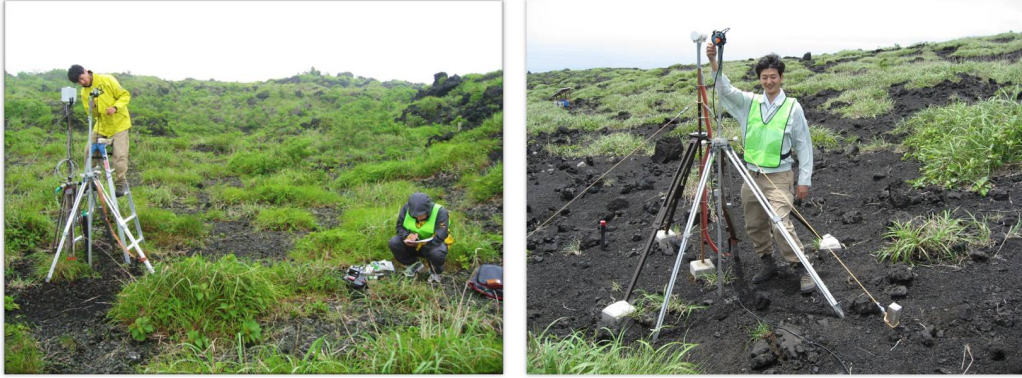


Figure 4 Scenes of the declination measurement (left) and the inclination measurement right beside of the proton sensors at MIK2 and MHR_SW, respectively.

乏しい。それ故に MIK のような構成の連続観測点は他に類を見ない。このような特異な観測点として MIK の運用は開始されたが、玄武岩を主体とした伊豆大島の特異な地質の影響もあって、結果的には後述のように、MIK のデータが全磁力の精密観測をする上で有益な知見をもたらすこととなった。

3 DI 効果の評価とその補正の重要性

地磁気観測所の伊豆大島担当による 2018 年から 2022 年までの調査研究の「進展」は、以下の成果

- 全磁力観測に対する DI 効果の評価方法の確立
- 活動評価におけるその補正の重要性の提示

に加え、DI 効果の補正手法を所外にも普及させるための技術開発に着手したことにほぼ集約される。DI 効果やその補正の実践については、既に数多く議論されており、ここで改めて導入することはない。近年の本論文集に限っても多数の報告があり ([7, 8, 9])、詳細についてはこれら報告およびその引用文献を参照されたい。

3.1 偏角伏角測定による DI 効果の評価法の確立

結論から述べると、前節で示した MIK2 の異常な増加トレンド (図 3) の主たる原因は、永年変化による DI 効果 [10] であった。これは以下に記すような調査により判明している。原理的には、観測点と参照点で取得される各全磁力値の差分には、見掛けの変化である DI 効果が含まれる。両地点の局所的な磁場ベクトルの方向が乖離するほど、同一の地磁気永年変化を経ている DI 効果 (全磁力差の見掛けトレンド) が明瞭に現れる。地磁気観測所では、このことを「測定による DI 補正」 [9] に従い、MIK1 および MIK2 のプロトンセンサー近傍にて実際に偏角と伏角の測定値を取得することで実証した。なお、DI 効果の評価には 0.1° の精度で角度が測定できれば十分である。

地磁気観測所で独自に開発した偏角伏角測定法では、偏角観測にトランシットコンパス (牛方商会) を、伏角観測には、方位磁針を除去したトランシットコンパスに 1 軸フラックスゲート磁力計を取り付けた改造器を用いる。伊豆大島においては、図 4 の写真に示すように観測者が脚立に乗り、センサー横 30cm ほどのところにポールと三脚で固定したトランシットコンパスを手動で操作し、目視で角度を $5'$ 刻みのバーニヤ目盛りから読み取った (観測者にもよるが手持ちの拡大鏡を要することが多い)。足場の悪い MIK での測定は容易ではなく、1 地点の偏角と伏角の観測につき約 90 分の測定時間を要した。

表 1 に MIK1 と MIK2、及び OSM の全磁力センサー近傍にて 2019 年 6 月に得られた偏角と伏角の測定結果を示す (MHR_NE と MHR_SW での測定結果も参考として併せて掲載する)。MIK1 と MIK2 については、主磁場モデル CHAOS-7 (<http://www.spacecenter.dk/files/magnetic-models/CHAOS-7/>) より得られる標準磁場 (偏角 -7.34°)

Table 1 Declinations and inclinations and their standard deviations obtained with the transit compass TS-25 at the proximity of the five total intensity sensors on Izu-Oshima Island in June 2019. The unit is degree (°).

	MIK1	MIK2	MHR_NE	MHR_SW	OSM
Declination	-9.22 ± 0.32	-12.92 ± 0.23	-7.93 ± 0.13	-4.41 ± 0.33	-8.66 ± 0.02
Inclination	51.35 ± 0.30	52.08 ± 0.29	50.24 ± 0.16	49.91 ± 0.26	49.68 ± 0.01

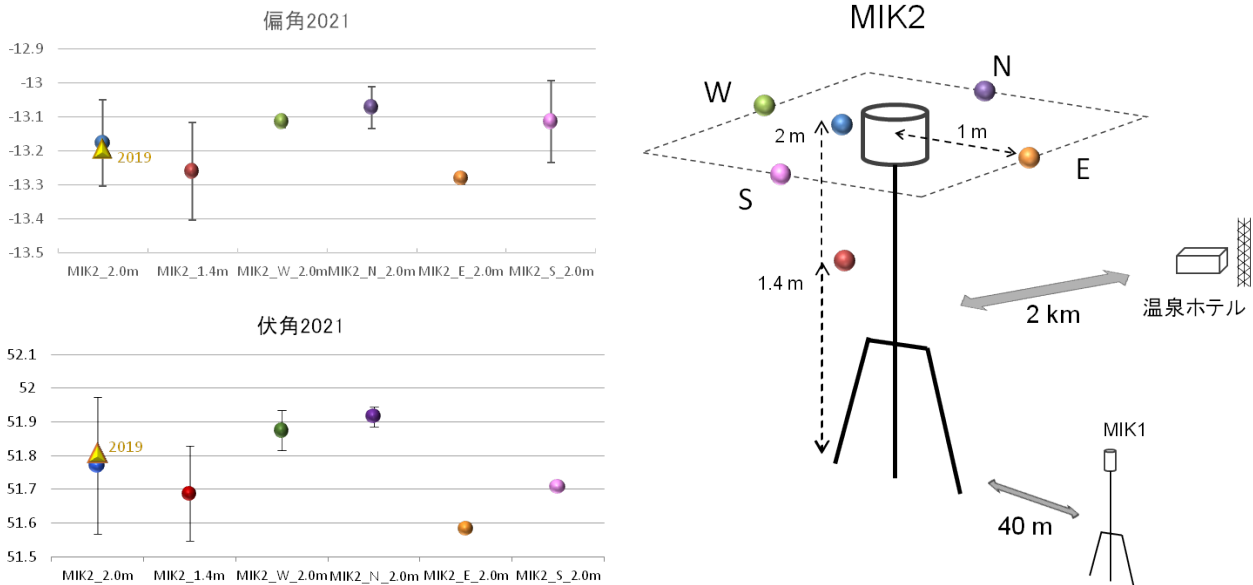


Figure 5 The declination (left top) and inclination (left bottom) at MIK2 in June 2021 (circle) and June 2019 (triangle). The measurement points are shown in the schematic illustration (right).

伏角 48.41°) と比較すると、偏角と伏角の異常は共に MIK2、MIK1、OSM の順に大きい。特に MIK2 の偏角が標準から約 5.6° も西偏しているのが際立っている。また MIK1 と MIK2 の間にも、偏角で約 3.7° の差があることがわかった。

偏角伏角測定の再現性の確認のため 2021 年 6 月にも MIK2 にて同様の測定が行われた。図 5 に示すように、2 年の間隔をおいても、その相違は 0.1° よりも十分に小さかった。また、2021 年 6 月の測定時には、偏角と伏角のメッシュ測定も実施された。それによると両者の空間分布には相関があり、北 1m 地点と東 1m 地点の間の伏角に最大の差が見られた。傾度としては約 $0.3^\circ/1.4\text{m}$ となる。これらの結果は、方位にかかわらずセンサーから 30cm 程度隔てた地点で観測を実施すれば、 0.1° の精度でセンサー点における偏角と伏角を取得できることを示している。

実際に観測された偏角伏角測定値 (表 1) と CHAOS-7 から得られる 3 成分の地磁気永年変化を用いることで、DI 効果 (見掛けトレンド) は算出される。これを図 3 の OSM 基準の MIK1 と MIK2 プロットから除去して補正した結果を図 6 に示す。なお図 6 では、MIK1 と MIK2 の前期 (2007 年-2012 年) と後期 (2013 年-2022 年) それぞれにつき、固有の年周変化成分を推定 (基本周期を 365.25 日としたフーリエ級数による回帰) して既に除去してあることには留意されたい。DI 効果の補正の結果、MIK2 の異常な増加トレンドが解消し、特に後期においては MIK1 とのトレンド差が無くなっている。これを以って MIK2 の異常な増加トレンドの原因が DI 効果であったと概ね示されたわけである。ただし、MIK2 の前期の増加トレンドは完全には解消されていない。MIK2 における磁気環境が 2013 年頃に変化し、最近の偏角伏角測定値に基づく計算では当時の実際の DI 効果を十分に再現できていない可能性が考えられる。

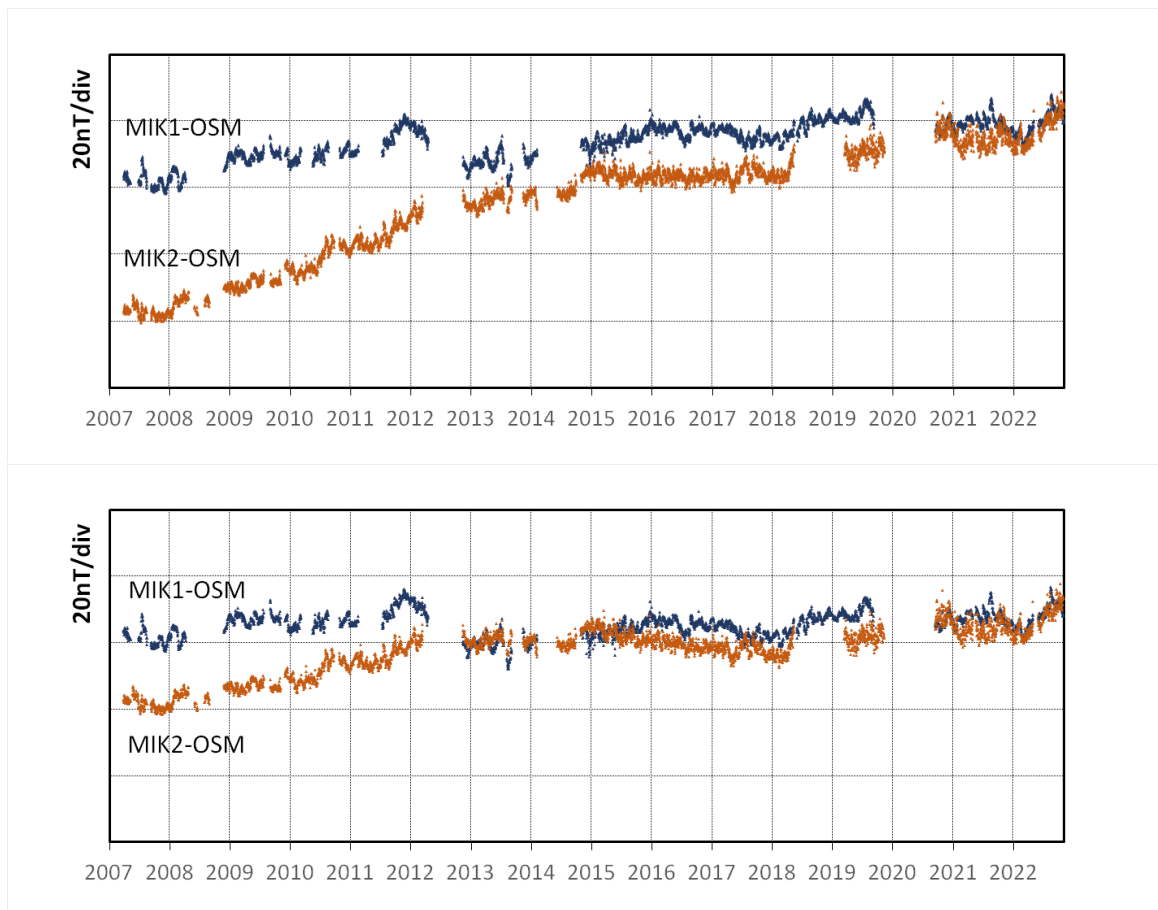


Figure 6 Daily total intensity data at MIK1 and MIK2 relative to OSM after elimination of each seasonal component. The top and bottom panels show those with and without the correction for the DI-effect, respectively.

3.2 DI 効果を補正することの重要性

冒頭の節でも述べたように、伊豆大島の活動評価および噴火早期警戒には、マグマ噴火の前兆として予期される全磁力の変化トレンドを観測点ごと正しく把握することが重要である。しかしながら、MIK2に見出されたDI効果は、従来のDI効果の補正を省略した全磁力データに基づく活動評価の信頼性を低下させるものである。全磁力データが含む見かけのトレンドを火山性のシグナルと誤認し、結果的に誤った解釈を下す可能性は常に免れない。また、仮にDI効果の影響を受けない観測点であったとしても、実際に偏角伏角観測が行われない限り、その全磁力データにDI効果によるトレンドが含まれないことを客観的に証明する手段もない。

上記のわかりやすい例としてやや誇張した模擬ケースを示す。観測点での偏角と伏角をそれぞれ 4° と 53° とし、参照点での偏角と伏角をそれぞれ -8° と 49° と設定したとき、2007年から2022年までに現れるDI効果は図7のようになる。このようなケースでは、火山性の全磁力変化が皆無であっても、図7の変化を（観測点が火口の南側にあったとして）単純に解釈すれば「2014年あたりまで続いた帯磁傾向が2017年あたりから消磁傾向に転じた」と誤評価することになりかねない。

表1からも推察されるように、伊豆大島では数 $^\circ$ に及ぶ局所的な磁気異常が至るところに存在すると考えて差し支えない。連続でも繰り返し観測でも、全磁力の観測にはDI効果の深刻な影響が及んでいる恐れも十分にあり、理想的には全ての観測点で偏角と伏角を把握しておくべきである（現実には、センサー地点の地形や植生などの環境や、

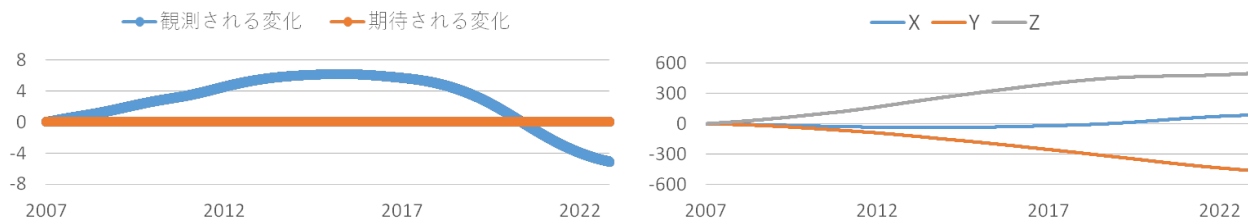


Figure 7 A simple simulation of the DI-effect (left) associated with the CHAOS-7 secular variation on Izu-Oshima Island (right). The unit of the vertical axis is nT.

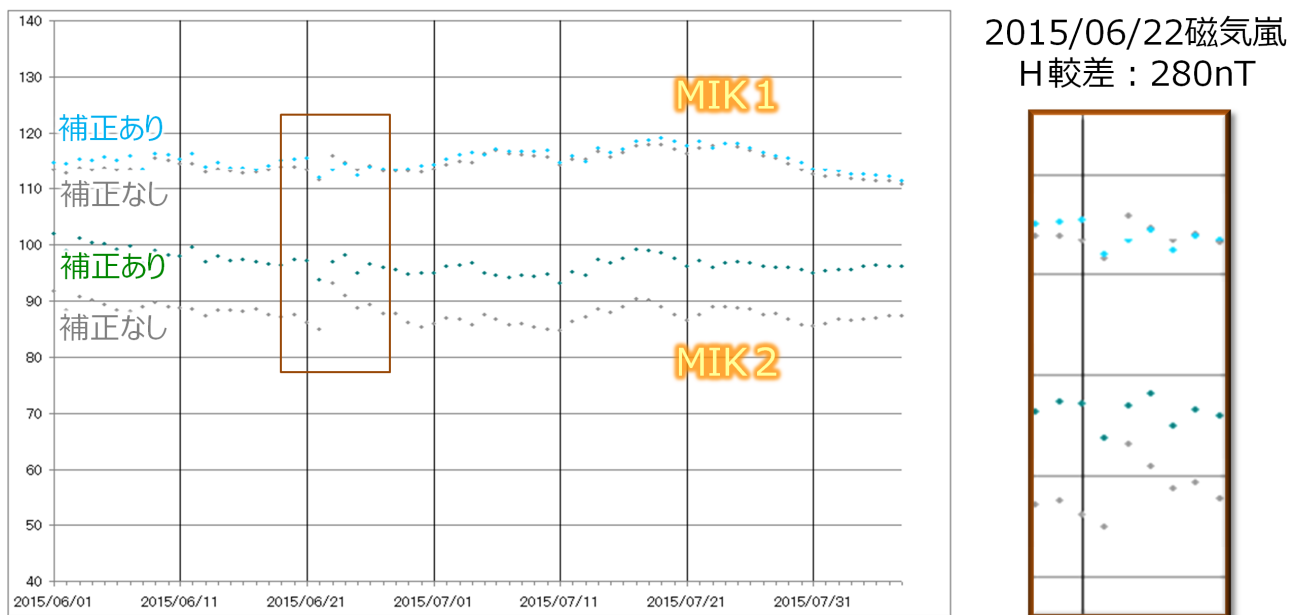


Figure 8 A case of the reduction of the short-period DI-effect due to the geomagnetic storm in the daily total intensity data at MIK1 (cyan) and MIK2 (green) with respect to OSM. The fluctuations on 22 June, 2015 appear to be effectively reduced after applying the correction based on the results of the angle measurements in Table 1. The unit of the vertical axis is nT.

真方位測定のための視野の制約もあり、測定自体が不可であったり、求める精度で遂行できない場合もある)。また、本質的にはこれは伊豆大島に限らず、どの火山における全磁力観測にも当てはまる問題でもある。トレンドから消磁や帯磁源の位置やモーメント強度の逆推定を行う場合、DI効果はノイズとなるため解の精度低下をもたらさうる。

最後に、偏角と伏角の測定によるDI効果の補正により、永年変化によるDI効果に加えて、外部起源磁場の短周期変動に伴うDI効果も低減されるという副次的なメリットを示す。ここでは、OSMを基準にしたMIK1とMIK2の毎日値に対し、外部起源の背景磁場変動として柿岡の3成分夜間値(15-17時UTC)を参照することで短周期DI効果を計算した。図8からは、地磁気嵐が発生していた2015年6月22日前後で、MIK1とMIK2に見られる短周期の変化が補正により幾分か平滑化されたことがわかる。このことは、DI効果の影響が周期に対して一様かどうかは十分に判断できないものの、それが長周期から短周期にまで及んでいることを示している。地磁気観測所構内での実験では、毎時値に現れる地磁気日変化に伴うDI効果も補正できることが確認されている [9]。

4 おわりに

磁場変化の完全な把握は、ベクトル3要素の全てを知ることで初めてなされるのであり、方向の情報を欠く全磁力のみの観測にはシグナルを読み誤るリスクが常に伴う。全磁力データを扱う限り、長周期・短周期にかかわらず微細シグナルを厳密に抽出する上でDI効果を適切に把握し、適切な補正を要することは『宿命』とも言える。フラックステート磁力計のような成分磁力計を使うことで、全磁力観測の原理的な難点は解消されうる。しかし、野外において長期的に基線値の安定した観測を実現するためには、傾斜や温度などの設置環境の管理に加えて定期的な絶対観測が必要であり、今後も火山に展開していくことは現実的に困難である。地磁気による火山活動監視においては、導入しやすく絶対値も安定している全磁力観測が今後も主流であり続けると想像される。

これまでの調査で独自に開発した偏角伏角測定器による観測には、繊細な扱いと慎重な目盛り読取りが伴うことで観測者の技量・時間・労力を要した。これを克服し「誰でもどこでも使える」測定器を開発するべく、地磁気観測所では新しい測定器の設計も進め、現在は既に製作者との共同開発段階に入っている。新しい測定器には、読取りを容易にするデジタル表示器が備えられ、三軸磁気センサーとジャイロ加速度センサーを用いた機構が採用された。その実用化は測定に伴う負荷の大幅な軽減をもたらすであろう。気象庁の火山監視業務に寄与するだけでなく、研究機関の火山研究等においても有効に活用されることが期待される。

謝辞

東京大学地震研究所共同利用により伊豆大島地磁観測所（OSM）の地磁気データの提供を頂きました。

参考文献

- [1] Yukutake, T. et al., Changes in the geomagnetic total intensity observed before the eruption of Oshima Volcano in 1986, *J. Geomag. Geoelectr.*, 42, 277-290, 1990.
- [2] 渡辺 秀文, 伊豆大島火山 1986 年噴火の前兆過程とマグマ供給システム, *火山*, 43, 271-282, 1998.
- [3] 島村哲也 他, 雌阿寒岳における全磁力観測, 2016 年 Conductivity Anomaly 研究会論文集, 71-76, 2016.
- [4] Ueda, H. et al., Geomagnetic changes associated with the dike intrusion during the 2000 Miyakejima eruptive activity, Japan, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 245, 416-42, 2006.
- [5] 笹岡雅宏, 伊豆大島火山活動監視のための地磁気全磁力観測—データの変動の要因に関する議論—, 地磁気観測所テクニカルレポート, 12, 21-28, 2015.
- [6] 田口陽介 他, 伊豆大島の地磁気全磁力にみられる周期数ヶ月の変動, 地磁気観測所テクニカルレポート, 11, 1-11, 2014.
- [7] 秋元良太郎 他, 活火山での全磁力観測における DI 補正法の適用, 2019 年 Conductivity Anomaly 研究会論文集, 25-32, 2019.
- [8] 下川淳 他, 草津白根山における全磁力観測の現状について, 2021 年 Conductivity Anomaly 研究会論文集, 41-48, 2021.
- [9] 浅利晴紀・増子徳道, DI 補正法の実践的な適用に関する考察, 2022 年 Conductivity Anomaly 研究会論文集, 13-20, 2022.
- [10] 橋本武志, 永年変動によるみかけの全磁力変化-火山地磁気効果の評価-, 2006 年 Conductivity Anomaly 研究会論文集, 51-58, 2006.