令和４年度
地磁気観測所調査研究業務
成果報告書

重点課題

電磁気による火山活動評価の高度化に向けた調査 ・・・・・・・・・ 1 頁
次期標準磁気儀設計に向けた予備調査 ・・・・・・・・・・・・・・ 30 頁
南極昭和基地の地磁気データの絶対値化に向けた調査 ・・・・・・ 45 頁

基礎課題

機械学習によるＫ指数判定手法の開発 ・・・・・・・・・・・・・・ 54 頁
地磁気観測施設の構内における各観測点の
地磁気変化特性に関する調査(その２)・・・・・・・・・・57 頁

2023 年 3 月
地磁気観測所

[調査研究の種別]：重点課題

[課題名]：電磁気による火山活動評価の高度化に向けた調査（令和 2 年～4 年度）

[担当者]： ○藤原善明、笹岡雅宏、山崎貴之、浅利晴紀、増子徳道、稲村友臣、山際芳雄（技術課）、豊留修一、谷口秀隆、長町信吾、屋良朝之、弘田瑛士、大戸道宏、松浦大輔、山際龍太郎（観測課）、齋藤誠

[概要]：

火山活動の活発化に伴う全磁力変化の観測事例が多数報告されている。これまでに当所が雌阿寒岳や草津白根山で実施してきた全磁力観測により得られた成果は、火山監視に対する全磁力観測の有効性を示している。これら全磁力変化は、火山体浅部熱水系の状態変化に起因する熱磁気効果と密接に関係していると推定されており、水蒸気噴火の発生予測に貢献することが期待されている。平成 26 年御嶽山噴火災害を契機に水蒸気噴火の発生予測への社会的ニーズが高まり、気象庁地震火山部では、平成 27 年度から水蒸気噴火の前兆を早期に捉えるための新たな観測手法のひとつとして全磁力観測に着目するとともに、その他の多項目観測データの統合解析による火山活動評価手法の高度化に取り組んでいる。

本調査研究では、地震火山部による火山業務改善の取り組みを技術的に支援するため、火山活動の監視および評価手法の高度化に係る技術開発に取り組む。当所が従前より全磁力連続観測を実施している雌阿寒岳、草津白根山、伊豆大島、三宅島、阿蘇山に加えて、地震火山部が平成 27 年度以降に連続観測施設を整備した樽前山、吾妻山、安達太良山、御嶽山、九重山、霧島山えびの高原（硫黄山）周辺を対象に、これまでの観測成果のとりまとめ、ノイズ低減手法の技術開発、常時観測化を見据えた効果的な観測のあり方、および観測安定性の検討を進める。

[具体的な計画と達成目標]：

１．今後の火山監視および活動評価への活用に向けて、これまでに得られた観測成果、知見を収集・整理し、観測・解析・評価の技術に係るとりまとめを行う。

当所がこれまで実施してきた雌阿寒岳、草津白根山、伊豆大島、三宅島、阿蘇山における火山活動と全磁力変化の対応関係把握のための全磁力連続観測、および全磁力変化の面的分布把握のための全磁力繰返し観測で得られた火山性シグナル、あるいは様々なノイズの観測事例を整理分析し、観測成果としてとりまとめを行う。

また、各火山での観測を継続させ、火山活動と全磁力変化の対応調査を引き続き実施する。雌阿寒岳および草津白根山では熱消磁あるいは帯磁ソースの時空間的推移を把握する。観測成果は火山課および各地域火山監視・警報センターに共有するほか、火山噴火予知連絡会に報告する。

その他、火山における比抵抗構造探査や自然電位などの電磁気観測について、機会をとらえて関係機関と共同で実施する。また、大学等が取り組んでいるドローン等を利用した空中磁気測量や噴火速報への活用が期待される空中電気観測についての情報収集等を行う。

２．火山の監視および解析する上で全磁力観測データのノイズ低減は極めて重要であり、火山業務への導入を目指して、年周変化や太陽活動による外部磁場変化の影響を除去する手法や地磁気永年変化に伴うＤＩ効果の補正手法などの技術開発を行う。

これまでの全磁力連続観測データに見られる火山活動以外の要因による変動の特徴が明らかにされてきた。それらのうち、年周変化および太陽活動による外部磁場変化の影響について、除去するための手法開発が進められ、雌阿寒岳の連続観測データに適用されている。今後は、草津白根山など連続観測を実施している火山にこの手法を適用し、その有用性を検証するとともに、改善に取り組む。地磁気永年変化に伴い、全磁力観測点における局所的な偏角および伏角の違いから生じる見かけ上の差（ＤＩ効果）は、全磁力変化により火山活動を評価する上で“ノイズ”となり、ＤＩ効果の補正は全磁力変化による熱源の推定精度の向上を図る上で極めて重要である。これまでの研究成果として、磁化の強い玄武岩質火山のため大きなＤＩ効果が予想される伊豆大島の気象庁全磁力観測点５点において実施した、当所が開発した簡易偏角・伏角計による測定で、ＤＩ補正係数を直接決定できることが明らかになった。そこで、東京大学地震研究所の協力を得て、伊豆大島の全磁力連続観測点９点での偏角・伏角測定によりＤＩ補正係数を決定し、気象庁および東京大学地震研究所のＤＩ補正後の全磁力観測データを統合的に解析する。また、玄武岩質火山に比べて磁化の弱い安山岩質火山である雌阿寒岳の全磁力連続観測点においても、同様な偏角・伏角測定およびＤＩ補正処理を試みる。

さらに、平成 27 年度～30 年度に地震火山部により全磁力連続観測点が整備された６火山（樽前山、吾妻山、霧島山、御嶽山、九重山、安達太良山」）については、全磁力観測データおよび各参照点の地磁気三成分データを用い、観測データの品質調査、ＤＩ補正、年周変化の補正などの解析を実施する。

地磁気永年変化のＤＩ補正については、これまでの調査結果を論文にとりまとめ、査読付きジャーナルへの投稿を予定している。

３．火山業務における常時観測への地磁気観測導入を見据えて、火山監視に効果的な連続観測網のあり方および観測装置の安定性確保に係る情報収集、課題解決について、検討を始める。

これまでの観測で得られた熱磁気効果の観測事例を踏まえ、熱磁気モデルによるシミュレーションを活用して、効果的な火山監視を実現するための全磁力連続観測点の最適な配置について検討する。

また、火山ガス、積雪、強風、インフラ未整備など、火山地帯に特有の過酷な環境下でも安定稼働する観測装置の開発に向けて、情報収集・整理、課題の抽出および解決策の検討を進める。

［令和２～４年度の成果］:

令和４年度は、３か年計画の最終年度であることから、令和４年度の成果を元に、令和２年度から令和４年度までの３か年にわたる調査研究成果を取りまとめる。

１．各火山における地磁気観測

〇雌阿寒岳

令和 4 年度は、

・全磁力連続観測点 3 点での観測の継続、機器の保守

・ポンマチネシリ火口周辺での全磁力の繰返し観測

・徒歩による面的な全磁力観測

を実施した。全磁力連続観測及び繰り返し観測の成果は、火山噴火予知連絡会及び札幌管区地域火山監視・警報センターに報告した。なお、令和４年度は、DI 補正のための偏角・伏角観測は実施しなかっ

た。

・全磁力連続観測、及び機器の保守

出張時の各種点検や受信データのチェックなど適切な保守の実施により、ほぼ欠測なく全磁力連続観測データを取得することができた。またＨ補正処理を施すことにより、年周変化および超高層起因のノイズを有意に除去できた。

96-1 火口南側の３点（MEA,ME2,ME3）では、2022 年 8 月中旬から 12 月にかけて、ポンマチネシリ 96-1 火口近傍の地下における熱活動の活発化の可能性を示す、全磁力のわずかな減少傾向がみられた。

・ポンマチネシリ火口周辺での全磁力の繰返し観測

雌阿寒岳における全磁力繰り返し観測の結果について報告する。

図 a-1 に全磁力観測点配置図を、図 a-2～図 a-4 に繰り返し観測の結果を示す。

2022 年 6 月に実施した全磁力繰り返し観測によると、2020 年 8 月から 2022 年 6 月の間に、96-1 火口南側から赤沼火口北側にかけて全磁力のわずかな減少（最大で 3nT 程度）が観測された。連続観測の結果と合わせると、中長期的には地下の消磁（温度上昇）が示唆される。

一部の観測点（ポンマチネシリ火口内等）は、天候不順のため観測を断念した。

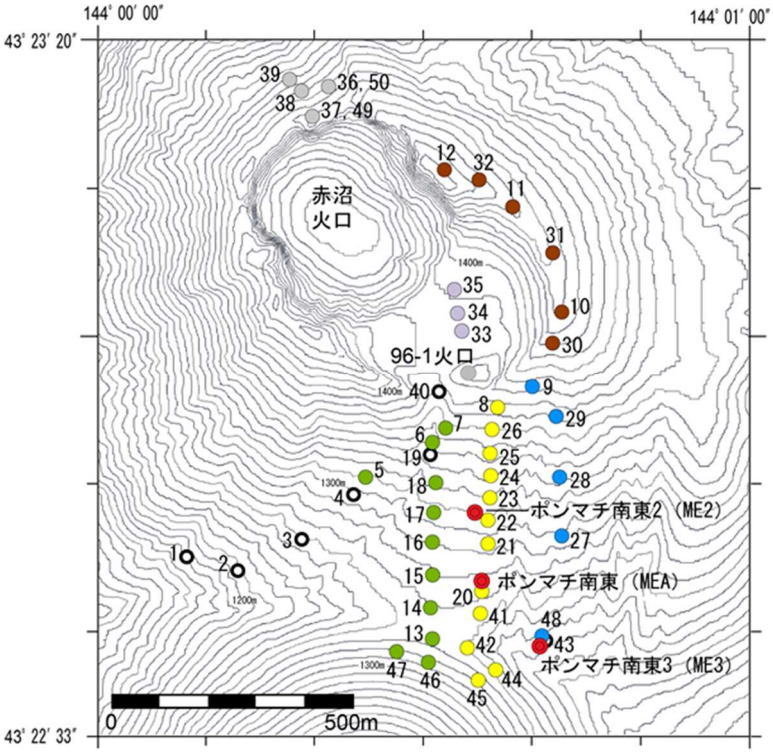


図 a-1　　雌阿寒岳　全磁力観測点配置図

二重丸◎は連続観測点を、一重丸○ は繰り返し観測点（色は図 A-8 と対応。 ● １、２、３、４、19、36、37、40、43 は観測終了）を示す。

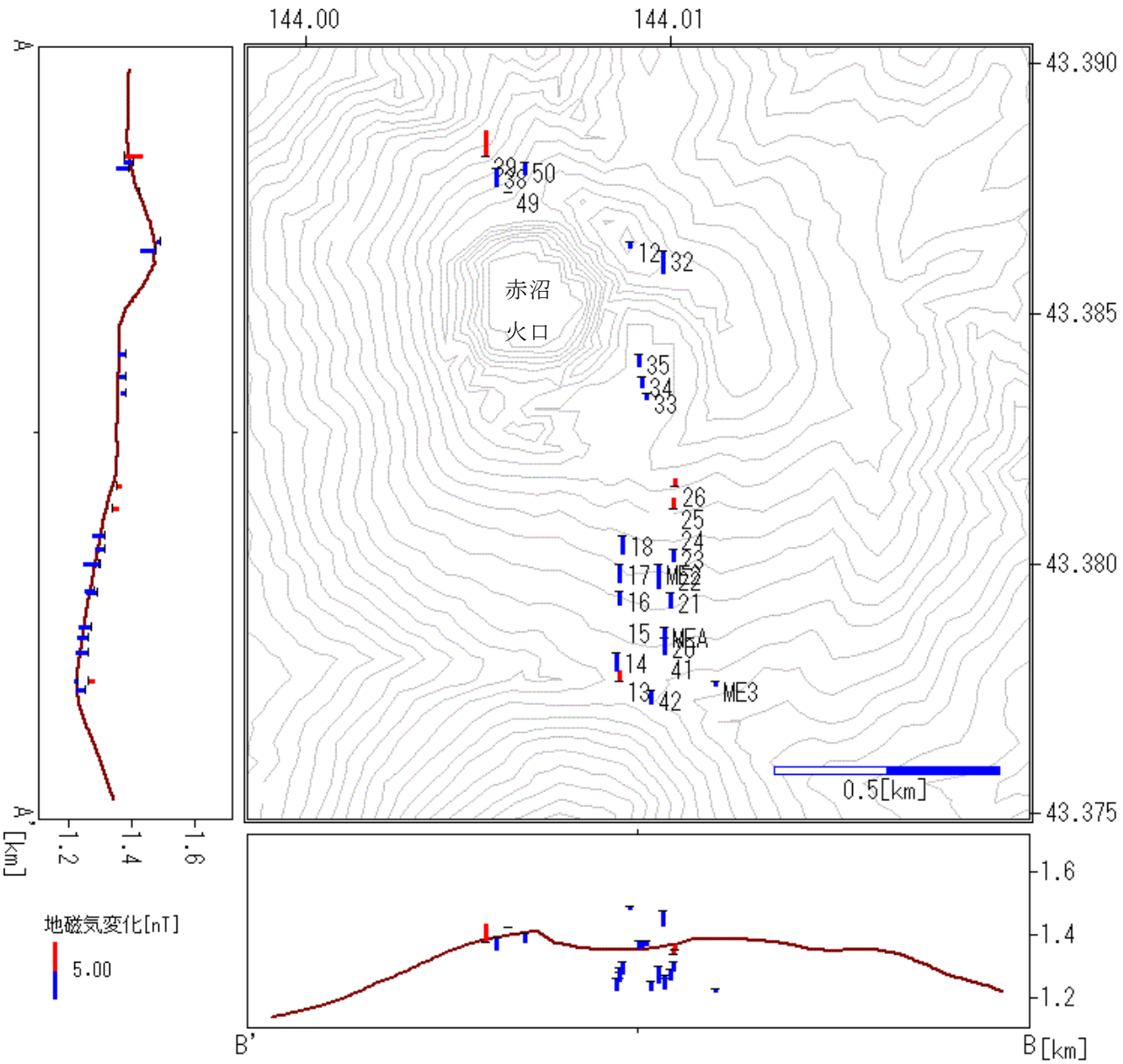


図 a-2　繰り返し観測の結果（2020 年 8 月～2021 年 6 月）

- 観測点番号の表示している点で 2020 年 8 月及び 2021 年 6 月に観測を実施した。
- 観測値（カラーバー）は 2020 年と 2021 年の両方に観測値がある場合に表示している。
- 96-1 火口南側斜面においては、南側で全磁力の減少、北側の一部の観測点で僅かな増加、赤沼火口北側では、全磁力の減少及び増加が見られた。総合的に見ると、広範囲に全磁力の減少が見られているが、今回の観測値を 1 点の消磁ソースで説明することは難しい。
-
- この地図の作成に当たっては、国土地理院長の承認を得て、同院発行の『数値地図 50m メッシュ（標高）』を使用した。

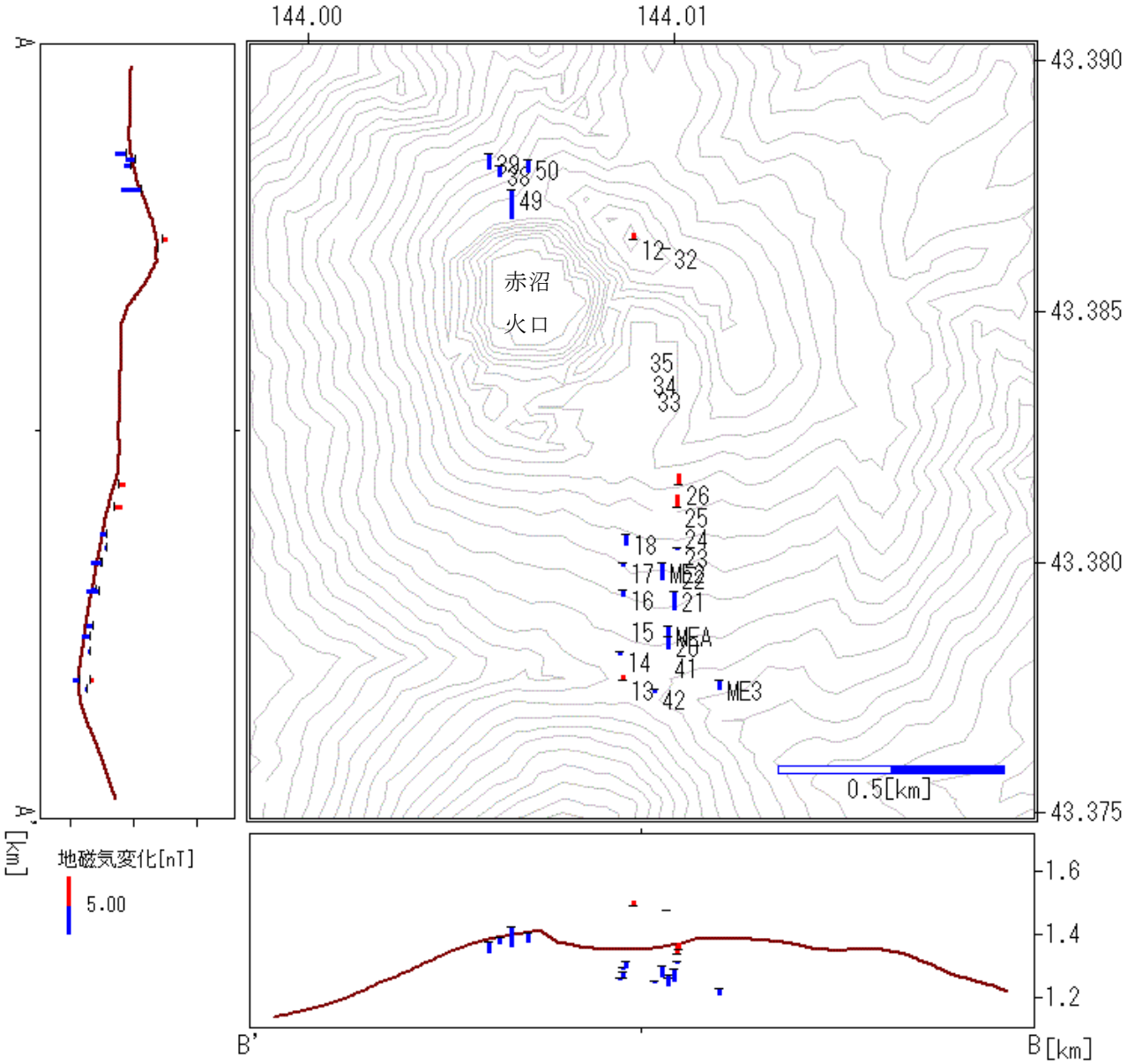


図 a-3　繰り返し観測の結果（2021 年 6 月～2022 年 6 月）

- 観測点番号の表示している点で 2021 年 6 月に観測を実施した。
- 観測値（カラーバー）は 2020 年と 2021 年の両方に観測値がある場合に表示している。
- 96-1 火口南側斜面においては、南側で全磁力の減少、北側の一部の観測点で僅かな増加、赤沼火口北側では、全磁力の減少が見られた。総合的に見ると、広範囲に全磁力の減少が見られているが、今回の観測値を 1 点の消磁ソースで説明することは難しい。
- この地図の作成に当たっては、国土地理院長の承認を得て、同院発行の『数値地図 50m メッシュ（標高）』を使用した。

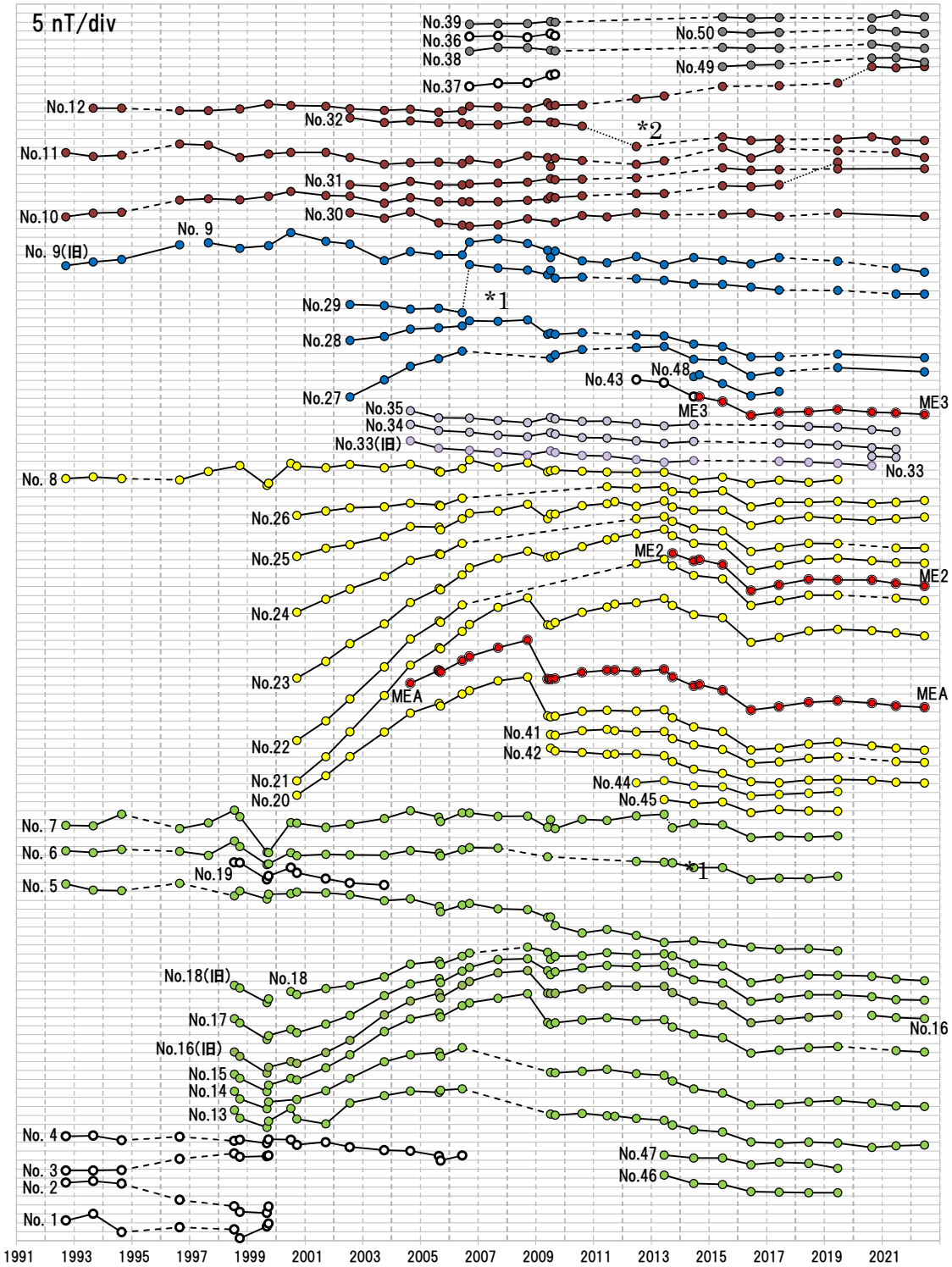


図 a-4　繰り返し観測点における全磁力変化（MMB 基準、1992 年９月～2022 年６月）

各繰り返し観測実施時期における連続観測点 MEA、ME2、ME3 の値もプロットしてある（観測点の色は図 A-1 と対応）。

点線は地形変化や観測地点変更がある場合、破線は観測間隔が 1 年を越える場合を示す。

*1：地形変化の影響があると思われる（No.7,29）

*2：観測点の位置変更による影響があると思われる（No.32）

・徒歩全磁力観測

雌阿寒岳では令和３年度に引き続き、徒歩による面的な全磁力観測をポンマチネシリ火口南麓で実施した。徒歩による全磁力観測は、従来の繰り返し観測では観測できなかった領域も観測することができるため、より詳細な空間分布を得ることできる。昨年度までの偏角観測で、MEA 及び ME2 観測点にくらべて ME3 観測点は偏角が１度西偏していること分かったことから、令和４年度の徒歩磁気観測は、ME3 近傍及び昨年度と踏査範囲重複するように MEA 及び ME2 付近の観測も実施した。昨年度の観測結果との比較（図 a-5）では、大局的な全磁力分布（南側ほど全磁力値が減少する傾向）に特に変化は認められないが、特に ME3 近傍では、周辺に比べて全磁力値が小さいことが分かった。これは表層の地質または地形の影響による可能性が示唆されるが、現時点ではその要因は特定できない。具体的な原因を探るため、来年度も徒歩による全磁力観測を実施し、過去二回の観測で踏査していない領域（阿寒富士の北側斜面等）での観測を実施し、より広域な全磁力変化を確認したい。また、地形や地質との関係について考察するため、他火山の事例を収集する予定である。

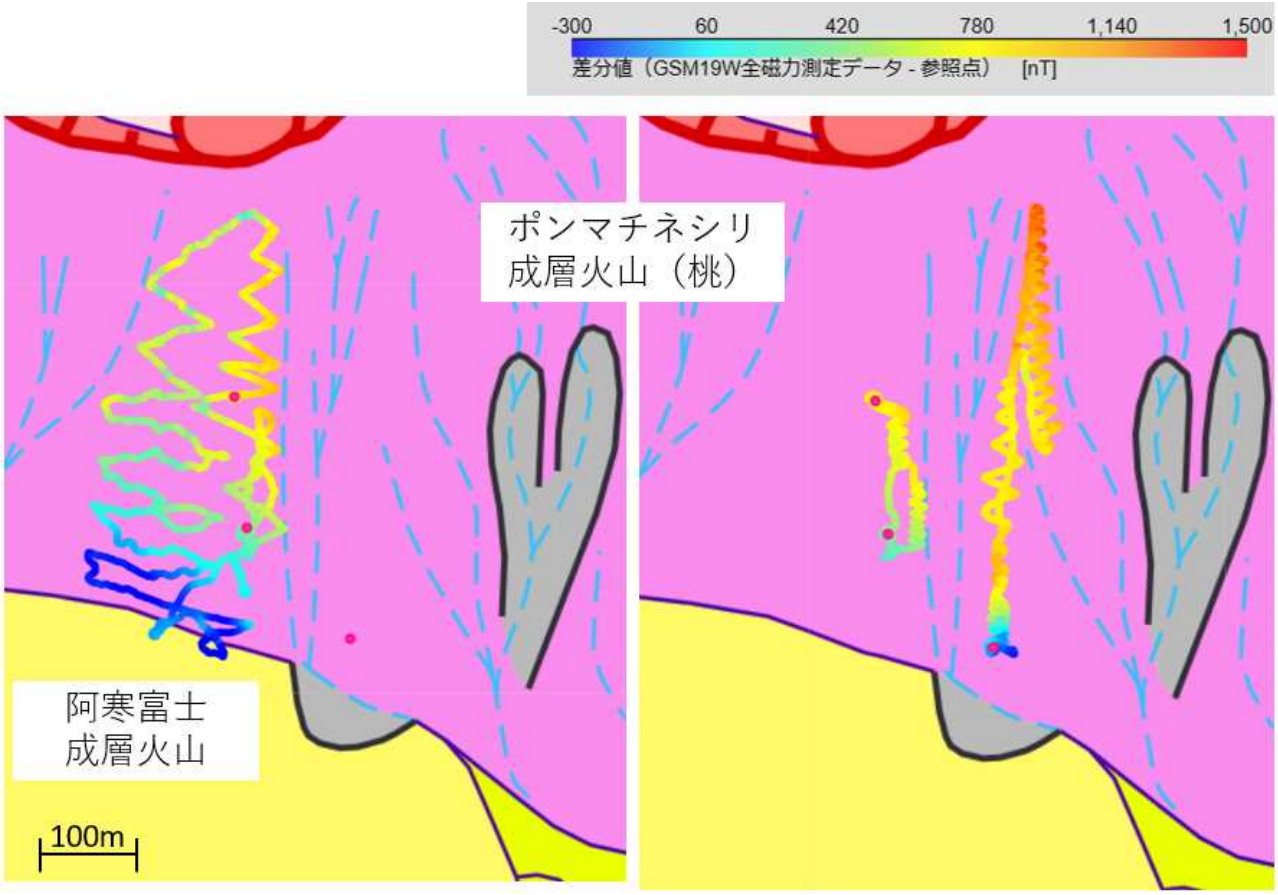


図 a-5　雌阿寒岳　徒歩による磁気観測結果

赤点は連続観測点を示す。コンター値は繰り返し観測の参照点を基準とした全磁力差。

（左）2021 年 6 月 27 日の踏査ルート、（右）2022 年 6 月 21 日の踏査ルート、

色を付した線は徒歩観測ルートを示す。

本資料の作成には地理院地図を使用した。

○吾妻山

地磁気観測所では、気象庁の火山監視業務の高度化に資するため令和 4 年度より新たな火山調査業務「吾妻山における地磁気 3 成分繰返し観測」を始動する。従前より火山観測項目に含まれる全磁力観測の利点は、観測そのもの簡便性とデータの安定性であるが、その理論的な面には多少の難点がある。本来ベクトル量である磁場の完全な情報が得られない（磁場の方向の情報を放棄している）だけでなく、全磁力同士の差分（観測点－参照点）には見掛けの変化（いわゆる「DI 効果」）が生じる。他方、地磁気のベクトル観測には、データの質と量の安定確保において難がある（観測自体に長時間および高度な技術を要する）。しかし、これがもし実現すれば、DI 効果の影響を免れるだけでなく、全磁力観測とは独立な新しい情報が得ることができるため、熱活動の時空間変化の推定精度向上につながる。その調査フィールドとしては、以下条件

- フラックスゲート磁力計による成分変化観測が既に稼働している
- 地磁気観測所から官用車によるアクセスが可能である
- 熱活動による地磁気変化が比較的顕著である

を満たす吾妻山が最適である。

本業務の長期的な展望として、令和 6 年度の次期建議への参画（東北大学・地震噴火予知推進センターと共同）に合わせた繰返し観測の本格運用開始を見据えている。そこで、まずは令和 4 年度からの 2 カ年による予備調査が計画された。その主たる目的は、

① 火山における高精度な地磁気ベクトル観測の技術的実現性の調査

② 火山監視の高度化に対する地磁気ベクトル観測の有用性の評価

である。1 年目となる令和 4 年度の目標は、現地での観測基盤の確立とし、吾妻山への計 4 回の出張によりこれを実行した。以下にその成果をまとめる。

吾妻山での地磁気 3 成分繰返し観測点の設置

吾妻山大穴火口周辺と高湯参照点にて繰返し観測点の設置を完了した。大穴火口の周辺および高湯参照点では、オーバーハウザー磁力計 GSM-19w による徒歩磁気測量を実施し、最終的にはそれぞれに 6 地点と 1 地点を選定した(図 b-1 および表 b-1)。各観測点では、4 本のプラスチック杭（1 ×中心点＋3 ×三脚の足）の打ち込みを完了している。またその他に、偏角測定に必要となる方位標の設置点（浄土平と高湯にそれぞれ 1 点）と GNSS 真方位観測のための偏心点（大穴火口周辺と高湯にそれぞれ 1 点）にも 1 本ずつのプラスチック杭を設置した。

表 b-1　大穴火口周辺・浄土平にて設置した観測点の座標

地点名	緯度（°N）	経度（°E）	高度（m）	新規設置本数	設置時期
A6	37.72548	140.2480	1716.6	4	R4.6
A7	37.72591	140.2483	1713.7	4	R4.6
A8	37.72463	140.2472	1691.1	4	R4.6
A9	37.72675	140.2493	1680.9	4	R4.6
A10	37.72748	140.2505	1649.7	4	R4.6
A11	37.72499	140.2514	1592.6	3	R4.6
A9 偏心点	37.72273	140.2540	1651.2	1	R4.9
方位標(主)	37.72881	140.2513	1573.6	1	R4.9
ABS 高湯	37.758	140.2967	926.6	4	R4.6

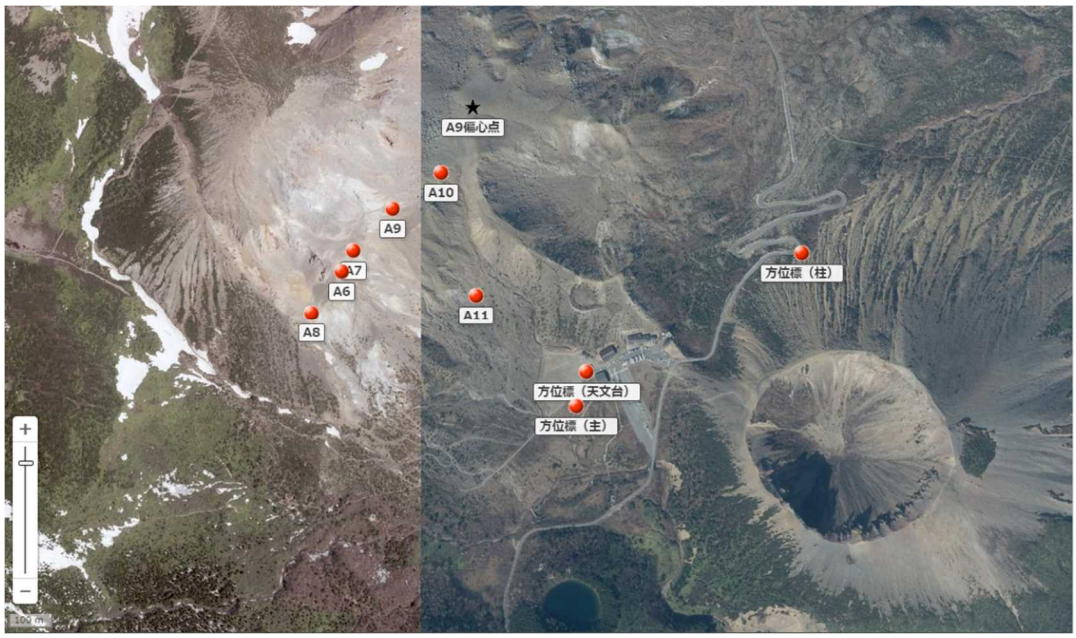


図 b-1　観測点、方位標、偏心点の配置

<u>GNSS による真方位観測</u>

火山における地磁気 3 成分観測（地理座標を基準とした南北成分・東西成分・鉛直成分）では、山頂観測点と参照点の成分毎の地点差から火山性変化の抽出を試みる。このため各地点での方位標の真方位角を取得する必要があり、本調査ではその手段として GNSS 観測を用いた真方位観測を採用した。地磁気観測所はそのための測器と観測技術を欠くことから、国土地理院物理測地課による協力（依頼出張による同院職員の派遣、同院測器の使用、観測結果の処理）により今回の真方位観測を実現した。その結果は表 b-2 の通りである。

表 b-2　大穴火口周辺の５観測点における真方位角（E+）

方位標（主）- A6	119° 59′ 40″
方位標（主）- A7	124° 47′ 12″
方位標（主）- A8	109° 30′ 13″
方位標（主）- A10	149° 59′ 54″
方位標（主）- A11	138° 19′ 37″
方位標（副）- A11	126° 19′ 23″

表 Z2b　A9 における真方位角（E+）

方位標（主）- A9	96° 28′ 32″
方位標（副）- A9	24° 03′ 18″

表 Z2c　高湯参照点における真方位角（E+）

方位標（主）- 本点	162° 47′ 00″
方位標（副）- 本点	143° 19′ 24″

地磁気変化のシミュレーション

今回設置した 6 観測点における現れる火山性の地磁気変化を予め想定するため、大穴火口浅部に与えた適当な熱消磁源に伴う地磁気 3 成分変化の数値計算を試行した（図 b-3）。仮定する磁気モーメントは偏角-8°、伏角 50°、強度 10^6 Am²であり、その位置座標は 37.727°N, 140.248°E、標高 1400m とした。シミュレーションの結果によると、南北成分では最も南に位置する A8 で変化が卓越（2.2nT）、東西成分では A9、A10、A11 で変化が卓越（1.7 から 3.1nT）、そして鉛直成分では A6、A7、A8、A9 で変化が卓越（2.2 から 4.7nT）する。1nT の観測分解能が得られれば、これらの変化が検出される可能性が十分にあると言える。

次年度に向けた課題

令和４年度の各出張では天候に恵まれる機会が少なく、実際に大穴火口周辺や高湯参照点にて十分な回数の地磁気 3 成分観測（絶対観測）を実施することが出来なかった。数少ない観測からは期待する観測精度を得ることが出来なかった。例えば高湯参照点においては続けて観測した偏角成分に 0.5 分角の違いが生じた。これはおよそ 5nT のバラツキに相当し、火山性の変化の抽出には適さない。次年度は、磁力計業者の協力を仰ぎ、絶対観測のバラツキの主要因と考えられる測定機器の不安定（磁気儀の出力のバラツキ・高湯参照点の収録器の温度依存性）を解消した上で、改めて現地にて絶対観測のデータを取得することで、その観測精度の向上を目指す。

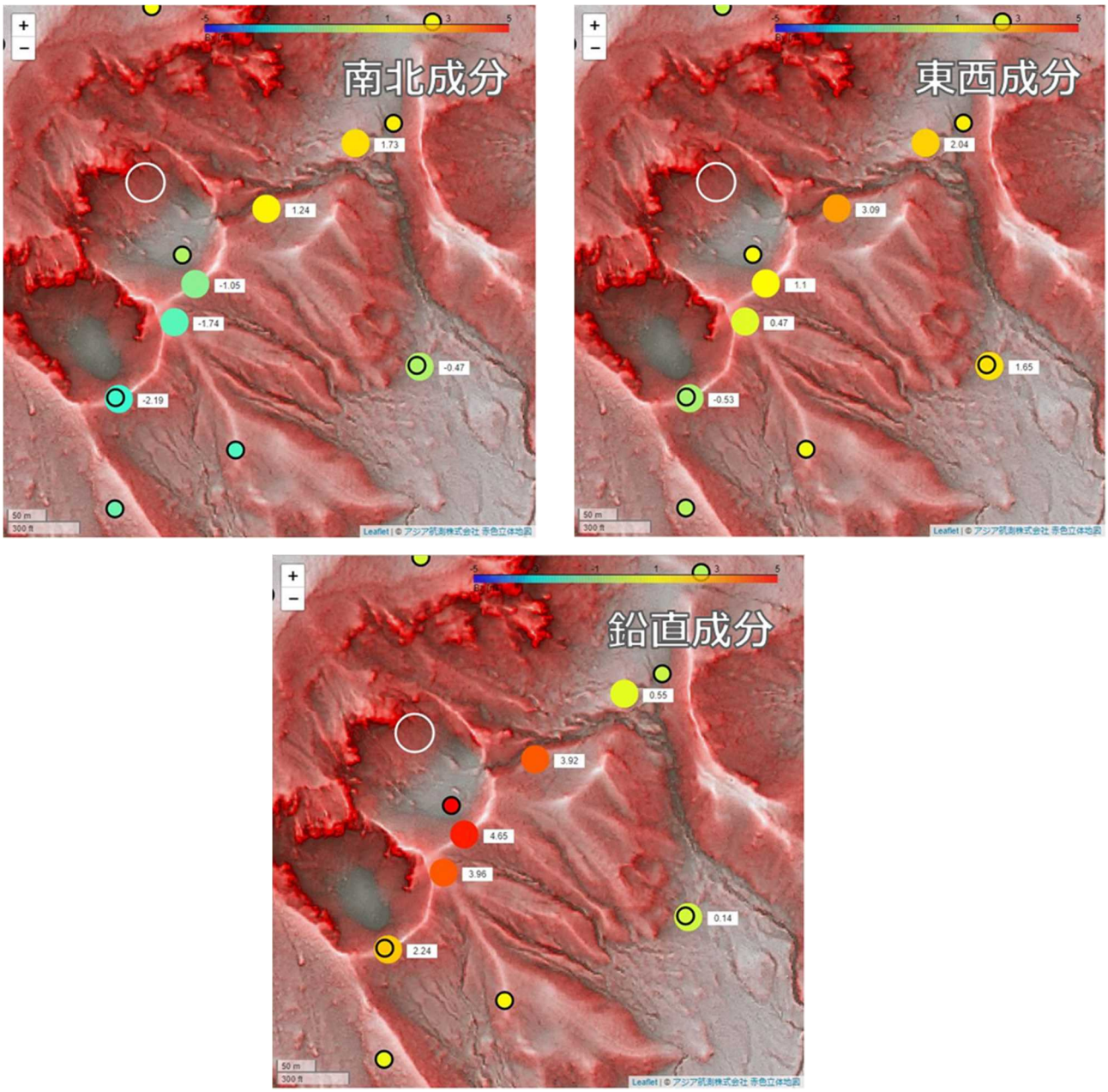


図 b-3　予測される火山性の地磁気変化。大きな○は新設の 3 成分繰返し観測点。黒枠の小さな○は既存の全磁力繰返し観測点。白○は双極子モーメントの水平位置。

○草津白根山（白根山（湯釜周辺））

令和 4 年度は全磁力連続観測点 3 点での観測を継続すると共に、2022 年 10 月に定期の全磁力繰返し観測を実施した（図 c-1）。

全磁力連続観測では、2018 年 4 月から 7 月にかけて、水釜付近地下の熱消磁を示唆する全磁力変化（P 点および Q 点で減少、R 点で増加）が観測された（図 c-2）。それ以降、湯釜南東の Q 点では全磁力の減少が認められたが、2022 年 5 月以降、湯釜近傍の地下における温度上昇を示す明瞭な変化は認められない。

全磁力繰り返し観測では、2018 年以降、湯釜の東から南東の観測点で全磁力の減少が継続している（図 c-3）。2021 年から 2022 年の全磁力変化によると、Q 点付近の観測点では引き続き全磁力の減少が認められているものの、湯釜の北から北東及び南西の観測点で全磁力の増加が認められている。

水釜付近に想定される熱消磁源以外の全磁力変化の要因を探るため、2021 年 10 月に湯釜南東から湯釜南にかけて徒歩により全磁力磁気測量を実施した（図 c-4）。それによると、湯釜南東側の Q 点付近では東西方向にライン状の強い磁気が見つかったが、湯釜南側の P 点付近は特に強い磁気源は無さそうであった。センサー高度が 235 cmよりも 185 cmのほうが強い測量値を示す結果が得られたことから、Q 点付近の磁気源は浅い場所にあることが示唆された。

連続観測点（P 点，Q 点，R 点）、および参照点である東京大学地震研究所八ヶ岳地球電磁気観測所の全磁力の夜間日平均値差に柿岡の水平地磁気成分のみを用いた DI 補正を試みた。その結果、短周期現象である磁気嵐等の DI 効果をやや軽減することができた（図 c-5）。

地磁気観測所では、外部磁場等の影響をより効果的に除去することを期待し、湯釜の南東約 5km にあるシズカ山に地磁気参照点の整備を計画している（図 c-6）。全磁力連続観測点Ｒ点と八ヶ岳・シズカ山それぞれの全磁力差（毎分値）を表示してみた（図 c-7）。シズカ山の方が全磁力差のバラつきが小さく、好適な地点と思われる。

草津白根山（湯釜付近）での全磁力観測結果については毎月の火山活動解説資料、火山噴火予知連絡会に報告した。

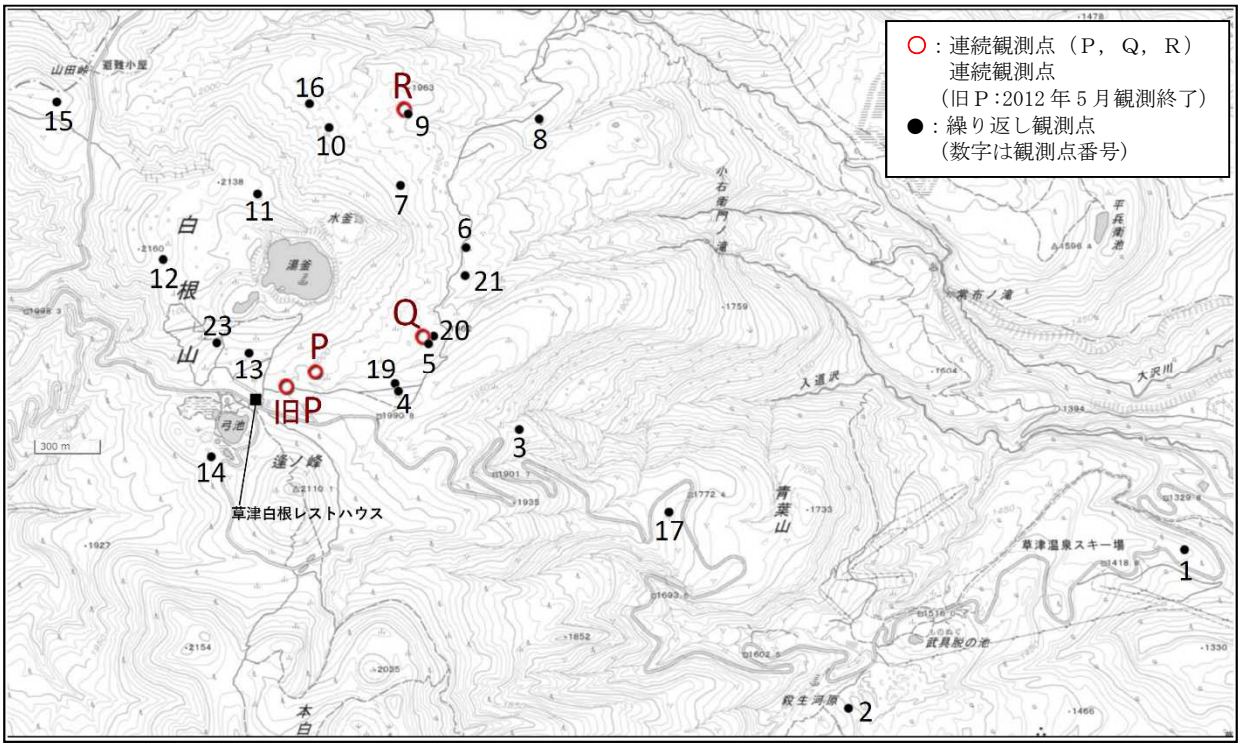


図 c-1　草津白根山の全磁力観測点配置図

■：連続観測点（P,Q,R）　□：連続観測点（旧 P: 2012 年 5 月観測終了）

●：繰り返し観測点（数字は観測点番号。本白根山の繰り返し観測点は除く）

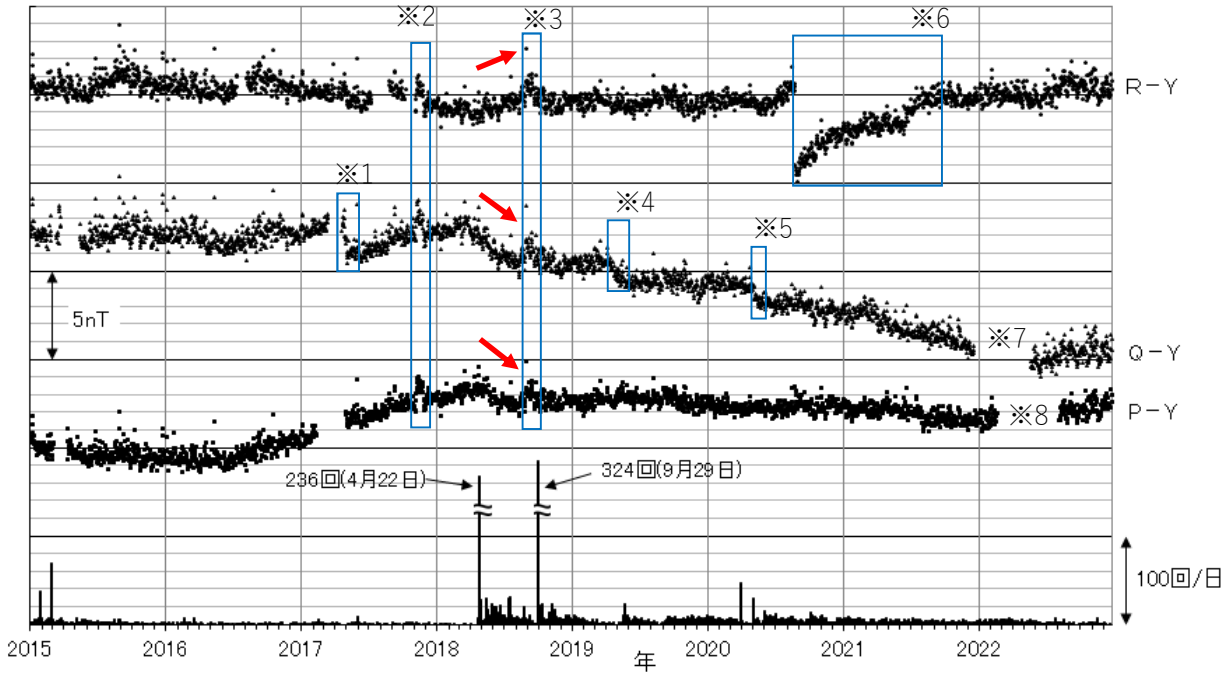
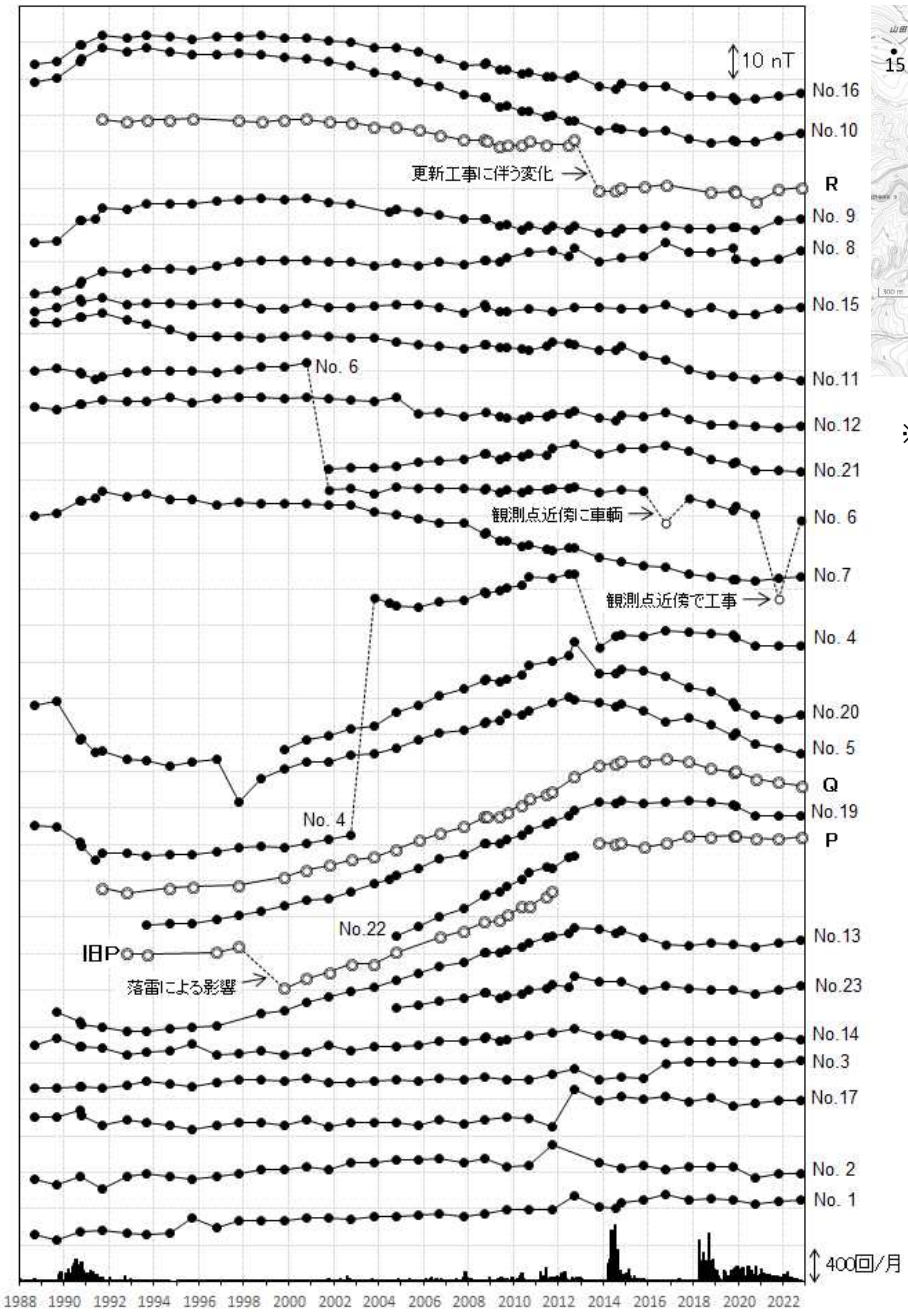
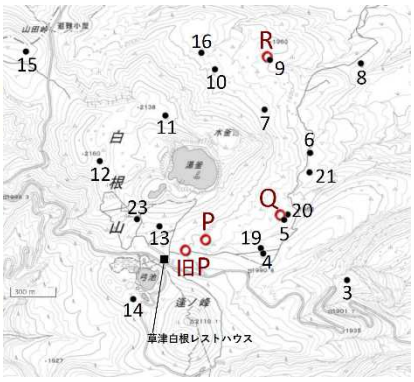


図 c-2　白根山（湯釜付近）における全磁力連続観測結果（2015年１月～2022年12月24日）

連続観測点Ｐ、Ｑ、Ｒにおける八ヶ岳地球電磁気観測所(東京大学地震研究所)(Ｙ)との全磁力の夜間（00:00～02:59(JST)）日平均値差。最下段は湯釜付近で観測された日別地震回数。赤矢印は2018年４月～７月に観測された全磁力変化。

(※1) 原因不明の急変、(※2) 八ヶ岳観測点の人工擾乱、(※3) 2018年8月～9月に発生した磁気嵐によると考えられる変化、
(※4) 2019年4月中旬～5月上旬のQでの原因不明の変化、(※5) 2020年5月3日のQでの原因不明の変化、
(※6) 落雷によるステップ状の変化とその後の余効変動を含む、(※7) 2021年12月18日～2022年5月18日機器障害による欠測
(※8) 2022年2月18日～8月3日機器障害による欠測





※No. 1、No. 2、No. 17 は地図欄外

赤字は連続観測点を表す

図 c-3　白根山（湯釜付近）における全磁力繰り返し観測結果（1988 年 9 月～2022 年 10 月）

・東京大学地震研究所八ヶ岳地球電磁気観測所（Y）で観測された全磁力値を基準とし、各繰り返し観測点とYの地域的短周期変動の差は連続観測点Qを介して除去した。
・連続観測点P、Q、Rおよび旧Pのデータは全磁力繰り返し観測実施日の値をプロット。
・破線は周辺環境の変化によると思われるギャップ。
・連続観測点Rの変化（2020 年 8 月～2021 年 7 月）は落雷による影響を含む。
・最下段は草津白根山の月別地震回数（2015 年以降は湯釜付近の地震のみ）。

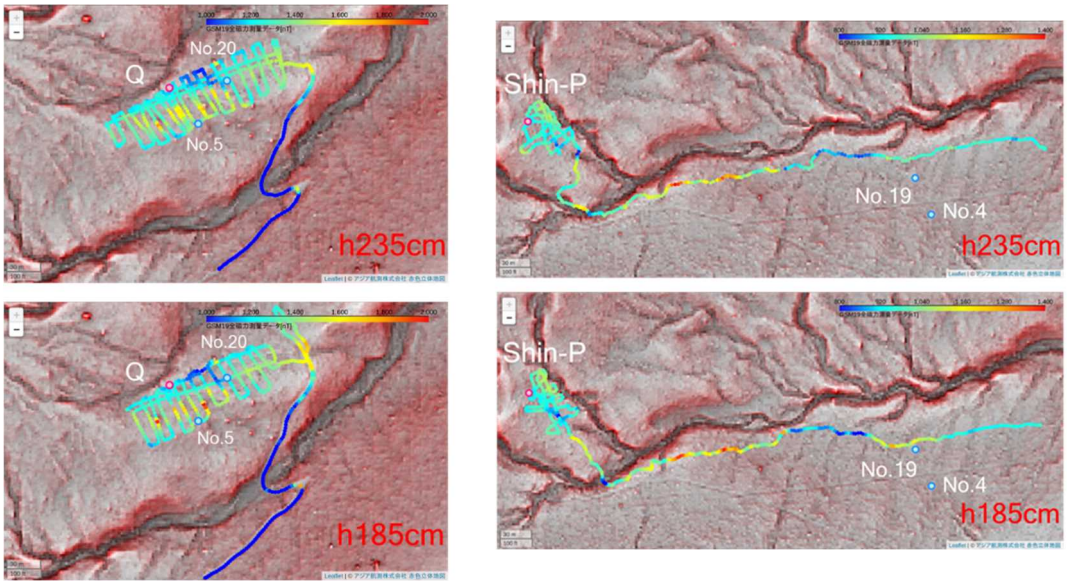


図 c-4　湯釜南東側における徒歩による全磁力観測の空間分布図（2021 年 10 月 8 日）
（左）湯釜南東側、（右）湯釜南側、センサー高度は 235cm と 185cm でそれぞれ測量.

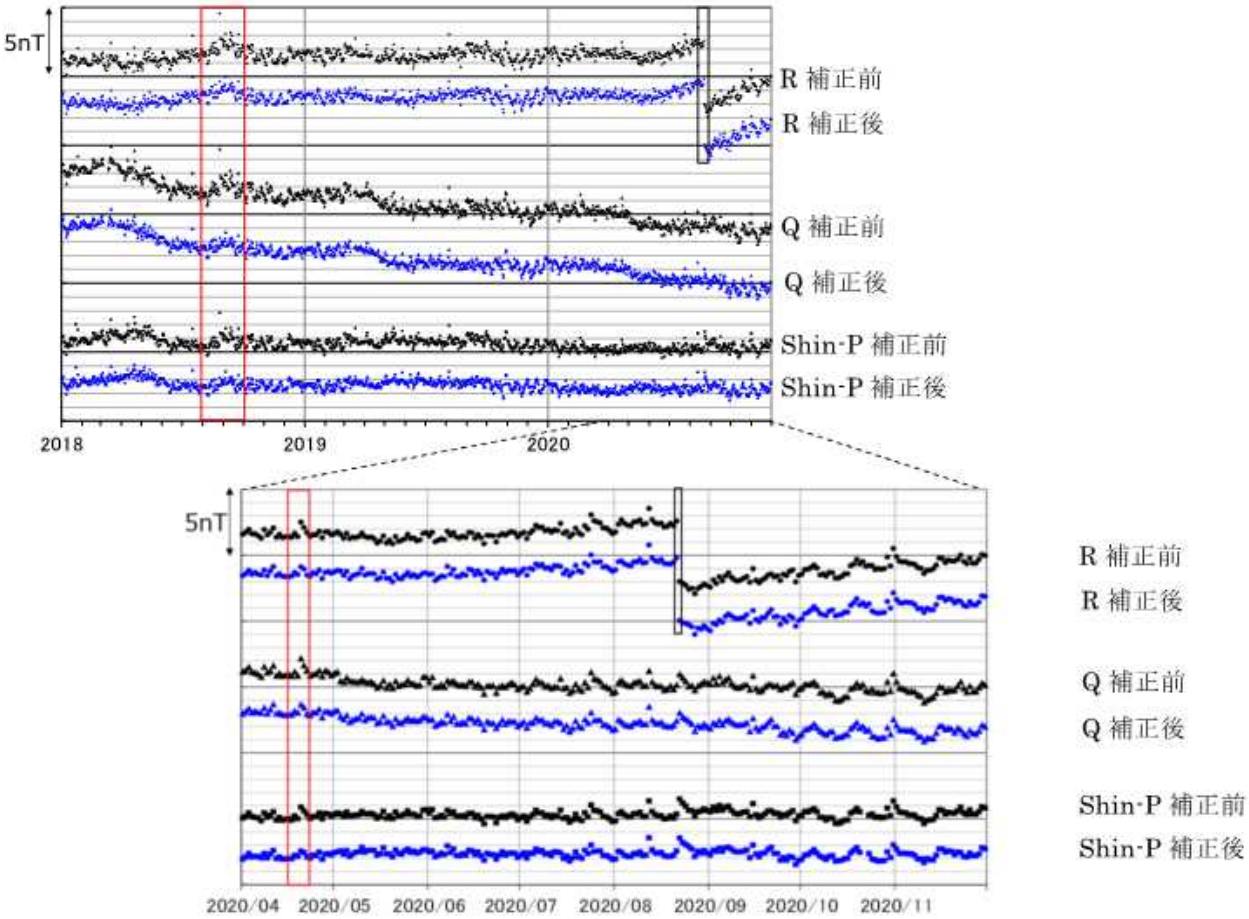


図 c-5　柿岡のH成分補正前後の連続観測点の全磁力変化
（八ヶ岳基準；2018 年 1 月～2020 年 12 月）

図 c-6　連続観測点 PQR 点、シズカ山、八ヶ岳の概略位置図

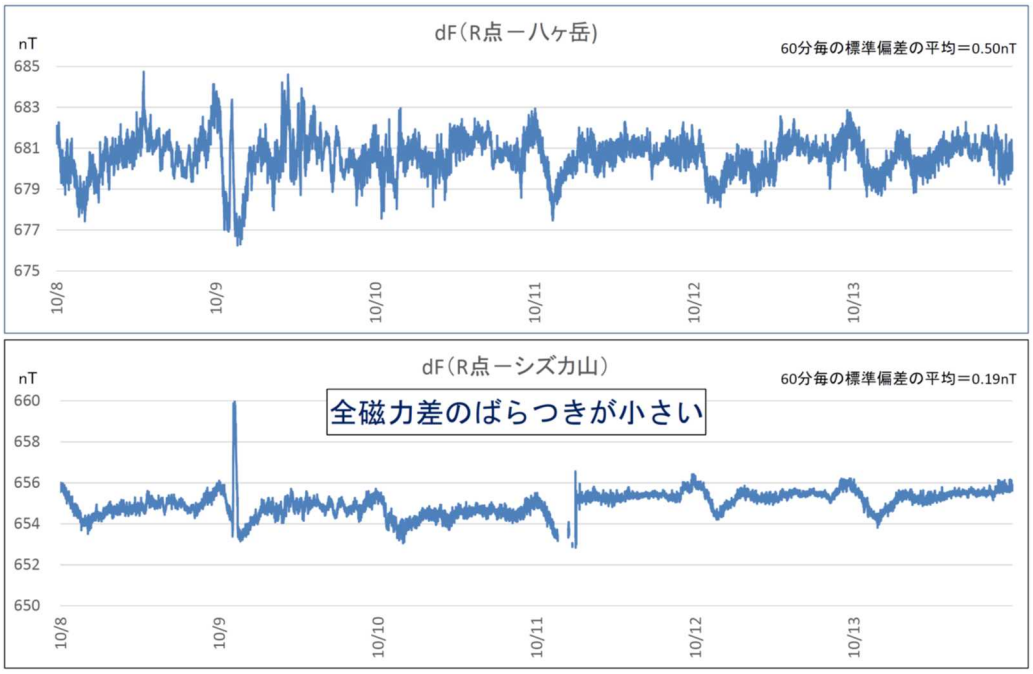


図 c-7　R 点と八ヶ岳、シズカ山の地磁気全磁力差（毎分値）（2022 年 10 月 8 日～13 日）

○草津白根山（本白根山）

2020 年 10 月 16 日に本白根山 10 地点で全磁力繰返し観測を実施した。2019 年 10 月の観測結果と比較して、熱磁気効果を示唆するような全磁力変化は観測されなかった（図 c-8、図 c-9）。2018 年および 2019 年に実施した自然電位観測結果については 2020 年の JPGU で報告した。また、観測結果をとりまとめた（飯野・他，2021）。

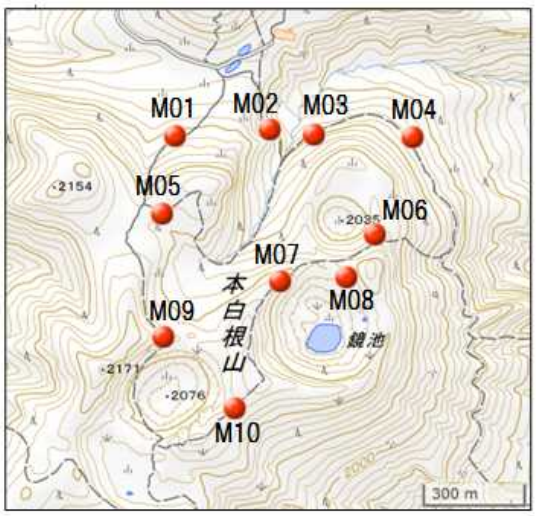


図 c-8　本白根山全磁力繰返し観測点配置図

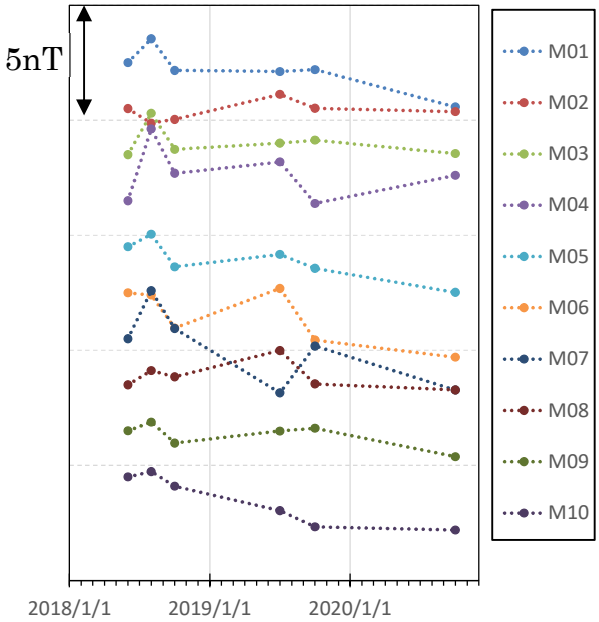


図 c-9　2018 年 6 月～2020 年 10 月までの全磁力の繰返し観測結果（基準点は八ヶ岳）

○伊豆大島

＜概要＞

三原山は過去４回の中規模噴火を 37 年±１年の周期で繰り返しており、次回噴火が非常に差し迫っている可能性は低くない（2023 年）。しかし、1986 年にＡ火口より始まったストロンボリ式マグマ噴火の前兆と見られる地磁気変化（渡辺 1998）は現在（2023 年 3 月）に至るまで検知されていない。そこで本年度も、来る時に備え、引き続き観測体制の強化とデータ解析手法の改良を行った。表 d-１に年度当初の実施計画と達成状況をまとめる。

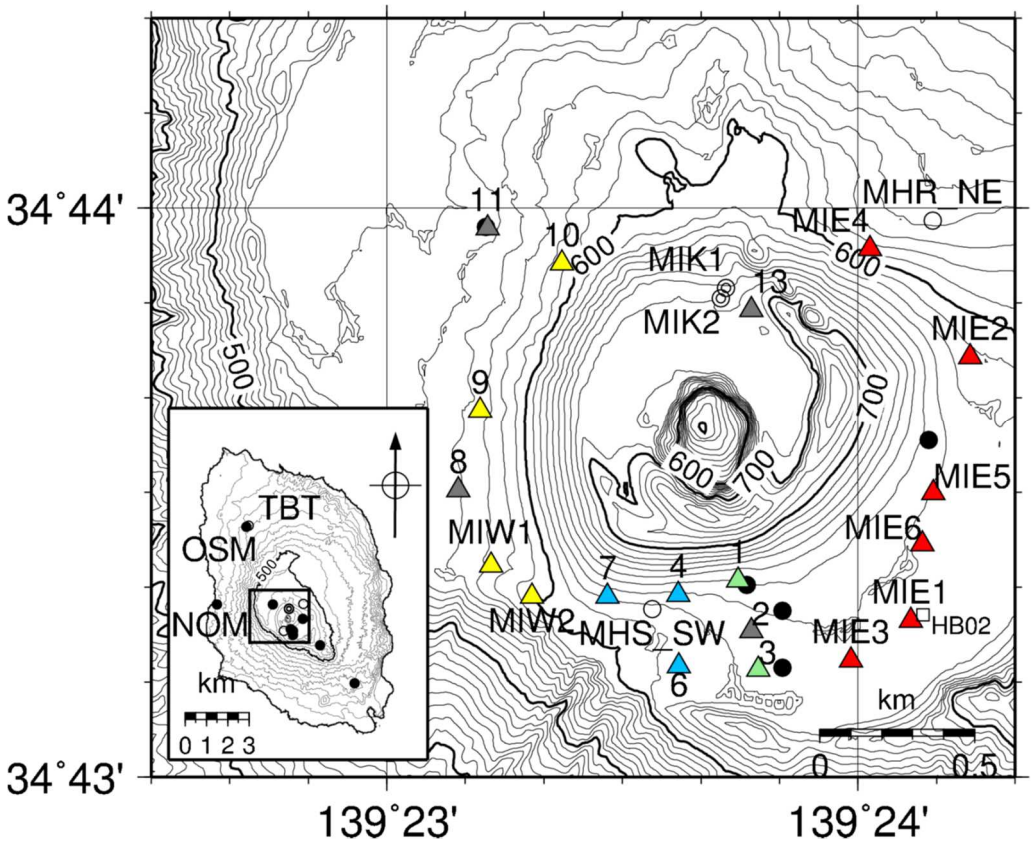
表 d-１　令和４年度の実施計画事項と年度末までの達成状況

実施計画	達成状況
定期出張（連続観測点保守・繰返し観測）	完了
東京大学地震研究所との共同利用研究（OSM 構内での絶対観測）	完了
年周変化補正法の検討、DI 補正	完了
論文執筆・出版（偏角伏角測定による長期ＤＩ補正）	完了

以下、令和２～４年度における主な調査観測成果について述べる。

○連続観測点 MIK（三原山北）の保守と環境調査、及び全磁力繰り返し観測

- MIK の現地保守点検において、連続観測点が良好に観測していることを確認した。（令和２年の磁力計収納箱の対策以降は水没はなし、令和３年の磁力計センサーケーブル交換後も、特に夏季は MIK2 においてスパイクノイズが混入する状況は変わらず）。
- 令和２～４年度も、全磁力繰り返し観測を全 17 点で実施した。観測点配置を図 d-1 に示す。繰り返し観測は 3 秒測定にて実施した。各観測点ではセンサー高を 2.0m と 1.4mにして、それぞれ 2 分ずつ（40 サンプルずつ）測定した。東京大学地震研究所の伊豆大島基準点 OSM を参照とした観測結果のプロットは図 d-2 の通りである（令和２年９月の測定結果は、年周変化の影響を強く受けていると考えられるため参考値とする）。1986 噴火の数年前より消磁を示唆する変化が見られていたカルデラ南側の東大連続点付近（黄緑：1,3）では、引き続き顕著なトレンド変化が現れていない。また、山体南側の観測点のいくつか（3、4、7、MIE6、MIE1、MIE3、MIW1）で全磁力の減少傾向がみられる。しかし、連続観測点 MHS_SW には同様の傾向は認められないため、これらの変化が火山活動に起因するものであるかは不明である。いずれにしても今回の観測結果からは、火口を中心とした深部からの熱源上昇が検知されたと断定される証拠は得られなかった。



- 繰返し観測点　△ 柿岡　　連続観測点　◎ 柿岡
- ▲ 消失　　○ 本庁
- ●　東大
- 気象観測点　□気象研（HB02）

図 d-1　伊豆大島　全磁力観測点配置図

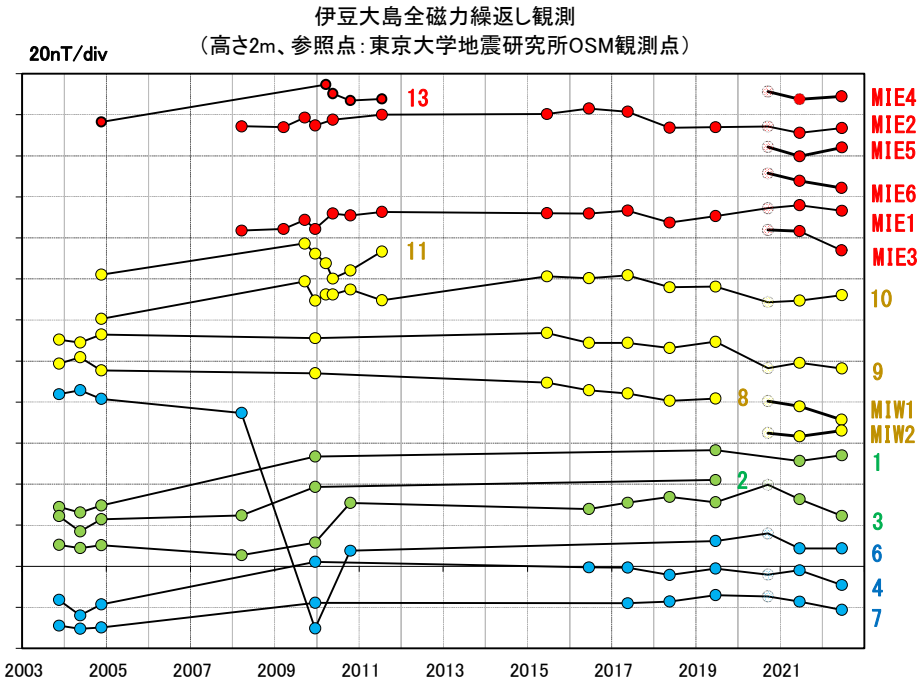


図 d-2　伊豆大島　全磁力繰り返し観測結果

○DI 観測

令和４年度の調査観測において、津倍付及び東大 OSM 構内で DI 観測を実施したが、過去の観測結果と最大１度の差が生じるなど、観測データの再現性については疑いがもたれた。令和４年度の観測では、職員が開発した偏角・伏角測定儀を用いたためによるものと考えられる。これを踏まえて、令和４年度より、観測精度の向上のため簡便な偏角・伏角測定儀を業者と共に開発中である（第２項で詳述）。

○東京大学地震研究所との共同利用研究

令和４年度も、東京大学地震研究所との共同利用研究の一環として、東大大島観測所（OSM）構内での絶対観測、全磁力地点差観測、真方位観測を行った。

・絶対観測

絶対観測は 3 日間にわたって計 7 回実施した。8 日と 9 日の観測は過去 3 年間の観測で使用したものと同一の磁気儀を、10 日には八ヶ岳で使用していた（2020 年 11 月から大島で保管している）磁気儀を用いて観測を行った。8 日と 9 日の観測結果を図 d-1 に示す。

H は 1nT、D は 0.3′、Z は 2nT の変動であり、観測結果に問題はないと思われる。

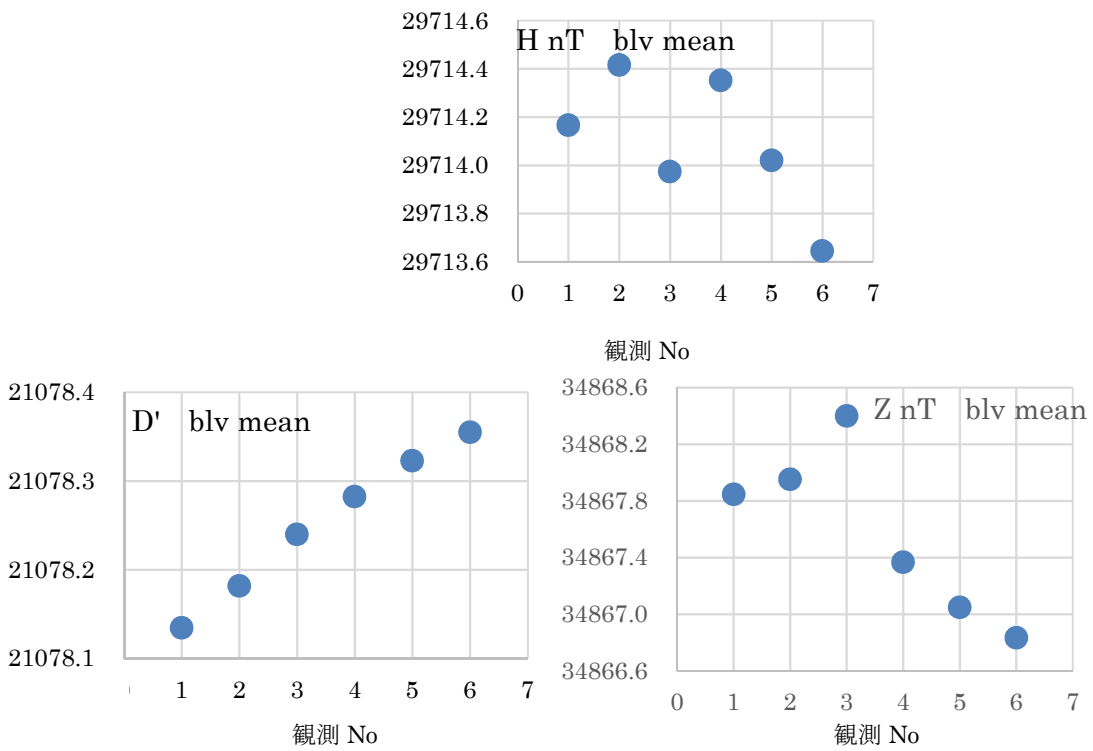


図 d-1　地磁気絶対観測結果

・全磁力地点差観測

地磁気絶対観測点（OSM）にて PM218-SB（東京大学地震研究所）を用いて全磁力地点差観測を行った。観測の結果（図 d-2）、8 日は 1968.76nT、9 日は 1968.12nT が得られ、平均して、全磁力地点差を 1968.44nT と求めた。昨年値は 1965.06nT であり、今回の観測は問題ないと思われる。

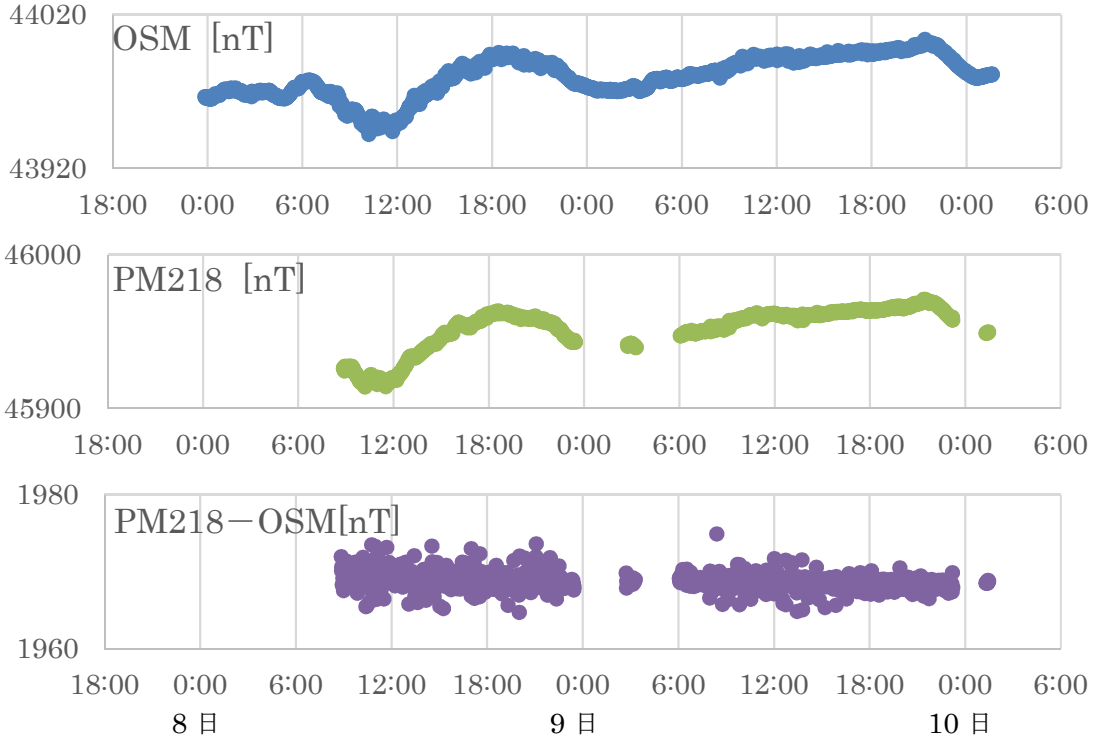


図 d-2　全磁力地点差観測結果

・真方位観測

地磁気絶対観測点（OSM）にて真方位観測を行った。観測の結果、356°57′59.51″(E+)が得られた。なお、採用値は、356°58′02.44″(E+)である。観測結果を図 d-3 に示す。観測値は、例年の観測値のばらつきの範囲内であると考えられる。

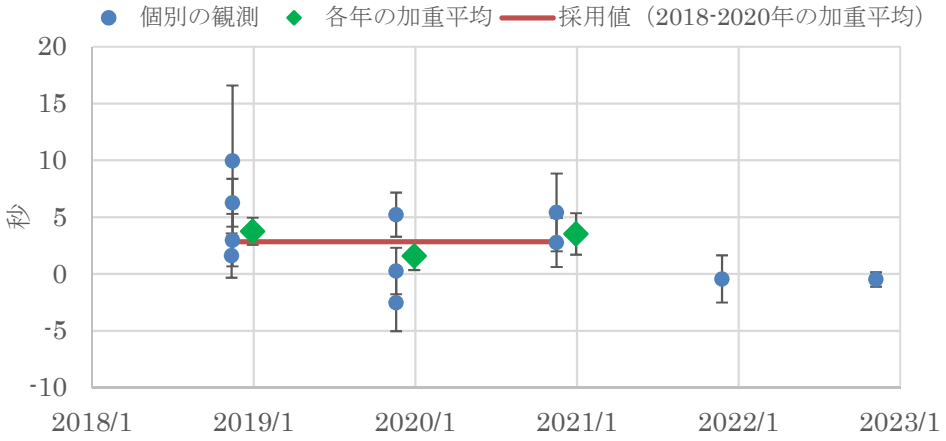


図 d-3　真方位観測結果

○連続観測点 MIK（三原山北）の年周変化補正法の検討

これまでの観測から MIK では振幅が 20nT に及ぶ年周変化が観測されている。これは、基本的には地温の年周変化を反映するが、単純なる正弦波的な様相でもなく、特に近年では MIK1 で夏期に二峰性の変化を見せている（これまでも降雨との相関性が議論されている（田口ほか 2012）が、その原因は定かではない）。火山性のトレンドを抽出するためには年周成分の除去が求められるが 2007 年～2012 年の区間では欠測が至る所にあり（図 d-3）、疎らなデータから年周成分の推定する適切な方法を検討する必要があった。

令和４年度は上記の課題に対し、基底周期を 365.25 日としたフーリエ級数による年周成分の表現法を導入し、適切な年周変化モデルを最小二乗推定する調査を行った。モデルに含める高調波の数については赤池情報量基準（AIC）およびベイズ情報量基準（BIC）を参照することで、基底の５倍の周波数まで含めるのが妥当と判断し、年周変化成分を推定およびこれを用いた補正を行った（図 d-3）。欠測が多いデータにも年周変化補正が実施できている。

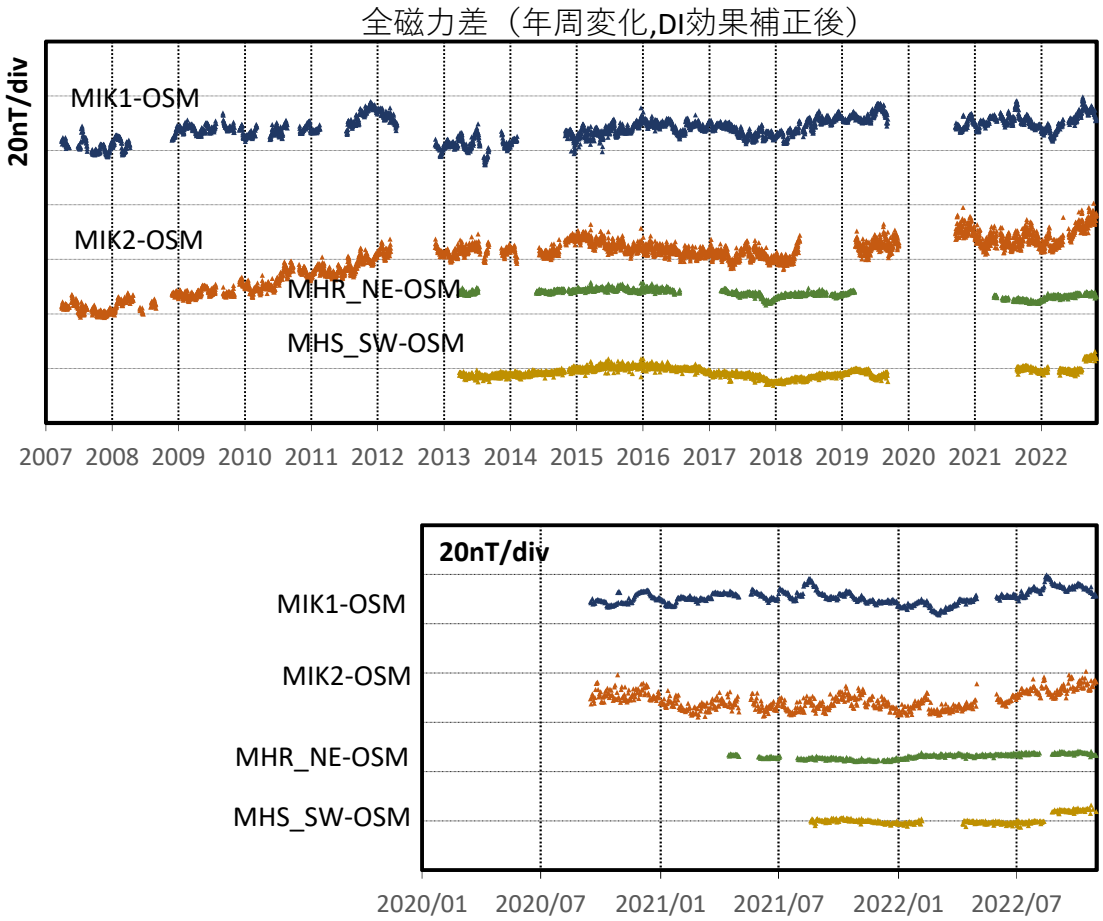


図 d-3　年周変化および DI 効果の補正を施した場合の全磁力日平均値差

（上図：期間 2007 年 3 月～2022 年 10 月、下図：期間 2020 年 1 月～2022 年 10 月）

年周成分は基本周期 365.25 日のフーリエ級数モデル（MIK1 は 6 次、MIK2 は 5 次、MHR_NE および MHS_SW は 1 次まで）から、DI 効果は各観測点および参照点の偏角・伏角の実測値と地磁気永年変化の全球モデル(http://www.spacecenter.dk/files/magnetic-models/CHAOS-7/)から推定した。

○徒歩磁気観測

・　令和 4 年 11 月の OSM 構内での絶対観測に合わせて、OSM 構内での徒歩による磁気測量を実施した（図 d-4）。2018 年に東京大学で実施された徒歩磁気観測との比較では、空間的な全磁力の分布に明瞭な変化は認められなかったが、前回の観測と同様に、少し距離を移動しただけで全磁力が数千 nT も変化することが確認された。

東大地震研究所提供（2018/10/19）

地磁気観測所測定（2022/11/9）

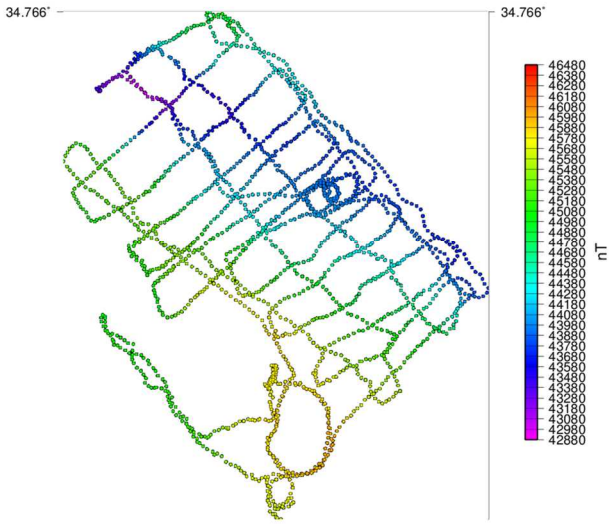


図 d-4　年周変化および DI 効果の補正を施した場合の全磁力日平均値差.

○阿蘇山

昭和 54（1979）年に開始した地磁気観測所における阿蘇山での全磁力連続観測は、令和４（2022）年 10 月 5 日を以て観測を終了した。2022 年 10 月の出張では、大平観測点、阿蘇山上観測点及び阿蘇山麓観測点における、成分点、補助点、全磁力点の位置確認を行った。阿蘇山麓観測点については、磁力計等の機器撤去を行った。

また、阿蘇山麓観測点の廃止に伴う全磁力繰り返し観測の参照点の設置候補を選定して初回の観測を行うとともに、火山活動の活発化に伴う入山規制により昨年度観測できなかった全磁力繰り返し観測を２年ぶりに実施した。

なお、阿蘇山における観測の変遷及び成果について取りまとめ中であり、令和５年度に論文等の形態で公表予定である。

○地震火山部整備６火山

平成 27 年度～30 年度に地震火山部により全磁力連続観測点が整備された６火山（樽前山、吾妻山、霧島山、御嶽山、九重山、安達太良山」）の地磁気データは地磁気観測所に伝送されており、データの評価や観測装置の安定性について全国の地域火山監視・警報センターの協力もと検討を行った。

本稿では、吾妻山の成果の概要について述べる。

・全磁力連続観測を用いた吾妻山熱水系の時間発展推定

本調査では､2022 年の夏期に活動が活発化した吾妻山で取得された全磁力の連続観測データを用い、年１回の繰返し観測では得られなかった時間分解能で大穴火口下の熱的状態の変化の推定を試みた。同年初頭の連続観測においては、前年までの帯磁（冷却）傾向が消磁（加熱）傾向に転じ、5 月からはその消磁傾向が加速していた。そこで、吾妻山を特徴づける全磁力の大きな変化率（とそれに伴う比較的高い S/N 比）に着目し、各観測点の１ヶ月前後差を説明する熱消磁源（一様磁化した球の中心位置とモーメントの大きさ）の時間発展を MaGCAP-V を用いて推定した。

その結果、4 月下旬から 10 月上旬の約 5 か月間に渡り、熱源の水平位置が大穴火口のやや北側に一貫して特定されただけでなく、興味深いことに、その標高が 1400m弱から 1600m 強までほぼ着実に上昇していた（図 f-1）。一方で、磁気モーメント強度の変化量の推移については明瞭な傾向は得られなかった。上記期間以外では、消磁に由来すると考えられる全磁力変化の強度が十分でなく、熱源の位置をロバストに逆推定することは出来なかった。

今回の解析期間は約 4 か月のみと限定的であるが、本結果は火山における熱的状態の連続監視における全磁力連続観測の有用性を示す画期的な事例である。全磁力連続観測のみに基づく本結果が示唆する熱源の上昇過程には、以下のように、大穴火口周辺の他の観測項目との調和的対応も見られる（令和 4 年 12 月火山活動解説資料（仙台管区地域火山監視・警報センター作成）より）。

① 5 月には地磁気変化に先行して、大穴火口北西の火山ガス観測装置にて SO_2/H_2S 比の上昇が観測された。

② 5 月頃から 8 月下旬にかけて、大穴火口浅部の膨張を示唆する地殻変動（傾斜計と GNSS 基線長）が観測された。

③ 9 月頃から 11 月頃にかけて大穴火口の周辺領域において地熱域の面積の拡大が観測された。

これらと本手法の結果を統合することで、5 月から 11 月にかけての大穴火口浅部における熱的状態の発展がより鮮明になり、消磁・帯磁の傾向のみを参考にしていた従来よりも高度な活動評価に貢献することが期待できる。特に、①と②が共に最盛期を迎えていた 6 月中旬～8 月上旬に熱源の標高の上昇率が最も大きく、同期間における熱水系の推移についてより詳細な解釈を与えうる。

今後も活発化の可能性がある大穴火口周辺において、本調査は全磁力の連続観測の変化も注視し続けることの重要性を示した。しかし、熱源位置の推定において重要な役割を果たす大穴火口 2 の連続データは、短周期 DI 効果による影響を比較的強く受けている。今後は各連続データに DI 補正を適用することでノイズを低減し、熱源位置の推定精度をより向上させることを目指す。

なお本調査は地震火山技術・調査課と仙台管区気象台地域火山監視・警報センターの協力の下で実施された。

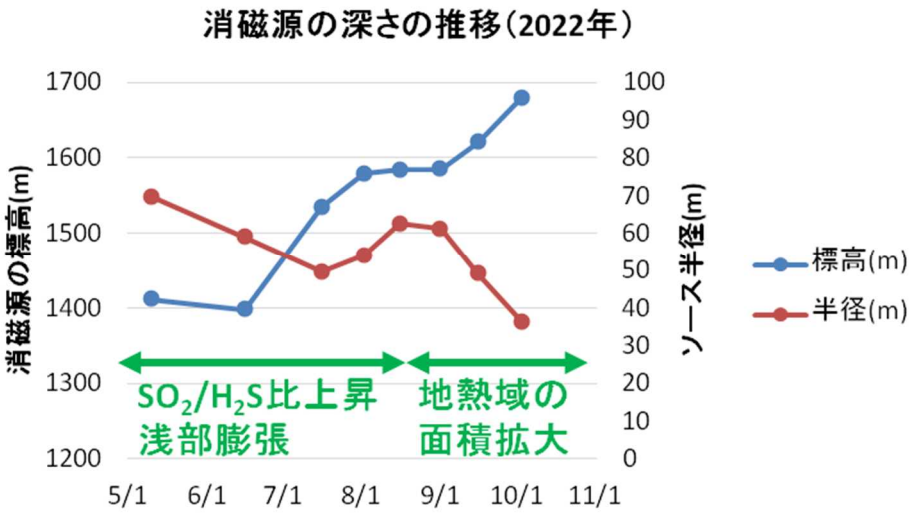


図 f-1　大穴火口浅部にて推定された熱源の標高と半径.

２．DI 効果とその補正

全磁力観測においては山上観測点と山麓参照点でそれぞれ観測を行い、その差から火山性の地磁気変化を抽出する方法が一般的である。しかし、スカラー値同士の引き算を行う性質上、参照点と観測点の地磁気の方向に違いがあると、DI 効果と呼ばれる見かけの変動が現れる。このため、火山性のシグナルを正しく抽出するためには DI 効果を適切に見積もった上で補正を施す必要がある。ここでは今期間に行った DI 効果に関連する成果をまとめる。

・DI 効果算出法の有効性の検証

DI 効果を見積もる方法として、これまで大きく分けて２つの方式により行われてきた。一つは実際に２地点の偏角と伏角を測定する方法であり、もう一つは地点差データと背景磁場変化から DI 効果成分を統計的に推定する方法である。両者はこれまで別々の事例に適用されてきており、直接比較されたことが無かった。そこで、両者の推定にどの程度の違いがあるのかを確認するため、柿岡の構内で人工擾乱監視のため常時運用されているオーバーハウザ―磁力計（J12 および J22、両点間の距離は約 120m）の観測記録を利用し、実際の全磁力地点差と各方式により算出される DI 効果の比較を行った。J12 と J22 のセンサー近傍にて簡易偏角伏角計を用いた測定を実施したところ、両点において偏角と伏角それぞれ約 0.5°の違いがあることがわかった（J12 :偏角-8.59°伏角 49.76°, J12 :偏角-7.98°伏角 50.22°）。J12 と J22 にて観測された全磁力地点差と、偏角伏角測定から／統計的推定から算出された DI 効果をプロットしたものを図 g-1 に示す。いずれも互いに良く一致していることがわかる。しかし同時に、統計的な推定では鉛直方向の補正係数の推定精度が悪くなることもわかった。

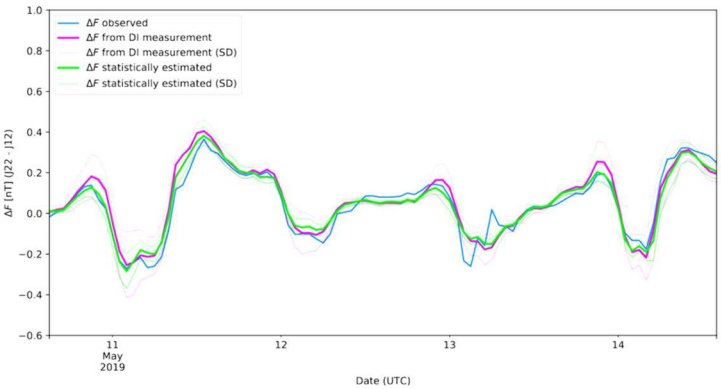


図 g-1　J12 と J22 の全磁力地点差（水色）、偏角伏角測定から算出された DI 効果（マゼンタ）、統計的に推定された DI 効果（緑）。

この検証によって、実際に観測された全磁力差が DI 効果によって説明が可能であること、偏角伏角測定による DI 効果推定と統計的手法による DI 効果推定の両方が実際の DI 効果を正しく表せることが確かめられた。ただし、統計的推定では鉛直成分の補正係数の推定精度が悪く、他成分に対して鉛直成分の変動が決して小さくない永年変化に補正を適用した場合、長期のトレンドを誤って推定してしまうことにもなりやすい。したがって、火山での DI 補正ではまず偏角伏角測定による補正が第一に望まれるべきだろう。また、統計的推定では磁気嵐等の短周期成分のみをターゲットとし、もっとも推定精度が高くなる１方向のみの成分を用いた補正を行うことも有効と考えられる。

なお、本調査は浅利・増子(2022)に詳しく記述されているため、詳細はこちらを参照されたい。

・DI 補正の適用

偏角伏角測定による DI 補正を伊豆大島において実際に適用した。伊豆大島では 40m という近距離にある MIK1,MIK2 観測点の全磁力変化に長期的なトレンド差が存在する。これは DI 効果による見かけ上の変化であることが疑われ、火山活動を正しく評価する上では DI 効果を適切に補正することが求められる。

DI 補正に必要な情報は、各観測点における偏角伏角の実測値と、伊豆大島周辺での地磁気永年変化の各成分の値である。伊豆大島においてはトランシットコンパスおよびそれを改造した伏角計により令和元年に偏角伏角の実測を行っている。測定結果を表 f-1 に示す。また、永年変化は人工衛星を用いた主磁場モデル「CHAOS7」(Finlay et al, 2020)を用いて推定できる。CHAOS7 による伊豆大島周辺での永年変化を図 g-2 に示す。MIK1、MIK2 に DI 補正を施した結果を図 g-3 に示す。2012 年以降のトレンド差はほぼ解消していることがわかる。また両観測点ともトレンドの傾きは小さくなり、この期間の火山活動による変動は見かけよりも小さいものであったことがわかる。この DI 補正の結果は、第 151 回火山噴火予知連絡会資料に反映されている。

なお、本調査は浅利・長町(2023)に詳しく記述されているため、詳細はこちらを参照されたい。

表 g-1　伊豆大島連続観測点における偏角、伏角

観測点	偏角	伏角
MIK1	−9°　13’	51°　56’
MIK2	−12°　55’	51°　48’
MHR_NE	−7°　56’	49°　58 ‘
MHS_SW	−4°　24’	50°　13’
OSM	−8°　42’	48°　50’

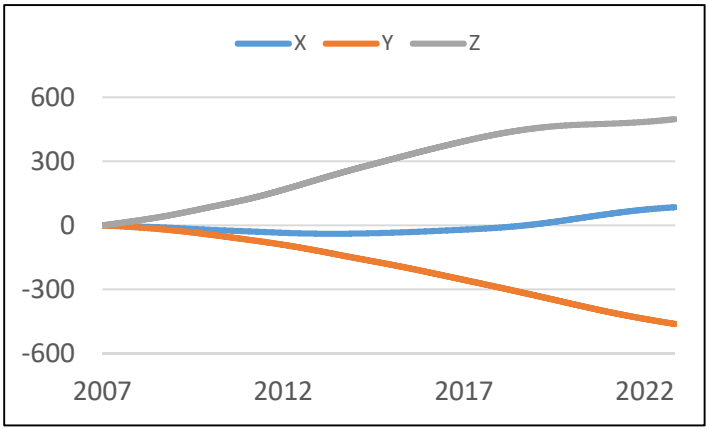


図 g-2　人工衛星主磁場モデル「CHAOS7」による伊豆大島周辺での地磁気永年変化

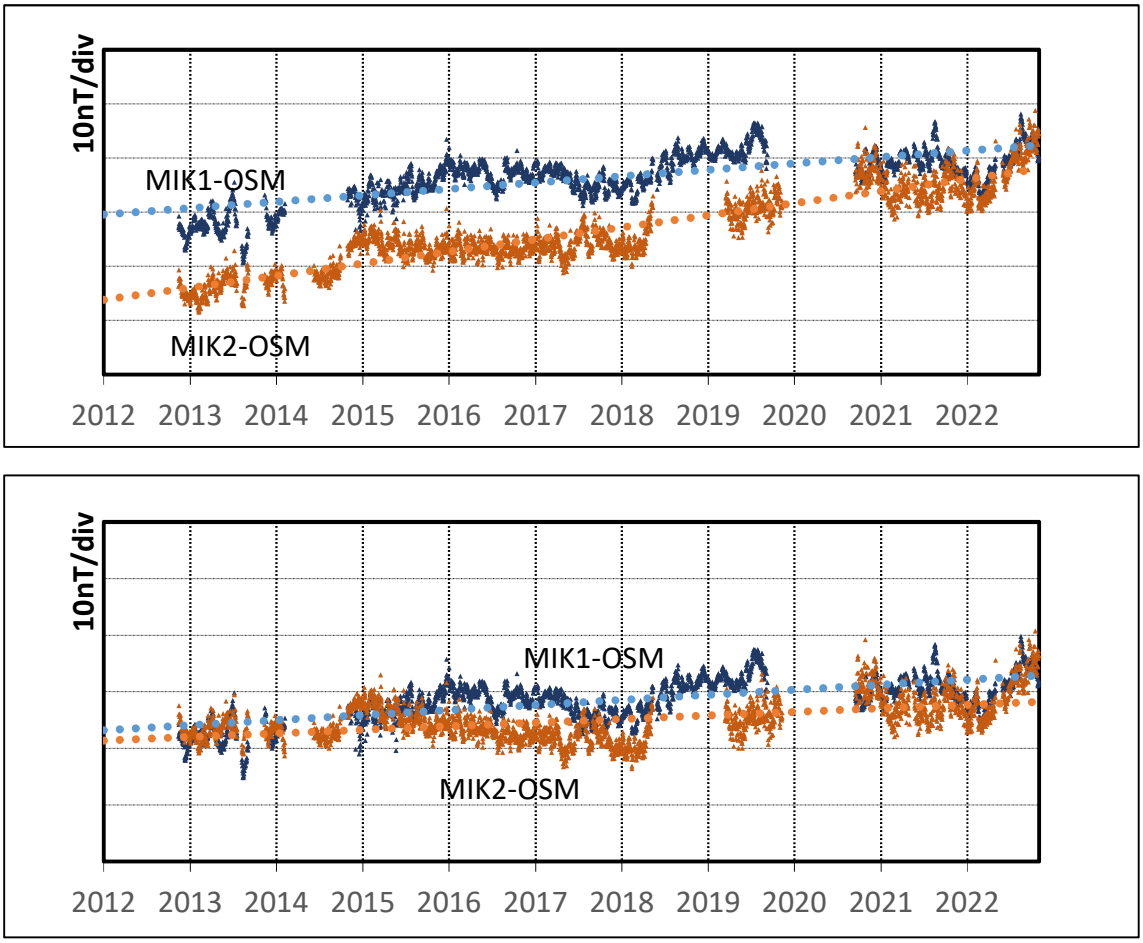


図 g-3　MIK1 および MIK2 の全磁力変化。DI 補正前（上）と DI 補正後（下）

・偏角・伏角測定器の開発

当庁では地磁気連続観測のほか、繰り返し観測も多く実施している。繰り返し観測においても、全磁力観測である以上 DI 効果の影響は避けることができないため、将来的には連続観測点のみならず繰り返し観測点においても DI 補正を施すことを目指すべきであろう。ただし、繰り返し観測点は連続観測点に比べて数が多く、ひとつの火山で 40 点近くもの観測点が存在する場合もある。DI 補正を施すには、それら一点一点で偏角および伏角の測定を行う必要があるが、令和元年に伊豆大島で行った偏角・伏角測定では、熟練の観測者であっても 1 観測点につき 90 分程度の時間を要しており、観測にかかる時間を短縮しないことには全国の繰り返し観測点にまで DI 補正を拡大するのは現実的とは言えない。

そこで、スマートフォン等に搭載されるような小型の 3 軸磁気センサーを用いることで、簡便かつ短時間で測定可能な偏角・伏角測定器を磁力計メーカーと協力して開発を進めている。図 g-4 左に示すのがその試作機である。回転台の中央に 2mm 角ほどの小型磁気センサーが取り付けられており、測定値をデジタルで取得できる。例えば伏角の測定時には、回転台を一周回すだけで 3 軸の測定値から伏角を算出可能である（図 g-4 右）。このようなデジタル値として処理する方法であれば、測定時間を 10 分以下まで短縮するとともに、人の目による読み取り誤差を排してより正確な測定ができるようになると期

待される。

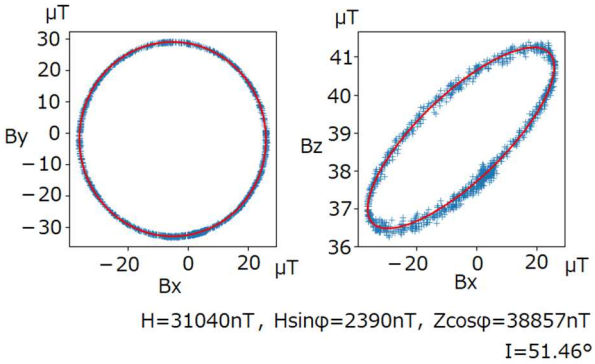


図 g-4　新しい偏角・伏角測定器の試作機（左）と伏角測定時のセンサー出力（右）。水平 2 成分の観測値の軌跡から地磁気水平成分の大きさが、水平 1 成分と鉛直 1 成分の観測値の軌跡から地磁気鉛直成分の大きさが、それらの比から伏角が算出できる。

３．まとめ

令和２年から令和４年にかけての３か年の調査研究では、従来から実施されている全磁力繰り返し観測や全磁力連続観測点の保守のみならず、徒歩による全磁力観測や繰り返し成分観測（吾妻山）及び新たな DI 測定機器の開発、草津白根山の山麓において新たに参照点候補を検討するなど、ノイズリダクションに対する新たな取り組みにも着手した。

上記のような調査研究を踏まえ、来年度以降（令和５～７年）の三か年計画においても実施することで、地磁気による火山活動評価の高度化に資するための調査研究にも継続して遂行する予定である。

［成果の発表］：

※Conductivity Anomaly 研究会シンポジウムについては、研究会論文集に掲載された場合は、「論文・報告書」の項のみに記載した。

○令和２年度

飯野英樹・山崎明・有田真・田中達朗・下川淳（2021）: 2018 年の本白根山噴火後の自然電位観測，験震時報，84 (1)，1-10.

下川淳・山崎明・笹岡雅宏・増子徳道・弘田瑛士，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.

山崎明・飯野英樹・有田真・下川淳，本白根山における 2018 年噴火後の自然電位および地磁気全磁力観測（２），日本地球惑星科学連合 2020 年大会，オンライン開催，2020 年 7 月.

山崎明，火山での精密磁場観測における諸問題，Conductivity Anomaly 研究会シンポジウム，オンライン開催，2021 年 1 月.

○令和３年度

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.

笹岡雅宏・増子徳道・下川淳・浅利晴紀・藤原善明，草津白根山において実施した徒歩による磁気測量, 2022 年 Conductivity Anomaly 研究会論文集，5-12.

○令和４年度

浅利晴紀・長町信吾，伊豆大島における全磁力観測の進展，2023 年 Conductivity Anomaly 研究会論文集，52-59.

笹岡雅宏・浅利晴紀・増子徳道（2022）：草津白根山湯釜南東で観測される季節変化に関する調査，2023 年 Conductivity Anomaly 研究会論文集，60-66.

［参考文献］：

Finlay, C.C., Kloss, C., Olsen, N. et al. The CHAOS-7 geomagnetic field model and observed changes in the South Atlantic Anomaly. Earth Planets Space 72, 156 (2020). https://doi.org/10.1186/s40623-020-01252-9.

[調査研究の種別]：重点課題
[課題名]：次期標準磁気儀設計に向けた予備調査（令和 3～5 年度）
[担当者]： ○山際 龍太郎、谷口秀隆、長町信吾、仰木淳平（観測課）
浅利晴紀、海東恵美、神谷亜希子（技術課）

[概要]：
絶対観測に用いる次期標準磁気儀設計に向けて、令和 2 年度までの試作機実験で明らかとなった問題点を踏まえ、海外での装置開発に係る最新の動向について情報収集するとともに、当所の観測成果を活用する各方面から求められる観測精度を実現するために磁気儀に必要となる性能について検討する。

[具体的な計画と達成目標]：
次期標準磁気儀に求められる精度を調査する。当所が保有している FT 型磁気儀のオーバーホールをドイツの Wenger-Wiethüchter Vermessungstechnik 社（以降、ヴェンガー社）の専門技術者に依頼するとともに、海外での磁気儀開発の状況調査を行う。過去の調査研究課題の内容のまとめを行い、これまでの試作機開発の問題点を洗い出す。あわせて次期標準磁気儀の素案について検討する。

[年次計画]：
令和 3 年度：１．過去に実施した磁気儀の改良に係る調査研究成果の総括
① これまでの調査研究で明らかになった、次期標準磁気儀製作に向けた課題の取りまとめ
② 製作業者から自動 DI 測定装置の製作の困難さの聞き取り調査及び分析
③ ベルギーの AutoDIF についての問題点の整理
２．海外における磁気儀開発に係る最新情報の収集
３．ユーザー（大学、研究機関、民間会社等）が要請する観測精度の聞取り調査及び取りまとめ
令和 4 年度：予算中期計画にある令和 6 年度「標準磁気儀更新」概算要求に伴い、令和 5 年 1 月の推計作業までに予算要求に係る情報収集の必要性があることから、本年度は調査方針を転換する。次期標準磁気儀の対象として（早期開発実現の見込みが薄い）自動測定装置を外し、手動測定装置に一本化する。作業は大きく分けて、
① 聞き取り調査
② ドイツ・ヴェンガー社への FT 型磁気儀のオーバーホール発注
③ 観測基線値の誤差の評価
から構成される。各作業の詳細については（**補足**）を参照のこと。

令和５年度：次期標準磁気儀の仕様作成に向けた具体的要件の取りまとめ

[工程表]：

令和４年度 年間計画

業務項目	内容	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	備考
聞き取り調査	海外機関の磁気儀運用保守・更新展望調査													IMOの中でも中心となっている機関を対象
	次期磁気儀に要求される性能・仕様のまとめ													
	セオドライトメーカーの情報収集													光学機器メーカー、医療メーカー等幅広に調査
	セオドライトメーカーへの聞き取り調査													
ドイツFTオーバーホール（継続）	前年度開拓ルートによるFTオーバーホール													KAK No.5を送付
観測基線値の誤差の評価（継続）	各誤差要因の調査													
	観測基線値の不確定性の推定													
全体とりまとめ														

---（補足）---

令和４年度の実施計画の具体をここに記しておく。このうち①は前年度の作業として予定されていたが、遅れが生じたため、令和４年度の計画に含める。②と③については、次期標準磁気儀に Carl-Zeiss THEO 010B が採用されることを想定して前年度に開始した作業の継続である。

① 聞き取り調査

ここでの調査は、自動測定装置ではなく手動測定装置に関するもので、DI-72 のような１点モノではなく、多数の展開販売に繋がり得る非磁性経緯儀（最小目盛 1″）に対象を絞る。本作業では、次期標準磁気儀の新規開発、または販売中の経緯儀の非磁性への改造を想定し、以下の聞き取り調査を行う。

調査 a　国内の測量機器メーカー他に対し、技術・ビジネス上の側面から開発の実現性について聴取する。

調査 b　海外の地磁気観測関係機関に対し、各機関・各国の磁気儀の運用と保守状況、および新規開発の展望についてメール照会する（国際業務班との連携）。

それぞれについて年間計画を以下に述べる（工程表の業務項目「聞き取り調査」も参照）。

＜調査 a の計画＞

以下２期に分けて聞き取り調査を進める。

［フェーズ Ⅰ（５月～７月）］調査の対象とする国内の業者を選定する。業者の候補としては、測量機器メーカーが考えられる。その他にも非磁性部材を販売機器に使用している可能性が高い医療機器メーカーも情報収集の対象となり得る。一方、それと並行して聞き取り調査に用いる資料を作成する。ここでは次期磁気儀の非磁性経緯儀に求められる仮の要件：

i.　現行の観測精度の維持に必要な THEO 010B （最小目盛 1″）相当

ii.　米 USGS を始めとした各国機関でも使用されている THEO 020（最小目盛 6″）

相当
に準じた『聞き取り用仕様書』をそれぞれ作成しておく。

［フェーズⅡ（８月～１２月)］聞き取り調査を展開する。要件に合う経緯儀の製作が難しいという場合には、特にその具体的理由を収集する。基本的にはメールおよびウェブ会議で聞き取りを行うが、必要に応じて業者への訪問調査も行う。

＜調査ｂの計画＞

中間報告まで（～９月）に調査を完了させる予定で作業を進める。対象としては、特に地磁気観測で主導的役割を担う機関が候補として挙げられる。一部を除いてインターマグネット観測所を運営する政府系機関であり、いずれの観測所でも絶対観測には THEO 010B または THEO 020 による FT 型磁気儀が用いられている。聞き取り項目を事前に定め（磁気儀の保有台数、保守状況、磁気儀の更新プラン、次期磁気儀の新規開発に関する構想・展望の有無など)、メールにて照会する。収集する回答からは、国内で新規開発を行う必要性、海外製の次期磁気儀の導入可能性に関する示唆が得られ、次期磁気儀の更新計画を策定する上で有用な参考情報となる。

② ドイツ・ヴェンガー社への FT 型磁気儀のオーバーホール発注

前年度、当所の FT 型磁気儀のセオドライト THEO 010B をドイツへ輸送して Carl-Zeiss の技術を継承する光学機器メーカー・ヴェンガー社によるオーバーホールを実現した。これにより DI-72 の予備器として位置づけられる KAK No.3 の徹底した保守を実施するとともに、一連のノウハウ（国際運送業者 FedEx による経緯儀の輸出入に係る手続きなど）を獲得した。

令和４年度は、前年に開拓したルートを活かし、観測課の協力（磁気儀の選定や器差測定）のもと、ヴェンガー社による FT 磁気儀のオーバーホールを引き続き実施する。予定では、前年より早い時期（５－６月）に KAK No.5（女満別 FT-88）のセオドライト THEO 010B をドイツへ輸送し、12 月までに保守・修理・GFZ との精算を終えて国内に返送されると見込んでいる。

③ 観測基線値の誤差の評価

採用基線値を観測基線値の線形補間とする現行の方式は、観測基線値の誤差が十分に小さくない限り、その妥当性が保証されない。その観点から、特に人工擾乱の頻度と大きさが近年大幅に増加している鹿屋では、観測基線値の測定精度低下への影響について、改めて調査が望まれる。前年度は、曲線（多項式）フィッティングにより採用基線値を推定した場合、現行の採用基線値との差が 0.3nT(または 0.03’)を超える場合も生じることを確認した。

令和４年度の調査では、（人工擾乱の影響が比較的小さい）柿岡と（比較的大きい）鹿屋をそれぞれ事例として、観測基線値の誤差を評価することを試みる。実際の絶対観測の結果として得られる観測基線値の時系列は、ある程度はバラついているが、仮にそのバラつきと

各観測基線値のエラーバーが同等であった場合（図１）、必ずしも線形内挿による方式が有意であるとは言えず、曲線フィットなど別の方式の導入検討も要する。

まず中間報告までに、測器固有の測定精度(precision)、人工擾乱に伴って生じる DI 測定値・スカラー磁力計の地点差・成分変化計値の確度（accuracy）など観測基線値の不確定性の各要因について統計的な評価を行う。年度後半に各要因に対して見積もった確度の全てを考慮して、観測基線値に及ぶ誤差の評価を行う。

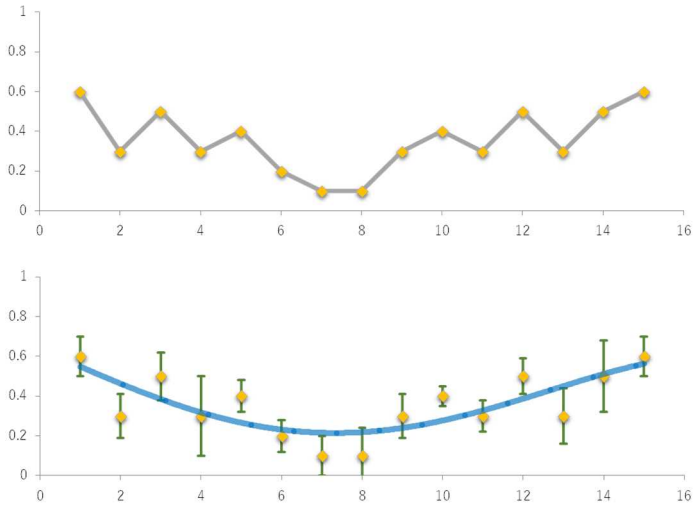


図１　観測基線値（黄点）と採用基線値（線）の概念図。
現行の線形内挿（上）と観測基線値の誤差を考慮した曲線回帰（下）。

[令和４年度の成果]：
実施計画に挙げた課題

① **聞き取り調査**
② **ドイツ・ヴェンガー社への FT 型磁気儀のオーバーホール発注**
③ **観測基線値の誤差の評価**

の各々で成果があった。以下に各課題の成果内容を記す。

①　聞き取り調査

＜調査 a の成果＞

国内業者ほか測量機器業界の団体に対し、非磁性セオドライト開発の実現性について電話とメールで聴き取りを行った。表１にそのまとめを示す。結論から言えば、**国内で非磁性セオドライトの製作、或は、既存の光学式セオドライトの非磁性への改造を請負える業者は皆無**である。各業者から聴き取りそのものに対する回答は得られたが、そのいずれにも前向きなものは含まれなかった。その理由は以下の通りである。

- 光学式セオドライトの需要が無い。市場から消えて既に相当の年月が経っており、昨今の測量機器市場には（トータルステーションを含む）電子式セオドライトしか存在しない。
- 業者が光学式セオドライトの製作のための技術や設備を保持していない。

「技術的にも、商業ベースの受注についても、非常にハードルが高い（メールより抜粋）」との回答があり、業者側から見た現実的な対応の難しさが現れている。

また、「国内に非磁性セオドライトを扱う業者は無い」との回答があり、12 月に回答があった業者を訪問し、改めて非磁性セオドライトの開発あるいは入手の可能性について相談をしたところ、現在も生産販売されている可能性のある中国の光学式セオドライト（以下の調査 b 参照）の入手について引き続き調査を進める、ということになった。

表 1　国内測量機器メーカー他への聞き取り調査結果まとめ

日付	聴取先	方法	Q	A
7月7日	A社	電話	光学式セオドライトの取扱はあるか？非磁性化は？	**光学式は生産中止**から久しく、ユーザーがいない。取扱はカタログのラインアップのみ。**生産のための設備も無い。**
7月7日	B社	電話	光学式セオドライトの取扱はあるか？非磁性化は？	**取扱はない**。企業の情報について回答は御免。カタログを確認されたい。
7月11日	C社	メール	光学式・電子式セオドライトの非磁性化の動向は？	国内で非磁性のセオドライトを製造できる**メーカーは存在しない**。
8月5日	D法人	メール	1秒読み光学式・電子式セオドライトを非磁性に改造できる国内業者はあるか？	**技術的にも、商業ベースの受注についても、非常にハードルが高い**。あまりお役に立てない。
8月8日	E社	メール	1秒読み光学式・電子式セオドライトを非磁性に改造できるか？	関連会社のA社での取扱いなので転送した。

＜調査 b の成果＞

地磁気観測業務を担う海外機関（気象または地質調査関連の公共機関）および地磁気観測装置メーカーに対しメールで聴取を行った（表２）。その結果、自力で絶対観測自動化装置の開発を進めてきたベルギー王立気象研究所（RMI）を除き、**いずれの公的な地磁気観測機関においても非磁性セオドライトを開発する能力・計画が無い**ことが判明した。RMI の自動化装置 AUTODIF については、現開発段階のモデルを用いて当所で試験観測調査が実施されており、当所の観測基準を満たすような観測精度・安定性が得られないことが判明している。

RMI から得られた情報では、同研究所と中国業者 Bofei 社との共同開発［Rasson・Hendrickx・Marin・Humbled・Li, 2016］による TDJ6E-NM（最小目盛 6″）および TDJ2E-NM（最小目盛 2″）の生産販売が続いている可能性がある。しかし、同社の窓口へメール問合せを行ったところ、回答は得られなかった。調査 a でも述べた通り、引き続き Bofei 社製品の入手可能性とその仕様の詳細について調査を進める予定である。

表２　海外関係機関への聞き取り調査結果まとめ

日付	聴取先	方法	Q	A
8月4日	RMI ベルギー王立気象研	メール	将来の開発計画は？	RMIは**開発を手掛ける随一の機関**。今後もAUTODIFを推進する。手動測器 BOIF TDJ6E（ラッソン×中国有限公司Bofei）も勧める。Mingeoの非磁性Zeissは評判悪い。
9月2日	Geoscience Australia 豪州地球科学機構	メール	保守をどうしているか？ 保守に満足しているか？ 将来の開発計画は？	軸調整はセルフ。国内業者の保守は不満。昨年購入したMingeoのZeiss020は問題有り。昨年はニーメックの助けでヴェンガー社に保守を依頼。**自前の開発能力は無し。**
9月2日	BGS 英国地質調査所	メール	保守をどうしているか？ 保守に満足しているか？ 将来の開発計画は？	保守はBartingtonへ発注。部品不足でZeissの保守が困難国内観測所のルーチンではWild T1も併用。MingeoにはZeiss010を注文中。**自前の開発リソース無し。**
9月15日	Mingeo社 ハンガリー民間業者	メー	将来の開発計画は？	インターマグネットの要件(±2.5nT)を満たしうるZeiss 020の改造を推進。電子読み取り用エンコーダとGPS刻時装置を組み込み、タブレットによる表示・収録。定期的な較正の不要な小型の核磁気儀dIdDも開発中。

一方、FT 型磁気儀を構成する 1 軸磁力計（英・バーティントン社 Mag-01H（A Probe））の生産動向については、近年の発注数の少なさを受けて、同磁力計の生産を停止する見込み（2024 年～）との情報が得られた（なお、偏角伏角観測以外を用途とするモデル（Probe B から Probe H）の生産は継続される）。目下、英地質調査所（BGS）を通じてその真偽を改めて確認しているところであるが、世界の主要地磁気観測所におけるルーチン観測に用いられる Mag-01H（A Probe）の生産が終了すれば、業界への打撃は大きい。既に販売価格が 1 年で 20 万円ほど上昇している（2022 年の時点で 1 式 120 万円程）との情報があり、今後も販売価格が高騰する可能性もあることから、早いうちに在庫から複数台を確保することについて検討が必要である。なお、デンマーク国立宇宙局（DTU Space）に問い合わせたところ、Mag-01H と並んで偏角伏角観測に利用されている同局の 1 軸磁力計 Model G についても、英 Pandect 社によるフラックスゲートのコアの生産中止に伴い、まもなく生産を終了するとの情報が入った。予算が許せばこちらも早いうちに購入しておくことを検討したいところである。

本調査（a と b）では、聴き取り先として国内外の公共機関・民間企業の全てを網羅できていない。そのため、磁気儀に適するセオドライトを製作できる業者が Bofei 社の他にも存在する可能性は否定できない。しかし、非磁性の光学式セオドライトの新規開発に関する情報が世界の主要観測所から全く聞かれなかった。技術的・経営的な困難に阻まれ、地磁気観測業界全体で絶対観測の持続可能性について展望が無いというのが現状であろう。地磁気絶対観測は（そして、それを用いた社会インフラであるナビゲーションも）冷戦時代に旧東独が有した測器製作技術に当面依存し続けることになる。

最後に、現在考えられる善後策を以下に挙げておく。

- 次期標準磁気儀を新規開発する更新計画は取り下げず、技術的なブレイクスルーを

待ち、実現するまで予算要求を先送りする。

- FT 型磁気儀に利用できる現存のセオドライトでは最も精度の高い Zeiss THEO 010B を今後 20 年は継続使用することを想定し、唯一の現役の元 Zeiss 技術者に徹底した保守（完全分解によるメンテナンスも可能）を依頼する（→**調査②**）。保守を終えた複数台の THEO 010B のうち最も安定したものを将来の標準磁気儀とする。
- 引き続き磁気儀の開発動向の情報を積極的に収集する。以下の計画の進捗は引き続き注目される。
  - 中国・Bofei の光学式セオドライトの生産状況（手動測定）
  - ハンガリー・Mingeo 社による Zeiss THEO 020 改修計画（測定角度を電子表示式にした半自動測定）
  - ベルギー・RMI による AUTODIF 計画（完全自動測定）
- かつての観測条件（高精度で安定した DI-72 による測定、及び人工擾乱の少ない環境）を前提として採用された現行の基線値算出方法を見直す。現行および将来の観測条件の劣悪化を想定し、統計学的な評価に基づいて適切な基線値算出方法に切り替える（→**調査③**）。

② ドイツ・ヴェンガー社への FT 型磁気儀のオーバーホール発注

当所の非磁性セオドライト Zeiss THEO 010B のうち KAK No.1（予定されていた KAK No.5 から変更）の保守を実施（ヴェンガー社に発注）した。昨年度に引き続き 2 台目の実施である。昨年度の経験から輸出入の手続き等における要領を得ており、国内にける作業は比較的スムーズに捗った。一方、ドイツの仲介機関 GFZ（ドイツ地球科学研究センター）の事務では、請求書の作成においてドイツ付加価値税（VAT）を免除する新たな作業を追加したために、多少の時間を要したようである。それでも全体としては昨年よりも進捗は速く、令和 4 年中に無事納入された（図 2）。なお、ヴェンガー社による点検・修理作業は迅速であり、その期間は 1 ヶ月にも満たない。

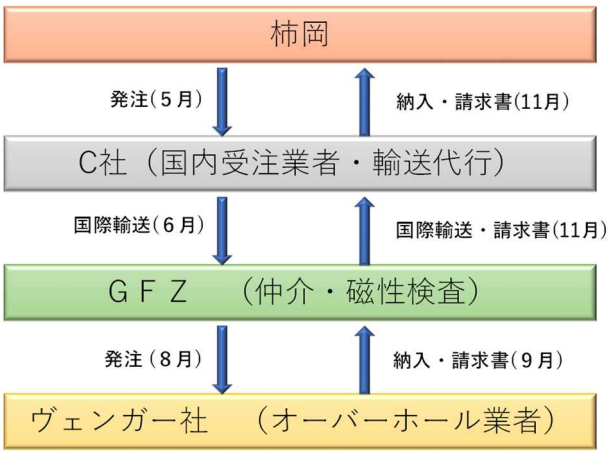


図 2 令和 4 年度の工程

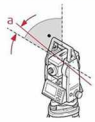
今回の KAK No.1 に対する保守作業の実施項目を表 3 に示す。これはヴェンガー社が作業前に点検に基づいて提示した作業予定項目および見積り（2022 年 7 月 25 日付）の和訳である（原文はドイツ語）。「実施予定作業」の太字が該当項目であり、作業後の請求額も見積りと同じであったことから、実際の作業内容もほぼ同じであったと考えられる。前回の KAK No.3 の際とは異なり、今回は完全分解ではなく部分的な分解による保守作業であった。全体としては、各部分に清掃とグリースが施されたほか、セオドライトの 3 軸、即ち水平軸誤差・視準軸水平誤差・視準軸高度誤差（表 3 の欄外）の調整が行われている。さらに「備考」に記されたように、特に不具合があると判断された箇所には適宜必要な修復作業が行われた。このようなの徹底した保守作業の結果として、光学系の視認性や体感的な操作性の向上のほか、実際の方位角・高度角の測定精度においても改善が得られるものと期待される。

表 3　ヴェンガー社の点検報告／見積書の和訳

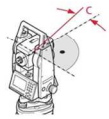
(顧客番号) [redacted]	(担当窓口) [redacted] (電話) [redacted] (携帯番号) [redacted] (Fax) [redacted]	見積書 22年7月5日 (修理番号) 735 rt (作業担当) [redacted] (電話) [redacted] (Fax) [redacted] (修理受付) 2022年6月23日	
(機器) セオドライト (メーカー) Zeiss Jena (型) Theo010B (シリアル番号) 151571	(生産地) 日本	(見積書 未承諾) ○ (見積書 承諾済) ○ (日付)　(署名)	
(入庫検査)	(付属品)		
(実施予定作業)			
● 機器	乾燥、清掃	● 自動補償機構 垂直目盛盤の"°"を自動で水平線上に合わせる機構	**清掃、調節、調整**、交換 部分的／完全
● 装置の分解様式	**部分的**、完全	● 光学式目盛り読取機構 (マイクロメーター)	**清掃、調節、調整**、交換 部分的／完全
● 機械的動作部	**グリース、清掃**	○ 電子式目盛読取り Hz, V	センサヘッド調整、交換
○ 湿気による障害	除去	○ 基板／給電	点検、設定、交換
● 内部光学系	乾燥、**清掃**		
● 整準台、整準ネジ	**清掃、グリース、方向調整**、交換	● 水平気泡管、円形気泡管	**点検、調整**、交換
● 微動機構 Hz, V	**点検、清掃、グリース、方向調整**、交換	● 視準軸水平誤差[c]	**点検、調整**
○ 水平目盛盤回転止安全レバー[a]	点検、調整、修理、交換	● 視準軸高度誤差[d]	**点検、調整**
● 水平目盛盤回転機構	**点検、調整**、修理、交換	● 接眼鏡クロス焦点調整機構	**点検、調整**、設定、定数調節
● Hz-クランプ	**修理、設定**	● 視度調整機構	**点検、調整**、交換
● V-クランプ	**修理、設定**	● 保護ケース	修理、交換、**清掃**
● 水平回転軸	**清掃、グリース**、可動性回復		
● 垂直(光軸)回転軸	**清掃、グリース**、調節、水平軸誤差[b]**調整**		
● 光学求心装置	**清掃、グリース、修理、調整**		
● 望遠鏡焦点調整機構	**清掃、グリース**、調節、**調整**		
● 分度盤 Hz, V	**清掃、点検**、偏心矯正、**読取り調整**		
(備考) ＊ マイクロメータ板の修理 ＊ 自動補償部品の新規設置 ＊ 視軸高度ずれ[d]の解消 ＊ 視軸水平ずれ[c]の解消 ＊ 光学求心装置の修理と調整 ＊ 垂直(光軸)回転軸の調整[b] ＊ 水平回転軸の清掃とグリース ＊ 自動補償機構の調整 ＊ V + Hz 微動機構の修理 ＊ V + Hz クランプの修理 ＊ 整準台の修理 ＊ 全体調整		小部品 [redacted]€	
(出庫検査) 強度試験 ○ 試験運転 ○ 気密性(湿気・塵)点検 ○ 最終点検 ● 検査済証貼付 ● 検査プロトコル発行 ● 本機器には、規格DIN EN.ISO 9001:2000に準拠し、検査、修理、光学及び電子的調節を実施する。 (署名 – 営業・技術担当) Krüger 修理中に発覚した不具合は本見積りの対象外とし、お客様と協議の上、新規に見積りを行います。 この見積りの有効期間は6週間です。		小部品 [redacted]€ 作業時間 16時間 @[redacted]€/時間 [redacted]€ 総額(税別)±10% [redacted]€	

a)黄色いつまみ – 水平目盛盤を経緯儀上部に固定

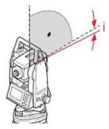
b)水平回転軸と垂直(光軸)回転軸の非直交度



c)視準軸と垂直(光軸)回転軸の非直交度



d)視準軸と水平回転軸の非直交度



出典：Vermessen leicht gemacht (Leica Geosystems)

今後の展望としては、当所が保有する残りのセオドライト THEO 010B をヴェンガー社へ送り、なるべく多くの保守・修復を完了したいところである。ヴェンガー社および GFZ としては、当所による昨年度の保守依頼（KAK No.3）が、EU 圏外からの初の試験的受注であった。その後、2021 年のうちに既にオーストラリア（豪州地球科学機構）からの保守依頼を受けている。今後も世界からヴェンガー社への保守依頼は増加する可能性がある一方、高齢の技術者が現役を続けられる時間には明らかに限りがある。当所としては、DI-72 が使用不可能となる日に備え、また数十年後も見据えての地磁気観測業務の維持のため、今しか対応できないことについては優先して実施していく必要があると考える。

③　観測基線値の誤差の評価

今年度は時間的な制約から、実施計画通りに「誤差の評価」を完了させることは出来なかった。これを受け、来年度は以下 i と ii

i.　観測基線値の誤差の評価

ii.　新しい採用基線値の定義の提案

の両方において一挙に成果を挙げることを目指すことになる。その準備という位置づけで、今年度は「観測基線値の誤差の評価における方法論の考察」と「観測基線値の誤差に関する統計的な予備調査」から成る予備調査に取り組んだ。以下にその成果をそれぞれ述べる。

＜観測基線値の誤差の評価における方法論の考察＞

本重点課題の当初の目標は「次期標準磁気儀に求められる観測精度を調査し、その成果を設計の仕様に反映させること」であった。つまり、次期標準磁気儀による絶対観測の結果に、有限の観測誤差（または不確かさ）が含まれることを前提としている。このことを認めるならば、本来は誤差を含む観測結果を統計的に合理的な方法で処理し、地磁気確定値に適切に反映させるプロセスの導入も必要となる。そこで、実施計画からは逸脱することになるが、本考察では現行のデータ処理方式（以降「現行方式」）の問題点について議論をしておく。それが観測精度の調査と本質的に切り離せないからである。

観測精度とは、観測データ $A_{観}$ のバラツキの程度を表す。ここで $A_{観}$ は

$$A_{観} = A_{真} + A_{オ} + A_{誤}$$

と表されるものとする。つまり、観測データ $A_{観}$ が（厳密には不可知な）真の物理量 $A_{真}$ と、（器差など）系統誤差によるオフセット $A_{オ}$ と、（測定誤差など）偶然誤差によるバラツキ $A_{誤}$ の重ね合わせとして取得されるものと見なす。$A_{オ}$ と $A_{誤}$ の標準偏差は、それぞれ観測の確度（accuracy）と精度（precision）の指標となる。以降、バラツキ $A_{誤}$ の統計的性質を、期待値 μ_F（=0）と標準偏差 σ_A により記述する。σ_A が $A_{真}$ の典型的な振幅（シグナル）より有意に小さい場合、その観測データ $A_{観}$ は「高精度なデータ」と言える。

地磁気絶対観測の 0 次データである $A_{観}$ は、磁気儀の各所定の姿勢につき得られる角度

測定値である。その１次プロダクトとして偏角 $D_{観}$ と伏角 $I_{観}$ が $A_{観}$ の線形結合により算出される。別に取得されたフラックスゲート磁力計の観測データを合わせると、2 次プロダクトとして基線値 $B_{観}$ が導出される。$B_{観}$ は $A_{観}$ の非線形関数であるが、これを定数である暫定基線値 $B_{観}^{(0)}$ の近傍で微小量 $\varepsilon \sim D_{観}^{(1)}/D_{観}^{(0)} \sim I_{観}^{(1)}/I_{観}^{(0)} \sim 0.001$（$^{(0)}$ と $^{(1)}$ はそれぞれ暫定基線値と観測基線値を表す）に関してテーラー展開 $B_{観}=B_{観}^{(0)}+B_{観}^{(1)}+O(\varepsilon^2)$ すると、2 次以上の項 $O(\varepsilon^2)$ が十分に小さいことから、1 次近似 $B_{観}=B_{観}^{(0)}+B_{観}^{(1)}$ として基線値は $F_{観}$ の線形結合により表現できる。従って、基線値 $B_{観}$ も観測データ $A_{観}$ と同様に

$$B_{観}=B_{真}+B_{オ}+B_{誤}、$$

と記述される。偶然誤差 $B_{誤}$ の標準偏差 σ_B が（厳密には不可知な）真の基線値 $B_{真}$ の変動より有意に小さい場合、その基線値 $B_{観}$ の精度は高いと言える。

現行方式にはそもそも「次期標準磁気儀に求められる観測精度」を定量化する問題（つまり許容できる最大の σ_A を具体的な定義する問題）とは相容れない矛盾が内在する。現行方式では、絶対観測の終了後、すぐに二者択一の評価判定が行われる［藤井・大和田・源, 2012］。即ち、絶対観測から得られた観測基線値 $B_{観}$ を

- 良好として採用
- 不良として不採用（再観測）

のいずれかに分類する。採用の判定が一旦与えられると、以降のデータ処理は、極端で強力な仮定 $B_{観}=B_{真}$ の下で実行される。つまり $B_{オ}=0$ かつ $\sigma_B=0$ である。このため $B_{真}$ の最適モデル（つまり採用基線値）は、必然的に観測基線値 $B_{観}$ を完全に説明する（モデル残差がゼロとなる）ように求められる（図１上）。言い換えると、絶対観測のバラツキ $A_{誤}$ の程度 σ_A の大小にかかわらず、結局は $\sigma_A=0$ として $A_{観}$ から採用基線値が導かれる。次期標準磁気儀に求められる観測精度 σ_A（或いは許容される最大の σ_B）を設計の仕様に盛り込んだところで、基線値などのプロダクトに対しては意味をなさない。

現実の角度測定値 $A_{観}$ には、言うまでもなく $\sigma_A>0$ となる誤差 $A_{誤}$ が含まれている。このような $A_{観}$ を過剰に説明するモデルの構築は、オーバーフィッティング、あるいは過学習と呼ばれ、一般には避けるべきものとされている。バラツキ $A_{誤}$ まで説明しようとするモデルは、本来見出すべき真の対象を適切に表現しないからである。特に現行方式の採用基線値の「決定論的」な導出法は、残差を全く許さず $B_{誤}$ を完全に説明するため、真の基線値 $B_{真}$ の傾向を見失わせるリスクが高い。一定の観測精度が維持されている柿岡は別として、観測の精度も頻度も柿岡に劣る女満別と鹿屋については、オーバーフィッティングのために既に採用基線値の統計学的な妥当性が失われているかもしれない。

現行方式に替わる採用基線値の算出法としては、ベイズ推定に代表されるような「確率論的」な手法（以降「代替手法」）がより適切である。代替手法では、データは確率密度分布の形で与えられるため、観測データ $A_{観}$ に含まれるバラツキの統計 σ_A も組み込まれる。モデルである採用基線値も確率密度分布の形で記述されるため、結果的にその期待値

だけでなく標準偏差の推定値も併せて得られ、最終成果物（地磁気確定値）に及ぶ絶対観測データ $A_{観}$ の不確かさの影響も評価可能となる。また、代替手法では再観測が求められない（$A_{誤}$ の大小にかかわらず $A_{観}$ をデータとして受け入れる）ため省力化の上でも優れている。ただし、代替手法ではバラツキ $A_{誤}$ の標準偏差 σ_A だけでなく、系統誤差 $A_{オ}$ の性質も予め知っておく必要がある（あるいは仮定しないとならない）。そこで、次に述べる「観測基線値の誤差に関する統計的な予備調査」では、標準偏差 σ_B により記述される基線値の誤差分布（代替手法による採用基線値のモデリングに対する入力情報）の統計的な調査結果について報告する。

＜観測基線値の誤差に関する統計的な予備調査＞

この調査では標準偏差 σ_B により表される基線値 $B_{観}$ の誤差分布の推定に着手する。系統誤差 $B_{オ}$ と偶然誤差 $B_{誤}$ から成る基線値の誤差は、複数の要因

a. 観測者による絶対観測の測定作業
b. 絶対観測中に発生する人工擾乱の変化計への影響
c. 観測装置の不安定性
d. その他

の重ね合わせによる。そこで本調査では、諸要因に由来する誤差をそれぞれに評価し、最後にそれらを統合することで「合成標準不確かさ」を推定する手法「不確かさバジェットによる評価[1]」を用いる。JISMA による測量機器の現場試験手順を定めるシリーズ規格 ISO17123 のガイドライン[2]によると、合成標準不確かさは以下のように定義される。

- [合成標準不確かさ] 測定結果にまつわる全ての標準不確かさを誤差の伝搬則によって足し合わせたもので、測量成果の不確かさを表す。
- [標準不確かさ] 正規分布する偶然誤差のバラツキの尺度である標準偏差を、適当な分布を与えることで系統誤差にまで拡張したもの。不確かさバジェットの要素となる。

さらに、各要因に関する標準不確かさの評価方法は、観測結果の統計的評価により得られる実験標準偏差を用いるタイプ A と、（経験値など）それ以外に基づくタイプ B に分かれる。

本報告では、タイプ A とタイプ B の評価例として、それぞれ上記の a と b に関する標準

---

[1] 観測の信頼性を示すために、従来は「誤差」「標準偏差」等の指標を用いていたが、現在は「不確かさ」という指標を用いて観測の信頼性を評価するのが一般的である。気象庁内でも気象測器検定試験センターが正確な試験を実施できる施設であることの認定（ISO17025）を受けるためにバジェットシートを作成している。

[2]「ISO17123 - 1 測量機器の現場試験理論 改定概要」
（http://www.jsima.or.jp/standard/ISO_17123_1_V01.pdf）

不確かさを評価の概要を示す。

1.　「観測者による絶対観測の測定作業」に伴う標準不確かさの評価（タイプ A 評価）

上述のように、タイプ A 評価の前提として、系統誤差 $B_{オ}$ も含んだ基線値の標準不確かさについて、適当な分布を事前に与える必要がある。少なくとも偶然誤差 $B_{誤}$ の分布については正規分布状であり（図 3）、人工擾乱の増加以前の報告と変わりはない [伊藤・藤井, 2003]。一方、系統誤差 $B_{オ}$ の分布の形態は不明である。ここでは標準不確かさの適当な分布として、正規分布を仮定することにする。

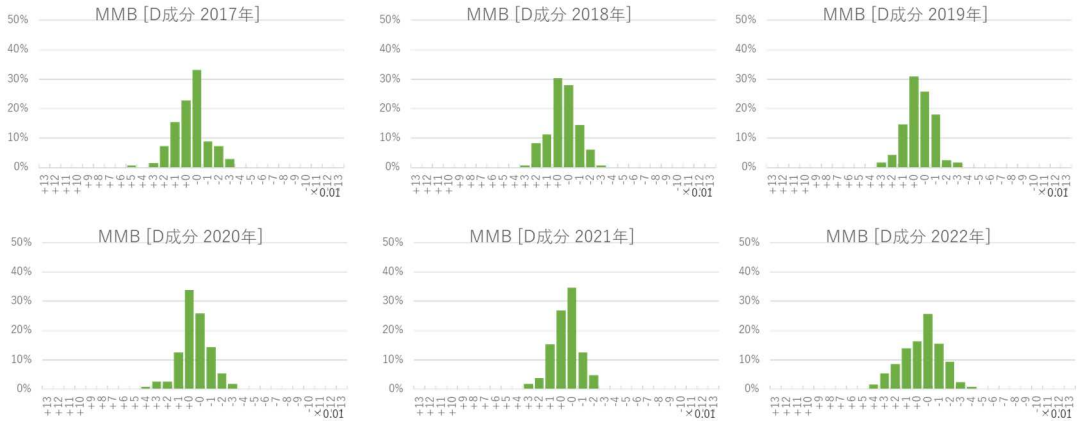


図 3　現行方式により得られた女満別の観測基線値の頻度分布（期待値は厳密にゼロ）。

上記仮定の下、JISMA ガイドラインの確率論的手法（その理論の説明は割愛する）を女満別の絶対観測データ $A_{観}$ に適用し、真の基線値 $B_{真}$ の推定値とその実験標準偏差（不偏推定量）を求めた（図 4）。図 4 には、現行の決定論的手法により $A_{観}$ から一意的に算出した 4 つの基線値も併せてプロットされている。両者を比較すると、確率論的手法による $B_{真}$ の推定値は、現行手法による観測基線値（算出された 4 つの基線値の平均）と一致していないことがわかる。これは後者が $B_{真}$ からのズレ（系統誤差）を考慮することができていないことに因る（4 つの基線値が $B_{真}$ の片側に偏っているケースなど）。特に、4 つの基線値のレンジが小さいにもかかわらず実験標準偏差が大きく推定された事例（2020/11/16 の偏角及び伏角など）は、観測データ $A_{観}$ の精度が高かったにもかかわらず、その確度が低かったことを示唆するものである。逆に 4 つの基線値のレンジが大きいにもかかわらず実験標準偏差が小さく推定された事例（2021/4/20 の伏角など）は、観測データ $A_{観}$ の精度が低かったにもかかわらず、その確度が高かったことを示唆するものである。以上のように、観測データの確率密度に対し適当な分布を事前に与えた統計モデルを導入することで、基線値の標準偏差の評価において現行方式では得られなかった系統誤差に関する情報を追加することが出来る。更に、現行方式では実現できなかった個々のデータの良否についても、個々の観測データ $A_{観}$ と統計モデルとの残差から評価することが

可能になる。

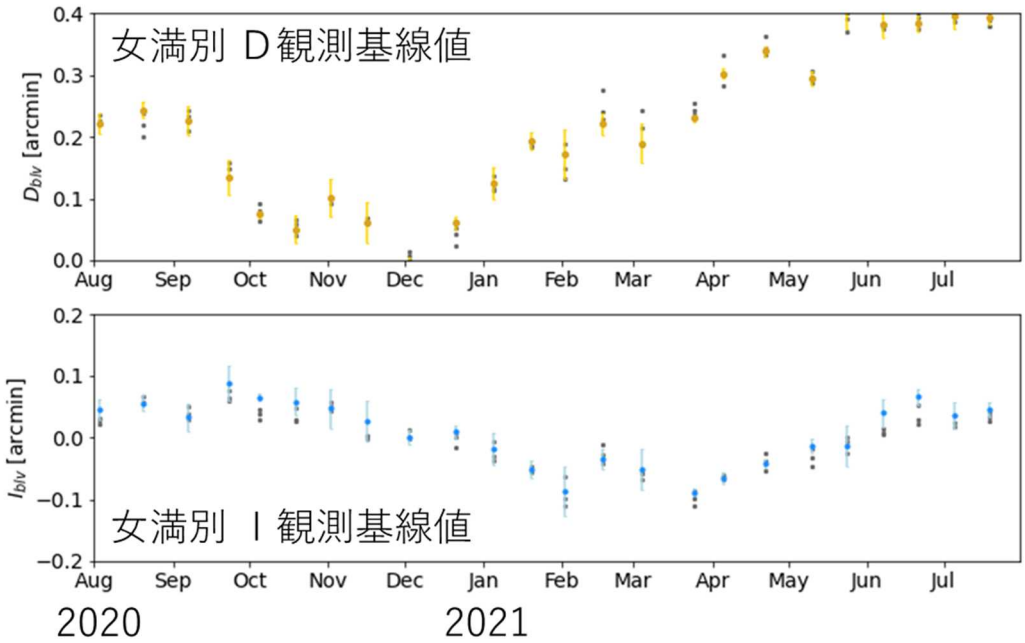


図 4　タイプ A 評価で確率論的に推定される真の基線値とその標準偏差の推定値（エラーバー付マーカー）、および、現行方式により算出される 4 つの基線値（灰色）。

2.　「絶対観測中に発生する人工擾乱の変化計への影響」に伴う標準不確かさの評価（タイプ B 評価）

鹿屋の人工擾乱はその振幅と頻度において近年特に深刻化しており、変化計の連続観測を通じて基線値 $B_{観}$に無視できない影響を与えつつある。ここでは、タイプ B 評価の事例として、鹿屋の確定毎分値作成における人工擾乱の補正実績の統計の報告［森永・屋良, 2021]に基づき、変化計の連続データに及ぶ人工擾乱に伴う $B_{観}$の標準不確かさを見積もる。同報告では、補正した人工擾乱の振幅 $B_{擾}^{(n)}$とその継続時間の総計 $T_{擾}^{(n)}$が年毎にまとめられている。そこで $T_{年}$=1 年として、人工擾乱の振幅の大きさ $|B_{擾}|$の期待値を次のように算出した（表 4)。

$$|B_{擾}| = \left(\Sigma_{n} |B_{擾}^{(n)}| T_{擾}^{(n)}\right) / T_{年}$$

変化計データの各成分に生じる人工擾乱の振幅の期待値は、［福井・大和田・森永, 2013]が基線値の採否判定方法を定めた 2013 年当時と比べると、近年にはどの成分においても大幅に増加したことがわかる。夜間も含めて任意の時刻に対し、例えば H 成分に現れると期待される擾乱の振幅は 0.2nT および 0.02 分角を超える。$B_{擾}^{(n)}$は昼間に集中するので、絶対観測が実施される典型的な時間帯（0-6 時 UT）に限った統計を取れば $|B_{擾}|$は 0.03 分角（観測基線値の採否の判断基準）を優に超えるだろう。近年の大幅な環境悪化を考慮

すると、現行方式の前提 σ_B=0 を保持するために多大な労力を払う（再観測を行う、人工擾乱を大きい時間帯を回避する、 [森永・長町・生駒・大和田, 2013]による補正を適用する、等）よりも、同前提を放棄して確率論的な基線値算出法に切り替える方が現実的である。

表 4　鹿屋の主測器に発現した人工擾乱の振幅の期待値

	H (nT)	Z (nT)	D (')	F (nT)
2013	0.029	0.012	0.006	0.020
2019	0.224	0.020	0.022	0.314
2020	0.209	0.024	0.028	0.231

最後に（H 成分と Z 成分の基線値の算出に用いられる）全磁力データ F に対する人工擾乱の影響を調べた結果を報告する。過去には、地点差測定（F 連続観測点－絶対観測室）を実施した時間帯内（各回 100 秒間）に、しばしば人工擾乱が生じていた。これらが地点差に及ぼす影響量を MyDist により再現すると、大きいものは 2nT を超えており（図 5）、年間を通じた影響量の期待値は 0.99nT であった。地点差に与える人工擾乱の影響は有意に大きく、基線値 $B_{観}$ に及ぼされる誤差は合成標準不確かさに統合されるべきである。

以上のように、引き続き $B_{観}$ の不確かさバジェット評価を、誤差の要因ごと丁寧に進める必要があり、令和 5 年度の実施計画においてはこれを主要課題として推進したい。

図 5　鹿屋の絶対観測で地点差測定中に発生した人工擾乱の再現事例（2022 年 1 月 29 日）。

参照文献

Rasson・Hendrickx・Marin・Humbled・Li. (2016). WIDIF: A new DIFLUX optimised for Field Use. J. Ind. Geophys. Union, Special Volume-2, pp: 9-18.

伊藤・藤井. (2003). 地磁気絶対観測における基線値の異常値判定基準の定量化に向けて. 地磁気観測所テクニカルレポート, 第 01 巻(第 01 号), p.1.

森永・屋良. (2021). 鹿屋観測施設の地磁気人工擾乱ノイズ補正基準見直しに向けた調査. 地磁気観測所所内技術資料(05 月号), p.15.

森永・長町・生駒・大和田. (2013). 鹿屋観測施設における絶対観測時の人工擾乱について－絶対観測時の人工擾乱の発生状況と擾乱補正方法－. 地磁気観測所テクニカルレポート, 第 10 巻(第 02 号), p.51.

藤井・大和田・源. (2012). 女満別・鹿屋における絶対観測頻度と精度のシミュレーション. 地磁気観測所テクニカルレポート, 第 09 巻(第 01, 02 号), p.1.

福井・大和田・森永. (2013). 地温の影響を加味した地磁気絶対観測基線値の推定と絶対観測の再観測頻度. 地磁気観測所テクニカルレポート, 第 10 巻(第 02 号), p.5.

[調査研究の種別]：重要課題

[課題名]：南極昭和基地の地磁気データの絶対値化に向けた調査（令和 3～5 年度）

[担当者]：○山際 龍太郎、仰木 淳平、平原 秀行、屋良 朝之（観測課）、稲村 友臣（技術課）

[概要]：

オーロラ帯直下であり、また観測点密度の低い南極域の地磁気絶対値の毎秒データを作成・公開することは宇宙天気予報や地磁気全球モデルの精度向上に寄与し、地球環境の把握や地磁気全球モデルを利用した火山活動評価の精度向上にも貢献する。

地磁気観測データを絶対値化するためには連続観測値の適切な較正や人工的な擾乱の把握が必要であり、その手法について調査する。

昭和基地は 1960 年に地磁気観測を開始し、観測点の少ない南極域において長期的に観測を継続している貴重な観測点である。観測項目は、ひと月に 1 度手動で地磁気の向きと大きさを測定する地磁気絶対観測と地磁気 3 成分の変化を 24 時間 365 日連続で自動測定する地磁気変化観測がある。それぞれの観測結果は独立に公開されており、絶対観測の結果を使って変化観測による連続観測値を較正する絶対値化は行われていない。そのため、本研究では連続観測値の絶対値化に向け観測手法の変更やその影響等について調査を行う。

昭和基地の地磁気連続観測値を絶対値化することは、科学と観測点運営の両面でメリットがある。科学的なメリットは、他の地磁気観測点や他の観測項目との比較が容易になることである。特に近年、人工衛星観測と地上観測をあわせて解析し、地磁気の全球モデルの開発等の研究が行われているが、観測点密度の低い南極域において、昭和基地のデータが利用できるようになるとモデルの精度向上につながる。観測点運営上のメリットは、効率的に絶対観測を行えるようになることである。現在はその月の代表値（磁気圏・電離圏等による影響の少ない主磁場の値）を得るため、宇宙天気予報を参考に、地磁気活動が静穏と予想される日時に絶観測を行うこととしており、直前にならないと計画を立てることができない。また、地磁気活動が活発になると予想されていない場合でも、実際に観測に適した状況になるかはわからず、また、観測中に活発になることもあり、観測を延期等せざるを得ないこともある。絶対値化した連続観測値から静穏な状態を抜き出して月の代表値を計算できるようになれば、地磁気の活動状況に関わらず絶対観測を行うことができ、観測隊員の負担を大きく減らすことができる。

連続観測値を絶対値化するために、絶対観測の簡略化と高頻度化の試験を行い、観測隊員の負担を増やさずに較正の精度を確保できるか確認する。簡略化の手法として弱磁場方式を導入し、現行のひと月に 1 度のゼロ磁場方式に加えてひと月 3 回程度の弱磁場方式の観測を行い、較正の精度や手法の違いによる影響を調査する。また、試験的に連続観測値を絶対値化し、静穏な状態を抜き出して計算した代表値と従来の方法による代表値を比較し、新しい方法を採用できるか評価する。

[具体的な計画と達成目標]：

具体的な達成目標は、南極昭和基地における 3 成分連続観測値を絶対値化し、インターマグネット毎秒観測所レベルにすることである。課題は以下の 2 点である。

・基線値の安定性の確保（絶対観測の頻度、センサ・制御部の温度管理）

・人工擾乱の把握

JARE62（昭和基地滞在：2020 年 12 月～2022 年 2 月）における当所からの越冬隊員昭和基地滞在中に、弱磁場方式での高頻度の絶対観測や人工擾乱源である車両の磁気モーメントの調査等を行う。並行して国内において、観測データ処理手法の整備や解析を行う。具体的なスケジュールは以下の年次計画のとおり。

[年次計画]（下線は主に昭和基地派遣職員による現地での実施項目）

令和 2 年度（前研究計画期間）：

<u>１．高頻度の絶対観測（弱磁場方式）の開始</u>

<u>２．真方位観測の準備</u>

３．フラックスゲート磁力計センサ庫の温度変化の抑制工事

令和 3 年度：

<u>１．高頻度の絶対観測（弱磁場方式）</u>

<u>２．全磁力繰り返し観測を用いた各車両の磁気モーメントの算出</u>

３．毎秒値の絶対値化の試行

４．絶対観測の手法の違い（ゼロ磁場・弱磁場）による較正精度の確認（簡易）

５．センサ庫内の温度変化を測定し、温度変化の緩和策の効果を検証（短期）

６．昭和基地での GNSS 真方位角測定方法の確立

令和 4 年度：

１．毎秒値の絶対値化のデータ処理システム作成

２．絶対観測の手法の違い（ゼロ磁場・弱磁場）による較正精度の確認

３．絶対観測の頻度が基線値に与える影響の調査

４．従来の年平均値と毎秒絶対値から計算した年平均値の比較

５．センサ庫内の温度変化を測定し、温度変化の緩和策の効果を検証（長期）

令和 5 年度：

１．高頻度の絶対観測（弱磁場方式）及び毎秒絶対値作成のルーチン化

２．調査結果について南極資料へ投稿

[共同研究機関（共同研究者）]：

国立極地研究所　（門倉 昭 教授）

[本年度の成果]：

本年度の調査研究事項は、主に以下の４項目である。

１．オーバーハウザー磁力計の導入

２．毎秒値の絶対値化のデータ処理システム作成

３．絶対観測の頻度・基線値の補間についての検討

４．毎秒絶対値からの年平均値算出方法の検討

１．オーバーハウザー磁力計の導入

南極昭和基地における全磁力の定常的な連続観測は 1991 年までプロトン磁力計を用いて行われていたが、測器の故障により観測終了となっていた。全磁力の連続観測は、フラックスゲート磁力計の安定性の確認や人工擾乱の監視に有用であり、インターマグネット観測所の要件でもある。そのため、2021 年度の予算でオーバーハウザー磁力計（以下、OHM）を調達し、今年度はそれを昭和基地に搬入・設置し（図 1）、観測を開始した。

設置前の準備として、OHM の器差・方向差の測定、センサポール部材等の磁性検査を行った。器差は－0.4 nT、方向差は peak to peak で 0.2 nT であった。

当初の計画では磁力計センサのみ地磁気変化計室の近傍に設置し、制御・記録部は約 170m 離れた重力計室に置く設計（図 2 上）だったが、8 月に柿岡で動作試験を行ったところ、正常に観測できないことが分かった。AC 電源駆動ではセンサケーブルが長すぎることが原因であったため、センサ付近に制御・記録部を入れた防水コンテナを設置し、AC 電源を地磁気変化計室から、LAN ケーブルを重力計室から引くように設計変更を行った（図 2 下）。

2023 年 1 月 20 日に地磁気変化計室の南東約 20m にセンサを、南東約 40m に制御・記録部を設置し、全磁力の毎秒計測を開始した。計測開始当初は磁力計（GSM-90F1）制御部の GPS 信号が受信できなかったが、2 月 10 日に GPS アンテナケーブルの繋ぎ変えを行い、正常に受信できるようになった。同日にネットワーク設定も行い、リアルタイムでデータを取得できるようになった。

図 1 設置したオーバーハウザー磁力計（左：センサ部、右：制御・記録部）

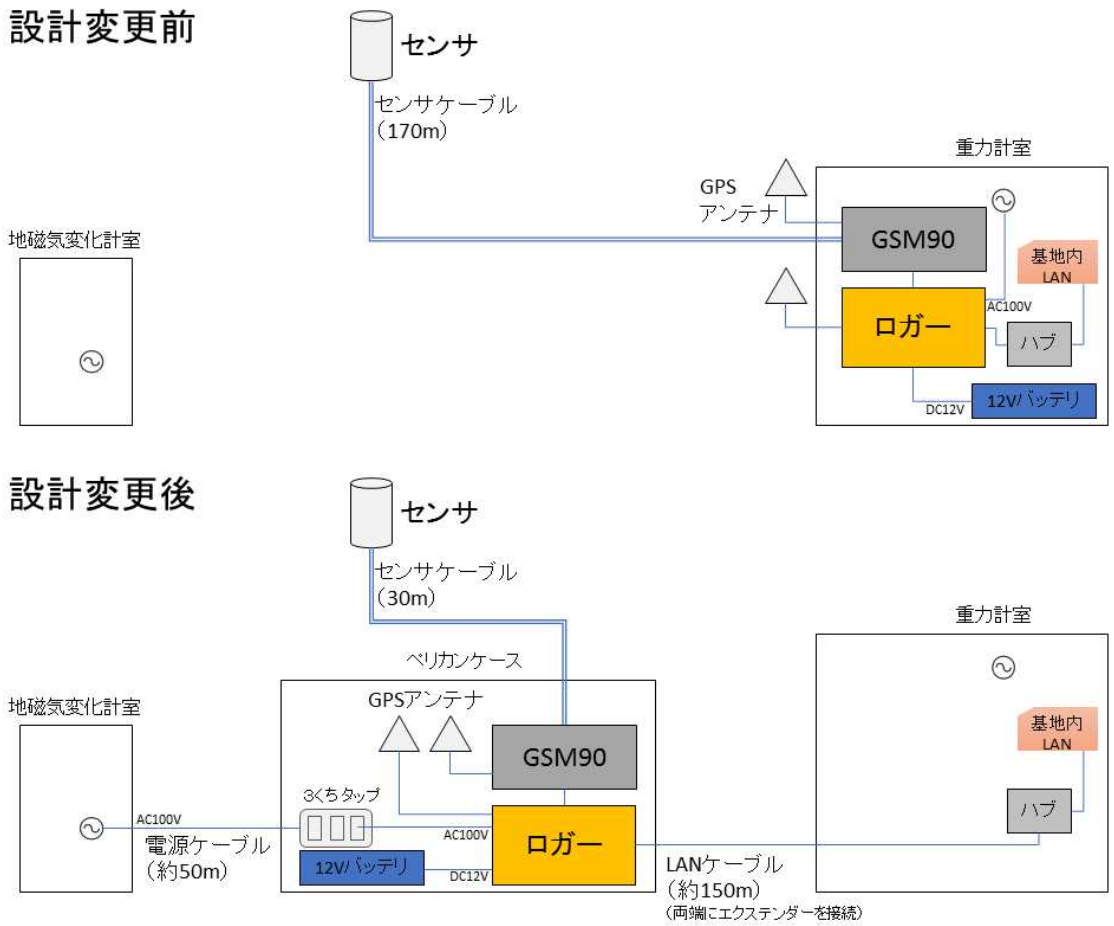


図 2 オーバーハウザー磁力計のシステム構成

２．毎秒値の絶対値化のデータ処理システム作成

変化観測値を絶対値化するためには、①観測基線値の計算、②間欠的な観測基線値から連続的な採用基線値の算出、③変化観測値に採用基線値を加算というプロセスが必要である。①～③は、柿岡では独自のプログラム群を使用しているが、昭和基地ではインターマグネットが公開しているソフトウェア「xMagpy」の使用を検討している。今年度は基本的に xMagpy を使用し、xMagpy にインプットするデータのフォーマットを整える部分のみ自作のプログラムを使用した。

「①観測基線値の計算」については、絶対観測結果の入力で使いにくい部分があることが分かり、入力ミスの防止や入力作業の効率化のため、xMagpy にインポート可能な形式で観測基線値を計算・出力するエクセルのマクロを作成する予定である。62 次隊の期間では、従来のゼロ磁場方式での観測（10 姿勢）の直後に弱磁場方式での観測を 1 セット（4 姿勢）実施し、ゼロ磁場方式の絶対観測（1～8 姿勢目を使用）と弱磁場観測の両方について xMagpy を用いた観測基線値の計算を行った。なお、絶対観測の妥当性の検討のために従来からエクセルを用いて観測基線値を計算している。これらの 3 種類の観測基線値を図 3 に

示す。ゼロ磁場方式の観測基線値の計算では、xMagpy とエクセルでおおむね一致していることが確認できた。xMagpy が常に僅かに（平均 0.04′）大きいが、これは xMagpy ではベース補正ができないためであり、ベース補正量を考慮するとほぼ一致する。また xMagpy は 1～8 姿勢目を使っている一方、エクセルでは 10 姿勢すべてを使って計算していることがわずかな違いを生んでいる原因である。xMagpy で計算した弱磁場方式とゼロ磁場方式の観測基線値の比較では、両観測手法の差はおおむね 0.1′に収まっている。5 月 28 日の観測など大きく外れることもあり、おそらく観測または記録のミスと予想されるが、今後原因を精査する。

「②間欠的な観測基線値から連続的な採用基線値の算出」については、スプライン補間の節点間隔等の検討が必要であり、またデータ期間の選択等の実際の運用についての検討も必要である。

「③変化観測値に採用基線値を加算」については、特に問題はなかった。

上記の方法で 62 次隊の期間（2021 年 2 月～2022 年 1 月）の連続観測値を絶対値化した。そのうちの 2 日間の絶対値プロットを図 4 に示す。上 3 段（H, Z, D）は絶対値化した連続観測値、4 段目が絶対観測室内に臨時で設置したオーバーハウザー磁力計の全磁力毎秒観測値（F）、5 段目が A-value（オーバーハウザー磁力計の全磁力－フラックスゲート磁力計から合成した全磁力）である。A-value のプロット中に多数のギャップが確認できるが、これらはフラックスゲート磁力計の H 成分と Z 成分に入ったギャップであり、2020 年 2 月の除雪中に誤ってセンサケーブルを傷つけたことが原因である。絶対値化することで A-value を表示でき、データの品質管理も容易になる。なお、62 次隊の期間は H 成分と Z 成分に数十 nT のギャップが頻繁に入るため、以下の検討・報告は D 成分のみについて行う。

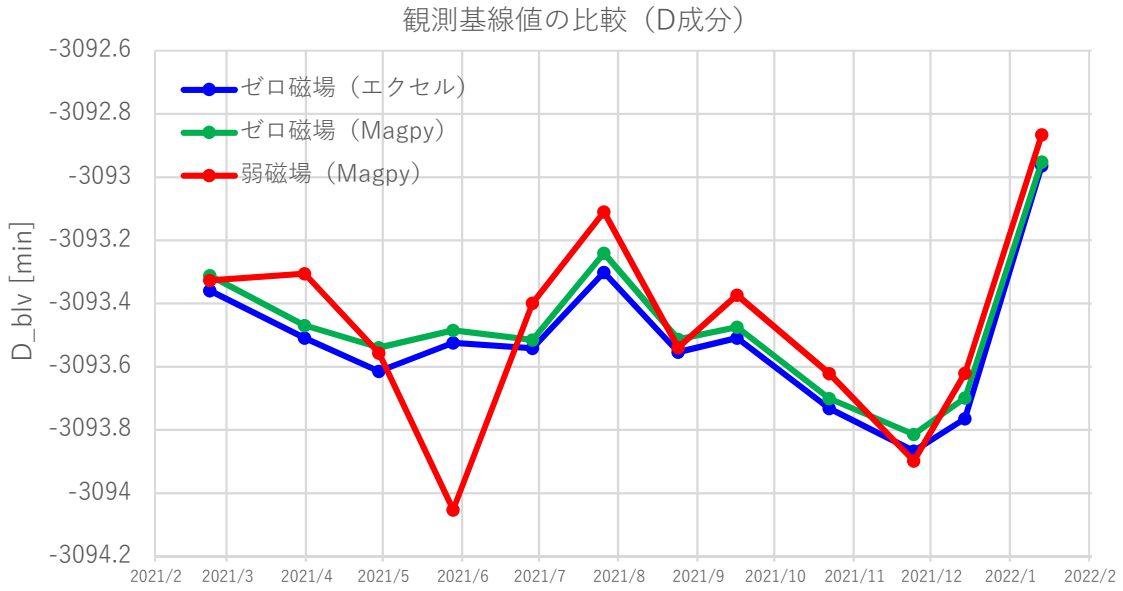


図 3 観測基線値の比較（D 成分）

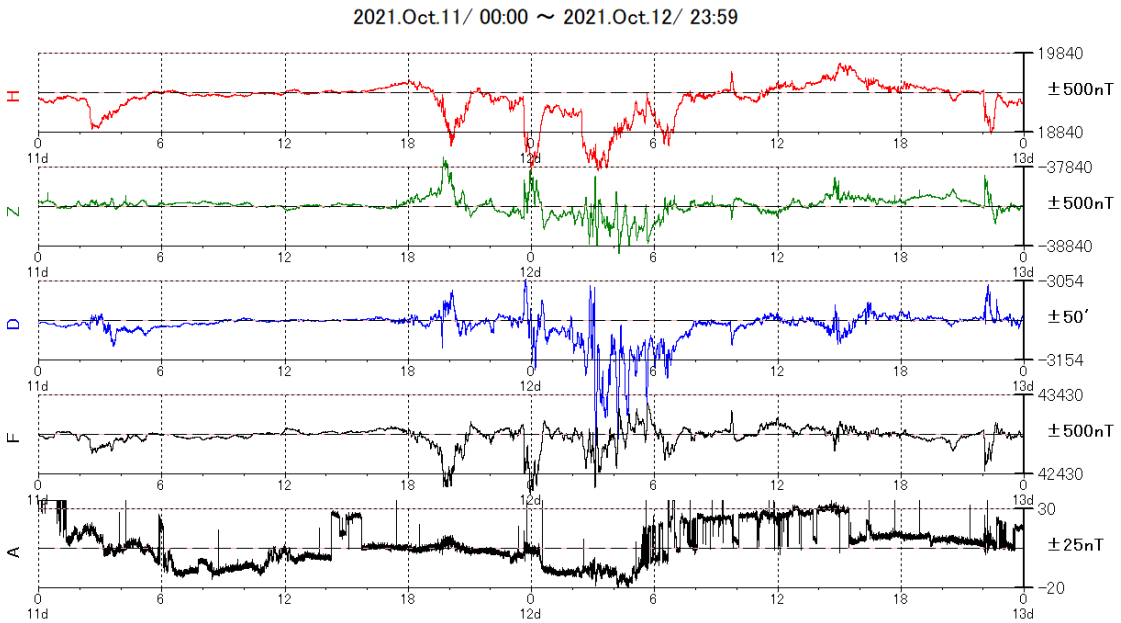


図 4 絶対値化した連続観測値（2021 年 10 月 11～12 日）

３．絶対観測の頻度・基線値の補間についての検討

62 次隊の期間中に、弱磁場方式の絶対観測を 42 日実施した。インターマグネット観測所の基準に則り、できるだけ週 1 回（月 4 回）の頻度を目指したが、天候や観測隊のスケジュールの都合により、観測間隔は最短で 2 日、最長で 21 日、平均で 8.3 日だった。

絶対観測の頻度による採用基線値の違いを調べるため、これらの絶対観測から月 2 回程度、または月 1 回程度になるように間引いて採用基線値を作成した。それぞれの採用基線値は xMagpy のスプライン補間機能を使って計算した。スプライン曲線の節点間隔は観測値が 3 回入る程度、つまり月 4 回の場合は 0.75 ヶ月、月 2 回の場合は 1.5 ヶ月、月 1 回の場合は 3 ヶ月に設定した。月 4 回、月 2 回、月 1 回の絶対観測から計算した採用基線値の比較を図 5 に示す。マーカーは●が月 4 回、■が月 2 回、▲が月 1 回の観測基線値であり、実線はそれらの採用基線値、破線は月 4 回の採用基線値を基準とした月 2 回と月 1 回の採用基線値の差（目盛は右軸、緑の網掛けは差が±0.2′ の範囲）である。

インターマグネット観測所に求められる精度はトータルで±5 nT であり、昭和基地の D 成分では±1′ にあたるため、採用基線値の精度はその五分の一である±0.2′ 程度に抑えたい。図 5 の破線に注目すると、基線値の変動が大きい夏期間（11 月～3 月）は月 4 回の絶対観測から求めた採用基線値との差が大きくなり、観測頻度を落とすことによる品質低下の影響が大きいことが明らかになった。一方、冬期間（4 月～10 月）はその差が小さく、観測頻度低下の影響は限定的である。冬期間は絶対観測を行える天候（気温・視程・日照時間）に制限があり、月 4 回の頻度を保つことは容易ではないので、冬期間に観測頻度低下の影響が小さいことは観測運営上のメリットが大きい。

スプライン補間は節点間隔の設定で大きく結果が変わるが、最適な節点間隔について調

査をしていないので、今後はその部分の検討を進める予定である。

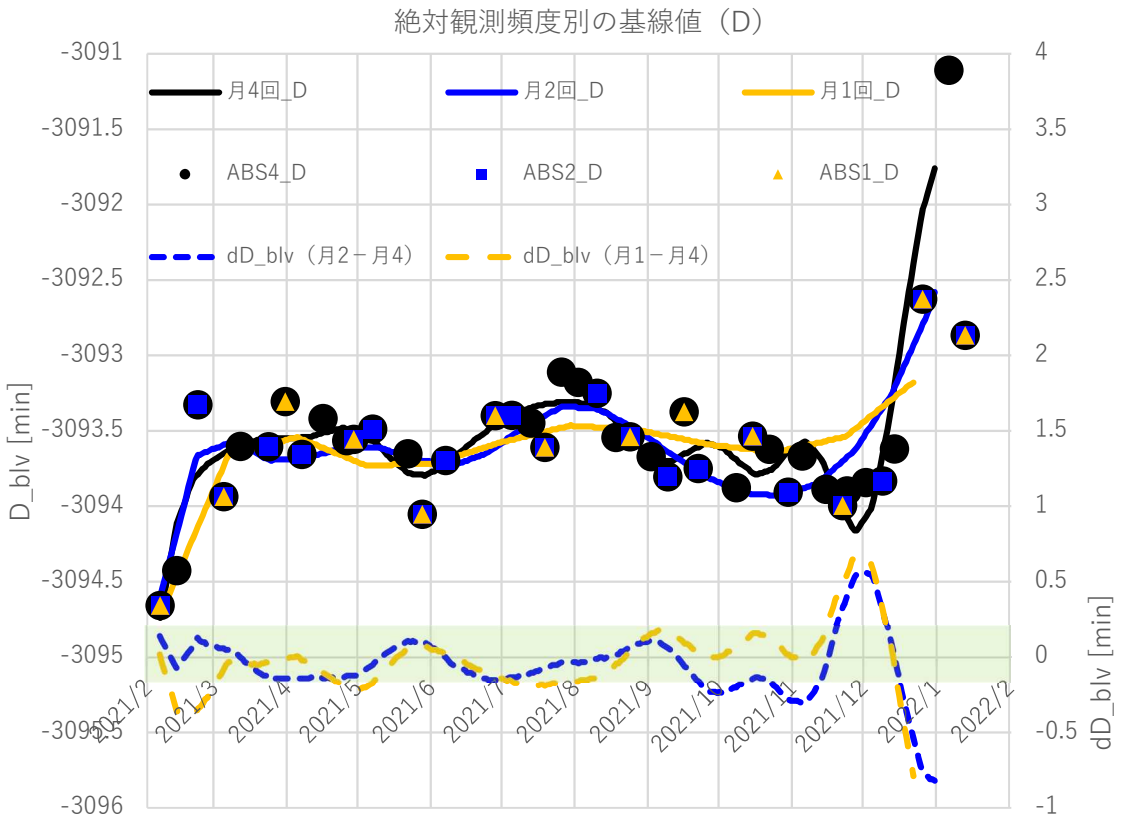


図 5 絶対観測頻度別の採用基線値と採用基線値の差（D 成分）

４．毎秒絶対値からの年平均値算出方法の検討

昭和基地の連続観測データを絶対値化するにあたり、年平均値の統計接続という問題がある。今回作成した毎秒絶対値からいくつかの方法で年平均値（観測期間の関係で実際は 10 ヶ月）を算出し、従来の方法による値と比較した。毎秒絶対値は月 1 回のゼロ磁場方式の絶対観測から作られたものを使用した。毎秒絶対値からの算出方法として、日中央値、日平均値のほか K 指数（相当）で制限した（K<3 相当と K<5 相当）日平均値を試した。K 指数（相当）での制限は、一日のうちの日中央値±K 幅/2 に入る時間帯のみ抽出して平均したものを K 指数（相当）制限付き日平均値とした。具体的には、昭和基地の K スケールは K=3 が 200 nT（=35.6′）、K=5 が 600 nT（=106.7′）なので、K<3 相当では日中央値±17.8′に入る範囲のデータを平均してその日の K 指数（相当）制限付き日平均値とした。

絶対観測で得られた絶対値とその回帰直線、毎秒絶対値の日中央値、日平均値、K 指数（相当）制限付き日平均値のプロットを図 6 に示す。従来の方法である静穏日での絶対観測値のばらつきは 2′（=10nT）程度と大きい。できるだけ静穏な状態を選んで観測するが、完全に静穏な状態で観測できることは少なく、この程度のばらつきを生じている。単純な日

平均値は磁気圏・電離層の影響を受け、時々大きく変化するが、K 指数（相当）で制限を強めればその変化が小さくなることが分かる。最も変化が少ないのは日中央値である。絶対観測値の直線回帰を基準にそれぞれの算出方法の値の差の平均と標準偏差を求めた（図 7）。従来の方法だと標準偏差が 2′ 弱だった。日中央値からの算出では従来の方法との差は－0.3′ と小さく、標準偏差も 0.8′ と小さかった。日平均値は、K<3 相当、K<5 相当、無制限と制限を緩めるに従い、従来の方法との差が広がり、標準偏差も大きくなった。

日中央値を使うことで、従来の方法とかなり近い結果が得られることが確認できた。今年度は、2021 年の D 成分の検討しかできなかったが、今後は H・Z 成分が正常な他の年で全成分の複数年にわたる調査を行い、統計学的な手法を用いてこの差が統計接続できる程度か確認することが必要である。

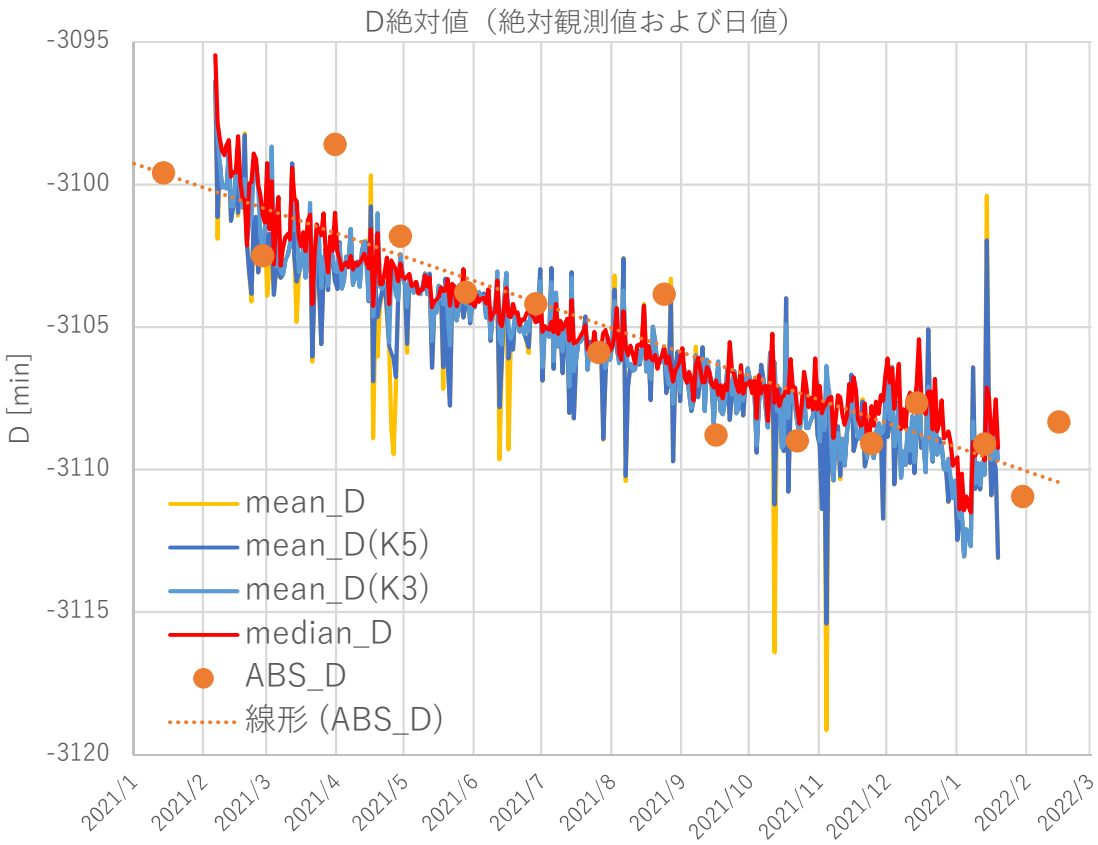


図 6 絶対値の比較（D 成分）

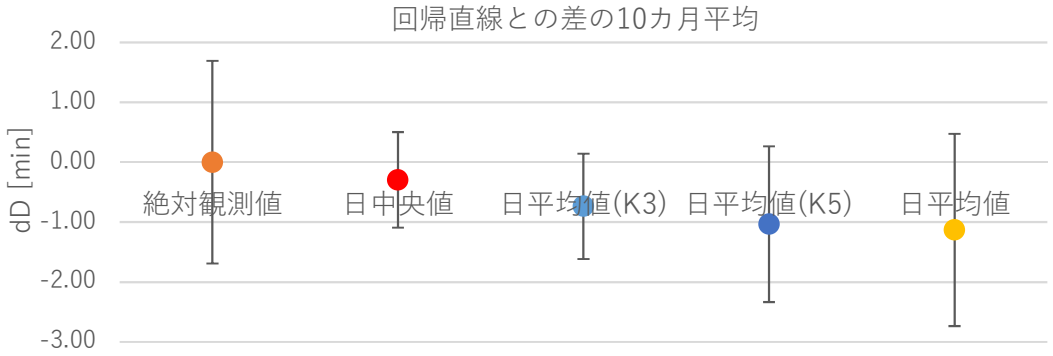


図 7 年平均値計算方法の比較（期間：2021 年 3 月～12 月、D 成分、エラーバーは標準偏差）

５．今年度のまとめと今後の方針

今年度はオーバーハウザー磁力計の観測開始のほか、連続観測値の絶対値化から年平均値の算出までを行うことができた。それぞれの項目でかなり粗削りなところがあるので、来年度はより丁寧に検証・確認を行い、最適なシステムを整える予定である。また、来年度から再来年度にかけて（65 次隊で）地磁気観測所所員を越冬隊員として昭和基地に派遣する予定であるので、観測システムの最適化、データ処理システムの作成や観測環境・人工擾乱源の調査など、現地でしか実施できない作業も進める予定である。

インターマグネット観測所としての認定に関する今後の方針としては、連続観測値の絶対値化の運用当初からの認定を目指すのではなく、データ処理システムの整備と年平均値の統計接続の確認ができれば、まずは、連続観測値の絶対値化の運用およびデータの公開を始め、予算等を調整して徐々に観測環境や機器を改善し、インターマグネット観測所への認定を目指す方が現実的であると考える。

[成果の発表]：

なし

[調査研究の種別]：基礎課題
[課題名]：機械学習による K 指数判定手法の開発
[担当者]： ○長町信吾（観測課）
[概要]：

地磁気変動の活動程度を表す指数のひとつに K 指数がある。1 日を 3 時間ごとの 8 区間に分け、各区間において地磁気の変動の振幅を準対数的に 0～9 の 10 階級で評価するもので、地磁気観測所では柿岡、女満別、鹿屋の 3 地点の K 指数を公表している。K 指数を測定するためには、実際の地磁気変化から、想定される日変化を取り除かなくてはならない。1930 年代にはじまる K 指数の黎明期から、観測者の経験に基づいて推定された日変化曲線をアナログ記録に鉛筆等で書き入れ、スケールを記録紙に当てて指数を読み取るという手法（以下、ハンドスケーリングと呼ぶ）で行われていたが、観測データがデジタル値で取得できるようになった 1980 年代以降には計算機による手法がいくつか開発された[*1]。ハンドスケーリングには、読み取りに手間がかかること、観測者の主観を完全に排除できないこと、担当者が変更になった場合の判定基準の確実な引継ぎなどの課題があり、計算機による判定が採用できればそれらの課題が解決されるものと期待されたが、過去に当所行われた試験[*2、*3] では満足のいく正答率を得ることができず、現在でも報告値はハンドスケーリングによる読み取り値を採用しており、計算機による読み取りは速報的な判定に利用するのみにとどまっている[*4]。

これまでの計算機による手法は、何らかの数学的アルゴリズムを用いて日変化を推定するものであった。しかし、K 指数として計測されるべき地磁気変化は、数分から数日間という非常に広い周波数領域にまたがるため、日変化と数学的に分離することが難しい。このため、計算機による日変化の推定と熟練の観測者の経験に基づく推定との間に大きな乖離が生じることがあり、これが計算機による手法では満足いく正答率が得られなかった大きな理由である。本研究では、従来の数学的手法による日変化推定の方法から離れ、熟練の観測者が持つ経験則を機械学習によって計算機上で再現するという新しい試みによって、精度の高い K 指数判定を目指す。

[具体的な計画と達成目標]：

昨年度までの調査で、確定毎分値を入力データ、K 指数の判定値を出力とする機械学習モデルでは従来の計算機判定を超える精度を得られないこと[*5]、H 成分については K 指数が 7 を超える大きな擾乱に対しては、そもそも機械学習を行う必要もなく判定できること[*6] が分かっている。今年度は入力データを精査し、判定に有用と思われる特徴量（例えば peak to peak 振幅など）を手動で抽出し、10 段階の K 指数 0 から 9 までをそれぞれ別々の分類アルゴリズムで判定することで、従来の計算機判定手法を超える正答率を目指す。

[工程表]：

1.機械学習に有用な入力データの精査。

2.機械学習による K 指数読み取りアルゴリズムを開発する。

3.開発したアルゴリズムでどの程度正答率を高められるか、教師データとしてどの程度の期間があれば十分かなどを検証、評価する。

工程表

	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月
項目 1												
項目 2												
項目 3												

[本年度の成果]：

H 成分について、peak to peak 振幅や太陽天頂角などの 11 種類の特徴量を抽出し、1989 年～2019 年の 30 年間のデータを用いて勾配ブースティング決定木アルゴリズムを用いて機械学習による K=6 および K=5 の判定を行った。結果を表 1 に示す。

表 1：H 成分 K=6 および K=5 の判定結果

		機械学習判定					
		K=6 判定			K＝5 判定		
		>=5	6	正答率	>=4	5	正答率
確定値	2					1	
	3					6	
	4		1		140	141	
	5	23	26			1047	88%
	6		277	92%			
	正答率		93%			88%	

K=6 判定においては、正答率 90%以上という高いスコアを得ることができた。また、確定値と 2 ランク違う判定例がひとつだけ存在した。この例を精査したところ、夜間における緩やかな変化を日変化と誤解した、確定値を作る際の静穏日曲線の引き方の方がむしろ不適切であったことが分かり、機械学習の方がより正しい判定であった。一方で、K=5 の判定では正答率こそ 88%と高い水準で得られたが、確定値と 3 ランク違う判定が 1 例存在した。K=5 と K=2 ではそのレンジに 30nT の開きがあり、これが誤判定だとすると看過で

きないエラーとなる。この例を精査したところ、大きな地磁気擾乱直後で日変化なのか地磁気擾乱なのか熟練者の目から見てもかなり判断に迷う難しい事例であり、確定値の判定が不適切なのか、機械学習に不備があるのか確たる判別が付かなかった。

H 成分の K=6 判定においては、十分な正答率を得ることができた上に、人間の判定ミスをもカバーできるほどの結果を得ることができた。一方で、K=5 の判定では、3 ランク異なる判定を出力することもあり、その学習結果の妥当性は慎重に判断せねばならないだろう。勾配ブースティング決定木アルゴリズムでは、モデルの複雑さなどのパラメータは機械学習の対象ではなく、ユーザーが自身の判断で設定しなければならない。このような「ハイパーパラメータ」を適切に設定することが機械学習結果の良否を左右することになるため、その調整次第では上述の 3 ランク違いの判定も結果が異なってくることも考えられる。今後はハイパーパラメータの試行錯誤を行い、より妥当な判定を行える学習器の開発を行っていきたい。

[成果の発表]：なし

[参考文献]：

*1 Menvielle, M., Papitashvili, N., Häkkinen, L., Sucksdorff, C., Computer production of K indeces: review and comparison of methods. Geophys. J. Int. 123, 866-886, 1995

*2 山田雄二，K 指数決定のデジタル化について―LRNS 法の場合―，地磁気観測所技術報告，37，58-68，1997

*3 小池捷春，玉谷智佐，長谷川一美，デジタル K 採用に関する調査―試験運用結果とその評価―，地磁気観測 所技術報告，38（1），1-10，1998

*4 長町信吾，K 指数速報値を計算機で算出する新しい手法，地磁気観測所テクニカルレポート 第 12 巻第 1,2 号，1-9，2015

*5 令和 2 年度地磁気観測所調査研究業務成果報告書

*6 令和 3 年度地磁気観測所調査研究業務成果報告書

［調査研究の種別］：基礎課題

［課題名］：地磁気観測施設の構内における各観測点の地磁気変化特性に関する調査（その②）

［担当者］： ○屋良朝之、松浦大輔、谷口秀隆、森永健司（観測課）

［概要］：

鹿屋と祓川では日変化や地磁気現象発生時に、地磁気変化の変動幅に違いがあることがわかった。さらに、2015 年 6 月 22 日に発生した磁気嵐においては、鹿屋の主観測点における地磁気変動と祓川における地磁気変動の差をとった変動幅よりも、女満別の同じ構内に設置された主観測点と副観測点の差の変動幅の方が大きいことが明らかになった。これまで各観測点の地磁気変化特性の違いについて、詳しい調査はされていなかった。

昨年度行った女満別および鹿屋の一部観測点の調査では、日変化スケールにおける地磁気変化特性の違いには、観測点の違いの他に、測器の違いや観測環境の温度変化の違いなど複数の要因が影響していることがわかった。また地磁気急変化現象を対象とした調査では、各観測点の地磁気変化特性の違いは、単純な変動幅の違いではないことが示唆される結果が得られた。

今年度の調査では、観測環境の温度変化の違いや人工擾乱の影響なども含めて、各観測点の地磁気変化特性の違いについて把握することを目的とする。

［具体的な計画と達成目標］：

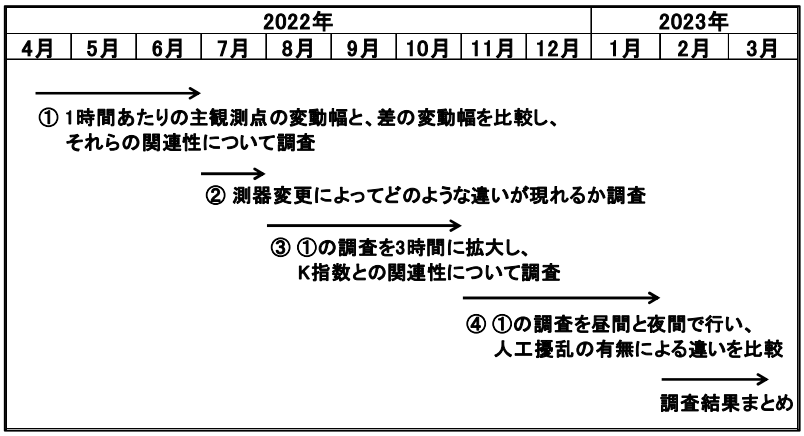
① 各観測施設の 1 時間あたりの主観測点の変動幅と、主観測点と副観測点のデータの差の変動幅（以下、差の変動幅という）を比較し、それらの関連性について調査する。

② ①の結果について、同じ観測点で使用していた測器ごとにデータを整理し、測器の違いによってどのような違いが現れるか調査する。

③ 日変化の影響を除去するために、①の調査を 3 時間に拡大し、K 指数との関連性を調査する。

④ 人工擾乱の有無による違いを比較するために、①の調査を昼間と夜間に分けて行う。

［工程表］：



[本年度の成果]：

柿岡、女満別および鹿屋観測施設の各観測点における成分別の地磁気変動幅の違いに着目し、観測施設別に１時間あたりの主観測点変動幅と、主観測点と副観測点のデータの差の変動幅との関係性について毎分値データを使用して調査した。

主観測点変動幅を成分別に１nT、0.1′ごとの階級に分け、各階級におけるデータの出現個数と各副観測点の差の変動幅の平均および標準偏差を求めた。図１～３に柿岡、女満別および鹿屋の各観測点における主観測点変動幅に対する各副観測点の差の変動幅の平均、近似直線、誤差範囲およびデータの出現個数を成分別に示す。主観測点変動幅に対する差の変動幅は、観測点毎に傾きが違うものの概ね線形的な変化を示す結果が得られた。しかし、mmb04 H 成分のように他の観測点と比較して相関が弱い観測点や、主観測点変動幅が大きくなるほど線形関係にならない場合があることもわかった。上記のまとめとして、表１に柿岡、女満別および鹿屋における近似直線の傾き、オフセットおよび相関係数を成分別に示す。女満別は柿岡、鹿屋と比べて全体的に相関係数が高い結果が得られた。これは主観測点変動幅と各副観測点の差の変動幅は線形関係であることを示している。線形関係であるということは、副観測点のデータに何らかの係数を掛けるだけで、主観測点のデータを表現できる可能性が高いことを示している。逆に相関係数の低い柿岡と鹿屋においては、副観測点のデータに単純な係数を掛けるだけでは主観測点のデータを表現することができない。また各観測点の傾きに着目すると、女満別の H 成分、D 成分においては傾きが大きいことがわかった。祓川観測点および kak04 も傾きは大きいが、前者は鹿屋と祓川の地点の差によるものと考えられる。後者は感度補正できない測器を使用していたことによる、感度のずれによるものと推察される。

上述のように、女満別における主観測点変動幅と差の変動幅の関係は、柿岡、鹿屋と比べると傾きが大きく、さらに H 成分は主観測点変動幅が大きくなるほど線形性が崩れ、単純な係数を掛けるだけでは違いを表現できない。この結果を受け、女満別 H 成分の１時間あたりの主観測点変動幅が大きい顕著事例に調査対象を絞り、主観測点変動幅と副観測点変動幅がどの程度異なっているのか、変動幅の比率（以下、変動幅係数）に着目し、事例解析を行った。ここでの変動幅係数とは、地磁気現象発生中の主観測点変動幅と副観測点変動幅の比を指している。変動幅係数は各観測点で値が異なり、各観測点の地磁気変化特性を特徴づけるパラメータであると考えた。変動幅係数適用の一例として、2014 年 9 月 12 日に発生した急始型磁気嵐において、女満別の各副観測点に変動幅係数を適用する前後の差の変動を示す（図４）。変動幅係数を適用することで、差の変動幅がゼロ付近でフラットになっていることから、変動幅係数の適用は概ね妥当であると思われる。しかしながら、変動幅係数適用後においても、15 時 55 分付近の変化度（１分当たりの変動幅）の大きい時間帯や、16 時 20 分以降の変化に対しては変動幅係数が妥当でないと考えられる。

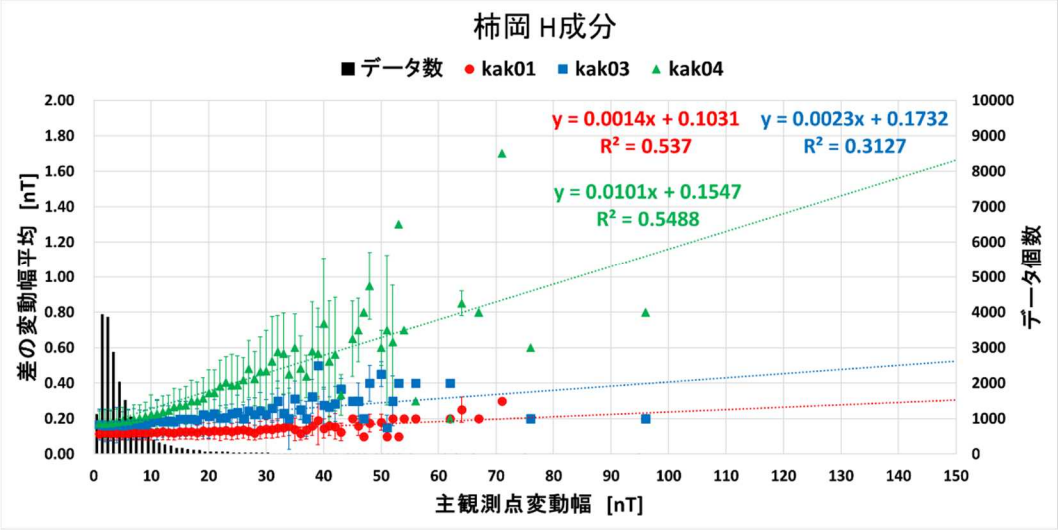
上記の事例解析から、変動幅係数がどのような要因に依存しているのかを調べるために、はじめに主観測点変動幅および変化度との関係について調査した。その結果、変動幅係数

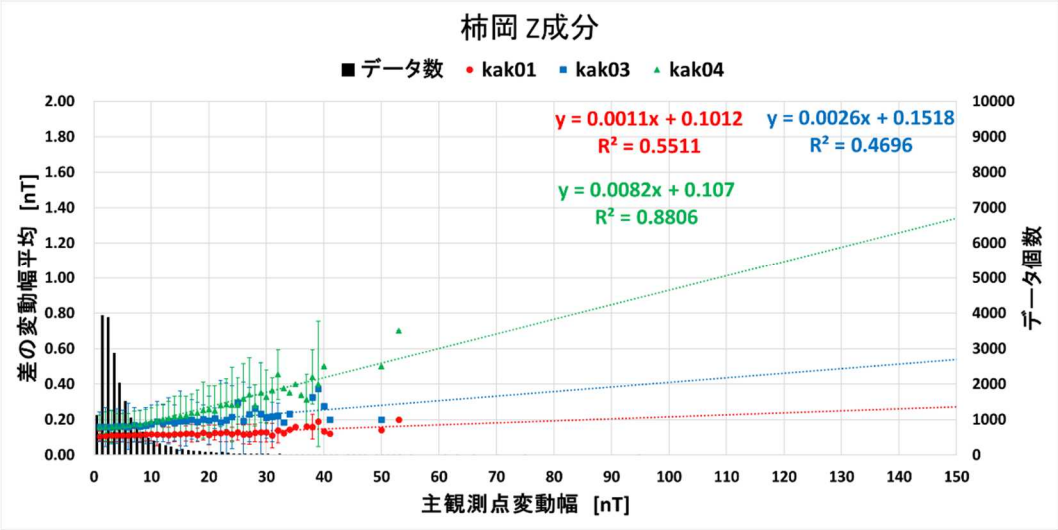
は主観測点の変動幅や変化度に依存しない結果が得られた。次に測器の違いによる変動幅係数の違いについても調査したが、測器依存性は確認できなかった（図５）。さらに各観測点で使用しているフラックスゲート磁力計は、本体およびセンサの温度変化にも影響されることから、それらの温度依存性についても調査した。結果としては、変動幅係数と磁力計の本体温度およびセンサ温度との間に関係性を見出すことはできなかった。最後に、変動幅係数と地中温度（5m）との関係性についても調べた。女満別構内の地中 5-6m には黒砂層による磁気異常があることが確認されている※1。一般的に磁化率には温度依存性があることから、地中の温度変化によって、土壌磁化が変化するのではないかと考え、参考程度までに調べてみた。その結果、変動幅係数と地中温度との間に関係性は確認できなかった。

本年度の調査により、柿岡、女満別および鹿屋観測施設の１時間あたりの主観測点の変動幅に対する差の変動幅は各観測点で傾きが違うものの、成分によらず概ね線形的な変化を示す結果であった。しかし、観測点によっては主観測点変動幅と差の変動幅の相関が弱い観測点があることや、主観測点変動幅が大きくなるほど線形関係にならない場合があることも判明した。また各観測点の地磁気変化特性を特徴づけるパラメータとして、変動幅係数という考えを取り入れた。しかし、主観測点の変動幅や変化度が大きいところに対しては、変動幅係数の適用は妥当ではなく、何らかの要因に依存していることが示唆される結果となった。そこで変動幅係数の依存性について調査したところ、主観測点の変動幅や変化度、各副観測点の本体温度、センサ温度および地中温度に対する依存は確認できなかった。最後に、図４を見ると主観測点の変動幅や変化度ではなく、地磁気現象の周期に依存しているようにも思われ、周波数解析なども有効な手段必要であると考えられる。

［参考文献］

※１ 福井史雄，森俊雄、女満別構内土壌の磁性について，地磁気観測所技術報告 第 13 巻 第 03 号，44-50，1973





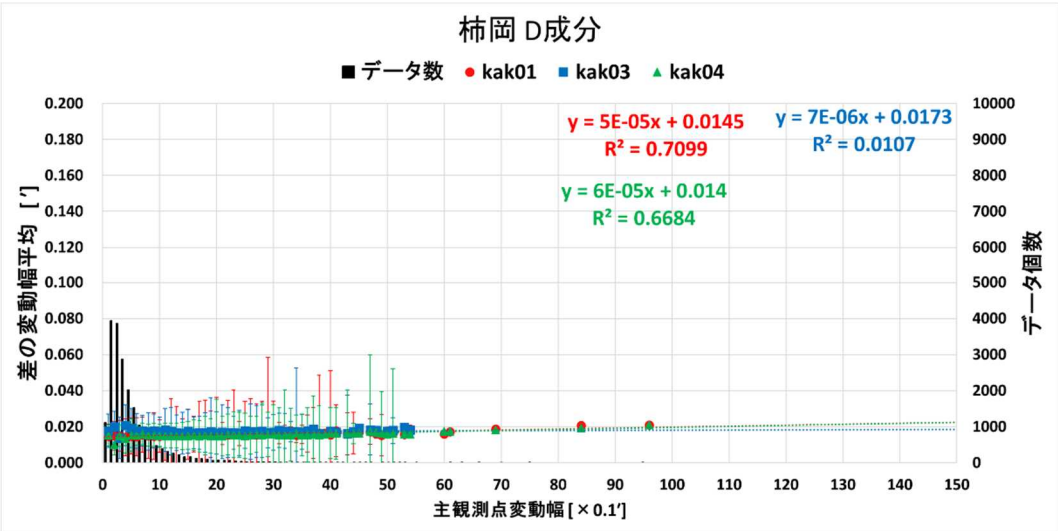


図 1 柿岡の各観測点における主観測点変動幅に対する差の変動幅の平均、
近似直線、誤差範囲およびデータの出現個数。上から、H 成分、Z 成分、D 成分。

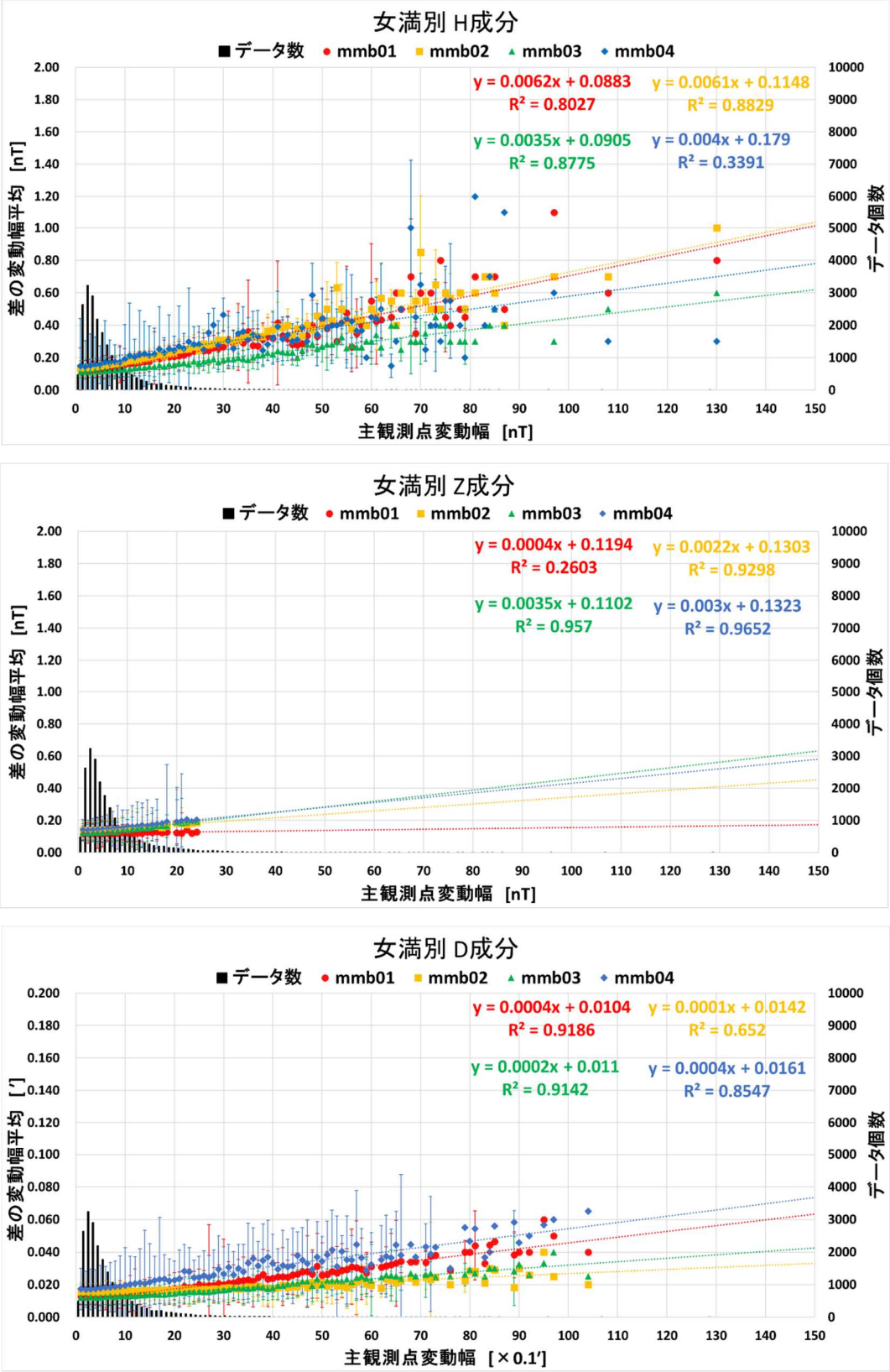


図 2 女満別の各観測点における主観測点変動幅に対する差の変動幅の平均、近似直線、誤差範囲およびデータの出現個数。上から、H 成分、Z 成分、D 成分。

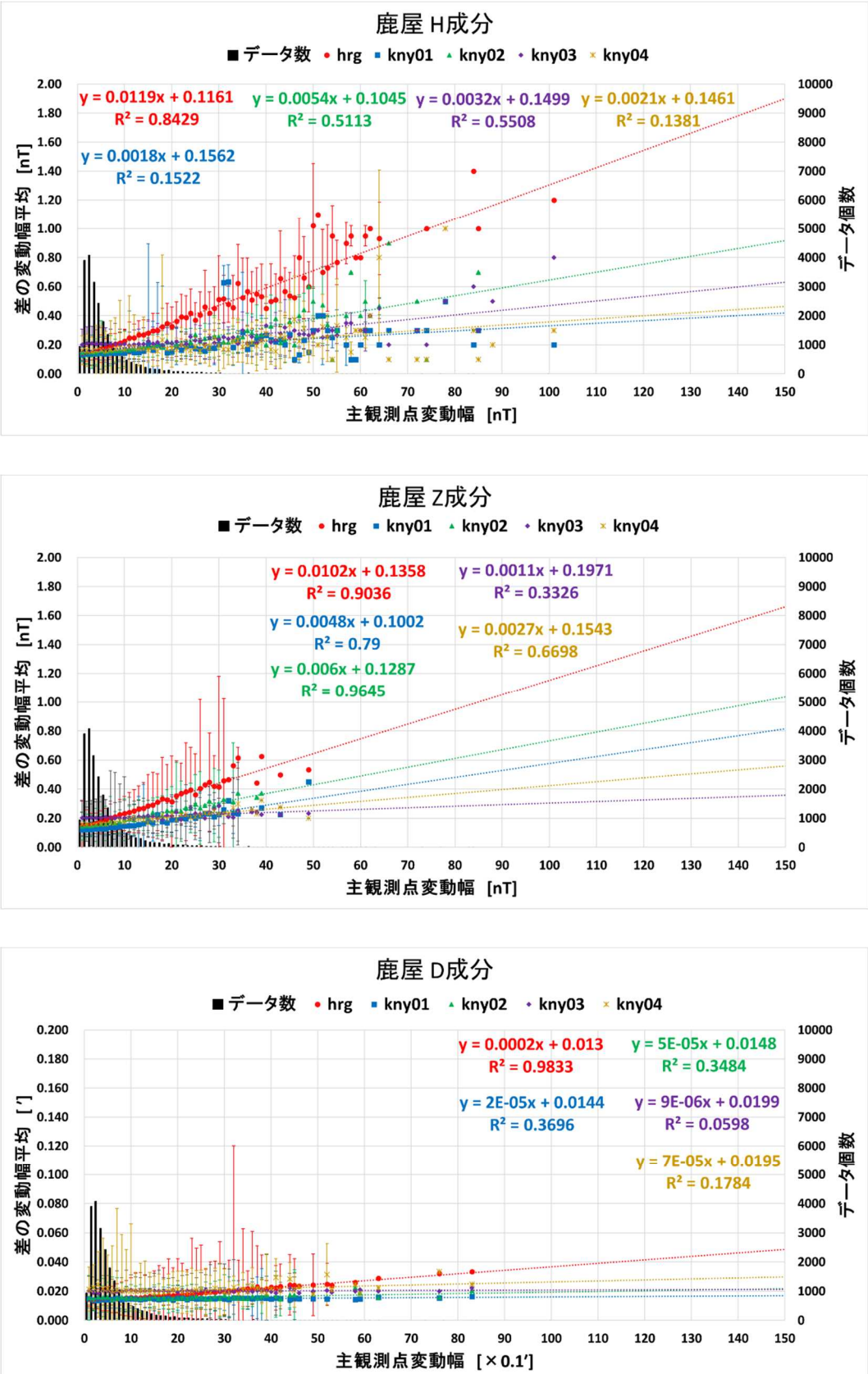


図 3 鹿屋の各観測点における主観測点変動幅に対する差の変動幅の平均、
近似直線、誤差範囲およびデータの出現個数。上から、H 成分、Z 成分、D 成分。

観測点	H			Z			D		
	傾き	オフセット	相関係数	傾き	オフセット	相関係数	傾き	オフセット	相関係数
kak01	0.0014	0.103	0.54	0.0001	0.119	0.00	0.00005	0.0145	0.71
kak03	0.0023	0.173	0.31	0.0011	0.177	0.07	0.00001	0.0173	0.01
kak04	0.0101	0.155	0.55	0.0046	0.168	0.27	0.00006	0.0140	0.67
mmb01	0.0062	0.088	0.80	0.0004	0.119	0.26	0.00040	0.0104	0.92
mmb02	0.0061	0.115	0.88	0.0022	0.130	0.93	0.00010	0.0142	0.65
mmb03	0.0035	0.091	0.88	0.0035	0.110	0.96	0.00020	0.0110	0.91
mmb04	0.0040	0.179	0.34	0.0030	0.132	0.97	0.00040	0.0161	0.85
kny01	0.0018	0.156	0.15	0.0048	0.100	0.79	0.00002	0.0144	0.37
kny02	0.0054	0.105	0.51	0.0060	0.129	0.96	0.00005	0.0148	0.35
kny03	0.0032	0.150	0.55	0.0011	0.197	0.33	0.00001	0.0199	0.06
kny04	0.0021	0.146	0.14	0.0027	0.154	0.67	0.00007	0.0195	0.18
hrg	0.0119	0.116	0.84	0.0102	0.136	0.90	0.00020	0.0130	0.98

表 1　柿岡、女満別および鹿屋における近似直線の傾き、オフセットおよび相関係数

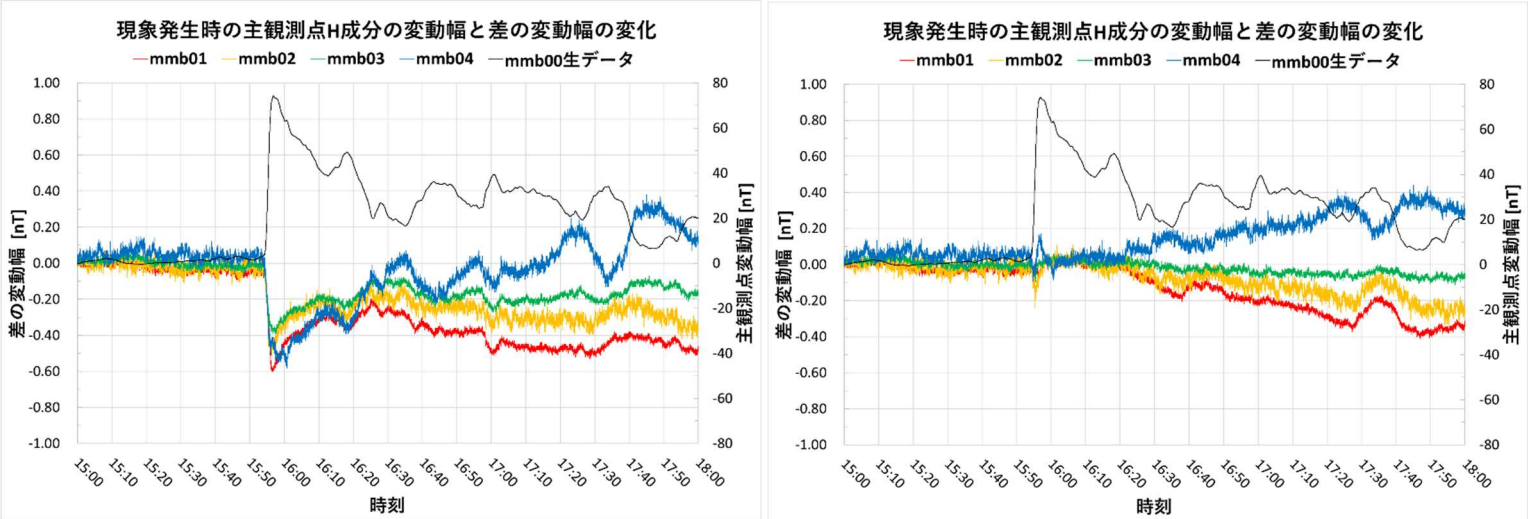


図 4　2014 年 9 月 12 日に発生した急始型磁気嵐。女満別の各副観測点の差の変動に変動幅係数を適用。（左）適用前、（右）適用後

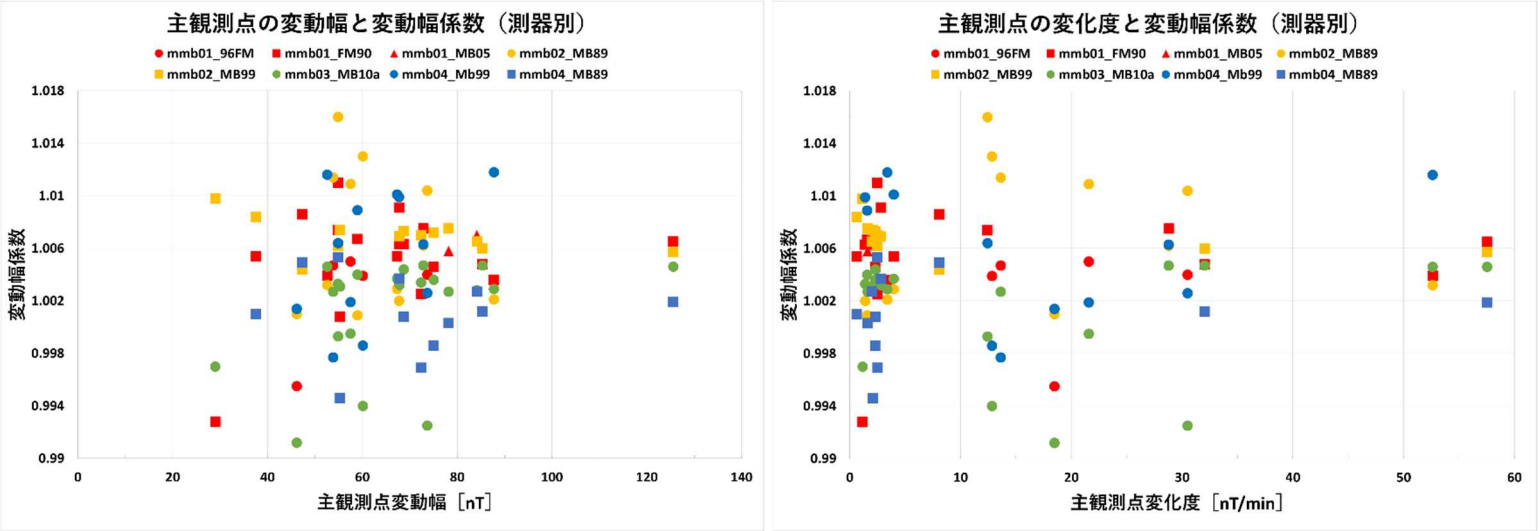


図 5　女満別における主観測点変動幅（左）および変化度（右）と変動幅係数の関係（測器別）