

# 令和 5 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	9 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	40 頁

## 基礎課題

機械学習による K 指数判定手法の開発	51 頁
松代地震観測所における地磁気観測	54 頁
表層透水を伴う地中温度の計算手法の開発	61 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 3)	65 頁
地磁気嵐の自動判別に向けた調査	70 頁

2024 年 3 月  
地磁気観測所

[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5年～7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、屋良朝之、山際芳雄（技術課）、  
大竹和生、谷口秀隆、長町信吾、稻村友臣、松浦大輔、飯塚ふうな、山際龍太郎（観測課）、  
吉田康宏

[成果]：

### I. 簡易型偏角・伏角の測器開発

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・伏角測定器を製作設計に必要な情報を収集して開発を進めている（図 1）。今年度は磁気センサーの取付精度や回転台の傾き角などが測定値にどのような影響を与えるかを精密に評価し、その補正方法を考案した。



図 1：小型磁気センサーを用いた偏角伏角計の試作機

### II. 地磁気観測データのノイズ低減

活火山で全磁力連続観測は、当所と本府地震火山部の両者で行われている。前者は主に調査研究を目的として 3 火山（雌阿寒岳・草津白根山・伊豆大島）で、後者は主に火山活動評価を目的として 6 火山（樽前山・吾妻山・安達太良山・御嶽山・九重山・霧島山）で観測を実施している。両者の情報システム（地磁気観測総合処理装置と VOIS）が令和 6 年度に更新整備される。そこで、火山監視業務の高度化のため、更新に合せて「火山全磁力データ VOIS 伝送計画」：

- ① 火山における全磁力データを当所の総合処理装置に集約
- ② それらにノイズ低減のための加工処理を施して VOIS へ伝送

③ VOIS で蓄積された毎日値を各火山センターの現業にて監視や評価に利用を実現する構想の具体化が進められてきた。システム更新と計画のスケジュールを図 2 に示す。

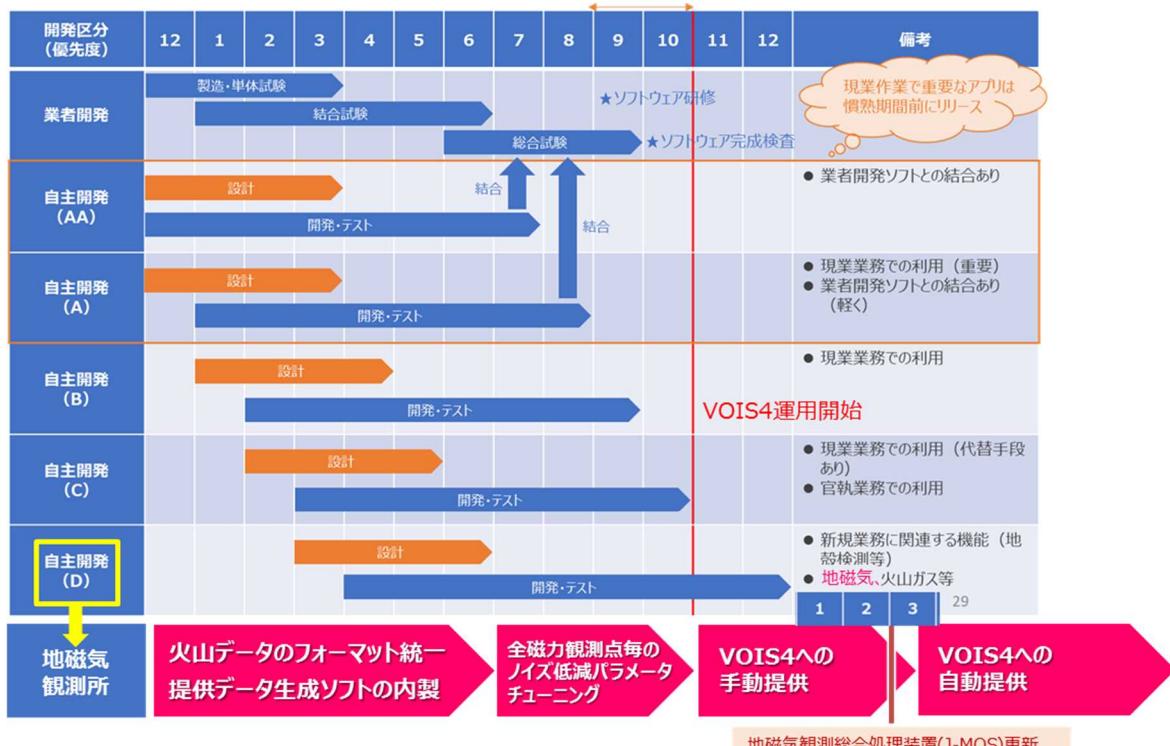


図 2 VOIS および地磁気観測総合処理装置の更新と「火山全磁力データ VOIS 伝送計画」の更新スケジュール（地震火山部計画資料からの抜粋に加筆）。

全磁力データには火山性以外の起源をもつ多様な変動が重畠しているほか、全磁力データの差には「DI 効果」がノイズとして含まれていることが知られている。近年、当所では DI 効果の除去手法（「DI 補正」）に重点的に取組んでおり、一定の成果を挙げてきた。そこで、上記の処理プロセス②には、当所と本府の全火山観測点に対して DI 補正も含める。本年度のノイズリダクション班の調査では、DI 補正を即時に適用する具体的なアルゴリズムについて検討した。

DI 効果の原理から、DI 補正には全磁力観測点における背景磁場（3 成分）の変動が必要である。特に即時の DI 補正では、その背景磁場変動を忠実に再現する 3 成分データを安定して供給することが困難な課題となる。その供給源として

- a) 毎日公開される全球モデル（磁気圏起源成分）の毎日値
- b) 当所の定常観測施設（柿岡・女満別・鹿屋）で取得された成分変化計データ

が考えられる。a)は観測点におけるモデル値を生成できるが、全球モデルにより局所的な急変化を十分に表現できるか確認を要する。b)については地域的な急変化の表現性は高いが、定常観測施設は火山観測点から数百 km は離れており、DI 補正に適用できる程度に局所的変化を表現できるか定かではない。

そこで、数百キロメートル離れた全磁力観測点の事例として国土地理院の地球電磁気連続観測施設（赤井川・原町・室戸）の全磁力毎日値と、全球モデル CHAOS-7 のモデル全磁力値との差（図 3 上段の緑線）、定常観測施設（女満別・柿岡・鹿屋）の全磁力毎日値の差分をプロットした（図 3 下段の緑線）。両者を比較すると、定常観測施設の変化観測のほうが、観測点の変化をよく表現していることがわかる（緑線の変化が滑らか）。

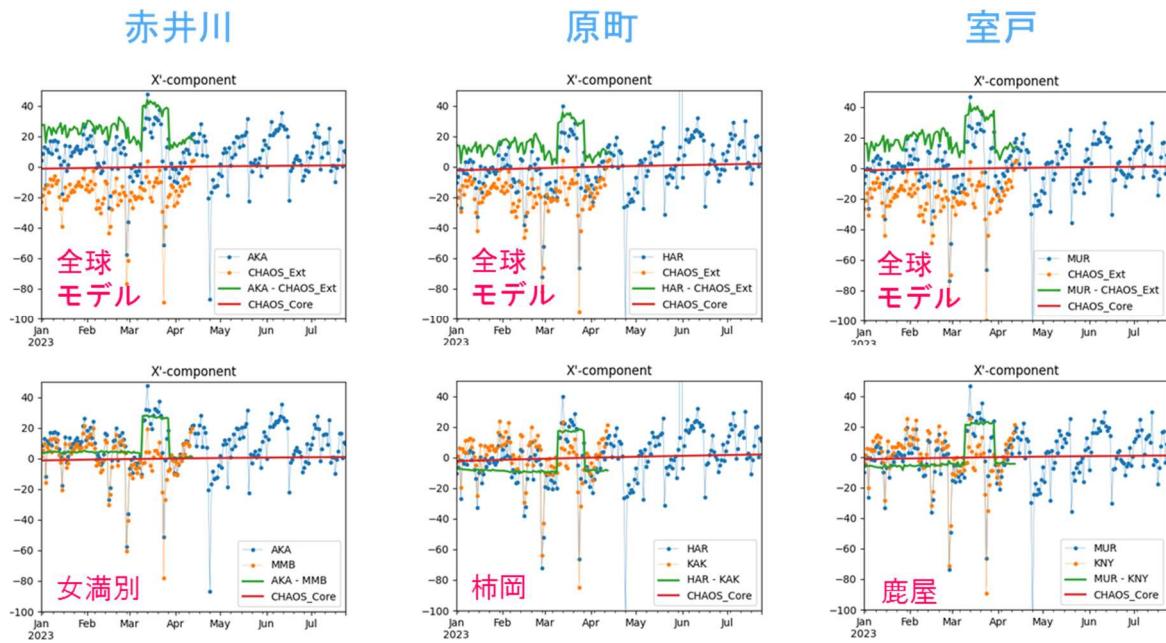


図 3 参照として全球モデルの全磁力毎日値（上段）、および定常観測施設（女満別・柿岡・鹿屋）の全磁力毎日値（下段）を用いた国土地理院施設（赤井川・原町・室戸）の全磁力毎日値（緑）。

以上の結果から、即時 DI 補正のための 3 成分変化には、(数百 km 離れていたとしても) 定常観測施設のデータを用いることとする。以下に、定常観測施設を用いた DI 補正の有効性を示す。ここでは、国土地理院の水沢測地観測所を疑似的に火山全磁力観測点および全磁力参照点と見立て、約 368km 隔てた柿岡の 3 成分を使って人為的に作成した水沢での DI 効果を補正する。DI 効果を含む全磁力差分データは次のように作成する。

1. 水沢の 3 成分確定データから全磁力を合成し、疑似的な全磁力参照データとする
2. 水沢の 3 成分確定データに時間変化しない異常値（偏角と伏角で-2° に相当）を付加してから全磁力を合成し、疑似的な全磁力観測点データとする
3. 1 と 2 の差分には人為的な DI 効果が含まれることになる

図 4 に、生成された水沢の DI 効果と、柿岡の 3 成分変化計データを用いた DI 補正のシミュレーション結果を示す。柿岡の成分データを利用して数 nT 程度の短周期 DI 効果と、2008 年以降にみられるトレンド（永年変化による DI 効果）が取り除かれている。本シミュレーションは観測点と参照点に異なるノイズのない理想的な状況で実施しているが、原理的には数百 km 離れた変化計データを用いて DI 補正できることを示している。

以上より、定常観測施設の暫定成分データを「火山全磁力データ VOIS 伝送計画」に用いる即時 DI 補正アルゴリズムにも適するものと認められる。次年度からは、同アルゴリズムに従い地磁気観測総合処理装置に即時 DI 補正アルゴリズムを実装する。

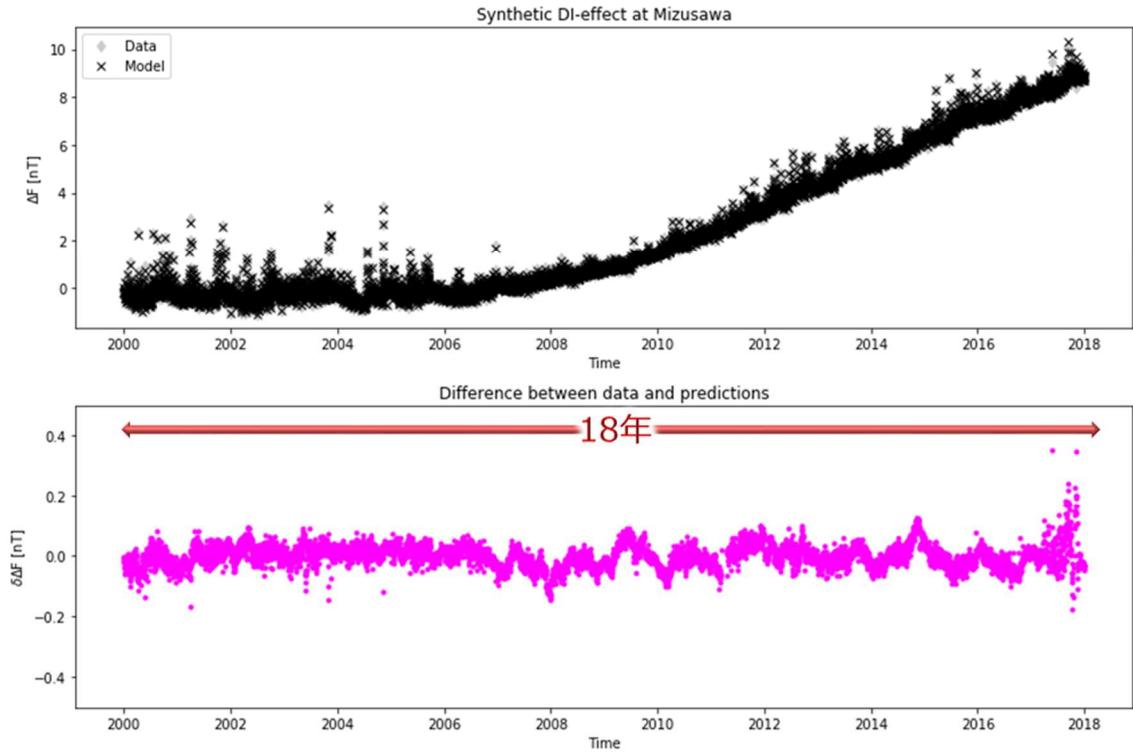


図 4 人為的に生成された水沢毎日値の DI 効果（上段の黒×）と柿岡の 3 成分変化計データを用いて予測した DI 効果（上段のグレー×）、および DI 補正（上段の黒×とグレー×の差）を施した後の水沢毎日値（下段）。

### III. 定常観測

雌阿寒岳、草津白根山及び伊豆大島については、全磁力の連続及び繰返し観測の成果を火山監視課及び各火山センターに共有し火山活動解説資料に掲載するほか、火山噴火予知連絡会に報告した。吾妻山については、予備調査として 3 成分繰返し観測を実施した。

#### ○雌阿寒岳

全磁力繰り返し観測については全磁力連続観測と調和的な観測成果を得た。一方、2023 年になって変化が顕著になった全磁力減少や赤沼火口北側の全磁力変化については、熱消磁源の標高などを検討したが、その原因の解釈は困難であった。

#### ○草津白根山

全磁力連続観測について、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。また、全磁力繰り返し観測について、2022 年 10 月～2023 年 10 月の差から湯釜の北側で全磁力の減少、南側で増加が見られ、冷却帶磁のパターンではあるが、系統的な変化はしておらず、単一の熱源ソースでは観測値をうまく説明することができなかった。

#### ○伊豆大島

火山活動が静穏であり火山性の全磁力変化は見られない。一方、マグマ上昇に伴う全磁力変化シミュレーションを実施した結果、三原山火口北側に設置した当所の全磁力連続観測点では火山性の変化が殆ど期待できないことが示唆された。津倍付連続観測点のノイズ調査では敷地内で徒步磁気測量を実施した結果、連続点磁力計（感部、電源・通信部）の付近で局所的に磁場傾度が大きい場所があることが分かった。また、津倍付のノイズ（2022 年と 2023 年の臨時連続観測記録）について解析した結果、ノイズの基本周波数は 0.1264Hz（7.912 秒）、振幅は 0.1nT 程度であり、各観測点のピークスペクトルの振

幅については 2022 年の 3 番目の観測点を中心として振幅が減少していることが分かり、磁気双極子を仮定するなどして、励起源の最適場所を開けた土地の南東端あたり深さ約 30m に推定した（図 5）。

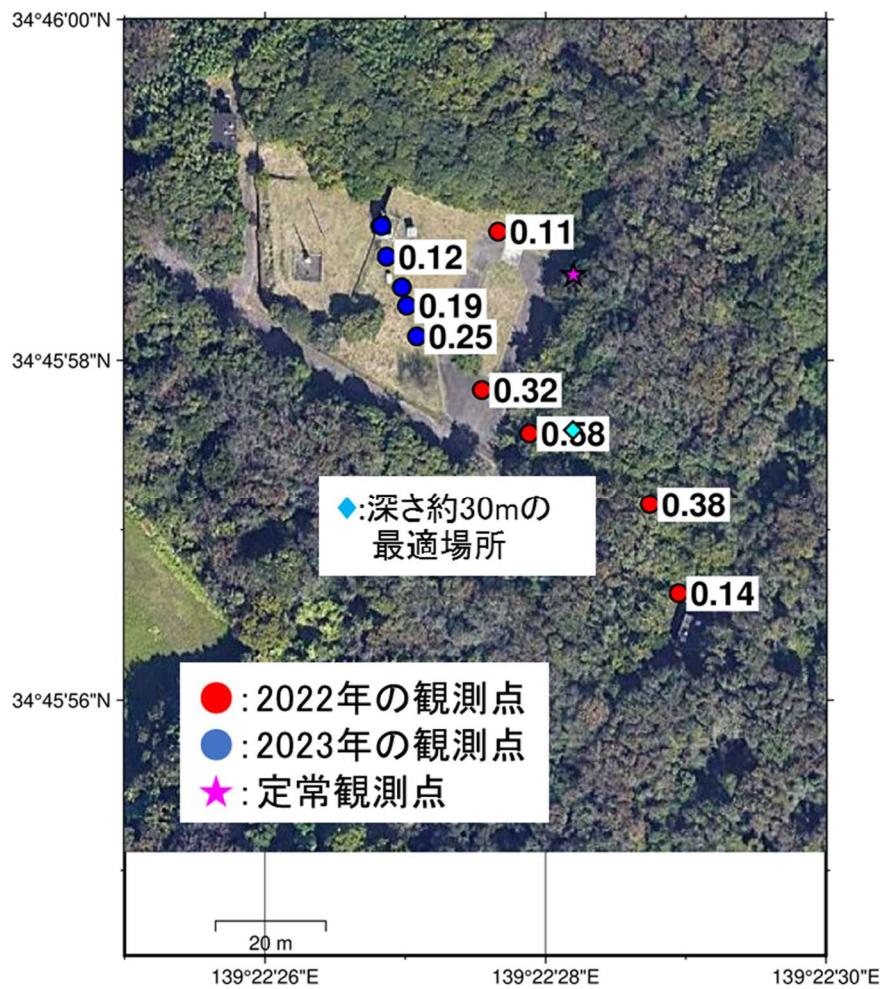


図 5 観測点の基本周波数の最大振幅分布

津倍付ノイズの励起源の最適場所を示す。

更に、津倍付のノイズがどれくらい低減できるか、バンドストップフィルターと伝達関数で比較をした（表 1）。どちらも 20~30%程度低減することができた。

表 1 津倍付ノイズの低減結果 (TBT:津倍付、MNE:三原山北東、MSW:三原新山南西)

	オリジナル	バンド・ストップ	伝達関数
TBT-MNE	0.193	0.140(27%)	0.156(19%)
TBT-MSW	0.190	0.137(28%)	0.152(20%)

### ○吾妻山

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、観測自体に長時間および高度な技術を要する。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と、熱活動の時空間変化の推定精度向上につながる。

## ①吾妻山での地磁気 3 成分繰返し観測

吾妻山大穴火口周辺（図 6）と高湯参照点にて 3 成分繰返し観測を実施した。偏角 D 及び伏角 I を 4 姿勢で観測した平均値を 1 回分としてカウントした（表 2）。

表 2 大穴火口周辺・高湯参照点の 3 成分繰返し観測結果

観測点	日付	基線値 D[°']	基線値 H[nT]	基線値 Z[nT]	各日における差[', nT, nT]
A7	2023-10-24	-8°45.33'	-1243.57	1439.80	0.11(D), 0.15(H), 0.00(Z)
		-8°45.22'	-1243.42	1439.80	
A9	2023-10-24	-8°52.55'	-1274.91	507.70	0.00(D), 0.72(H), 0.84(Z)
		-8°52.55'	-1275.63	508.54	
A11	2023-07-13	-8°23.73'	-1043.60	948.22	0.05(D), 0.51(H), 0.37(Z)
		-8°23.68'	-1044.11	948.59	
高湯	2023-07-12	-8°16.32'	-684.90	929.44	0.05(D), 0.04(H), 0.06(Z)
		-8°16.47'	-684.86	929.50	
	2023-09-26	-8°17.67'	-686.76	929.89	0.06(D), 0.47(H), 0.33(Z)
		-8°17.73'	-687.23	930.22	

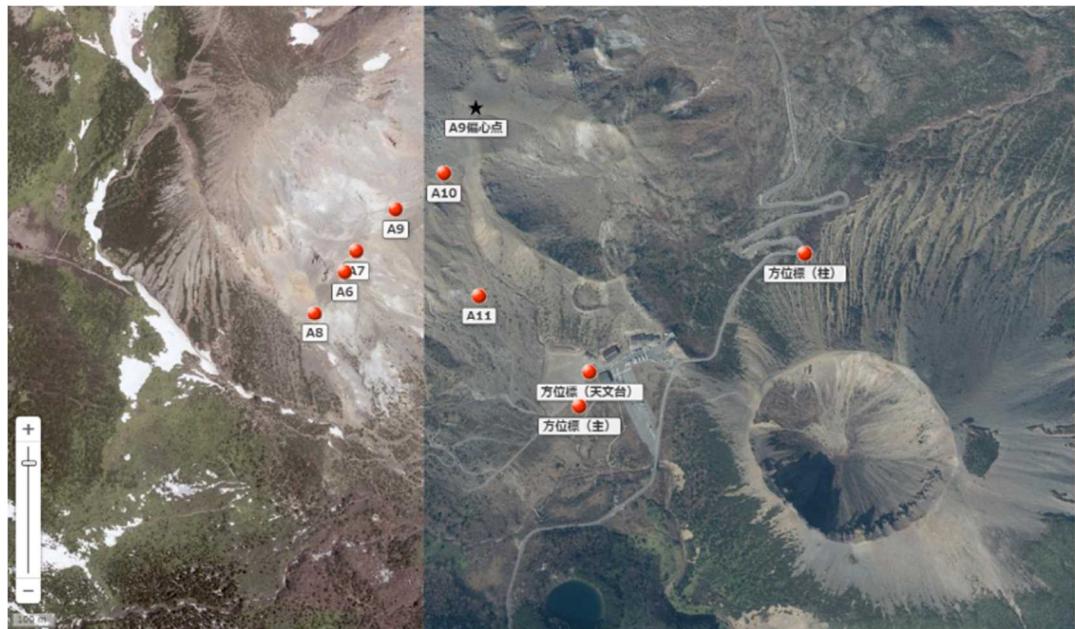


図 6 観測点、方位標の配置

## ②GNSS による真方位観測

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 3 の通りである。

表3 大穴火口周辺・高湯参照点の真方位角 (E+)

観測点	方位標距離 [m]	真方位角 (R5年) [° ' " ]	真方位角 (R4年) [° ' " ]	真方位の変化量 ["]
高湯(主)	160	162 47 00	162 47 00	0
高湯(副)	-	143 19 27	143 19 24	3
A6	610	119 59 33	119 59 34	1
A7	610	124 47 10	124 47 12	2
A8	640	109 30 03	109 30 13	10
A9	950	96 28 21	96 28 32	11
A10	610	149 59 59	149 59 54	5
A11	337	138 19 43	138 19 37	6

### ③高湯参照点収録装置の温度対策効果の検証

6 火山の参照点で運用中の収録装置 (DTMGM9EFG) は、ブラックスゲート磁力計の出力の温度依存性が高いことが分かっている。回路部の温度係数は約  $0.2\text{nT}/^\circ\text{C}$  である。温度特性の良い抵抗に改良することで約  $0.02\text{nT}/^\circ\text{C}$  になっている。更に出力を安定させるために真空断熱パネルと保冷剤を用いた自作の断熱コンテナを用意し検証を行った (図 7)。

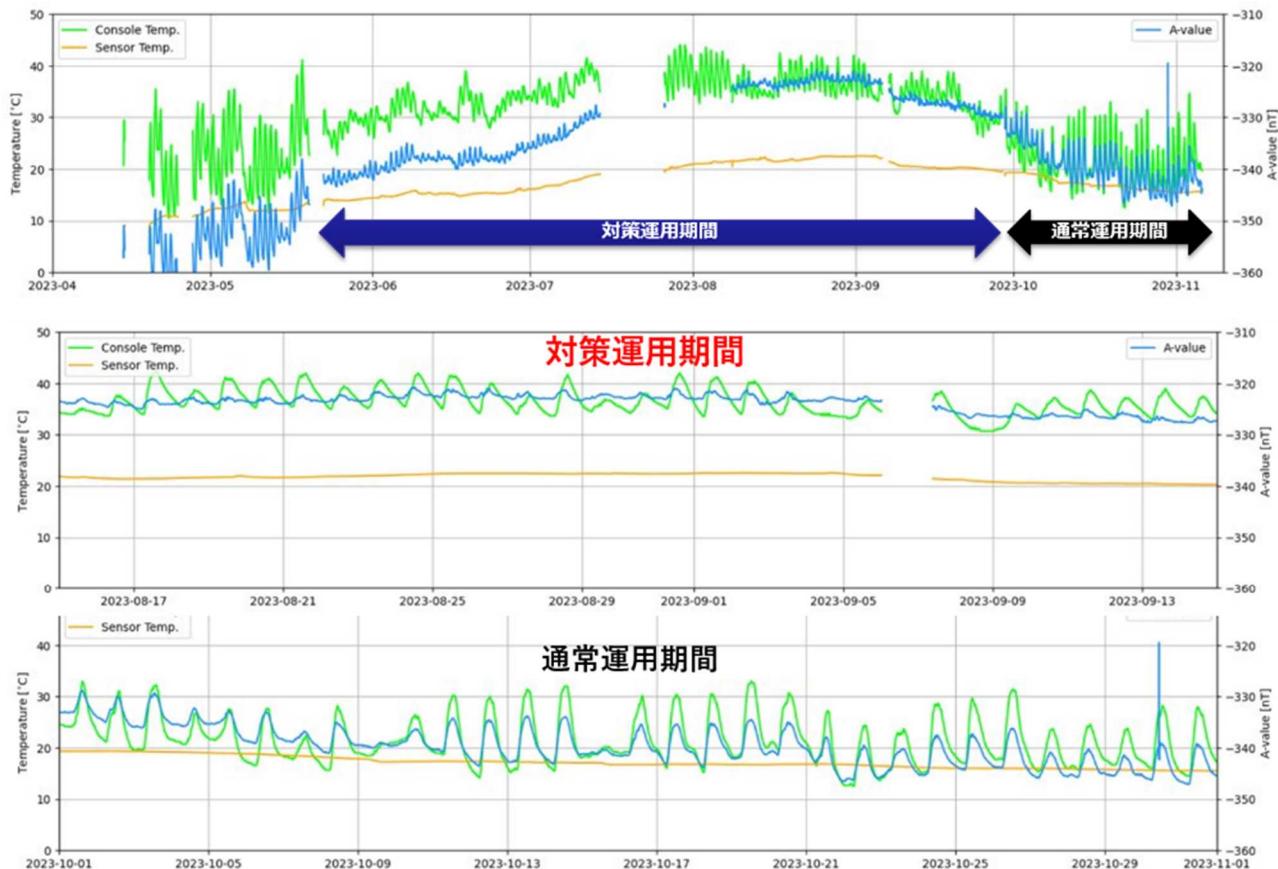


図7 高湯参照点収録装置の温度変化

[成果の発表] :

・論文・報告書等

豊留修一・藤原善明・長町信吾・増子徳道・屋良朝之・山崎明・弘田瑛士・栗原正宣,2024,阿蘇山における地磁気観測,地磁気観測所テクニカルレポート,19,査読無,2024年3月刊行

松下拓輝・浅利晴紀・稻村友臣・仰木淳平・平原秀行・有田真・近藤斗真・増子徳道・屋良朝之・谷口秀隆・藤原善明・山際芳雄・秋元良太郎・海田俊輝・市來雅啓,2024,吾妻山大穴火口付近における地磁気ベクトル成分観測の予備調査,Conductivity Anomaly研究会2024年論文集,査読無,刊行準備中

・学会・シンポジウム等での発表

浅利晴紀・有田真・秋元良太郎,2023,2022年吾妻山大穴火口浅部の熱的推移について～全磁力連続観測による示唆～,日本地球惑星科学連合2023年大会,SVC33-01

飯塚ふうな・三嶋渉・宮村淳一・橋本武志,2023,樽前山における2021年3月の熱消磁現象と最近の火山活動,日本地球惑星科学連合2023年大会,SVC33-02

Nagamachi, S. and S. Asari,2023,A new method to correct the orientation effect in observations of the total magnetic force for volcanomagnetic monitoring,the 28th IUGG General Assembly (IUGG2023),A23p-327

松下拓輝・浅利晴紀・稻村友臣・仰木淳平・平原秀行・有田真・近藤斗真・増子徳道・屋良朝之・谷口秀隆・藤原善明・山際芳雄・秋元良太郎・海田俊輝・市來雅啓,2023,吾妻山大穴火口付近における地磁気ベクトル成分観測の予備調査,2023年度Conductivity Anomaly研究会

[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]：○浅利晴紀、海東恵美、神谷亜希子（技術課）

山際 龍太郎、長町信吾、谷口秀隆、仰木淳平、西田重晴（観測課）

[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専門職人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。

[工程表]：

調査項目	令和3年度	令和4年度	令和5年度
①FT型磁気儀オーバーホール	成果R3・1	成果R4・1	成果R5・1
②聴き取り調査		成果R4・2	
③観測基線値の誤差	成果R3・2	成果R4・3	成果R5・2
④DI-72の診断			成果R5・3
⑤セオドライトの検定			成果R5・4

調査開始当初の目標には、①と②に續いて「次期標準磁気儀の素案の検討」が含まれていた。しかし、②の結果、次期標準磁気儀を設計開発する目途が立たないことが判明したことから、本課題の方針を転換して③④⑤の調査を進めた。本計画は令和5年度までの成果をもって終了とする。

[令和3年度の成果]：

(成果R3・1) ドイツ専門業者へのFT型磁気儀のオーバーホール発注

○FT型磁気儀について

1軸フラックスゲート磁力計を搭載した非磁性経緯儀（当所では「FT型磁気儀」と称するが「DI-meter」或いは「DI-flux」とも呼ばれる）は、1980年代後半に登場して以来、従前のサーチコイル型磁気儀に取って代わり現在に至るまで地磁気絶対観測を行うためのスタンダードな測器として世界中で使われている。特に世界の主要地磁気観測所においては、例外なくCarl-Zeiss社（旧東ドイツ・イエナ）による経緯儀THEO 010B（1"読み）

と THEO 020B (6"読み) が使用されている。同社の測量機器生産技術（特に経緯儀の非磁性と観測精度の担保）に相当する技術を有する業者が 30 年以上現れていないのは、限られた需要に対し新規に開発コストを投じるメリットの乏しさによると考えられる。Carl-Zeiss 社では THEO の生産は既に終了されており、各ユーザーが独自に保守を施しながら使用を続けているのが世界的な現状である。

#### ○FT 型磁気儀のオーバーホールに関する課題

THEO を複数台所有する当所では、定期的に国内業者に依頼し、ドイツで研修を受けた国内の技師によるオーバーホールが実施されてきた。しかしながら不具合が十分に解消されないケースもあり、現在運用している THEO 010B（柿岡予備器・女満別ルーチン用・鹿屋ルーチン用・祓川ルーチン用・父島ルーチン用・昭和基地ルーチン用・国際比較観測用・技術協力用・調査観測用）のいずれについても万全の状態にあると言えるものは少ない。特に柿岡・女満別・鹿屋の 3 官署では、データ収集・配信に関する国際事業で定められた枠組みのもとで、ルーチンの絶対観測において十分に高い観測精度が要求されることから、THEO の完全な状態維持には重要な意義がある。現在、柿岡では主測器 DI-72 が不能に陥った際の予備器として THEO 010B が常備されている（KAK No.3）に過ぎない。しかし同器の機械的動作や光学系は完全な調整が施された状態から程遠く、柿岡の主測器として置き換わるには懸念が伴っていた。

#### ○ドイツの専門職人へのオーバーホール発注

当時の Carl-Zeiss 社にて THEO に携わった職人のうち 1 名が今も現役であり、新興の測量機器メーカー Wenger-Wiethüchter 社（ドイツ・イエナ）に籍を移して EU 圏内からの THEO のオーバーホールを受注している。そこで、KAK No.3 の完全な整備を期し、本調査では同職人に対し初めて EU 圏外からオーバーホールを発注するためのルート開拓を目指した。当所と Wenger 社の間には、国内代理業者とドイツ地球科学研究センター（GFZ）附属の二二メック地磁気観測所を仲介としてオーバーホールの発注・輸送・精算が行われた（成果 R4-1 図 5 を参照）。以下では、開拓した国際輸送経路と、Wenger 社によるオーバーホールの内容について報告する。

#### ○国際輸送について

輸送ルートについては種々の選択肢がある。輸出代行業者を利用することも検討したが、最終的には、国内代理業者の提案に従い、往復ともに国際宅配業者 FedEx を利用した。

#### ○Wenger 社によるオーバーホールの内容

今回の KAK No.3 オーバーホールでは、完全分解による清掃・注油・調整が行われるとともに、特に図 1 の項目にて調整・修理が行われた。オーバーホールに先行して実施されたニーメック観測所での非磁性点検では脚部ネジの 1 本に磁性が確認された (20nT) が、結局磁力計の位置では測定に影響しない程度のことからネジ交換は行われなかつた。全ての修理が完了した後に、ニーメック観測所で動作点検と非磁性検査が行われ状態良好との判定を得た。当所納入後に動作を確認したところ、クランプの固い調整と、マイクロメーターが滑る症状の残存が気になる点として挙がったが、ドイツの専門職人によるオーバーホールの成果は目覚ましいものがあった。まだオーバーホール後の器差測定を行っている段階ではあるが、KAK No.3 は DI-72 の後継となる可能性もあることから、そのための重要な準備を済ませられたことは大きな成果と言える。

### ○今後の展望

ニーメック観測所は今回の受注事例をもとに EU 圏外からもオーバーホールを受け付けることである。職人の高齢化による健康問題も聞かれることから、早期に他の THEO もオーバーホールを済ませることが望ましい。今のうちに複数台のオーバーホールを済ませたいところであるが、本調査によって仲介を通すルートが開拓され、発注と輸送方法に関する知見を得たことで、次回以降は各段階（成果 R4-1 図 5 を参照）において円滑な手続きや作業が期待できるようになった。

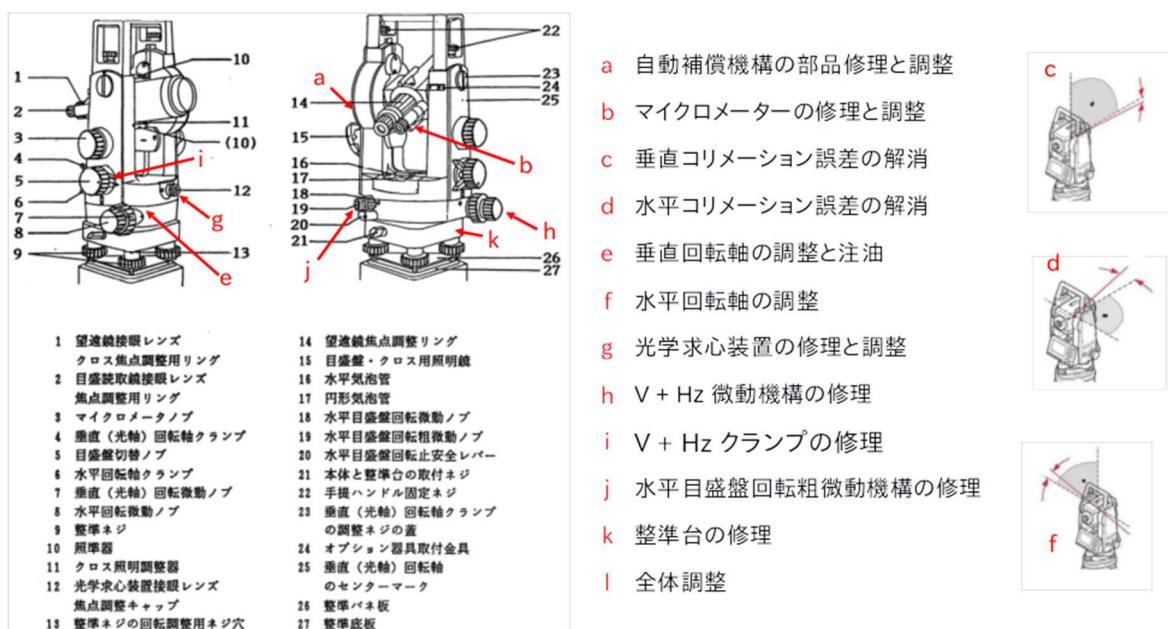


図 1 Wenger 社による KAK No.3 の診断結果に特記されていたオーバーホール実施項目。

## (成果 R3-2). 観測誤差を考慮した基線値の検討

### ○地磁気連続成分データの基線値について

フラックスゲート磁力計のような地磁気ベクトル 3 成分の連続変化観測では、測定の絶対値は保証されない。各成分の絶対値は、手動による絶対観測が実施された時刻にのみ得られる。連続成分データを絶対化するには、絶対観測から算出される「観測基線値」を用いて任意の時刻の基線値を「推定」する必要がある。言い換えれば、絶対化された連続成分データは、純粋な測定に基づくものではなく、「観測基線値」から導出される基線値の時間変化モデルに依存する。「採用基線値」と呼ばれるこのモデルの推定には、標準となる方法が定められておらず、データ生産者のポリシーに従って観測所ごとに異なる。当所の採用基線値は、観測基線値の線形補間により得ている（図 2）。これは、観測基線値の誤差がゼロであると前提としていることに他ならない。実際に柿岡では、現標準磁気儀 DI-72 による絶対観測の精度自体が高いほか、1 回の観測が 2 名によりそれぞれ行われることで測定数も多く、観測基線値が比較的精度よく決定されている（分散が小さい）と考えられる（絶対観測で 0.03' を超える観測誤差が疑われる場合は再観測としている）。

標準磁気儀 DI-72 による観測終了に伴い、現在と同じ観測精度が保てなくなる状況は想定される。例えば偏角で 0.1' 程度の測定誤差が生じうる FT 型磁気儀がこれを継承する場合、ゼロ誤差の前提が妥当であるかは疑問である。特に、1 名により FT 型磁気儀を用いて低頻度の絶対観測が既に実施されている出張所や観測点においては尚更である。また、観測施設近隣の人工擾乱による絶対観測への影響の増加も懸念される。各成分の基線値算出に必要となる全磁力の基線値にさえ人工擾乱による誤差の影響が及んでいるかもしれない。観測環境と測器の観点から、観測基線値のゼロ誤差の妥当性が担保されない時代に移り変わりつつあることは留意すべきである。ゼロ誤差が妥当でない場合、現行の採用基線値は、明かな過学習と見なされ、統計的にも適切な回帰モデルとは言い難い。

当所の採用基線値の導出方法は、世界的にはむしろ全く例外的である。観測基線値の測定誤差を考慮に入れて推定された基線値が採用されるのが一般的であり、当所のような単純な内挿は他に例が無い。具体的なモデル化の方法は生産者により異なるが、基本的には主観あるいは数値的な方法による直線か曲線による回帰モデルが採用基線値として用いられている（図 2）。

### ○曲線による基線値の導入

本調査では、当所の採用基線値として曲線による基線値を導入した場合を想定し、現行の内挿による採用基線値とどの程度の差が生じるか調べた。用いられる曲線としては多項式、B-スプライン、ベジエ曲線などが考えられるが、ここでは多項式による線形最小二乗回帰により、適度に滑らかに連続する基線値（柿岡における 2021 年の 1 年分）を推定することにする。観測基線値の誤差の定量的な見積りを欠いているため、ここではオーバーフィッティングを適度に回避する手段としてベイズ情報量基準（BIC）を参照して多項式の打ち切り次数を決定した。

図 3 に観測基線値と推定された多項式回帰モデルを示す。ここでは H,Z,D,F 成分の曲線はそれぞれ BIC が最小となるように打ち切り次数をそれぞれ 9 次、9 次、2 次、3 次としている。いずれにおいても、偶然誤差と見られるようなバラつきまで説明するのを回避する基線値のモデルが得られている。図 4 には現行の採用基線値と多項式モデルの残差をプロットする。Z,F 成分の残差については柿岡の毎分値の異常基準とする  $0.3nT$  の中に納まっている。H 成分についても局所的な例外を除いて同様である。これら 3 成分については、DI-72 による現行の絶対観測を継続する限りは、現行の基線値でも特に差し支えないと考えらえる。しかしこれは次期標準磁気儀の観測精度が DI-72 より劣る場合はこの限りではない。

一方、D 成分では、毎分値の異常基準とする  $0.03'$  を超える箇所が複数見られる。残差のバラつきが、絶対観測に伴うランダムな偶然誤差によるものであるならば、曲線による回帰モデルを採用する判断も妥当であろう。一方、一見して偶然誤差に見えるバラつきが、磁力計の環境変化に伴う有意な基線値変動であるならば、曲線による滑らかな基線値の表現は単純化しすぎである。現在のところ観測誤差に関する定量的な事前情報が十分収集できていないため、この点の判断に示唆を与えることはできない。D 成分の最適な基線値については、絶対観測の誤差や、連続観測の誤差の性質について事前の情報を収集する必要がある。最終的には、これらを総合して採用基線値のモデル誤差を算出し (Lesur et al. 2018)、その妥当性について評価を与えられることが望まれる。

本調査では DI-72 に代わる次期標準磁気儀が FT 型磁力計となること想定し、基線値のモデリングの対象を柿岡に絞った。本課題の主旨からはやや逸脱するが、FT 型磁力計が使われている鹿屋においては、ゼロ誤差を前提とした採用基線値の是非についての検討は、現時点で既に差し迫った課題であろう。近年特に人工擾乱が増大していることもあり、既にインターマグネットの相互チェック担当者からも勧められているところである。

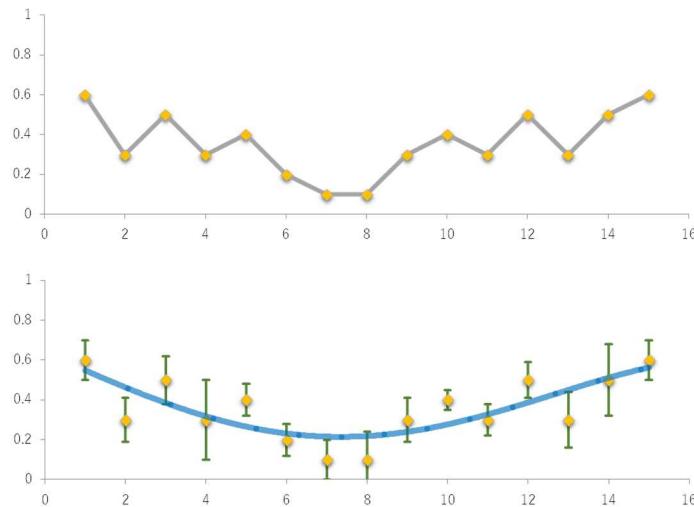


図 2 観測基線値（黄点）と採用基線値（線）の概念図。現行の線形内挿（上）と観測基線値の誤差を考慮した曲線回帰（下）。

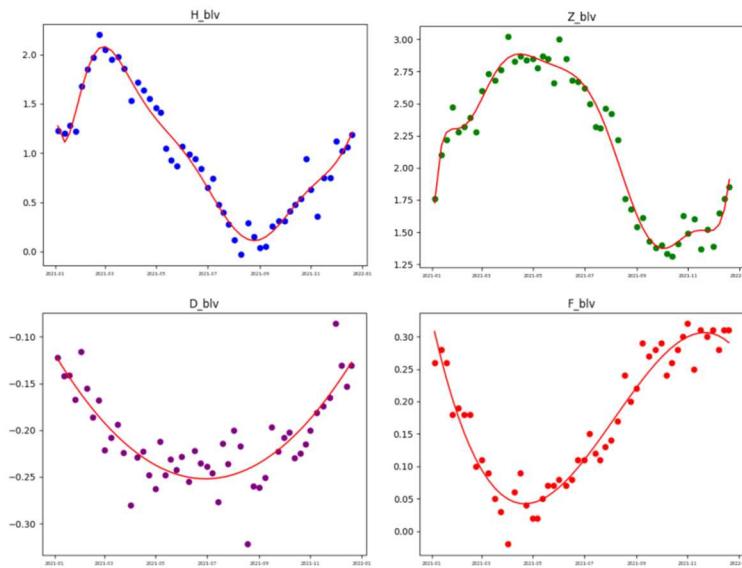


図 3 2021 年の柿岡における観測基線値および多項式による基線値の回帰モデル。

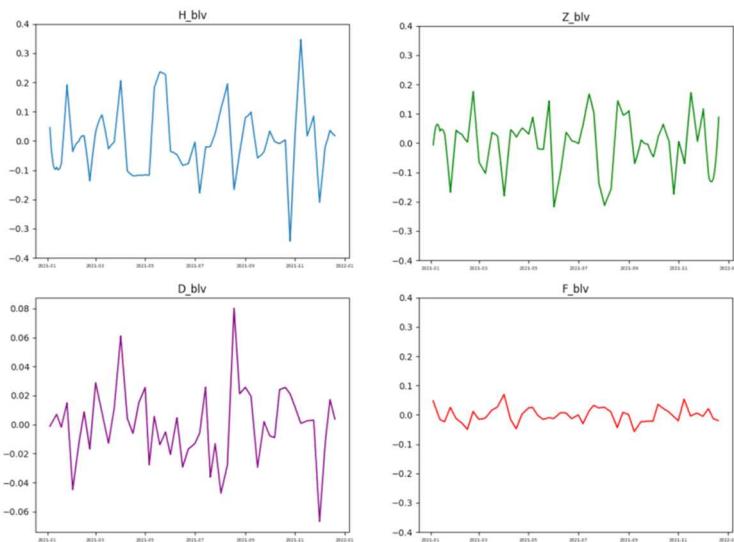


図 4 2021 年の柿岡における採用基線値と図 2 の基線値の回帰モデルとの残差。

偏差二乗平均 (RMSE) は、0.12nT (H 成分)、0.10nT (Z 成分)、  
0.025' (D 成分)、0.03nT (F 成分)。

[令和 4 年度の成果] :

(成果 R4-1). ドイツ専門業者への 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 (Wenger 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、国内における作業は比較的スムーズに捲った。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 5)。なお、Wenger 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 5 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図 6 に示す。これは Wenger 社が作業前の点検に基づいて提示した作業予定項目（「実施予定作業」の太字）を和訳したものである（原文はドイツ語）。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・視準軸水平コリメーション誤差・視準軸高度コリメーション誤差（図 6 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。

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 Wenger 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。Wenger 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 Wenger 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。

(顧客番号)	(担当窓口) (電話) (携帯番号) (Fax)	(修理番号) 735 rt (作業担当) (電話) (Fax) (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 (入庫検査) (付属品)	(日付) ○ (署名) ○
(実施予定作業)		
● 機器	乾燥、清掃	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	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	清掃、調節、調整、 交換 部分的／完全
○ 湿気による障害	除去	点検、設定、交換
● 内部光学系	乾燥、清掃	点検、設定、交換
● 整準台、整準ネジ	清掃、グリース、方向調整、交換	清掃、調節、調整、 交換 部分的／完全
● 微動機構 Hz, V	点検、清掃、グリース、方向調整、交換	点検、調整、交換
○ 水平目盛盤回転軸 安全レバーア	点検、調整、修理、交換	点検、調整
● 水平目盛盤回転機構	点検、調整、修理、交換	点検、調整、交換
● Hz-クランプ	修理、設定	点検、調整
● V-クランプ	修理、設定	点検、調整
● 水平回転軸	清掃、グリース、可動性回復	点検、調整、設定、 定数調節
● 垂直(光軸)回転軸	清掃、グリース、調節、水平軸誤差 <sup>b</sup> 調整	点検、調整、交換
● 光学求心装置	清掃、グリース、修理、調整	修理、交換、清掃
● 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、隙取り調整	
(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 <sup>a</sup> の解消		
* 視軸水平ずれ <sup>a</sup> 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 <sup>b</sup>		
* 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		
(出庫検査)		
强度試験 ○		
試験運転 ○		
気密性(温気・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 ISO 9001:2000に準拠し、検査、修理、光学及び電子の調節を実施する。		
(署名 - 営業・技術担当)		

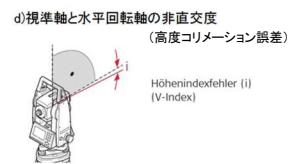


図 6 Wenger 社の点検報告の和訳

(成果 R4-2). 測量機器の市場と研究開発の現状に関する聞き取り調査

＜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

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聞き取りを行った。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。各業者から聞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つた。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月に回答があつた業者を訪問し、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？	<b>光学式は生産中止</b> 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。 <b>生産のための設備も無い</b> 。
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？	<b>取扱はない</b> 。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 <b>メーカーは存在しない</b> 。
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> 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

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。 <b>自前の開発能力は無し。</b>
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。 <b>自前の開発リソース無し。</b>
9月15日	Mingeo社 ハンガリー民間業者	メール	将来の開発計画は？	インターマグネットの要件( $\pm 2.5\text{nT}$ )を満たしする <b>Zeiss 020の改造を推進</b> 。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 <b>核磁気儀dIdD</b> も開発中。

一方、FT型磁気儀を構成する1軸磁力計（英・Bartington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、聞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。

- 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 職人に徹底した保守（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。

#### (成果 R 4・3). 観測基線値の誤差の評価

「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  $A_{\text{観}}$  のバラツキの程度を表す。ここで  $A_{\text{観}}$  は

$$A_{\text{観}} = A_{\text{真}} + A_{\text{オ}} + A_{\text{誤}}$$

と表されるものとする。つまり、観測データ  $A_{\text{観}}$  が（厳密には不可知な）真の物理量  $A_{\text{真}}$  と、（器差など）系統誤差によるオフセット  $A_{\text{オ}}$  と、（測定誤差など）偶然誤差によるバラツキ  $A_{\text{誤}}$  の重ね合わせとして取得されるものと見なす。 $A_{\text{オ}}$  と  $A_{\text{誤}}$  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  $A_{\text{誤}}$  の統計的性質を、期待値  $\mu_F (=0)$  と標準偏差  $\sigma_A$  により記述する。 $\sigma_A$  が  $A_{\text{真}}$  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  $A_{\text{観}}$  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 $\varepsilon \sim D_{観}^{(1)} / D_{観}^{(0)} \sim I_{観}^{(1)} / I_{観}^{(0)} \sim 0.001$ （<sup>(0)</sup>と<sup>(1)</sup>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 $B_{観}$ 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 $\sigma_B$ 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 $\sigma_A$ 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（成果R3-2図2上）。言い換えると、絶対観測のバラツキ $A_{観}$ の程度 $\sigma_A$ 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 $\sigma_A$ （或いは許容される最大の $\sigma_B$ ）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 $\sigma_A$ 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  $\sigma_A$  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  $\sigma_B$  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  $\sigma_B$  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<sup>1</sup>」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<sup>2</sup>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](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  $B_{\text{オ}}$  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  $B_{\text{誤}}$  の分布については正規分布状であり（図7）、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  $B_{\text{オ}}$  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。

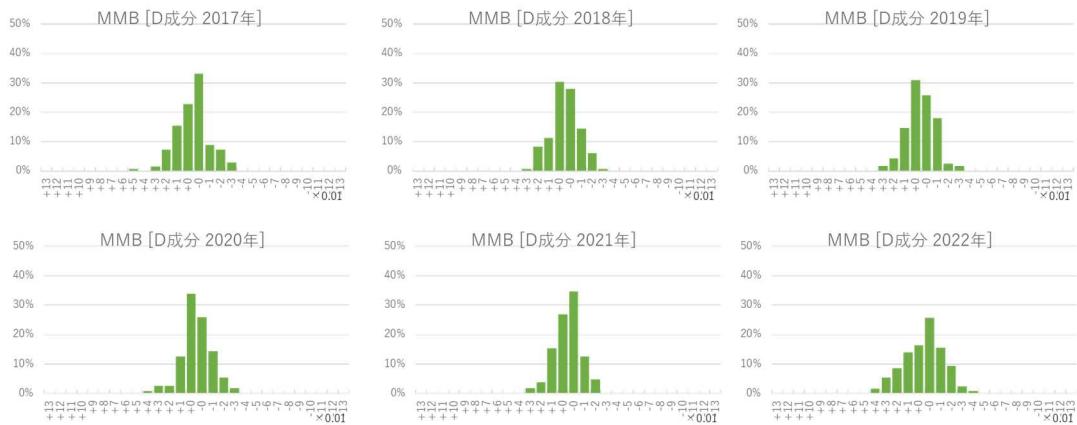


図7 現行方式により得られた女満別の観測基線値の頻度分布（期待値は厳密にゼロ）。

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  $A_{\text{観}}$  に適用し、真の基線値  $B_{\text{真}}$  の推定値とその実験標準偏差（不偏推定量）を求めた（図8）。図8には、現行の決定論的手法により  $A_{\text{観}}$  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  $B_{\text{真}}$  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  $B_{\text{真}}$  からのズレ（系統誤差）を考慮することができないことに因る（4つの基線値が  $B_{\text{真}}$  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  $A_{\text{観}}$  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  $A_{\text{観}}$  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  $A_{\text{観}}$  と統計モデルとの残差から評価することが可能になる。

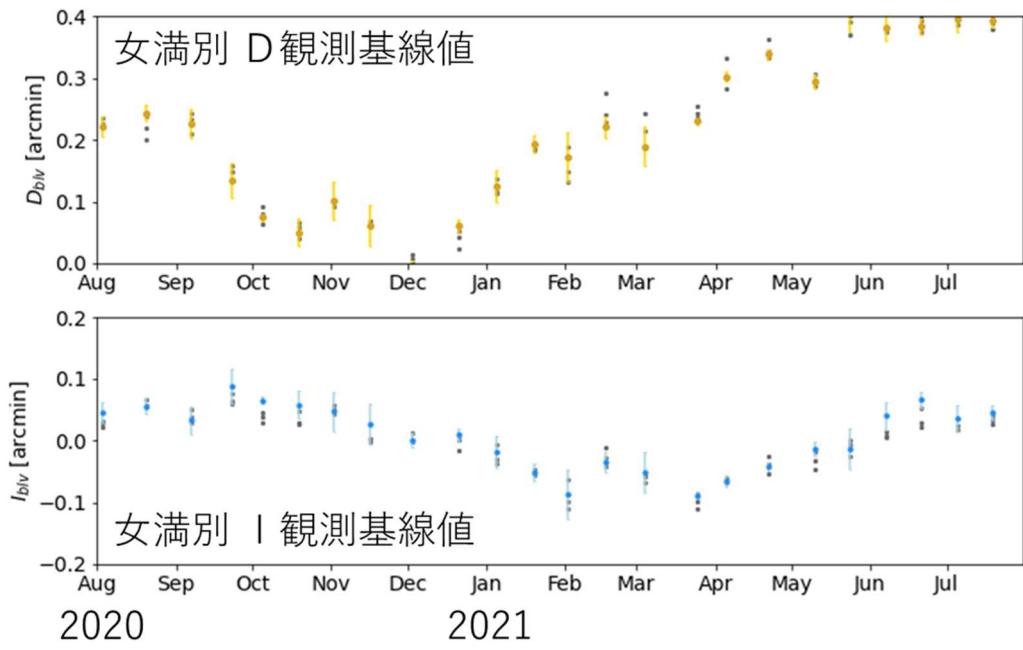


図 8 タイプ A 評価で確率論的に推定される真の基線値とその標準偏差の推定値（エラーバー付マーカー）、および、現行方式により算出される 4 つの基線値（灰色）。

なお、参考として 8 つの観測値から成る絶対観測データ  $A_{\text{観}}$  と真の基線値  $B_{\text{真}}$  を含む 4 つのモデルパラメータを関連付ける線形の観測方程式を以下に記しておく。

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \\ I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & \tan I & r/H \\ 1 & 0 & -1 & -\tan I & -r/H \\ 1 & 0 & 1 & -\tan I & r/H \\ 1 & 0 & 1 & \tan I & -r/H \\ 0 & 1 & 0 & -1 & -r/F \\ 0 & 1 & 0 & -1 & r/F \\ 0 & 1 & 0 & 1 & -r/F \\ 0 & 1 & 0 & 1 & r/F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D \\ I \\ \delta \\ \varepsilon \\ S_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \\ f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix}$$

8姿勢  
観測値       $I, H, F$  平均的な伏角・水平分力・全磁力  
 $r = \frac{180}{\pi}$ 
推定値  
 $D$  偏角  
 $I$  伏角  
測定誤差

$\delta$  水平軸ズレ  
 $\varepsilon$  高度軸ズレ  
 $S_o$  磁力計オフセット

ここで  $D_1$  から  $D_4$  が 4 姿勢の偏角測定値（外部磁場変動は 3 成分変化計記録を用いて補正済み）、 $I_1$  から  $I_4$  が 4 姿勢の伏角測定値（外部磁場変動は 3 成分変化計記録を用いて補正済み）、 $D$  と  $I$  がそれぞれ真の偏角と伏角、 $\delta$  と  $\varepsilon$  がそれぞれ磁力計軸と望遠鏡軸の水平方向と高度方向のずれ角、 $S_o$  が磁力計出力値のオフセットである。

## 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  $B_{\text{観}}$  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  $B_{\text{観}}$  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  $B_{\text{擾}}^{(n)}$  とその継続時間の総計  $T_{\text{擾}}^{(n)}$  が年毎にまとめられている。そこで  $T_{\text{年}}=1$  年として、人工擾乱の振幅の大きさ  $|B_{\text{擾}}|$  の期待値を次のように算出した（表 3）。

$$|B_{\text{擾}}| = (\sum_n |B_{\text{擾}}^{(n)}| T_{\text{擾}}^{(n)}) / T_{\text{年}}$$

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。 $B_{\text{擾}}^{(n)}$  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  $|B_{\text{擾}}|$  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  $\sigma_B=0$  を保持するために多大な労力を払う（再観測を行う、人工擾乱の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 3 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 9）、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  $B_{\text{観}}$  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  $B_{\text{観}}$  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。

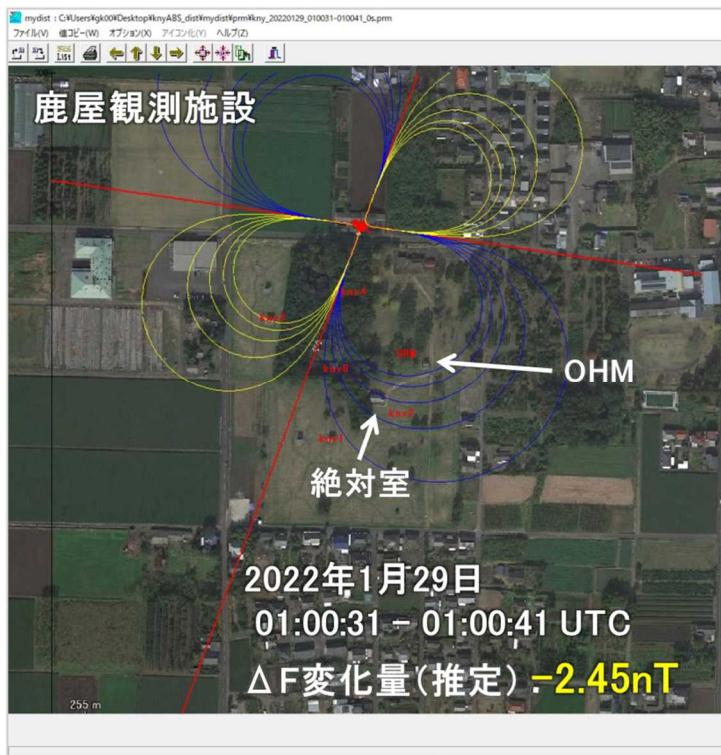


図9 鹿屋の絶対観測で地点差測定中に発生した人工擾乱の再現事例  
(2022年1月29日)。

#### 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卷(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卷(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卷(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卷(第02号), p.5
- [令和5年度の成果] :
- (成果 R5-1). ドイツ専門業者へのFT型磁気儀のオーバーホール発注

ドイツ専門業者（Wenger 社）でのオーバーホールのためドイツへ送付する当所 3 台目の非磁性セオドライトには、当所の FT 型磁気儀 KAK No.2 の THEO 010B を選択した。同測器の不具合については、光学系の異常も含んでおり（図 10）、以前の 2 台とはまた異なる症状があったため、専門職人による修復が期待された。

令和 5 年度の発注から納入までの工程は基本的に前年度のものと同じである（成果 R4-1 図 5 を参照）。令和 5 年 5 月に KAK No.2 セオドライトが国内代理店により引き取られ、令和 6 年 2 月に同代理店から当所へ納入された。専門職人ならではの分解調整により光学系の不具合は解消され、オーバーホールの結果は良好であった。ただし、補修のできない傷（図 10）については残ったままである。

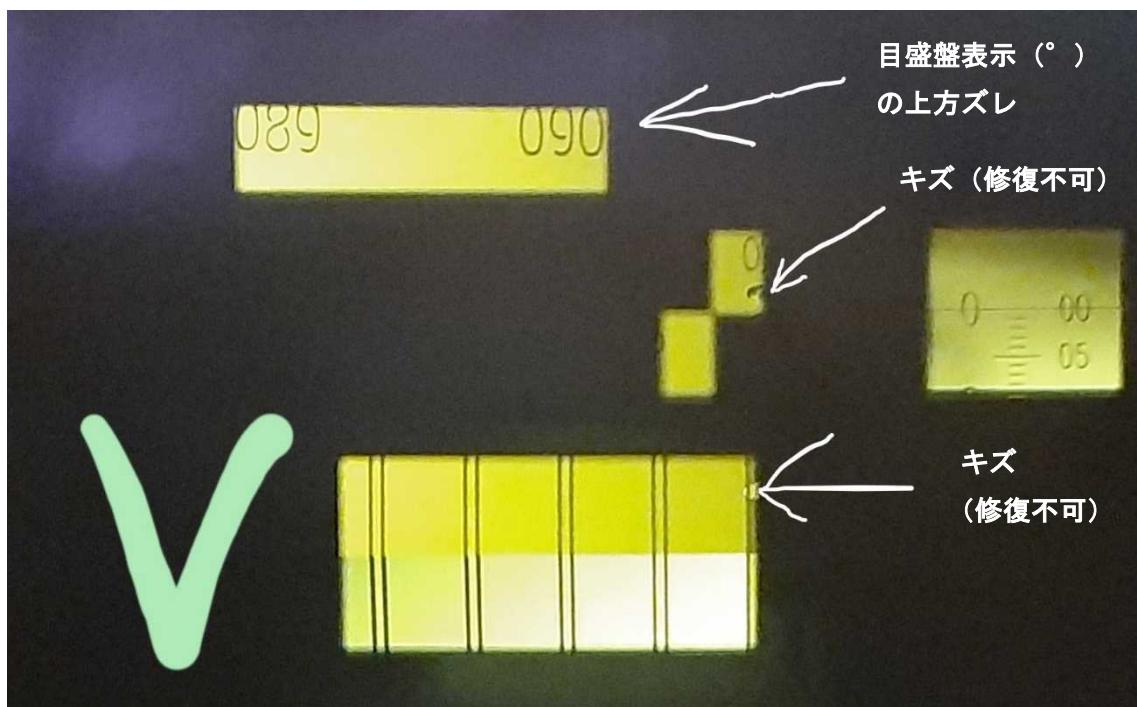


図 10 セオドライト KAK No.2 の修理前マイクロメーター視野（高度角 90°00'00''）

一方、近年の費用増加については懸念される。令和 3 年度のオーバーホール経費（税別）に対する、以降 2 年の経費の比率を表 4 に示す。Wenger 社への支払額はやや減少した（作業単価が維持されたまま工数減少）が、ドイツの仲介機関（GFZ ドイツ地球科学研究センター）による請求額が上昇した。これは同機関が、Wenger 社へ発注する前と後に行うセオドライトの点検工数を増やしたこと、その人件費が上昇したことによる。実際、KAK No.2 セオドライトの事前点検によって、底部プレートに磁性（ごく近傍にて 6nT であり観測には影響しない程度）があることが判明している（後に非磁性のものと交換されている）。また、為替レート（ユーロ/円）の変動も費用増加の原因となっている。令和 3 年から令和 5 年にかけては 130 円台前半から 150 円台後半に上昇しており、経費総額の約 40%

を占めるドイツ分の実費上昇への影響は小さくない。次年度以降もオーバーホールを継続するにあたり、為替レートとドイツ仲介機関の動向には注意を要するだろう。

セオドライト THEO 010B による FT 型磁気儀は、柿岡の次期標準磁気儀として現時点での唯一の選択肢である。本重点課題では、ドイツ専門職人にオーバーホールを発注するルートを開拓し、順次進めるプロセス（図 5）を軌道に乗せることができた。これは次世代の磁気儀の設計開発が実現するまでの橋渡しとして重要な成果と言える。現役として唯一残っている（ご高齢の）専門職人が受注を続けられる限り、当所保有の THEO 010B の修復を出来るだけ多く済ませることが望まれ、今後も可能な限りは Wenger 社へオーバーホールを発注したいところである。

表 4 令和 3 年度のオーバーホール実績を基準としたその後の実費の比率。

ドイツ分実費は決済時の為替レートを適用して円に換算してから算出。

	令和 4 年度	令和 5 年度
経費総額	114%	120%
実費 (Wenger 社)	96%	105%
実費 (ドイツ仲介機関)	151%	203%

最後に、昨年度の調査結果(成果 R4-2)を受けて、今年度はデンマーク国立宇宙局 (DTU Space) の 1 軸磁力計 Model G を購入することを付記しておく。海外の地磁気観測所では比較的広く FT 型磁気儀に使われている磁力計だが、当所では初めて購入する測器になる。上述のオーバーホールと同じ国内代理業者を通じ、1 台ではあるが、生産中止を目前にしての入手を実現した。次期標準磁気儀を構成する磁力計に適するか評価するため、DI-72 との定期的な比較観測を実施して精度や安定性などを調査することになる。

#### (成果 R5-2). 観測基線値の誤差の評価

観測基線値の誤差の評価に関する方法論の考察(成果 R4-3)では、偏角と伏角の観測基線値 ( $D_{\text{観}}$  と  $I_{\text{観}}$ ) とその不確かさの統計的推定には、0 次データとして得られる各観測量  $A_{\text{観}}$  (セオドライトの各姿勢での測角値) の

- 偶然誤差  $A_{\text{誤}}$
- 系統誤差  $A_{\text{オ}}$

に関する情報が求め必要であることを議論した。そこで今年度の調査では、THEO 010B による測角における  $A_{\text{誤}}$  や  $A_{\text{オ}}$  を推定するための統計データの取得を行った。もし  $A_{\text{誤}}$  や  $A_{\text{オ}}$  の確率密度分布に関する事前の知識があれば、これらをベイズ推定に直接適用することで、偏角と伏角の観測基線値 ( $D_{\text{観}}$  と  $I_{\text{観}}$ ) の事後密度分布を算出できる。(成果 R4-3) に示した不偏推定量を用いる手法 (図 8) と比べ、より多くの統計に基づき観測基線値の不確かさを評価できることになる。

また、水平分力と鉛直分力の観測基線値 ( $H_{\text{観}}$  と  $Z_{\text{観}}$ ) には、更なる不確かさ要因がある。これらを伏角の観測基線値  $I_{\text{観}}$  から算出するには、全磁力の観測基線値  $F_{\text{観}}$  を適用した全磁力連続観測が用いられるが、磁準（ゼロ磁場合わせ）の瞬間ににおける全磁力連続観測値は、観測施設構内の構造不均質に伴う「誘導の差」のため、絶対観測点における全磁力値を忠実に再現するとは限らない。そこで、全磁力の地点差（全磁力連続観測点-絶対観測点）を周波数解析により調査した。

#### ○セオドライトによる測角（方位角と高度角の測定）の不確かさ

セオドライト THEO 010B による測定の偶然誤差  $A_{\text{誤}}$  あるいは系統誤差  $A_{\text{オ}}$  についての統計データを収集するため、複数の職員により繰り返し測定を実施した。一般に、偏角測定には「①方位標を視準した際の方位角の測定」「②水平面内でのゼロ磁場方位角の測定」が行われる。また、伏角測定には「③磁気子午面内でのゼロ磁場高度角の測定」が行われる。以下に、①②③それぞれについての繰り返し測定の結果を示す。

「①方位標を視準した際の方位角の測定」の結果をヒストグラムに集計したものを図 11 に示す。個人によるバラツキ  $A_{\text{誤}}$  は標準誤差  $\sigma_A$  にして 1.7 秒角から 2.3 秒角であり、各々平均値に対しておよそ対照的な分布となっている。一方、観測者固有の癖などに起因する系統誤差  $A_{\text{オ}}$  は 2.9 秒角から 5.8 秒角に及ぶことが分かった。

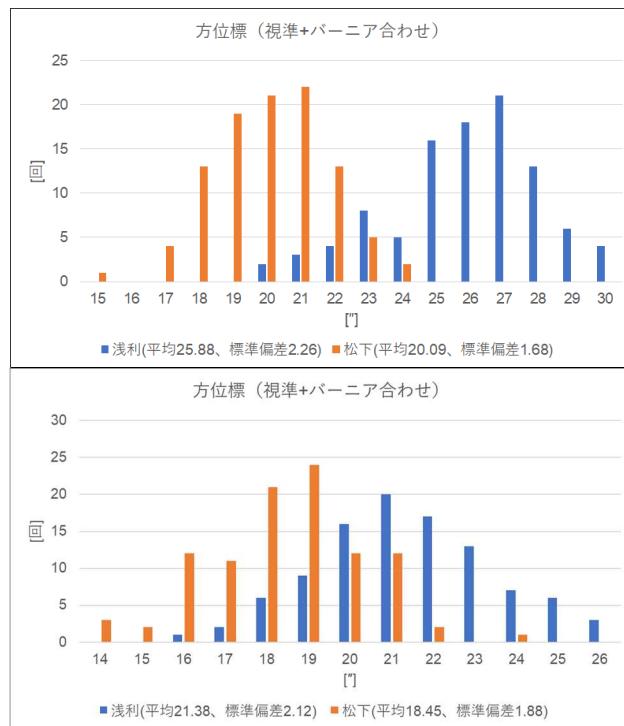


図 11 職員 2 名による「①方位標を視準した際の方位角の測定」の結果。上段が姿勢 L (正)、下段が姿勢 R (反)。横軸は秒角、縦軸は頻度。1名につき 1 視準 1 読定を 100 回試行した (観測地点：比較較正室W台、目標物：方位標「大穴」、測器：磁気儀 KAK No.3)。

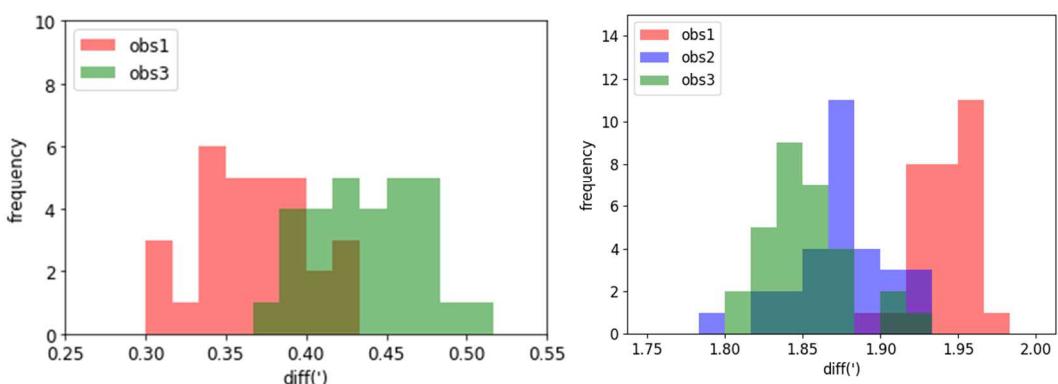


図 12 複数の職員による「②水平面内のゼロ磁場方位角の測定（姿勢 N-Up）」(左)と「③磁気子午面内のゼロ磁場高度角の測定（姿勢 W-Up）」(右)の結果。横軸は分角、縦軸は頻度。各々 1 磁準 1 読定を 30 回試行した (観測地点：比較較正室W台、目標物：方位標「大穴」、測器：磁気儀 KAK No.3)。②では望遠鏡の水平合わせ直しも含む。

図 12 は「②水平面内のゼロ磁場方位角の測定」と「③磁気子午面内のゼロ磁場高度角の測定」の結果をヒストグラムに表したものである。いずれの測定も、およそ中心に対

して対象な分布をしている。個人によるバラツキ  $A_A$  は、標準誤差  $\sigma_A$  にして①では 1.9 から 2.0 秒角、②では 1.1 から 1.8 秒角である。①の測定と同様に、観測者間の系統誤差  $A_A$  が顕著に見られ、②では 4.2 秒角、③では最大で 5.5 秒角であった。 $A_A$  が生じる原因の一つには、分度盤の対向目盛合わせ（図 10 下部の二重線合致調整）の個人差が考えられる。図 12 左は、それぞれ視力 1.5 と 0.01 未満である観測者 obs1 と obs3 が裸眼で実施したものである。表 5 は、obs1 と obs3（矯正視力 1.5）による再測定（姿勢 N-Up、N-Down、W-Up、W-Down を 10 回ずつ）である。水平面内での測定時に、分度盤の拡大像に視力による見え方の差が顕著であることが確認された（obs3 裸眼 - obs1 裸眼 :  $-5.5 \pm 1.4$  秒角、obs3 矯正 - obs1 裸眼 :  $+0.55 \pm 1.0$  秒角）。

表 5 視力矯正器具の有無による分度盤の見え方の違い。数値は各姿勢における磁準の際の方方位角（Declination 測定）または高度角（Inclination 測定）の秒角部分。

			obs3 裸眼 ["]	obs3 矯正 ["]	obs1 裸眼 ["]	obs3 裸眼 -obs1[""]	標準偏差 [""]	obs3 矯正 -obs1[""]	標準偏差 [""]
Declination	N	Up	20.7	26.75	26.2	-5.5	1.35	0.55	1.04
	N	Down	29.5	36.8	36.5	-7	1.33	0.3	0.67
Inclination	W	Up	29.4	27.2	28.9	0.5	1.72	-1.7	2.36
	W	Down	34.7	33.9	33.2	1.5	1.84	0.7	1.34

観測に伴う労力から、統計的に十分な試行回数に達したとは言えないが、以上のように得られた統計データは、THEO 010B による測角に伴う不確かさの傾向をある程度示すものである。方位角測定の標準誤差は、視準と磁準のどちらも 2 秒角程度であり、磁準における高度角測定の標準誤差はそれよりもやや小さい。これは、小池・大和田(2007)による報告（標準偏差：方位角 0.036 分角=2.2 秒角、高度角 0.026 分角=1.6 秒角）と類似する結果である。

同一の観測者（方位角および高度角における各測定は互いに無相関、標準誤差はそれぞれ 2.0 秒角と 1.8 秒角と仮定する）が当所の採用する測定回数（視準を 16 回、磁準を偏角と伏角で 10 回ずつ）で絶対観測を実施した場合、偏角と伏角の観測基線値の標準誤差はそれぞれ 0.7 秒角と 0.6 秒角となる。そこで、これらの推定を基準に、過去の業務における測定の精度について考察してみる。ここでは、鹿屋における絶対観測（2017 年 2 月から 2024 年 1 月まで）を例に挙げる。各回の絶対観測記録から

- A) 現行採用の算出手順により得られた観測基線値
- B) 手順の一部（各磁準の 2 読定目、偏角測定における磁準後の「レベルチェック（= 望遠鏡の水準ずれ補正）」）を省略して得られた観測基線値

をそれぞれ求め、A) と B) の差をヒストグラムに表したもの（図 13）を示す。その差の標準誤差は、偏角において 0.6 秒角であり、方位角測定のバラツキによる観測基線値の標準誤差 0.7 秒角と同程度かやや小さい。一方、伏角においては 0.2 秒角であり、高度角

測定のバラツキによる標準誤差 0.6 秒角より十分に小さい。各測定に伴う個人の測定誤差を考慮する場合、A)と B)の観測基線値の相違は有意なものとは言えない。従って、絶対観測の省力化のため、手順を B)のように省略しても差し支えないということになる。 A)と B)の観測基線値を時系列でプロットすると、両者の差は基線値そのもののバラツキに比べて明らかに小さいことがわかる（図 14）。

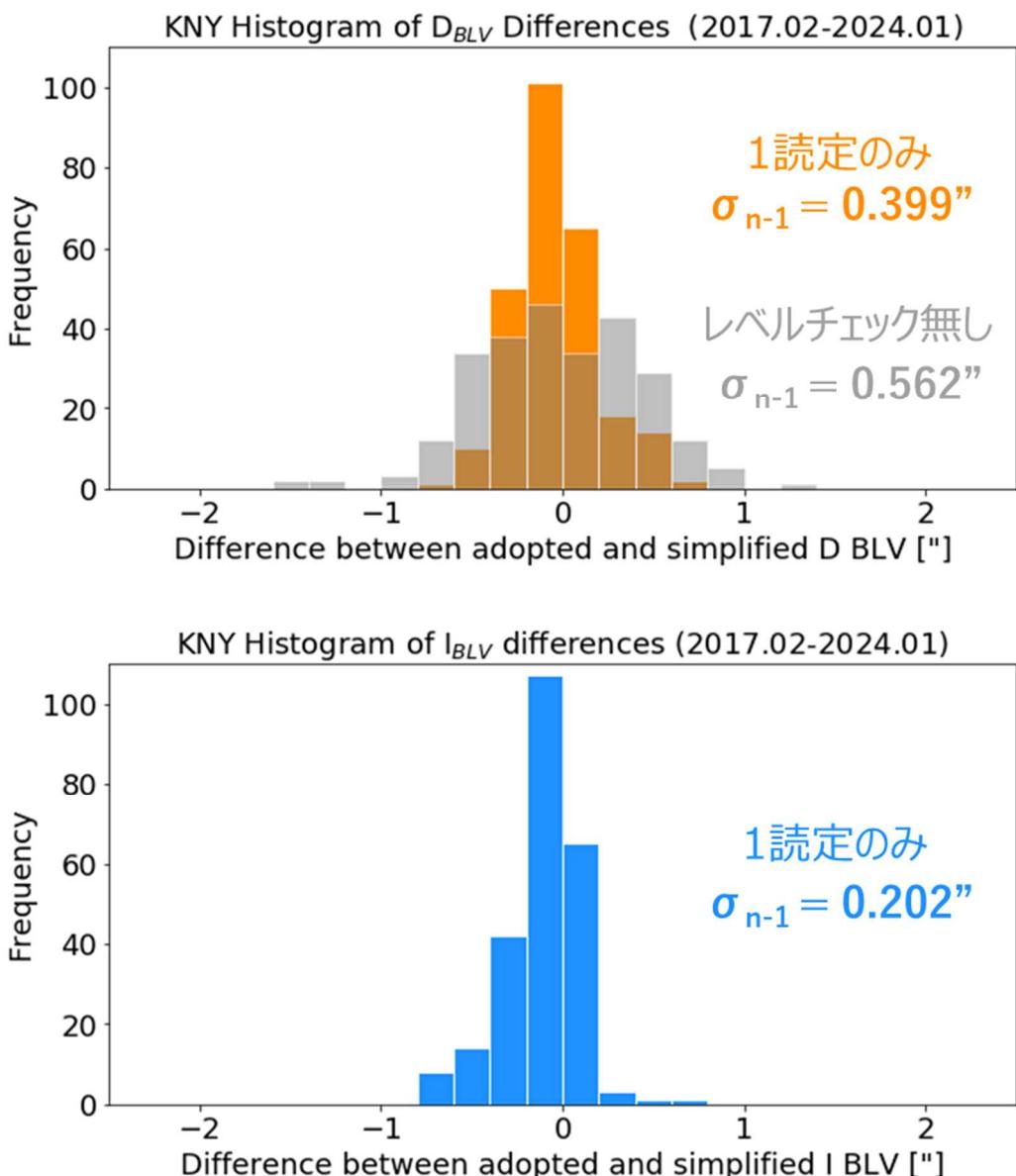


図 13 鹿屋の絶対観測記録（2017 年 2 月～2024 年 1 月）より A)正規の手順で得られる観測基線値と、B)各姿勢の第 1 読定のみ採用して得られる観測基線値の差分ヒストグラム（上段が偏角、下段が伏角、横軸は秒角、縦軸は頻度）。B)で磁準後のレベルチェックも省略して得られた結果を上段にグレーで示す。

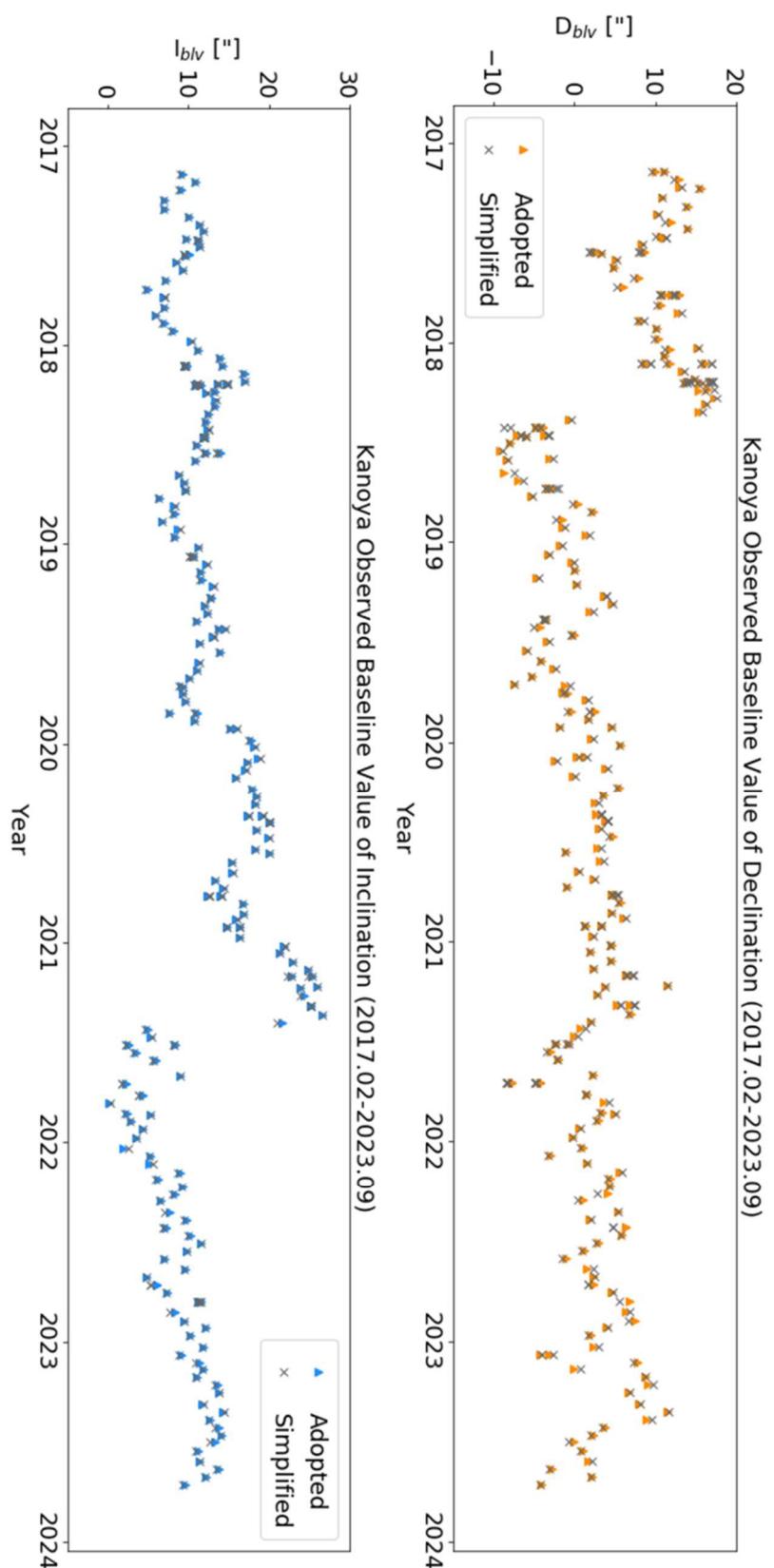


図 14 鹿屋の観測基線値 A) (カラー) と観測基線値 B) (グレー) の時系列プロット  
上段と下段はそれぞれ偏角と伏角

### ○絶対観測点における全磁力瞬間値の不確かさ

ここでは、全磁力連続観測点における定常観測の瞬間値と、絶対観測点における全磁力の瞬間値の間のバラツキについて調査する。後者のデータを取得するため、柿岡と女満別の絶対観測点のプロトン磁力計近傍（柿岡：60cm、女満別：2mほど）に臨時でオーバーハウザー磁力計 GSM-19 を設置して全磁力毎秒値を測定した。以下に、両地点の全磁力毎秒値を比較した結果を示す。

柿岡における2地点の全磁力毎秒値を時間領域で比較すると、その差のバラツキはほぼ0.2nT未満に収まっていることがわかる（図15）。また、両者の間の伝達関数（帯域0.01~0.5Hz）には、有意な振幅および位相特性は見られない（図16）。0.1Hz付近にて、絶対観測地点に僅か（10から20°程）な位相遅れの傾向が見られるが原因は不明である（DI-72の伝導性の影響による可能性もある）。柿岡においては、全磁力瞬間値の地点差の標準誤差は0.1nT未満であり、絶対観測点における全磁力瞬間値のバラツキは観測基線値の誤差の主要因とはならない。

一方、女満別に対する同様の観測と解析の結果を図17と図18に示す。2地点の全磁力毎秒値を時間領域で比較すると、柿岡と同様にその差のバラツキはほぼ0.2nT未満に収まっている。また、伝達関数においては、0.2Hzより高周波側の帯域で、僅かに絶対観測点の振幅が小さくなる傾向はある（0.8~0.9）ものの、有意な振幅および位相特性があるとは言えない。女満別構内には土壤の不均質があると報告されているが、柿岡と同様に、全磁力の地点差のバラツキは観測基線値の誤差の主要因とはならないだろう。

ただし、本調査での柿岡と女満別における臨時観測は、いずれも地磁気活動が静穏な期間に実施されたため、擾乱日の臨時観測を使った解析と評価も望まれる。

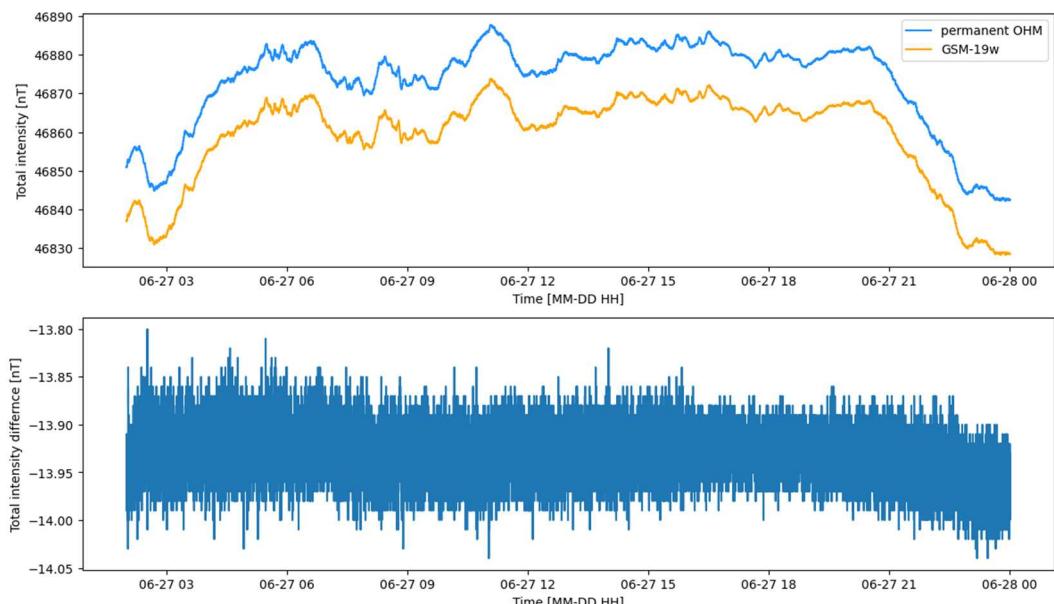


図15 柿岡における絶対観測点近傍（上段オレンジ）と連続観測点（上段青）における全磁力毎秒値とその差（下段）。2023年6月27日UTの臨時観測データを使用。

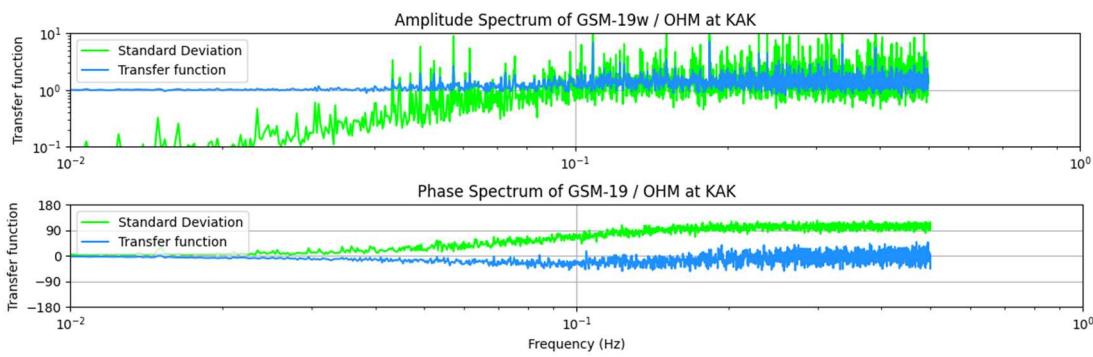


図 16 柿岡における全磁力毎秒値の伝達関数（絶対観測点近傍の臨時観測に対する連続観測点の定常観測）。上段と下段はそれぞれ振幅特性と位相特性（青）。

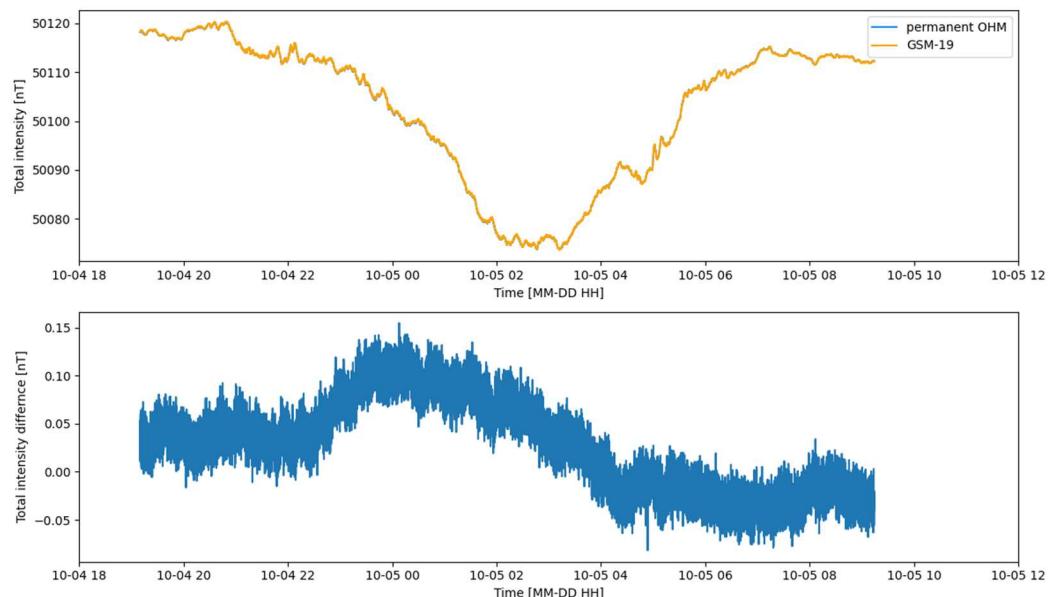


図 17 女満別における絶対観測点近傍（上段オレンジ）と連続観測点（上段青）における全磁力毎秒値とその差（下段）。2023 年 10 月 4~5 日 UT の臨時観測データを使用。

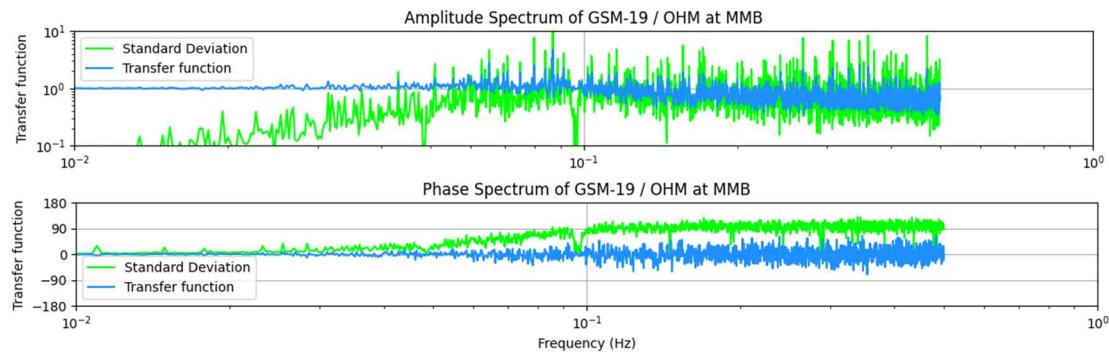


図 18 女満別における全磁力毎秒値の伝達関数（絶対観測点近傍の臨時観測に対する連続観測点の定常観測）。上段と下段はそれぞれ振幅特性と位相特性（青）。

### (成果 R 5・3). 現標準磁気儀 DI-72 の状態診断

柿岡の定常業務として行われる絶対観測は、現行の標準磁気儀である DI-72 を用いて週に 1 回行われており、近年では観測基準に満たない測定結果を得るなどして再観測の頻度がやや高まっている。その原因については定かではないが、可能性としては老朽化に起因する観測精度の経年的な低下も疑われる。そこで本調査では、佐野（要報 Vol16 1975）を参考として、近年の定常観測の結果から DI-72 固有の器械誤差を算出し、その健康状態に経年的な変化があるかどうか評価した。

DI-72 の絶対観測では、一人の観測者につき 4 個の観測基線値を得る。1 個の観測基線値は、偏角と伏角を 4 回の測定

- ① E (補償コイル=正) - R (サーチコイル=右回し)
- ② E (補償コイル=正) - L (サーチコイル=左回し)
- ③ W (補償コイル=反) - R (サーチコイル=右回し)
- ④ W (補償コイル=反) - L (サーチコイル・左回し)

した結果から算出される。ここで E と W は、一般的なセオドライトと同様に、測器本体を鉛直回転軸に関して反転した姿勢である。さらに、DI-72 には、補償コイルとサーチコイルの軸自身をそれぞれ反転（補償コイル Up-Down、サーチコイル 0°-180°）させられる機構が備わっている。それらを組み合わせた 4 種の姿勢は、4 個の観測基線値の独立な算出を可能にするだけでなく、不完全なコリメーションに起因する系統誤差を相殺する。最終的には、それらの平均値をもって 1 つの観測基線値を得る。

一般にセオドライトの完璧なる軸調整は現実的ではなく、DI-72 においても例外ではない。また軸の状態は時間と共に変化するため、FT 型磁気儀に使われる Zeiss の THEO 010 では、定期的にオーバーホールを行って調整している。前述の通り、器械誤差は正反の測定値を平均することで軽減されるが、セオドライトの状態診断には有用であるため、その各種誤差（の時間変化）は把握しておくとよい。器械誤差は正反の測定値の差を取ることで得られる。

DI-72 の場合、器械誤差は「補償コイルが作る一様磁場方向の軸」に対する 3 軸（本体鉛直回転軸 E-W、補償コイル水平回転軸 Up-Down、サーチコイル水平反転軸 0°-180°）の不完全な直交性に由来する。これらは通常のルーチン観測による測定結果から算出することができる。また、サーチコイル回転軸も考慮に入れると、「サーチコイルのオリエンテーション誤差角」（佐野・小池, 1975）も器械誤差の一つと見なせるが、ここでは調査の対象外とする。同一姿勢での右回しと左回しの差についても、セオドライトの器械誤差に関する状態診断とは趣旨が異なるので、やはり調査の対象外とする。

近年（2017-2022）の DI-72 によるルーチン絶対観測から得られた測定結果を用いて算出した器械誤差を図 19 に示す。Up-Down および 0°-180° についての器械誤差は、水平角と高度角の両成分において共におよそ 1 秒角以内に収まっている。佐野(1975)を参照すると、DI-72 運用開始当初からまもない時期の報告でも同様であり、50 年を経ても変わらな

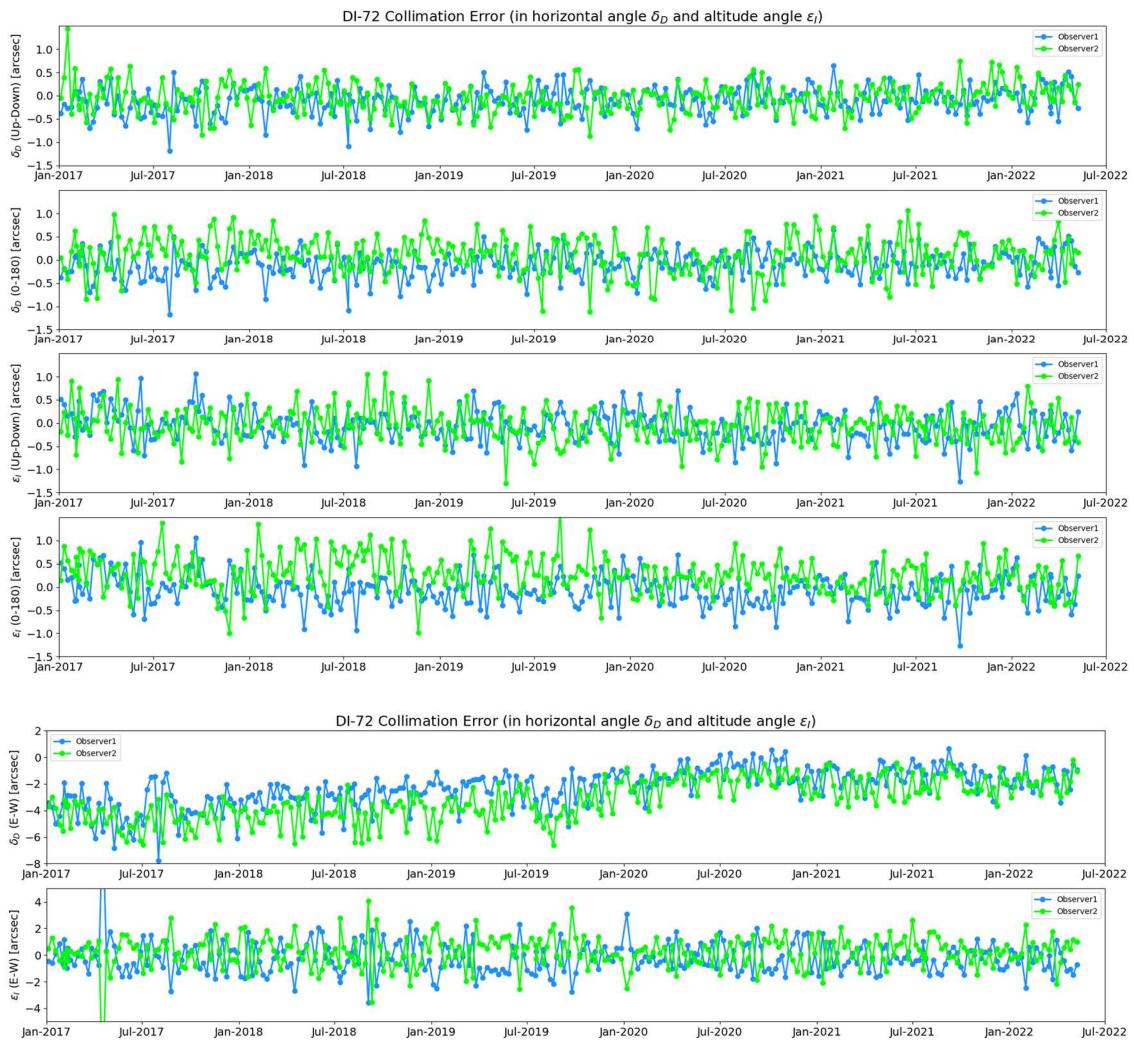


図 19 DI-72 機械誤差（水平角  $\delta$  と高度角  $\varepsilon$  の 2 成分）の推移（2017 年 1 月～2022 年 5 月）。上から Up-Down（水平角  $\delta$ ）、 $0^\circ$ - $180^\circ$ （水平角  $\delta$ ）、Up-Down（高度角  $\varepsilon$ ）、 $0^\circ$ - $180^\circ$ （高度角  $\varepsilon$ ）、E-W（水平角  $\delta$ ）、E-W（高度角  $\varepsilon$ ）。

い状態と機械的動作を維持できていることがわかる。一方、E-W に関する器械誤差については、測定毎のばらつきが目立つ。その高度角成分については 0 秒角を中心として推移している一方、水平角成分については明らかに数秒角ほどの系統的な偏差がある。即ち、E-W の姿勢反転に伴い、補償コイル一様磁場軸が水平方向に数秒角ほどずれるということである。佐野(1975)は同様の報告をしていることから、これは運用開始当初からのクセであろう。さらに本調査からは、E-W 器械誤差の水平角成分が、2017 年から 2022 年にかけて 2 秒角ほどゆっくり変化したことも新たに判明した。

今回の調査では、DI-72 の 3 軸の相対的な位置関係に限るが、半世紀前の開発当初から劣化したことを見た結果は得られなかった。むしろそれほどの年月を経て老朽化の進行が

想定される中で、その精緻な作り込みを驚くべき程に維持していることがわかった。唯一、数秒角ほどである E-W 器械誤差の水平角成分が、1 秒角以内である他の誤差よりも目立つて大きいが、それも当初と変わっておらず、観測に支障をきたすほどではない。また E-W 器械誤差の水平角成分に見られた緩慢な経年変化も、30 秒角ほどの振幅で年周変化する FT 型磁気儀の 1 軸磁力計センサ軸誤差に比べれば微々たるものである。今回の調査による DI-72 の健康診断は「良好」と言えるものであった。経的な状態の変化だけでなく、急変も検知するため、今後も継続的に器械誤差を確認することが望ましい。

#### (成果 R5・4). セオドライトの検定方法の習得

前出の(成果 R5-3)では、DI-72 の器械誤差をルーチン観測の記録から評価したが、FT 型磁気儀に用いるセオドライト THEO 010 についても、その固有の状態を定期的に診断しておきたい。可搬型セオドライトの器械誤差を厳密に測定するには、コリメーターと呼ばれる装置が用いられる。国土地理院は、本院内にコリメーターを保有しており、独自の測量機器検定基準に従いセオドライトの等級を認定している。例えば、THEO 010 は 1 級セオドライトとして登録されている。国土地理院の測量機器検定基準は多数の判定項目から成るが、ここではそのうちの視準軸の水平角コリメーションに注目する。以下は 1 級セオドライトの要件である。

コリメーターの 3 方位 (W,N,E) に設置された無限遠目標を視準する対回観測（1 視準 1 読定）を 3 回実施（各回で水平目盛盤を  $60^\circ$  ずつ回転）するのを 1 セットとし、複数セットのうちいずれかで  
倍角差 …  $10''$  以内  
観測差 …  $5''$  以内  
であり、かつ、セット間較差が  $3''$  以内であること。

本調査では、当所が保有する THEO 010 に対し、上記 1 級セオドライト要件に準じた評価を独自に行うこと目標と定める。その手法を検討するため

① 国土地理院でコリメーターを使ったセオドライト検定方法について研修を受講する  
② 修得した検定方法に準ずる方法を考案し、当所内でも実践できるか調査する

を順次実行した。①については、国土地理院測地部物理測地課によるご厚意とご協力により実現した。ご提供頂いた半日の研修では、本調査担当者 4 名が当所の 2 台の THEO 010 を持参し、上記基準に関するセオドライト検定の実技（測定者と記録者の手順）を習得した。②については、当所がコリメーターを持たないことから、構内の複数の構造物などを目標物として代用することとした。

評価対象の THEO 010 を設置する観測点と、視準する目標物 3 カ所の位置を図 20 に示す。測定は計 6 名の職員により、国土地理院の検定手順に従った測定を 3 セットずつ 2 日間に分けて実施した（通常は同一の観測者が全セットの観測を行う）。その結果、1 級セオ

ドライトの要件を満たす結果は得られなかつたが、倍角差、観測差、セット間較差それぞれについては、要件を満たすものも認められた（表 6）。

屋外での三脚を用いて、適当な構造物を目標とした今回の測定は、国土地理院の屋内コリメーターを用いた測定と同等の精度は到底見込めない。それでも 1 級セオドライトの基準を参考として、独自のセオドライト評価の状態の評価もある程度は実施可能であることは確認された。測定の手間は生じるが、1 級セオドライトの基準に劣るセオドライトの特定には有用であり、オーバーホールを実施するセオドライトの優先度を判断する客観的な材料にはなるだろう。



図 20 セオドライト THEO 010 (●) と目標物 (×) の位置

表 6 THEO 010B (旧海保) による本調査独自のセオドライト検定の結果。  
赤字は国土地理院の 1 級セオドライトの要件を満たす。セット間較差は最小のもの。

日付	観測者	倍角差["]	観測差["]	セット間較差["]
2024/1/10	A	5	17	
2024/1/10	B	19	16	5
2024/1/10	C	5	4	
2024/1/17	D	38	17	
2024/1/17	E	10	9	2
2024/1/17	F	13	7	

## 参照文献

- 佐野幸三. (1975). KASMMER システムによる地磁気観測精度について. 地磁気観測所要報 第 16 卷 第 02 号, p.121
- 小池捷春・大和田毅. (2007). Accuracy of Geomagnetic Absolute Observation caused by Azimuth Mark Reading, 地磁気観測所テクニカルレポート 別冊 第 05 卷, p.1
- 佐野幸三・小池捷春. (1975). DI-72 磁気儀サーチコイルのオリエンテーション誤差角について, 地磁気観測所技術報告 第 15 卷 第 03,04 号, p.27

[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3～6年度）

[担当者]：○仰木 淳平、稻村 友臣、平原 秀行、山際 龍太郎（観測課）

屋良 朝之、浅利 晴紀（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）を得るために、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ます、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す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] :

最終的な目標は、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に登録することである。計画期間（～令和 6 年度）での目標は絶対値化したデータの公開と精度の把握とし、その後、観測環境等を整え、数年以内にインターマグネット毎秒観測所への登録を目指す。絶対値化の課題は以下の 2 点である。

- ・基線値の補間方法の検討
- ・統計接続可能な年平均値の算出方法の検討
- ・最適なデータ編集システムの作成

JARE65（昭和基地滞在：2023 年 12 月～2025 年 2 月）における当所からの越冬隊員の昭和基地滞在中に、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 3 年度：(実施済み)

1. 高頻度の絶対観測（弱磁場方式）
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
3. 每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：(実施済み)

1. 通年の毎秒値の絶対値化の試行
2. 基線値の補間方法の検討
3. 絶対観測の頻度が基線値に与える影響の調査
4. 每秒絶対値からの年平均値の算出方法の検討（年平均値の統計接続）

#### 令和 5 年度：(計画)

1. 測器の状態の把握
2. データ編集方法（基線値の補間方法、年平均値の算出方法等）の決定
3. データ編集システムの作成
4. GNSS 真方位角測定
5. 観測環境および人工擾乱の把握のための磁気測量（定点・歩行）

#### 令和 6 年度：(計画)

1. 調査結果（絶対値化の方法と統計接続）について南極資料へ投稿
2. 現業システムの作成
3. 観測精度向上のための観測システムの改善

#### 4. 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

#### 5. 個々の車両の磁気モーメントの測定

##### 長期的なロードマップ

項目/行事	2023年度		2024年度	2025年度	2026年度	2027年度
	本研究計画				次期研究計画	
絶対値化	システム設計	システム構築	★絶対値化(2025年1月～)			
インターマグネット登録		精度向上策の検討	精度向上策の実施	☆申請？	☆申請？	
過去データの絶対値化				過去に遡って絶対値化 (2024年→1980年頃)		
柿岡からの越冬隊員派遣		J65屋良		? J67 ?		
INTERMAGNET meeting	●	●	●	●		●
IAGAワークショップ	@ハンガリー	@ブラジル		@(柿岡)		

[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 5 項目である。

1. 全磁力磁気測量を用いた観測環境調査
2. 全磁力繰り返し観測を用いた新規建造物の影響調査
3. オーバーハウザー磁力計のノイズ調査
4. GNSS 測位を用いた方位標の真方位観測
5. 連続観測値の絶対値化システムの構築

以下では、それぞれの項目について報告する。

##### 1. 全磁力磁気測量を用いた観測環境調査

昭和基地のある東オングル島全体、地磁気観測施設近傍および参照点候補地の観測環境を調査するため、携帯型オーバーハウザー磁力計 GSM-19W を使用し、全磁力磁気測量を行った。この磁力計は 1Hz サンプリングで位置情報と全磁力値を測定しながら歩くことができ、全磁力の面的な分布を測定するのに適している。今回はセンサ高約 215cm で測定した。測定の様子を図 1、それぞれの領域での測定結果（速報値）を図 2~4 に示す。測定中の磁場の自然変動の影響を取り除くため、図中の全磁力値は GSM-19W の測定値から地磁気観測施設で連続観測しているオーバーハウザー磁力計 GSM-90 の測定値を引いている（GSM-19W-GSM-90）。データは未精査で測定エラーや作業ノイズ等の除去はしていない。



図1 徒歩での全磁力磁気測量

1-1. 東オングル島全体（測定日：2024年1月6, 10, 29, 30日）

島の東半分は概ね地磁気観測施設と同程度の全磁力であり、磁気勾配が小さい。島中央部から西側は南北方向の帶状に全磁力が小さい領域、大きい領域、小さい領域と分布し、変化が大きい。これは仁木・他(1981)や有田・他(2013)によるこれまでの測定と調和的である。

今回はこれまでと異なり線状に連続的な観測ができたが、地形や基地施設の配置により測線が歪になってしまった。今後は事前に測線の検討を行い、できるだけ均一な測線で観測できるように改善を図る。

1-2. 地磁気観測施設近傍（測定日：2024年1月6日）

地磁気変化計室（地磁気絶対観測点）を中心に約100m四方の領域を5m程度の格子間隔で観測した。絶対観測点（図3中の☆）、フラックスゲート磁力計センサ（図3中の[FM]）、オーバーハウザー磁力計センサ（図3中の[OH]）の付近では磁気勾配が小さく、地磁気観測に適していることが確認できた。絶対観測点の東約40mの磁気異常はアンテナの鉄塔によるものであり、絶対観測点への影響は小さいと予想されるが、今後データを精査する。現在のフラックスゲート磁力計のセンサ庫は夏期の傾斜変動や水没等の問題があり、移設を検討している。今回の磁気測量の情報は移設先の地点選定に有用である。

1-3. 参照点候補地（測定日：2023年12月30, 31日）

今後、昭和基地の主要部（地磁気観測施設の北西～北東の距離約200m）では大型の建物の建設や解体が予定されている。その影響を把握するため、参照点を基地主要部から十分に離れた場所に設置することが望ましい。仁木・他(1981)や有田・他(2013)から第1HFレーダーサイトの南東側は磁気勾配が小さいことが分かっており、また、各施設から十分離れていることから、ここを参照点候補地として約300m四方の領域を20m程度の格子間隔で観測した。じやがいも池の南側は広範囲にわたり磁気勾配が小さく、参照点として適していることが確認できた。今後は冬期の積雪状況やHFレーダーとの干渉について調査する予定である。



図2 徒歩での全磁力磁気測量結果（東オングル島全体）

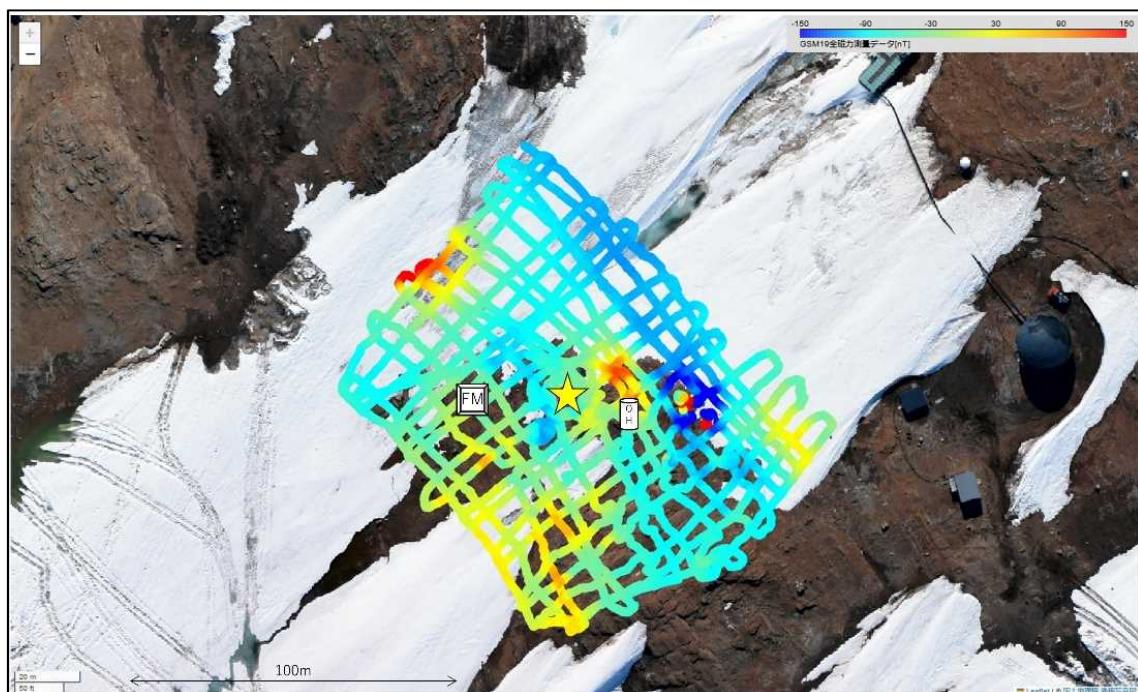


図3 徒歩での全磁力磁気測量結果（地磁気観測施設近傍）

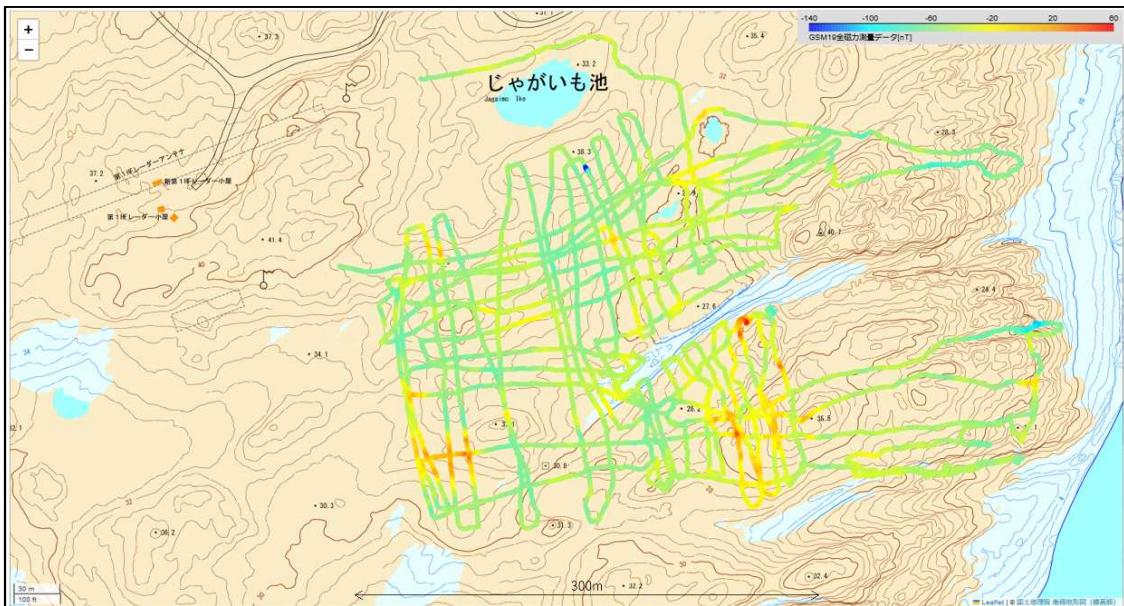


図4 徒歩での全磁力磁気測量結果（参照点候補地）

## 2. 全磁力繰り返し観測を用いた新規建造物の影響調査

2023年12月から2026年2月にかけて地磁気観測施設の北北西約250m(図5中の赤四角)に新しく夏期隊員宿舎(以下、新夏宿)の建設が予定されており、それによる地磁気観測への影響が危惧されたので、全磁力繰り返し観測を用いて影響量を調査した。地磁気観測に影響を及ぼす鉄材の設置は2023年12月から2024年2月に集中しており、その鉄材量は約46tonである。

昭和基地では地磁気観測環境の監視のために、9点の環境監視点(図5中の●)を設定し、毎年その場所で夏期間の前後(12月前半頃と2月後半頃)に全磁力繰り返し観測を行い、磁気的な環境の変化を把握している。新夏宿の影響調査では、その9点以外に地磁気観測施設と新夏宿を結ぶ延長線上に5点の臨時観測点(図5中の■)を設けて10日程度の間隔で全磁力繰り返し観測を行った。

繰り返し観測の結果を図6に示す。工事期間の前後で大きく変化したのは、新夏宿に最も近い臨時点①だけであり、約5nTだった。その変化は2月下旬の観測では半分程度戻っていたが、これは建築作業に使われて新夏宿付近に駐車していた16t ラフテレンクレーンを撤去したためだと考えられる。新夏宿そのものによる影響は、臨時点①で約3nTだった。他の観測点ではほとんど変化が見られなかったことから、地磁気観測施設への大きな影響はなかったと判断した。なお、簡易的に鉄材の影響量を見積もある方法であるBreiner(1973)の $1\text{ton} \cdot 40\text{m} \cdot 1\text{nT}$ の関係を使うと、臨時点①への影響は約6nT、地磁気施設への影響は約0.2nTとなり、臨時点①の実測値約3nTを考慮すると、地磁気観測施設への影響量は0.1nT程度と推測できる。今後は繰り返し観測データの精査を行い、この影響量の妥当性を確かめる。



図 5 新夏宿と環境監視点の配置図



図 6 全磁力繰り返し観測の結果

### 3. オーバーハウザー磁力計のノイズ調査

2023年2月にオーバーハウザー磁力計（GEM社製 GSM-90）を導入し、全磁力の連続観測（1Hzサンプリング）を開始した。しかし、その後の観測データからノイズレベルが高いことが示唆されたため、ノイズレベルの確認と原因の調査を行った。

ノイズレベルを調べるためにGSM-90の毎秒値の前後差dFを計算したところ、dFの標準偏差が1nT程度であり、通常のGSM-90と比べると10倍以上大きいことが確認できた。毎秒の測定毎に記録されるシグナルクオリティは、基本的に良好を示す99だったが、時折それに満たない数値（89や29等）を示した。電源をAC100Vで運用していたので、電源からのノイズ混入を疑い、AC100Vとバックアップバッテリ（DC12V）を10分間ごとに切り替えて比較したが、違いは見られず（図7）、電源ノイズは原因でないことが分かった。

第65次隊夏期間（2023年12月～2024年1月）に徒歩での全磁力磁気測量用に別のオーバーハウザー磁力計GSM-19Wを持ち込んだので、それをGSM-90の近く（北に約5m）に設置し測定値を直接比較することで、ノイズがセンサ周辺の外的要因によるものかを調査した。GSM-90の前後差dFの標準偏差が1.8nTだったのに対し、GSM-19Wは0.04nTであり、センサ周辺の外的要因ではないことが分かった（図8）。

オーバーハウザー磁力計はセンサの近くに（非磁性でも）金属があるとシグナルクオリティが低下する。昭和基地ではブリザードや強い紫外線から守るためにセンサをアルミ製の台座と塩化ビニール製の覆いで囲っており（図9）、アルミ製の台座による影響の可能性があった。そのため台座から外して50cm程度離して測定したところ、毎秒値の前後差dFの標準偏差が大幅に小さくなり、シグナルクオリティの改善も確認できた（図10）。

このことからノイズレベルが高いことの主な原因是アルミ製の台座による影響と考えられるため、今後は台座の改善方法を探り、ノイズレベルを下げる予定である。

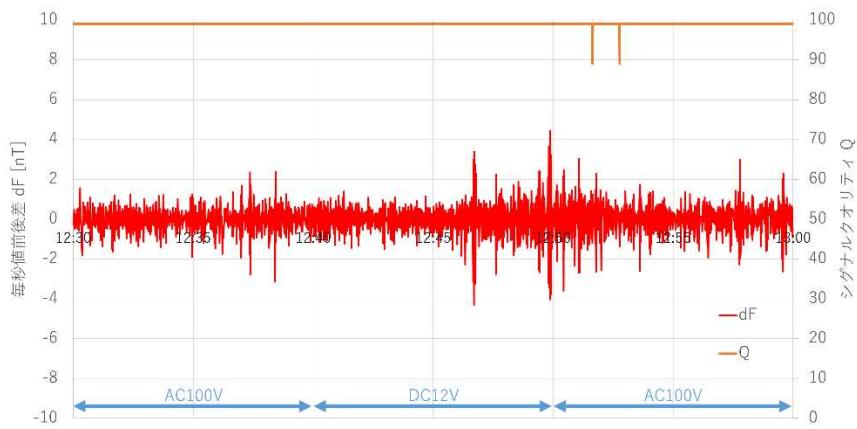


図 7 電源の違いによる GSM-90 (赤線) のノイズレベル (毎秒値前後差) の比較 (2023 年 5 月 5 日)

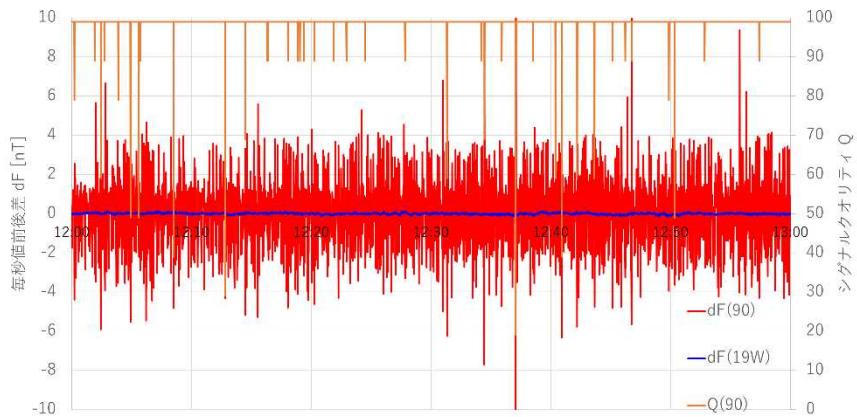


図 8 GSM-90 (赤線) と GSM-19W (青線) のノイズレベル (毎秒値前後差) の比較 (2024 年 1 月 21 日)



図 9 オーバーハウザー磁力計のアルミ製センサポールと塩化ビニール製センサカバー (左)、センサカバーを取り外した状態 (右)

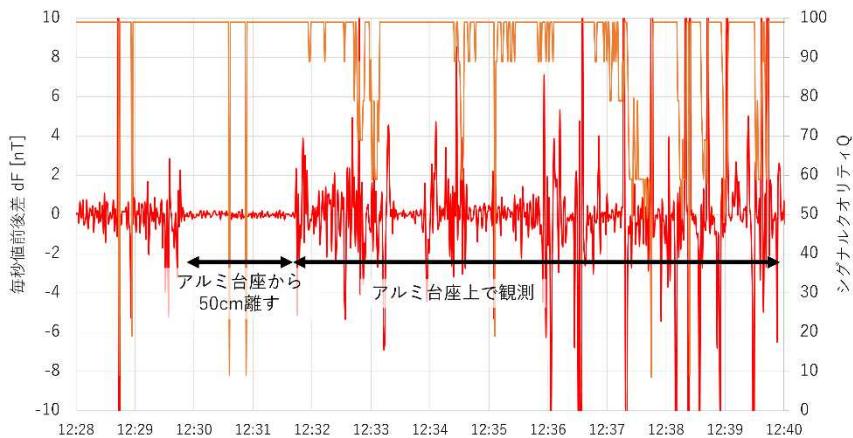


図 10 センサのアルミ製台座との距離によるノイズレベル（毎秒値前後差）の比較（2024年3月8日）

#### 4. GNSS 検位を用いた方位標の真方位観測

偏角成分の絶対観測の基準となる方位標の真方位角（地理的北からの角度）は、第 10 次隊が実施した天測（太陽）で得た値を使用している。その後、第 41 次隊、第 48 次隊、第 50 次隊、第 54 次隊で GNSS を使い、第 56 次隊では天測（星）を使用して真方位観測を行ったところ、採用値（第 10 次隊 :  $46^{\circ} 28.2'$ ）と  $1'$  程度の違いが確認された。真方位角の更新とその後の定期的な確認のため、精度が高く実施の容易な測定方法として、GNSS 精密測位およびトータルステーションを利用した真方位角の測定（国土地理院協力）を第 63 次隊の夏期間で行った。測定方法としては第 63 次隊で確立できたが、トータルステーションの動作が不安定だったため、2024 年 1 月 17 日に第 65 次隊の夏作業で同様の真方位観測を行った（図 11）。GNSS 検位の計算は第 65 次隊の帰国後に行われるため、真方位の算出は 2024 年 7 月頃になる予定である。



図 11 精密測位のための GNSS アンテナの設置（協力：国土地理院）

## 5. 連続観測値の絶対値化システムの構築

フラックスゲート磁力計で測定した連続観測値を絶対観測の結果で較正して絶対値にするシステムを構築中である。基線値の計算と連続観測値への基線値の適用は、ひとまず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。今年度は絶対観測の結果を xMagpy に入力するための Excel マクロを作成した。

また、昭和基地の夏期に発生するフラックスゲート磁力計センサの急激な傾斜変動に対応するために、独自の B-スプライン補間法の検討を行った。ギャップ状の傾斜変動の表現のため、仮想的な観測基線値としてシグモイド関数にガウシアンノイズを乗せたものを用意した。この観測基線値を 3 次 B-スpline でフィッティングすると、節点を等間隔に設定した場合、ステップ状の変化のところでオーバーシュートが見られ、不要な振動が発生する（図 12 左）。節点をギャップ上の変化のところに集めてフィッティングするとこの振動を抑えることができた（図 12 右）。実際の運用では、フラックスゲート磁力計センサに取り付けていた傾斜計データをもとに地磁気データを補正することでギャップ状の傾斜変動の影響を取り除くが、傾斜計を付ける前（2020 年以前）のデータを遡って絶対値化するときには、今回調査した手法でギャップ状の変化の処理を行うことができるかもしれない。

今後は絶対値化システムの全体の調整とともに個々の部分についての最適化も併せて行う予定である。

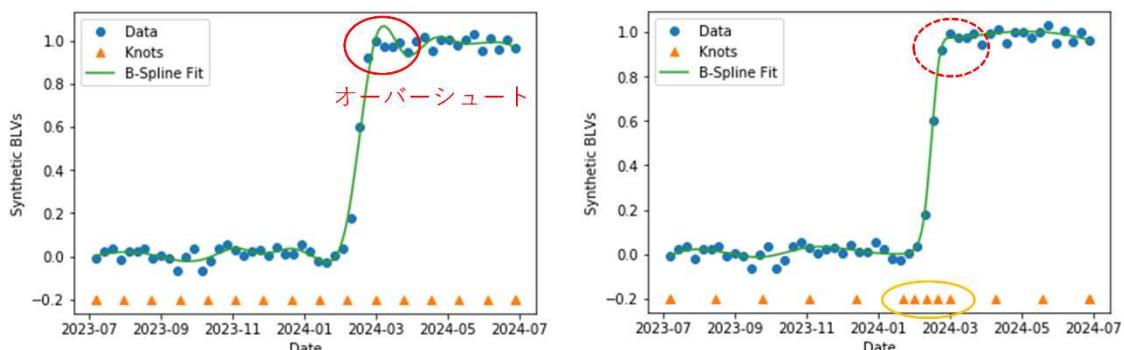


図 12 3 次 B-スpline フィッティングでの節点（図中▲）間隔調整の効果

## 6. 今年度のまとめと今後の方針

予定していた連続観測値の絶対値化システムの詳細を決めてシステムの構築を完了するところまで行かなかったため、来年度は早々にその部分を完成させる。第 65 次隊で地磁気観測所の職員を越冬隊員（昭和基地滞在：2023 年 12 月～2025 年 1 月）として派遣できることにより、通常の隊では困難な詳細な現地調査や機器の調整を進めることができており、来年度も引き続き現地での作業を精力的に行う。

[引用文献] :

仁木国雄, 芳野赳夫, 福西浩, 昭和基地周辺の地磁気全磁力分布, 南極資料, 71, 64-75, 1981  
有田真, 高橋幸祐, 源泰拓, 門倉昭, 東オングル島における地磁気測量—新規に建築された

施設による地磁気観測への影響の検証—, 南極資料, 57 (1), 151-161, 2013

Breiner, S., Applications manual for portable magnetometers. Sunnyvale, Calif,  
GeoMetrics, 42-44, 1973

[成果の発表] :

仰木淳平, 稲村友臣, 浅利晴紀, 山際龍太郎, 平原秀行, 有田真, 屋良朝之, 西田重晴, 門倉  
昭, A renovation project of magnetic observation facilities and data processing at  
Syowa Station, Antarctica, 第 19 回 IAGA 国際観測ワークショップ, 2023 年 5 月

[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<sup>\*1</sup>。ハンドスケーリングには、読み取りに手間がかかること、観測者の主觀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<sup>\*2, \*3</sup> 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<sup>\*4</sup>。

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つ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、H 成分の  $K\leq 5$  の判定においては勾配ブースティング決定木アルゴリズムなどを用いることで 90% 程度の正答率が得られた<sup>\*5</sup>。引き続き、小さい K 指数の判定においても従来の計算機判定手法を超える正答率を目指すとともに、ユーザー自身が与えなければならない（学習対象ではない）ハイパーパラメータの適切な設定方法の検討を行う。

[工程表] :

- 1.機械学習では学習対象ではないハイパーパラメータの探索方法の検討。
- 2.K=4,3,2 程度における最適なアルゴリズムの検討
- 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 K=4 以下の判定を、昨年までに抽出した peak to peak 振幅や太陽天頂角などの 11 種類の特徴量に 3 次関数 Fitting からの較差を加えた 12 種類の特徴量を用いて、1989 年～2019 年の 30 年間のデータにつ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判定を行った。ハイパーパラメータの探索には k=4 の k cross validation 法を用いた。結果を表 1 に示す。

表 1 : H 成分の判定結果

		予測値										正答率 (%)
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
確定値	0	3295	683	11								82.6
	1	538	3585	612	8							75.6
	2	9	556	3510	295	4						80.3
	3		10	388	2363	121	1					82.0
	4			6	119	968	29					86.3
	5				1	28	281	10				87.8
	6					1	5	63	1			90.0
	7								14	1		93.3
	8									4		100
	9											
正答率(%)		85.8	74.2	77.5	84.8	86.3	88.9	86.3	93.3	80.0		

総合正答率				
-2 違い	-1 違い	一致	+1 違い	+2 違い
0.2%	9.3%	80.4%	10.0%	0.1%

総合正答率において 80%を超える高い正答率を得ることができた。これは熟練した観測者同士の読み取り値の一致率<sup>\*1</sup>に匹敵する精度である。しかし、個別の K 指数の正答率でみると、K=1、2 で他よりも正答率が低くなっている。この部分の正答率を高めるべく、毎秒値の利用やル回帰（SVR）や畳み込みニューラルネットワーク（CNN）を用いた特徴量を新たに加えるなどの改良を行ったが、これ以上の正答率向上には繋がらなかった。

H 成分では K=1,2 に若干の弱さがあるものの、全体としては人間のハンドスケーリングによる読み取りと遜色のない判定が可能になった。今後は D 成分においても同様の精度が得られる機械学習モデルを構築していきたい。

なお、今年度は情報システム研究機構・データサイエンス共同利用基盤施設（ROIS-DS）の公募型共同研究「ROIS-DS-JOINT 2023-2」に採択されたことを受け（課題名：即時情報活用のための地磁気短周期変化自動判別システムの開発）、一部の作業は外部のデータサイエンティストの協力のもの行った。

[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 卷第 1,2 号, 1-9, 2015

\*5 令和 4 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] : 松代地震観測所における地磁気観測

[担当者] : 平原秀行 (観測課)

[概要] :

地磁気変化観測に用いるフラックスゲート磁力計は、温度変化や傾斜変化による計測値変動があり、柿岡では 1 週間に 1 回程度の絶対観測で絶対値を求め、観測値の補正を行っている。

松代地震観測所の大坑道内にある地震計室は、温度変化や傾斜変化が極めて小さく、こうした環境での地磁気変化観測は、計測値の安定性が高いと推測され、絶対観測の間隔を広げられる可能性がある。

昨年度は松代地震観測所の予備調査を行い、大坑道の地震計室内にフラックスゲート磁力計を設置した。今年度は、フラックスゲート磁力計の観測を引き続き行い、観測データの安定性を解析する。

[具体的な計画と達成目標] :

1. 昨年度大坑道に設置したフラックスゲート磁力計の観測を引き続き行う。
2. 4 月下旬から 5 月下旬にかけてデータの回収および全磁力観測装置の設置を行う。
3. 7 月にすべての機器の撤収を行う。
4. 傾斜変化および温度変化が小さい地下坑道での地磁気観測の安定性を解析する。

[本年度の成果] :

#### 1. 地磁気観測

2023 年 5 月 30 日、31 日に 1 回目の出張を行い、フラックスゲート磁力計の保守作業およびデータ回収を実施した。また、写真 1 のように、オーバーハウザー磁力計 GSM19 をフラックスゲート磁力計と同じ器械台に設置して全磁力観測を開始した。全磁力観測は GSM19 のメモリ量を考慮して、2 秒計測を行った。2023 年 7 月 20 日、21 日に 2 回目の出張を行い、すべての機器を撤収した。

観測期間の地磁気観測値を図 1 に、センサの傾斜、センサ温度および処理部温度を図 2 に示す。回収したデータは、地磁気 3 成分および全磁力値と、傾斜および温度についてデータベースにアーカイブした。データ期間は、2022 年 11 月 21 日から 2023 年 7 月 19 日までである。



写真1 松代地震観測所大坑道地震計室に設置した  
フラックスゲート磁力計（手前）とオーバーハウザー磁力計（奥）

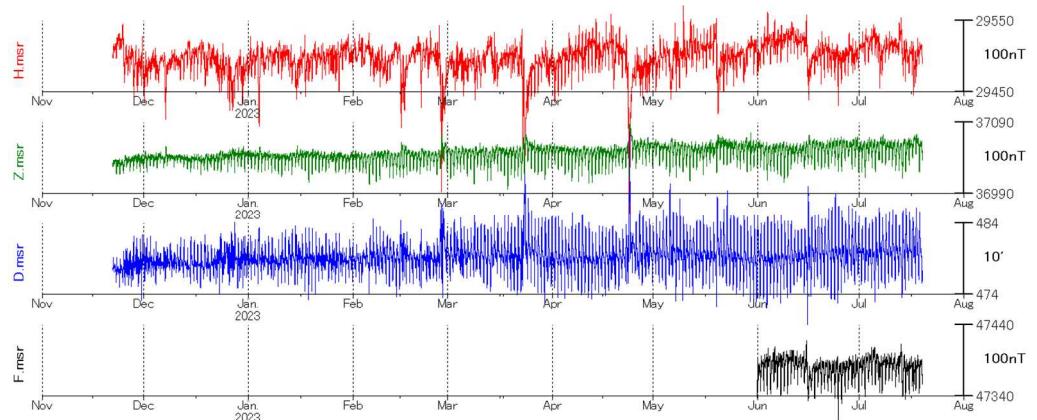


図1 地磁気毎分値（上から H: 水平分力、Z: 鉛直分力、D: 偏角、F: 全磁力）

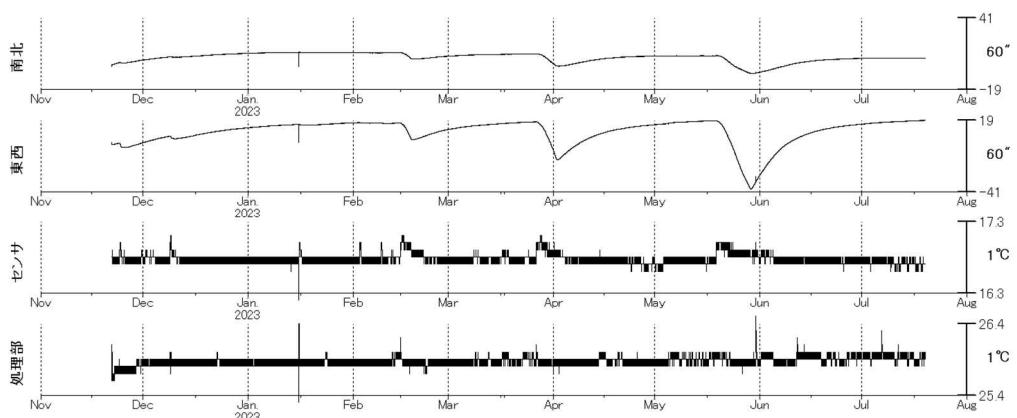


図2 温度傾斜毎分値（上から NS 傾斜、EW 傾斜、センサ温度、アンプ温度）

## 2. 鉄道の影響

松代地震観測所は直流電化鉄道が近くを通っているため、鉄道営業時間内には影響を受ける。図3に観測所と鉄道の位置を示す。黒線が鉄道の直流電化 1500V（長野電鉄、しなの鉄道、JR 東日本）で、青線が北陸新幹線の交流電化 25000V である。交流は 50Hz であるため、今回の地磁気観測においては影響を受けない。



図3 松代地震観測所と鉄道の位置（地理院地図に加筆）

黒線が直流電化 1500V、青線が交流電化 25000V、

松代地震観測所から半径 5km ごとに円を描いた。

松代地震観測所で観測した地磁気静穏日のプロットを図4に示す。鉄道営業時間内に擾乱がみられる。特にZ成分に擾乱が見られ、柿岡でも見ることができる特徴である。これは、地面に平行に流れる電流が作り出す磁場が擾乱になっているもので、大地への漏洩電流があることから発生する。図4からは、15時ころから20時（日本時間午前0時から午前5時）過ぎまで、擾乱がない時間帯が見て取れる。

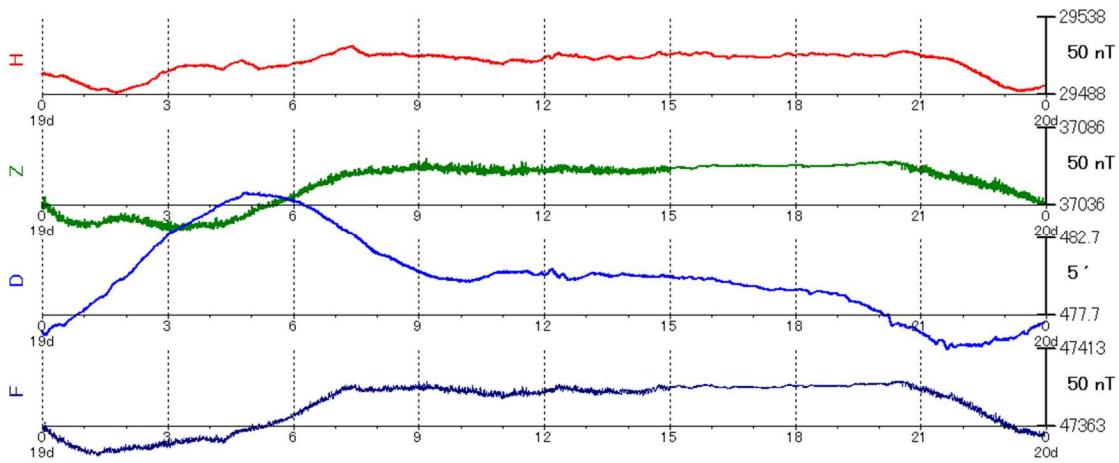


図4 地磁気静穏日のプロット（2023年7月19日）

同じ日の14時から21時（日本時間午後11時から午前6時）のZ成分を図5に示す。比較のために柿岡のZ成分も併せて示す。最も近い直流電化鉄道は、松代では7km、柿岡では常磐線電化の際に取り決められた35kmである。松代では営業時間中は5nT程度の不規則な擾乱が15時（日本時間午前0時）まで見られ、20時（同5時）過ぎまで擾乱のない時間帯となる。しかし、擾乱のない時間帯も不規則なギャップが見られ、どの時間帯が擾乱を受けていない時間帯なのかわからない。松代のAvalue（全磁力観測値と成分観測の合成全磁力の差）からは不規則なギャップが見られないで、擾乱源が離れた場所にあることが示され、磁力計によるものではないことがわかった。

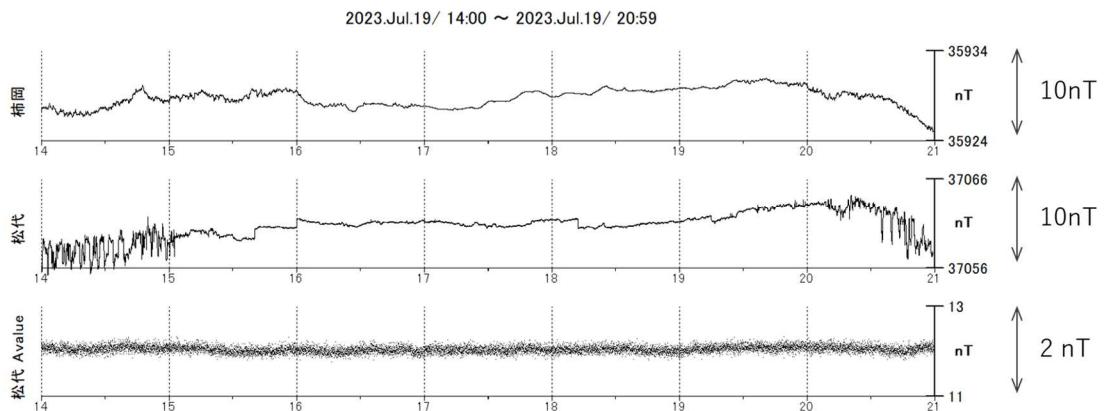


図5 2023年7月19日14時から21時(UTC)のプロット

上から柿岡、松代の地磁気Z成分、松代のAvalue。

図6に柿岡および松代の各成分の前後差を示す。前後差は観測のノイズ状況を知ることができる。柿岡、松代ともに深夜帯は前後差が小さくなり、それ以外の時間帯は鉄道の影響を受けていることが見て取れる。松代の前後差は柿岡よりも大きく、特にZ, F成分に顕著にあらわれている。前後差からも松代が地磁気観測に不適であることがわかった。

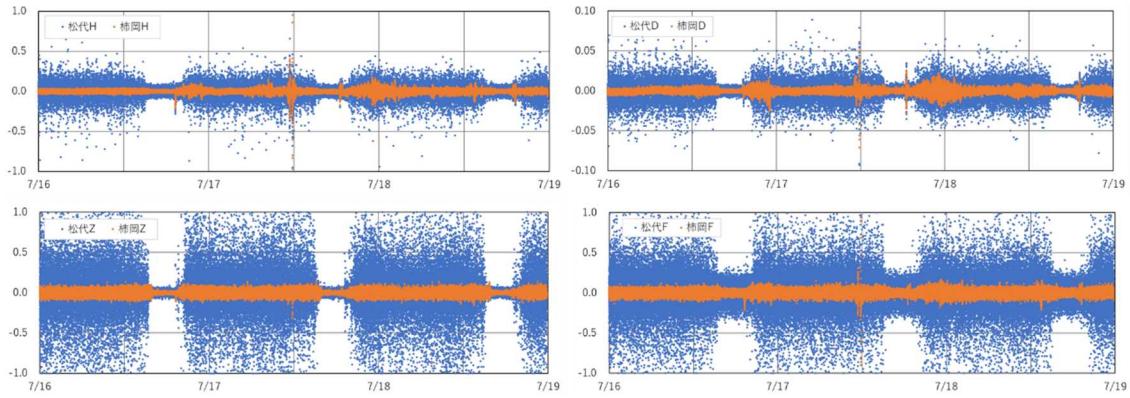


図6 各成分の前後差 (2023年7月16日-19日)

横軸は世界時、青点が松代、橙点が柿岡

### 3. データの安定性

図2の傾斜と温度のデータから、期間中の温度変化は0.5°C以内と極めて安定している。傾斜については一定値に漸近するような動きが見られたが、期間中に10日間程度で変位が1分角になるような変動が3回見られた。図7の松代地震観測所が設置した石英管式ひずみ計のデータからは、関連するような変動は確認されなかった。また、この特異な変動の直前に0.2°C程度の温度急変がみられたため、地震計室内の局所的な変動と考えられる。

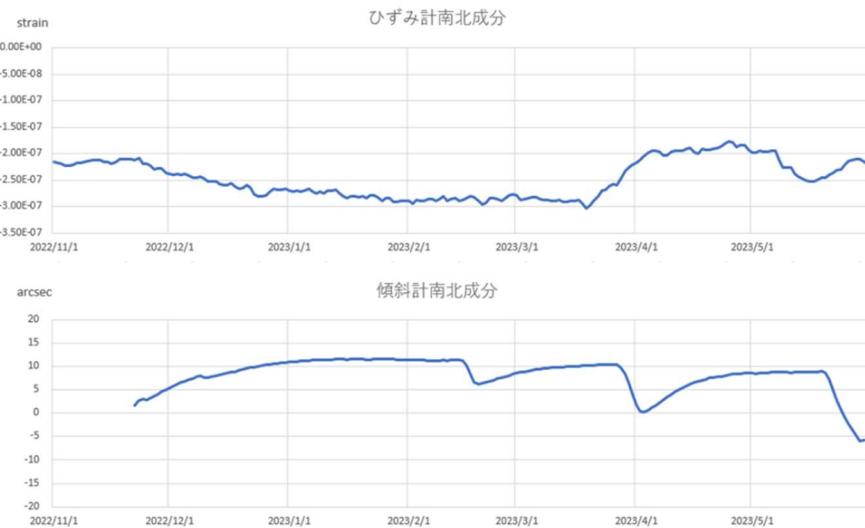


図7 石英管式ひずみ計と傾斜計値の比較

上：松代地震観測所の石英管式ひずみ計（気象庁地震火山部）

下：磁力計センサの傾斜計

地磁気観測値の安定性を確かめるため、鉄道営業時間外の16時台（UTC）の毎秒値3600個について、柿岡確定毎秒値との差の平均と標準偏差を求めた。3成分のプロットを図8に示す。前述した傾斜変動の影響が見られたため、傾斜補正処理を行ったものを右に示す。

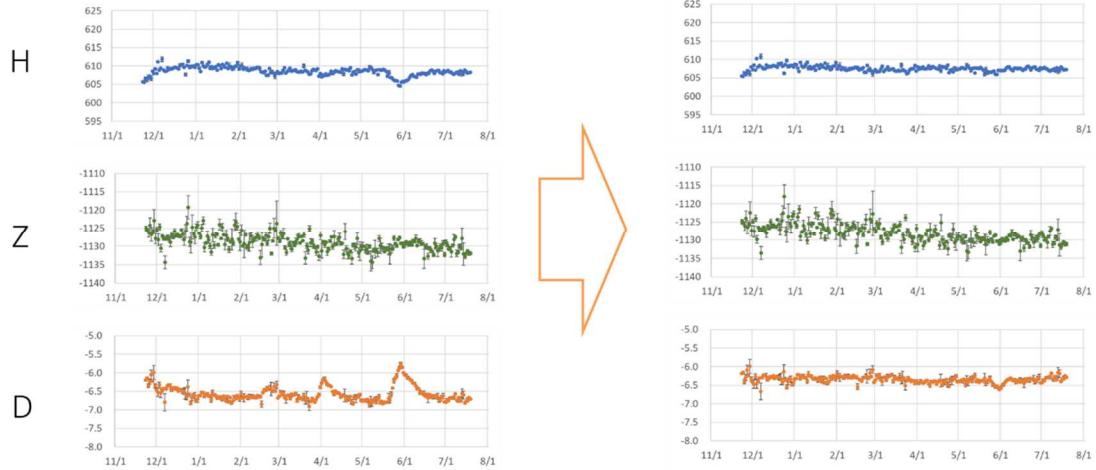


図8 夜間値平均の差プロット（柿岡－松代）。右が傾斜補正をしたもの。

図8からは、Z成分は柿岡における地下の電気電導度異常のためにバラつきが見られるが、HおよびD成分は期間を通して安定した観測ができていることが見て取れる。松代では絶対観測による較正を行っていないため、基線値が安定していることを示している。参考のために、柿岡構内に設置した磁力計2台の夜間値の差を図9に示す。図9からも、松代の観測値が安定していることが見て取れる。

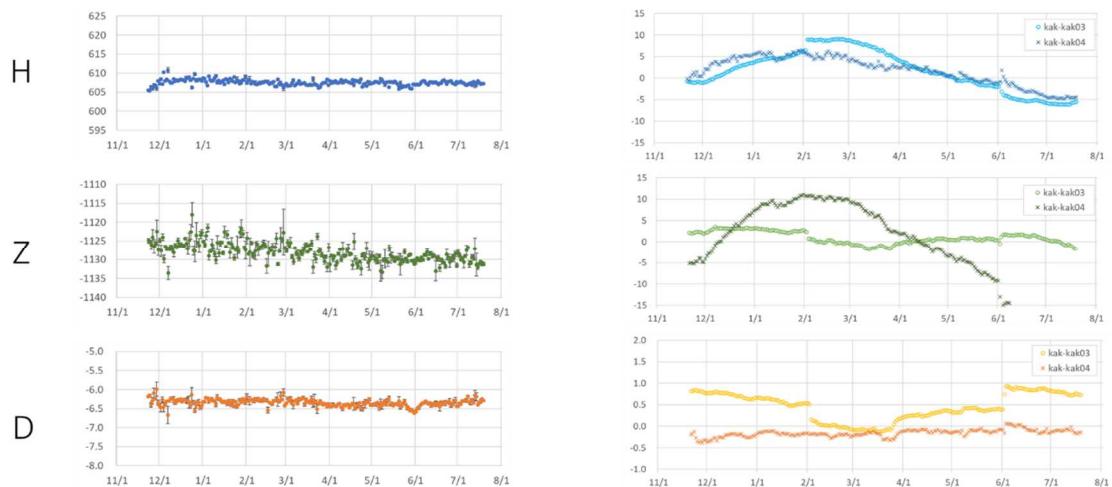


図9 柿岡確定毎秒値との夜間値平均の差プロット。

左が松代。右が柿岡構内に設置した磁力計2台。

#### 4.まとめ

フラックスゲート磁力計を設置した松代地震観測所大坑道の地震計室は、観測期間中の温度変化が0.5°C以下ときわめて安定した温度環境であった。傾斜変動は、一定値に漸近する動きが見られたが、観測期間中に3回、10日間程度の原因不明の特異な変動が見られた。その時に、地震計室内の温度が0.2°C程度変化したことや、石英管式ひずみ計に管れした変動が見られないことから、この傾斜変動は地震計室内の局所的な変動と考えられる。

また、松代地震観測所は直流電化鉄道からの距離が近く、営業時間内の大きな擾乱を受けた。営業時間外にもギャップ状の変動が見られたため、この場所は地磁気観測には適さないことがわかった。

柿岡確定値との比較から、傾斜と温度が安定した場所での観測は、変動が少なく基線値が安定していることが示された。このことは、観測値の構成に使われる絶対観測の間隔を拡げられることが示唆され、観測業務の効率化につながるものである。これから磁力計の設置には、温度や傾斜の変動を抑えた場所の選定や観測室の製作が必須となるだろう。

#### 謝辞

本調査の遂行にあたり、気象庁地震火山部からは松代地震観測所の石英管式ひずみ計および水管傾斜計のデータをいただきました。また、松代地震観測所からは、設置場所である地震計室と電力およびGPS時計信号を提供していただきました。ここに感謝の意を表します。

[課題名]：表層透水を伴う地中温度の計算手法の開発（令和5年）

[担当者]：○笹岡雅宏、浅利晴紀（技術課）、下川淳（網走地台）

[成果]：

伊豆大島の全磁力連続観測においては、特に夏季の降水量が大きい時に全磁力がステップ的に増加し、降水が終わって以降も全磁力が減少しないことが確認されている（図1）。全磁力観測点（MIK1,2）は水捌けのよい玄武岩スコリア層の上に設置されている。しかし、天水が全磁力観測に影響する根拠となるようなメカニズムについては未だに提案できていない。本課題では、表層透水に伴い地中温度が変化することで全磁力が影響を受ける可能性を考察するため、地中温度の計算手法を開発する。まず、地中温度の鉛直分布を算出するための概念モデルを検討し、使用する物理パラメータについて調査した。次に、地中の深さを50cmで分割した地層毎に、深さ方向の熱収支の関係から1次元熱伝導モデルを作成し、地表面からの熱伝導のほか、天水と地層との熱接触に伴う温度変化を取り入れた。

熱特性に係るパラメータについては、玄武岩、土壌などの熱伝導係数と熱容量の数値の導出のため、各パラメータ（熱伝導率および容積比熱）の資料を調査した<sup>\*1, \*2</sup>。富士山のスコリアの調査によると、スコリアの間隙率は70%程度あり、1時間に約10mの速さで透水する実験結果が示された<sup>\*3</sup>。ここでは、伊豆大島のスコリアについても、同じ間隙率、かつ1時間に10mの深さまで透水することを想定する。ところで、混合物質の各パラメータの導出は一般的に構造を反映するため煩雑である<sup>\*4</sup>。本課題では、玄武岩スコリアの間隙率70%の中に空気と水が混合する場合について並列式で簡便的に試算し、並列式の各パラメータを用いて地中温度の鉛直プロファイルを算出する。

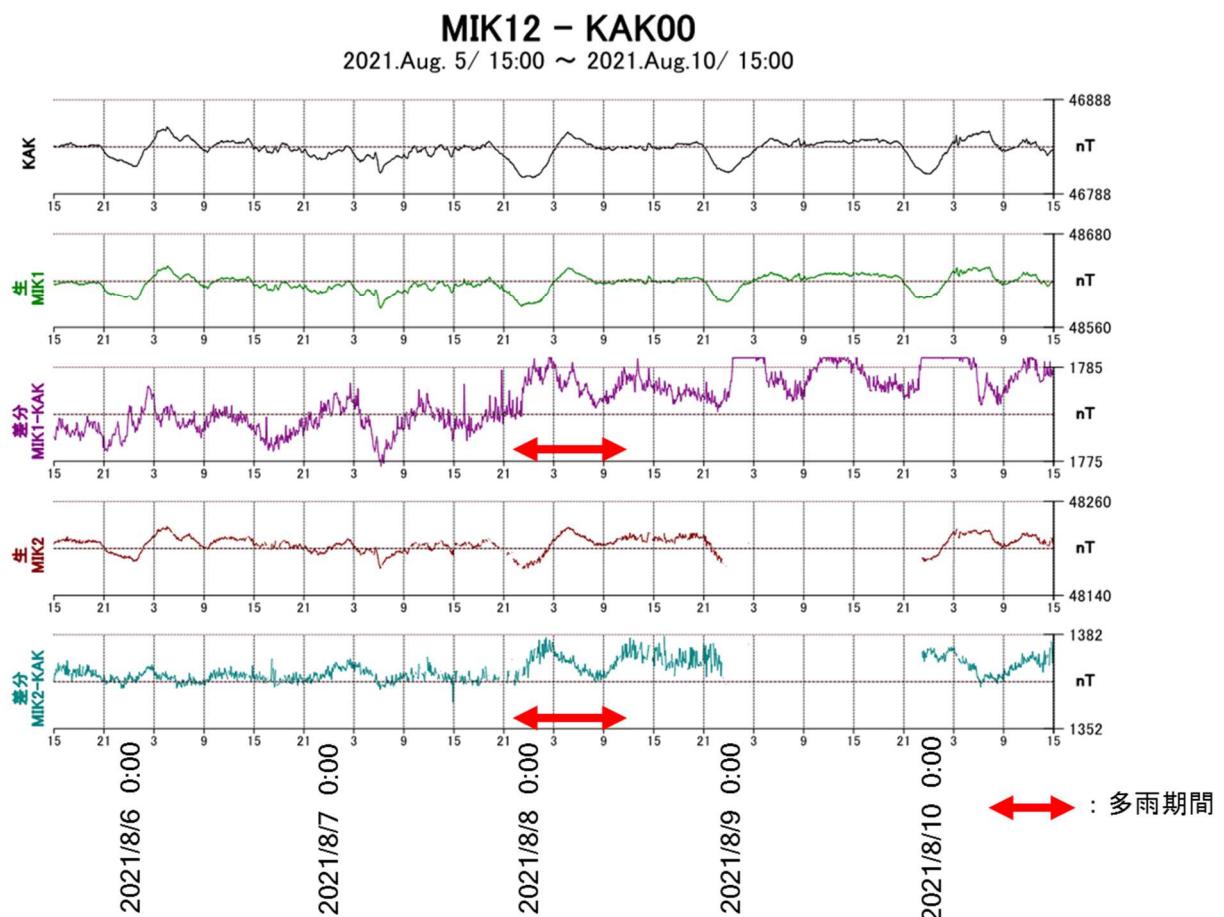


図1 伊豆大島（MIK1,2）の全磁力観測（5分サンプリング）

地下 10m では地中温度が年平均気温であることが知られており、1 次元熱伝導の計算をする際の境界条件とした。夏季は、地表温度が地中温度より高いため、降雨の表層透水による接触熱により地中の温度は増加することが期待される（図 2）。

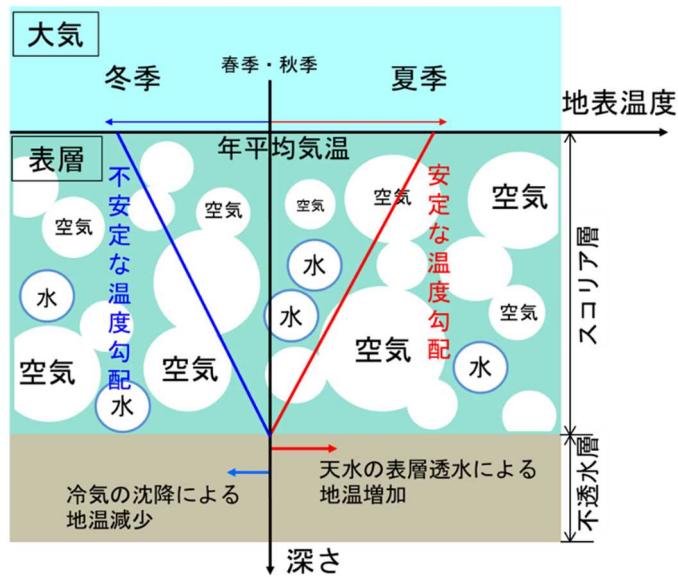


図 2 スコリア層の温度勾配の季節変化の概念図

観測地点の地表はやや硬いとの指摘があるため地表付近の地層は玄武岩と土の構成とし、それより地下ではスコリアの構造とみなした（図 3）。空気と水は共に熱伝導および熱容量が小さいため、地表付近の地層より地下では熱を伝えにくくが温度変化はしやすい。スコリア層は、表層透水に伴う接触熱が加われば、岩石だけの地層と比べて温度変化しやすいと言える。

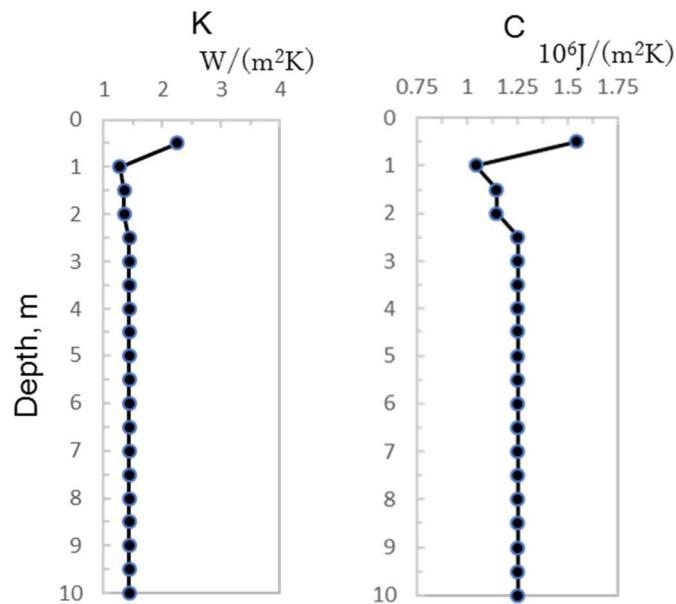


図 3 玄武岩スコリアから成る表層モデルに対する K(熱伝導係数)および C(熱容量)  
1番目の層（深さ 0.0~0.5m）は、玄武岩と土の構成比(70%, 30%)を採用。以下、スコリアの玄武岩、水、空気の構成比：(深さ 0.5~1.0m)30%, 14%, 56%, (深さ 1.0~2.0m)30%, 21%, 49%, (深さ 2.0~10.0m)30%, 28%, 42%をそれぞれ採用。

図 1 に示す多雨期間に対応して計算した地中温度プロファイルを図 4 に示す。地表附近の地層の温度 ( $T_1$ ) は地表面温度 ( $T_s$ ) の影響を強く受けて変化している。一方、多雨期間に地中温度はステップ的に増加し、全磁力変化と調和的である。この結果は、スコリア層内に埋まっている岩石が透水による接触熱により温度が増加して全磁力変化をもたらしている可能性を示唆する。図 5 に全磁力に影響する可能性のある岩石の位置の概略を示す。観測点南側の火口寄りのスコリア層に全磁力変化の原因の岩石があるのかもしれない。今はまだ仮説の段階であり、次年度の計画では実証に進む必要がある。

本課題では、地表面温度については、悪天（日照無、強風）の条件下で気温とほぼ等しいと仮定した。伊豆大島の全磁力観測点では地中温度の測定も実施しているが正常なデータが取得できていないため、地表面温度の推定値の較正に利用できるデータがない。このため、地中温度の計算に用いる地表面温度（推定値）については、サーモカメラを使用して地表面温度の実測値から較正したい。また、モデル計算により地中温度変化から全磁力変化を見積り、伊豆大島において夏季に観測された全磁力値を補正することにより、本仮説の実証を試みたい。

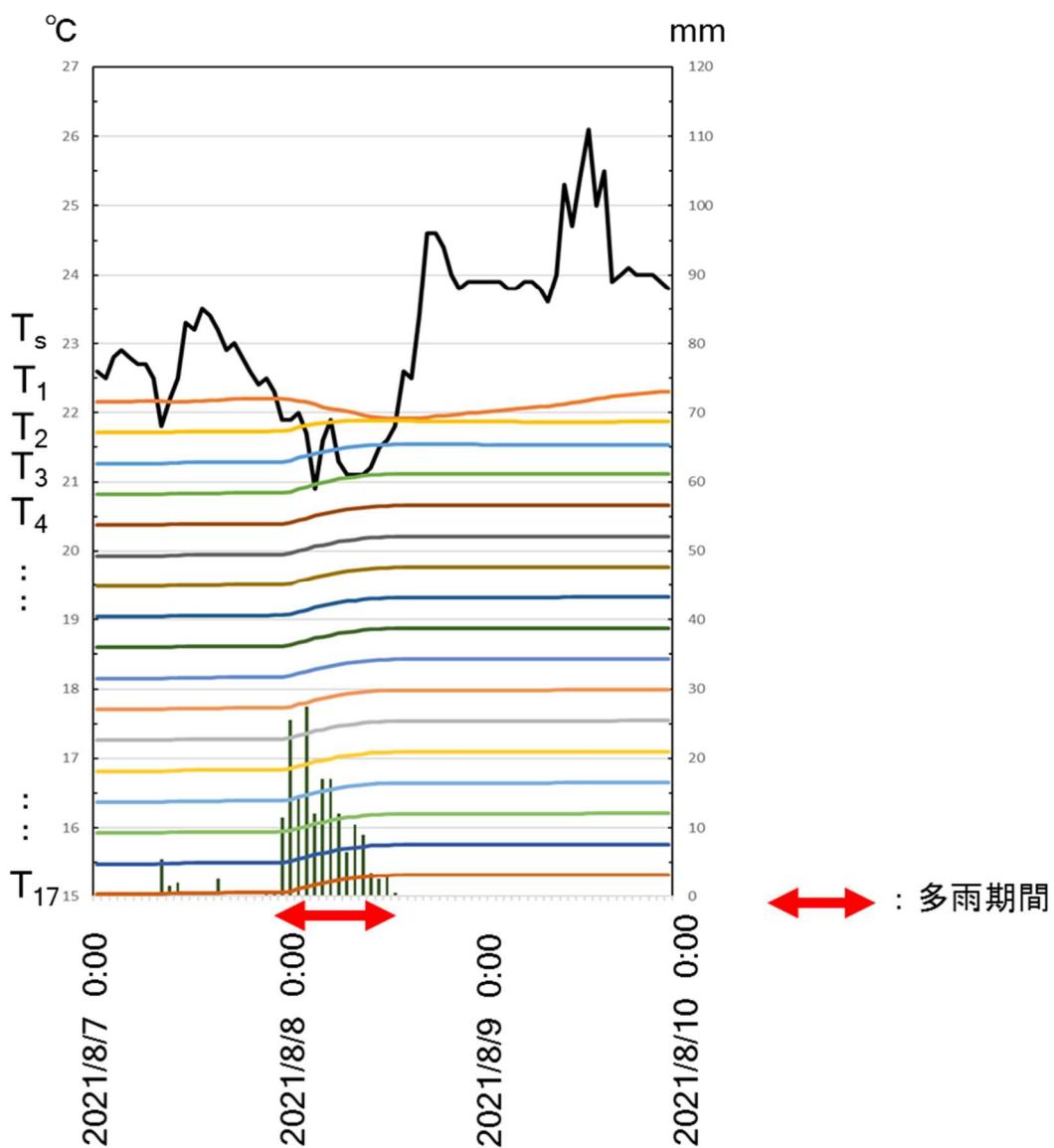


図 4 時別で推定した地中温度変化

$T_s$  : 地表面温度、 $T_i$  ( $i=1 \sim 20$ ) : 地表から  $i$  番目の厚さ 50cm の地層温度

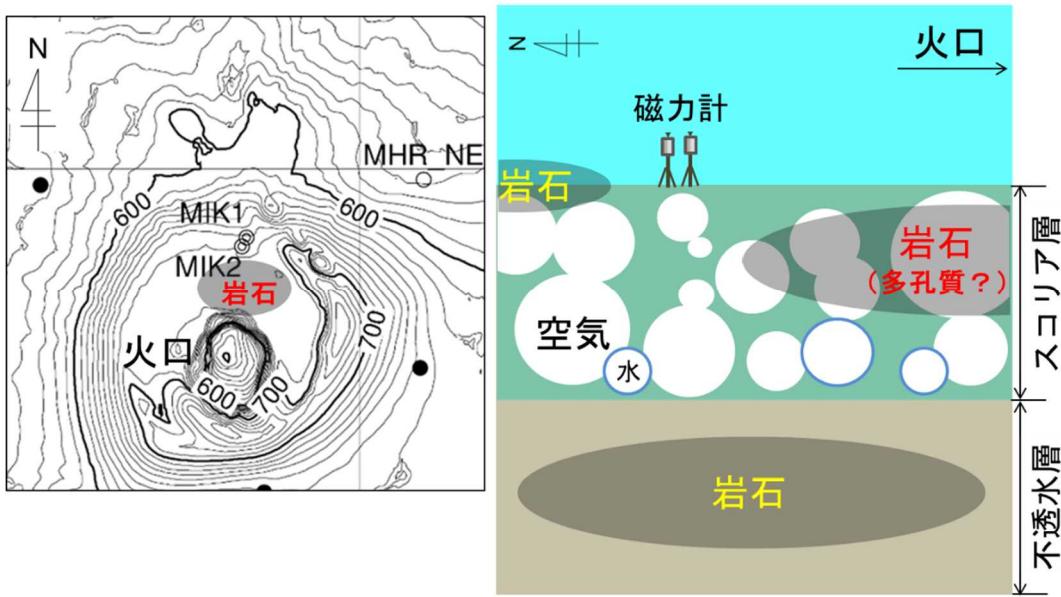


図5 表層透水により全磁力観測に影響する可能性のある岩石の位置（赤字箇所）

#### 参考文献

- \*1 北野晃一, 新孝一, 木下直人, 奥野哲夫, 高温下岩石の力学特性, 热特性および透水特性に関する文献調査, 応用地質, 29卷, 3号, 36-47, 1988
- \*2 土木学会岩盤力学委員会, 热環境下の岩盤施設の開発をめざして-熱物性と解析-, 土木学会, p.252, 2006
- \*3 笹田勝寛, 富士山スコリアの性質とその脆弱性, 平成 29 年度危機管理学シンポジウム, 第 1 部「富士山噴火に備える」講演資料データ, 2017, [https://www.nihon.ac.jp/risk\\_management/pdf/research/symposium/20171118/171222\\_3.pdf](https://www.nihon.ac.jp/risk_management/pdf/research/symposium/20171118/171222_3.pdf)
- \*4 稲葉 英男, 土壤の熱物性, 热物性, 3卷, 1号, 31-39, <https://doi.org/10.2963/jntp.3.31>, 1989

【成果の発表】：

なし

[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3)

[担当者] : ○松浦大輔、屋良朝之、浅利晴紀、森永健司

[概要] :

地磁気観測所では柿岡、女満別、鹿屋、父島における地磁気変化を連続観測している。各観測施設内で観測される地磁気変化はほぼ同じであると期待されるが、構内で近接する主測器と副測器の間にも地磁気現象ばかりか日変化においても明瞭な差がある。地点間距離が約3.4kmの鹿屋と祓川では外部擾乱変動に多少の地点差もあるが、2015年6月22日に発生した磁気嵐においては、鹿屋と祓川の振幅の差よりも、むしろ女満別構内に設置された主測器と副測器の振幅の差の方が大きいことが明らかになった。各地点固有の誘導磁場が影響しているものと考えられる。

これまでの調査研究では、観測点の地磁気変化特性の相違を調べるために、各時系列から抽出した1時間変化量などをデータセットとして統計調査を行った。その結果、女満別・鹿屋の一部観測点では、変化量そのものと変化量の地点差の間に単純な線形関係を見出せず、これは温度変化などを考慮しても改善しなかった。各地点の地磁気変化特性に異なる周波数依存性があることが示唆された。

そこで今年度の調査では、各地点の地磁気変化特性の差を調べるために周波数解析を始める。ここでは、鹿屋(kny00,hrg)と女満別(mmb00,mmbo1)それぞれ2観測点について、外部擾乱に対する応答の周波数特性の相違を明らかすることを目指す。最終的には、観測点間の伝達関数を推定することで、リファレンス観測点として許容される地磁気変化の違いを明瞭にし、新たに副観測点や構外比較観測点を新設する際の基礎資料とする。

[具体的な計画と達成目標] :

① データセットの作成

女満別(mmb00,01)、鹿屋(kny00,hrg)のそれぞれ静穏時／擾乱時におけるH、Z、D成分を集める。ただし、今回は外部起源の擾乱だけの周波数応答特性を調査するため、人口擾乱やスペイクノイズ等が極力少ないデータを精査して集める必要がある。

② アルゴリズムの作成

データセットから各観測所についてペアとなる地磁気データをそれぞれフーリエ変換し、振幅と位相のスペクトルを推定する。さらに両点間の伝達関数および応答関数を導く。そのためのアルゴリズムを作成する。

③ 結果の評価

以上の周波数解析の結果から、それぞれの観測点の地磁気変化特性を評価する。

[工程表] :

2023年												2024年		
4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月			
① データセットの作成														
	② アルゴリズムの作成								③ 評価					
											まとめ			

[今年度の成果] :

鹿屋観測施設の主測器 kny00 と祓川 hrg、女満別観測施設の主測器 mmb00 と mmb01 で観測された地磁気変動について周波数解析を行った。太陽活動が活発な期間のうち、測器の更新が行われていない期間を選び、K 指数を参考にして地磁気変動が静穏時、擾乱時に分けて、測器毎の応答特性を調査した。

・データセットについて

今回の調査では外部起源の地磁気変動について静穏時と擾乱時に分けて観測点毎の周波数応答特性を調べるため、測器の更新が行われていない、また太陽活動の活発であった 2015 年を対象に人工擾乱のない 15~18 UT の時間帯を抽出した。kny00, hrg は 32 日 分、mmb00, 01 は 279 日分の地磁気 3 成分 (H,Z,D) 毎秒値データを解析した。静穏時と擾乱時については K 指数で分類した。また今回は特定の短周期現象を抽出するようなことはしていない。

異常値処理について、データセット内に含まれるスパイクノイズは以下の基準で欠測させ、前後に値が存在する場合は内挿して補完した。

スパイクノイズ判定：前後データを含む計 3 個の中央値との差が 3nT, 0.3' 以上のもの

・鹿屋観測施設

鹿屋観測施設は構内に 5 つのブラックゲート磁力計とオーバーハウザー磁力計が設置されている。また観測施設の北西約 3.4 km 離れた場所に祓川比較観測点があり地磁気 3 成分と全磁力を計測している。今回の調査では鹿屋観測施設の主測器 kny00 と比較観測点 hrg の地磁気 3 成分 (毎秒値) を対象として、それぞれの周波数応答特性を調べた。

図 1 に kny00, hrg のパワースペクトル (8192 秒間の地磁気データにハン窓を適用してから FFT して得たパワースペクトルをスタッカした) を示す。鹿屋観測施設および祓川比較観測点では特定の周波数ピークは認められなかった。対象期間における鹿屋観測施設では近隣からの地電流ノイズが観測されていたため、特定の周波数ピークが存在すると期待されたが、地磁気に影響を与えるほどのノイズではなかった。静穏時 (K 指数 1)、擾乱時 (K 指数 5) における kny00 のパワースペクトルを見ると周期帯 20~40 秒で擾乱時の方が大きいことがわかった。

図 2 にパワースペクトルの比 (hrg/kny00) を示す。hrg で観測された地磁気水平成分 H 及び鉛直成分 Z は、約 0.1Hz より高周波数側で、kny00 の 1.7~1.9 倍となることが分かった。短周期現象や脈動現象などの地磁気変動が、それぞれの観測記録において振幅の異なる変化として現れている。

- ・女満別観測施設

女満別観測施設は構内に 5 つのブラックゲート磁力計とオーバーハウザー磁力計が設置されている。今回の調査では女満別観測施設の主測器 mmb00 と南に約 75m 離れた場所に設置された副測器 mmb01 の地磁気 3 成分（毎秒値）を対象として、周波数応答特性を調べた。

図 3 に mmb00 と mmb01 のパワースペクトルを示す。主測器および副測器どちらにも共通のピークが存在していることがわかる。これらは観測施設構外から人工的なノイズによるものと考えられる。静穏時 (K 指数 1) と擾乱時 (K 指数 5) における mmb00 のパワースペクトルを見ると周期帯 10~100 秒で擾乱時の方が大きく、その差が明瞭に現れる帯域は kny00 よりも広い。

図 4 に mmb01 と mmb00 のパワースペクトルの比を示す。0.2~0.35Hz の周波数帯では主測器と副測器の比が 10 を超える周波数も見られる。これは構内にノイズ発生源があることを示唆する。一方、他の周波数帯のピークについては、比がおよそ 1 であることから構外にノイズ発生源があることが考えられる。

今年度の調査により、鹿屋観測施設と比較観測点の祓川では H, Z 成分で周波数応答特性が異なり、パワースペクトルで比較すると 0.1Hz より高周波数帯で祓川が 1.7~1.9 倍大きいことが分かった。このことから地磁気短周期現象における変化の振幅特性に違いがあることが確認された。今後、両地点で観測された短周期現象について解析し、位相の違いを調べることも必要と考える。また女満別観測施設では mmb00 と mmb01 において 0.2~0.35Hz の周波数帯でパワースペクトル比が顕著に大きく、構内にノイズ源があることが示唆された。今後は構内に設置された他の磁力計についても同様の解析をしてその原因を調査したいと思う。

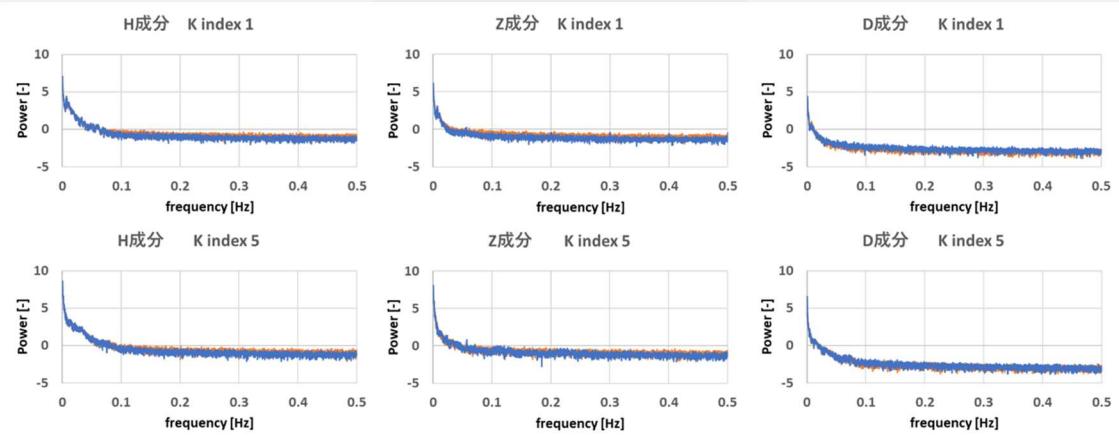


図 1 静穏時、擾乱時における地磁気 3 成分のパワースペクトル（青:kny00、橙:hrg）

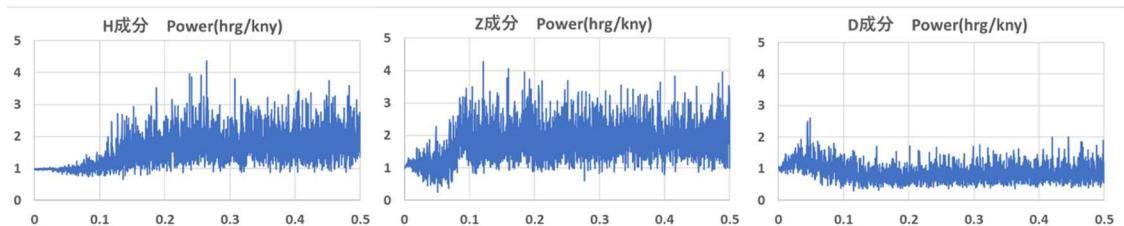


図 2 平均パワースペクトルの比 (hrg/kny00)

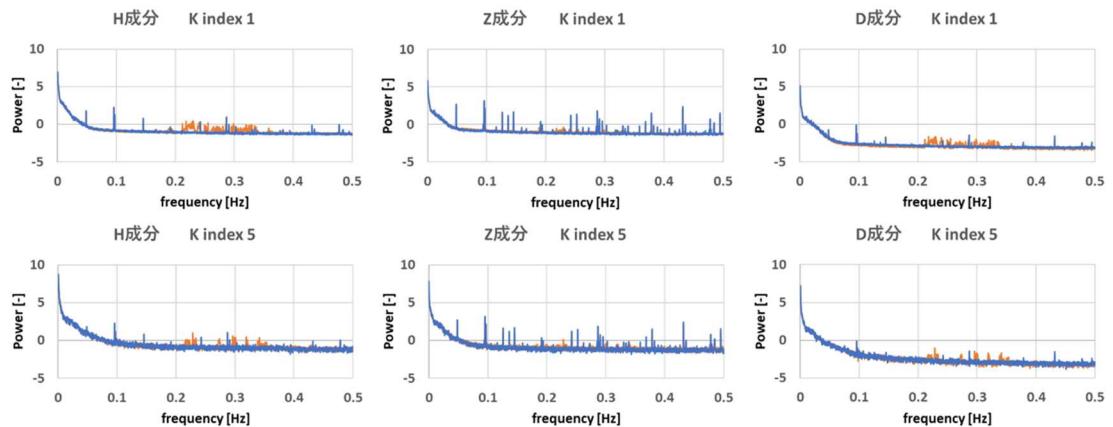


図 3 静穏時、擾乱時における地磁気 3 成分のパワースペクトル（青:mmb00、橙:mmb01）

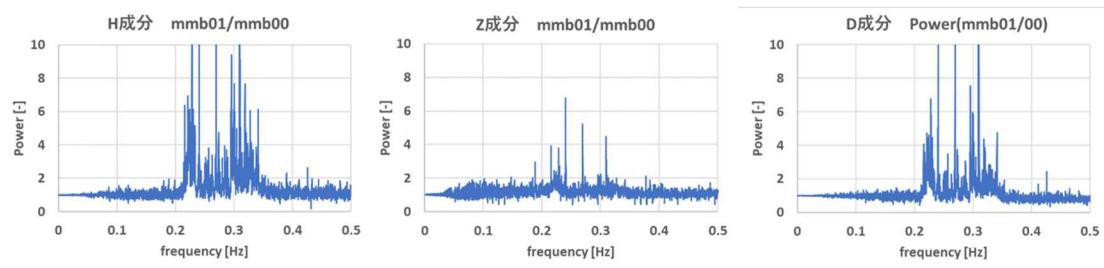


図4 平均パワースペクトルの比 (mmb01/mmb00)

[調査研究の種別] : 基礎課題

[課題名] : 地磁気嵐の自動判別に向けた調査

[担当者] : 森永健司、谷口秀隆、飯塚ふうな、長町信吾

[概要] :

地磁気嵐の判別及び通報業務は IGY(1957 年)を契機に、観測課の当番業務として実施されている。しかしながら、当番業務は官執時間のみで、時間外(夜間 17 時～翌 08 時 30 分)に発生した地磁気嵐に関しては、当番者出勤後(08 時 30 分以降)まで地磁気嵐の情報が発信されない。

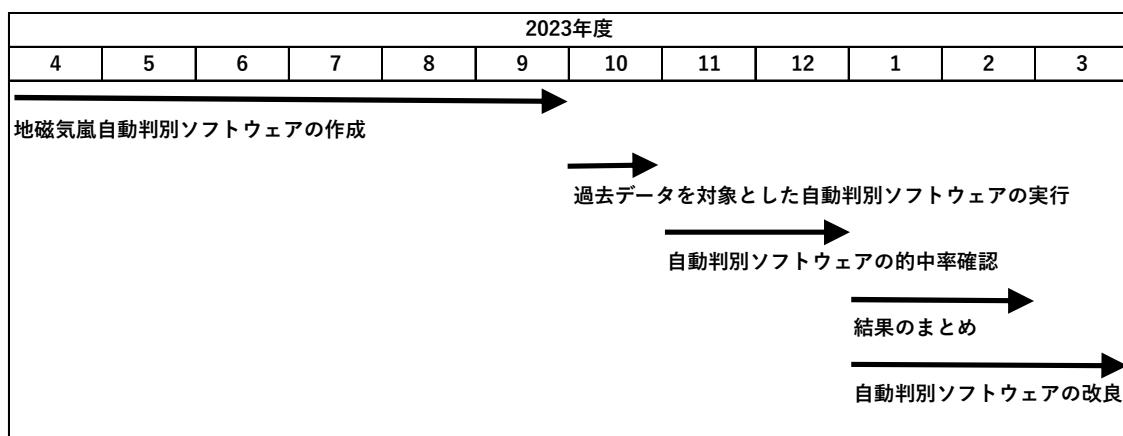
近年、宇宙天気予報の重要性が増してきており、NICT でも 2019 年 12 月より 24 時間体制で宇宙天気予報及び宇宙天気情報を提供するようになったため、地磁気観測所からの地磁気嵐情報の発信の遅れは大きな問題となっている。

本研究では、当番勤務時間外で発生した地磁気嵐の迅速な情報発信を目的とし、地磁気嵐の自動判別ソフトウェアの開発と、その精度検証を行う。

[具体的な計画と達成目標] :

- 過去 24 時間の K 指数、地磁気 H 成分の振幅、DST 指数を読み込み地磁気嵐の発生及び開始時間を自動判別するソフトウェアを開発する。
- 開発したソフトウェアで自動判別した地磁気嵐の発生及び開始時間の的中率を確認する。
- 的中率を基に、自動判別ソフトウェアの改良を実施する。

【工程表】:



## 【本年度の成果】:

### 1.地磁気嵐自動判別ソフトウェアの開発

地磁気嵐自動判別ソフトウェアは、地磁気の擾乱度を示す指数である 3 時間毎の K 指数及び 1 時間毎の DST 指数を使用して地磁気嵐の有無を判別し、地磁気観測所の観測データを使用して地磁気嵐の開始時刻を決定する。地磁気嵐の判別は、K 指数の更新に合わせて 3 時間毎に実施する仕様とした。判別時が地磁気嵐発生中でない場合は地磁気嵐が発生したかを判別し、地磁気嵐中の場合は地磁気嵐が終了したか判別している。地磁気嵐自動判別ソフトウェアによる地磁気嵐の判別方法のフローチャートを図 1 に示す。

地磁気嵐は地磁気急変化現象（以下 SC という）を伴う急始型地磁気嵐と、SC を伴わない緩始型地磁気嵐の 2 種類があり、それぞれで地磁気嵐としての採用基準や開始時刻の判別基準が異なっている。地磁気嵐の型と開始時刻にかかる SC の判別方法のフローチャートを図 2 に示す。SC ありと判別され地磁気嵐の条件を満たした場合、急始型地磁気嵐となり開始時刻は地磁気嵐の主相（地磁気水平成分が急激に減少する期間）直前の SC 発生時刻と判別され、1 分単位で決定する。SC なしと判別され地磁気嵐の条件を満たした場合は、緩始型地磁気嵐となり開始時刻は主相の始まりの時刻と判別され、1 時間単位で決定する。

### 2.自動判別ソフトウェアの判別結果

太陽サイクル 1 周期にあたる 2012 年から 2022 年までの 11 年間に発生した地磁気嵐（113 事例）を対象とし、開発した自動判別プログラムを実行した。自動判別及び比較対象となる当番業務による速報（以下、当番速報という）の地磁気嵐の的中、空振り、見逃しの個数と割合を表 1 に示す。表 1 を見ると自動反定による的中数及び見逃し数は当番業務の速報とほぼ同程度であることがわかる。しかし、空振りの数が当番速報より多い傾向がみられた。空振りの原因を調査したところ、ほぼ半数に当たる 6 事例は SC の判別ミスによるものであった。残り半数に関しては、主担当者の裁量で地磁気嵐と採用されていないものの、主担当者次第で地磁気嵐として採用されてもおかしくない事例であった。

的中した事例に関して、地磁気嵐の型の一一致率を確認した。自動判別プログラム及び当番速報の地磁気嵐の型の一一致、不一致の割合を表 2 に示す。当番速報の型の一一致率が約 93% なのに対し、自動判別では 70% 程度となっている。地磁気嵐として判別できている事例でも、SC の有無の判別に失敗している事例が 30% 程度もあり、SC の判別アルゴリズムにまだ改善の余地があることがわかる。

自動判別及び当番速報の急始型地磁気嵐の開始時刻のズレを 1 分単位で、緩始型地磁気嵐の開始時刻のズレを 1 時間単位で確認した。自動判別及び当番速報の急始型地磁気嵐の開始時刻の 1 分単位のズレの出現率を図 3、図 4 に、緩始型地磁気嵐の開始時刻の 1 時間単位のズレの出現率を図 5、図 6 に示す。

急始型地磁気嵐の開始時刻に関しては、当番速報が 70% 程度実際の採用値と一致しているのに対し、自動判別では 30% 程度しか一致していない。また、自動判別では 10 分以上時

刻がずれている事例が半数近いことがわかる。これは急始型地磁気嵐の始まりとなる SC ではない別の急変化現象を SC と判別しているためである。

緩始型地磁気嵐の開始時刻に関しても、当番速報が 70%以上一致しているのに対し、自動判別は 25%程度しか一致していない。10 時間以上ズレている事例も 20%以上あり、地磁気嵐の開始時刻の判別に関しては、プログラムの改良が必要なことがわかる。

最後に、地磁気嵐の終了時刻のズレを 1 時間単位で確認した。図 7、図 8 に自動判別及び当番速報の地磁気嵐終了時間の時刻ズレの出現率を示す。地磁気嵐の終了時刻に関しては、その後のデータを見ることができない状態で決定する速報で正確に決定することは難しく、当番速報でも完全に一致するのは 30%程度しかない。当番速報では全体的に採用値より早い時間に地磁気嵐を終了させる傾向がある。しかしながら、自動判別による地磁気嵐の終了判別を見ると、完全に一致するのは 10%程度で、多くの事例で採用値より遅く地磁気嵐を終了させていることがわかる。この傾向は、地磁気嵐の終了判別の基準が適切でないこともあるが、自動判別の判別間隔が 3 時間毎ということも関係していると考えられる。

### 3.まとめと今後の課題

地磁気嵐の自動判別プログラムを開発し、過去 11 年間のデータを使用して精度検証を行った。地磁気嵐の発生そのものは、現用の当番速報とほぼ同程度で的中させることができた。しかし、地磁気嵐の開始時刻や終了時刻の判別に関しては、まだまだ実用的なレベルに達しておらず、より精度を上げるためにプログラムの改良が必要である。

重点的に改良する項目として、急始型地磁気嵐の開始となる SC 現象の判別精度の改良があげられる。SC の判別精度を上げることにより、地磁気嵐の開始時刻精度の向上だけでなく、空振り判別を減らすこと期待される。具体的に、現在の自動判別プログラムで使用していない人工衛星の太陽風速度や密度のデータを参照するように改良することで、SC 現象の判別精度を向上させることを検討している。

また、1 時間毎に更新される K 指数の自動読み取りデータを使用し、自動判別の間隔を 3 時間毎から 1 時間毎に変更する計画を立てている。自動読み取り K 指数の精度の問題もあるが、判別間隔を上げることにより速報性の向上や、地磁気嵐終了時刻の精度向上が期待される。また、K 指数や DST 指数の速報値を使用することにより、実用に近い形での判別精度の検証ができる。

本年度の調査により、地磁気嵐の自動判別の実用化に向けて基本となるプログラムを開発し、精度検証を行って問題点の洗い出しをすることができた。今回の研究結果を元に実用化に向けたプログラムの改良を重ね、地磁気嵐速報発表業務の効率化を図ってゆきたい。

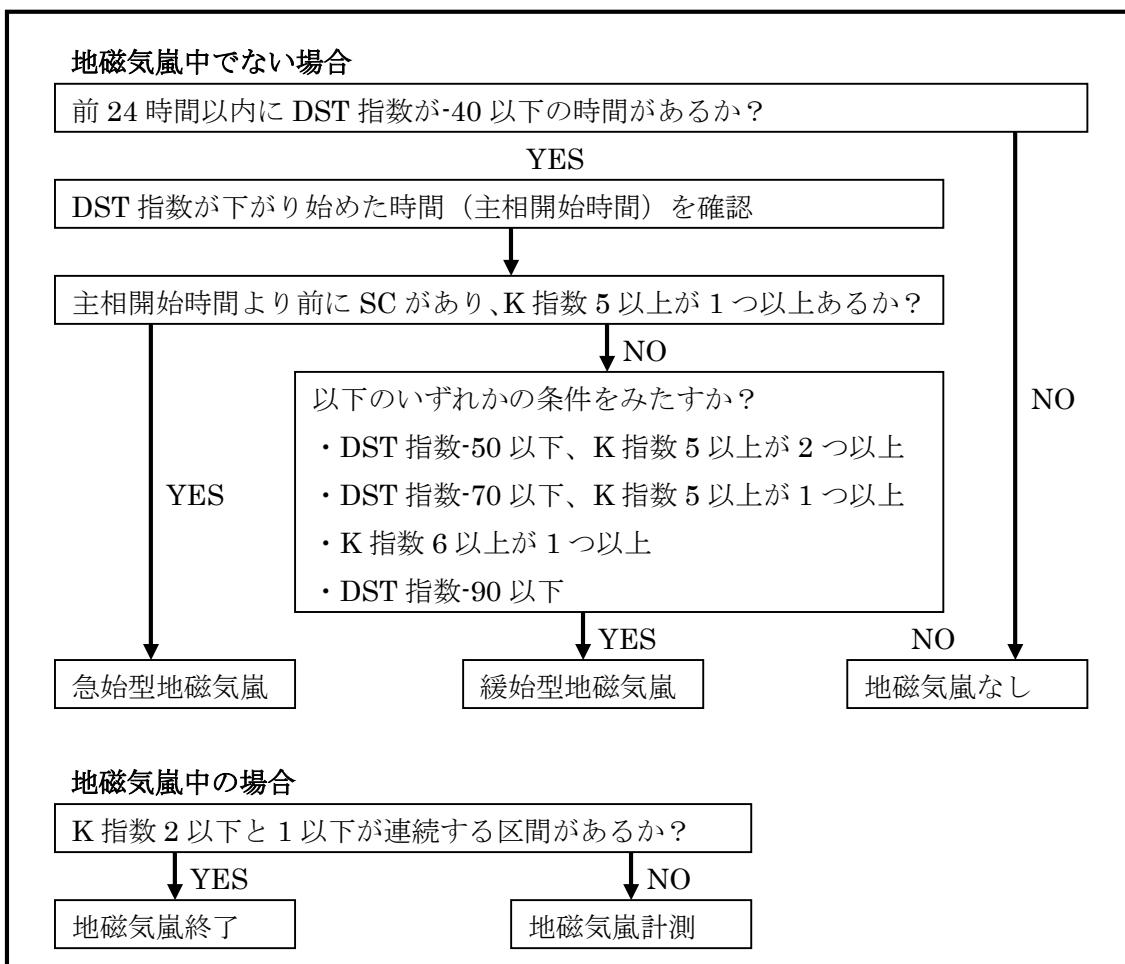


図 1 地磁気嵐発生の判別フローチャート

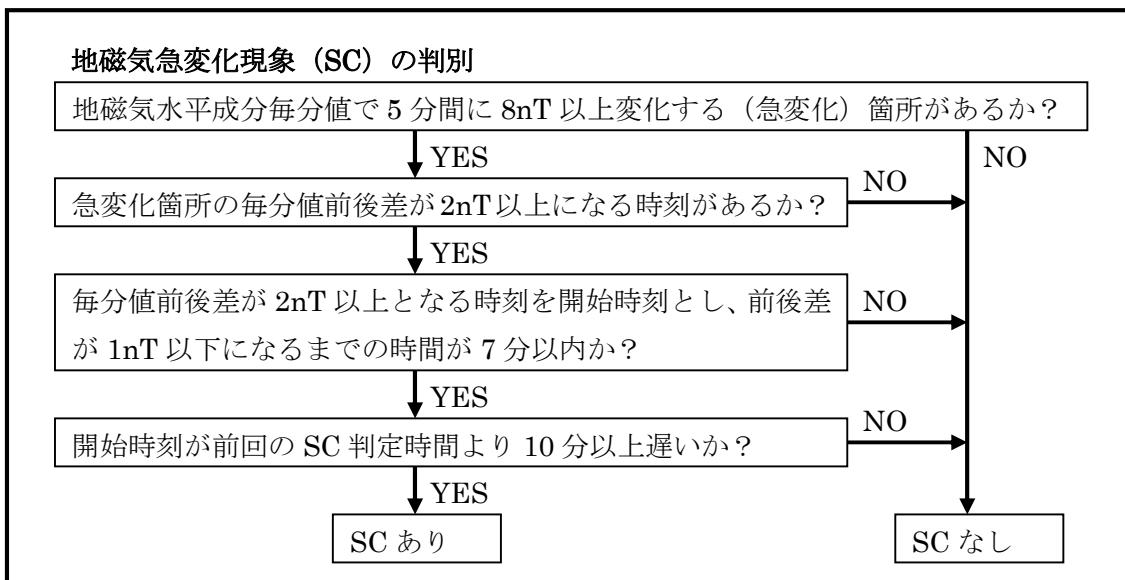


図 2 地磁気急変化現象 (SC) の判別フローチャート

表1 自動判別プログラム及び当番速報の的中、空振り、見逃しの割合

地磁気嵐判別	自動判別プログラム		A 当番速報	
	事例数	割合 (%)	事例数	割合 (%)
的中	96	78.05	97	82.91
空振り	13	10.57	4	3.42
見逃し	17	11.38	16	13.68

表2 自動判別プログラム及び当番速報の地磁気嵐の型の一致率

TYPE 判別	自動判別プログラム		A 当番速報	
	事例数	割合(%)	事例数	割合(%)
的中	67	69.79	90	92.78
SSC を SG と判別	17	17.71	7	7.22
SG を SSC と判別	12	12.50	0	0.00

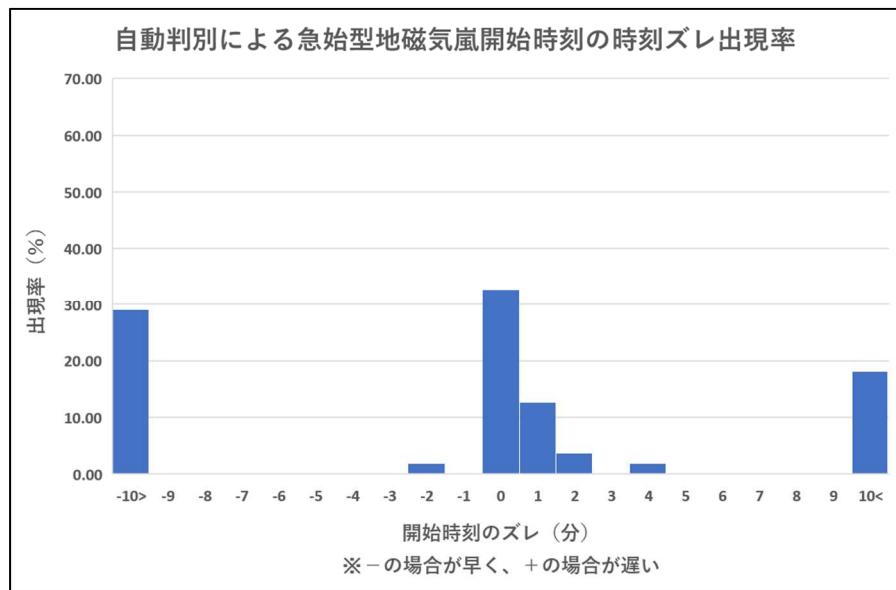


図 3 自動判別プログラムによる急始型地磁気嵐開始時刻の時刻ズレの出現率

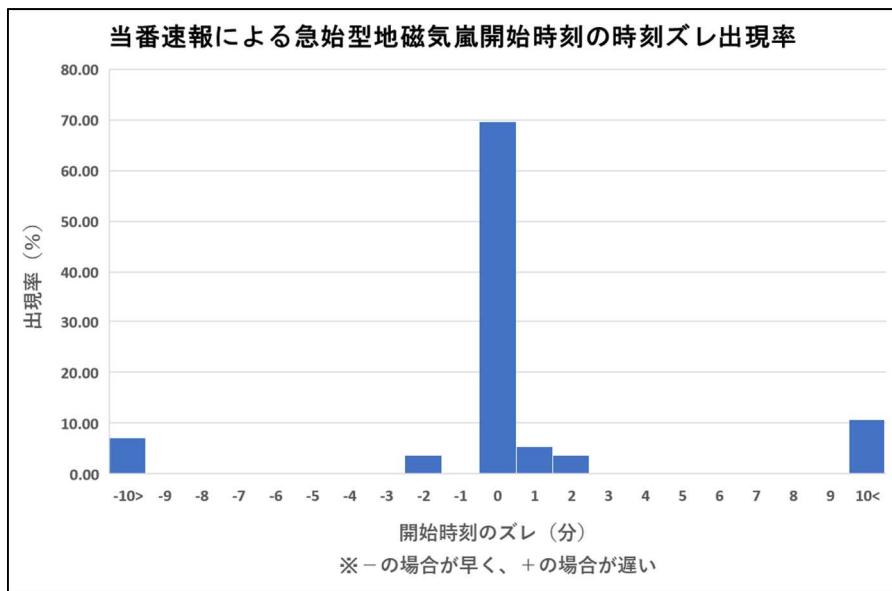


図 4 当番速報による急始型地磁気嵐開始時刻の時刻ズレの出現率

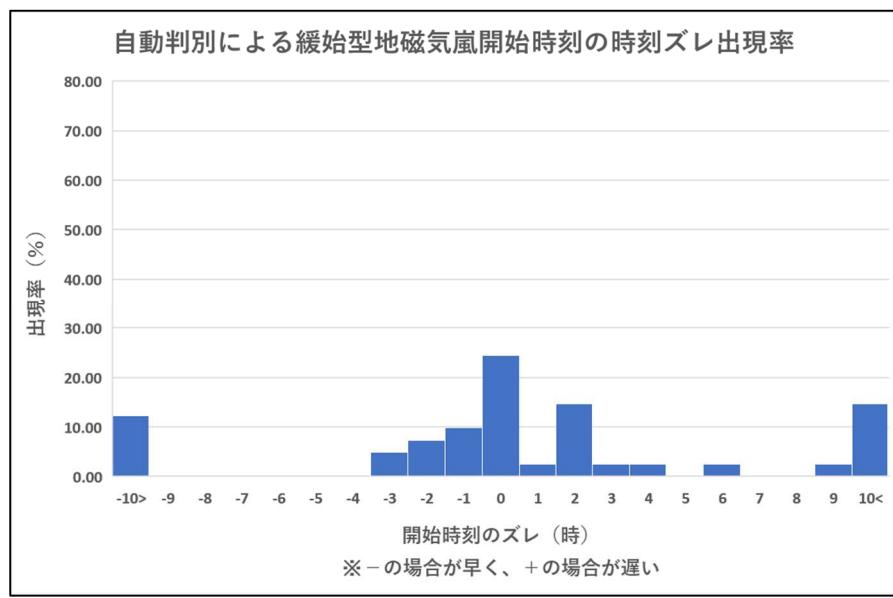


図 5 自動判別プログラムによる緩始型地磁気嵐開始時刻の時刻ズレの出現率

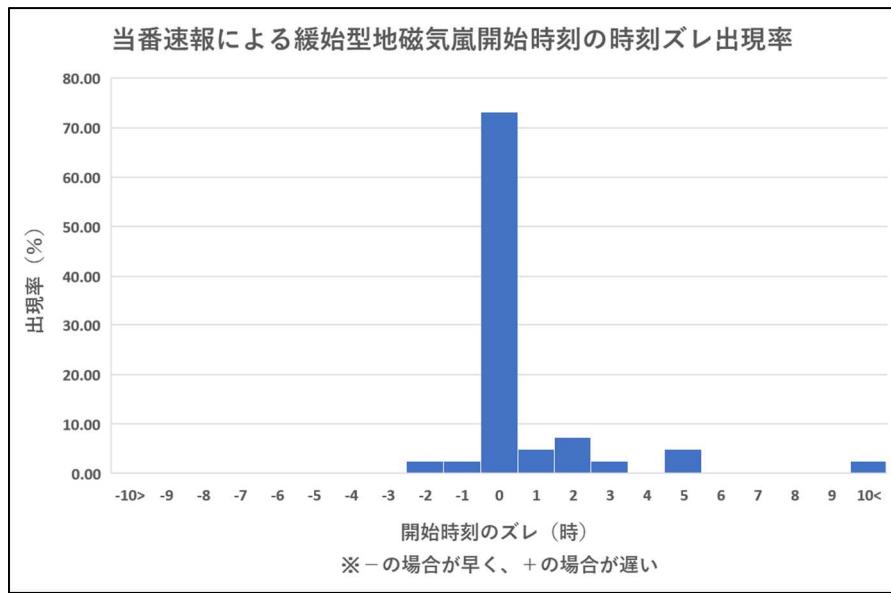


図 6 当番速報による緩始型地磁気嵐開始時刻の時刻ズレの出現率

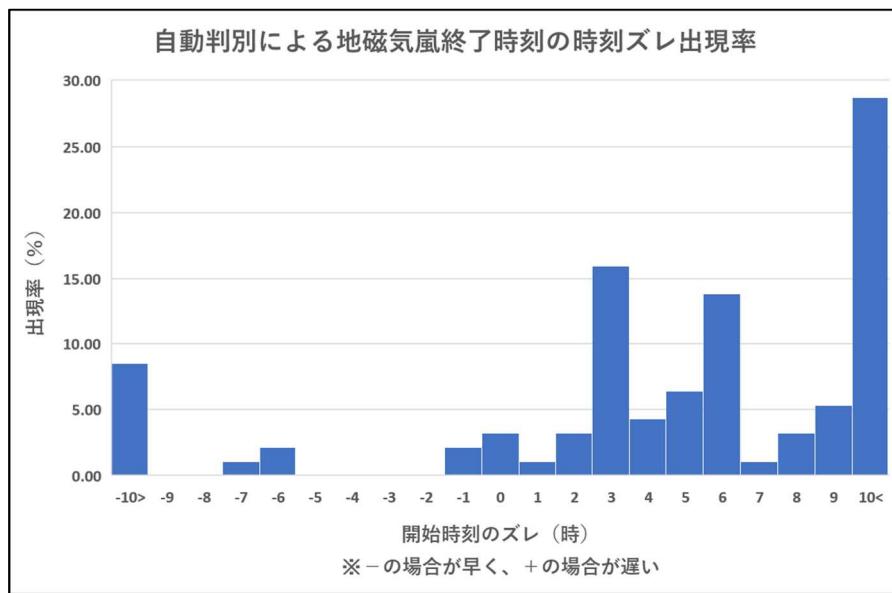


図 7 自動判別プログラムによる地磁気嵐終了時刻の時刻ズレの出現率

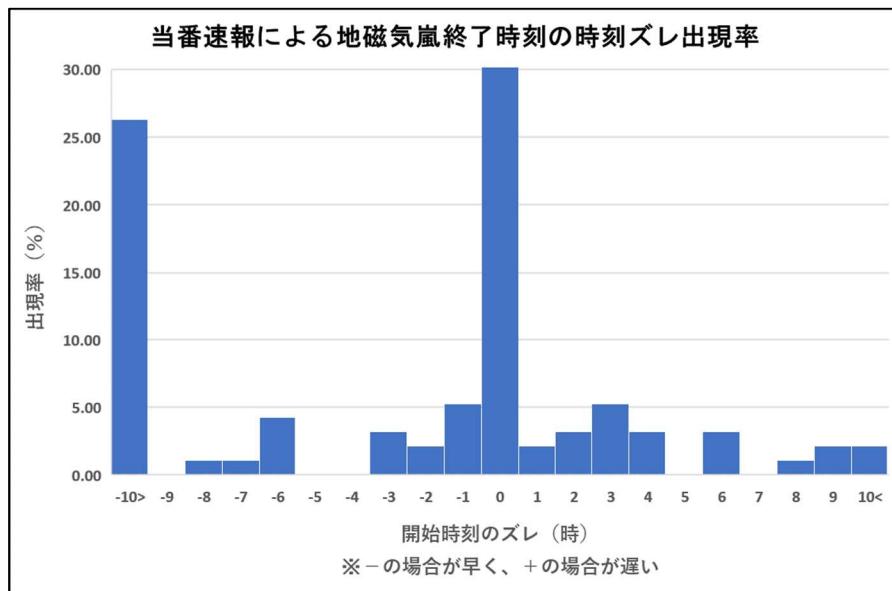


図 8 当番速報による地磁気嵐終了時刻の時刻ズレの出現率