

# 令和6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
南極昭和基地の地磁気データの絶対値化に向けた調査 . . . . .	13 頁

## 基礎課題

機械学習による K 指数判定手法の開発 . . . . .	25 頁
表層透水を伴う地中温度の計算手法の開発 (その2) . . . . .	28 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4) . . . . .	33 頁
地磁気嵐の自動判別に向けた調査 (その2) . . . . .	37 頁
新たな真方位観測方法の検討 . . . . .	42 頁
FT 型磁気儀における観測方法と基線値算出方法の再考 . . . . .	52 頁
インターマグネット確定毎秒値データチェック手法の開発 . . . . .	61 頁
宇宙天気災害に関連する磁気嵐の特徴について . . . . .	65 頁
画像解析による光学式セオドライトの目盛読み取り . . . . .	76 頁
1955 年以前のブロマイドデータ数値化に向けた調査 . . . . .	81 頁

2025 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5年～7年度）

[担当者]：○増子徳道、山崎貴之、浅利晴紀、谷口秀隆（技術課）、大竹和生、長町信吾、北山拓、松下拓輝、櫻井友己、松浦大輔、飯塚ふうな（観測課）

[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引き続き取り組む。

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、伊豆大島等に加えて、地震火山部が平成27～30年度以降に本庁地震火山部が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）（以下、本庁整備6火山）周辺を対象に、これまでの観測成果のとりまとめ、ノイズ低減手法及び観測測器の技術開発、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引き続き進める。

[具体的な計画と達成目標]：

令和5年度から7年度にかけて、以下のⅠ～Ⅳを実施する。

Ⅰ. 定常観測

Ⅱ. 地磁気観測データのノイズ低減

Ⅲ. 簡易型偏角・伏角の測器開発

Ⅳ. データ処理

Ⅰ. 定常観測

地磁気観測所で実施している全磁力連続観測による火山監視および活動評価の高精度化に向けて、引き続き観測を実施しつつ観測の効率化に向けた検討を行うとともに、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、吾妻山等について、

- ・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
- ・全磁力変化の面的分布を把握するための全磁力繰返し観測

について整理分析し、観測成果として取りまとめる。

また、火山活動と全磁力変化の対応について引き続き調査する。地磁気観測所で観測している火山（雌阿寒岳、草津白根山、伊豆大島）及び本庁整備6火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とともに、各地域火山監視・警報センターによる火山活動評価も参考にしながら、火山による多項目観測の有効性について地磁気観測の観点から検証する。観測成果は火山監視課および

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、火山調査委員会等に報告する。

#### ○全磁力連続観測点における通信回線の LTE 化

これまで FOMA 回線あるいは衛星回線を用いてデータ伝送を行っていた各観測点について、LTE 回線への更新を行い、安定したデータ伝送を確立させる。

#### ○シズカ山参照点の新設

草津白根山における地磁気観測の解析結果は、警戒レベルの判定基準にも採用されている。これまでその観測データは、東大地震研から提供される八ヶ岳地磁気観測所（草津白根山から 70km 程）のデータを参照として処理されてきた。本課題では、防災業務において比較的重要な役割を果たす参照データを自ら取得すべく、草津白根山から約 5km 南のシズカ山に参照点を新設する。同参照点での地磁気観測は、成分（フラックスゲート磁力計 FRG-604RC）と全磁力（オーバーハウザー磁力計 GSM-90）の 4 成分毎秒測定から成る。

シズカ山参照点の整備計画で特に挑戦的となる課題は、野外成分変化観測の安定化である。当庁では、既に 6 火山（樽前山・吾妻山・安達太良山・御嶽山・九重山・霧島山）の参照点にてフラックスゲート磁力計 FRG-700 を用いた成分観測を運用している。しかし、

- 観測・通信機器の不具合に伴う欠測が度々発生する
- 温度と傾斜の変動に起因する観測記録のドリフトが大きい

など、火山活動監視・評価における不都合も報告されている。そこで令和 5 年度には、これらの克服を念頭に観測設備の設計を行った。既に測器の納入は終えており、必要な予算は確保されている。令和 6 年度は、待ち受け工事業者・測器業者との契約を行い、参照点の設置を完了する。

## II. 地磁気観測データのノイズ低減

#### ○熱消磁源モデル推定アルゴリズムの改良

当庁による全磁力データを用いた火山活動評価では、MAGCAP-V を用いた熱消磁モデルの推定結果（消磁源の位置と規模）を参考資料としている。その入力データセットには、火口周辺における全磁力連続観測または繰り返し観測から得られた全磁力時間変化量が使用される。実際の観測にはノイズ（観測誤差やローカルの磁場変化）が含まれており、それらが MAGCAP-V による推定の結果を大きく左右する事例もあった。例えば、2018-19 年の吾妻山大穴火口における全磁力繰り返し観測に伴う推定では、ごくローカルな異常のあった一つの地点（12 番）の近傍に、推定結果が大きく引き寄せられ、活動評価に適さない結果が得られていた。

本調査では、熱消磁源モデルの推定に対するノイズの影響を緩和する手法を検討する。過去の MAGCAP-V 熱消磁モデルが示す消磁源（または帯磁源）の位置は、上記のような例外的事例を除き、比較的安定していたことから、各火山の典型的な熱活動領域は既に想定できるようになっている（吾妻山や草津白根山など）。そこで、この先験的情報を熱消磁源モデルの事前確率密度分布として与え、新たに追加されたデータからベイズ推定によりモデルの事後確率密度分布を得る方法を開発する。併せて、MAGCAP-V が実装していなかった複数の離れた消磁源の同時推定も試みる。

#### ○吾妻山

令和4年度開始の新規プロジェクト「地磁気3成分繰り返し観測による火山活動監視の高度化」の計画では、令和5年度までに予備調査を終了し、令和6年度より繰り返し観測の本格運用を開始する予定であった。令和5年度までの調査

① 観測点の設置、② 地磁気絶対観測・GNSS真方位観測、③ 高湯参照点の3成分変化計の安定化

から、目標とする精度（0.1~0.2分角：大穴火口下の熱消磁に伴う地磁気シグナルを検知するのに必要な精度）の測定を実施できる目途を立てることはできた。しかし、本格運用の開始前に解決すべき課題が各項目において残ったため、予備調査をあと1年延長する（特に③の解決は必須）。

令和5年度の調査計画は、上記項目①②③それぞれについて以下の通りとする。

- ① では、高湯参照点の絶対観測点を浄土平へ移設する。高湯参照点は表層地盤が緩く傾斜が変動しやすいため、絶対観測を実施する地点に適していない。そこでこれに代わる成分参照点の候補地を浄土平にて選定する。
- ② では、成分観測のより確かな精度評価のため、既設点における評価用観測データ（地磁気絶対値/GNSS）を蓄積する。
- ③ では、収録器のアナログ回路に使われている分圧用抵抗器を温度依存性の低いものに交換する（温度日変化に伴う収録値ドリフトの主要因）。併せて、収録装置および収納ケースの断熱性を強化する。

### Ⅲ. 簡易型偏角・伏角の測器開発

地磁気観測における偏角・伏角観測において、特に火山地域での観測は、地質、岩石、及び地形等の局所的な影響を受けて、地磁気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）があることが知られており、中長期的な地磁気の変化（永年変化）に対して適切にDI補正を施さないと、火山活動の中長期的な推移を見誤る可能性がある。

これまでに伊豆大島や雌阿寒岳等でトランシットコンパスによる偏角・伏角観測を実施してきたが、各観測の読み取りはアナログの目盛で読み取る必要があることから、1観測点における観測に時間を要した。また、従来の偏角・伏角観測においては、ある程度の経験が必要であり、誰でも短時間に観測を行うことはできない。またこれまで、DI補正は全磁力連続観測点でのみしか実施しておらず、火山活動に伴う中長期的な火山活動評価を高精度に行うには、全磁力繰り返し観測点においても偏角・伏角観測を実施する必要があるが、時間がかかることが課題であった。

そこで本調査研究では、簡易的に測定できる偏角・伏角測定装置を開発することによって、観測値読み取りのデジタル化を図り、観測時間の短縮につなげる。地磁気観測所構内において観測精度の検証を実施した上で、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でテスト観測を実施し、過去の観測値との比較検証を行う。また、偏角及び伏角観測の精度の担保を確認したうえで、各地域火山監視・警報センターに展開し、本庁整備6火山の地磁気観測の精度向上にあてる。

### Ⅳ. データ処理

○火山監視情報システム（VOIS）提供用の全磁力データ補正プログラムの実装

VOIS4は令和6年11月に更新整備され運用開始となる。これに合わせ、全磁力毎日値データ（樽前山・安達太良山・吾妻山・御嶽山・九重山・霧島山・雌阿寒岳・草津白根山・伊豆大島・三宅島）を火山現業の活動監視・評価に適するよう加工し、地磁気観測総合処理装置（令和7年3月更新予定）

から VOIS4 へ提供する計画が進められてきた。令和 5 年度の本調査課題（ノイズリダクション）では、DI 効果の即時補正アルゴリズムについて検討し、各火山観測点における背景磁場変動（DI 補正に必要な情報）には、柿岡・女満別・鹿屋の暫定 3 成分データを適用するのが最も妥当であるという結論に至った。そこで令和 6 年度は、全磁力データの即時自動補正ソフト（プログラム開発と観測点固有の補正パラメータチューニング）を製作する。

自動処理ソフトは Python を使用して内製する。ソフトは以下の各モジュールから構成される。

- ① フォーマット変換
- ② パルスノイズ除去
- ③ 毎日値の生成
- ④ 各火山の全磁力参照点との差分
- ⑤ 年周変化の補正
- ⑥ 令和 5 年度の検討を踏まえた DI 補正
- ⑦ VOIS 用 CSV フォーマットでの出力

[年次計画]：令和 6 年度

#### I. 定常観測

##### ○雌阿寒岳

- ・全磁力連続観測点における観測機器保守（通信の LTE 化+ME3 蓄電池更新）
- ・ポンマチネシリ火口周辺での全磁力の繰返し観測・解析

##### ○吾妻山

- ・繰返し成分観測のための測器の調整とその他必要な機材の準備
- ・絶対観測の実施（山上繰返し点 6 点+参照点 1 点）
- ・GNSS 真方位観測の実施（国土地理院による技術協力）
- ・参照点の観測基線値の算出

##### ○草津白根山

- ・全磁力繰返し観測
- ・全磁力連続観測（中継点）における通信回線の LTE 化
- ・シズカ山基準点の新設  
観測点周辺の磁場環境再調査（徒歩磁気測量）  
柿岡構内での FRG-604RC と GSM-90 の試験観測開始  
設計事務所への発注、設備製作者への発注  
土建業者による待ち受け工事の契約  
土建業者による待ち受け工事  
職員のシズカ山出張による測器・通信機器の設置、運用開始

##### ○伊豆大島

- ・全磁力連続観測点(MIK1,2)の保守
- ・全磁力連続観測点における収録装置の更新
- ・全磁力繰返し観測
- ・東京大学地震研究所全磁力連続観測点での偏角・伏角測定（東大地震研の依頼）
- ・東京大学地震研究所 OSM 観測点における絶対観測、真方位観測（東大地震研の依頼）



[共同研究に係る関係官署及び所外関係機関]：

気象庁地震火山部火山監視課、地震火山技術・調査課、札幌・仙台・福岡管区気象台の各地域火山監視・警報センター、東京大学地震研究所、東北大学、国土地理院

[成果] :

## I. 定常観測

### ○全磁力の定常観測と観測データの評価

地磁気観測所で実施している全磁力連続観測（雌阿寒岳、草津白根山、伊豆大島）について、全磁力観測データと他項目の火山観測データとの比較検討を行い、雌阿寒岳および伊豆大島については全磁力変化の面的分布を把握するための全磁力繰返し観測を実施して熱活動の時空間的推移を調査した（図1）。これらの観測成果は火山監視課および各火山センターに共有し火山活動解説資料に掲載されたほか、火山調査委員会に報告した。

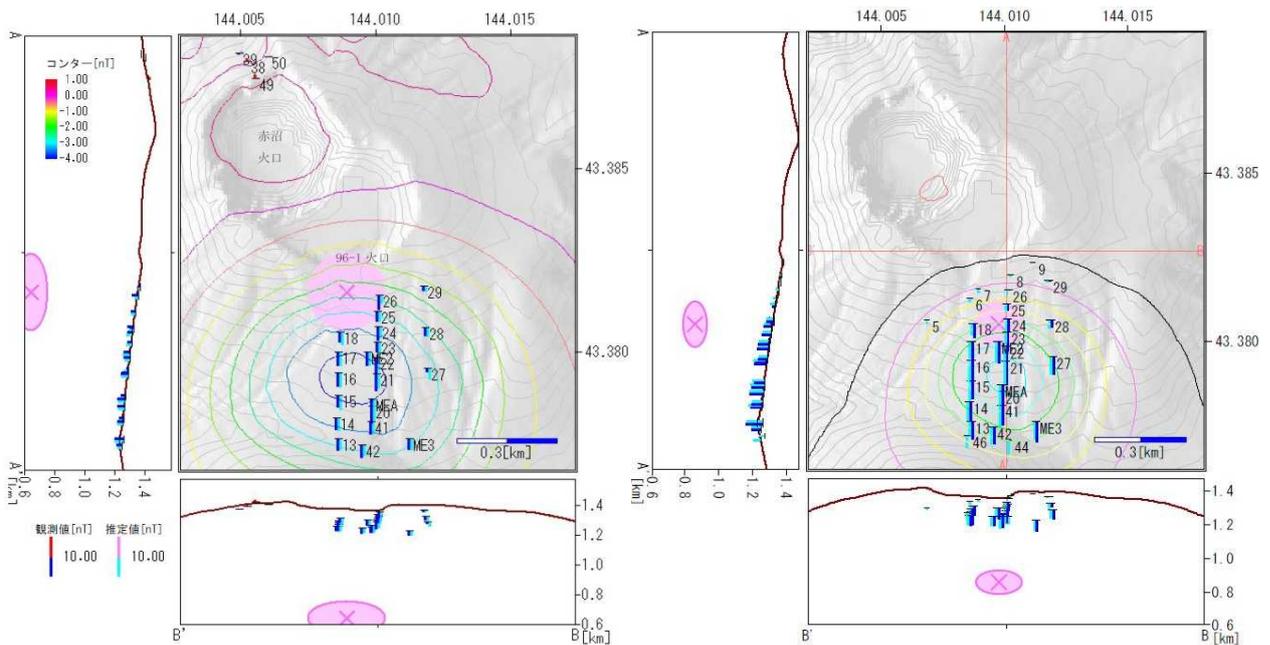


図1 雌阿寒岳における全磁力繰返し観測から推定される地下の熱消磁源

(左図) 2022年6月と2023年6月の観測結果から推定された熱源と地表面での影響量

(右図) 2023年6月と2024年6月の観測結果から推定された熱源と地表面での影響量

### ○全磁力連続観測点における通信回線のLTE化

雌阿寒岳では衛星回線から、伊豆大島ではFOMA回線からそれぞれLTE回線に更新し、草津白根山では新たにLTE回線を導入したとともに、データ収録装置をLinuxOSに更新したことで、地磁気観測所から直接データ同期を行う仕組みを整備した。これにより従来より安定したデータ伝送が実現した。

## II. 地磁気観測データのノイズ低減

### ○熱消磁源推定の高度化

火山における全磁力観測は、主に年1回程度行う多点での繰返し観測と、地点数は限られるが時間的に連続している連続観測とを合わせて行っている。地下の熱源は、同時に多点で行う繰返し観測により高精度に推定することが可能である。繰返し観測で推定された熱源情報を先験情報とし、拡張カルマンフィルタを用いて、数点の連続データから高時間分解能の熱源の変化を推定し、熱源の情報を確率密度で表現する手法を開発した（図2-4）。これにより、従来は1年に1回程度算出してい

た熱源情報を随時推定することができるほか、観測点の移設や増設に効果が高い地点を数値で知ることができるようになる。

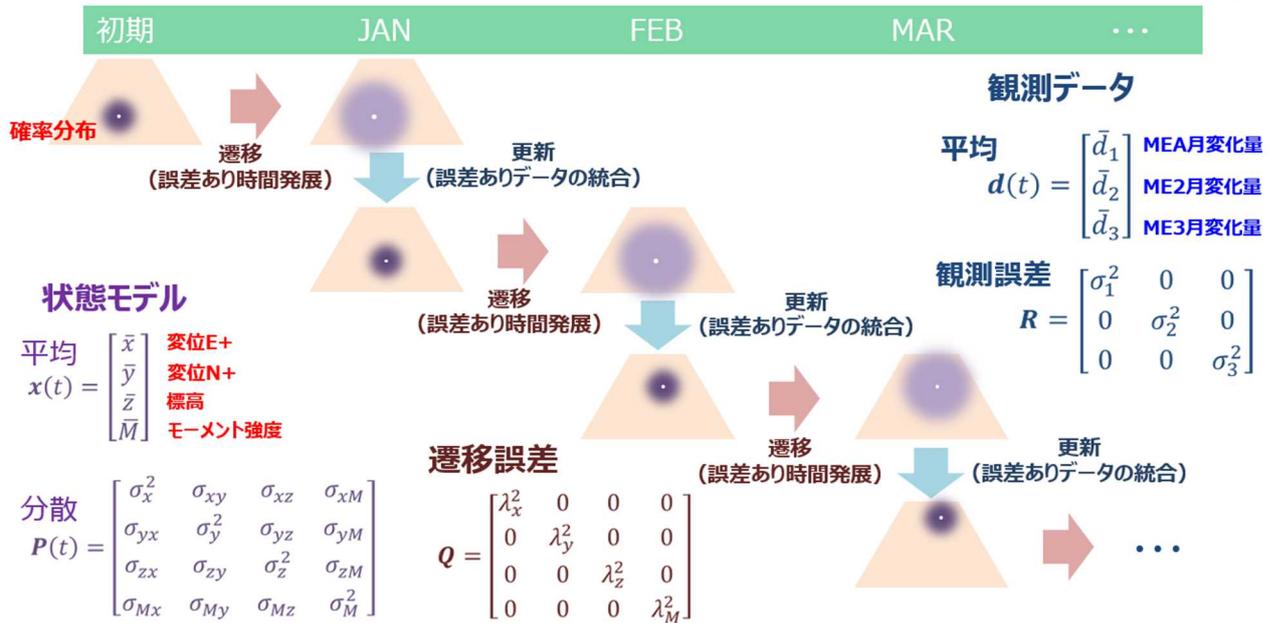


図2 開発した拡張カルマンフィルタを適用して状態モデルを時間発展させる熱源推定手法

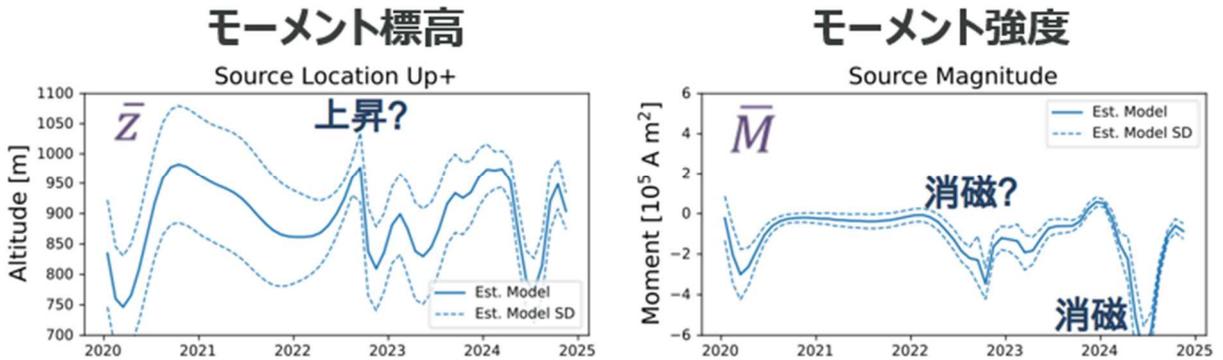


図3 開発した手法を用いて計算した熱源のモーメント標高（左）と強度（右）の時間変化

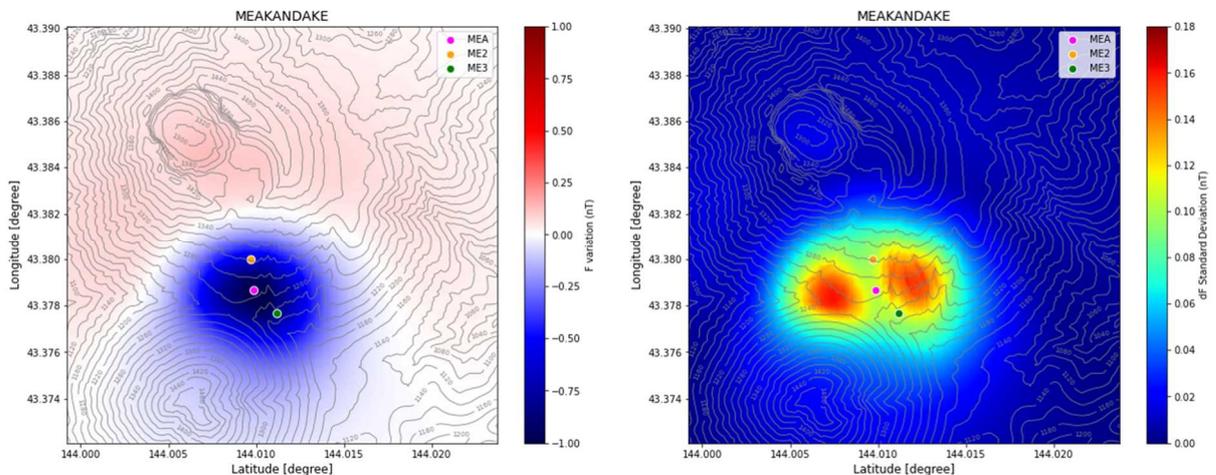


図4 最適モデルにより推定される地表面での全磁力変化（左）と誤差の分布（右）

### ○草津白根山山麓参照点（シズカ山参照点）の新設

草津白根山における地磁気観測の解析結果は、警戒レベルの判定基準にも採用されている。これまでその観測データは、東大地震研から提供される八ヶ岳地磁気観測所（草津白根山から 70km 程）のデータを参照として処理されてきたが、距離が離れているが故に除去しきれない地点差ノイズが存在していた。この問題を解決すべく、草津白根山から約 5km 南のシズカ山に全磁力（オーバーハウザー磁力計 GSM-90）と 3 成分（フラックスゲート磁力計 FRG-604RC）との 4 成分毎秒測定から成る参照点を整備した（図 5-6）。シズカ山参照点を用いることで、既存の八ヶ岳参照点との差分に比べ超高層起因の短周期ノイズを低減できることが確認された（図 7）。今後はシズカ山参照点と八ヶ岳地磁気観測所のデータおよび主地場衛星モデルをハイブリッドに使用することで、短周期ノイズを除去しつつ長期的に安定したデータを得ることが期待できる。

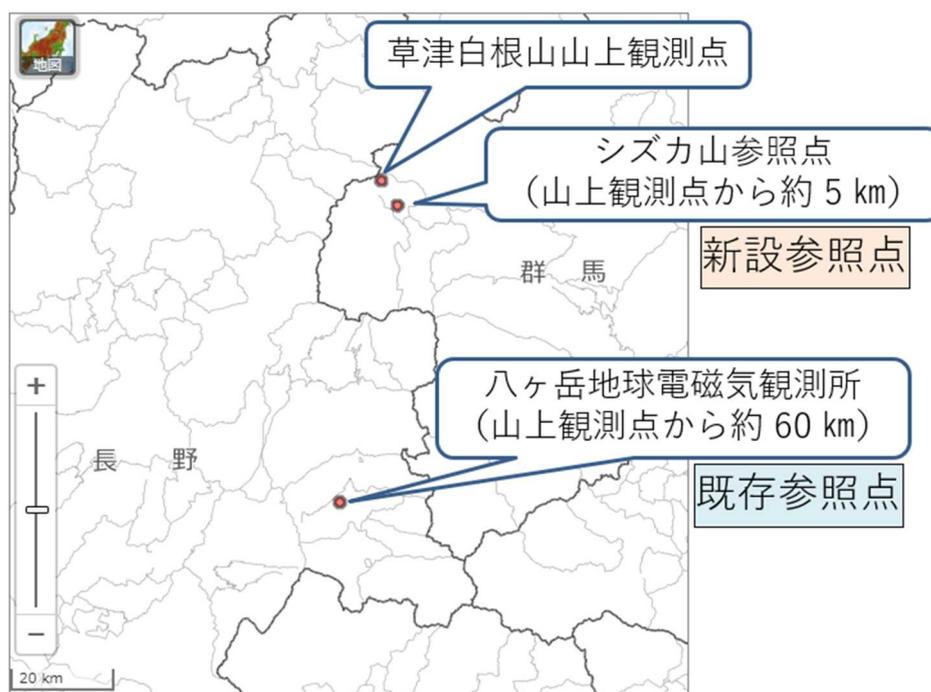
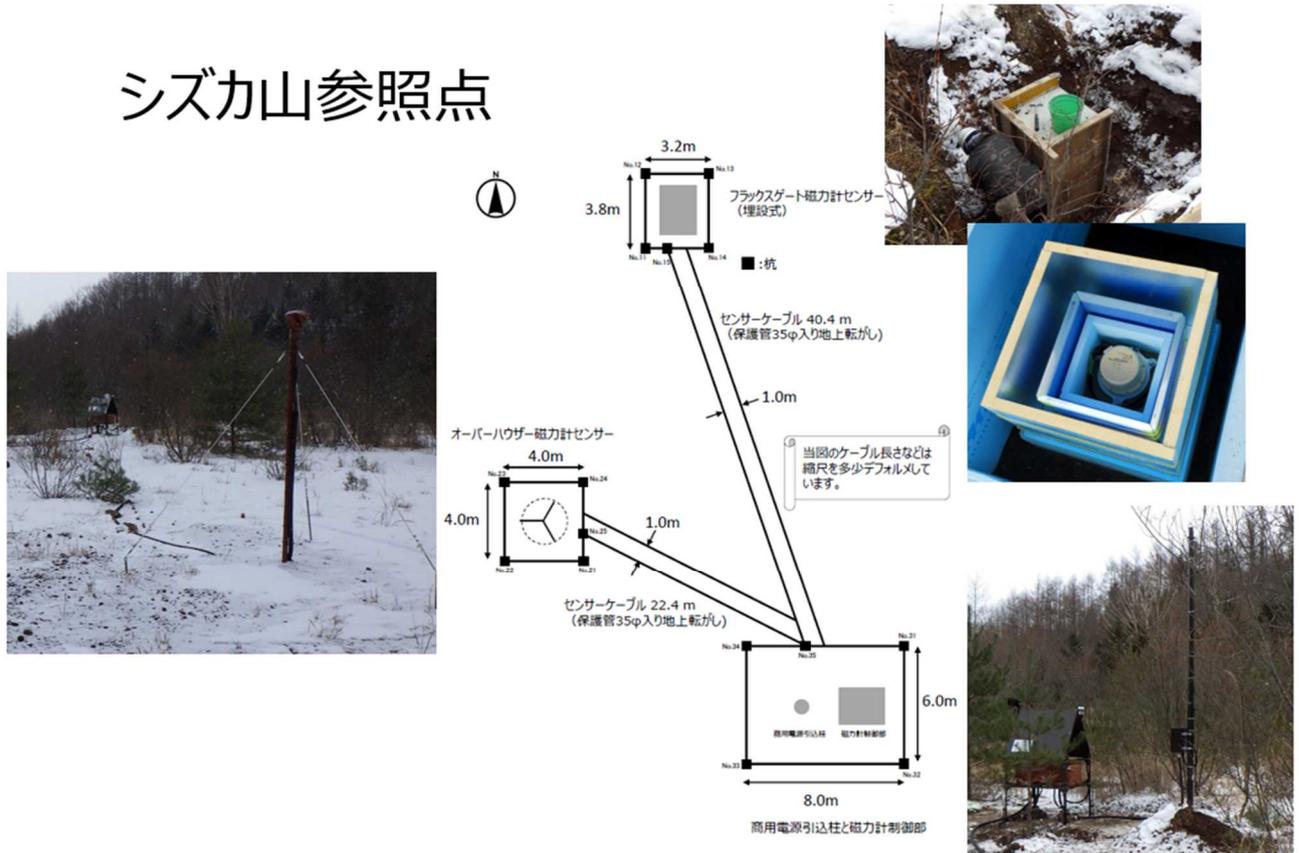
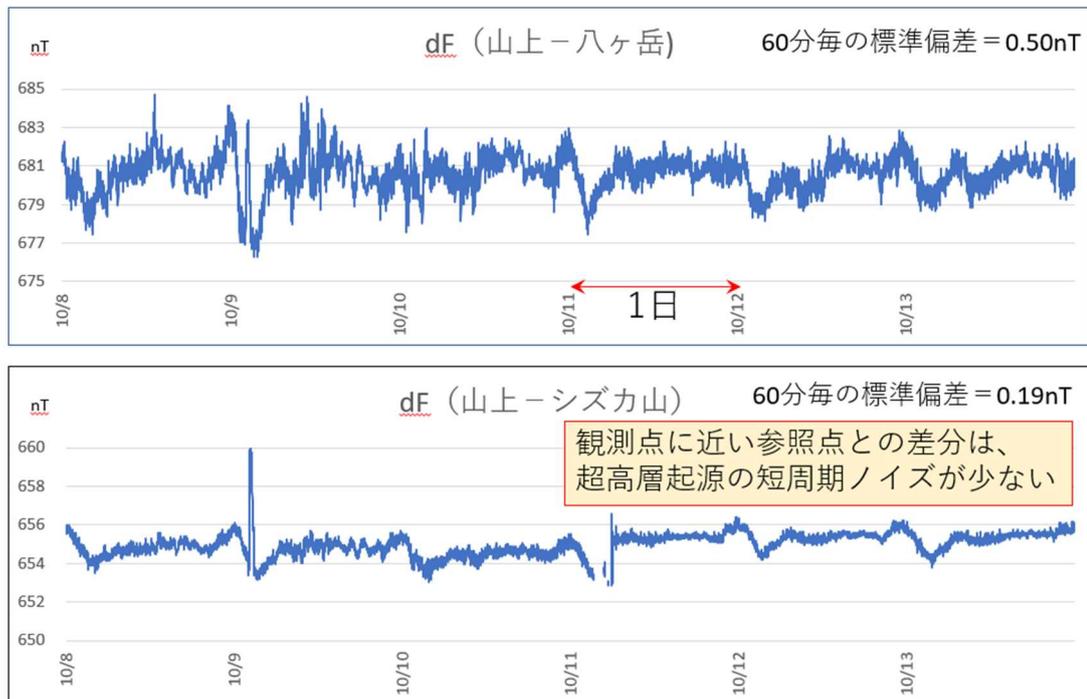


図 5 草津白根山山上観測点と既存および新設参照点の位置図  
地図の作成には国土地理院の地理院地図を使用した。

# シズカ山参照点



## 山上点と八ヶ岳、山麓点の全磁力差（毎分値）



○吾妻山における地磁気3成分繰り返し観測

吾妻山における地磁気観測の基準として用いている高湯参照点は、表層地盤が緩く傾斜が変動しやすいため、絶対観測を実施する地点に適していない。そこでこれに代わる成分参照点の候補地を浄土平にて選定した。

また、参照点の3成分変化計の値が温度に依存して大きく変動していることが判明した（図8）ため、収録機のアナログ回路に使われている分圧用抵抗器を温度依存性の低いものに改修した（図9、仙台管区火山センターにより実施）とともに、収録装置および収納ケースの断熱性を強化した。これにより温度の日周変化にともなう3成分観測値のドリフトを低減することができた（図10）。成分観測点における火山性の地磁気変化は数 nT/年程度であり、これを繰り返し観測により検出するには、少なくとも観測の実施期間（3~4日間）に渡り、参照点の成分データ日較差が 1nT 程度に収まるとより理想的である。次年度も更なる安定化に向けた調査を継続する。

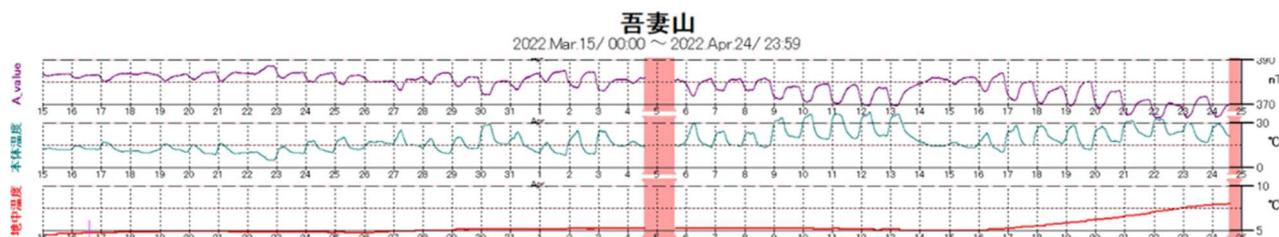


図8 高湯参照点における3成分変化計の値（上段）、本体温度（中段）、地中温度（下段）

	X (+5V)	Y (+0V)	Z (+5V)
改修前	0.278 nT/°C	0.267 nT/°C	0.340 nT/°C
改修後	0.116 nT/°C	0.013 nT/°C	0.078 nT/°C

図9 収録機のアナログ回路改修前後の3成分変化計の温度係数

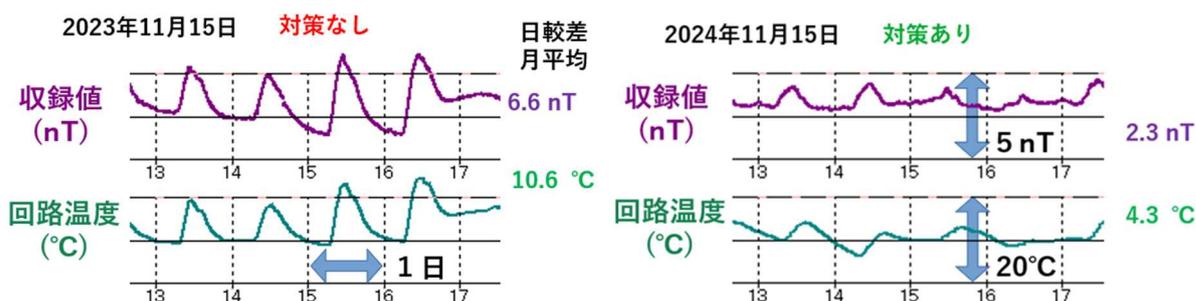


図10 収録機庫の断熱強化前後の3成分変化計の収録値（左図）および回路温度（右図）

### Ⅲ. 簡易型偏角・伏角の測器開発

火山観測点で簡便に偏角・伏角を観測するための測器について、観測手法のアルゴリズムを考案し、業者に委託して試作機を完成させた。今後はこれを用いてして地磁気観測所で試験観測を行い観測精度の検証等を実施した上、本庁整備6火山での偏角・伏角の測定を目指す。

### Ⅳ. データ処理；火山監視情報システム（VOIS）提供用の全磁力データ補正プログラムの実装

気象庁で連続観測を行っているすべての火山における全磁力データ（樽前山・安達太良山・吾妻山・

御嶽山・九重山・霧島山・雌阿寒岳・草津白根山・伊豆大島・三宅島) を火山現象の活動監視・評価に適するよう加工し地磁気観測総合処理装置から VOIS4 へ提供するプログラムを作成し、運用を開始した。プログラムは、フォーマット変換、パルスノイズ除去、各火山の全磁力参照点との差分、年周変化の補正、DI 補正、毎日値の生成の処理を自動で行い、補正されたデータ (図 11) が VOIS4 に自動で共有される。

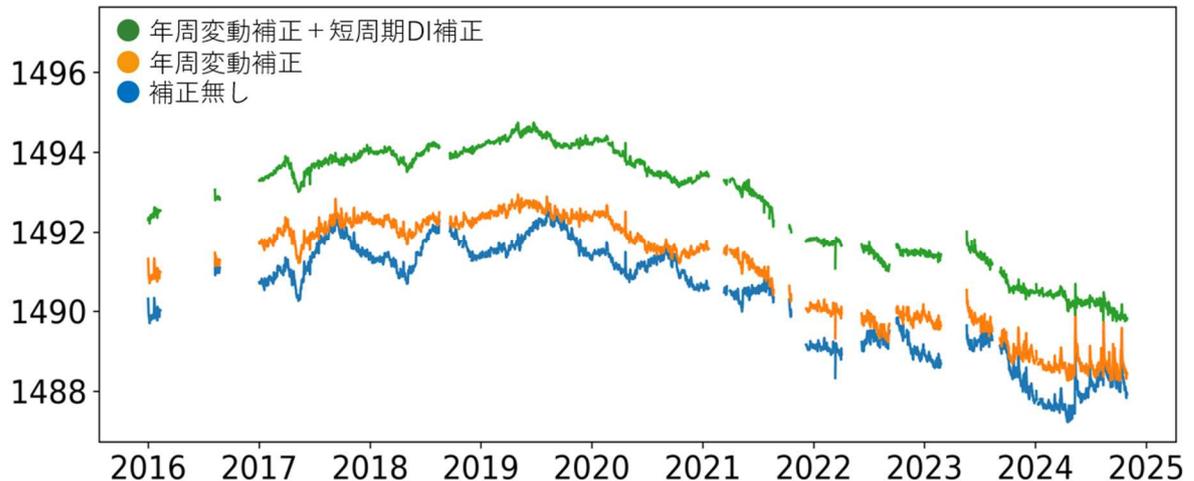


図 11 自動で処理を行った全磁力連続観測データ (樽前山)  
 (下段) パルスノイズ除去後の日平均値 (参照点との差分)  
 (中段) 下段に年周変動の補正を加えた日平均値 (参照点との差分)  
 (上段) 中段に短周期の DI 補正を加えた日平均値 (参照点との差分)

[成果の発表] :

- Seiki Asari, Shin Arita, Ryotaro Akimoto, 2024, Continuous observation of the total magnetic intensity for volcanic activity monitoring: a case of the 2022 thermal evolution of Azumayama Volcano, Japan, XXth IAGA Workshop
- 増子徳道, 地球電磁気学的手法による火山活動評価の高度化, 災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画 (第3次) 令和6年度成果報告シンポジウム
- 増子徳道, 地球電磁気学的手法による火山活動評価の高度化, 災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画 (第3次) 火山部会成果報告会
- 浅利晴紀, 2025, 雌阿寒岳における全磁力連続観測を用いた熱消磁源の時間発展の評価, 2024年度 CA 研究会
- 笹岡雅宏・浅利晴紀, 2025, 伊豆大島における全磁力観測に係る調査, 2024年度 CA 研究会

[調査研究の種別]：重点課題

[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、松浦 大輔、飯塚 ふうな、北山 拓、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1959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た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ことは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対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]：

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. 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：（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. 毎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：（実施済み）

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・徒歩）

令和 6 年度：（計画）

1. 現業用データ編集システムの設計
2. 現業用データ編集システムの構築

3. 現業システムの改良（基線値の補間方法の改善等）
4. 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
5. 観測精度向上のための観測施設の改良の検討
6. 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
7. 観測環境の把握（個々の車両の磁気モーメントの測定、磁気測量等）

### 長期的なロードマップ

ロードマップ	2024年度	2025年度	2026年度	2027年度
項目/行事	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	@ブラジル		@(柿岡)	

[共同研究機関（共同研究者）]：

極域環境データサイエンスセンター・国立極地研究所（門倉 昭 特任教授）

[本年度の成果]：

本年度は4か年計画の最終年度であるため、本報告では I.本年度の成果、II.4か年の成果、III.今後の課題と展望を記載する。

#### I. 本年度の成果

本年度の調査研究事項は、主に以下の3項目である。

1. オーバーハウザー磁力計のノイズ対策
2. 変化観測値の絶対値化
3. 現地隊員の観測支援の強化

以下では、それぞれの項目について報告する。

##### 1. オーバーハウザー磁力計のノイズ対策

昭和基地では2023年にオーバーハウザー磁力計（GEM社製GSM-90）を導入し、全磁力の毎秒連続観測を開始したが、設置当初からノイズレベルの高い状態が続いていた。昨年度の調査により、ノイズの原因がセンサポールの上部に固定しているアルミ製の円盤（センサカバーの台座）であり、センサを20cm程度かさ上げしてアルミ円盤から離すとノイズレベルがほぼ正常値まで下がることが確認できた。今年度はセンサをかさ上げる部材を調達し、取り付けた（図1）。

センサのかさ上げの効果を把握するため、水平距離で約 5m 離れた場所に携帯型のオーバーハウザー磁力計 (GEM 社製 GSM-19W) を設置し、かさ上げ前後で GSM-90 と並行して毎秒観測を行った (図 2)。GSM-90 と GSM-19W のかさ上げ前後でのノイズレベルの比較を図 3 に示す。ノイズレベルの目安として毎秒値の前後差 (ある時刻の全磁力値とその 1 秒前の全磁力値の差) の時系列を描画している。かさ上げ前の GSM-90 のノイズレベルは GSM-19W の 5 倍超だったが、かさ上げ後はほぼ同等にまで改善されたことが確認できた。

ノイズレベルの改善状況を確認するため、GSM-19W を AC100V 給電に切り替え、2 日間程度の長時間比較観測を実施した。その結果、概ね 06~18 時 (UT) に GSM-90 のノイズレベルが高まることがあることが分かった (図 4)。ノイズの混入する時間帯が明確なため、他の設備・機器からの人工的なノイズである可能性が高い。

センサのかさ上げによってノイズレベルの改善が見られたものの、ノイズレベルの悪化はアルミ円盤以外の要因もあることが確認された。今後はかさ上げ後に確認されたノイズについて、他の設備・機器の動作ログ等と比較し、原因の特定を進める。



図 1 かさ上げ前後のセンサの状態 (左上：かさ上げ前の内部、右上：かさ上げ後の内部、左下：かさ上げ前の外観、右下：かさ上げ後の外観)



図 2 かさ上げの効果確認のための比較観測

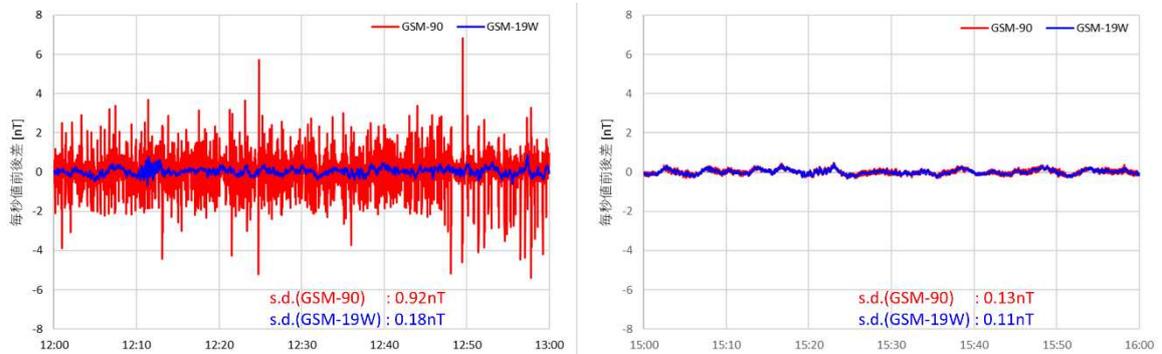


図 3 かさ上げ前後のノイズレベル（全磁力毎秒値前後差）の比較（左：かさ上げ前、右：かさ上げ後） 赤線が昭和基地の GSM-90、青線が比較用の携帯型の GSM-19W

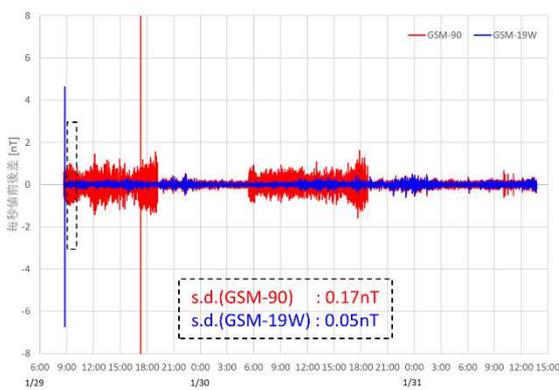


図 4 かさ上げ後の長時間比較観測時のノイズレベル（全磁力毎秒値前後差）、図中の s.d.は破線の 1 時間（2025-01-29 09:00～10:00UT）の前後差の標準偏差

## 2. 変化観測値の絶対値化

インターマグネットが公開しているデータ処理ツール MagPy と自作のデータ処理プロ

グラムを組み合わせ、2024年の1年間について変化観測値を絶対値に変換した。データ処理の流れは以下の通りである。

1. 極地研究所のデータ公開ページより変化観測ファイルと全磁力連続観測ファイルをダウンロード
2. 変化観測ファイルと全磁力連続観測ファイルを MagPy で読み込める形式でマージ
3. 絶対観測野帳(PDF)を Excel に入力し、MagPy で読み込める形式で出力 (図 5)
4. MagPy で 2 と 3 を読み込み、観測基線値を計算
5. MagPy で観測基線値をスプライン補間 (図 6)
6. MagPy で 2 に 5 でスプライン補間した基線値を適用し、変化観測値を絶対値へ変換 (図 7)

The figure shows two documents side-by-side. The left document is a handwritten observation notebook with multiple tables and notes. The right document is an Excel spreadsheet with several data tables and labels.

**Figure 5: Absolute Observation Notebook (Left) and MagPy Output Excel (Right)**

**Table 1: Absolute Observation Notebook (Left)**

VC	Time (UT)	read1	read2
L	10:04:27	22 22	22
R	10:04:27	22 22	22
R	10:04:27	22 22	22
L	10:04:27	22 22	22

**Table 2: Absolute Observation Notebook (Left) - Position Data**

VC	sensor	V	Time (UT)	read1	read2	LC
1	N	Up	10:55:20	21	22	26
2	N	Down	10:55:20	21	22	26
3	S	Down	10:55:20	21	22	26
4	S	Up	10:55:20	21	22	26

**Table 3: Absolute Observation Notebook (Left) - Inclination Data**

VC	sensor	V	Time (UT)	read1	read2
1	W	Up	11:13:00	12	12
2	W	Down	11:13:00	12	12
3	E	Down	11:13:00	12	12
4	E	Up	11:13:00	12	12

**Table 4: MagPy Output Excel (Right) - T.Mark**

VC	Time (UT)	read1	read2
L	10:04:27	22	22
R	10:04:27	22	22
R	10:04:27	22	22
L	10:04:27	22	22

**Table 5: MagPy Output Excel (Right) - Destination**

VC	sensor	V	Time (UT)	read1	read2	LC
1	N	Up	10:55:20	21	22	26
2	N	Down	10:55:20	21	22	26
3	S	Down	10:55:20	21	22	26
4	S	Up	10:55:20	21	22	26

**Table 6: MagPy Output Excel (Right) - Inclination**

VC	sensor	V	Time	read1	read2
1	W	Up	11:13:00	12	12
2	W	Down	11:13:00	12	12
3	E	Down	11:13:00	12	12
4	E	Up	11:13:00	12	12

図 5 絶対観測野帳 (左) と観測値を MagPy 形式に変換出力するための Excel (右)



図 6 MagPy で計算した観測基線値 (●) とスプライン補間結果 (実線)

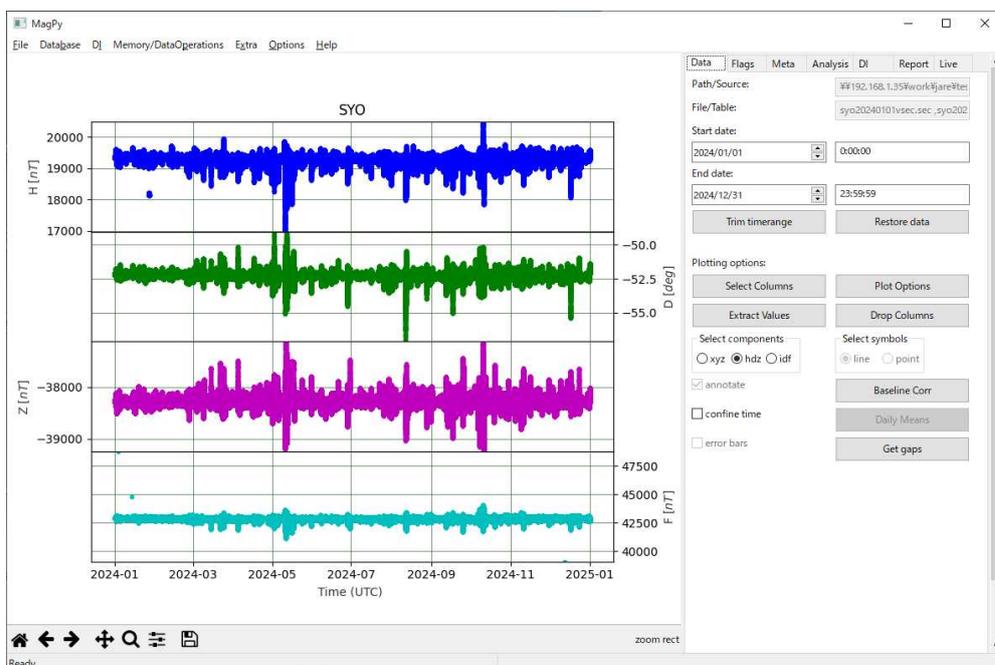


図 7 変換後の 2024 年の絶対値 (上から H 成分、D 成分、Z 成分、F 成分)

2024 年では 54 日 96 セット (4 姿勢で 1 セット) の絶対観測 (弱磁場方式) を行った。H 成分の観測基線値で 4 月と 5 月の境に 10nT 程度のギャップが発生し (図 6 の赤矢印)、その後数か月かけて戻るような変化が確認された。このギャップ前後の 4 月最後から 5 月最初の絶対観測の期間の全磁力  $F$  と絶対値化した毎秒値から計算した  $A$ -value (オーバーハウザー磁力計の全磁力値  $F_{OHM}$  とフラックスゲート磁力計の合成  $F_{FM}$  の差、 $A\text{-value} = F_{OHM} - F_{FM}$ ) を図 8 に示す。4 月 28 日の絶対観測時の  $A$ -value と 5 月 3 日の絶対観測時の  $A$ -value に 3nT 程度の変化が見られる (図 8 の青線)。また、4 月 29 日 6 時あたりの本来

A-value が一定であるべき自然磁場変動が小さなタイミング (図 8 の赤枠) でも A-value に 3nT 程度の変化が見られる。仮にフラックスゲート磁力計の H 成分が機械的な問題で +10nT 変化したと仮定すると、H の基線値では -10nT、A-value では -4.5nT の変化となって現れ、H 基線値の 5 月のギャップを概ね説明できる。また、A-value の不自然な波状の変化が他の期間にも確認された (図 9)。これらのデータだけで、H 基線値のギャップの原因がフラックスゲート磁力計の異常だとは言いきれないが、これを手掛かりに引き続きギャップの原因を探る予定である。

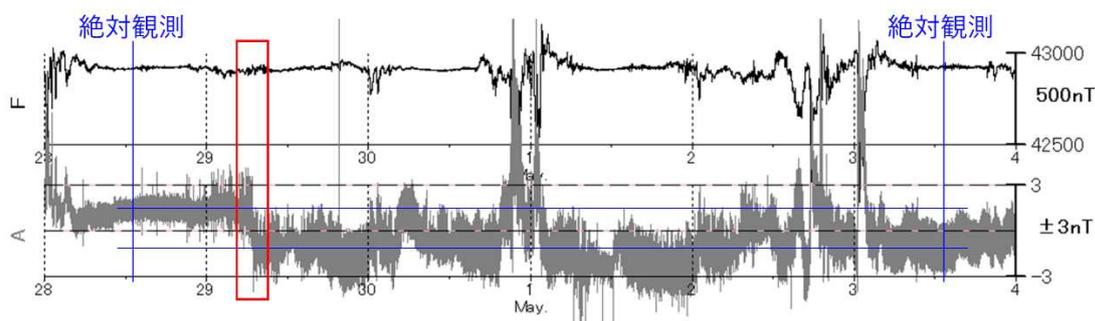


図 8 H 成分基線値のギャップ付近の全磁力と A-value (2024 年 4 月 28 日～5 月 3 日)

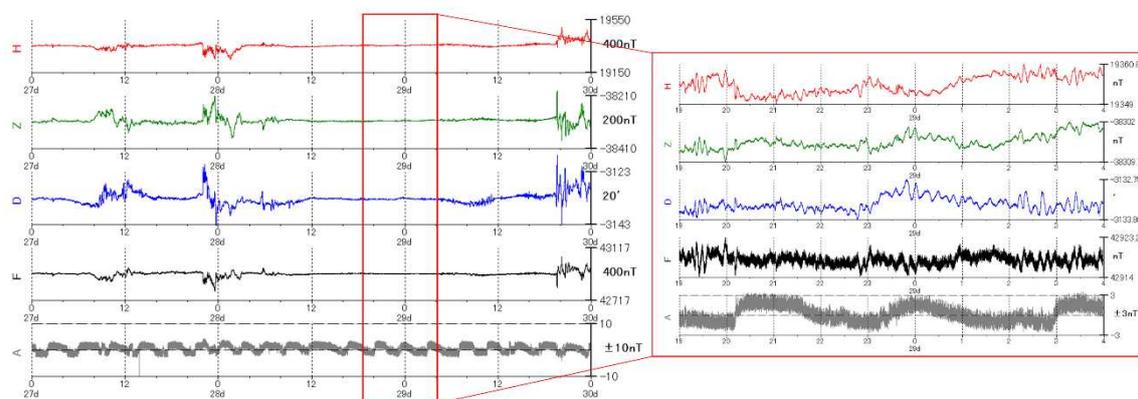


図 9 A-value の異常な変化 (2024 年 5 月 27 日～29 日)

### 3. 現地隊員の観測支援の強化

高精度で安定した地磁気データの取得には、実際に観測を担当する現地隊員の協力が欠かせない。現地隊員の観測技術の維持・向上のため、以下の 2 つの取り組みを行った。

地磁気絶対観測では磁気儀 (地磁気を精密に測る測量機器) の繊細な取り扱いが求められる。昭和基地で絶対観測を担当する隊員は、8 月頃に栂岡で機器取扱い・観測の訓練を受けた後、次に磁気儀を扱うのが 1 月の現地引継ぎであり、これまでの隊員経験者から国内での観測練習の機会の充実を望む声が多かった。一方、昭和基地の磁気儀は非磁性のセオドライト (Carl Zeiss Jena 製 THEO 010B) に高分解能の 1 軸磁力計 (Bartington 製 Mag-

01H、最小分解能 0.1 nT) を乗せたものであるが、昭和基地で使用しているものと同じモデルの磁気儀の入手は非常に困難である。操作の習熟のための国内(極地研敷地内)での使用ではそこまでの性能は不要であるため、非磁性ではないが THEO010B と全く同じ操作性である THEO010A に簡易型磁気センサモジュール(WitMotion 製 HWT901B、最小分解能 8.3 nT) を取り付けることで、練習用の磁気儀を開発・導入することができた(図 10)。

また、絶対観測の手順や注意点についても復習したいという要望があったため、絶対観測の流れを一通り撮影し、野帳への記入方法や注意点を載せた絶対観測練習用動画を作成した(図 11)。



図 10 国内練習用磁気儀



図 11 作成した絶対観測練習用動画

## II. 4 年間の成果

将来的なインターマグネット観測所への登録を目標に、以下の 3 つの観点で調査を進めてきた。詳細な報告は当該年度の報告書に記載している。

1. 測器の改良・導入
2. 観測点の運用・データ処理
3. 観測環境の把握

### 1. 測器の改良・導入

フラックスゲート磁力計は温度変化による影響を大きく受ける。温度変化による影響を低減するため、センサ庫の断熱・保温対策を段階的に進め、センサ温度の日周変化に対しては、対策前の約 10 分の 1 まで小さくすることができた (R3 年度)。

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ため、オーバーハウザー磁力計 (GEM 社製 GSM-90) を導入し、毎秒連続観測を開始した (R4 年度)。その後、ノイズレベルが高

いことが確認され、主な原因がセンサを固定しているポールの上部に固定しているアルミ製の円盤であることが分かった (R5 年度)。ノイズレベルを下げるため、センサをかさ上げる部材を設置し、概ね正常のレベルまで下げることができた (R6 年度)。

## 2. 観測点の運用・データ処理

地磁気データの絶対値化のため、絶対観測と変化観測を組み合わせてデータを処理し、変化観測値を絶対値化するシステムを構築した (R4~6 年度)。

絶対観測の頻度は、これまでは月 1 回だったが、インターマグネット観測所の推奨基準 (週 1 回) に準拠するため、観測頻度を上げる必要があった。観測隊の運営として絶対観測にかかる労力を大幅に増やすことはできないため、絶対観測の方法や手順を再検討し、主に観測方法をゼロ磁場方式から弱磁場方式へと変更することで高頻度化を実現した (R3 年度、R6 年度)。

偏角の絶対観測で方位角の基準とする方位標の真方位角 (地理的北からの方位標の角度) は半世紀以上前の第 10 次隊で測定された値を使い続けている。第 10 次隊では観測小屋の屋根を付ける前に太陽の天測で真方位角を求めたらしいが、屋根のある現在では同じ方法で測ることはできない。方位標の真方位角は、定期的に測定して健全性を確認することが望ましいため、昭和基地で今後も継続的に高精度で少ない労力で真方位角を得る方法として GNSS 測位を利用することにした。GNSS 測位は国土地理院の隊員が毎年行っているため、その隊員の協力により測定を行った (R3 年度、R5 年度)。

高精度で安定した地磁気データの取得には、実際に観測する現地隊員の協力が欠かせない。現地隊員の観測技術の維持・向上のため、国内練習用の磁気儀の導入と絶対観測練習用動画の作成を行い、現地隊員の観測支援を強化した (R6 年度)。

## 3. 観測環境の把握

高精度で安定した観測を継続するためには、自然および人工の地磁気観測環境の把握が必要である。

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 サンプル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。東オングル島全体の観測では、過去の格子間隔約 200m の磁気測量の結果と調和的であり、その間を埋めるデータを取得できた。地磁気変化計室 (地磁気絶対観測点) 近傍の約 5m の格子間隔の観測では、フラックスゲート磁力計センサやオーバーハウザー磁力計センサ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。参照点候補地 (第 1HF レーダーサイトの南東側) の約 20m の格子間隔の観測では、観測領域のほとんどの地点で磁気勾配が小さく、参照点に適していることが確認できた (R5 年度)。

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46 tonだった。新夏宿の影響調査のため、常設の9点の環境監視点（全磁力繰り返し観測点）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。その結果、新夏宿の地磁気観測施設への影響はほぼないことが確認できた（R5年度）。

昭和基地では様々な重機や雪上車等の車両が運用されており、これらの影響を避けるため、絶対観測時にはすべての車両に一律で通行制限を行っている。各車両による擾乱量を把握することで、通行制限対象を必要最小限の車両のみにすることができ、観測隊全体の負担を減らすことができる。全磁力繰り返し観測を応用し、車両の擾乱量を把握する手法を開発した（R3年度）。また、17台の重機・雪上車について測定を行った（R6年度、未処理）。

### III. 今後の課題と展望

今回の調査研究により、絶対観測と変化観測を組み合わせてデータを処理し、変化観測データを絶対値化するシステムを構築することができたが、プロトタイプであり、改良すべき点は多い。例えば、以下の作業を予定している。

- 各プログラムの連携を見直し、より簡単で手間のかからない処理への改良。
- 絶対観測結果の良否の評価を様々な観点（例えば、方位標読み取りの妥当性や1セクト4姿勢観測での個別の姿勢ごとの妥当性の評価）から自動で行う処理の追加。
- メンテナンスや観測障害時の欠測処理、異常値処理の簡素化。
- 絶対観測基線値の計算でのオーバーハウザー磁力計を使用しない処理の追加（オーバーハウザー磁力計の障害時やオーバーハウザー磁力計導入以前のデータの処理のため）。

また、今回の絶対値化では、まだインターマグネットの基準を満たす精度に達していない。以下のことに取り組み、徐々に精度を向上させる予定である。

- フラックスゲート磁力計の出力異常の可能性の調査（A-valueの異常変化の原因調査）
- 観測基線値の補間方法の最適化
- フラックスゲート磁力計センサの夏期の傾斜変動に対する補正処理（フラックスゲート磁力計の更新時期によりセンサ吊り下げ式の導入も検討）
- フラックスゲート磁力計センサ庫の温度環境の改善（非磁性ヒーターでの温度制御）
- フラックスゲート磁力計処理部の温度環境の改善
- オーバーハウザー磁力計のノイズ源の特定

これらの改善によりインターマグネットへの登録を目指す、登録申請の提出データや提出資料の準備、準リアルタイムでの地磁気世界資料センター京都（WDC 京都）へのデータ提供を並行して進めていきたい。

インターマグネット登録後は、その知見とデータ処理システムを応用して、過去の変化観測データの絶対値化を行いたい。昭和基地は1966年に現在の地点での観測を開始し、1981年から変化計データがデジタル収録されている。収録装置や磁気儀の更新等により、古いデータほど品質は落ちるが、極域における重要な観測点である昭和基地の1～2秒サンプリングの連続的な絶対値が半世紀近くの期間にわたり公開できることになる（図12）。

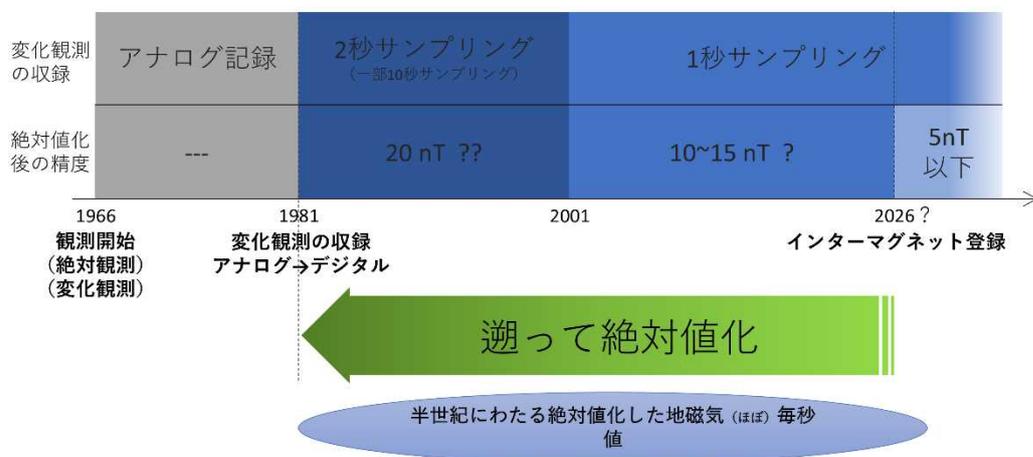


図12 変化計データの過去にさかのぼった絶対値化の計画

[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、ハンドスケールリングと呼ぶ）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。ハンドスケールリングには、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ル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、H 成分についてはほぼ及第点と言える正答率が得られるモデルを構築することができた\*5。引き続き、D 成分においてもモデル構築を行い、H 成分と同等以上の精度を目指す。

[工程表] :

- 1.D 成分判定に用いる特徴量の抽出
- 2.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] :

1989年～2019年の30年間のデータを用いて、D成分のK指数判定を試みた。K $\geq$ 8の事例は当該期間においては存在しなかったため、機械学習モデルを構築することは出来なかったが、K $\geq$ 8という極端な事例では最大値と最小値の較差のみで判定して問題ないと考えられる。

K=7の判定では、0-3時の時間帯以外では機械学習の必要はなく、最大値と最小値の較差のみで判定してほぼ問題ないことが分かった。一方で日変化が大きい0-3時では勾配ブースティング決定木アルゴリズムを用いた機械学習判定を導入した。その結果を表1に示す。

表1 : D成分 K=7 の判定結果

		予測値		正答率 (%)
		$\leq 6$	7	
確定値	5		0	
	6		5	
	7	0	25	100
正答率(%)			83	

確定値でK=7のものは見逃すことなく判定できており（見逃し率0%）、空振りの事例もK=7の閾値に非常に近いK=6を判定したもので、大きな誤判定ではなかった。

D成分のK=7判定は及第点に達したと考えられる。今後はK=6以下の判定を担うモデルを構築していきたい。

[成果の発表] : なし

[参考文献] :

- \*1 Menvielle, M., Papitashvili, N., Häkkinen, L., Sucksdorff, C., Computer production of K indices: 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 5 年度地磁気観測所調査研究業務成果報告書



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及び間隙の熱対流に伴う温度変化を同時に取り入れた。

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\*1,\*2。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\*3。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\*4。ここでは、伊豆大島のスコリア（1~3m）について、60%の間隙率、かつ1時間に3mの深さまで透水することを想定する。

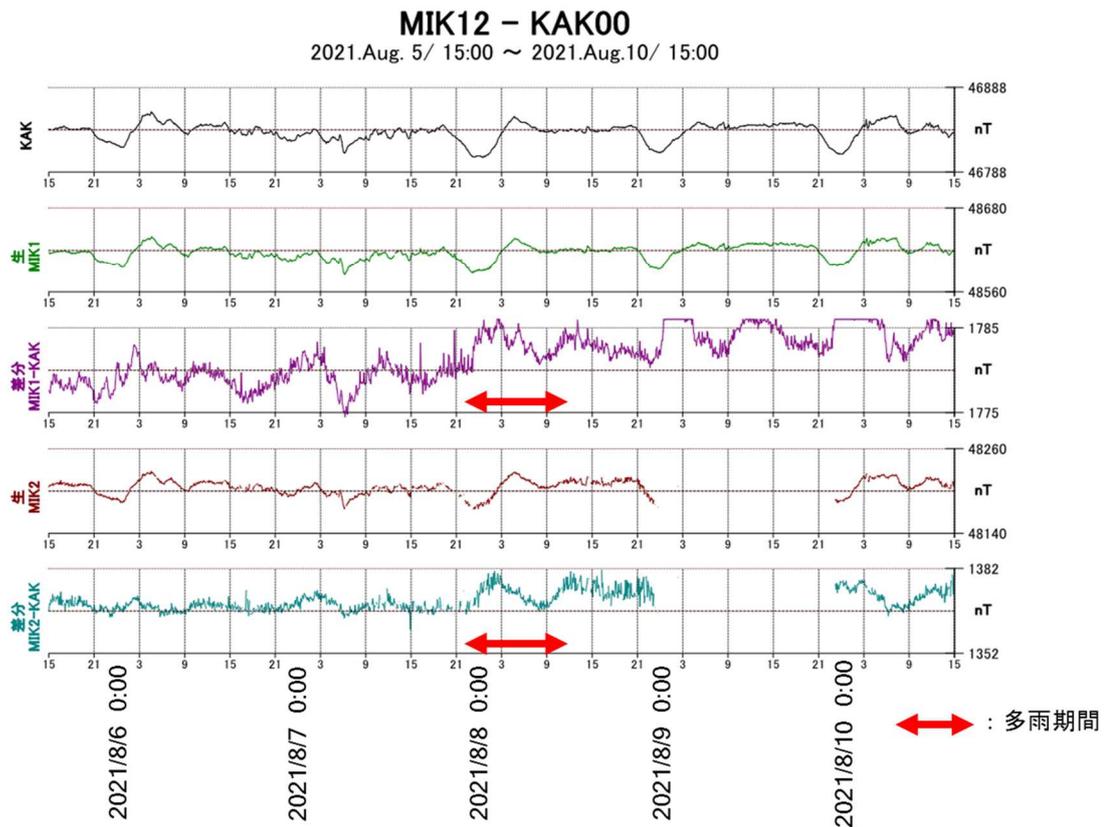


図1 伊豆大島 (MIK1,2) の全磁力観測 (5分サンプリング)

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し、冬季はその逆の温度変化が発生するとともに地上付近の冷氣沈降による熱対流が期待される(図2)。

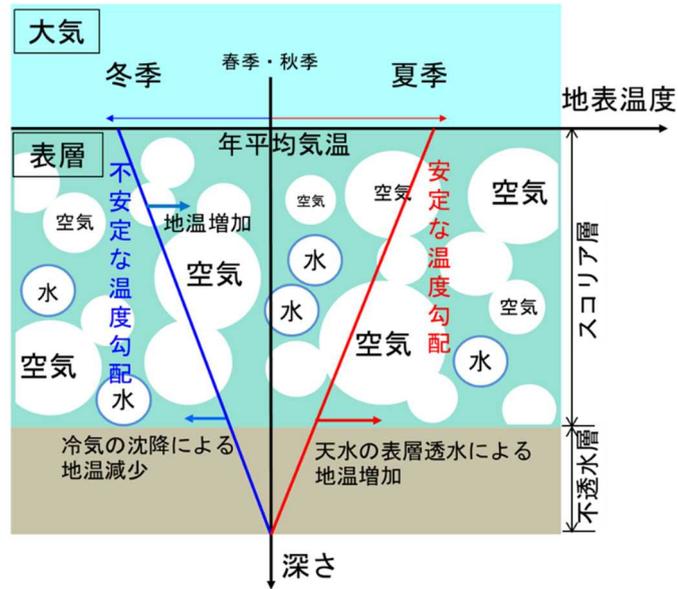


図2 スコリア層の温度勾配の季節変化の概念図

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。

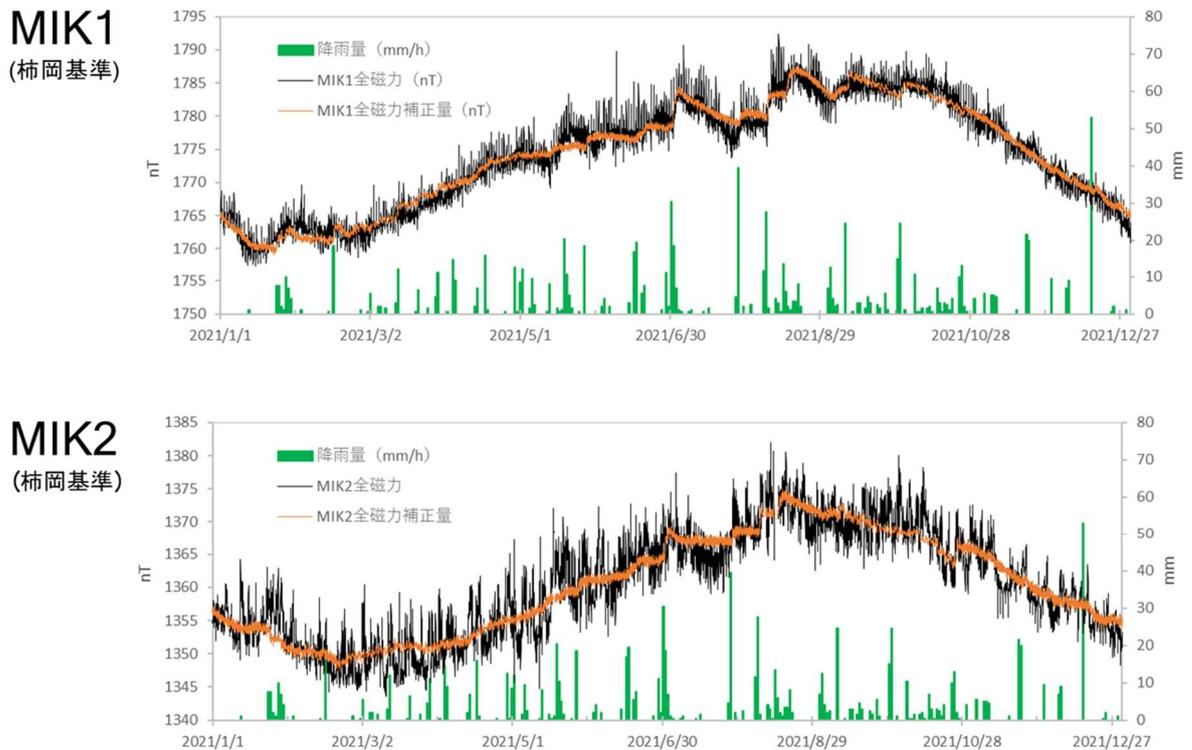


図3 全磁力と全磁力補正量との比較

図3に2021年の全磁力観測とその補正量を示す。概ね良好な補正量が求められている。図4に2021～2024年の全磁力観測とその補正量を示す。全磁力は漸増の傾向を示すが、補正量はそのような傾向はないことが分かる。図5に補正後の全磁力を示す。概ね表層透水の影響が除去されている。今後は岩

石磁気の大きさを実測して調査研究に反映させたい。

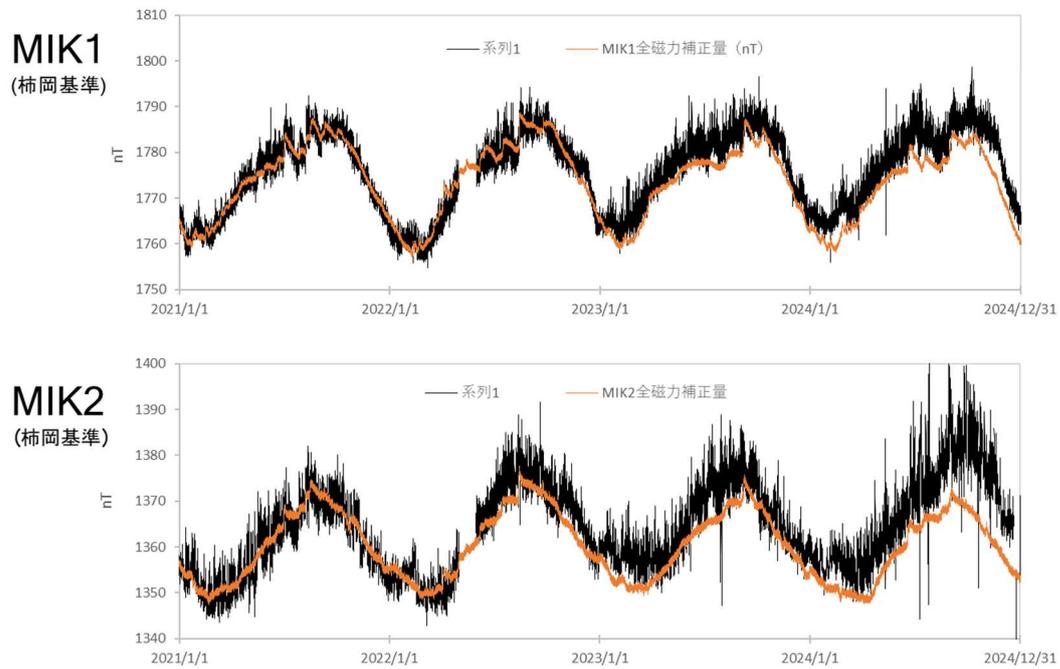


図4 全磁力観測とその補正量

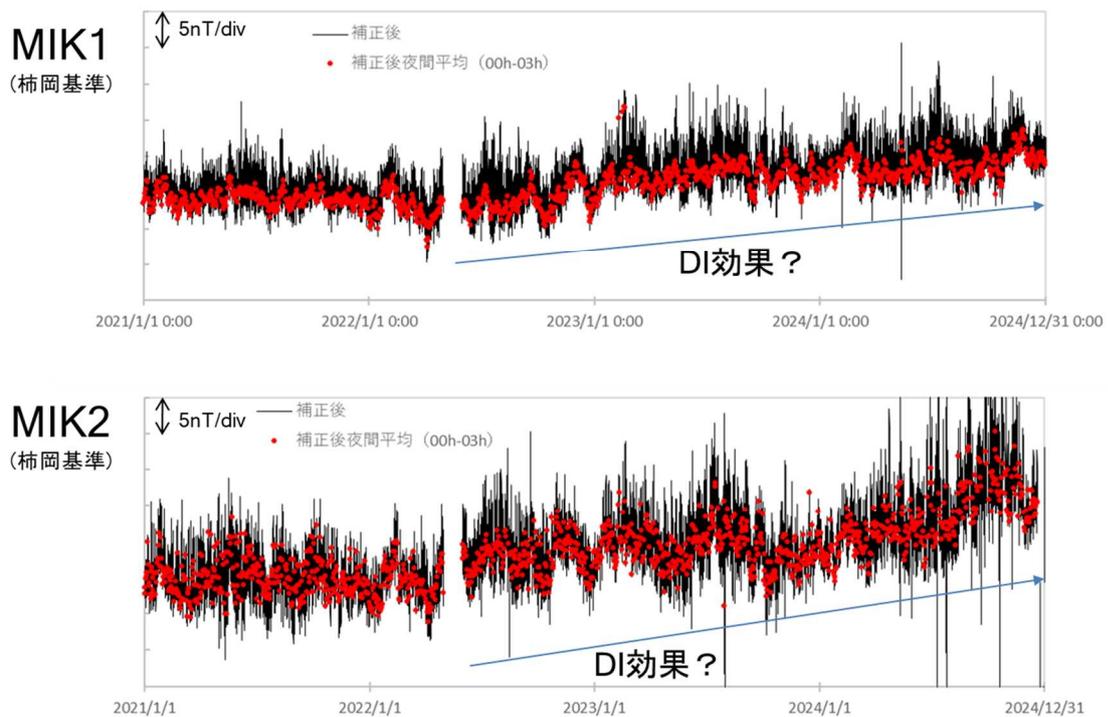


図5 表層透水により全磁力観測に影響する可能性のある岩石の位置 (赤字箇所)

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, 熱特性および透水特性に関する文献調査, 応用地質, 29 巻, 3 号, 36-47, 1988
- \*2 土木学会岩盤力学委員会, 熱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, 土壌の熱物性, 熱物性, 3 巻, 1 号, 31-39, <https://doi.org/10.2963/jjtp.3.31>, 1989

[成果の発表]:

笹岡雅宏, 浅利晴紀, 伊豆大島における全磁力変動に係る調査, 2024 年度 C A 研究集会, 2025

[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4)

[担当者]：○浅利晴紀、松浦大輔、屋良朝之、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ろうが、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。

令和4年度までの調査研究(その1、その2)では、観測点の地磁気変化特性の相違を調べるため、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。

そこで昨年度の調査(その3)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た。鹿屋(kny00,hrg)と女満別(mmb00,mmb01)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にすることを目指して夜間データを収集し、それらのパワースペクトル推定を行った。その結果、周波数帯によっては顕著な振幅比があることから観測点固有の変化特性があることがわかった。そこで、本年度は位相特性の違いを調査するほか、観測点間の伝達関数を推定する。両観測施設において、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 スペクトル解析

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、位相のスペクトルを推定する。

② 地磁気変化特性の違いの評価

2地点間の伝達関数を導出して、それぞれの観測点の地磁気変化特性を評価する。

③ 伝達関数の導出

夜間値から推定した伝達関数から更に応答関数を求め、これを昼間のhrgデータに畳み込むことで人工擾乱の影響を受けていないkny00の地磁気変化の再現を試み、人工擾乱補正の作業にて参照としての利用に適するか評価する。

[工程表] :

令和6年						令和7年					
4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
①スペクトル解析											
			②地磁気変化特性の違いを評価								
						②伝達関数の導出					

[今年度の成果] :

今年度は女満別観測施設の主測器(mmb00)と副測器(mmb01)で観測された地磁気 3 成分 (水平・鉛直分力 HZ、偏角 D) について周波数解析を行い、それぞれの周波数応答特性を調査した。

・データセット

女満別観測施設の観測点 mmb00 と mmb01 に設置されている磁力計で観測した地磁気 3 成分毎秒値データを使用した。対象期間はそれぞれの観測点で磁力計が交換されていない 2015 年の 1 年間として、施設周辺からの人工擾乱を避けるため 15:00:00~19:33:03UT の夜間データを抽出した。また夜間データのうち、15-18UT の K 指数が 4 以上の擾乱日 (51 日分) だけを使用して周波数解析 (FFT) を行った。

・51 日分の周波数解析結果

15~18UT の K 指数が 4 以上の夜間データは 51 日分あり、mmb00 と mmb01 の毎秒値データを周波数解析した結果を図 1 に示す。平均振幅スペクトルを見ると、mmb00,01 両方で周期 10 秒付近の振幅が大きいことがわかり、両地点この周期帯のノイズを外部から受けている可能性がある。また、周期 3-5 秒付近では mmb01 だけ標準偏差が大きい周波数帯が見られる。これは 10 秒周期と比較しても mmb01 だけに見られる特徴であり、mmb01 付近からのノイズが日によってあったりなかったりするのかもしれない。また、同様にそれぞれの平均位相スペクトルを求めて位相差 (mmb01-mmb00) を計算すると、±1rad ほどの位相差が見られたが標準偏差も 3rad と大きく位相ズレの評価ができない結果となった (図 2)。

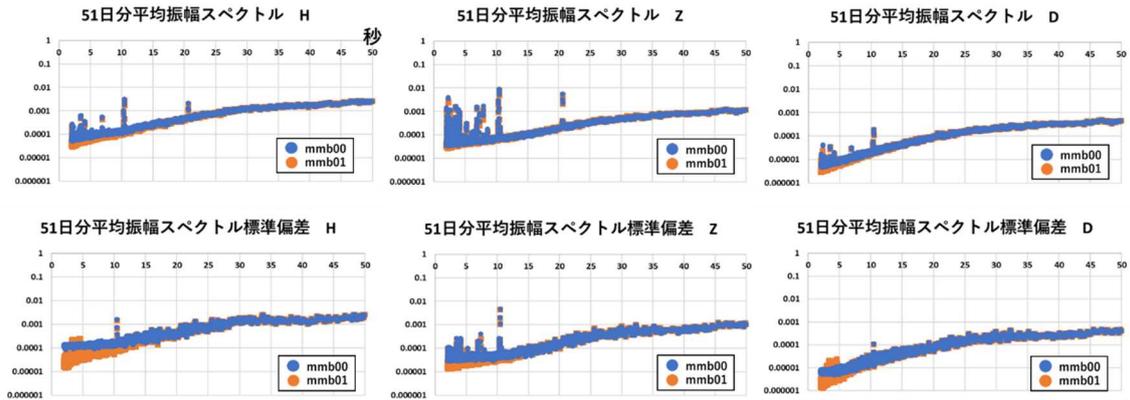


図1 51日分の平均振幅スペクトルと周波数毎の標準偏差  
 上段：51日分の平均振幅スペクトル（左：H成分、中央：Z成分、右：D成分）  
 下段：周波数毎の標準偏差（左：H成分、中央：Z成分、右：D成分）

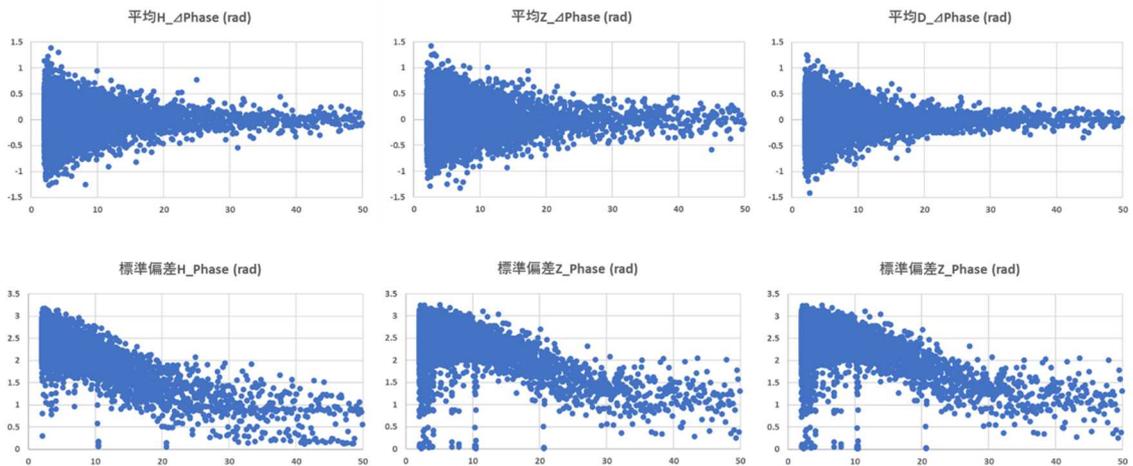


図2 平均位相スペクトルから求めた位相差 (mmb01-mmb00) とその標準偏差  
 上段：位相差（左：H成分、中央：Z成分、右：D成分）  
 下段：位相差の標準偏差（左：H成分、中央：Z成分、右：D成分）

・ 31日分の周波数解析結果

51日分のサンプルから平均位相スペクトルを求めると標準偏差が大きく評価できないので51日分のデータのうち、周波数毎に最大値、最小値を含むそれぞれ10データを除いて平均値を計算してスペクトルを出した。したがって得られる平均スペクトルは周波数によって別の日の値を平均していることに注意する。

31サンプルから平均値を求めて振幅スペクトルを求めた（図3）。51日分の平均値から求めた平均振幅スペクトルでは周期3-5秒付近の標準偏差がmmb00とmmb01で異なっていたが、31サンプルでは見られないことからやはり日によってノイズの有無があるのかもしれない。また周期10秒のピークは中央値付近のデータを平均しても現れることから

毎日ノイズの影響を受けていると考えられる。図4の平均位相スペクトルと位相差を見ると、標準偏差が2radと大きいままで位相差の評価はできなかった。

[まとめ]

今年度は女満別観測施設の観測点 mmb00 と mmb01 について周波数解析を行った。振幅スペクトルでは mmb01 に周期 3-5 秒のノイズが日によって影響を受けている可能性があることが分かった。また 10 秒周期のノイズは比較的広範囲に、毎日影響を受けていることが分かった。それぞれの平均位相スペクトルから位相差を調べたが、背景ノイズにより位相差を求められなかった。今後観測点間の位相差を評価する際は、リモートリファレンス法など別の手法を取り入れて解析する必要がある。

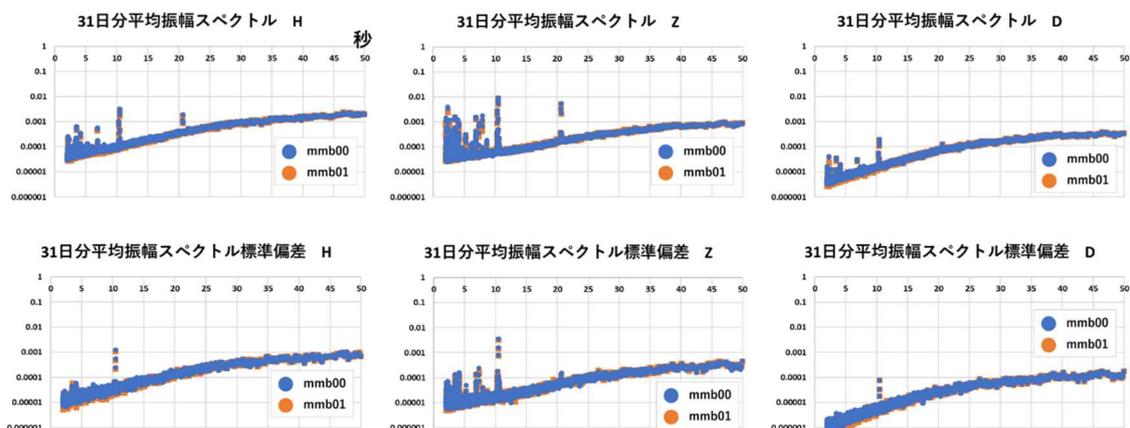


図3 31日分の平均振幅スペクトルと周波数毎の標準偏差

上段：31日分の平均振幅スペクトル（左：H成分、中央：Z成分、右：D成分）

下段：周波数毎の標準偏差（左：H成分、中央：Z成分、右：D成分）

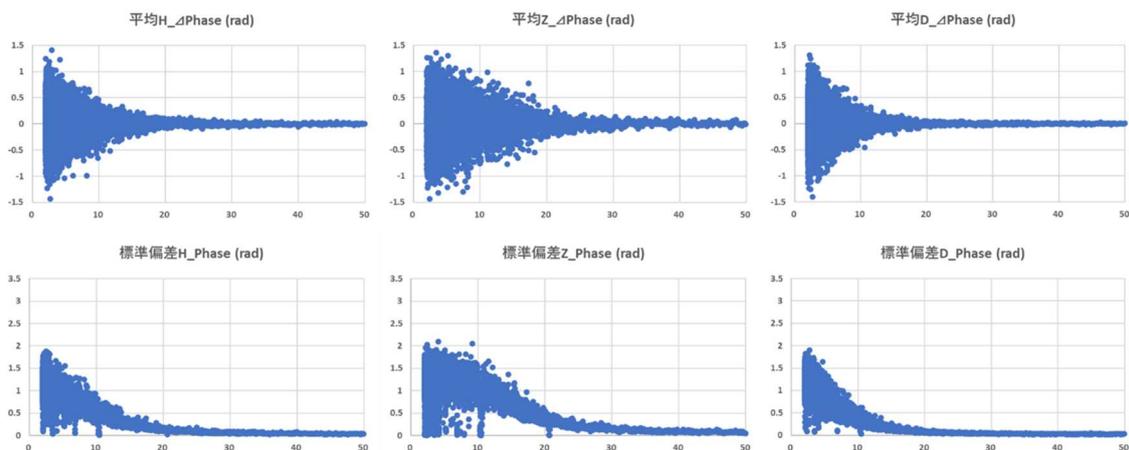


図4 平均位相スペクトルから求めた位相差 (mmb01-mmb00) とその標準偏差

上段：位相差（左：H成分、中央：Z成分、右：D成分）

下段：位相差の標準偏差（左：H成分、中央：Z成分、右：D成分）

[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（その2）

[担当者]：○森永健司、吉田昌弘、飯塚ふうな、長町信吾

[概要]：

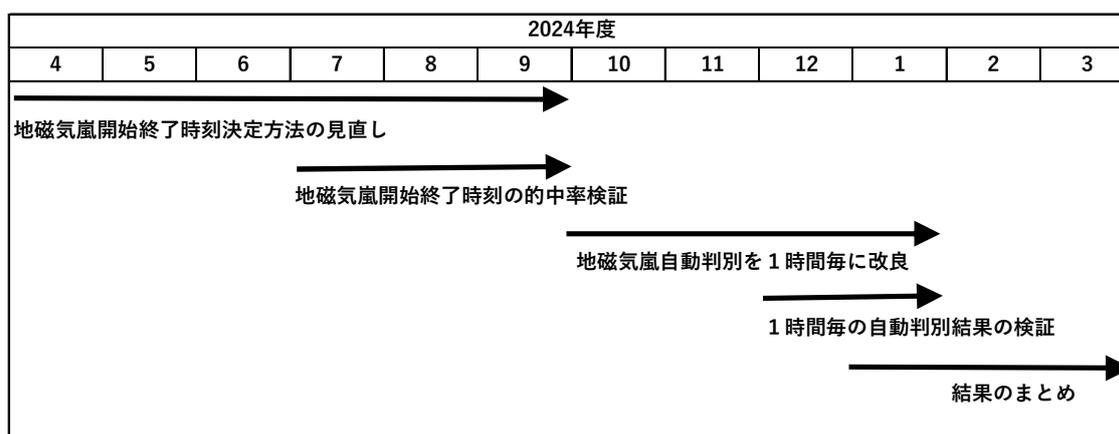
地磁気嵐の判定及び通報業務は IGY(1957 年)を契機に、観測課の当番業務として実施されている。しかしながら、当番業務は官執時間のみで、時間外(夜間 17 時～翌 08 時 30 分)に発生した地磁気嵐に関しては、当番者出勤後(08 時 30 分以降)まで地磁気嵐の情報が発信されない。

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。

本年度は、昨年度の調査で作成した自動判別ソフトウェアを改良し、地磁気嵐の開始終了時刻の決定精度の向上、判定間隔の短縮を目標とする。

[具体的な計画と達成目標]：

1. 昨年度作成した地磁気嵐自動判別ソフトウェアを改良し、地磁気嵐の開始終了時刻の判定精度を実用レベルまで向上させる。
2. 1 時間毎に更新される自動判定 K 指数を使用し、地磁気嵐自動判別の頻度を 1 時間毎に短縮する
3. 1 時間毎更新の地磁気嵐自動判別の的中精度を検証する。



[本年度の成果]

急始型地磁気嵐 (SSC) の判定精度を高めることを目的とし、人工衛星で観測されている太陽風速度、密度、太陽風磁場のデータも使用し SSC の開始時に発生する地磁気急変化現象 (SC) を判定することを試みた。

NOAA が運用している DSCOVR 衛星の太陽風観測データを使用できる 2017 年から 2022 年までに発生した SC を対象とし、SC に対応するの太陽風密度、速度、磁場の急変化の大きさ、および発生時刻を確認した。表 1 にこの期間に発生した SC に対応する太陽風の変化の一覧を示す。

表 1 を使用して、SC 発生時に太陽風データの変化を統計的に調査した。調査結果をもとにした SC 判定のフォローチャートを図 1 に示す。SC 判定方法を改良した地磁気嵐自動判定プログラム作成し。2012 年から 2022 年までの期間を対象として自動判定を実行した。地磁気嵐発生の判定条件は前年度と同様とし、SC の判定基準のみ変更している。また、2012 年から 2016 年の期間に関しては、太陽風データとして NOAA の ACE 衛星のデータを使用し、2017 年から 2022 年の期間は DSCOVR 衛星のデータを使用している。

改良前後の地磁気嵐自動判定プログラムによる判定結果を表 2 に示す。単純な地磁気嵐の判定結果で見ると、プログラム改良したことにより判定結果がやや悪くなっていた。ただし、表 3 に示すように、地磁気嵐の中時の地磁気嵐の型の一致率は改善されており、特に緩始型地磁気嵐 (SG) を SSC と判定していた事例は大きく減少している。的中事例の詳細を見ると、改修前のプログラムでは SSC を SSC として判定できた事例は 38 事例、SG を SG として判定できた事例は 29 事例であったが、プログラム改修後は SSC が 37 事例、SG が 37 事例となっていた。SSC の判定精度を上げることが目的であったが、SSC の判定条件を複雑にすることにより、SG を SSC として誤判定することが減少し、結果的に SG の判定精度が高くなるという結果となっている。

SSC の開始時間の一致率についても改修前後の比較を行った。改修前後で SSC を SSC として判定できている事例数はほぼかわらず、開始時間の一致率もほぼ同じという結果であった。SSC の開始時刻が大きくずれている事例は 9 事例あり、その原因を調査したところ、実際の開始時刻より前に SSC の発生と判定した事例は、全て SC に似た急変化現象が実際の SC より前に発生している事例であった。逆に実際の開始時刻より遅い時刻を発生と判定した事例は、SC の振幅が小さく判定できなかった場合と太陽風データが欠測していた場合で、SC の発生を見逃しており、その後の磁気嵐中の不規則な急変化現象を SC と判定してしまった事例であった。どちらも数はそれほど多くはないが、SC に似た急変化が連続して発生して開始時刻の判定を誤ったパターンに関しては地磁気嵐の主相開始時刻の精度を上げることにより解消できる可能性がある。

本年度の調査結果をまとめると、SSC の判定に注力して調査を進めた結果、地磁気嵐の型の判定精度は向上したものの、全体的な判定精度はやや悪くなるという結果であった。来年度以降も調査を継続し、本年度調査対象としていなかった SG の判定に注力して作業す

ることで、全体的な判定精度の向上を期待したい。

表 1 2017 年 1 月から 2022 年 12 月までに発生した SSC と、  
対応する太陽風の各項目変化量

SSC 発生日	SSC 発生時刻	地磁気 水平成分変化量 (nT)	太陽風急変と SSC発生の時間差 (分)	太陽風急変時の 磁場変化量 (nT)	太陽風急変時の 密度変化量 (p/cc)	太陽風急変時の 速度変化量 (km/sec)
2017/4/21	15:19	12	39	欠測	20	20
2017/5/27	15:30	19	46	70	186	61
2017/7/16	5:59	70	45	132	225	175
2017/8/31	5:37	22	56	51	202	32
2017/9/6	23:44	11	38	66	0	147
2017/9/7	23:00	-17	32	164	28	172
2017/9/12	20:04	18	40	41	65	37
2017/9/14	11:16	14	53	47	105	16
2017/9/26	23:47	9	53	35	100	28
2018/4/20	0:20	18	62	31	280	43
2018/5/5	10:25	14	60	31	122	31
2018/9/10	10:31	2	44	10	19	5
2019/5/10	17:54	11	60	37	95	46
2020/4/20	2:30	12	63	35	31	31
2021/5/12	6:37	32	52	79	164	114
2021/8/27	1:15	10	50	8	73	48
2021/9/17	2:17	11	49	20	30	30
2021/10/12	2:25	15	40	80	139	120
2021/10/12	9:45	30	52	-11	192	0
2021/11/3	19:41	21	23	61	16	56
2022/2/1	22:20	13	56	46	62	0
2022/2/9	21:00	3	50	28	47	26
2022/3/13	10:45	25	35	45	185	145
2022/3/31	2:23	38	44	12	248	79
2022/4/10	3:00	38	53	-5	111	0
2022/7/7	6:56	18	55	20	118	23
2022/7/18	21:19	3	54	50	55	26
2022/8/17	2:58	23	45	80	70	30

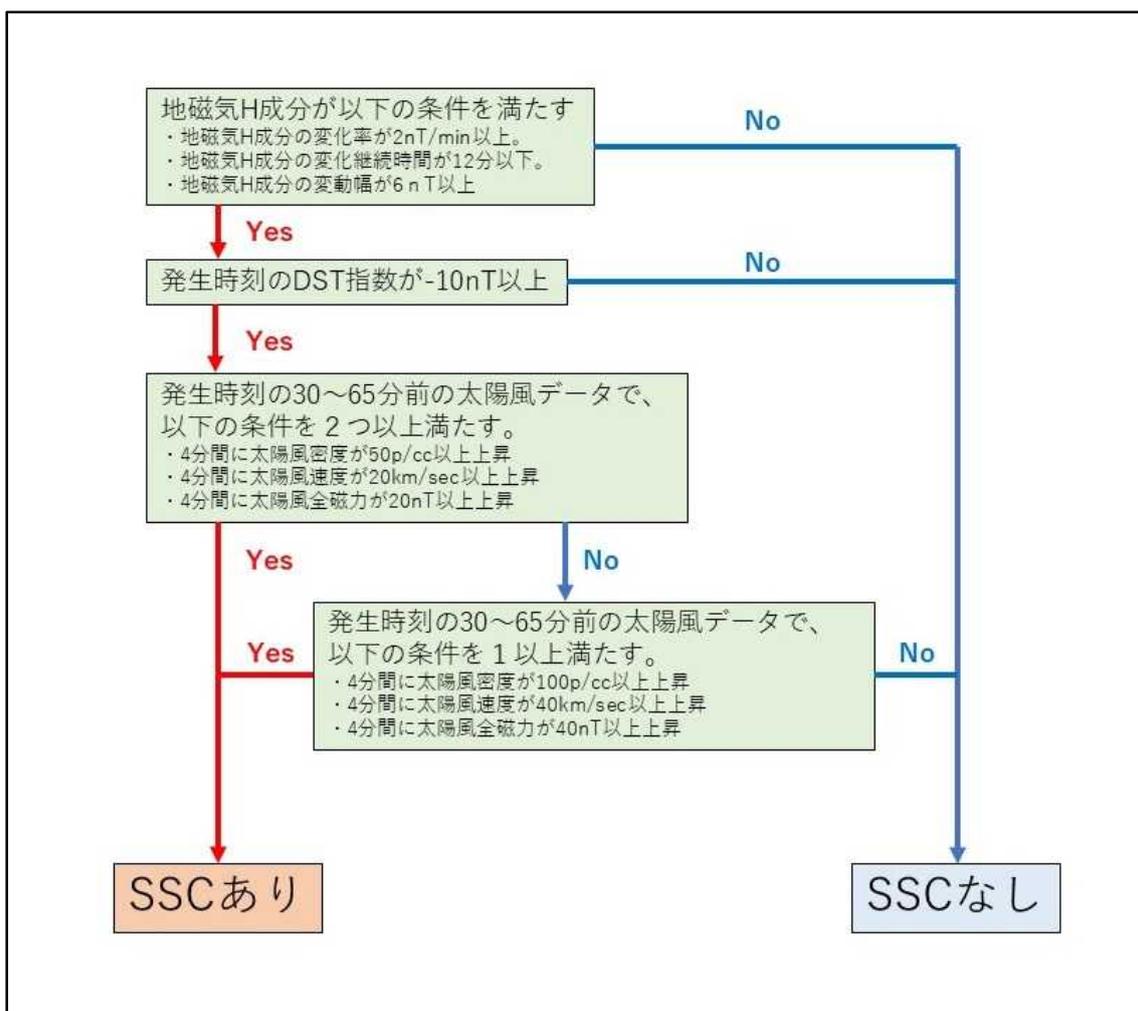


図1 SC発生の判定フローチャート

表3 自動判定プログラム改修前後の地磁気嵐的中率

磁気嵐判定	プログラム改修前（昨年度）		プログラム改修後（本年度）	
	事例数	割合(%)	事例数	割合(%)
的中	96	76.19	93	72.66
空振り	13	10.32	15	11.72
見逃し	17	13.49	20	15.63

表 4 自動判定プログラム改修前後の地磁気嵐的中時の型の一致率

TYPE判定	昨年の結果		新基準での試作	
	事例数	割合(%)	事例数	割合(%)
的中	67	69.79	74	79.57
SSCをSGと判定	17	17.71	17	18.28
SGをSSCと判定	12	12.50	2	2.15

[調査研究の種別]：基礎課題

[課題名]：新たな真方位観測方法の検討

[担当者]：○松下拓輝、仰木淳平、松浦大輔、飯塚ふうな（観測課）、浅利晴紀（技術課）

[概要]：

地磁気を構成する要素の一つに「偏角」があり、これは真方位（地図の北）と磁北（方位磁石が指す北）のズレの角度を表す。真方位を調べることは通常容易ではないので、方位磁石と偏角の値を使って、真方位を調べることが一般社会でよく行われている。一方で、地磁気観測所では、真方位を使って偏角を調べており、通常調べるのが容易ではない真方位を北極星観測により求めている。しかしながら、この方法は、観測機会の制限（夜間かつ晴天）や天体の軌道計算ソフトの時刻のズレに伴う誤差といった課題があり<sup>①</sup>、特に観測リソースの小さい女満別や鹿屋において、良質な真方位の観測が保てなくなる恐れがある。

そこで、本課題では、昼間でも観測可能な GNSS 測位及び太陽天測による方法のそれぞれの精度評価及び北極星観測との比較を行う。

これにより、現在のように限られたリソースでも良質な観測成果の担保が期待される。また、観測機会の制限が少なくなることで、真方位観測の活用の幅が広がり、例えば、夜間観測が難しい火山等でも、偏角の情報が得やすくなると考えられる。

[具体的な計画と達成目標]：

#### ① GNSS 測位及び太陽天測による真方位算出方法の習熟（技術習得）

- ・各観測の知見を持つ担当者が、その知見を伝授することにより、担当者全員が真方位を算出できるようになる。
- ・GNSS 測位については測量用の機材を 5 日間レンタルし、柿岡構内で実践する。

#### ② 各観測方法による真方位角の算出（観測と解析）

- ・GNSS 測位は測量用の機材を 10 日間×2 回レンタルし、女満別及び鹿屋で観測する。
- ・GNSS の解析にあたっては、スタティック法に加えキネマティック法も実施し、観測時間と精度のトレードオフ評価の基礎データを蓄積する。
- ・太陽天測については、高度が異なる夏至や冬至等の真方位角への影響も評価する。

#### ③ 結果のまとめ

- ・GNSS 測位及び太陽天測について、観測や解析の手順書（マニュアル）を作成する。
- ・また、それぞれの手法で得られた、真方位角結果の性質について、それぞれ、技術資料またはテクニカルレポートにまとめ、次年度早期の提出を目指す。

[本年度の成果]：

#### 1. 方法論

本章では、導入として、柿岡地磁気観測所、女満別観測施設、鹿屋観測施設（以下、観測所等という）で共通する観測方法及び使用した機材について述べる。

すべての観測所等において、観測基台と方位標で GNSS 観測を行うことができないため、以下のよう

な方法で観測を行う。観測方法のイメージを図1に、使用した機材を表1に、それぞれ示す。屋外の適当な場所に杭を2か所打設し、その上に三脚を立て、GNSS観測を行い、 $\theta_{GNSS}$ を得る。

① 多角測量方式に準じてGNSS観測を行った2点のうち1点を出発点とし、観測基台及び方位標まで水平角観測を行い、 $\beta_1, \beta_2$ を得る。

② ①、②の結果から、計算により $\theta_1, \theta_2$ を導出する。

上記①のGNSS観測においては、表2に示す解析方法で、 $\theta_{GNSS}$ を求めた。また③における $\theta_1, \theta_2$ の導出は以下の式を用いた。

$$\theta_1 = \theta_{GNSS} + \beta_1 \pm 180^\circ$$

$$\theta_2 = \theta_1 + \beta_2 \pm 180^\circ$$

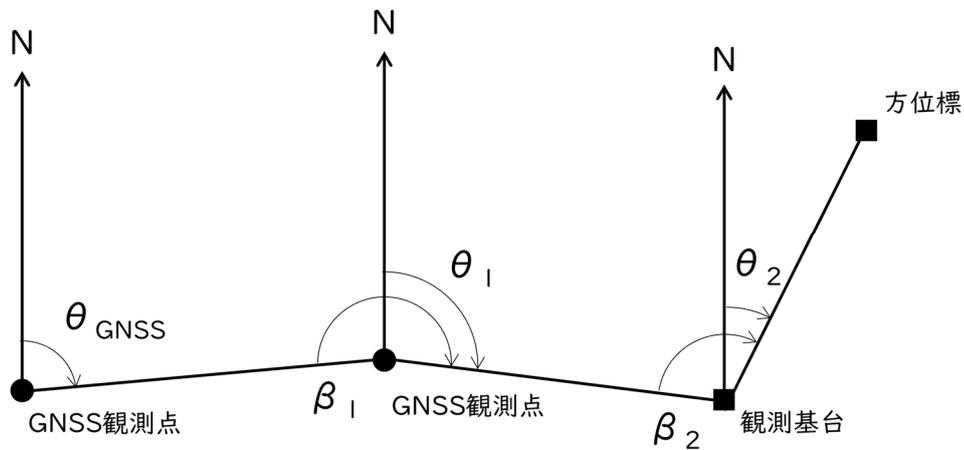


図1 観測方法の概念図。 $\theta$ は次点の真方位角、 $\beta$ は水平角観測で得られた角度を示す。

表1 GNSS真方位観測に用いた機材

項目	使用機材名
GNSS観測	Trimble Alloy + Zephyr3 Rover Trimble R750 + Zephyr3 Rover
水平角観測	Trimble M3 / THEO-020

表2 GNSS観測結果の解析設定

項目	内容
使用ソフトウェア	RTKLIB ver.2.4.2 <sup>[1]</sup>
解析モード	Static
使用衛星	GPS+GLONASS+QZSS
使用周波数	L1+L2+L5 (combined)
エポック間隔	1秒
使用暦	放送暦
大気遅延補正	なし
電離層遅延補正	なし

## 2. GNSS 真方位観測結果

本章では、観測所等において、本年度実施した GNSS 真方位観測の結果について記す。なお、観測方法や使用した機材については、前章を確認されたい。

### 2-1. 柿岡

2024年9月6日及び12月23日に、柿岡地磁気観測所で GNSS 真方位観測を実施した。図2に示すように、まずは GNSS 観測点を構内の北側と南側に2か所設置した。この2点間で GNSS 観測を実施し、 $\theta_A$ を得た。その後、北側の GNSS 観測点及び絶対観測室それぞれで水平角観測を実施し、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ を得た。これらの観測結果を表3にまとめている。なお、柿岡では、方位標は主に2つあり、一つが「大穴」と呼ばれる主方位標で、もう一つが「市販」と呼ばれる副方位標である。 $\theta_2$ については大穴のみ導出している。この観測結果から、GNSS 観測と比べて、水平角観測の精度が4倍程度劣ることが分かる。この観測結果  $\theta_A$ 、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$  から大穴及び市販の真方位角を算出した結果を天測により求めた現行の採用値と併せて、表4に示す。およそ-10秒角であり、この差が観測の誤差によるものなのか、観測原理の違いによるものなのかは調査中である。

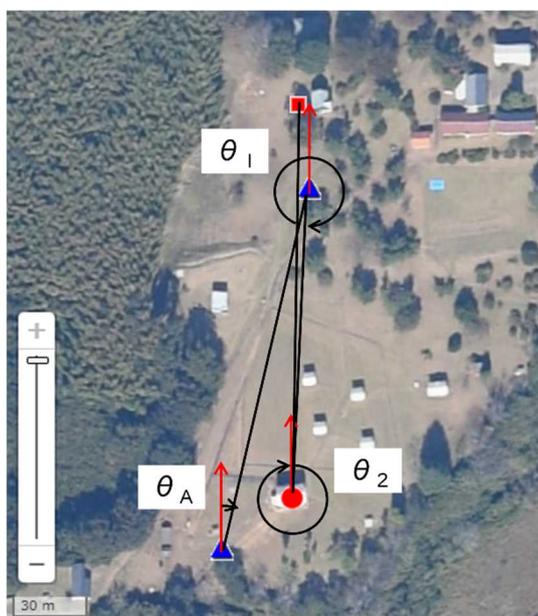


図2 柿岡地磁気観測所の配点図（地理院タイルに観測点の位置等を追記）。青三角形が GNSS 観測点、赤丸が絶対観測室、赤正方形が方位標（大穴）を示す。

表3 柿岡の観測結果（GNSS 観測及び水平角観測）

観測	採用値*	平均値	標準偏差	観測数
GNSS 観測 ( $\theta_A$ )	13° 55′ 52.0″	13° 55′ 51.9″	0.6″	3346
水平角観測 ( $\theta_1$ )	350° 25′ 3.3″	350° 25′ 5.1″	2.3″	12
水平角観測 ( $\theta_2$ )	356° 11′ 49.3″	356° 11′ 47.3″	2.1″	14

\* GNSS 観測の採用値は、ratio が 999.9 のエポックを平均、水平角は倍角差 15 秒観測差 8 秒以内を満たすものを採用。

表 4 GNSS 真方位観測結果と現行の北極星を用いた天測による真方位観測結果との比較

方位標	GNSS 真方位*	現採用値	最近の観測値 (日付)
大穴	0° 32' 44.6"	0° 32' 55"	0° 32' 56.7" (2024/11/25)

## 2-2. 女満別観測施設

2024年11月27日から11月28日にかけて、女満別観測施設でGNSS真方位観測を実施した。図3に示すように、まずはGNSS観測点を構内の北側と東側に2か所設置し、点名をそれぞれGNSS-N、GNSS-Eとした。GNSS観測をGNSS-EとGNSS-N間で実施し、 $\theta_A$ を得た。その後、GNSS-N及びGNSS-E並びに絶対観測室それぞれで水平角観測を実施し、 $\theta_{N1}$ 、 $\theta_{N2}$ 、 $\theta_{E1}$ 、 $\theta_{E2}$ を得た。これらの観測結果を表5にまとめている。この観測結果から、他の2か所と同様にGNSS観測と比べて、水平角観測の精度がよくないことが分かる。この観測結果 $\theta_A$ 、 $\theta_{N1}$ 、 $\theta_{N2}$ 、 $\theta_{E1}$ 、 $\theta_{E2}$ からN方位標及びE方位標の真方位角を算出した結果を天測により求めた現行の採用値と併せて、表6に示す。N方位標、E方位標でそれぞれ+9秒角、-16秒角程度である。この差が、観測の誤差によるものなのか、観測原理の違いによるものなのかは調査中である。

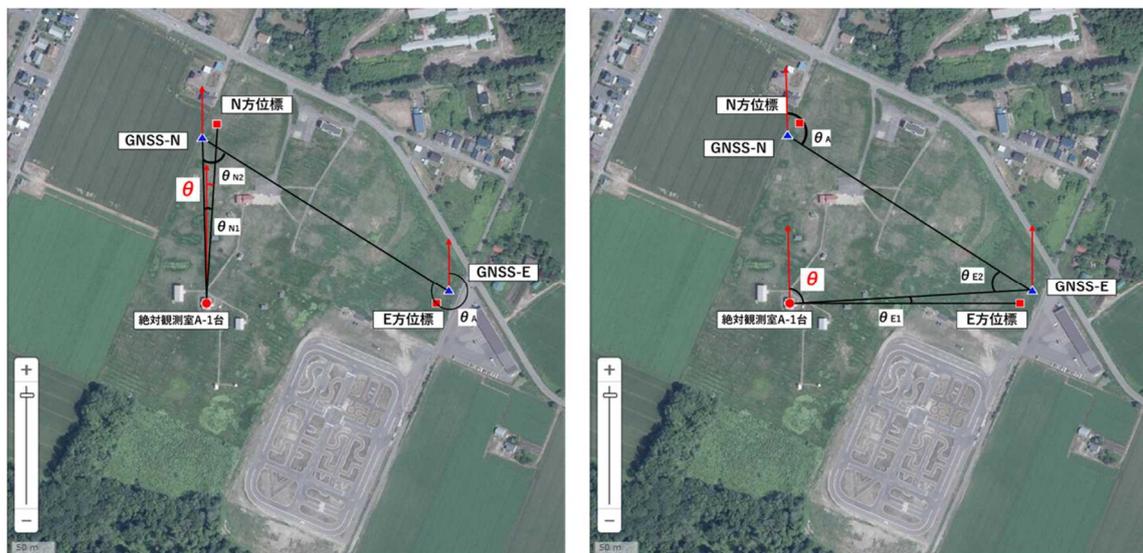


図 3 女満別観測施設の配点図 (地理院タイルに観測点の位置等を追記)

表 5 女満別の観測結果 (GNSS 観測及び水平角観測)

観測	採用値*	平均値	標準偏差	観測数
GNSS 観測 ( $\theta_A$ )	304° 39' 32.4"	304° 39' 32.4"	0.0"	3665
水平角観測 ( $\theta_{N1}$ )	0° 29' 47.3"	0° 29' 44.4"	3.4"	4
水平角観測 ( $\theta_{N2}$ )	57° 55' 49.3"	57° 55' 49.8"	4.0"	4
水平角観測 ( $\theta_{E1}$ )	0° 11' 13.8"	0° 11' 16.9"	4.6"	4
水平角観測 ( $\theta_{E2}$ )	34° 47' 35.8"	34° 47' 35.6"	3.4"	4

\* GNSS 観測の採用値は、ratio が 999.9 のエポックを平均、水平角は倍角差 8 秒観測差 3 秒以内を満たすものを採用。

表 6 GNSS 真方位観測結果と現行の北極星を用いた天測による真方位観測結果との比較

方位標	GNSS 真方位*	現採用値	最近の観測値 (日付)
N 方位標	3° 05' 09.0"	3° 05' 00"	3° 04' 57.8" (2024/09/25)
E 方位標	90° 03' 02.5"	90° 03' 18"	90° 03' 14.6" (2024/09/25)

### 2-3. 鹿屋観測施設

2024年12月4日から12月5日にかけて、鹿屋観測施設でGNSS真方位観測を実施した。図4に示すように、まずはGNSS観測点を構内の南側に2か所設置し、点名をそれぞれkny1001, kny1002とした。GNSS観測をkny1001とkny1002間で実施し、 $\theta_A$ を得た。その後、kny1002及び絶対観測室C台それぞれで水平角観測を実施し、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ を得た。これらの観測結果を表7にまとめている。なお、鹿屋では、方位標は主に2つあり、一つが「大穴」と呼ばれる主方位標で、もう一つが「市販」と呼ばれる副方位標で、 $\theta_2$ についてはそれぞれ導出していることに注意されたい。この観測結果から、他の2か所と同様にGNSS観測と比べて、水平角観測の精度がよくないことが分かる。この観測結果 $\theta_A$ 、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ から大穴及び市販の真方位角を算出した結果を天測により求めた現行の採用値と併せて、表8に示す。大穴、市販でそれぞれ-4秒角、-8秒角である。この差が、観測の誤差によるものなのか、観測原理の違いによるものなのかは調査中である。

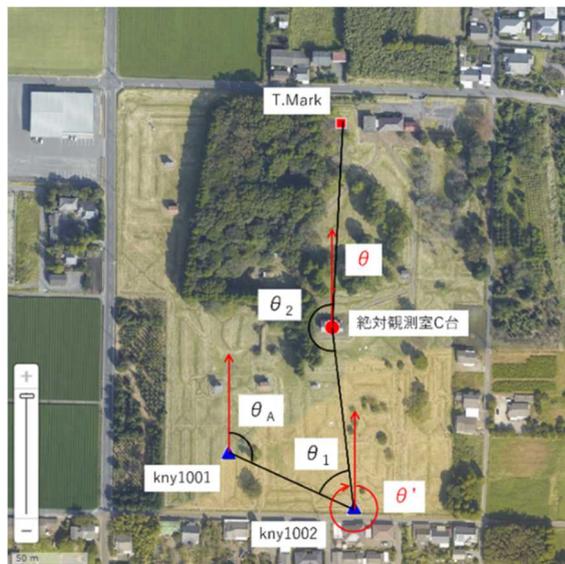


図 4 鹿屋観測施設の配点図 (地理院タイルに観測点の位置等を追記)

表 7 鹿屋の観測結果 (GNSS 観測及び水平角観測)

観測	採用値*	平均値	標準偏差	観測数
GNSS 観測 ( $\theta_A$ )	114° 30' 29.8"	114° 30' 29.8"	0.1"	6589
水平角観測 ( $\theta_1$ )	57° 57' 48.3"	57° 57' 50.1"	2.6"	6
水平角観測 ( $\theta_2$ ) 大穴	187° 01' 19.3"	187° 01' 14.0"	5.3"	8
水平角観測 ( $\theta_2$ ) 市販	187° 08' 57.0"	187° 08' 56.3"	3.4"	8

\* GNSS 観測の採用値は、ratio が 999.9 のエポックを平均、水平角は倍角差 8 秒観測差 3 秒以内を満たすものを採用。

表 8 GNSS 真方位観測結果と現行の北極星を用いた天測による真方位観測結果との比較

方位標	GNSS 真方位*	現採用値	最近の観測値 (日付)
kny 大穴(W+)	0° 30' 22.7"	0° 30' 18"	0° 30' 18.6" (2024/10/23)
kny 市販(W+)	0° 22' 44.9"	0° 22' 36"	0° 22' 38.1" (2024/10/23)

### 3. 考察

#### 3-1. 鉛直線偏差の影響

GNSS 観測により求めた柿岡での真方位角の標準偏差を表 3 の結果から、

$$\sigma_{GNSS真方位} = \sqrt{\sigma_{GNSS}^2 + \sigma_{horiz1}^2 + \sigma_{horiz2}^2}$$

の式 ( $\sigma_{GNSS, hori1, hori2}$  はそれぞれ、GNSS 観測、水平角観測 1 か所目、2 か所目を示す) を用いて、GNSS 真方位の標準偏差を求めると、3 秒程度となる。現行の天測による方法との差は 10 秒程度であり、標準偏差と比べ、有意な値である。この差について、準拠楕円体とジオイド間の傾きである鉛直線偏差の観点から検証する。経度方向または東西方向の鉛直線偏差は、近似的に以下の式であらわされる。

$$\eta = (\lambda_a - \lambda_g) \cos \phi_g$$

ここで、 $\phi_a, \lambda_a$  は天文経緯度、 $\phi_g, \lambda_g$  は測地経緯度である。熱海(1933)<sup>[2]</sup>の表 1 にある柿岡から一番最寄りの筑波山の天文経緯度(36° 13' 22.0"、140° 05' 55.0")と測地経緯度(36° 13' 22.3"、140° 05' 67.2")の値を同式に代入すると、西に約 10 秒の傾きという結果が得られる。この傾きは、測器の傾きと同等と考えてよいだろうから、地磁気観測所技術報告書第 26 巻特別号(p.108)にある傾斜補正の式 ( $b \cdot \tanh, b$  は傾斜(秒)、 $h$  は天体の高度角を示す) に代入すると、天測の結果が楕円体面基準の GNSS に近づく方に 7 秒程度という結果が得られる。したがって、現行の天測との差は、この鉛直偏差の影響が一つの可能性として考えられる。

同様に熱海(1933)<sup>[2]</sup>の表 1 から女満別周辺、鹿屋周辺の天文経緯度及び測地経緯度の結果を抽出したものを表 9 に整理した。これを用いて、柿岡同様に鉛直偏差の影響量を求めると、女満別では N(E) 方位標と逆(同)センスに 7 秒程度、鹿屋では逆のセンスに 2 秒程度である。女満別については、鉛直軸偏差に原因があれば、N 及び E 方位標で GNSS と天測の結果が同等なはずである。このことから、別の要因、例えば、水平角観測の精度などが考えられる。実際に、水平角観測で 2 名の観測結果で、N 及び E 方位標において 6~7 秒程度の差がある観測も見られた。令和 7 年度に水平角観測の回数を増やして検証したい。鹿屋については、表 9 で用いた値が、50km ほど離れた場所ということが考えられる。川畑(1939)<sup>[3]</sup>の表 1 によれば、より鹿屋に近い「笠ノ原」の測地経度と天文経度の差は、Kagosima と逆のセンスで 4 秒程度であった。実際にこの値を用いて、影響量を計算すると、GNSS の結果に近づくセンスに 2 秒程度と GNSS との差を説明するのに整合的な結果となった。ただし、ここで注意したいのは、両者の基準が異なるだけで、天文経緯度、測地経緯度どちらの値が正しいとはならないことである。したがって、過去の結果との連続性の観点から、GNSS 観測で求めた真方位角に対して、鉛直偏差の影響量を加味して、天測の結果に整合させることが望ましいだろう。

表 9 天文経緯度及び測地経緯度の観測記録（熱海[1933]の表 1 より抜粋）

観測点	年	天文緯度経度	測地緯度経度	鉛直偏差
Abasiri	1905	44° 01' 10.7" 144° 16' 26.3"	44° 01' 09.7" 144° 16' 35.8"	-6.8"
Tukubasan	1902	36° 13' 22.0" 140° 05' 55.0"	36° 13' 22.3" 140° 05' 67.2"	-9.8"
Kagosima	?	31° 35' 41.9" 130° 33' 33.0"	31° 35' 41.7" 130° 33' 29.1"	+3.3"

### 3-2. 解析手法や使用する衛星等の違いによる真方位角への影響

前述の解析では、一般的に一番精度がよいと言われる、Static で解析を行った。一方で、他にも Kinematic, DGPS (ディファレンシャル)、Single (単独測位) などがあり、これらの精度はそれぞれ、数 cm、数 m、10m 程度と言われている<sup>[3]</sup>。なお、Static はメーカーの公称精度によれば、数 mm である。通常、Static 方式は、1 回の観測で 1~2 時間程度と観測に時間がかかるが、Kinematic や DGPS, Single などは観測時間を短縮することが可能なため、真方位角の算出における精度を検証することは意義がある。本章では、柿岡で実施した GNSS 観測について、これらの解析手法の結果と Static の結果を比較した。

観測データは、2-1 と同じデータを用い、解析に用いたソフトウェアは、同じく RTKLIB である。DGPS の参照点は、電子基準点「八郷」のデータを用いた。図 5 に各手法による座標の解析結果を示す。この座標は、出発点、ここでは南側の GNSS 観測点となる、を基準とした、北側の GNSS 観測点の相対的な座標を示している。破線で囲まれた各マスは 50cm 四方である。この図から、Static や Kinematic に比べて、DGPS 及び Single の位置精度が劣ることがわかる。また、Static と Kinematic についての拡大図を図 6 に示す。この図から、Static の方が精度がよいことがわかり、それぞれの手法について、本観測においても、一般的にいわれる位置精度と同様であることが確認できた。

次にこの解析結果をもとに、柿岡の方位標（大穴）の真方位角をそれぞれ算出した。なお、この際に用いた水平角観測の結果 ( $\theta_1, \theta_2$ ) は、表 3 の採用値を固定値として用いている。算出した真方位角のヒストグラムを図 7 に、平均値と標準偏差を表 10 に示す。図から、Static については、天測の結果とは系統的なずれがみられるものの、精度については、天測よりも高いことが分かる。一方、Kinematic については、同様に系統的なずれがみられるが、分布の広がり具合は、天測と同等であることが分かる。また、DGPS 及び Single については、天測と比較して、きわめて分布の広がり大きい。実際に、標準偏差が DGPS(Single)において、約 200(300)秒角であることから、真方位角の精度が低いことがわかる。一方、平均値としては、現採用値と比較すると、Single の結果が、1 秒差と一番近い値になった。さらに、表 11 に、使用する衛星の種類や使用する周波数を変えて、真方位角を算出したが、結果は平均値及び標準偏差ともに差はみられなかった。これについては、観測基線が短いためだと考えられる。

以上の結果から、GNSS 真方位角観測における、Static 以外の手法利用の妥当性について、ばらつきの大きさから、DGPS 及び Single の採用は控えるべきだと考える。Kinematic については、ばらつきが天測と同等であることから、観測時間に制約がある場合などは、この手法を用いることも可能だろう。使用する衛星種類や周波数については、今回の観測基線長（100~200m）程度では影響がなかったが、一般的に基線長が長くなると電離層遅延の影響が大きくなると言われていることから、基線の長さが異なる場合には、改めて検討が必要である。

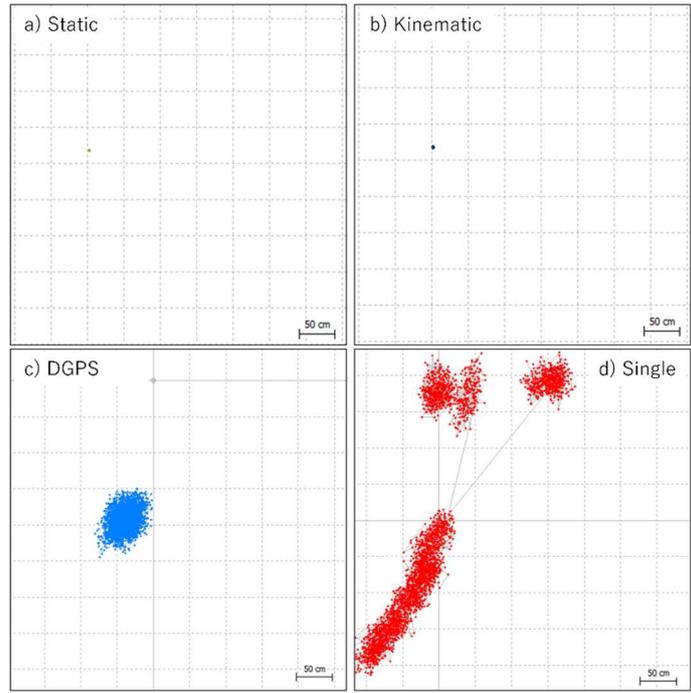


図5 各手法による柿岡 GNSS 観測点の座標解析結果

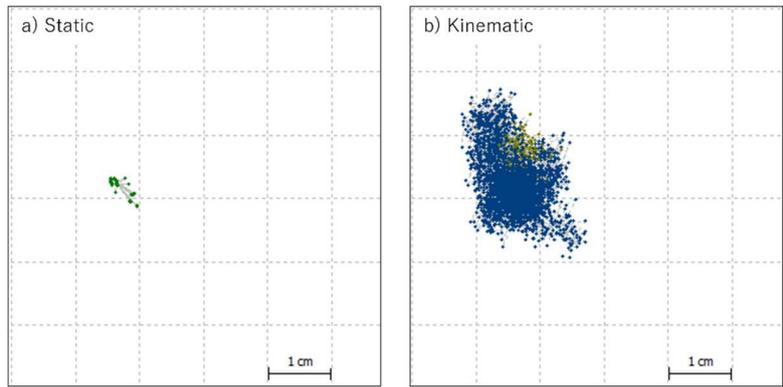


図6 図5 a)Static, b)Kinematic の解析結果の拡大図

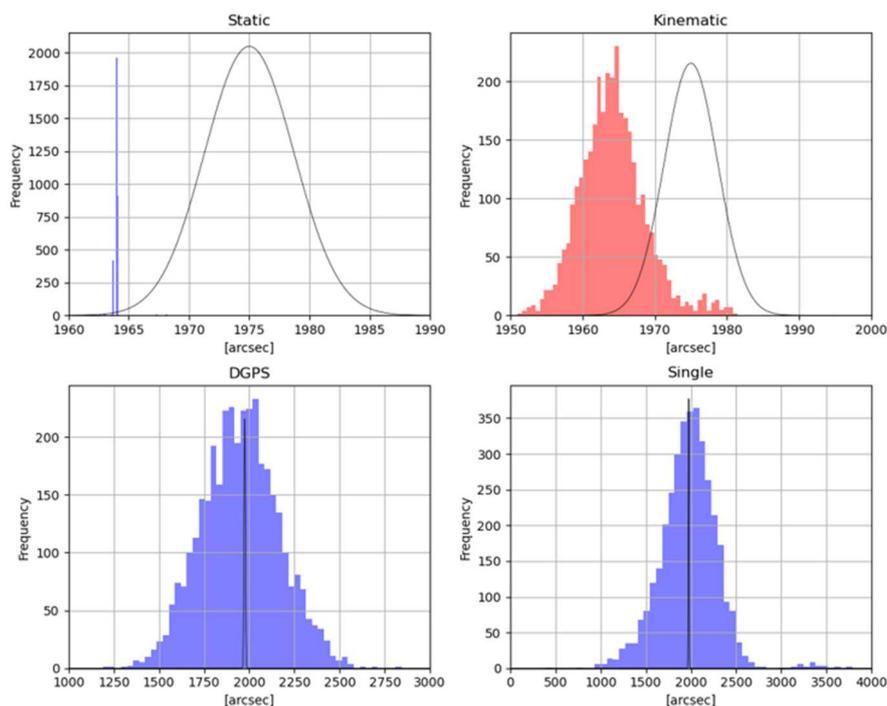


図7 各解析手法で求めた柿岡方位標（大穴）の真方位角のヒストグラム。黒実線は、現行の手法である天測の観測結果が正規分布と仮定した際の度数を表す。

表10 各解析手法で求めた柿岡方位標(大穴)の真方位角とその標準偏差

解析手法	真方位角（平均値）	標準偏差（"）
Static	0° 32' 44"	0.4"
Kinematic	0° 32' 44"	4.3"
DGPS	0° 32' 32"	213.4"
Single	0° 32' 56"	314.2"

表11 使用する衛星種類と周波数の違いによる柿岡方位標(大穴)の真方位角とその標準偏差

条件	真方位角（平均値）	標準偏差（"）
GPS+GLONASS+QZSS	0° 32' 44"	0.4"
GPS	0° 32' 44"	0.5"
3周波	0° 32' 44"	0.4"
1周波	0° 32' 43"	0.3"

#### 4. まとめと今後の課題

本調査研究では、GNSS 測位を用いた真方位角の算出について、その精度評価や現行の北極星観測による方法との比較を行った。今回の結果から、GNSS 測位自体の精度は北極星観測よりもよいものの、各所では GNSS 観測に加えて、水平角観測を実施せねばならず、これも加味した精度は、北極星観測によるものよりも悪くなるのが分かった。水平角の観測回数を増やすことで、よりよい精度が得られるが、その分観測時間も増えるため、作業時間の縮小には効果が薄いといえる。一方で、GNSS 観測及び水平角

観測は時間や天候に左右されにくいということで、執務時間内に観測できるという点は、一つのメリットと言える。今後は、業務の一環として、GNSS 真方位観測を継続し、GNSS 真方位結果の蓄積を行い、設置位置のずれといった系統的な誤差がないかなどを確認したい。

[参考文献] :

- [1] 高須, 知., 久保, 信., & 安田, 明. (2007). RTK-GPS 用プログラムライブラリ RTKLIB の開発・評価. *GPS/GNSS Symposium 2007*. Tokyo, Japan.
- [2] ATUMI, K. (1933). La deviation de la vertical au Japan. *Japan J. Astron. Geophys.*, 305-312.
- [3] KAWABATA, Y. (1939). A study on the deviation of the plumb-line in Japan. *Bull. Central Meteorological Observatory of Japan*, 173.
- [4] 国土地理院. GNSS を使用した測量のいろいろ. <https://www.gsi.go.jp/denshi/denshi45009.html>. accessed 2025-03-12

[調査研究の種別]：基礎課題

[課題名]：FT 型磁気儀における観測方法と基線値算出方法の再考

[担当者]：○松下拓輝、飯塚ふうな、松浦大輔（観測課）、浅利晴紀（技術課）

[概要]：

地磁気観測所では、FT 型磁気儀を用いて基線値を求める際に、望遠鏡の向きを南北上下に向けた一連を 1 回として計 2.5 回から 4 セットの基線値を求めている。2.5 回とは、1 回の半分を次のセットに流用していることを意味しており、つまり観測値の重複を許している。本来は重みづけをするなどして平均を求めるべきであるが、なされていない。他に、トータルの姿勢数を 12 回にし、独立した 3 セットから単純平均で基線値を求めるといった方法も考えられるが、観測時間が増えてしまうという問題もある。また、令和 5 年度の調査研究課題「次期標準磁気儀設計に向けた予備調査」において、絶対観測の誤差を考慮して基線値を決定する必要性が指摘されており、基線値の算出方法にも課題がある。

このような背景から、本課題では、①観測手順を再考し必要な手順にしばり、従来と変わらない労力で独立した観測値セットを得ること、②観測誤差を考慮した基線値算出方法として、MCMC 法を用いたベイズ推定が有効かを評価すること、の 2 点を軸に調査する。

[具体的な計画と達成目標]：

#### ① 観測方法の再考

- ・現在の手順のうち、マイクロメータの合わせ直し(2 読定)及びレベルチェックについて、過去の観測結果を用いて、これら手順の誤差を調べ、観測への効果を定量的に評価する。
- ・2 回読みとレベルチェックの効果に応じて、省力化できる手順を検討及び実施し、その観測時間と従来方式による観測時間の差を評価する。
- ・独立した 3 個の基線値を得るために、12 姿勢観測を実施するとともに、この基線値と従来方式 (10 姿勢) で得た基線値の違いについて調べる。
- ・併せて、12 姿勢かつ省力化した手順用の観測野帳 (案) を作成する。

#### ② 基線値算出方法の再考

- ・他国の基線値算出方法について調べてまとめる。
- ・他国と当所の各方法で過去の観測結果から基線値を算出、両者の差を評価する。
- ・先行事例を参考にベイズ推定による基線値算出のアルゴリズムを検討し、プログラムを作成する (MCMC 法を想定)。
- ・ベイズ推定を過去の観測結果に適用し、基線値の特徴や従来方式との差を調べる。

#### ③ 結果のまとめ

- ・観測手順の再考について、従来方式の効果や省力的な方法の特徴などについて、技術資料にまとめ、次年度早期の提出を目指す。
- ・基線値算出方法の再考について、ベイズ推定による基線値の初期結果を 11 月 IAGA

Workshop で発表することを目指しつつ、次年度すみやかにテクニカルレポートを執筆できるように調査結果の整理をする。

[本年度の成果]：

## 1. 観測方法の検証

### 1-1. 方法論

FT 型磁気儀の観測においては、測定誤差を小さくするために、図 1 のようにセンサが望遠鏡の上部にある状態で、望遠鏡の輪番を北(南)に向けた  $N_{UP}(S_{UP})$  及びセンサが下部にある状態で、望遠鏡の輪番を北(南)に向けた  $N_{DOWN}(S_{DOWN})$  の 4 姿勢での観測値の平均を算出して、1 つの結果としている。地磁気観測所では、この他にも誤差を減らすために、観測値(目盛りの値)を 2 回読む、偏角の観測において、D の値を読んだ後に、レベルのチェックを行うなどの手順を実施している(詳細な観測方法については、地磁気観測所, [1994]を確認されたい)。本調査では、このうち、読みを 1 回、レベルのチェックなしで観測を行い、その精度を評価した。また、期間の前半はこれらの省略に加えて、反転時のレベル合わせ( $89^{\circ} 50' 10'$  及び  $269^{\circ} 50' 10'$ )も省略した方法を実施した。本調査の観測方法と地磁気観測所の通常の方法の比較を表 1 に整理した。また、観測の期間等の概要は表 2 のとおり。基本的には、地磁気観測所の絶対観測日の前後 1 日以内に、2 名で各 3 セット (12 姿勢) の観測を行ったが、休日等の都合で、多少のずれがあることに注意されたい。

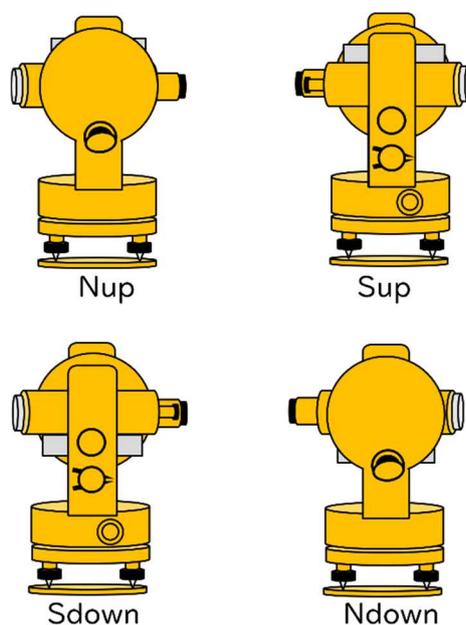


図 1 FT 型磁気儀の観測姿勢

表 1 本調査と通常の観測方法の比較

項目	通常の方法	方法 A	方法 B
マイクロメータの読み (回数)	2	1	1
レベルチェック (D 読定後のレベル確認)	あり	なし	なし
反転時のレベル合わせ(D 観測時)	あり	あり	なし
ベース補正	あり	なし	なし

表 2 本調査の観測概要

項目	内容	備考
観測期間	2024 年 5 月 24 日~2024 年 9 月 2 日 計 29 回 (方法 B) 2024 年 9 月 9 日~2025 年 1 月 27 日 計 40 回 (方法 A)	
人数	原則 2 名 (観測者と記録者)	
観測セット数	偏角 D 及び伏角 I 各 3 セット (計 12 姿勢)	
基線値	柿岡主測器 FM10(kak00)基準	

## 1-2. 観測結果

期間中の偏角 D と伏角 I の観測結果を地磁気観測所の絶対観測結果である DI-72 の観測基線値と合わせて、図 2, 図 3 に示す。図から、方法 A の期間と比べて、方法 B の期間中の FT 型磁気儀の値がばらつきが大きいことが分かる。数値的にも、表 3 のとおり、方法 A より方法 B の方が標準偏差が大きいことが分かる。伏角の観測については、レベルチェックと同等のものがないため、伏角における方法 A と方法 B は同じであり、結果に差異は見られない。次に DI-72 との器差を方法 A の期間について、図 3 に示す。図から、伏角 I は比較的安定した器差が得られているが、偏角 D は伏角に比べ、数倍のばらつきがみられる (表 4 参照)。

次に、本調査の方法による 12 姿勢での観測時間を図 4 に示す。時間については、数分のばらつきがあるものの、D(I)の観測で、17(18)分程度となり、16 姿勢での時間に単純換算すると DI 合わせて約 50 分程度となる。通常の FT の観測方法では、10 姿勢で DI 合わせて 50~60 分であることから 16 姿勢換算にすると、80~100 分程度となり、本調査における方法では半分近い短縮につながる。

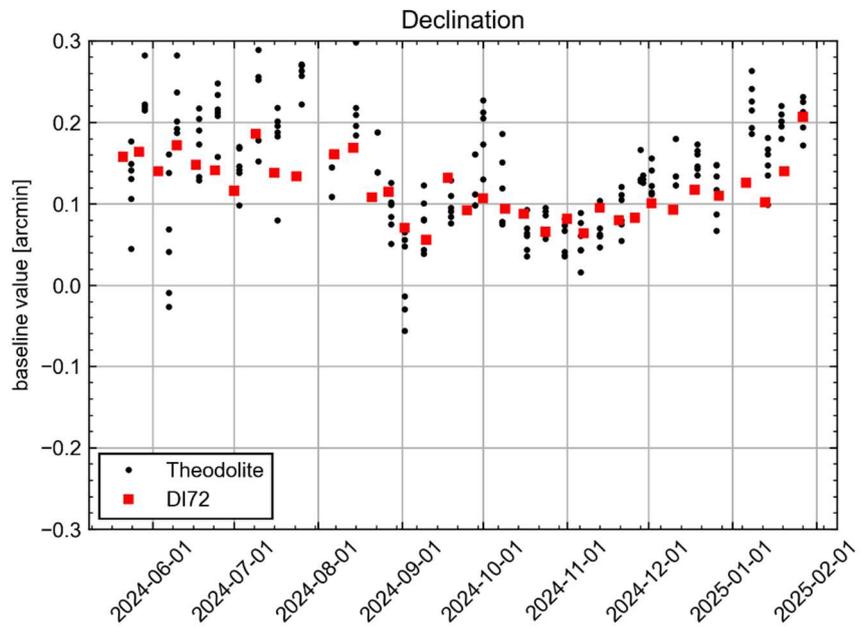


図 2 偏角 D の観測基線値（黒が FT 型磁気儀、赤が DI-72 による）

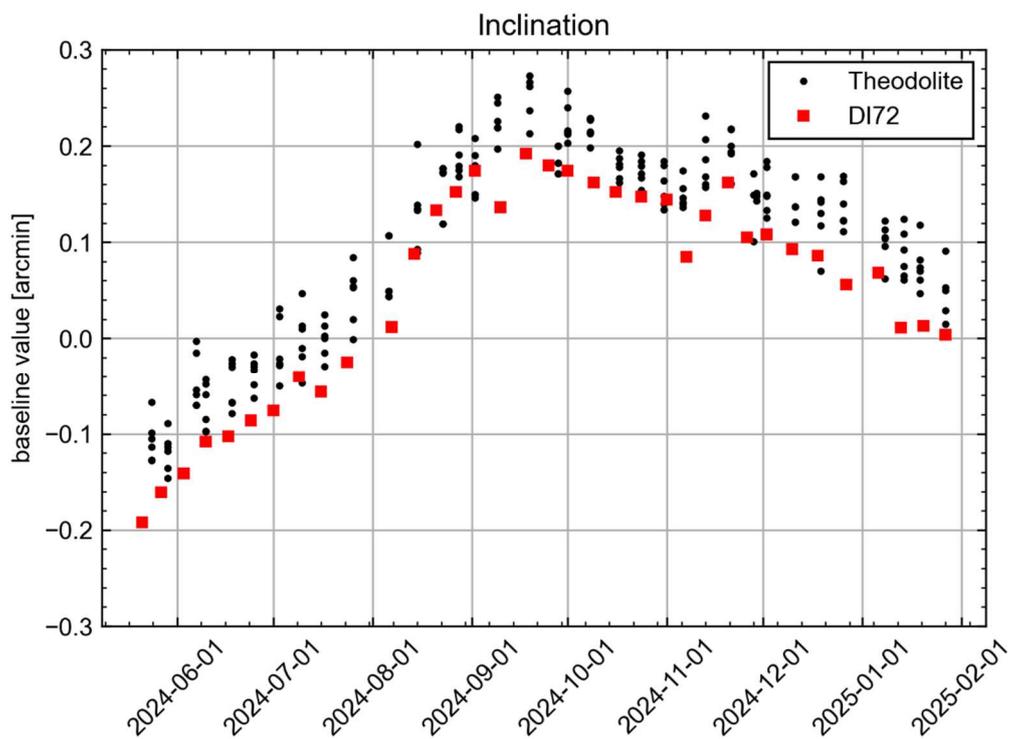


図 3 伏角 I の観測基線値（図の形式は図 2 と同じ）

表3 方法Aと方法Bの観測結果の比較（器差）

	平均値	標準偏差	試行回数
方法B	D: -0.31	D: 0.09	19
方法A	D: -0.20	D: 0.05	20

表4 本調査の方法AとDI-72との器差。DI-72の結果は、観測日から一番近い日のデータを採用している。

	器差の平均[′]	器差の標準偏差[′]
偏角D	-0.224	0.077
伏角I	0.048	0.022

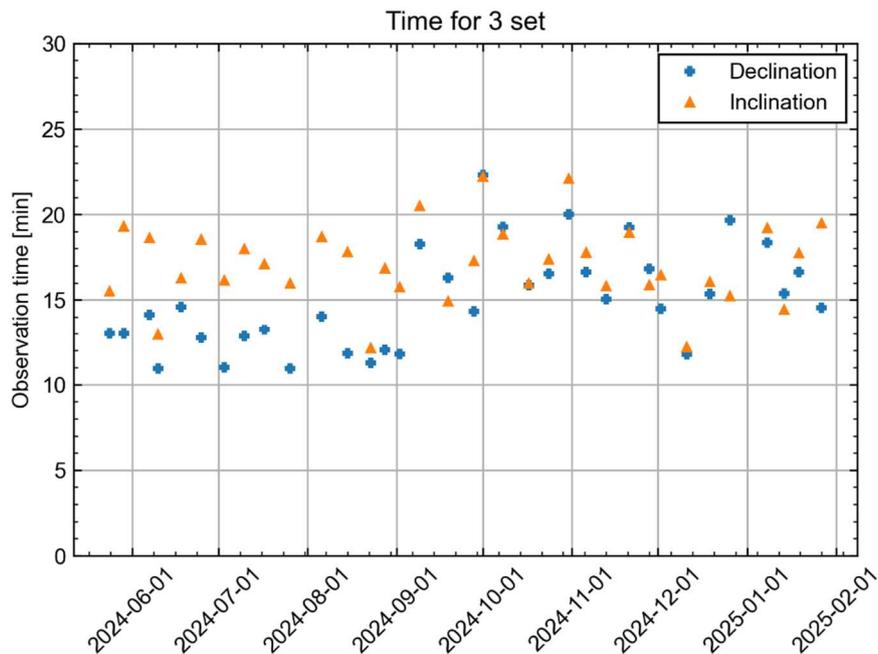


図4 本調査の方法による観測に要した時間(D, Iはそれぞれ12姿勢)

### 1-3. 考察

#### 1-3-1. 方法Aと方法Bについて

偏角Dの方法Aと方法Bの標準偏差の値において、明瞭な差が見られた。両者の違いは、反転時のレベル合わせの有無だけなので、これが原因と考えるのが自然であろう。方法Bの際は観測の開始前に東西南北で鉛直目盛盤が90° 00′ 00″となるように調整していたが、これでは不十分であったと考えられる。観測中に水平がずれた可能性などが考えられるが、本結果からはこれ以上の原因究明は難しい。いずれにせよ、反転時のレベル合わせは必須と言える。

### 1-3-2. DI-72 との器差について

伏角 I については、 $+0.05'$  で安定していたため、本調査の方法でも特に問題はないと考えられる。ただし、時折、器差が大きくなることもあるため、標準偏差だけで結果の良し悪しを判断せず、前回値との連続性の観点からも採否を判断する必要があるだろう。偏角 D については、器差のバラつき（標準偏差）が伏角 I に比べて、3~4 倍であった。このことから、DI-72 のように観測誤差がほぼゼロとするのは難しい。したがって、何かしらのスムージング処理が必要だと考えられる。スムージングについては、次章で述べる。

## 2. 計算方法の検証

### 2-1. 方法論

伏角 I は、図 3 で示すように、DI-72 と同等の推移をしているため、スムージング処理の必要性は小さい。したがって、本章では偏角 D のスムージング処理について、述べる。本調査では、前章で実施した約半年間、計 35 日分ほどの偏角 D の観測値を用いて、「A. 移動平均（3 回分）」、「B. スプラインスムージング」、「C. 多項式近似」の 3 つの手法を用いて処理をし、DI-72 の基線値と比較した。スプラインスムージングに関しては、各観測データにどの程度寄せるかを定めるパラメータ  $\lambda$  を数種類選択肢、それぞれについて比較した。また、多項式近似については、3 次から 6 次について比較をした。これらの結果について、次節で述べる。

### 2-2. 計算結果

図 5 にスプラインスムージングの結果を破線で FT の観測基線値及び DI-72 の観測基線値をそれぞれ黒丸及び赤四角で示す。図から、観測基線値に沿うようなスプラインは、DI-72 の結果とはあまり対応がよくないことが分かる。一方で、 $\lambda$  を python ツール SciPy のアルゴリズムによる自動設定にした場合と  $\lambda$  を 100 に設定した場合とは大きな差が見られない。図 6 から図 9 は多項式近似の 3 次から 6 次と観測基線値の比較を示す。図 5 と同様に、破線で多項式近似の結果を黒丸と赤四角はそれぞれ FT と DI-72 の観測基線値を示す。この図からは、どの次数が一番 DI-72 の結果との対応がよいかはわからない。図 10 は、移動平均を含めた各スムージング手法と DI-72 の観測基線値の差をプロットしている。また、この差の標準偏差を表 5 に示す。図から、スプラインスムージングのうち、 $\lambda$  に 1 を代入した結果 (spline\_lam1) の結果が特に期間のはじめにおいて、大きな差を示している。また、9 月頃の多項式近似の値は軒並み大きな差を示している。表から、数値的に見れば、スムージング処理しない場合の器差  $0.077'$  と比べ 3 分の 1 から半分程度の標準偏差に抑えられている。 $\lambda$  に 1 を代入した標準偏差が  $0.05'$  程度と一番大きいですがそれ以外はおよそ同程度の値で、 $0.03'$  ほどであった。

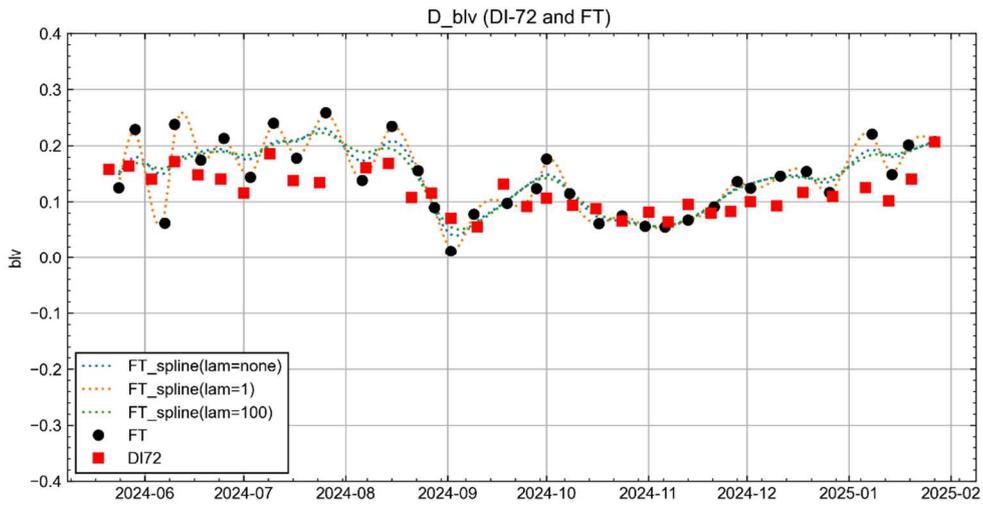


図5 スプラインスムージングを施した FT 磁気儀の結果と FT 及び DI-72 の観測基線値

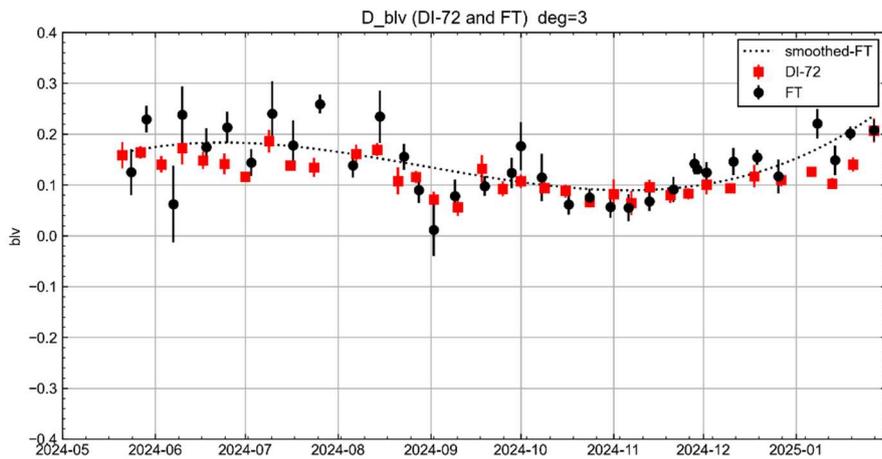


図6 多項式近似 (3次) を施した FT 磁気儀の結果と FT 及び DI-72 の観測基線値

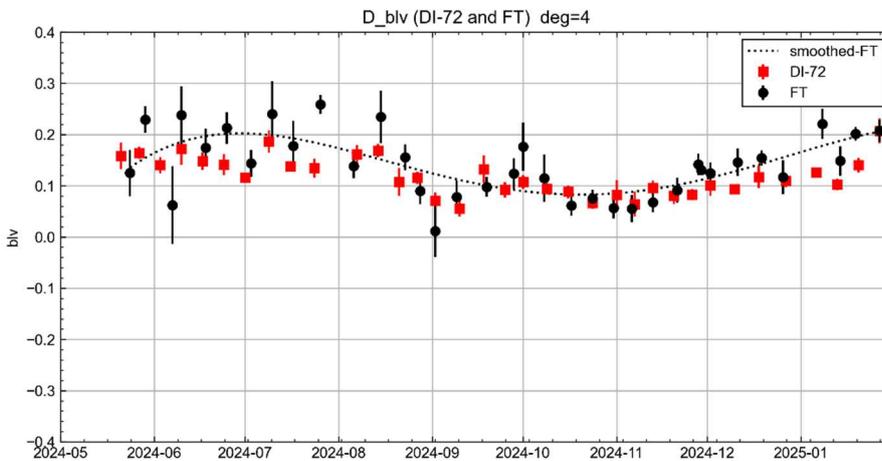


図7 図6と同じ様式の図。ただし、多項式近似の次数は4

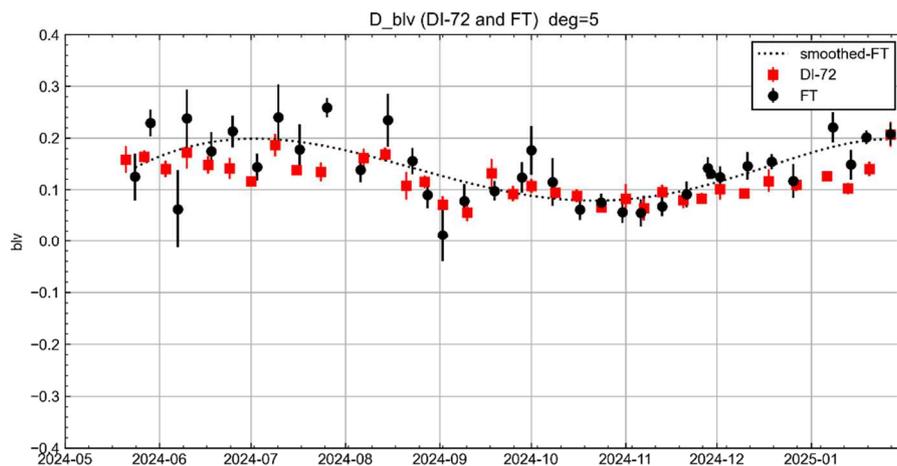


図 8 図 6 と同じ様式の図。ただし、多項式近似の次数は 5

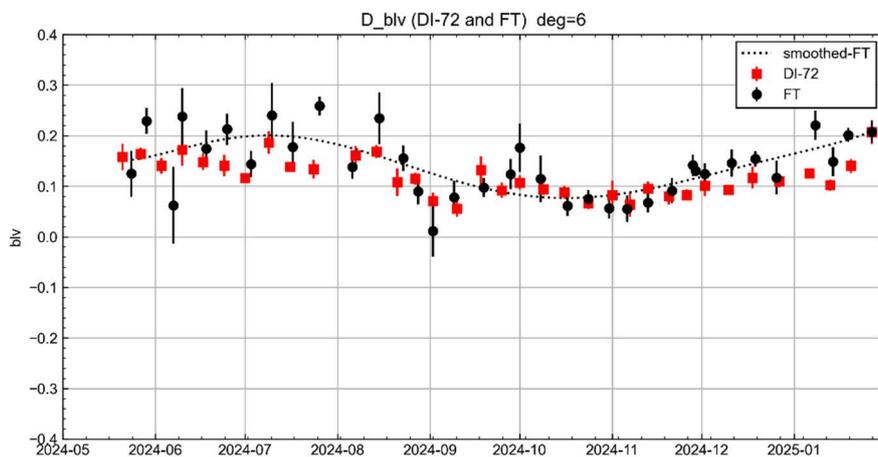


図 9 図 6 と同じ様式の図。ただし、多項式近似の次数は 6

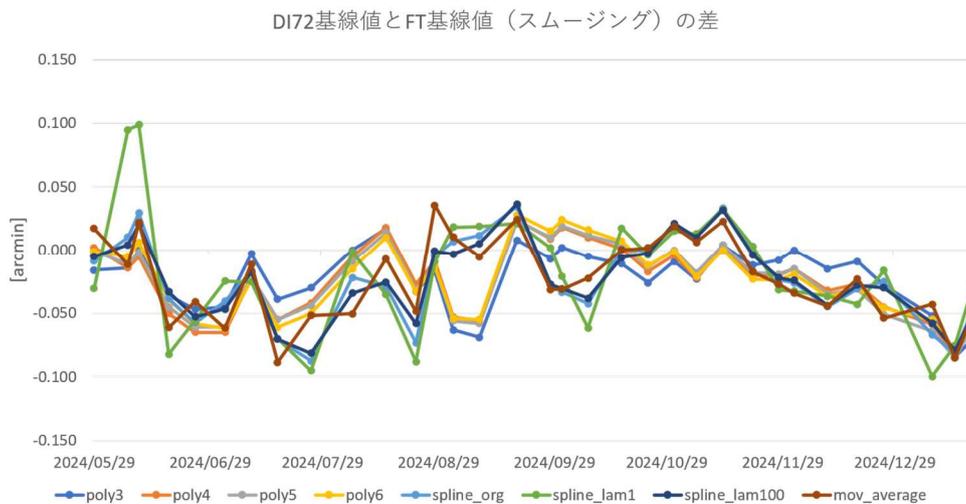


図 10 各スムージング手法と DI-72 の基線値との差

表5 各スムージング手法と DI-72 の結果との比較（単位はいずれも[']）

	poly3	poly4	poly5	poly6	spline_auto	spline_lam1	spline_lam100	Mov_ave
Std	0.025	0.028	0.029	0.029	0.033	0.047	0.030	0.032

### 3. まとめ

本研究では、現在絶対観測で使用している DI-72 に不調があった場合に備えて、FT 型磁気儀での絶対観測業務の実現性について、観測時間の観点で評価、最適な方法を検証した。今回は時間的な制約等から、FT 型磁気儀の正規の方法との比較はできなかったが、より本質的な DI-72 との評価はできたと考える。また、観測方法だけでなく、その後の計算処理の方法についても、DI-72 の結果を正解値とし、比較することができた。今回は、他国・他機関の観測所でも利用されている様な多項式近似等の一般的な方法での比較を示した。ベイズ推定の方法は得られた確率分布のよい活用方法が思い浮かばなかったため、本稿では説明を控えた。例えば、分布から得られる確からしさを一つの再観測実施の指標とすることや平均処理の重みづけとして使う方法などが考えられるが、今後の検討課題としたい。

[参考文献] :

[1] 地磁気観測所. 1994, 観測指針

[調査研究の種別]：基礎課題

[課題名]：インターマグネット確定毎秒値データチェック手法の開発

[担当者]：○神谷亜希子（技術課）、浅利晴紀（技術課）

[概要]：

当所は地磁気観測の国際共同事業であるインターマグネット（国際リアルタイム地磁気観測ネットワーク）に加盟しており、柿岡・女満別・鹿屋はその認定観測所として登録されている。インターマグネットでは、確定データセットを年次に出版するにあたり、認定観測所から提供される確定データの品質をチェックしており、加盟機関の有志メンバーから成る「相互チェックタスクチーム」がこれを担っている。当所は令和2年度より同チームに加入し、確定毎分値データについては相互チェックを進めているところ、毎秒値データセットも新たに出版するというインターマグネットの方針に従い、毎秒値の相互チェックも進めていくこととなった。毎秒値チェックの方法についても大まかなガイドラインしか与えられていないため、本課題では当所での具体的なチェック手法について検討を行う。

[具体的な計画と達成目標]：

1. 海外のデータチェックの事例について調査する。
2. 海外のチェック事例をもとにデータチェックの手法を検討する。
3. 初任者でも作業を進められるようデータチェック手法についてより確実で迅速な方法について検討を進める。
4. 検討結果に基づき、チェックシートおよび手順書を作成する。

[工程表]：

2024									2025		
4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
		海外のデータチェック事例の調査									
				データチェック手法の検討							
						データチェック手法の改善					
								チェックシート・手順書の作成			

[研究協力者]：

京都大学地磁気世界資料解析センター 今城峻 助教

[成果]:

## 1. 海外のデータチェック事例の調査

インターネットの確定毎秒値データチェックにおいては、IMBOT と呼ばれるプログラムによるデータチェックを最初に実施される。IMBOT では、データの可読性、メタ情報の内容、データの内容および品質、確定毎分値との整合性についてチェックが行われ、その結果をもとにレポートが作成される。相互チェックタスクチームでは、そのレポート内容をもとに、プログラムではチェックしきれない内容を目視でチェックする。

海外で実施された目視チェックの一例として、メタ情報の検査、プロットデータの精査、確定毎分値との整合性および A-value のチェック、パワースペクトルによるノイズレベルのチェック、の4項目が実施されたことが分かった。

地磁気観測所から確定毎秒値をインターネットに提出する際に使用している Magpy というソフトウェアを用いて、試験的に海外でのデータチェック項目4項目を実施した。作業の結果、操作性が悪く動作が遅いこと、パワースペクトルによるノイズレベルのチェックを実施する際にコマンドラインでのソフトウェアの起動が必要であり、手順が煩雑になってしまうという2つの問題点があることがわかった。

## 2. データチェック手法の検討

1. の作業をふまえ、当所で実施するデータチェックの手法を検討する。

はじめに、現在、確定毎分値チェックで実施している項目について、確定毎秒値においてもチェックを実施する必要はないか、という点について検討した。

確定毎分値チェックにおいては、1. で実施したチェック項目と合わせ年平均値、基線値データ、隣接観測点との比較を実施している。前述の全項目について、確定毎分値と整合がとれていれば、結果として確定毎秒値でも不備がないことを説明可能であるため、確定毎秒値ではチェックする必要はないと判断した。

以上より、当所での確定毎秒値の相互データチェックは、以下4項目の実施ということで検討を進めることとする。

1. メタ情報の精査
2. プロットデータの精査
3. 確定毎分値との整合性および A-value のチェック
4. パワースペクトルによるノイズレベルのチェック

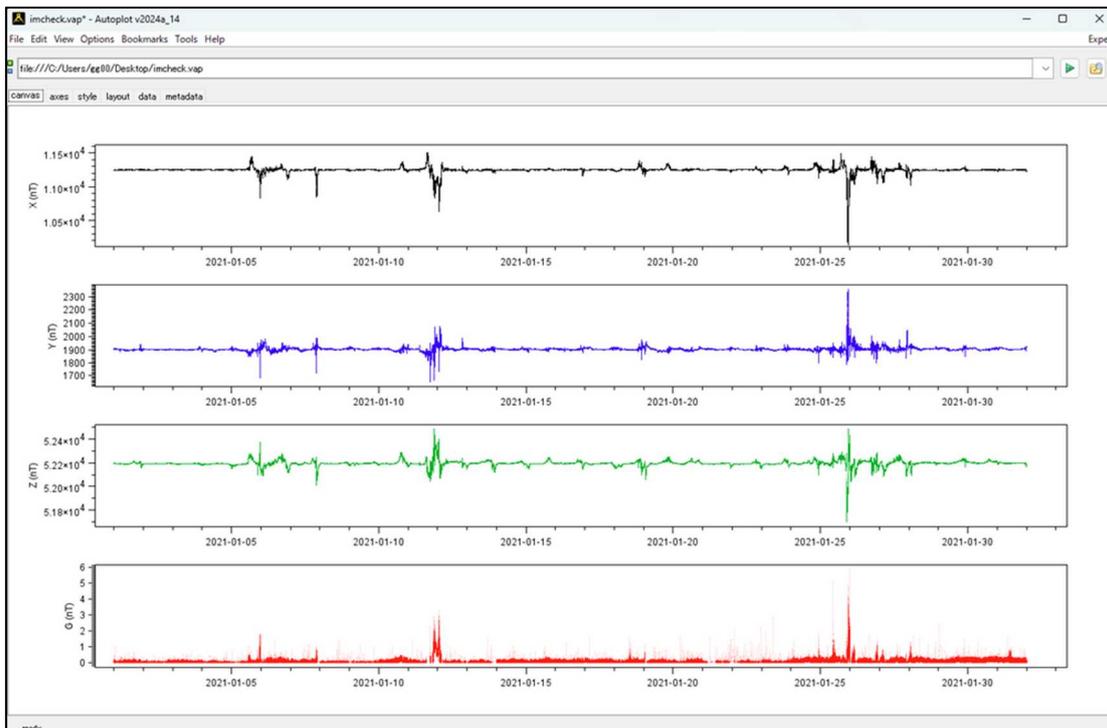
## 3. データチェック手法の改善

各データチェック項目について、以下の通り、データチェック手法についての改善を検討した。

メタ情報の精査については、Excel のチェックシートを作成し、チェックの必要な項目を見落とすことがないようにした。また、初心者がチェック作業を進めると同時に学習できる

よう、メタ情報の各内容について別シートに解説資料を添付した。

プロットデータの精査および確定毎分値の整合性、A-value のチェックについては、ソフトウェアの動作速度や操作性が悪いことが作業者の負担となる可能性があるため、2024 年度にリオで開催されたインターマグネット会議内で紹介されていた **Autoplot** というソフトウェアを導入して進めてみることにした。



プロットデータの精査、A-value のチェックについては、地磁気データの変動の大きい箇所や、疑義のある場所について、**Autoplot** を使用しマウスでのみの操作で手早くプロットデータを拡大して確認できることが分かった。データの抜けについては **Autoplot** の機能に **csv** 出力があり、データ抜けの部分は「N/A」と表示されることから目視だけでなく **Excel** 等の検索機能を利用して調べることができることもわかった。

確定毎分値との整合性については、**IMBOT** で確定毎分値と齟齬があると指摘された部分（確定毎分値および確定毎秒値の振幅の最大値などが **IMBOT** チェックでよく指摘される）についても **Autoplot** にて同様にプロットを拡大して確認することが可能である。

パワースペクトルによるノイズレベルのチェックについては、**Magpy** ではソフトウェアをコマンドラインでの起動する必要があったが、**Autoplot** では GUI 上にソフトウェアの機能としてパワースペクトルを計算するプロダクトが組み込まれており、同じソフトウェアを使用してチェックすることが可能である。

また、**Autoplot** の画面カスタマイズの設定を保存しておくことができるため、一度ソフトウェアを終了してもすぐにチェック時の設定で立ち上げることが可能となっている。

#### 4. チェックシート・手順書の作成

チェックシートについては、大きく「メタ情報の精査」「各月ごとのチェック内容」「チェック内容の解説」の3項目にわけて作成した。「メタ情報の精査」「各月ごとのチェック内容」については、チェック項目に漏れがないよう、作業者が必要事項を埋めていく形式となっている。

「チェック内容の解説」については前述の通り、初心者勉強のためという側面もあるが、最終チェック者になるべく初心者からの質問対応に時間を割かれないようにするということも当シートを作成した目的の一つである。

手順書については、現在作成中であるが、相互チェック概要説明、確定値毎秒値チェックの流れ、各チェック項目の説明、について記載する予定である。

#### 5. 今後の展望

次年度は作成したチェックシート・手順書をもとにインターマグネット確定毎秒値チェックを実施し、地磁気観測所のルーチン業務の一環として今後作業を進めていきたいと考えている。また、インターマグネット相互データチェックの日本の担当をされている京都大学地磁気世界資料解析センターの今城助教授を通じてインターマグネットにもこの方法を共有し、相互データチェック作業の一助としていただくことを想定している。

[調査研究の種別]：基礎課題

[課題名]：宇宙天気災害に関連する磁気嵐の特徴について

[担当者]：○吉田昌弘，長町信吾（観測課）

[概要]：

アメリカ・ニュージャージー州，カナダ・ケベック，モントリオール周辺で9時間に及ぶ停電が発生し，600万世帯に影響が及ぶ災害が発生している<sup>(1)</sup>，<sup>(2)</sup>，<sup>(3)</sup>．他にもHF帯（短波）通信・放送や航空機・遠洋漁業，GPS等の通信障害<sup>(4)</sup>，衛星の落下が発生している<sup>(5)</sup>．これら災害の原因として，太陽から突発的に惑星間にプラズマが放出されるコロナ質量放出（以下CMEとする，CME：Coronal Mass Ejection）により，高速となって地球磁気圏に到来する太陽風の影響が考えられている<sup>(5)</sup>．

上述のようにCMEによる災害は世界各地で発生しており，災害発生と同時に磁気嵐が観測されている．この磁気嵐の発達に関わるリングカレントの活動を表す指標として，Dst指数が用いられている．Dst指数指定観測所の一つが柿岡（日本）となっているため，柿岡にて磁気嵐を観測することは，災害を把握するという観点からも重要な意味を持つ．

しかしながら地磁気観測所では，これまで宇宙天気現象に関連した災害発生時の磁気嵐について詳細な調査は実施されていない．また，当所における防災情報を充実させるためにも，宇宙天気現象による災害と磁気嵐との関連について整理しておくことは必要である．

そこで本課題において，文献・NICT（情報通信研究機構）等のHPから宇宙天気現象による災害を参照し，災害発生時における磁気嵐の特徴を調査する．

[具体的な計画と達成目標]：

① 磁気嵐に関連した宇宙天気災害の文献調査

過去に発生した磁気嵐に関連する災害について，文献調査を実施する．電気関係の分野でも調査報告が実施されているか調査する．また，NICTのHPより，「宇宙天気による社会システムへの影響例」一覧<sup>(6)</sup>が掲載されているので，本調査において参照する．

② 宇宙天気災害発生時に観測した磁気嵐を抽出

上記①で行った文献調査結果より，災害発生時の磁気嵐を抽出する．

③ 磁気嵐の特徴についてまとめ

上記②で抽出した磁気嵐について，規模，継続時間，連続したCMEによるものか，他，特徴をまとめる．

[工程表]

作業項目	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文献調査	→											
②磁気嵐の抽出				→								
③特徴のまとめ							→					
④報告書作成											○	○

[共同研究に係る関係官署及び所外関係機関]：

なし

[参考文献]

- (1) <https://www.nhk.or.jp/bousai/articles/21629/>
- (2) [https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan\\_shohi/denryoku\\_anzen/pdf/006\\_02\\_02\\_12.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/denryoku_anzen/pdf/006_02_02_12.pdf)
- (3) D.H.Boteler (2019) A 21st Century View of the March 1989 Magnetic Storm, *Space Weather*, 10.1029/2019SW002278, 1427-1441.
- (4) 亘慎一 (2006) 2. 宇宙環境擾乱による障害と宇宙天気予報, *J.Plasma Fusion Res.* Vol.82, No.11, 739-744.
- (5) R.Kataoka et al., (2022) Unexpected space weather causing the reentry of 38 Starlink satellites in February 2022, *J.Space Weather Space Clim*, 12, 41.
- (6) <https://www2.nict.go.jp/spe/swx/swcenter/hazards.html>

[本年度の成果]

## 1. 緒言

宇宙天気現象の発生を地磁気現象から推定することが可能となる特徴について検討を行うため、宇宙天気現象と地磁気現象の対応関係について調査した。調査は、宇宙天気としてデリンジャー現象・プロトン現象を対象とし、同じ太陽フレアから発生した地磁気現象の抽出、デリンジャー現象・プロトン現象の発生数、太陽フレアの発生位置と規模、地磁気現象の大きさと発生数、CMEによる太陽風の動圧、発生確率について実施した。結果として、デリンジャー現象・プロトン現象とSFE, Si&Sscに関連が認められたため、以下に報告する。

## 2. 宇宙天気と地磁気現象の抽出について

NICTが公開しているwebページに「宇宙天気予報」<sup>(7)</sup>がある。この宇宙天気予報における「レポート」の日報や臨時情報に記載されている、デリンジャー現象・プロトン現象を調査対象とした。また、宇宙天気現象の要因となった太陽フレアについては、日報に記載の最大時刻・領域(発生時の位置)・関連現象を引用した。

期間について、デリンジャー現象・プロトン現象は日報の記載が開始された2006年5月1日～2024年12月31日、太陽フレアは最大時刻・領域(発生時の位置)・関連現象の記載が始まった2013年5月23日～2024年12月31日である。

地磁気現象については、柿岡で観測したSFE, Si, Ssc(急始型磁気嵐)を使用した。

デリンジャー現象・プロトン現象と同一の太陽フレアによる地磁気現象(Si, Ssc(急始型磁気嵐))の同定については、宇宙天気予報のレポートに記載の「地磁気活動」を参照し

た. SFE とデリンジャー現象については, 同じ時間帯に認められたものを同一の太陽フレアによる現象とした. また, 2006年5月1日より前に発生したデリンジャー現象については, 発生から2~3日程度後に生じた Si, Ssc を同一の太陽フレアによるものとした.

過去の日本における宇宙天気現象による災害事例に関しては, 国立研究開発法人情報通信研究機構による「科学提言のための宇宙天気現象の社会への影響評価」<sup>(8)</sup> 記載のものを引用した.

### 3. デリンジャー現象・プロトン現象発生時に観測した地磁気現象について

#### 3.1 デリンジャー現象・プロトン現象発生数の推移と太陽黒点数との対応関係

月別の太陽黒点数と年別のデリンジャー現象・プロトン現象発生数を図1に示す. 黒点数の極大期に対応してデリンジャー現象・プロトン現象の発生数も増加しており, Solar cycle 24以降で太陽黒点数の最も多かった2024年にはデリンジャー現象の発生数が124(個/年)を記録していた.

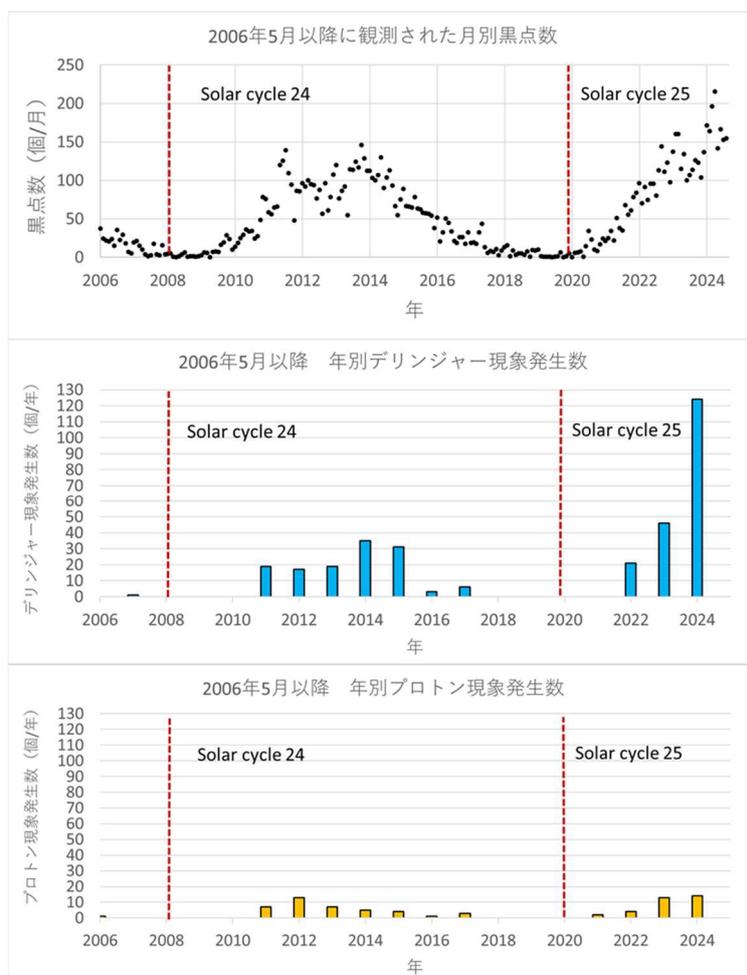


図1 (上)2006年以降の月別黒点数, (中)年別デリンジャー現象発生数  
(下)年別プロトン現象発生数

### 3.2 デリンジャー現象・プロトン現象が生じた太陽フレアの太陽面位置と急始型磁気嵐

デリンジャー現象発生と同時に CME による急始型磁気嵐を観測した場合の太陽フレアは、太陽面緯度 N27°~S23°，経度 E28°~W44°に位置していた(図 2(左)). プロトン現象発生時に、CME による急始型磁気嵐が同時に発生していた場合の太陽フレアもほぼ同じ位置で、太陽面緯度 N29°~S22°，経度 E29°~W43°であった(図 2(右)). ただし、太陽面の東端 (S12° , E82° )，西端(S9° , W83°)でデリンジャー現象・プロトン現象と急始型磁気嵐を同時に発生させた太陽フレアが存在しており、この太陽フレアの規模はそれぞれ X4.9, X8.2 であった.

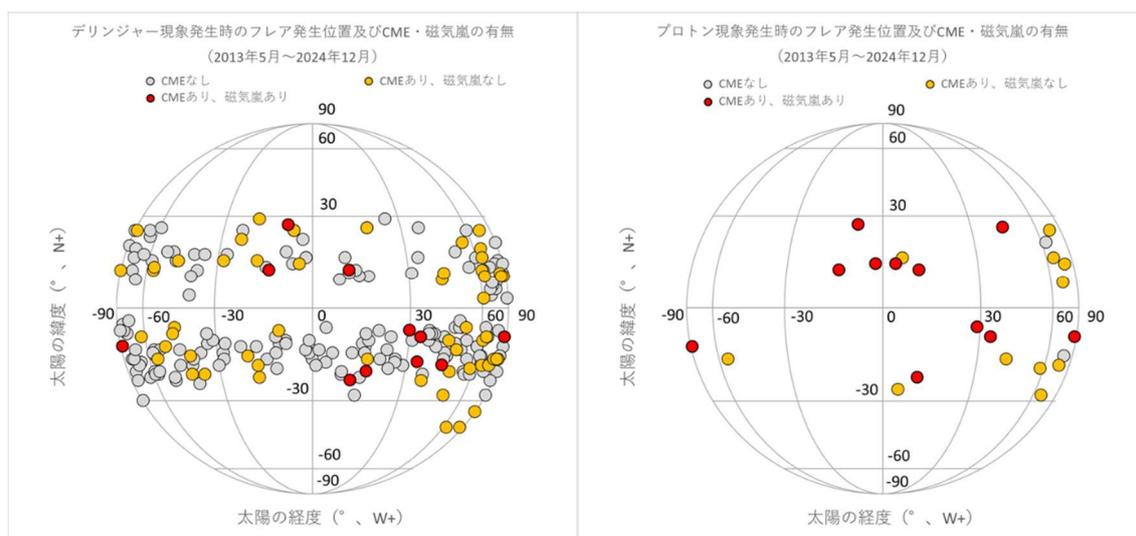


図 2 (左)デリンジャー現象, (右)プロトン現象発生時における太陽フレアの太陽面緯度・経度及び CME・磁気嵐の有無

### 3.3 デリンジャー現象・プロトン現象発生時の Ssc と急始型磁気嵐

デリンジャー現象・プロトン現象と、同じ太陽フレアから発生した急始型磁気嵐に特徴が認められるか確認するため、Ssc と急始型磁気嵐の H 成分変化量を調査した。結果を図 3 及び図 4 に示す。また、図 4 でプロトン現象を観測しており、高エネルギー粒子により人工衛星に災害が発生していたものを緑でプロットしている。

デリンジャー現象・プロトン現象と、同一の太陽フレアから発生した Ssc の H 成分は、宇宙天気を伴っていない Ssc の H 成分と比較して明瞭に発達していた(図 3, 図 4). 急始型磁気嵐の H 成分変化量には特徴的な傾向は認められていないことから、デリンジャー現象・プロトン現象と同一の太陽フレアから発生した地磁気現象には、衝撃波による影響が特徴的に認められた。

デリンジャー現象・プロトン現象と同一の太陽フレアから発生した Ssc のうち、H 成分変化量が比較的小さいものも存在している。図 3, 図 4 において Ssc の H 成分変化量が 18nT の太陽フレアでは太陽面の発生経度が W83°，図 3 において Ssc の H 成分変化量が 16nT の太陽フレアでは W59°となっていた。また、図 3 で Ssc の H 成分変化量が 9nT, 図

4 で  $5\text{nT}$  であったものについては、太陽フレアの規模がそれぞれ C3.7, M1.2 であったが CME が地球方向に向かって噴出していたため、Ssc の H 成分変化量がそれぞれ小さくなったと考えられる。そして図 4 において Ssc の H 成分変化量が  $-17\text{nT}$  であったものは、太陽フレアの規模が X9.3 であったが太陽が昇る時間帯の観測であったため、Preliminary Impulse が卓越したことが考えられる。

また、図 3 において白点で示す 1976 年以前の釣り磁石による地磁気観測では、測器の時定数の差により、1976 年以降の電子データによるものよりも Ssc の H 成分変化量が小さく示されていると考えられる。

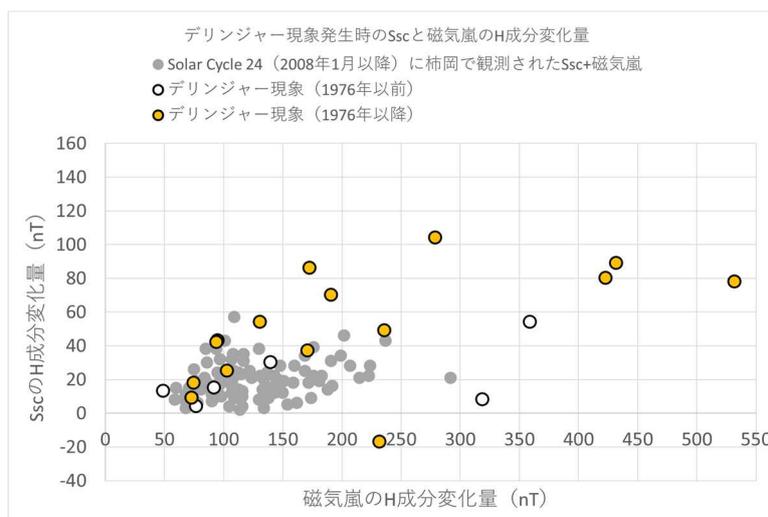


図 3 デリンジャー現象発生時の Ssc と磁気嵐の H 成分変化量

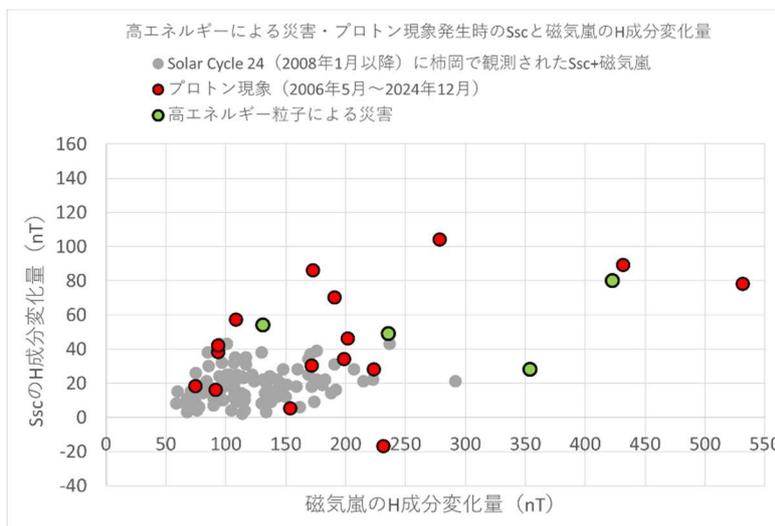


図 4 プロトン現象・高エネルギー粒子による災害時の Ssc と磁気嵐の H 成分変化量

### 3. 4 デリンジャー現象・プロトン現象発生時の Si

3. 3 で CME の衝撃波による Ssc の H 成分変化量が、デリンジャー現象・プロトン現象

発生時に特徴的であったことから、Si についても調査を実施した。

デリンジャー現象・プロトン現象と Si 発生時の太陽フレア位置について、太陽面の極座標を図 5 に示す。太陽面中心付近で観測した太陽フレアについては、15nT、18nT と小さいものも認められるが、Si の H 成分変化量が 34nT、37nT、64nT を観測しており、明瞭な発達が認められた。中心付近を外れた位置での太陽フレアでは、30nT を超えるものも存在するが観測した Si の H 成分変化量は比較的小さかった。

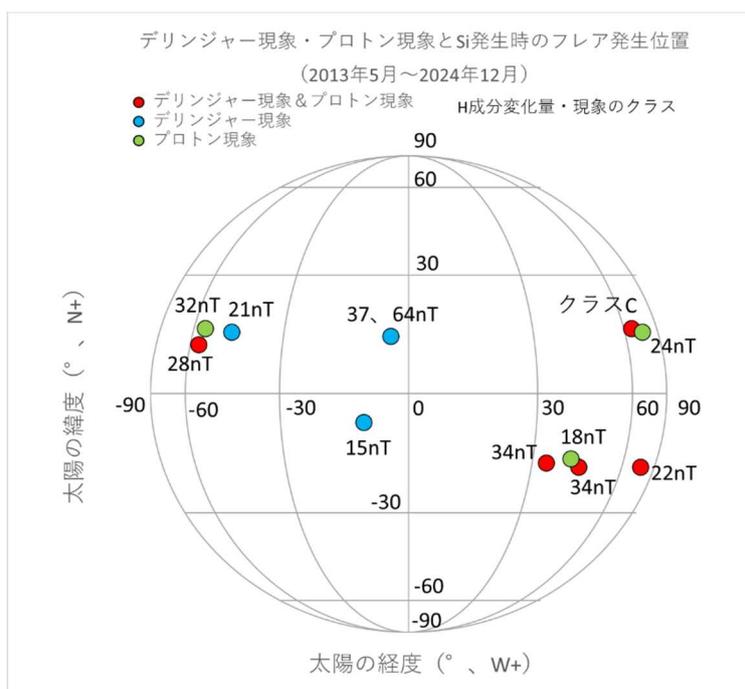


図 5 デリンジャー現象・プロトン現象と Si 発生時における太陽フレアの太陽面緯度・経度

### 3. 5 デリンジャー現象・プロトン現象発生時における Si&Ssc の H 成分変化量と太陽風の動圧

デリンジャー現象・プロトン現象発生時の磁場変化 (H 成分変化量) と太陽風の変化を参照しておく必要があるため、以下に示す式<sup>(9)</sup>に従い、太陽風の動圧(図 6)及び CME 到達前後の動圧差 (図 7) について算出した。太陽風動圧の算出には ACE の人工衛星データを使用し<sup>(10)</sup>、動圧差には CME の衝撃波面が到達する前の 10 分間と、到達した後の 10 分間の平均値を用いた (図 6)。

$$\text{太陽風の動圧} = mnv^2(m: \text{プロトン質量}, n: \text{密度}, v: \text{速度})$$

$$\text{磁場変化} = \alpha^* \{ \sqrt{(CME \text{ 到達後の動圧})} - \sqrt{(CME \text{ 到達前の動圧})} \}$$

デリンジャー現象・プロトン現象発生時、及び Solar cycle 25 以降に観測したクラス B 以上の Si&Ssc の磁場変化 (H 成分変化量) と算出した太陽風の動圧差を図 7 に示す。太陽風の動圧差が小さく Si&Ssc の H 成分変化量が 40nT を超えるものが存在するが、太陽風の動圧差が増加すると Si&Ssc の H 成分変化量も増加していた。

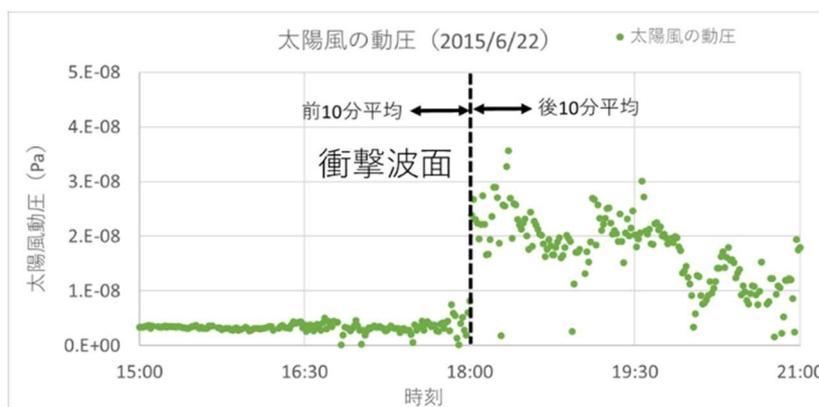


図 6 太陽風の動圧

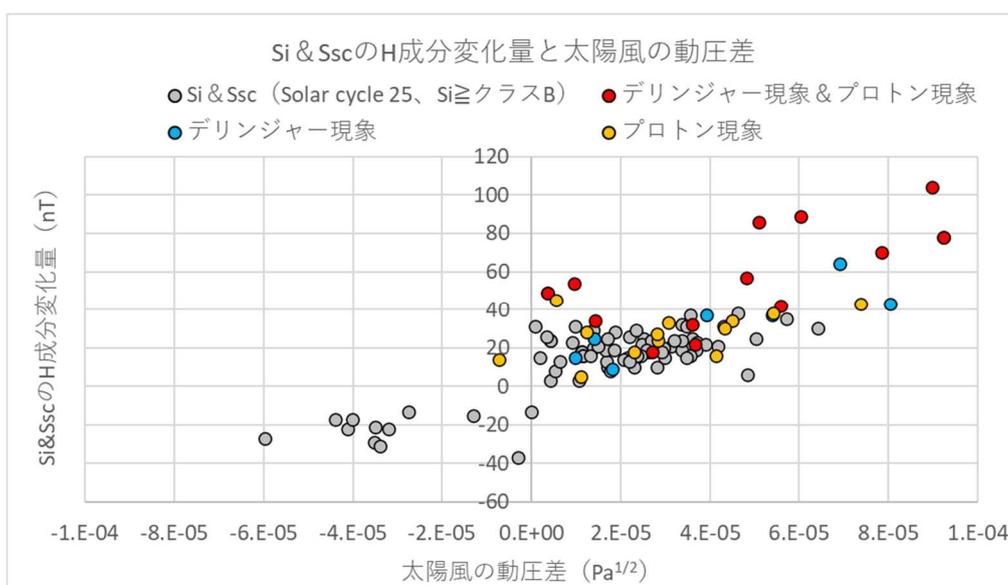


図 7 Si&Ssc の H 成分変化量と太陽風の動圧差

### 3.6 デリンジャー現象と SFE の関連について

デリンジャー現象と SFE の時間帯別発生個数を図 8 に示す。SFE とデリンジャー現象が同時に観測された個数は、3時から4時 (UT) にかけて最も多くなっている、既往の研究結果<sup>(11)</sup>と整合的であった。

デリンジャー現象発生時の太陽フレア規模と SFE のベクトルの振幅を図 9 に示す。ここでベクトルの振幅とは、以下に示す通り SFE における H 成分の振幅と D 成分の振幅を考

慮したものとす。

$$\text{ベクトルの振幅} = \sqrt{\{(H)^2+(D)^2\}}$$

図 9 に示す通り、太陽フレア規模の増大とともに SFE のベクトルの振幅の増加が認められた。ただし、本調査におけるベクトルの振幅には日変化による影響を排除していないため、定性的な変化量であると考え。

太陽フレアで X 線等級の規模が M クラス前半だと、デリンジャー現象を伴わず、SFE のみが多数存在していた。これに対して太陽フレアの規模が M6~X クラスになると、SFE の観測とともにデリンジャー現象が同時に発生している割合が 91%と増加していた (図 9)。

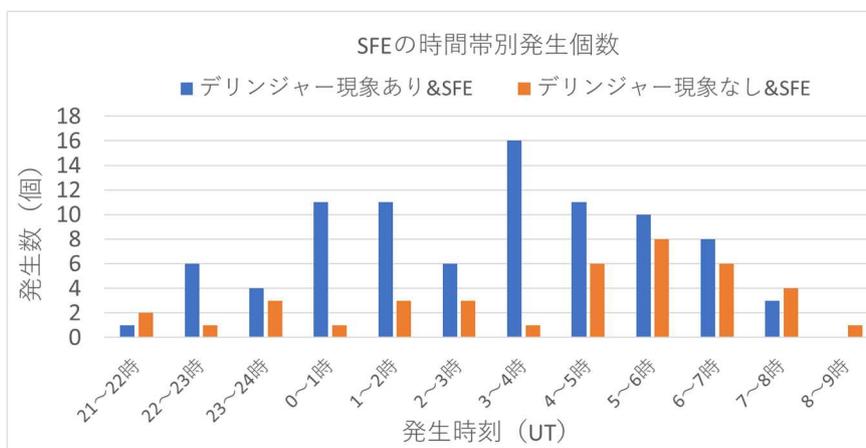


図 8 SFE, デリンジャー現象の時間帯別発生個数

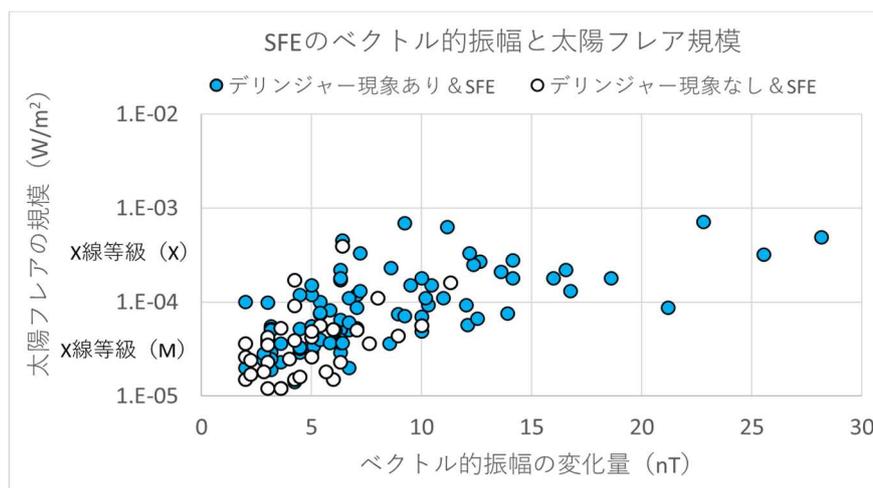


図 9 デリンジャー現象発生時の太陽フレア規模と SFE のベクトルの振幅

#### 4. デリンジャー現象、プロトン現象と SFE, Si&Ssc に関する考察

##### 4.1 プロトン現象と Si&Ssc

高エネルギー粒子は、太陽フレアにより生成されるものと、CME の衝撃波による加速から生成されるものがある<sup>(12)</sup>。生成された 10MeV 以上の高エネルギー粒子が 10PFU (particles/cm<sup>2</sup>/sr/s) 以上となった場合に、NICT にてプロトン現象の発生として臨時情報が発表されている。また地磁気現象として Si&Ssc は、CME の衝撃波が地球磁気圏に衝突することにより生じると考えられており<sup>(9)</sup>、プロトン現象と Si&Ssc は CME の衝撃波により発生するという点において、一致している。

図 4 に示す通り、プロトン現象と同一の CME から発生した Si&Ssc の H 成分は、明瞭に発達していた。また、Si&Ssc の H 成分変化量が 40nT 以上になると、プロトン現象も同時に観測する割合が 83% と高くなっていた (図 4)。そして、図 7 より Si&Ssc の H 成分変化量は、太陽風による動圧差の大きさに比例して増加していた。これらのことから、Si&Ssc とプロトン現象を同時に観測した場合には、H 成分が発達しているため、CME による動圧の変化は比較的大きいものになっていたと考えられる。

太陽フレア、プロトン現象と地磁気擾乱が発生するタイミングについては調査されているが<sup>(13)</sup>、人工衛星で得られた太陽風データを考慮した Si&Ssc に関する検討は十分に実施されていないため、H 成分が発達していたことは本調査による結果と考える。

##### 4.2 デリンジャー現象と SFE

太陽フレアにより放出された X 線や紫外線が地球に到達することにより、電離圏 D 領域の電子密度が増加し短波を吸収することで、デリンジャー現象が生ずることが知られている<sup>(14)</sup>。また、太陽フレアからの X 線や紫外線が地球に到達することにより、電離層電流が短時間のうちに変化することで SFE が発生すると考えられている<sup>(15)</sup>。このようにデリンジャー現象、SFE は、ともに太陽フレアから放出された X 線や紫外線を要因としていることから、X 線等級による太陽フレアの規模が大きくなることで、デリンジャー現象と SFE が同時に発生する割合が高まっていたと考えられる (図 8)。

デリンジャー現象と SFE の発生数と現象が生じるタイミングについては、これまでに調査が実施されている<sup>(11)</sup>。しかし、人工衛星による詳細な太陽フレア情報と関連させた調査は十分ではなく、太陽フレア規模の増加でデリンジャー現象と SFE が同時に発生する割合が高まっていたことは、本調査で得られた結果と考える。

#### 5. プロトン現象の発生を地磁気現象から推定することが可能となる特徴について検討

Si&Ssc を観測した場合にプロトン現象がどのくらいの確率で発生しているか、スレットスコア・空振り率・見逃し率を用いて検討を行った<sup>(16)</sup>。期間は Solar cycle 24(2008 年 1 月)以降のものを使用した。

表 1 に示すように、Si&Ssc とプロトン現象が同時に発生した場合を(A)適中、Si&Ssc を

観測したがプロトン現象が発生しなかった場合を(B)空振り，Si&Sscが発生しなかったがプロトン現象を観測した場合を(C)見逃し，Si&Ssc及びプロトン現象がともに発生しなかった場合を(D)現象なしとした．またSi&SscのH成分変化量を①<14nT，②≧14nT，③≧28nT，④≧38nT，⑤≧46nTとして，それぞれ①～⑤について表1の式に示す様にスレットスコア・空振り率・見逃し率を算出した．

表1 Si&Sscを観測した場合におけるプロトン現象発生予測(2008/1/1～)のカテゴリー分類(左)と定義式(右)

Si&Sscを観測した場合のプロトン現象発生予測(2008/1/1～)		
	実況	
	プロトン現象が発生した	プロトン現象が発生しなかった
Si&Sscが発生した	A(適中)	B(空振り)
Si&Sscが発生しなかった	C(見逃し)	D(現象なし)

スレットスコア	= A / (A+B+C)
空振り率	= B / (A+B)
見逃し率	= C / (A+C)

表2 Si&SscのH成分変化量ごとのスレットスコア・空振り率・見逃し率

	Si&Ssc(H成分変化量)				
	①<14nT	②≧14nT	③≧28nT	④≧38nT	⑤≧46nT
スレットスコア	0.07	0.12	0.16	0.14	0.12
空振り率	0.91	0.85	0.66	0.43	0.10
見逃し率	0.58	0.69	0.77	0.84	0.88

結果を表2に示す．スレットスコアは表1に示す①～⑤で0.1前後となっており，Si&Sscとプロトン現象が同時に発生する割合は小さい．見逃し率もSi&Sscが①<14nTの場合でも0.58となっており，プロトン現象のみの発生数が多くなっていた．

⑤≧46nTでは空振り率が0.10となっており，46nTを超えるSi&SscのH成分変化量を観測した時には，プロトン現象が9割の確率で発生していた．しかし，⑤では(C)見逃し率も0.88と大きくなっていた．

そのため，プロトン現象発生時にSi&SscのH成分に特徴的な発達認められたが(図4)，見逃し率も全体として大きく，H成分変化量からプロトン現象の発生を推定することは困難であると考えられる．

## 6. まとめ

宇宙天気現象として，デリンジャー現象及びプロトン現象と同一の太陽フレアから観測したSFE，Si&Ssc(急始型磁気嵐)の対応関係について調査を実施した．本調査を通じて得られた結果は，以下の通りである．

- ・デリンジャー現象・プロトン現象と同一の太陽フレアから発生したCMEによるSi&Ssc

の H 成分は、明瞭に発達していた。

・デリンジャー現象と SFE は、太陽フレア規模の増加とともに同時に発生する割合が増えていた。

・プロトン現象発生時に Si&Ssc の H 成分に特徴が認められたが、H 成分変化量からプロトン現象の発生を推定することは困難であった。

[成果発表] 技術資料に投稿予定

[引用文献]

- (7) 国立研究開発法人情報通信研究機構, 宇宙天気予報, <https://swc.nict.go.jp/>
  - (8) 国立研究開発法人情報通信研究機構 (2020) 科学提言のための宇宙天気現象の社会への影響評価, <https://www2.nict.go.jp/spe/benchmark/>
  - (9) 荒木徹, 菊池崇, 佐納康治, 新堀淳樹, 永野宏, 藤田茂 (2023) 解説: 地磁気急始変化 (Geomagnetic Sudden Commencement), 名古屋大学, 名古屋, <https://doi.org/10.18999/2007346>
  - (10) SOLAR AND HELIOSPHERIC OBSERVATORY, <https://sohoftp.nascom.nasa.gov/sdb/goes/ace/daily/>.
  - (11) 今道周一 (1938) 無線短波障害と地球磁場の变化, 地磁気観測所要報, 第1巻, p.13
  - (12) 八代誠 (2021) 3-2-4.太陽高エネルギー粒子(3-2.太陽嵐現象), 太陽地球圏環境予測 オープンテキスト・ブック, 名古屋大学, 名古屋, <https://doi.org/10.18999/pstep.2021.3.2.4>
  - (13) 小川忠彦 (1985) 1982年6月~9月の太陽地球間擾乱現象 III. 太陽フレア, フレア粒子及び地磁気変動, 電波研究所季報, 31, 特2, pp.19-39
  - (14) 渡邊恭子 (2021) 3-2-2.フレア放射(3-2.太陽嵐現象), 太陽地球圏環境予測 オープンテキスト・ブック, 名古屋大学, 名古屋, <https://doi.org/10.18999/pstep.2021.3.2.2>
  - (15) 安永朗宏, 藤本晶子, 吉川颯正 (2021) 磁気赤道域における特異的な太陽フレア効果(SFE\*)の発生要因の探求, 地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会, 150th, ROMBUNNO.R010-14
  - (16) 気象庁予報部, 平成25年度数値予報研修テキスト, pp.130-134, 2013
-

[調査研究の種別]：基礎課題

[課題名]：画像解析による光学式セオドライトの目盛読み取り

[担当者]：○吉武由紀、海東恵美、神谷亜希子、浅利晴紀（技術課）

[概要]：

<現状と課題>

FT型磁気儀は、地磁気の偏角伏角測定器として1980年代に普及し、現在では世界中の地磁気観測施設にて絶対観測のために使用されている。一般的な測量用セオドライトやトータルステーションについては、角度読み取り機構がデジタル化され既に久しいが、非磁性の要件が伴う磁気儀には、分度盤を目視で読み取る光学式セオドライトが依然として使われている。近年では、非磁性エンコーダーを利用して電子式に改造された磁気儀も登場しているが、現時点では非常に高価なため普及しているとは言えない。今日でも、磁気儀を用いた観測ではマイクロメーターに投影された目盛の拡大像（図1）の目視によるアナログ読み取りが主流である。電子パネルに表示されたデジタル値を読む電子式と比べると、光学式では操作や読定に一定の習熟が要求される。

<計画>

昨今目覚ましく発展するAI画像解析技術を活用し、光学式セオドライトの安価な電子化を試みる。人間による目盛の数値読み取り（マイクロメーター内部の分度盤と副尺の目視による読定）を画像解析で再現するため、本計画では比較的簡単に導入できる画像解析クラウドサービスを利用する。目盛の画像から測定値を読み取る学習モデルを生成し、その正答率をどこまで高められるか調査する（業務実装には当然100%の正答率が要求される）。

<期待される効果>

磁気儀の目盛読み取りが電子化された（正答率100%の理想的な画像解析が実現した）場合、絶対観測において次のようなメリットが得られる。①読定値の自動記録も可能となり、観測の時間と労力を短縮できる。②目盛読み取りの個人差を解消できる。③読定の際に観測者自身の重心移動が不要となり、地盤が不安定な地点での観測精度が向上する。なお、小型カメラや伝送用モジュールに磁性があったとしても、これらが望遠鏡に固定されている限り偏角伏角測定影響しない（1軸磁力計の出力に一定のオフセットを生成するのみ）。

[具体的な計画と達成目標]：

1. 磁気儀 THEO 010B の分度盤と副尺の拡大像をマイクロメーター接眼鏡から撮影する（図1）。
2. 収集した撮影画像を読定に適する（対向する分度線が合致する）グループと適さないグループに分類してそれぞれラベリングする。さらに前者の画像には正解の読定値を付す。
3. ラベリングされた全画像の一部を教師データとして画像解析AI（例えば Google AutoML Vision）に学習させ、目盛拡大像の自動解析モデルを生成する。

4. 評価用に残しておいた画像を解析モデルに入力し、得られた結果（読定適否判定と読定値）の正答率が 100%に迫るか検証する。

[工程表]：

R6									R7		
4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
データ画像の撮影と収集											
				ラベリング							
					画像解析モデルの構築						
								正答率の検証			

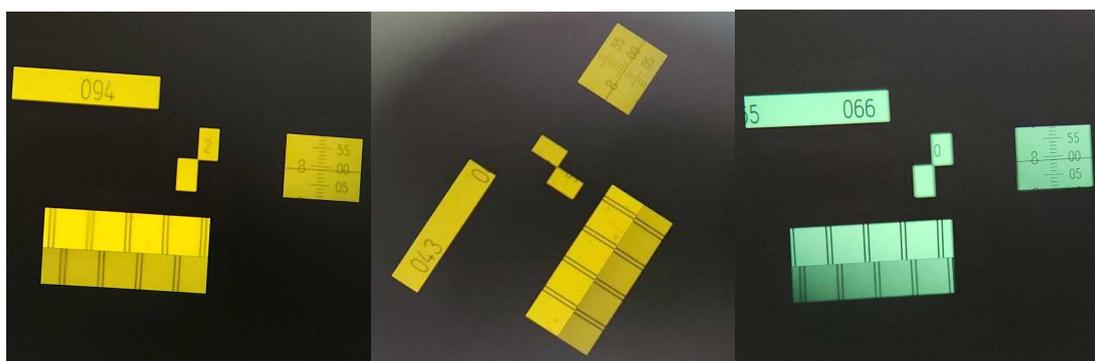


図1 マイクロメーターに投影された分度盤の目盛および副尺の拡大像

[今年度の成果]：

今年度は本課題の当初目標の達成に要する時間を十分に割り充てることができず、進捗は（工程1～4のうち）工程2までに留まった。年間を通じ担当者（全て技術課）の本来業務が繁忙であったためである。残りの工程の実施、及び、最終結論の導出については次年度へ持ち越すこととし、以下にはここまで得られた成果のみを報告する。

#### <画像収集とラベリング>

画像収集については学習に用いるデータとして数を稼ぐ必要がある。これを達成することは、現時点では次の理由から容易な状況にないことがわかった。1) マイクロメータの接眼鏡にカメラレンズを十分に近づけないと内部の像が得られない。2) カメラレンズが完全に接眼鏡に接すると、像のコントラストが過大となり目盛が潰れて見えない。これら問題の一部は、高解像度かつ高感度のカメラ機能を有するスマートフォンを使用すること

で解決したものの、撮影作業（カメラ位置を調整とシャッター）そのものを効率化する方法は見出だせなかった。現時点で手動による方法のみ実行可能なため、画像データの量産には相応の時間（と根気）が必要である。

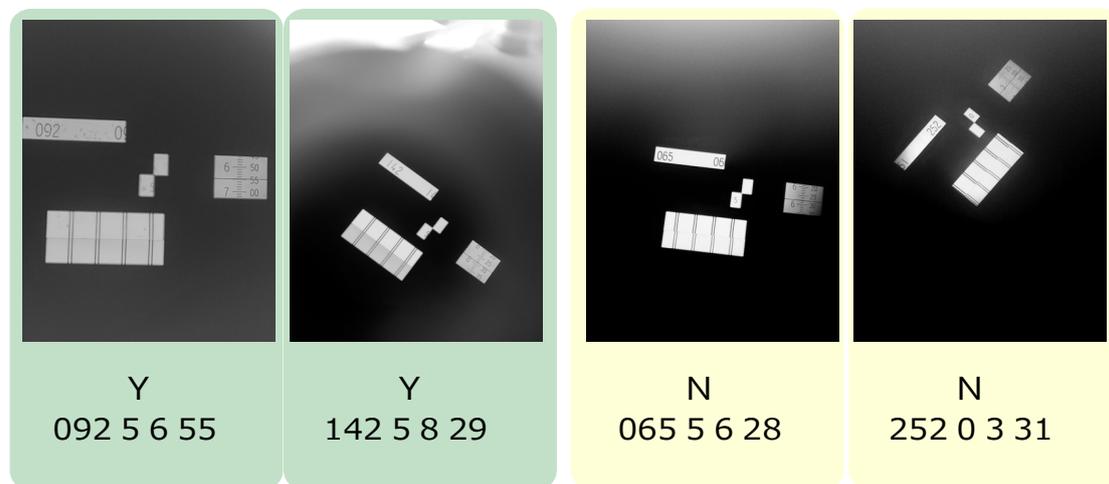


図2 撮影された画像（グレースケール化済み）と付加されたラベル

図2に取得した画像とそのラベリングの例を示す。マイクロメータ視野の左下にある最大の窓には、ガラス輪盤に（20分角毎に）刻まれた二重線が投影されている。輪盤の180度対向側に位置する二重線が窓の上と下半分の領域にそれぞれ映し出されており、これらがセオドライトの姿勢に従ってそれぞれ横にスライド移動する。姿勢の角度測定を行うのは、視野において二重線が上下で完全に合致するときである。これを考慮し、まず各画像のラベリングにおいては、合致している（Y）、合致していない（N）、という基準で2つのグループに分類した。人が直にマイクロメータを覗き、YまたはNの判断を行う場合、個人の視力（近視の度合い）に従って読み取り値に数秒角の差が生じることが知られている。写真からの判定であれば、このような問題を回避することが可能である。

測角に適する状態（Y）の画像からは、その読み取り値も各画像のラベルに加えた（図2の7桁の数字列）。一方、測角に適さない状態（N）の画像については、読み取り値自体が有効なものではないが、参考値として同様に付しておいた。

#### <OCRの試み>

図2では、マイクロメータの測角値を人が認識してラベリングしたが、ここでOCR<sup>1</sup>を適用してマイクロメータ数値の抽出が可能かどうか調査してみた。OCRには、オープン

1 Optical Character Recognition（光学文字認識）手書きまたは印刷された文字列画像を検知・判別してデジタル文字コードに読み起こす技術

ソースのエンジンである Tesseract を用いることとし、その python 用のモジュール pytesseract を適用して実装することとした。OCR による文字列解析には入力する画像を事前に処理しておく必要があるが、ここでは画像処理エンジン OpenCV の python 用モジュール cv2 を適用した。これにより、マイクロメーター画像の輪郭を強調して、白黒2極化した画像を生成できる (図3)。

以上のような前処理を施した画像を Tesseract に解析させたところ、解析のチューニング次第では測角値のうち度の単位にあたる数値は読み取ることが出来た (図3の例の場合では、066 という

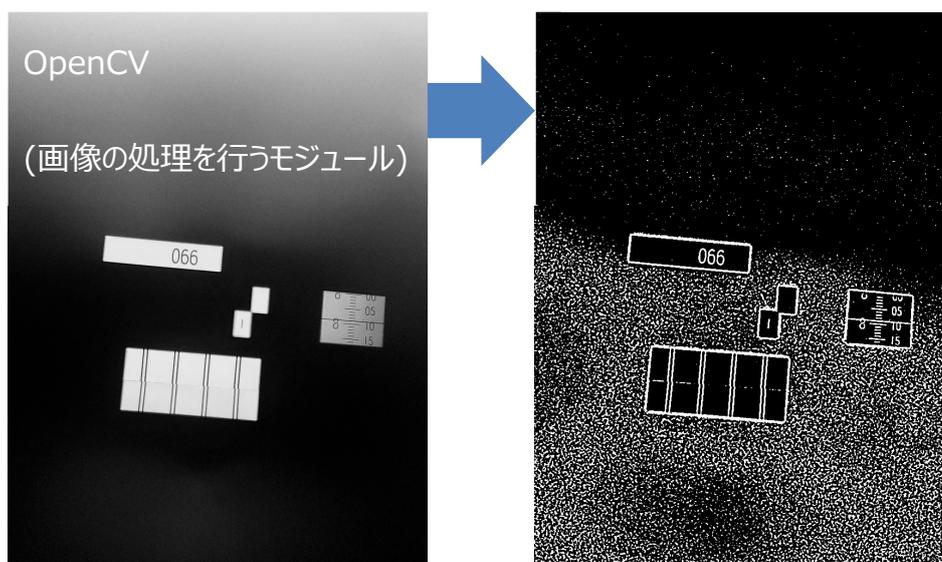


図4 OCRの前処理の例 (OpenCV 使用)

数値は認識することが出来た)。しかし、分角以下の数値については、Tesseract のチューニングをある程度調整するくらいでは読み取れるものではなかった。副尺 (一番右の小さな目盛りの付いた窓) の数字は比較的小さいが、解像度においては十分であると考えられるので、認識されない原因については現時点では不明である。

上述の結果が OCR の不適切な適用によるものか確認するため、既存の OCR アプリを用いて同じ試験を行った。OCR を適用するには多数の無料アプリが存在するが、ここでは Microsoft 社の開発した Microsoft Lens を用いたところ、図5に示すように (前処理の程度にかかわらず) 結果は同様であった。

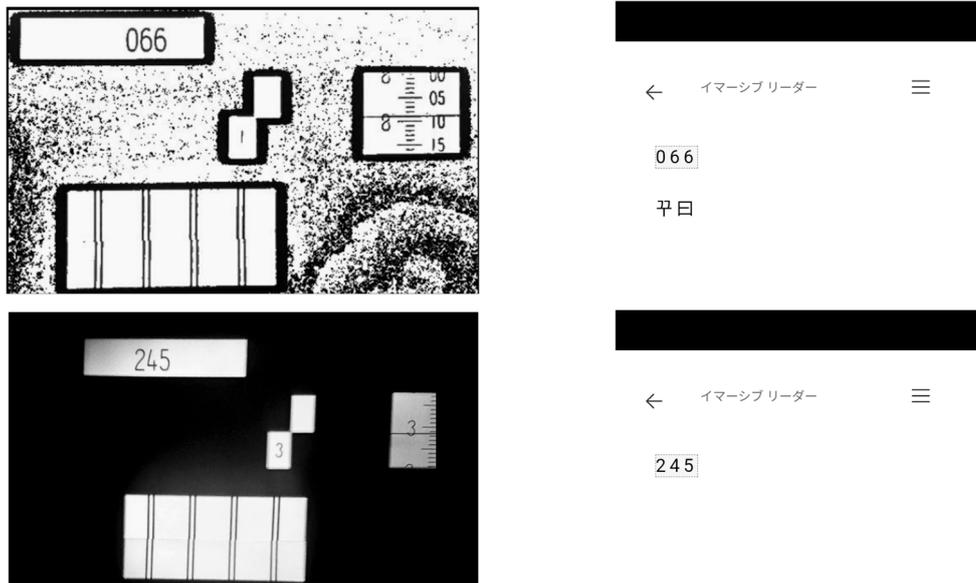


図5 Microsoft Lens を用いた文字列の認識結果

<まとめ>

ここまでの成果をまとめると以下の通りである。当初目標に迫るには大きく及ばなかったが、最終工程 3 以降のためのデータセット生成と画像解析の知見収集について一定の成果はあった。

- (工程 1) 高解像度・高感度のカメラ機能を持つスマートフォンを用いて機械学習の入力データとなる画像を作成した。撮影は手動によるため時間と労力を要するが、継続してデータを増強する必要がある。
- (工程 2) 手動によるラベリングを行った。マイクロメーター画像から測角値を抽出する方法として OCR による数値の認識を試みたが、①オープンエンジン、②既存アプリ、のいずれを用いても完全に読み取ることは出来なかった（読み取れたのは度単位の数値のみ）。
- OCR で数値を直接読み取ることが困難であるならば、画像そのものから数値を与える機械学習モデルを独自に生成する必要がある。手動（目視）で得た数値をラベリングした画像を更に大量に生成し（工程 2 の増強）、読み取り値をパターン出力させるような学習モデルを構築することになるだろう。

[調査研究の種別]：基礎課題

[課題名]：1955年以前のブロマイドデータ数値化に向けた調査

[担当者]：○飯塚ふうな、森永健司、長町信吾、吉田昌弘、松浦大輔（観測課）、増子徳道、海東恵美、吉武由紀（技術課）

[概要]：

100年を超える歴史を持つ地磁気観測所においてもデジタル値として観測されたデータは40年余りに過ぎず、地磁気観測記録の多くはブロマイド印画紙のアナログマグネットグラムとして蓄積されている。平成20年度から、これらをデジタルデータに変換する手法の開発、ブロマイド記録の数値化、ブロマイド印画紙の画像データの作成・公開作業を行っており、令和5年度時点で、柿岡1956～1983年、女満別・鹿屋1973～1984年のブロマイド記録の数値化が完了している。

来年度以降、柿岡の1955年以前のブロマイド記録のデジタル化作業を実施予定であるが、当時のブロマイド記録の品質にはばらつきが見られ、また、数値化に必要な情報が揃っていない可能性もある。そこで本調査研究では、デジタル化作業に必要な当時の記録の特徴や品質、基線値・寸法値などの変換パラメータの調査を行う。また、調査結果をもとに読取り・数値化プログラムの改修を繰り返し、1955年以前のブロマイド記録の数値データ化までの一連の作業手順を確立させる。さらに、ブロマイド記録のデジタル化を行った各年代の時刻分解能を調査し、印画紙の収縮等に起因する年代毎の違いや、数値化したデータの分解能の違いをまとめたい。

[具体的な計画と達成目標]：

1924～1955年の柿岡のブロマイド記録をデジタル化するにあたり、以下の作業を行う。

① ブロマイドアナログ記録の品質確認

(1) 時刻情報の確認

スキャン済みブロマイド記録を実際に見て、Tmarkの種類、data線及びbase線のTmark位置のズレ、ブロマイド交換時刻の有無を確認する。

(2) data線、base線の本数

同じ成分でdata線やbase線が2本引いてあるなど読取りの障害となりうる情報を確認する。

(3) 背景の汚れの確認

年代ごとに、読取りが困難となる黒ずみの状況を確認し、現在の読取りプログラムで読取り可能かどうかを確認する。

(4) 変換パラメータの確認

1955年以前のデータについて、数値変換に必要な各種パラメータ（基線値、寸法値）が、すべてそろっているかを確認する。

② プログラムの改良とテスト読取り

①の調査結果をもとに、1955年以前のブロマイド画像を数値変換できるよう各プログラムを改修する。改修したプログラムでのテスト読取りを実施し、テスト結果をもとにして読取りプログラムをさらに改修し完成度を高める。

また、テスト読取りの結果を検証し、1955年以前のブロマイドデータの最適な時刻情報の与え方を決定する。

③ デジタル数値化したデータの品質調査

過去10年以上ブロマイド読取の業務を実施してきたが、作成しているデジタルデータの精度に関する調査はあまり実施されていない。そこで、1955年以前のデータだけでなく、すでにデジタル数値化している1956年以降も併せてデジタル数値化したデータの精度検証を行う。最終目標としては、テクニカルレポートにまとめてデータ使用者に公表したい。

[工程表] :

作業項目	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 ブロマイドアナログ記録の品質確認	→											
② プログラムの改良とテスト読取り	→											
③ デジタル数値化したデータの品質調査							→					

[本年度の成果] :

1. ブロマイド記録の調査とプログラムの改良

1924～1955年のブロマイドアナログ記録から各月一枚を抽出し、現用の読み取りツールでの読み取り作業を行い、読み取りが困難または不可能な箇所を洗い出した。そして、それらを解決するために、読み取りツールの改修を実施した。ここでは、見つかった問題点と、その解決策として追加された機能の一部を紹介する。

- ① Tmark が線ではなく空白または空白と手書き線が重なっている→輝度が低い場所や空白域の中心を Tmark と認識する (図1)。
- ② ②Tmark と思しき位置に空白が近接していて目視では正しい位置を判断できない→読み取った Tmark 間の幅を pixel(dot)単位で表示する (図2)。
- ③ ③Tmark が読み取れる線と読み取れない線が共存している→読み取ることができた成分の結果から他成分の Tmark 位置を決定する (図3)。
- ④ ④③で推定した Tmark は、線の読取り開始位置のずれ等で空白部から全体的にずれる場合がある→読取済み Tmark を左右にスライドする (図3)。

⑤ ⑤全成分の Tmark が読み取れない→ブロマイド上部に記載されている交換時間を元に、データ線の開始・終了時刻から等間隔で Tmark 位置を推定する (図 4)。

これらの機能が追加されたことで、1955 年以前のブロマイド記録の読み取り作業が可能になったとともに、作業の効率化も見込まれる。

## 2. 原簿と変換パラメータの電子データ化

1955 年以前の原簿は、紙媒体としてのみ現存していることが判明した。原簿には、基線値や寸法値など、ブロマイド記録を読み取って得られる座標データを地磁気の値に変換するために必要なパラメータが書かれている。データの保護と利用性向上を目的として、原簿をスキャンして pdf データとして保存するとともに、各種パラメータを読み取って Excel に入力した。1946 年～1955 年の 10 年分についてそれらの作業を実施した。

## 3. まとめと今後

1924 年～1955 年のブロマイド記録を調査した結果をもとに、既存のブロマイドデータ読み取りツールを改良・機能追加を行った。これにより、これまでのツールでは読み取ることができなかった古い記録も読み取り可能となり、読み取り作業の効率化も期待される。また、ブロマイドデータを数値変換するために必要なパラメータの電子データ化を 10 年分を行った。

来年度以降は、改良したツールで読み取った結果を検証し、最適な時刻情報の与え方などを検討する。また、原簿と変換パラメータの電子データ化も引き続き進めていく。さらに、過去 10 年以上にわたって実施してきたブロマイド記録のデジタルデータ化作業について、データの精度検証を行い、最終的にはテクニカルレポートにまとめてデータ使用者に公表したい。

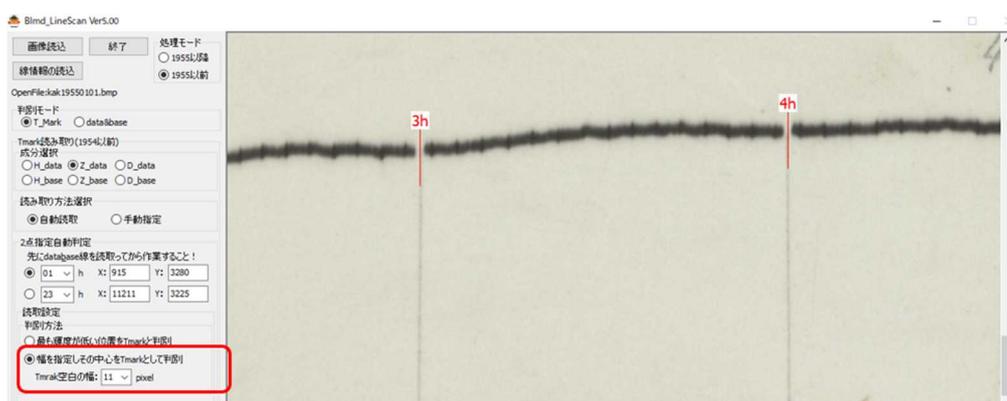


図 1 幅を指定し、空白域の中心を Tmark と認識する機能の適用例



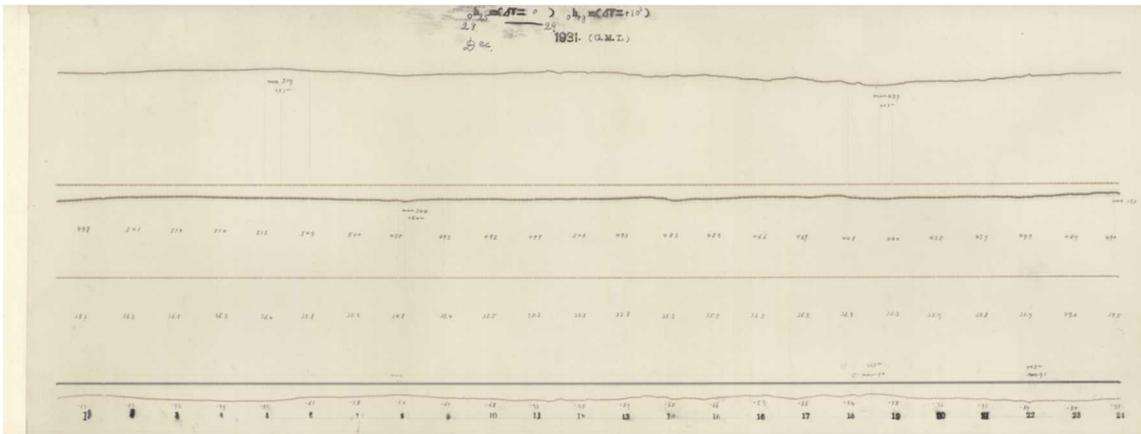


図4 全成分の Tmark が読み取れないブロマイド記録の例 (1931年12月28日)