

令和7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

基礎課題

機械学習による K 指数判定手法の開発 … 14

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5） … 15

地磁気嵐の自動判別に向けた調査（その3） … 19

画像解析による光学式セオドライトの目盛読み取り … 22

地磁気絶対観測における新方式磁力計の導入調査 … 26

Solar Flare Effect(SFE)の自動検出に向けた基礎調査 … 37

南極昭和基地の地磁気データの品質改善 … 40

雌阿寒岳の長期観測データを用いた
火山性全磁力変化抽出手法の検討 … 48

表層磁気分布の影響による全磁力変動の調査 … 55

インターマグネット推奨の新しいリアルタイム伝送方式
の予備調査 … 59

女満別観測施設構内における融雪期の全磁力変化 … 67

GNSS 真方位観測の業務化に向けた調査 … 71

2026年3月

地磁気観測所

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]：○浅利晴紀、森永健司、増子徳道、谷口秀隆、松浦大輔（技術課）、平原秀行、長町信吾、
有田真、北山拓、下川淳、屋良朝之、櫻井友己（観測課）、
飯塚ふうな（網走地磁気観測連絡事務所）

[成果]：

令和 7 年度は、3 か年計画の最終年度であることから、令和 7 年度の成果を元に、令和 5 年度から令和 7 年度までの 3 か年にわたる調査研究成果を枠組み別について取りまとめる。なお、令和 5 年度の開始当初の実施計画では 3 つの枠組み（Ⅰ～Ⅲ）に分類されていたが、令和 6 年度以降には、新たな枠組み「Ⅳ. データ処理」を追加し、地震火山部の火山観測情報システム（VOIS）へのデータ提供に要する自動補正処理アルゴリズムの検討を行った。本報告では、枠組みⅠ～Ⅳの成果についてそれぞれ示す。

Ⅰ. 定常観測

○定常観測の実施と整理

雌阿寒岳・草津白根山・伊豆大島において、活動の推移と噴火の前兆を示す可能性のある事例の観測を蓄積するため、全磁力の連続観測と繰り返し観測を継続した。作業としては、従前と同様に観測・保守作業を定期あるいは必要に応じて臨時的に続けたものであり、火山調査研究推進本部の火山調査委員会資料に取りまとめられている。本項目では、その継続的な観測の成果の掲載は割愛し、解析・評価の技術開発に関連する成果を報告する。

<雌阿寒岳>

雌阿寒岳のポンマチネシリ火口南斜面で稼働する 3 つの全磁力連続観測点では、令和 6 年度までの間、いずれも相互に類似した変化を示しており、間欠的に発生する一時的な減少レートの増加もほぼ同時期に認められていた（図 1）。

しかし、令和 7 年 9 月に 96-1 火口で小規模な噴火が発生した際には、火口に近い 2 点（ME2 および MEA）で急激な減少が観測された一方、ME3 では明瞭な減少が確認されなかった。噴火後も ME3 の挙動は他の 2 点とは明らかに異なり、これまでに例のない貴重な観測事例となった。ME3 の挙動の特異性の原因については、令和 8 年度の繰り返し観測の結果から示唆が得られると期待される。

こうした差異の明確な原因は現時点では解明されていないものの、噴火や噴気の増加といった明瞭な活発化が伴っていたことから、従来とは異なり、ごく浅部での加熱過程を捉えた可能性が示唆される。このことは、3 点から構成される現行観測体制の有効性を裏付ける結果ともいえる。

今後、沈静化に向かう過程で深部からの熱供給が停止する場合には、浅部から順に冷却が進行すると考えられる。その過程が地磁気変化としてどのように記録されるかは注目すべき点であり、将来的には警戒レベル引き下げの検討に資する知見となる可能性がある。

様式 2 調査研究業務成果報告書（第 24 条 2）

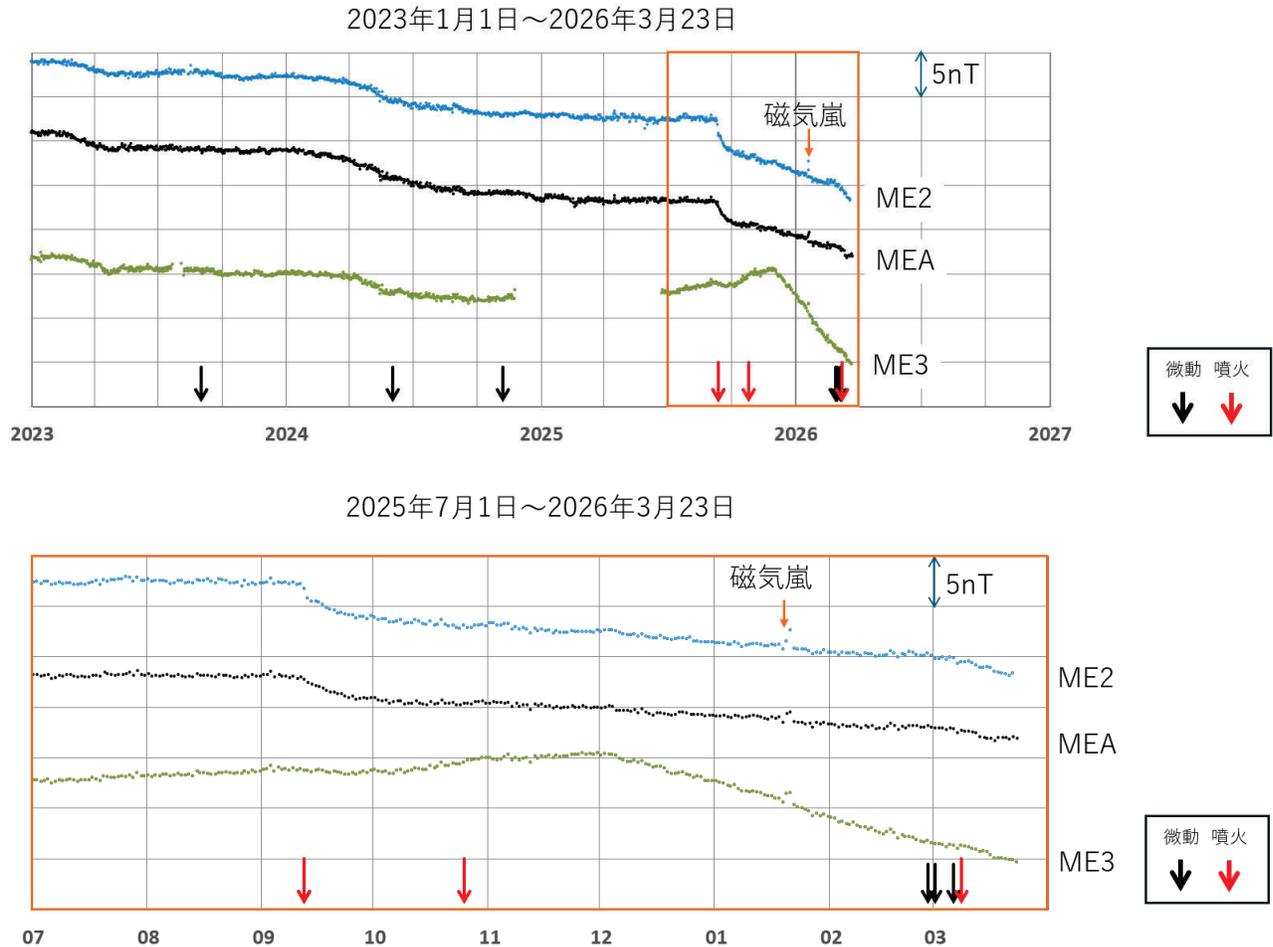


図 1 女満別を基準とした MEA,ME2,ME3 の全磁力変化（自動補正済み毎日値）。

<草津白根山>

湯釜周辺では、全磁力連続観測点として P（湯釜南）、Q（湯釜南東）、R（湯釜北東）の 3 点を運用している。令和 5 年度から令和 7 年度にかけては、機器障害によるデータ欠落が比較的高い頻度で発生した（図 2）。更新整備計画では令和 9 年度に 3 点全ての一斉更新整備を予定しており、これまでに蓄積された運用経験と技術的知見を踏まえ、より強固で安定した装置となるよう再設計を行う方針である。

本年度は、観測体制をより総合的かつ高度なものとするため、観測点 R の再配置について検討を進めた。これまでの観測結果によれば、3 点のうち R は他の 2 点に比べて、火山活動に起因すると期待される変化が明瞭に捉えられていなかった。そこで、湯釜直下の浅部における熱的活動をより鮮明にイメージングできる体制を構築することを目的に、R の最適な移設候補地について定量的な評価を実施した。

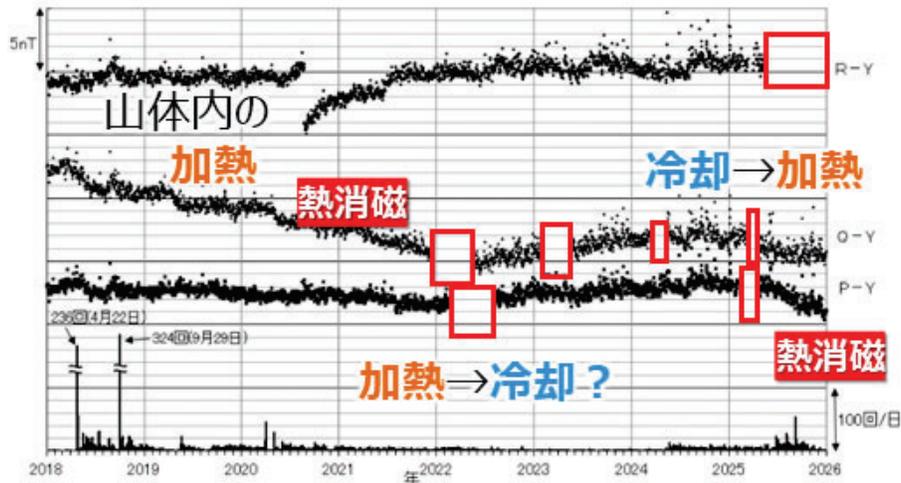


図 2 草津白根山の活動推移 (赤枠はデータ欠落)

表 1 正規分布により確率的に仮定した熱消磁源パラメータの中心と標準偏差

消磁源	緯度[°]	経度[°]	標高[m]	消磁源半径[m]
中心 (水釜下)	36.644354	138.537683	1850	100
標準偏差	50m	50m	50m	30m

R の移設先の候補は既存の全磁力繰り返し観測点とし、湯釜下に仮定した熱消磁源の偏差に対する全磁力の感度を各点において算出した。ここでは熱消磁源を一様磁化した単一球による双極子モーメントの強度変化とし、その各パラメータ (変位 3 成分と単一球半径) が互いに無相関の正規分布に従うと仮定した (表 1)。この熱消磁源モデルに対し、各観測点にて生じる全磁力の変化は誤差の伝搬則に従って正規分布により得られ、その標準偏差が大きい地点ほど熱消磁源の変動に対する感度が高いと見なせる。得られた各点の標準偏差のうち、最大のものは、6.2nT となった全磁力繰り返し観測点 7 であった (図 3)。このことから同点が最適であるという一つの客観的な示唆が得られた。

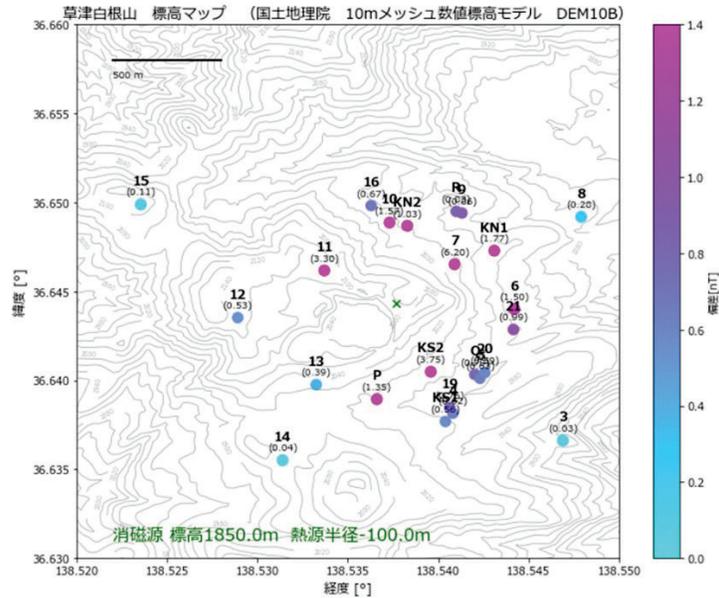


図 3 表 1 で仮定した熱消磁源に対する湯釜周辺の全磁力繰り返し観測点における感度 (nT)

○シズカ山参照点の新設

令和 6 年度中に新規整備を完了したシズカ山参照点 (設備の詳細は令和 6 年度成果報告書を参照) は、令和 7 年 7 月より連続稼働を開始した。草津白根山から南方に約 70 km 離れた八ヶ岳を基準とした全磁力変化では、超高層起源の影響によるばらつきが顕著であるのに対し、同じく南方に約 5 km と近傍に位置するシズカ山を基準とした場合には、変化のばらつきが大幅に低減されることが確認された (図 4)。特に、偶然にも DI 効果の影響を受けなかったと考えられる Q (湯釜南東) では、非常に滑らかな変化が得られ、火山性変化 (およびそれに重畳する季節性変化) が明瞭に抽出可能となった。ただし、シズカ山参照点は運用開始から日が浅く、季節性変化の特徴については現時点で十分に評価できていない。そのため、今後数年間のデータ蓄積を通じて季節性の傾向を明らかにしていく必要がある。

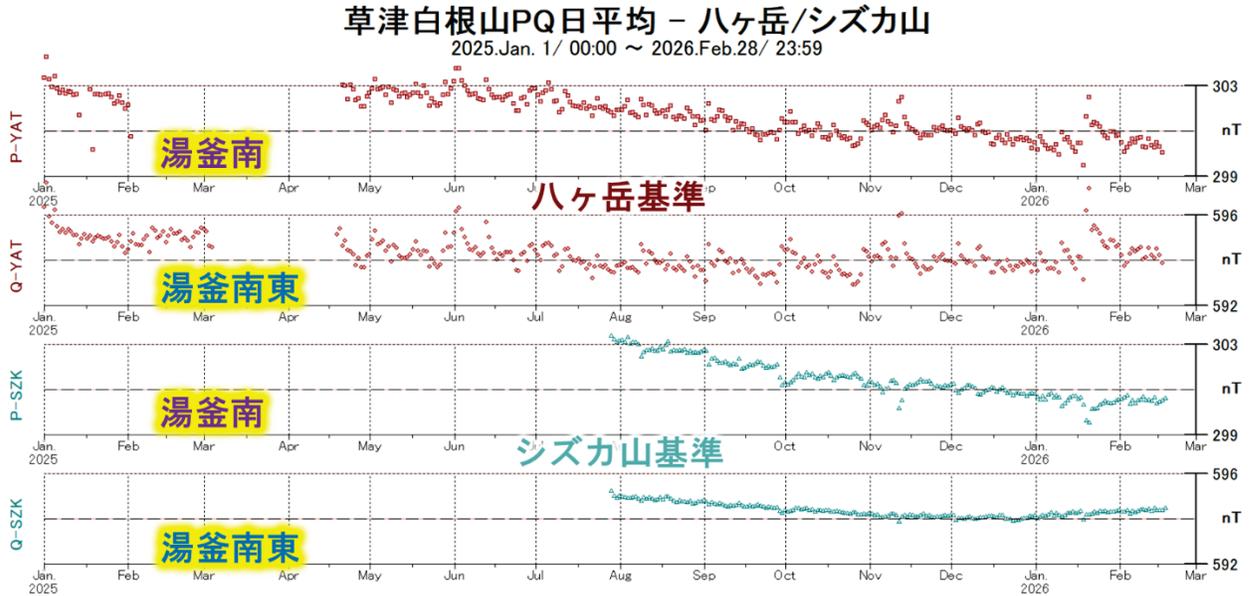


図 4 ハケ岳とシズカ山を基準とした P (湯釜南) と Q (湯釜南東) の全磁力毎日値

<伊豆大島>

令和 7 年度も、前年度までと同様に全磁力繰り返し観測を実施した。その結果は、第 7 回火山調査委員会「111 の活火山の調査観測結果に関する資料 (関東・中部地方、伊豆・小笠原諸島)」の 189 ページに示されているとおり、火山活動に起因する明瞭な変化は確認されなかった。本報告では、その集計過程において実施したノイズ処理の手法について述べる。

これまで伊豆大島での全磁力繰り返し観測では、火山性変化以外の寄与 (ノイズ) を除去するため、津倍付の当庁施設構内において臨時的全磁力連続観測を行い、これを参照として用いてきた。しかし近年、津倍付での全磁力連続観測には人工的と考えられるノイズが混入する事例が増えている。令和 7 年 5 月の全磁力繰り返し観測においても、取得した全磁力毎秒データには 7~8 秒周期の明瞭なノイズが含まれていた (図 5)。このため次善策として、当該ノイズを適切に低減するためのローパスフィルタ (39 点ガウシアンフィルタ) を設計し、津倍付の連続観測データに適用してノイズ除去を行った。事後処理により、一定程度は人工的ノイズの影響を抑制できることが確認できたものの、今後も津倍付におけるノイズ環境については継続的な注意が必要である。

様式 2 調査研究業務成果報告書（第 24 条 2）

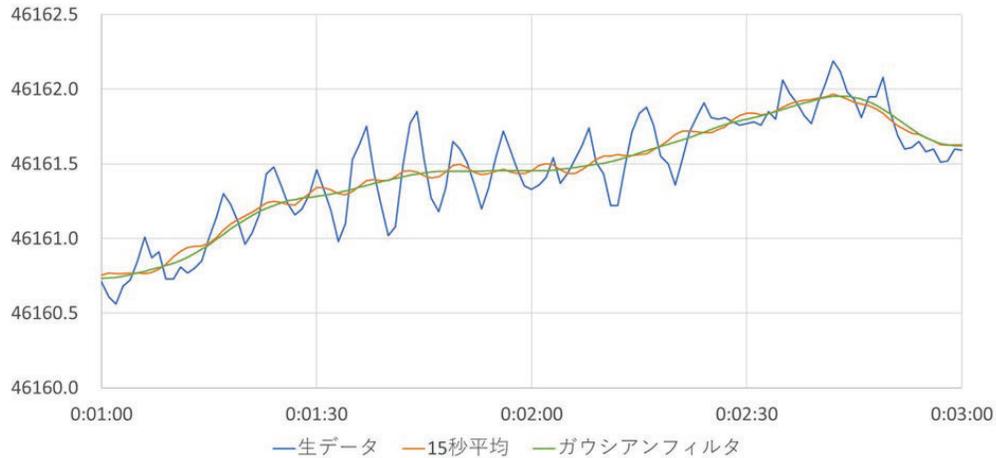


図 5 津倍付における参照用全磁力データ

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

昨年度に開発した熱消磁源の時間発展モデル推定法（令和 6 年度成果報告書を参照）を草津白根山の連続観測データに適用し、2014 年 1 月から 2025 年 10 月にかけて、湯釜付近浅部における熱的状態の推移を推定した。本解析を実施するにあたり、当所の 2 観測点のみではデータが不足するため、東京科学大学との研究協力のもと、同大学が運用する 4 観測点を追加して解析に用いた（図 6）。

湯釜南側に配置された 4 観測点（東京科学大学 KS1・KS2、および気象庁 P・Q）と、北側に配置された 2 観測点（東京科学大学 KN1・KN2）における全磁力連続観測データの月間変化量（nT）に対し、開発済みの推定法を適用して、4 パラメータ（3 座標＋モーメント強度）から成る単一双極子熱消磁源モデルを月次で推定した（図 7 および図 8）。その結果、比較的活動的であった時期の熱消磁源には以下の特徴が認められた。

- ・ 2014 年：湯釜直下（標高約 1600 m）において熱消磁が発生。
- ・ 2018～2019 年：熱消磁源が水釜側（標高約 1800 m）へ移動。
- ・ 2025 年：再び湯釜側（標高約 1400 m）へ移動。

2025 年に推定された熱消磁については、Tseng et al. (2020)^{*6} の比抵抗モデルによれば、透水性の低い粘土層（低比抵抗領域 C1）に囲まれた高比抵抗領域 R1 内において、それまでより湯釜寄りの位置で熱供給が生じた可能性が示唆される。また、これらの推定結果は、やや深部（標高 1000 m 前後）で発生した火山性地震の水平分布の推移とも調和的である（図 8）。

様式 2 調査研究業務成果報告書 (第 24 条 2)

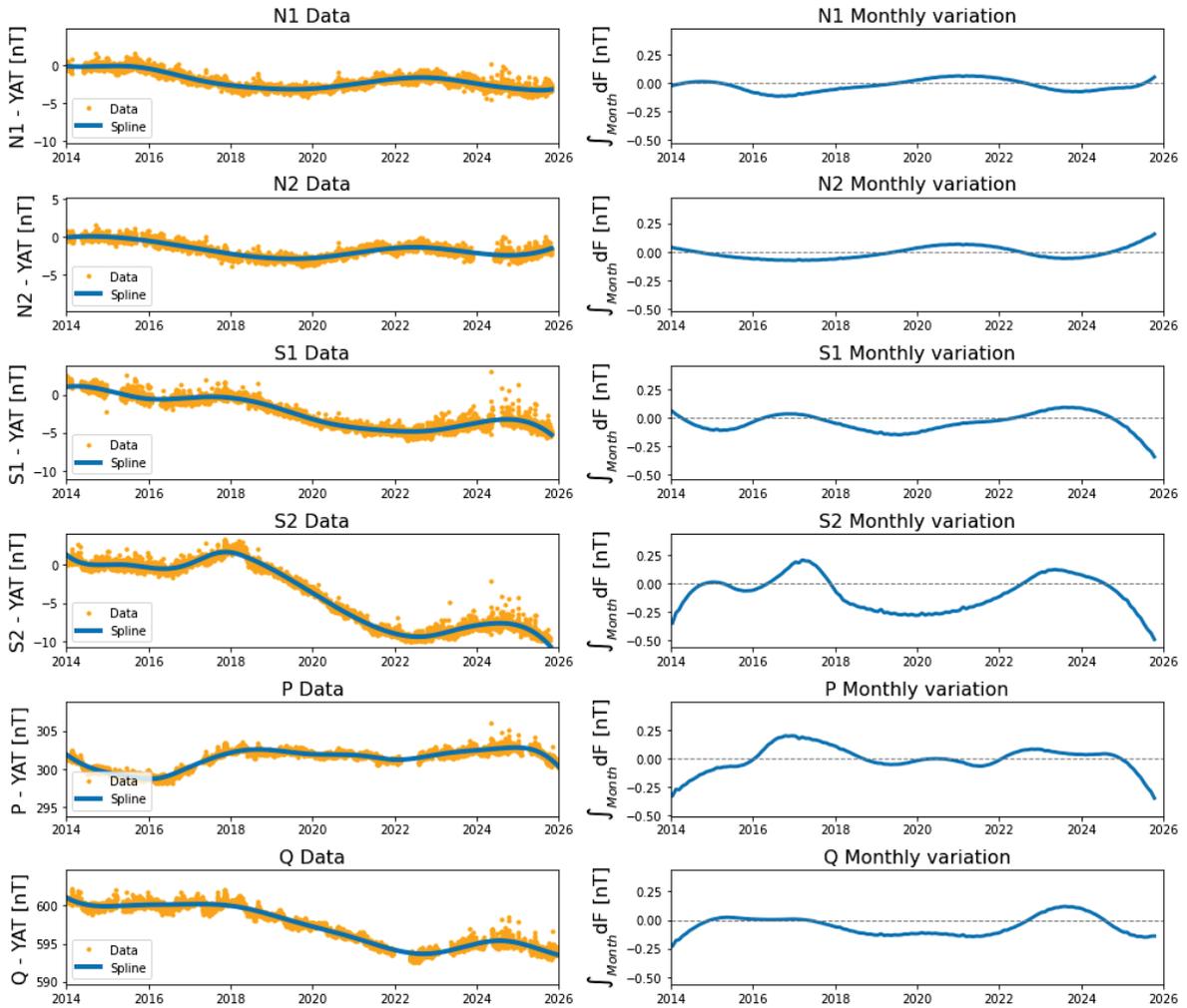


図 6 (左) 草津白根山 (湯釜付近) の 6 連続観測点 (ハヶ岳参照) の全磁力毎日値 (オレンジ) とその回帰モデル (4 次スプライン曲線)。 (右) 回帰モデルから算出した月間の全磁力変化量。

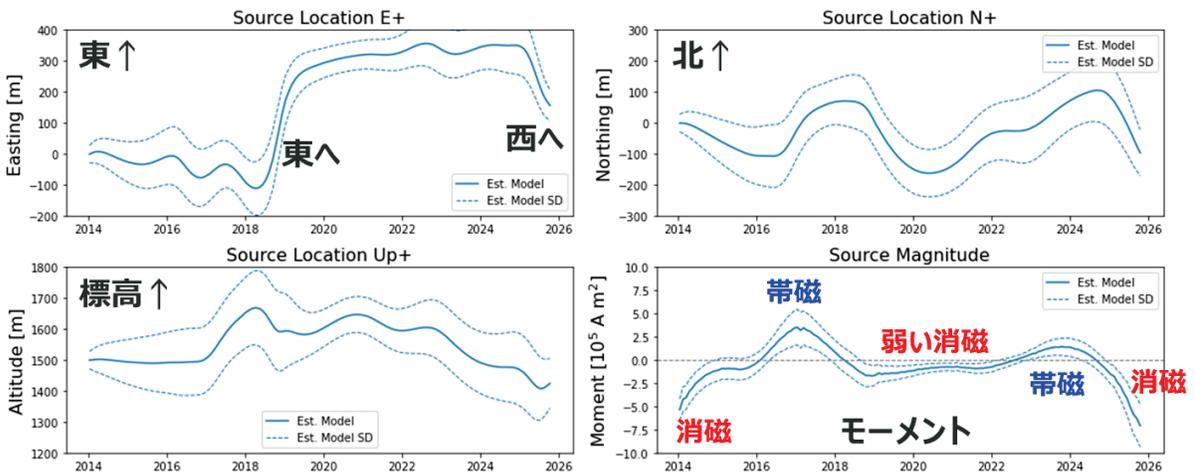
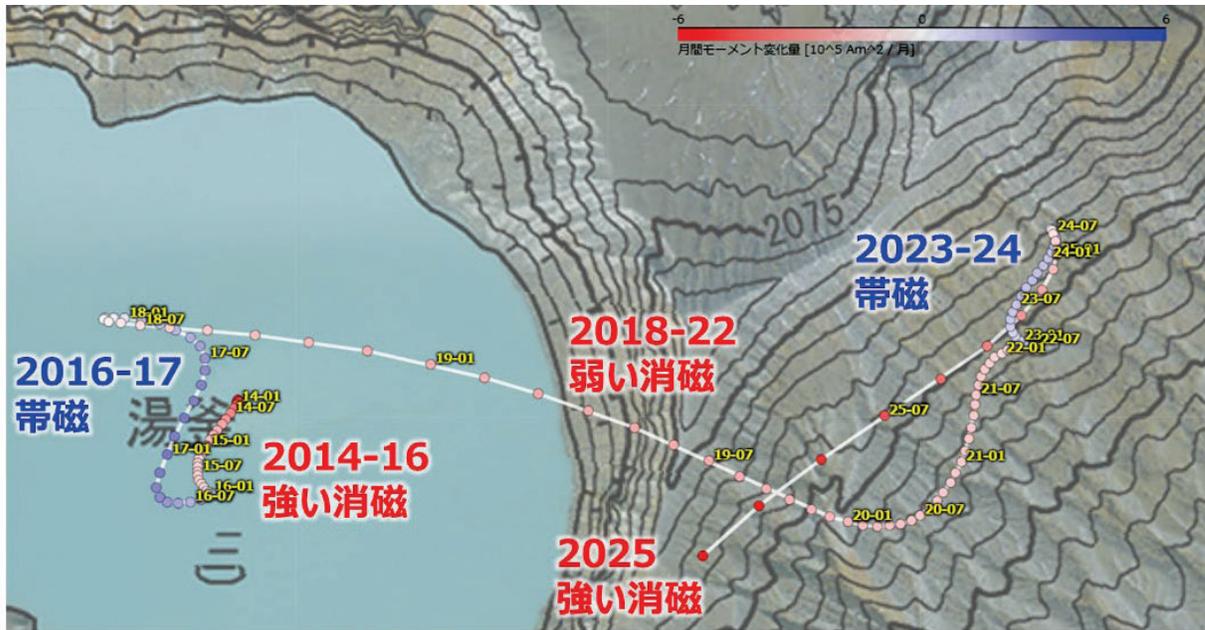
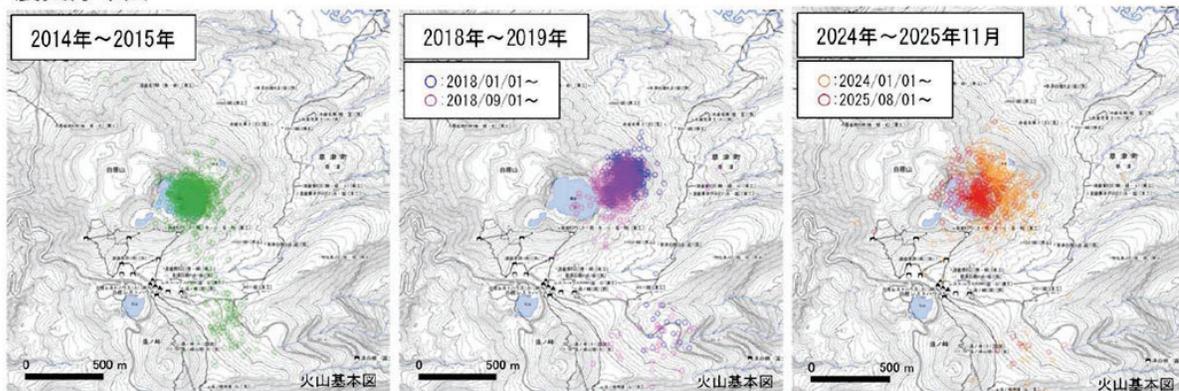


図 7 推定された熱消磁源モデルの 4 パラメータ。2014 年 1 月のモデル推定には初期状態変数は次の通り 水平位置…湯釜の中心部、標高 1500m, モーメント 0.0 Am²を与えた。



震央分布図



2019年11月8日以降の震源分布は、震源計算に使用する観測点を新たに追加して再計算している

図 8 （上）拡張カルマンフィルタを用いて推定された熱消磁源モデルの水平分布

（下）震央分布図（火山調査研究推進本部 第 8 回火山調査委員会資料（気象庁）より抜粋）

○吾妻山

令和 5～6 年度に引き続き、大穴火口周辺の観測点において成分繰り返し観測を実施し、その観測結果の安定性を評価した。一方、令和 6 年度までの調査で明らかになっていた高湯参照点の 3 成分変化計における日周ドリフトについては、センサ地点への日射を遮るなどの対策を講じたものの、原因を特定してその発生を抑制するには至らなかった。本報告では、令和 6 年度に新設した浄土平参照点で得られた観測結果を表 2 に示す。3 回の測定は JST 9 時台（測定 1）、12 時台（測定 2）、16 時台（測定 3）に実施したものであり、得られた観測基線値のレンジは 2 nT 強であった。この値は火山地域での観測としては必ずしも悪い結果ではないが、その一因として高湯変化計における日周ドリフトの影響が残っている可能性は否定できない。現時点では、変化計の日周ドリフトを完全に除去する手法は確立されていない。しかし、火山性の変化が 2 nT を上回ると期待される大穴火口近傍での観測においては、当該ドリフトの影響は比較的小さいと考えられる。

表 2 浄土平参照点における 3 回の成分繰り返し観測（令和 7 年 7 月 18 日）から得られた観測基線値とそのレンジ

	Dblv	Hblv [nT]	Zblv [nT]
測定 1	-8° 48.61′	-1267.01	64.17
測定 2	-8° 48.56′	-1264.80	63.26
測定 3	-8° 48.59′	-1266.63	65.54
レンジ	0.05′	2.21	2.29

Ⅲ. 簡易型偏角・伏角の測器開発

令和 5 年度に、トランシットコンパスに 3 軸磁気センサおよび加速度センサを搭載した小型軽量の偏角・伏角測定装置（以下、「簡易 DI 計」）の設計を完了し、試作機の開発に着手した（令和 5 年度報告書を参照）。令和 6 年度も開発を継続し、令和 7 年度に試作機が完成した（図 9 および表 3）。

簡易 DI 計の試作機には、一般的で比較的安価な市販モーショセンサ基盤に組み込まれた 3 軸加速度センサおよび 3 軸磁気センサが搭載されている。そのため、センサの感度や直交度について厳密な保証はなく、観測精度の確保が課題である。そこで、感度および直交度のずれを補正するため、3×3 の較正行列を適用し、事後的に数値補正を行う方式を採用した。

令和 7 年度には、センサをあらゆる方向に向けて多数の測定データを取得し、それらに基づいて較正行列を推定する手法を考案するとともに、その有効性の検証を実施した。これにより、簡易 DI 計の基本性能を評価するための基礎的準備が整ったといえる。火山の全磁力観測点における実際の測定試験については、次年度以降に実施する予定である。



図 9 3 軸の磁気センサと加速度センサを搭載した簡易 DI 計の試作機

表 3 簡易 DI 計試作機の基本仕様

項目	内容
重量	1.3 kg
水平回転目盛	5 分(偏角解像度 約 0.1°)
磁場分解能	13 nT(伏角解像度 理想的には約 0.03°)
測定所要時間	30 分以内を目指す

IV. データ処理

令和 6 年度に完了したデータ処理の一元化（フォーマット統一、ノイズ補正処理アルゴリズムの開発と自動化実装、伝送基盤の整備）により、気象庁の現行の火山観測情報システム（VOIS4）では、前日までの補正済み全磁力毎日値を取得し、閲覧できるようになった（図 10、詳細は令和 6 年度成果報告書）。これにより、従来は手動で行っていたデータ処理および配布作業を大幅に省力化できたほか、火山監視・警報センター等では、開発時点で最適化された自動ノイズ補正が適用された直近の全磁力連続データを容易に確認できるようになった。

令和 7 年度は、地震火山技術・調査課地磁気解析係と連携し、評価資料の作成など実際の監視業務における利用状況のフォローアップを行った。また、気象庁の火山活動評価会議や施設等機関研究発表会においても本整備内容を紹介したほか、庁内の業務用コミュニケーション基盤に相談窓口を設け、現場からの問い合わせに対応しやすい体制を整備した。

様式 2 調査研究業務成果報告書（第 24 条 2）



図 10 VOIS4 の地磁気データ監視画面の例（樽前山）。
（上）自動補正の適用なし（下）自動補正の適用あり。

<今後の展望>

令和 7 年度を最終年度とする本 3 か年計画では、重点課題として掲げた中期的目標「地磁気観測による火山監視の業務化」に向けた技術開発において、各枠組み（Ⅰ～Ⅳ）で重要な進展を遂げた。ここでは、次期 3 か年計画（令和 8 年度～令和 10 年度）の策定にあたり、上記目標の達成に向けて各枠組みにおいて見込まれる成果を改めて整理する（図 11）。

Ⅰ. 定常観測:

これまでに得られた知見を活かして安定性の高い観測装置の設計と更新整備の検討を進められる

Ⅱ. 地磁気観測データのノイズ低減:

ノイズ除去を高度化し微細な火山性変化をより高精度に抽出できるようになる

Ⅲ. 簡易型偏角・伏角の測器開発:

簡易 DI 計の開発を完了し、全磁力観測点で偏角・伏角を簡便に取得できるようにする。これにより、現体制で未適用の長周期 DI 補正が実施可能となり、全磁力変化のトレンドを正確に把握できるようになる。

Ⅳ. 地磁気観測データのノイズ低減:

枠組みⅢにより全磁力トレンドが高精度化されることで、熱消磁源の時間発展モデルの信頼性が向

様式 2 調査研究業務成果報告書（第 24 条 2）

上する。

IV. データ処理:

枠組み I～IIIの成果を、VOIS4 が提供する全磁力データの自動補正チューニングに反映する。また、熱消磁源モデルの高精度化の成果を火山活動評価の検討材料に取り込むことで、「地磁気による火山監視の業務化」に必要な高度化が実現可能となる。

次期 3 年計画の終了時に、地磁気観測を実施する火山において実際に業務化を目指すには、これまでの成果を踏まえ、目標達成に向けた取り組みを一層加速させる必要がある。

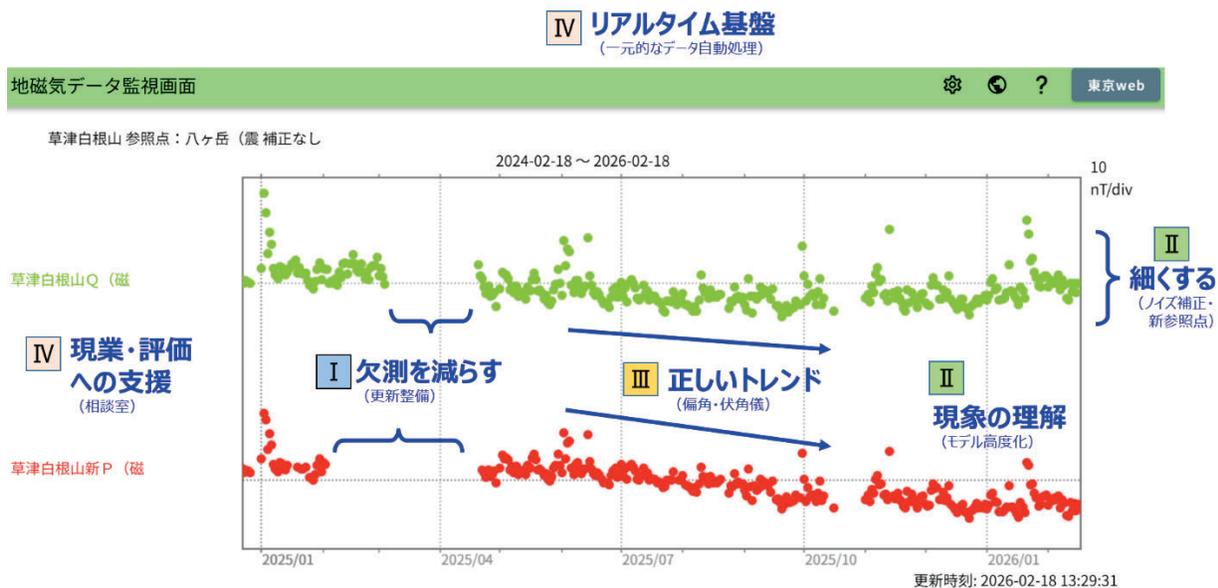


図 11 「地磁気観測による火山監視の業務化」 達成に向けた重点ポイントの整理

[成果の発表] :

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

○令和 5 年度

豊留修一・藤原義明・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, 2024 年 3 月

松下拓輝・浅利晴紀・稲村友臣・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・藤原義明・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, 2024 年 Conductivity Anomaly 研究会論文集

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 月の熱消磁気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., Asari, S., 2023, A new method to correct the orientation effect in observations of the total magnetic force for volcanomagnetic monitoring, the 28th IUGG General Assembly, A23p-327

○令和 6 年度

様式 2 調査研究業務成果報告書 (第 24 条 2)

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) 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, 2025 年 Conductivity Anomaly 研究会論文集

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, 2025 年 Conductivity Anomaly 研究会論文集

○令和 7 年度

笹岡雅宏・浅利晴紀・小田啓邦, 伊豆大島火山の全磁力変動に関する研究, 2025, 日本火山学会 2025 年度秋季大会, 2025 年 10 月

浅利晴紀, 地球電磁気学的手法による火山活動評価の高度化, 2026, 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, 2026 年 3 月

浅利晴紀・谷口秀隆・神田徑, 2026, 2025 年草津白根山活発化に伴う地磁気変化, 2026 年 Conductivity Anomaly 研究会論文集

基礎課題

[課題名] : 機械学習による K 指数判定手法の開発 (令和 7 年度)

[担当者] : ○長町信吾 (観測課)

[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。昨年度までの調査で、K=7 の判定において 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、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により良好な判定ができることが分かっている。本年度は K=6 以下の判定を勾配ブースティング決定木アルゴリズムにより行った。結果を表 1 に示す。

表 1 : D 成分の正答率

		予測値										正答率 (%)
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
確定値	0	4900	733	7								86.9
	1	563	3652	539								76.8
	2	5	460	3230	263							81.6
	3		5	314	1989	41						84.7
	4			3	99	544	7					83.3
	5				3	18	115	1				83.9
	6						3	17	2			77.3
	7								7			100
	8											
	9											
正答率(%)		89.6	75.3	78.9	84.5	90.2	92.0	94.4	77.8			
総合正答率												
-2 違い	-1 違い	一致				+1 違い			+2 違い			
0.09%	8.32%	82.50%				9.05%			0.04%			

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。これは熟練者が互いに同じデータで読み比べた場合の正答率に匹敵する水準である。昨年度までに H 成分においても 80%を超える正答率が得られるモデルを開発できており、両成分において人間によるハンドスケールリングと同等の判定が可能になったことを意味する。

今後はこれらのモデルの業務への反映を進めていきたい。

[成果の発表] :

なし

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 5）（令和 7 年度）

[担当者]：○屋良朝之（観測課）、浅利晴紀、森永健司、松浦大輔（技術課）、
飯塚ふうな（網走地磁気観測連絡事務所）

[成果]：

今年度の調査では、観測点間の周波数特性を明確に抽出するために、昨年度の調査において、背景ノイズの影響により評価が困難であった mmb00 および mmb01 の地磁気 3 成分（水平分力 H、鉛直分力 Z、偏角 D）に対し、リモートリファレンス（以下、RR）法を適用した周波数解析を実施した。

解析には、昨年度の調査と同様に女満別観測施設の mmb00 および mmb01 のデータセットを用いた。対象期間は 2015 年の 1 年間とし、施設周辺の人工ノイズの影響を最小限に抑えるため、夜間帯にあたる 15:00:00–19:33:03 UT（16,384 秒間）のデータを使用した。さらに、夜間データのうち 15–18 UT における K 指数が 4 以上の擾乱日のみを解析対象とした。また、リファレンス点としては、時刻同期が確保されている柿岡（kak00）の地磁気 3 成分毎秒値データを使用した。

また、センサーの据付姿勢の差異が観測値に与える影響の調査については、女満別観測施設 mmb04 を対象とした試験観測を実施した。まず、2025 年 5 月 26 日–10 月 6 日の期間、センサーを概ね磁北から西向きに約 1.2 度回転させた。この期間中、急始型磁気嵐 2 回、緩始型磁気嵐 5 回の観測データを得た。次いで、2025 年 10 月 6 日–11 月 20 日の期間、センサーを概ね磁北から東向きに約 1.2 度回転させ、急始型磁気嵐 2 回、緩始型磁気嵐 4 回のデータを取得した。なお、これらの観測データの解析は現在進行中であるため、本報告書における調査結果の記述は省略する。

・周波数解析結果

振幅スペクトル

図 1 に mmb00 および mmb01 における周期ごとの平均振幅スペクトルと標準偏差を示す。同図において、前年度の調査結果を橙色および青色、RR 法を適用した結果を赤色およびシアン色でそれぞれ示す。振幅スペクトルの解析結果から、RR 法の適用により、3 成分すべてにおいて周期 3–5 秒および 10 秒付近のノイズが効果的に除去されていることが確認された。RR 法適用後の振幅スペクトルは、適用前と比較して全成分で減少する傾向を示したが、特に Z 成分における減少幅は顕著であった。標準偏差に着目すると、H 成分では 10–50 秒の周期帯において RR 法適用前後の差異はほとんどなかったが、10 秒以下の周期帯では適用後に減少する傾向が見られた。D 成分では 50 秒以下の周期帯において適用前後で差異はそれほど無かった。Z 成分においては、50 秒以下の周期帯にわたって適用後に標準偏差が低減する結果が得られた。

RR 法適用後の mmb00 および mmb01 の Z 成分の振幅スペクトルは、H および D 成分

と比較して小さい値となった。RR 法は観測点とリファレンス点に共通する信号成分を抽出し、無相関なノイズ成分を除去する手法であるため、両地点間のコヒーレンスは RR 法の有効性を評価する上で重要な指標となる。図 2 に mmb00 と kak00 間の周期別コヒーレンスを示す。図 2 より、H および D 成分のコヒーレンスは 30–50 秒の周期帯で概ね 0.8 程度であったが、30 秒以下の周期帯では相関が低下する傾向が認められた。Z 成分については、50 秒以下の周期帯においてコヒーレンスが 0.2 以下と低く、相関が極めて小さいことが明らかとなった。この低い相関に起因して、RR 法を適用した過程で局所的なノイズのみならず、本来の信号成分まで除去された可能性がある。

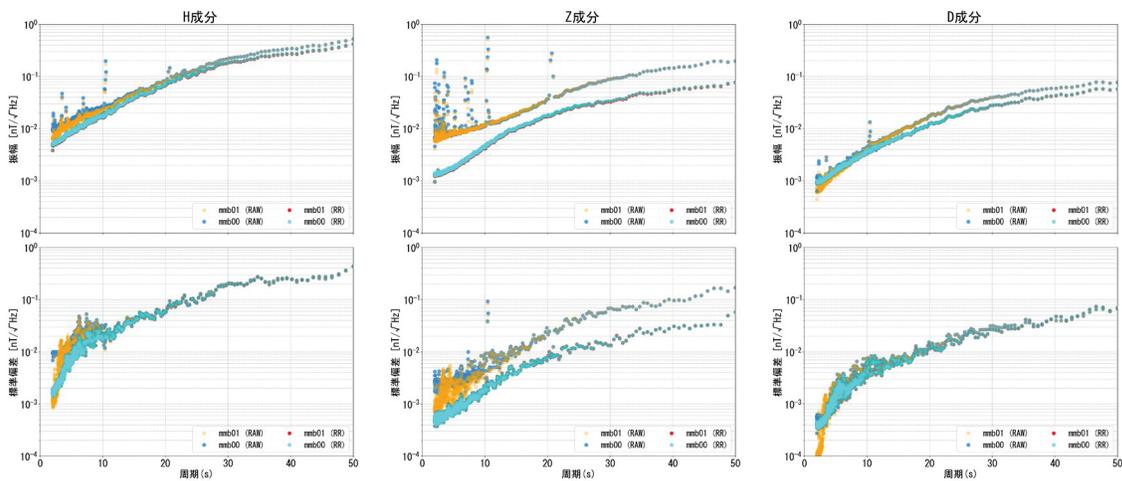


図 1：各周期における平均振幅スペクトル（上段）と標準偏差（下段）

左から H 成分、Z 成分、D 成分

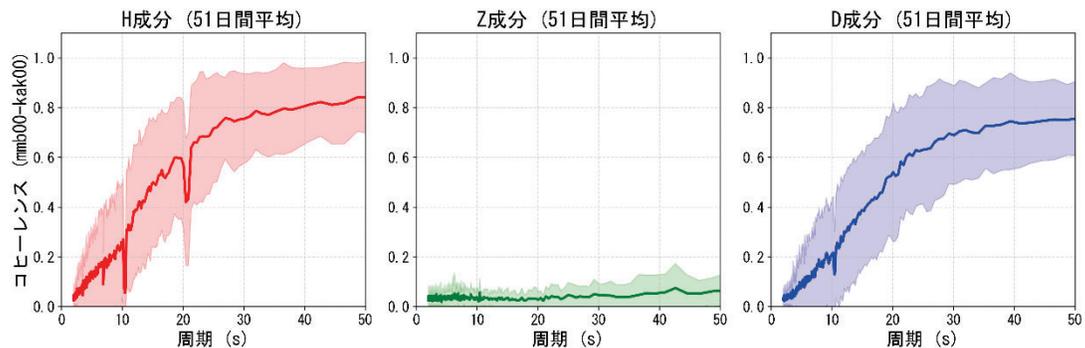


図 2：各周期における mmb00 と kak00 のコヒーレンス（51 日平均）

左から H 成分、Z 成分、D 成分。標準偏差を網掛け部分で示している。

振幅比

図 3 に各周期における mmb00 と mmb01 の振幅比 (mmb01/mmb00) を示す。全成分において、振幅比は周期によらず概ね一定の値を示したが、20 秒以下の周期帯では、mmb01

と比較して $mmb00$ の振幅が非常にわずかではあるものの大きくなる傾向であった。全周期における平均的な振幅の差を算出すると、H 成分で 2.5%、Z 成分で 2.4%、D 成分で 0.5%、それぞれ $mmb00$ の方が $mmb01$ より大きい結果となった。

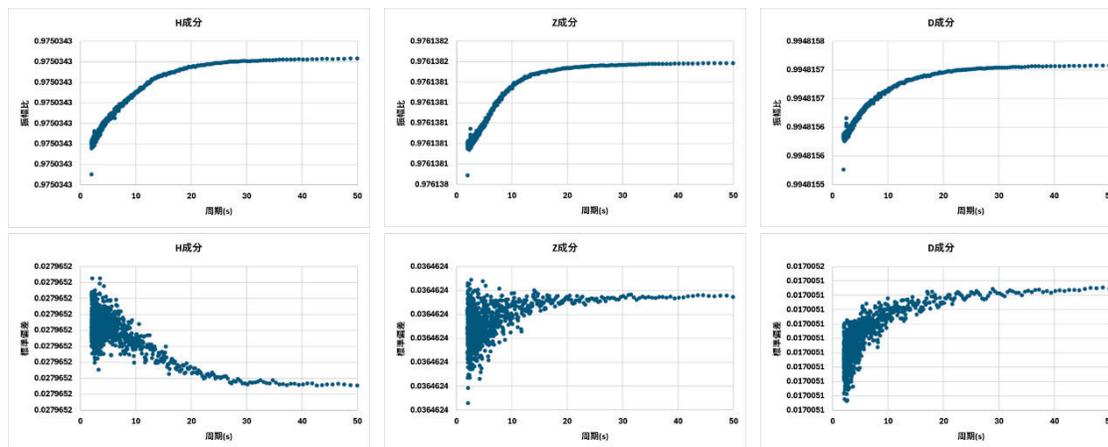


図 3：各周期における振幅比（上段： $mmb01/mmb00$ ）および標準偏差（下段）
左から H 成分、Z 成分、D 成分

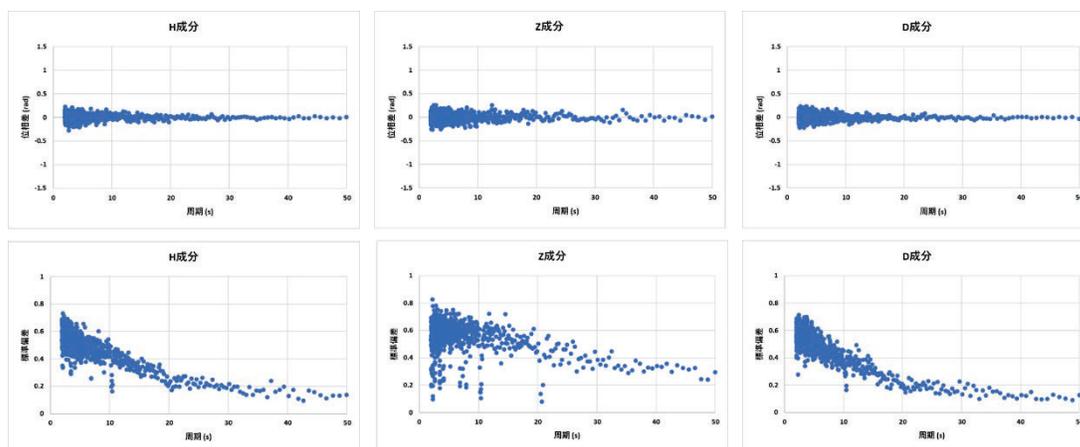


図 4：各周期における位相差（上段： $mmb01-mmb00$ ）と標準偏差（下段）
左から H 成分、Z 成分、D 成分

位相スペクトル

図 4 に各周期における $mmb00$ と $mmb01$ の位相差およびその標準偏差を示す。H および D 成分の標準偏差に着目すると、20–50 秒の周期帯では概ね 0.2rad 程度で推移しているが、20 秒以下の周期帯では 0.2–0.8rad へと増大する傾向が見られた。Z 成分については、周期 50 秒以下の範囲にわたって標準偏差が 0.2–0.8rad と大きな値を示した。全成分において、標準偏差が増大した周期 20 秒以下の領域では、有意な位相差を抽出することが

困難であった。一方、標準偏差が比較的小さい20–50秒の周期帯においては、両地点間における位相差の系統的な差異は確認されなかった。

[まとめ]

柿岡（kak00）をリファレンス点として、女満別の mmb00 および mmb01 に対してリモートリファレンス法を適用し、背景ノイズの除去を試みた。その結果、昨年度の調査で課題となっていた周期3–5秒および10秒付近のノイズは概ね除去されたものの、明確な信号を抽出するには至らなかった。この要因の一つとして、リファレンス点である柿岡周辺の地下電気伝導度異常（Conductivity Anomaly）の影響が考えられる。また、柿岡と女満別では磁気緯度が異なるため、外部起源の磁場変動における両地点間の相関が、短周期帯において十分でなかった可能性も否定できない。今後は、女満別と磁気緯度が近接している地点をリファレンス点として選定することで、より明確な信号抽出が可能になると期待される。

[成果の発表]：

なし

基礎課題

[課題名] : 地磁気嵐の自動判別に向けた調査 (その 3) (令和 7 年度)

[担当者] : ○森永健司 (技術課)、長町信吾、吉田昌弘 (観測課)、
飯塚ふうな (網走地磁気観測連絡事務所)

[成果] :

地磁気嵐自動判別ソフトウェアの精度向上を目的として、本年度は緩始型地磁気嵐 (SG) の開始時刻判定方法の改良に取り組んだ。SG の開始時刻は速報値では 1 時間単位で決定しているが、急始型地磁気嵐 (SSC) のように明確な開始シグナルがないため、熟練した当番者でも判断が難しい。

本調査では、2012 年 1 月から 2022 年 12 月までに発生した SG 45 事例を対象に、SG 開始前後の DST 指数 (以下 DST)、柿岡における地磁気 H 成分 (以下 H 成分)、太陽風全磁力 (以下 Bt)、太陽風磁場南北成分 (以下 Bz) の変化を統計的に調査し、開始時刻判定に有効な閾値を検討した。

まず、SG 開始時刻の前後 2 時間における DST と H 成分、開始 3 時間前から 1 時間後までの Bt と Bz の 1 時間平均値を抽出した。Bt と Bz の時間を 1 時間前にずらしたのは、太陽風磁場を観測する人工衛星が地球から約 150 万 km 離れた位置にあり、太陽風の変化が地上の地磁気変化より約 1 時間先行するためである。抽出した各要素の時間平均値を図 1~4 に示す。

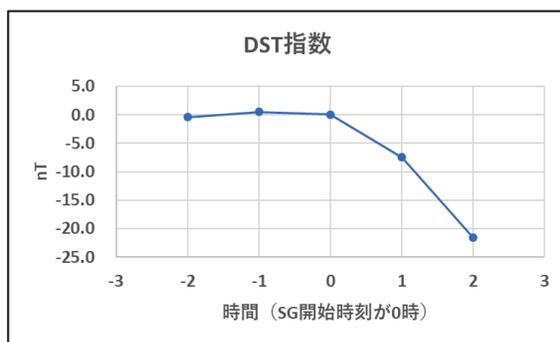


図 1 DST 指数の開始前後 2 時間の変化

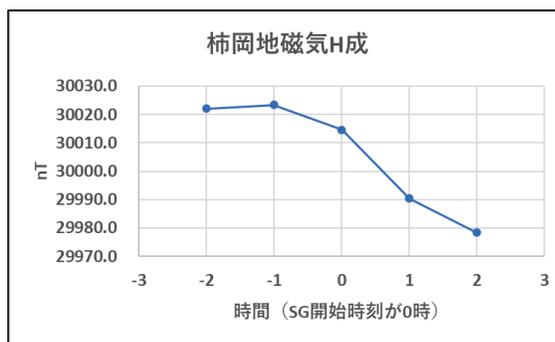


図 2 地磁気 H 成分の開始前後 2 時間の変化

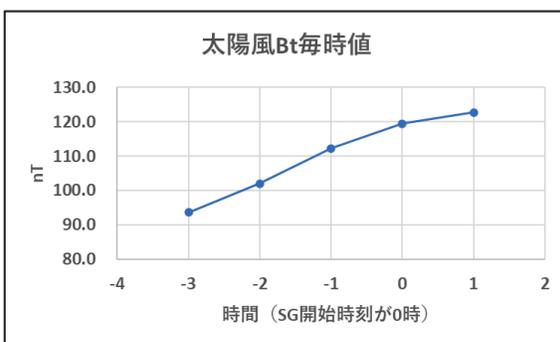


図 3 太陽風 Bt の開始前後 2 時間の変化

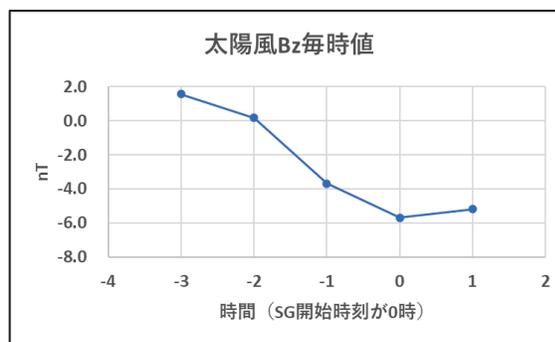


図 4 太陽風 Bz の開始前後 2 時間の変化

図 1~4 から、DST・H 成分・Bz は SG 発生後に明らかに減少し、Bt は逆に増加する傾向が確認できた。そこで、SG 発生前後 2 時間 (Bt・Bz は発生 1 時間前を中心とした前後 2 時間) の平均値の差を用いて開始時刻を判定する方法を採用した。各事例について前後差を算出し、その中央値を求め、中央値よりやや小さく区切りの良い値を判定閾値として設定した。採用した閾値は以下のとおりである。

- DST 指数：前後 2 時間平均差 -10 nT 以下
- 地磁気 H 成分：前後 2 時間平均差 -30 nT 以下
- 太陽風 Bt：前後 2 時間平均差 $+15 \text{ nT}$ 以上
- 太陽風 Bz：前後 2 時間平均差 -5 nT 以下

これらのうち 2 つ以上を満たす場合に SG 開始と判定することとした。ただし、DST は地磁気嵐判定の主要指標であるため、DST のみで前後差が閾値の 2 倍 (-20 nT 以下) となる場合は、それだけで SG 開始と判定する特例を設けた。

この判定条件を自動判定プログラムに組み込み、地磁気嵐の的中率、地磁気嵐の型の的中率、SG 開始時刻のズレが改善しているかを検証した。地磁気嵐判定結果を表 1、地磁気嵐の型判定結果を表 2、SG 開始時刻の判定結果を表 3 に示す。

表 1 自動判定プログラムによる改良前後の地磁気嵐判定結果

地磁気嵐判定	改良前		改良後	
	事例数	割合(%)	事例数	割合(%)
的中	93	72.66	92	72.44
空振り	15	11.72	14	11.02
見逃し	20	15.63	21	16.54

表 2 自動判定プログラムによる改良前後の地磁気嵐の型の判定結果

型判定	改良前		改良後	
	事例数	割合(%)	事例数	割合(%)
的中	74	79.57	74	80.43
SSCをSGと判定	17	18.28	13	14.13
SGをSSCと判定	2	2.15	5	5.43

表 3 自動判定プログラムによる SG の開始時刻の判定結果

開始時間のズレ	A当番		改良前		改良後	
	個数	割合(%)	個数	割合(%)	個数	割合(%)
見逃し(又は型間違い)	4	8.89	16	35.56	11	24.44
±10時間以上	0	0.00	6	13.33	3	6.67
±8～9時間	1	2.22	0	0.00	0	0.00
±6～7時間	1	2.22	1	2.22	2	4.44
±4～5時間	2	4.44	2	4.44	5	11.11
±2～3時間	5	11.11	9	20.00	8	17.78
±2時間以内	32	71.11	11	24.44	16	35.56

表 1・2 に示すとおり、地磁気嵐そのものの判定条件や SSC の開始時刻判定条件は変更していないため、昨年度とほぼ同じ結果となった。一方、表 3 に示す SG 開始時刻の判定では、開始時刻のズレが 2 時間以内となる割合が約 35%と、改良前より約 10%向上した。また、ズレ 5 時間以内では約 64%となり、全体の半数以上を 5 時間以内で判定できたことになる。

冒頭で述べたように SG の開始時刻判定は当番者でも難しく、当番者の判断でも 2 時間以内の的中率は約 71%である。自動判定プログラムの精度は当番者と比較すると低く見えるものの、改良前と比べれば大きく改善しており、これ以上の精度向上は困難と考えられる。

過去 3 年間で、地磁気嵐の判定、SSC の開始時刻判定、SG の開始時刻判定と段階的に自動判定条件を改良してきた。現在の自動判定プログラムは、過去事例を用いて 3 時間ごとに時刻をスライドさせ、直前 24 時間に地磁気嵐が発生したかを判定している。今回の調査により、各判定条件の検証が十分に行えたと考える。来年度以降は、プログラムをリアルタイムで動作できるよう改良し、まずは当番業務を補助するツールとして活用できるよう作業を進めていきたい。

[成果の発表] :

なし

基礎課題

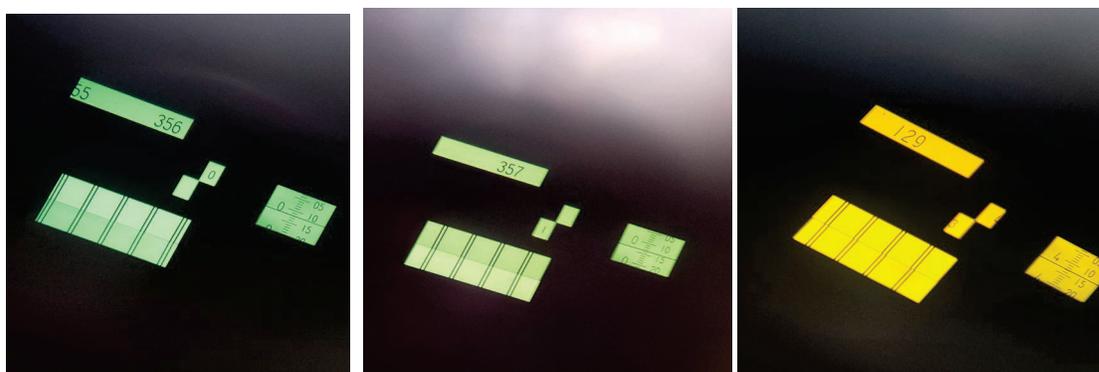
[課題名]：画像解析による光学式セオドライトの目盛読み取り（令和 7 年度）

[担当者]：○吉武由紀、海東恵美、神谷亜希子、浅利晴紀（技術課）

[成果]：

当初計画の工程表に沿った進捗は得られなかったが、上述の計画 1 から 5 までのうち、取り組むことができたのは次の通りである。

- ・計画 1（機械学習に inputs するためのデータ画像の撮影と収集）
- ・計画 2（分度線の合致の状態も情報として加えたラベリング）（図 2）
- ・計画 3（OCR による数値読み取りの改善）



①よく合致する

②おおよそ合致する

③合致しない

図 2 読定に適するグループの分類等

以下、ここまで得られた成果について報告する。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する。

<（計画 1）画像撮影と収集および（計画 2）ラベリング>

昨年度の調査から、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マイクロメーターの鮮明な像が得られることは確認できた。しかし、今年度も撮影作業（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せていないため、昨年度同様、手動による方法で画像データを収集した。画像撮影の方法自体は、昨年度の報告と同じであるため、ここでは割愛する。今年度の作業では、図 2 のように特に分度線の合致具合を微妙に変えた画像データを重点的に生成し、適宜ラベリングを行った（図 1）。学習に用いる画像データとしては、依然として数を増やす必要がある。

<（計画 3）OCR による読み取り精度の改善>

昨年度の調査では、既存の OCR パッケージ（Tesseract）および既存のアプリ

（Microsoft Lens）を用いて、画像そのものから目盛りの数値を読み取る試みを行ったところ、実際に読み取ることのできたのは「度の単位」の目盛り数値のみであった（図 1 右端の画像の場合では「066」のみ）。そこで今年度の調査では、その前段階として、目盛りのある窓を特定して抽出する画像解析を行うことにした。その手順は以下の通りである。

（STEP1） 窓の位置をラベリングした画像データセットの生成

（STEP2） 画像データから窓を抽出する学習モデルの構築

あらかじめ全体画像から窓のみを抽出しておくことで、各窓に対し OCR を確実に実行できることを期待したものである。THEO010B 彩光部の内部では、異なる 3 箇所まで光を取り込み、複雑な光学系経路を通じて各窓をそれぞれ照明している。窓ごとに輝度が異なるため、個別にコントラスト調整を行うことで OCR 精度向上を図る。

（STEP1） においては、CVAT（Computer Vision Annotation Tool）を使用することにした。CVAT は、画像や動画に対してアノテーション（画像・音声・テキストなどのデータにラベルや意味情報を付加して AI が学習できるようにする作業）を行うためのオープンソースツールであり、ブラウザ上で直感的に操作できる。クラウド上のサービスでも利用できるが、（業務上のセキュリティポリシーの関係から）今回はスタンドアローンの PC（Linux Mint 22）で実施することにした。

まず 5 つの窓に対し個別の注釈（表示窓「度」、表示窓「楡」、表示窓「奇 10 分」、表示窓「偶 10 分」、表示窓「副尺」）を設定した。実際のマイクロメーターの像では、各窓の相対的な位置関係は固定されているが、望遠鏡の高度角（伏角）とともにその視野が回転する。そこで、異なる角度で傾斜する長方形の窓を的確に指定するため、回転可能な長方形により指定できる OBB（Oriented Bounding Box）によるアノテーション作業を行った（図 3）。

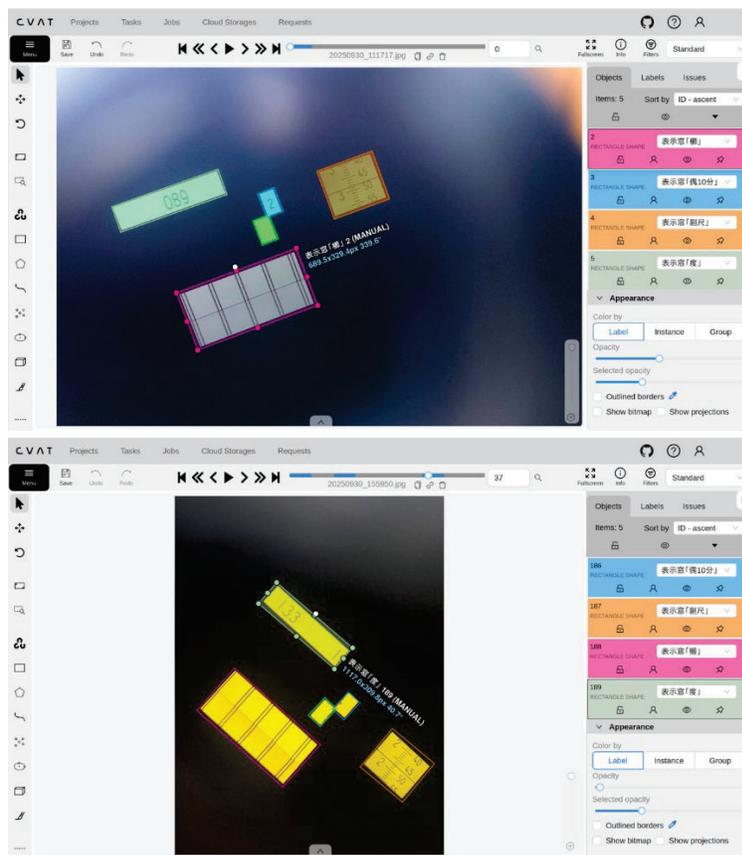


図 3 CVAT によるアノテーション作業画面の例

CVAT には手動の作業を効率化する支援機能が備わっており、別の画像に対するアノテーションをコピーすることも可能である。しかし、時間的な制約から、本年度は蓄積した 59 枚の画像データに対するアノテーション作業を実施したところで終了した（アノテーションデータの出力は YAML 形式 data.yaml）。

(STEP2) では、CVAT から YAML フォーマットで出力したデータセットを学習用と検証用に分け、画像から各窓を自動的に検出する学習モデルの構築を試みた。ここでは、畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を使って画像から特徴を取り出し、それをもとに物体を高速で見つけられる軽量で高精度な深層学習モデル YOLO (You Only Look Once) v8 を採用した。用いた Linux Mint 22 の PC は、クアッドコア CPU (インテル Core M) を搭載した低スペックの端末であるため、学習における負荷を低減するような設定で学習させた。

```
$ yolo detect train data=data.yaml model=yolo8n.pt device= cpu batch=4 epochs=30
imgsz=320
```

学習と検証には 30 分ほどの時間を要し、最終的に表 1 の結果を得た。

表1 YOLOv8 を用いた窓検出モデルの評価指標

意味（指標名）	値	説明
評価に使った画像枚数	53	—
全ラベル数（窓の総数）	265	—
Precision（適合率）	0.931	モデルが「窓」と検出したものの正しさ
Recall（再現率）	0.915	実際にある窓をどれだけ検出できたか
mAP50	0.963	予測が正解の重なりが >50% となる精度の平均指標

表1からもわかる通り、学習モデルとしては高水準だが100%確実に窓を検出できるモデルを構築するには至っていない。Recall 0.915 によれば265 個中23 個の窓を見逃していることになる（表示窓「奇10分」と表示窓「偶10分」は小さい窓であるため比較的検出が難しい）。これは、学習に使ったデータ数が少ないこと、また用いたデータ画像の多くには、互いに非常に類似した画像も含まれているため、十分な学習ができていなかったためと考えられる。今後、マイクロメーターの窓の抽出精度を100%に近付けるため、アノテーション作業済み画像データの増強と、学習モデルの適切な選択やチューニングを模索したい。

前年度に引き続き、今年度も進捗があった。次年度も本課題を継続し、[具体的な計画と達成目標]に記載した計画を全て並行して進めていく所存である。

[成果の発表]:

なし

基礎課題

[課題名]：地磁気絶対観測における新方式磁力計の導入調査（令和 7 年度）

[担当者]：○平原秀行（観測課）、浅利晴紀、海東恵美（技術課）

[成果]：

1. 基本波形型直交フラックスゲート磁力計の導入

現在、地磁気観測所では DI メータ搭載のフラックスゲート磁力計は、2つのメーカーの製品を使用している。ひとつはイギリス Bartington 社製の MAG-01H（以下、Bartington 磁力計）で、DI メータ導入初期から使用しており、地磁気観測所では最も台数が多い。もうひとつはデンマーク DTU 社製の D&I Fluxgate Magnetometer Model G（以下、DTU 磁力計）で、2023 年度に 1 台導入したものである。いずれの磁力計も一軸方向の磁場の大きさを測定するものであり、地磁気絶対観測の手法は同じである。それぞれの磁力計について、解決できない使い勝手の悪さがあり、特に屋外の観測などの観測室と異なる制約がある環境では、絶対観測のしやすさを低下させていた。観測者が感じた使い勝手の悪さを具体的に記す。

- ・ Bartington 社 MAG-01H
 - －軸調整が難しい
 - －測定値のバラつきが大きい
 - －測定値表示が見にくい
- ・ DTU 社 D&I Fluxgate Magnetometer Model G
 - －測定表示レンジが狭い（±200nT）
 - －センサが大きく重い
 - －測定値を外部に出力できない

このような使い勝手の悪さがある場合に、例えば父島のような、天候や時間の制約がある観測点では、観測者の心理的負担が大きくなる懸念があった。

本調査で評価する宇宙航空研究開発機構（JAXA）が開発した基本波形型直交フラックスゲート磁力計（以下、JAXA 磁力計）は、小型・軽量であると同時に低雑音で科学ロケットに搭載された実績があり、さらに国内業者による製作であるため仕様変更が容易にできる利点ある。JAXA 磁力計を DI メータに搭載することにより、上記のような使い勝手上の課題（設置・調整・表示・出力等）を改善し、絶対観測の作業性および取得データの信頼性の向上が期待できる。

地磁気観測所は、JAXA と令和 6 年度に協力協定を締結して磁力計の貸与を受けた。絶対観測への実用可能性を判断するため、計測安定性および応答時間を調査し、地磁気観測所所有の他の磁力計と比較した。

貸与された JAXA 磁力計は、幅 5 mm、長さ 45 mm の棒状である。また、DI メータへの取

り付け器具は、幅 50 mm、長さ 110 mm、高さ 30 mmの箱状で、上下方向および左右方向を微調ネジにより位置調整ができる。磁力計および取り付け器具の外観を写真1に示す。



写真1 貸与された JAXA 磁力計および取り付け器具
左：センサーと取り付け部、右：セオドライトに搭載した外観

2. 磁力計の計測安定性の調査

磁力計のノイズの大きさおよび計測値の安定性を調査するため、JAXA 磁力計、DTU 磁力計および Bartington 磁力計 3 台の計 5 台について、柿岡比較制御室で 3 日間の連続観測を行った。各磁力計はカールツアイス社製セオドライトに搭載し、磁北から 90° 東に向けた状態で設置した。

初期ドリフトの影響を避けるため、磁力計起動の 1 日後にあたる 2025 年 9 月 13 日から 15 日にかけて、電圧ロガーを用いて毎秒値の計測を行った。参照データには、柿岡の高感度フラックスゲート磁力計 FM10 の Y 成分 (kak00_Y) を用いた。測定の様子を写真2に、3 日間の測定値プロットを図1に示す。なお、測定後半の約 1.5 日間には地磁気嵐が発生した。



写真2 測定中の比較制御室の様子

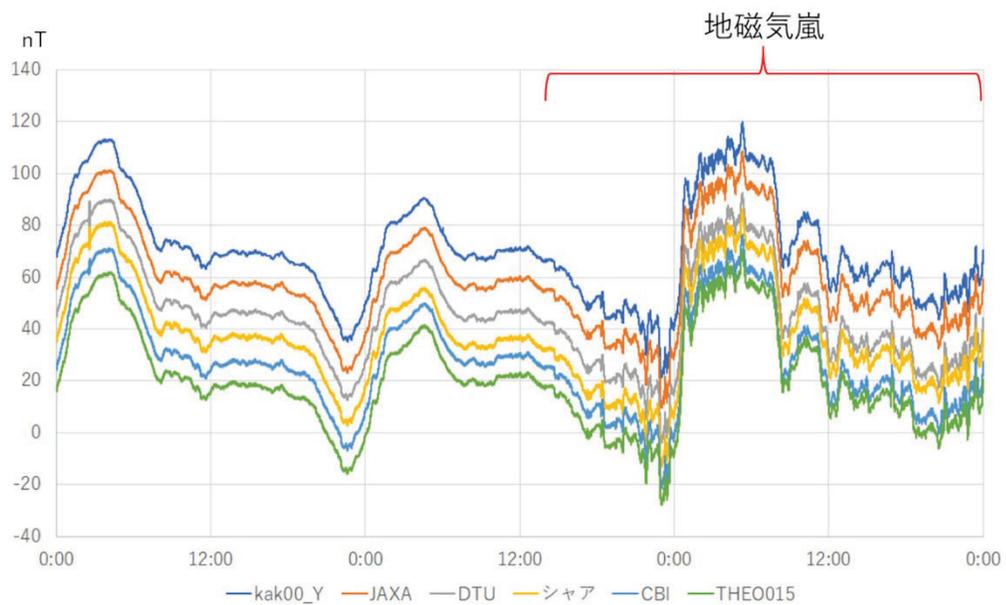


図1 計測した3日間のプロット（2025年9月13日～15日）
上から、FM10_Y成分（kak00_Y）、JAXA、DTU、Bartington 3台

計測ノイズの評価には、地磁気変動の影響を小さくするために連続する毎秒値の差（以下、毎秒値差）を用いることが多い。本調査では、毎秒値差の振幅（幅）を指標として磁

力計の出力ノイズの大きさを比較した。各磁力計の毎秒値差を図2に示す。最もノイズが小さい参照データ（kak00_Y）では、期間後半に発生した地磁気嵐に伴う変動が毎秒値差にも現れている。JAXA 磁力計およびDTU 磁力計も同様に毎秒値差の幅が小さく、地磁気嵐による変動を確認できた。一方、Bartington 磁力計（3台）はいずれも幅が大きく、地磁気嵐による変動を判別できなかった。また、DTU 磁力計では、1日あたり2回の不規則な頻度で、 $\pm 0.5\text{nT}$ 程度のノイズが発生していることがわかった。

各磁力計の計測値と参照データとの差分を図3に示す。図3より、JAXA 磁力計は他の磁力計に比べて計測値のドリフトが小さいことがわかった。差分が大きく変化した他の磁力計についても、地磁気観測所が行う偏角・伏角の絶対観測はそれぞれ30分程度で終了するため、観測時間スケールでのドリフト量は許容範囲内に収まっており、現状では絶対観測に使用できると判断している。

以上より、JAXA 磁力計は、ノイズ特性およびドリフト特性について、地磁気絶対観測に用いる磁力計として地磁気観測所所有のDTU 磁力計およびBartington 磁力計より信頼性が高いと結論付けた。

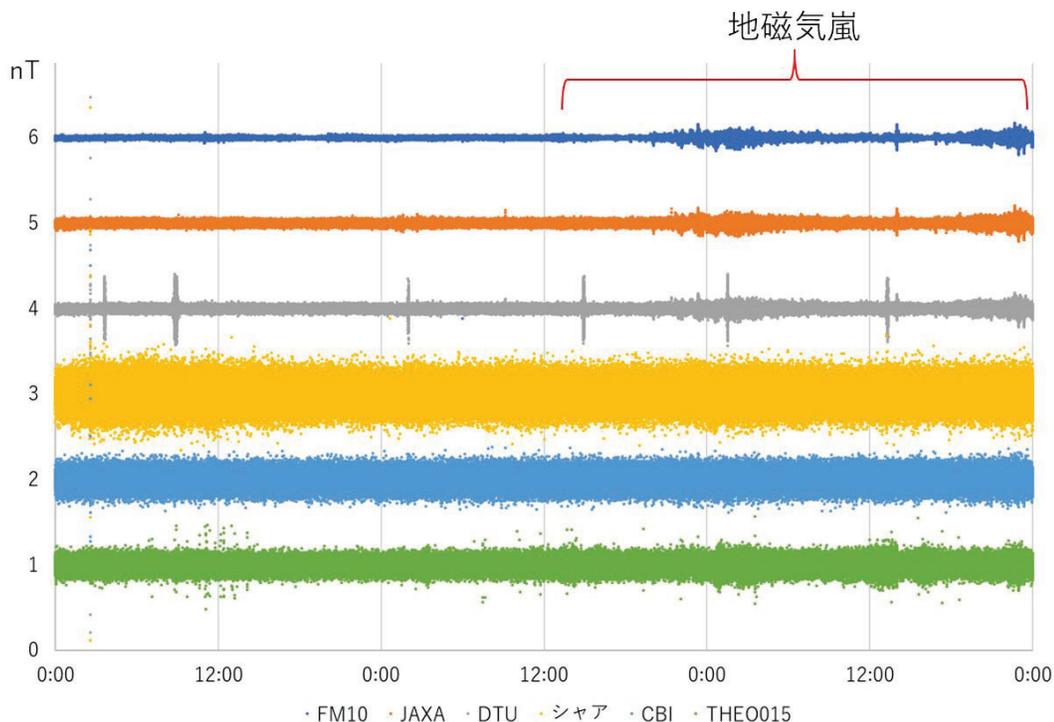


図2 計測値の毎秒値差プロット（2025年9月13日－15日）
上から、FM10_Y成分（kak00_Y）、JAXA、DTU、Bartington 3台

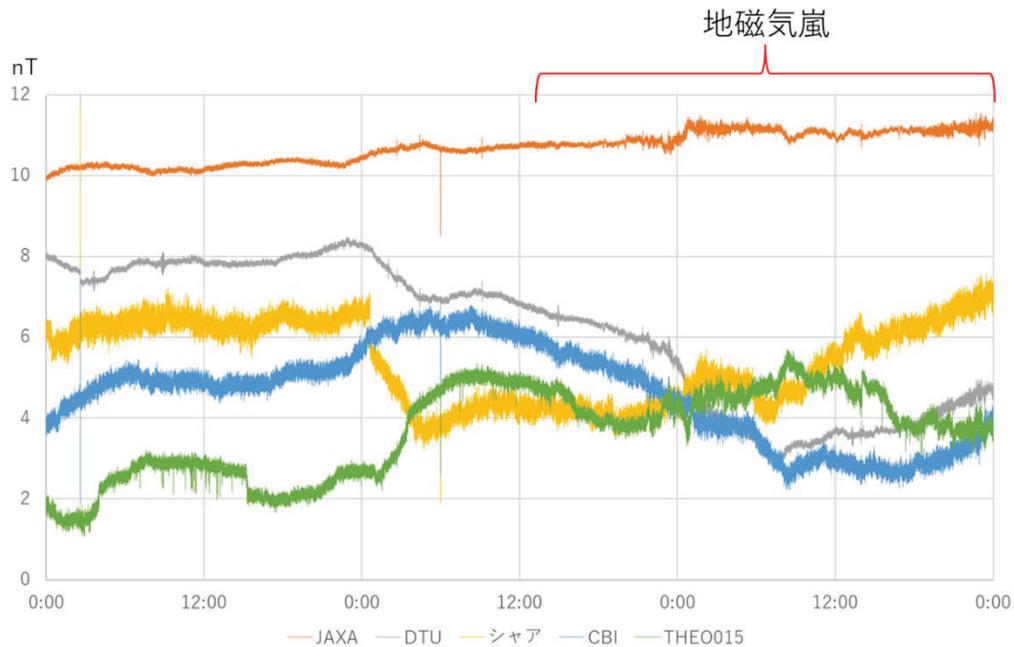


図 3 各磁力計と参照データとの差分プロット（2025 年 9 月 13 日－15 日）
計測開始時の上から、JAXA、DTU、Bartington 3 台

3. 磁力計の応答速度の調査

地磁気絶対観測では、磁力計出力がゼロとなる方向、すなわち地磁気に直交する方向に DI メータの磁力計を手動で回転させて合わせる。このとき、磁力計の応答が速いほど出力が速やかに整定するため、観測の操作性が向上する。現行の Bartington 磁力計では、応答が遅いと観測者が感じる場合が多く、絶対観測に時間がかかる要因となっていた。そこで、JAXA 磁力計、DTU 磁力計および Bartington 磁力計について、磁場を急変させた際の出力を測定し、それぞれの出力の応答時間を比較した。

柿岡比較較正室西台の大型ヘルムホルツコイルを用い、急峻な磁場変化を与えた。DI メータを東向き（出力がゼロとなる方向）に設置し、大型ヘルムホルツコイルの Y 軸に 40 mA の矩形電流を印加した。これにより、約 500 nT のステップ状の磁場変化を 10 回以上与え、出力応答を計測した。JAXA 磁力計、DTU 磁力計および Bartington 磁力計（1 台）について同様の実験を行った。実験の様子および取得データ例を写真 3 に、生成した磁場と各磁力計の応答を図 4 および図 5 に示す。



写真3 比較校正室西台での応答速度測定の様子

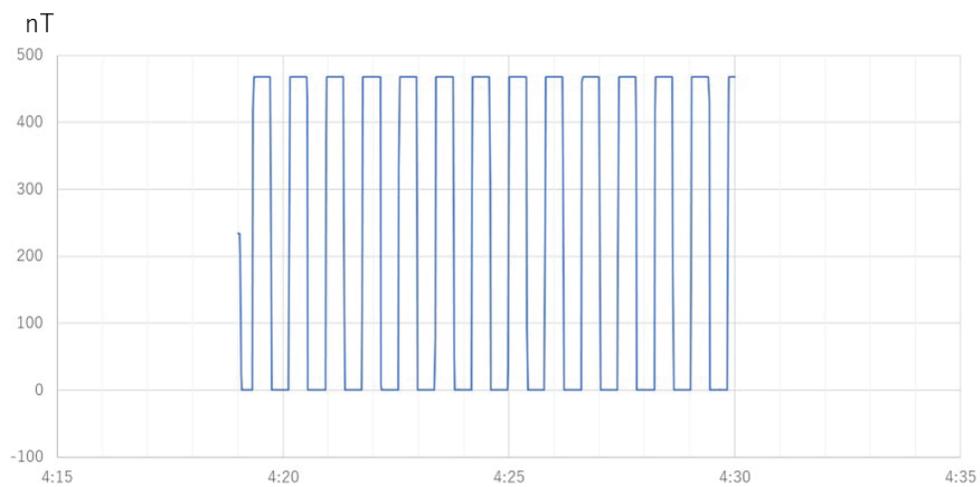


図4 大型ヘルムホルツコイルに印加した矩形電流により生成した磁場

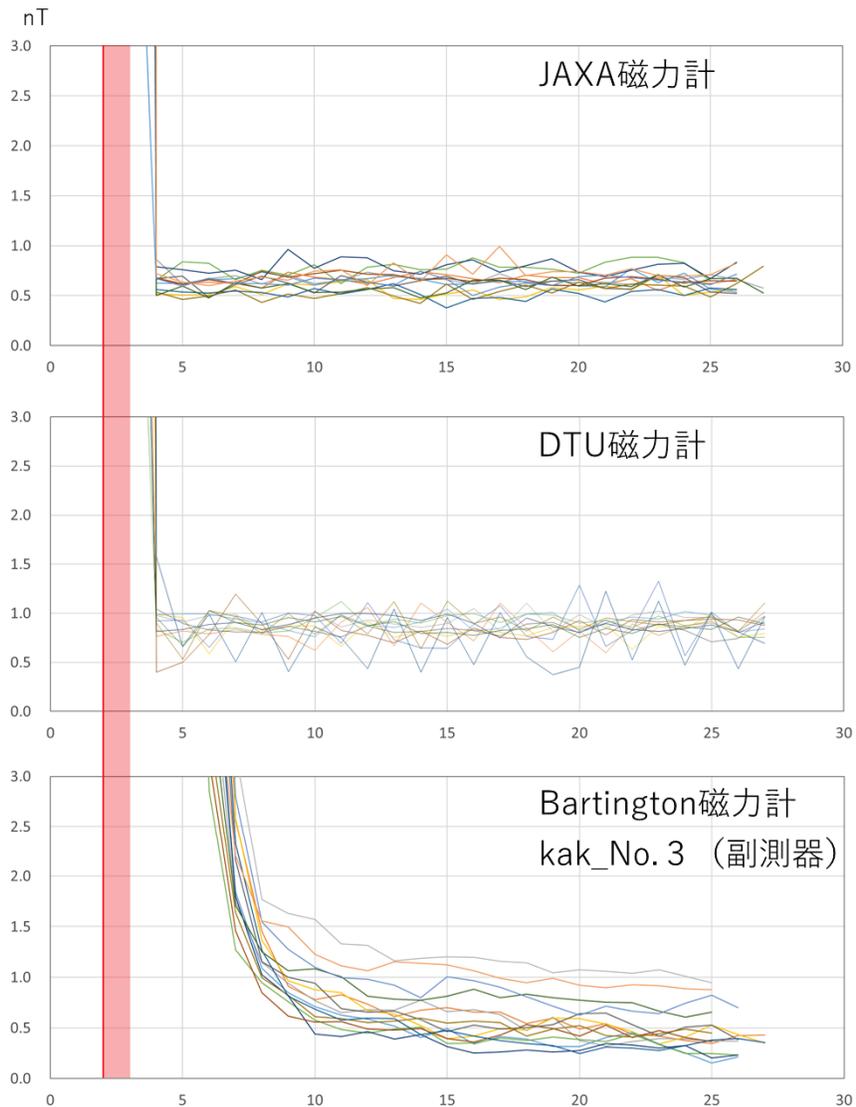


図5 磁場の急変化による応答時間測定
横軸は時間で、赤い部分（2～3秒）で磁場を急変化させた。

図5より、JAXA 磁力計および DTU 磁力計は、印加 2 秒後の 4 秒で出力がほぼ一定となり、速やかに整定することがわかる。一方、Bartington 磁力計は、10 秒程度まで急峻な変化が続いた後も緩やかな変化が残り、整定に時間を要した。この傾向は、実際の絶対観測において観測者が経験してきた応答の遅れと整合的である。

以上より、JAXA 磁力計は Bartington 磁力計に比べて応答時間が短く、DI メータの回転操作に対して出力が速やかに追従するため、絶対観測の操作性向上に有利であると考えられる。また、DTU 磁力計についても、Bartington 磁力計より応答時間が短いことを本実験で確認した。

4. 磁力計の初期ドリフトの調査

絶対観測では、出力がゼロとなる 4 姿勢で得られた値の平均を観測値としている。観測中に磁力計のオフセットが変動すると、その変動分が誤差要因となる。現行の Bartington 磁力計では、2 分間のエージング後に表示値を確認し、オフセット変動が十分小さいことを目視で確認してから絶対観測を開始している。

JAXA 磁力計の初期ドリフト（オフセット変動）を評価するため、磁力計を磁北から 90° 東方向の出力がほぼゼロとなる向きに設置した。電圧ロガーは、ロガー自身のオフセット変動の影響を抑えるため、1 日以上連続通電した状態で起動したまま磁力計の電源を切り、室温まで冷却した状態から電源を投入（コールドスタート）し、出力および処理部温度を同時に測定した。2025 年 10 月 27 日の計測例を図 6 に示す。図 6（右図）より、電源投入後の約 10 分間は出力が大きく変化するが、10 分以降は変化が緩やかになることが見てとれる。磁気儀の据付から偏角の 1 回目の観測開始までには、レベル調整やマークの読み取り等により通常 10 分以上要する。したがって、電源投入と同時に据付作業を開始する運用をすれば、観測開始時には初期ドリフトの影響を相対的に小さくできる。

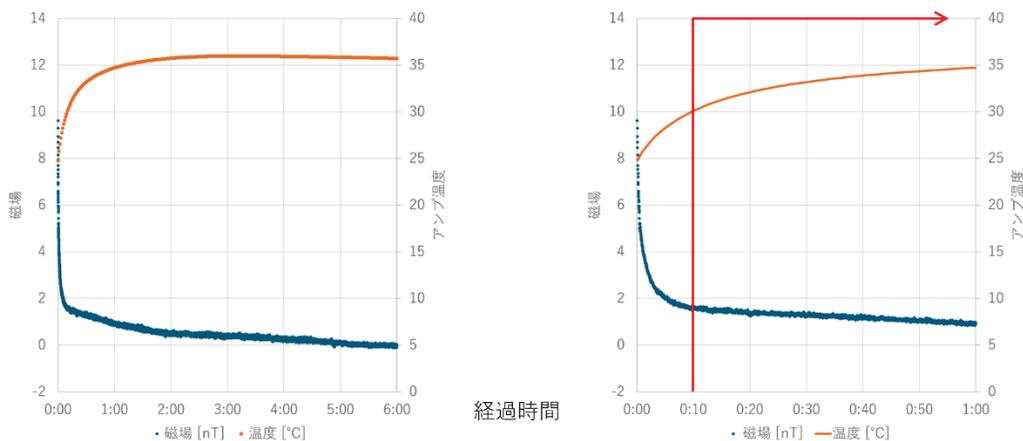


図 6 JAXA 磁力計の初期ドリフト（2025 年 10 月 27 日 05 時 UTC 開始）

左：電源投入後 6 時間まで、右：電源投入後 1 時間まで

2025 年 10 月 27 日から 11 月 27 日までの計 10 回の測定結果を図 7 に示す。図 7 は 1 分間平均値で、電源投入後 10 分から 2 時間までを表示している。磁場出力値については、電源投入後 2 時間時点の値をゼロとして相対値で示した。図 7 より、時間経過とともに処理部温度は上昇して一定値に漸近し、それに伴って磁場出力は低下する傾向が見られた。磁場出力と処理部温度の関係を図 8 に示す。計測 10 回から求めた温度係数の平均は $-0.16 \text{ nT}/^\circ\text{C}$ であり、処理部温度を制御すれば初期ドリフトを低減できる可能性がある。

例えば、偏角の観測で 4 姿勢の間に 0.5 nT のドリフト量があったとすると、水平分力が 30000 nT と仮定して水平角のズレは、

$$\Delta\theta = \sin^{-1}(0.5 \div 30000) = 3.44''$$

となり、十分小さな値である。なお、図7の磁場出力は電源投入後2時間時点の値をゼロとした相対値である。図7から4姿勢の観測を行う10分間程度のドリフト量は0.5nT以下と見積もられるので、電源投入後10分以降に絶対観測を始めれば、十分な精度で観測できると考えられる。

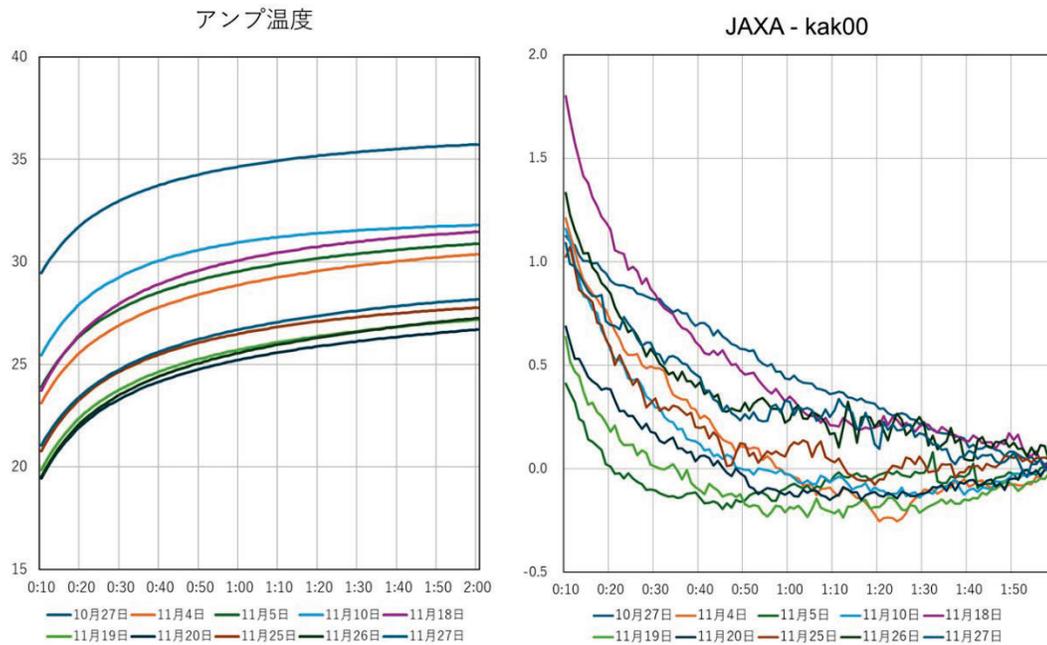


図7 コールドスタートの処理部温度（右）と初期ドリフト（左）

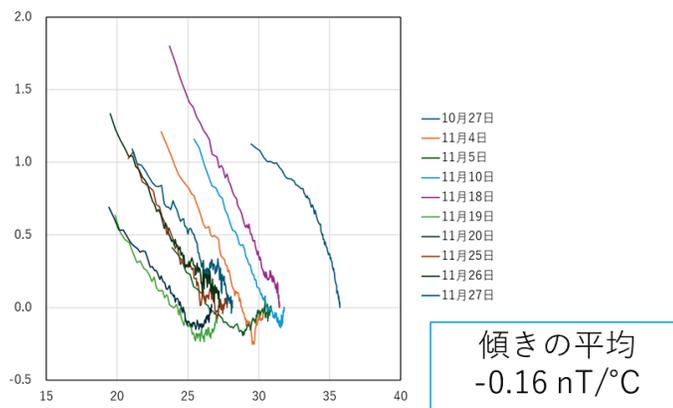


図8 処理部温度（横軸）と初期ドリフト（縦軸）の関係

5. 地磁気絶対観測

実際の絶対観測において、従来の磁気儀と比較して運用上の差異が生じるかを確認した。

JAXA 磁力計を柿岡の機動観測用 DI メータに搭載し、比較校正室において観測者 2 名が各 1 回ずつ絶対観測を実施した。観測手順は従来の地磁気観測所の方式に従い、偏角・伏角ともに 4 姿勢を 2.5 回繰り返す（計 10 姿勢）観測を行った。得られた 10 姿勢の結果から、連続する 4 つの器差（標準磁気儀 DI72 との差）を算出した。その結果を図 9 に示す。

観測開始条件として、1 人目は電源投入後 10 分経過してから観測を開始し、2 人目は電源投入後 3 時間以上起動した状態から観測を開始した。図 9 より、両者の器差は近い値となり、観測結果は互いに整合していることがわかった。また、地磁気観測所では 4 つの器差の較差を **range** と呼び、観測の正確性を推定する指標としている。地磁気観測所の運用では、DI メータの観測において **range** が 3" 以内であれば十分な精度であると判断している。図 9 の **range** はいずれも 3" を下回っており、JAXA 磁力計は絶対観測に必要な性能を有することが示された。

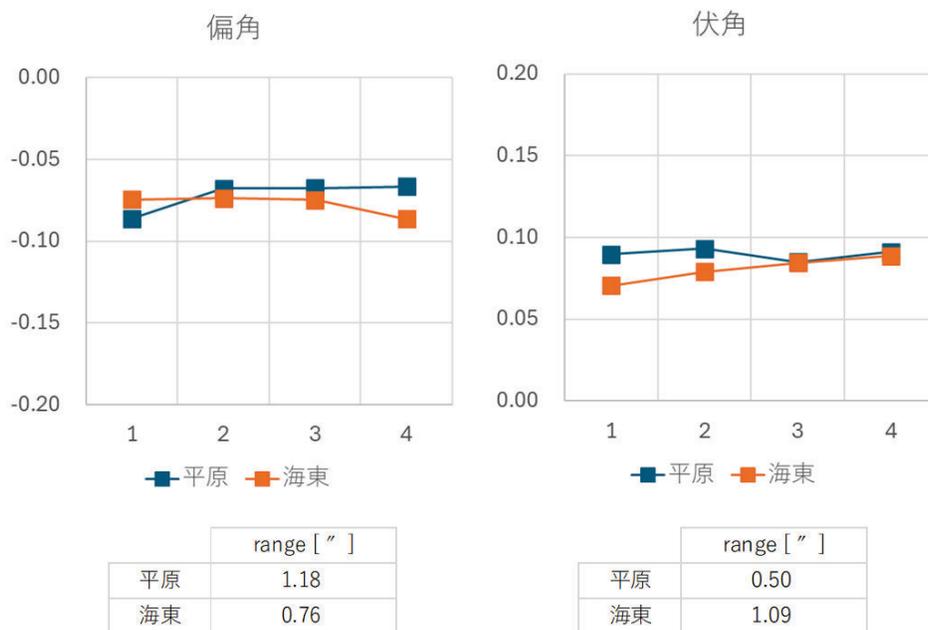


図 9 JAXA 磁力計を搭載した DI メータの器差

左：偏角 D の器差、右：伏角 I の器差

6. まとめ

JAXA が開発した科学ロケット搭載用の小型・軽量・低ノイズの基本波形型直交フラックスゲート磁力計について、DI メータへの搭載を目的に性能調査を実施した。その結果、ノイズ特性、応答特性および初期ドリフトの観点から、DI メータ用磁力計として実用上十分な性能を有することがわかった。初期ドリフトについては、観測が長時間化した場合に誤差要因となり得るため、JAXA へ測定結果を報告し、処理部内の発熱源と信号検波部を熱的

様式2 調査研究業務成果報告書（第24条2）

に分離する改良を提案したところ、対応の了承を得た。今後は、絶対観測時の利便性をさらに高めるため、取り付け器具および表示・処理部（表示方法、記録・出力機能等）の最適化を進め、DIメータとしての完成度を高めていく予定である。

[成果の発表]:

なし

基礎課題

[課題名] : Solar Flare Effect(SFE)の自動検出に向けた基礎調査 (令和 7~12 年度)

[担当者] : ○松下拓輝、櫻井友己 (観測課)

[成果] :

1. SFE データベースの作成

地磁気観測所およびスペインの Ebro 観測所が公開している SFE の現象リストならびに公開されている太陽フレアのリストを組み合わせ、SFE 解析に利用するデータベースの整備を試みた。地磁気観測所および Ebro 観測所のリストはそれぞれ以下の URL で公開されているものを用いた。

地磁気観測所 : <https://www.kakioka-jma.go.jp/obsdata/dataviewer/ja?>

Ebro 観測所 : <https://www.obsebre.es/en/variations/rapid#sfe>

本調査で得た気づきとして、地磁気観測所の SFE リストについては、各成分の振幅や開始および終了時間が掲載されているので、背景の S_q の大きさに対する SFE の振幅 (増長率) を地磁気データから容易に計算できる。一方で、リストが国内の柿岡、女満別、鹿屋に限られることから、グローバルな解析には不向きである。一方、Ebro 観測所のリストは各国から報告された SFE をリスト化しているものの、SFE の発現時刻と Quality(変動の明瞭性を表す指標)しか記載されておらず、定量的な解析には不向きである。以上のことから、次年度以降もデータベースの整備に取り組み、各国の地磁気データを用いて、いちから SFE の現象リストを整備することにした。現象を抽出するツールを整備中で、これを用いて、各ローカルタイムをまんべんなく拾える観測点データセットで SFE をリスト化したいと考えている。

太陽フレアのリストについては、Plutino et al. (2023)^{*5} のカタログを用いた。これは、GOES のイベントリストに比べて、より多くの X 線の変動を抽出しているという点では、メリットがあるが、フレアの発生位置が掲載されていないという点ではデメリットととらえた。SFE と太陽フレアの対応を調べるうえで、フレアの情報が多いほど有益であるため、GOES のイベントリスト¹も活用することにした。このリストにはフレアが発生した黒点群の番号が記載されているが、位置は記載されていないため、黒点群の位置は別のサマリー²から抽出することにした。自動抽出のプログラムを作成したので、次年度はこのプログラムを用いて、GOES のイベントリストを用いたフレアリストも整備する。ただし、1996 年以降のイベントしか確認できないため、それ以前のデータセットについても、他に利用可能なカタログ等がないか引き続き調査を進めたい。

¹ <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/> にある yyyy_events

² <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/> にある yyyy_SRS

2. SFE 発生高度の調査

事例解析として、2012 年 3 月 5 日 03:32-05:20UT のイベントの解析を行った。この時の柿岡の毎秒値と GOES14 の X 線のプロットを図 1 に示す。LDE フレアのため、SFE が顕現している時間も比較的長いものであった。このイベントの開始の時間と終了の時刻の高度 100km での昼夜境界線を図 2 に示す。HER, FUR, TAM において、柿岡の SFE に遅れて、SFE が立ち上がるのが期待されたが、そのような変動は見られなかった。この時間帯は、背景の Sq 変動も微小のため、SFE の抽出方法を工夫する必要があるかもしれない。今後の課題としたい。

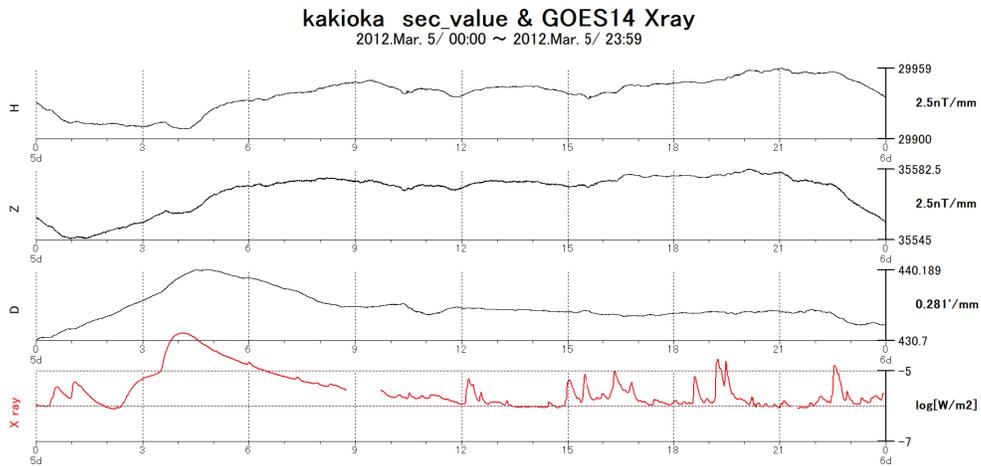


図 1 柿岡の毎秒値（上から、H, Z, D 成分）と GOES14 で観測された X 線（最下段）

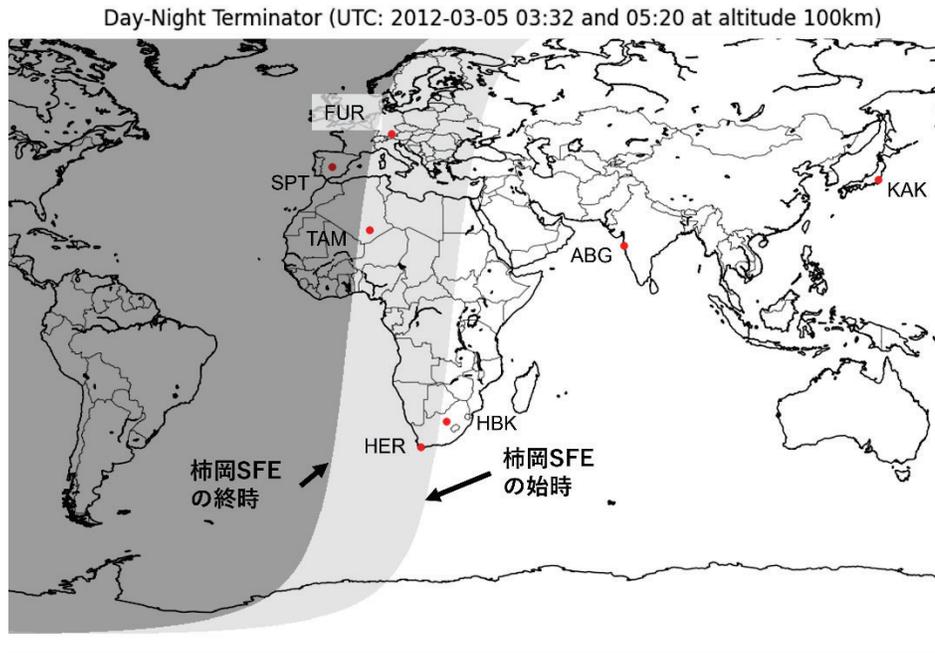


図2 3月5日のSFEの発現、終了時刻における昼夜境界線(高度100km)

[成果の発表]:

なし

基礎課題

[課題名]：南極昭和基地の地磁気データの品質改善（令和 7～8 年度）

[担当者]：○仰木 淳平、有田 真、屋良 朝之、北山 拓（観測課）

松浦 大輔、浅利 晴紀（技術課）

飯塚 ふうな（網走地磁気観測連絡事務所）

[成果]：

本年度の調査研究事項は、主に以下の 4 項目である。

1. フラックスゲート磁力計の不調の可能性
2. オーバーハウザー磁力計に混入したノイズ
3. 夏季の傾斜補正と観測基線値の補間
4. 車両の磁性検査

以下では、それぞれの項目について報告する。

1. フラックスゲート磁力計の不調の可能性

昨年度までの調査により、フラックスゲート磁力計データに異常の可能性があることが分かっている。この異常はフラックスゲート磁力計 (AD 変換ロガーを含む) の機械的異常、測定環境の異常、人工的な擾乱等の可能性 (それらの複合も含む) がある。頻度や程度に違いがあるが、今年度もそれらが引き続き発生していることを確認した。フラックスゲート磁力計の異常を示唆する変化は以下の 3 点である。①A-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、 $A\text{-value} = F_{OHM} - F_{FM}$) の周期的な変化、②フラックスゲート磁力計出力値のギャップ状変化、③A-value の数時間から数日の時間スケールでの変化。これらの原因については、今年度も分からなかった。

1-1. A-value の周期的な変化

A-value の周期的な変化の例を図 1 に示す。A-value の約 2nT の一時的な減少が周期的に発生していることが分かる。A-value の変化が自然磁場の変化に比べて非常に小さいため、各成分の生データを見てもフラックスゲート磁力計とオーバーハウザー磁力計のどちらに原因があるのか判断できない。なお、昨年度に比べて発生頻度と振幅はやや減少した。

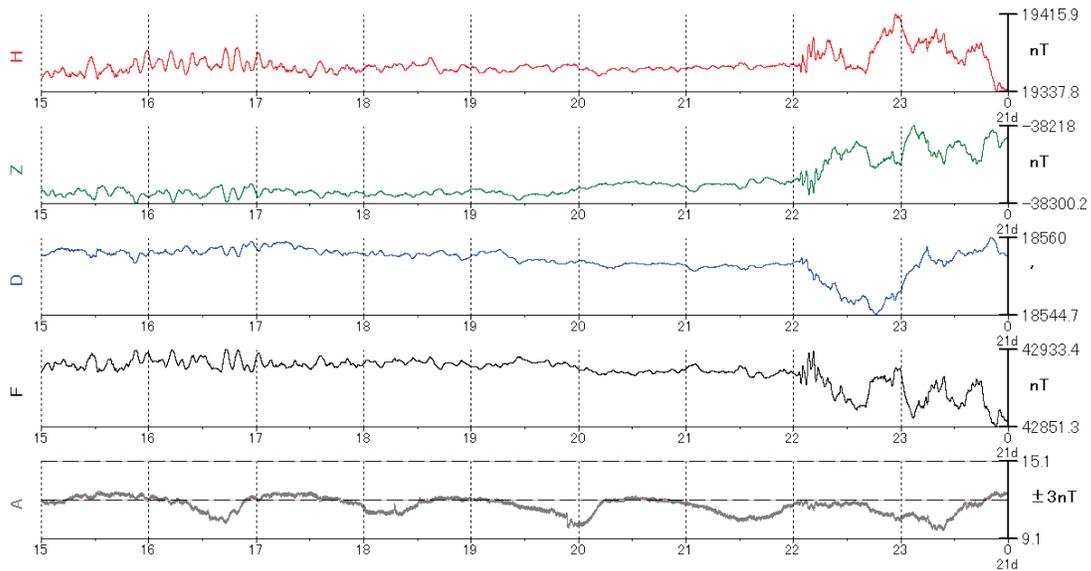


図 1 A-value の周期的な変化 (上から H 成分、Z 成分、D 成分、F 成分、A-value。いずれも暫定毎秒値。2025 年 7 月 20 日 15:00~24:00 UT)

1-2. フラックスゲート磁力計出力値のギャップ状変化

フラックスゲート磁力計出力値のギャップ状変化の例を図 2 に示す。15:49 あたりで A-value に 1nT 程度のギャップ状変化があり、同じタイミングでフラックスゲート成分 (HZD) にもギャップ状変化が生じている。オーバーハウザー磁力計のデータにはギャップ状変化が見られないことから、センサ付近への人工的な擾乱ではなく、フラックスゲート磁力計 (AD 変換装置である NTDL ロガーを含む) の異常であると判断できる。

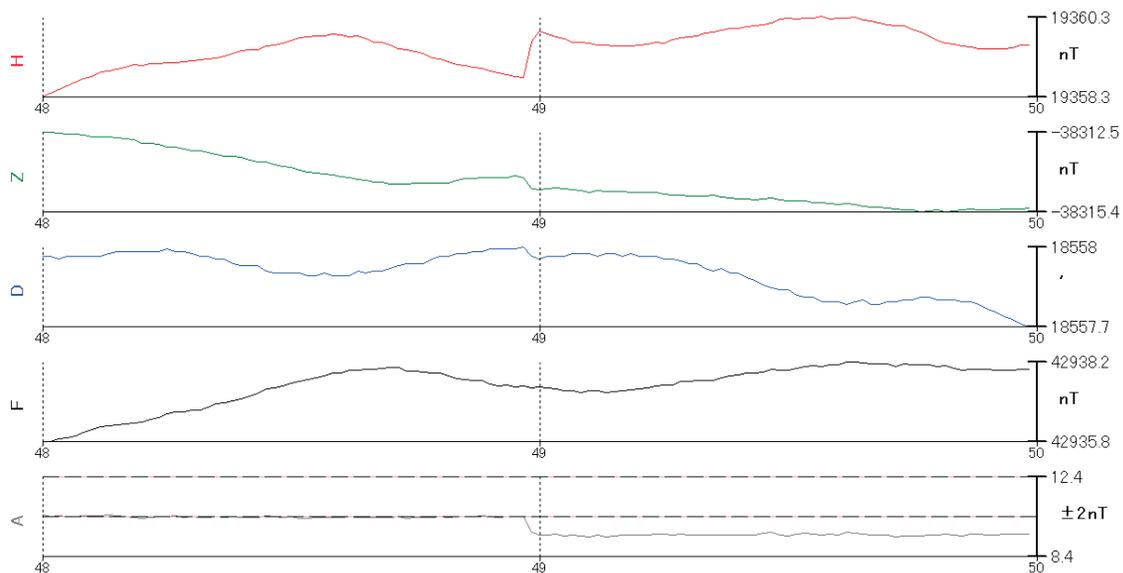


図 2 フラックスゲート磁力計出力値のギャップ状変化 (上から H 成分、Z 成分、D 成分、F 成分、A-value。いずれも暫定毎秒値。2025 年 4 月 15 日 15:48~15:49 UT)

1-3. A-value の数時間から数日の時間スケールでの変化

年間を通して（特に冬期）A-value に数時間から数日の時間スケールで 10nT 程度の変化が見られる（図3）。フラックスゲート磁力計センサの持つ温度特性やセンサ周辺の岩盤の温度変化に伴う磁化の変化のため、A-value に年周変化が見られることは一般的である。しかしそれよりもはるかに短い時間スケールで A-value が大きく変化している。この変化はフラックスゲート磁力計によるものの可能性が高い。なぜなら、週1回程度の頻度で行う絶対観測の際に絶対観測点（地磁気変化計室）でプロトン磁力計による全磁力観測を実施しているが、そのプロトン磁力計とオーバーハウザー磁力計との全磁力差は年間を通して安定しており、10nT もの大きな変化は見られないからである。一方、絶対観測でのフラックスゲート磁力計の H および Z 成分の基線値はばらつきが大きい。

フラックスゲート磁力計の不安定の原因はいくつか考えられるが、比較的簡単に調べられるものとして、磁力計制御部の温度変化がある。制御部に温度計を取り付け、温度変化と A-value の変化の関係を調べることで原因の特定に結び付くかもしれない。使用している磁力計（島津製作所 MB162）の制御部の温度特性は一般的には 0.3nT/°C 程度であり、10nT 程度の変化を説明するには 30°C もの温度変化が必要である。制御部は情報処理棟のラック内に設置しており、数時間や数日で 30°C もの変化は大き過ぎるが、そもそもこの磁力計は極域仕様で測定レンジを拡げているため、温度特性が一般的なモデルと異なる可能性もあるため、制御部の温度変化を調べる価値はある。

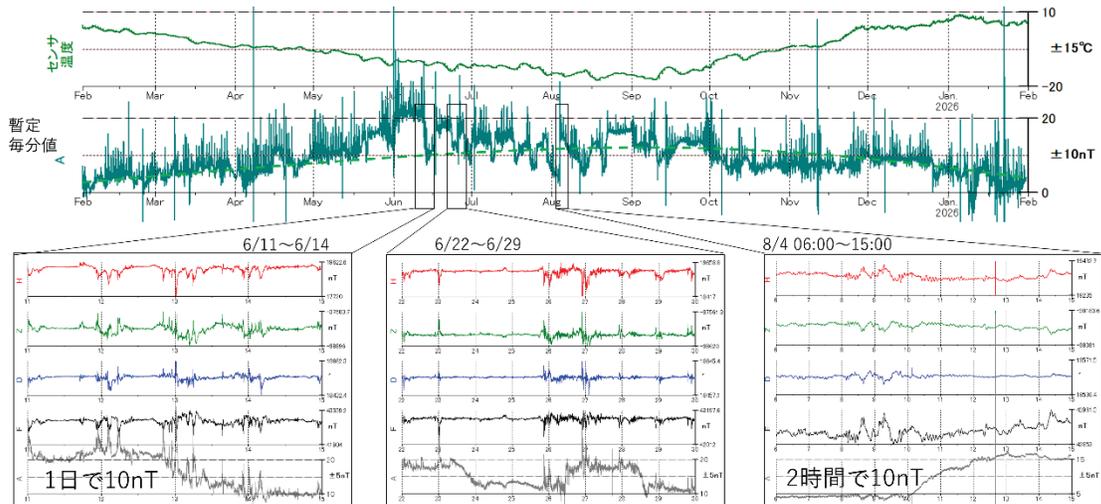


図3 A-value の数時間から数日の時間スケールでの変化

2. オーバーハウザー磁力計に混入したノイズ

昨年度の調査でオーバーハウザー磁力計のノイズレベルを大幅に下げることができたが、一時的に 1nT 程度以下のヒゲノイズが頻発する時間帯があることが確認されていた（図4左）。今年度は 2025 年の年間を通したノイズの発生状況を時間ごとに調べ、対象としているノイズが夏期の日中のみ発生していることを確認した（図4右）。

ノイズの時間帯やノイズの波形から太陽光発電による電磁ノイズの可能性があると判断し、2025年2月以降の全ての日について定常気象観測の全天日射量とノイズの発生状況を比較した。その結果、ノイズの発生しているときには日射があることが確認できた(図5左)。同程度の日射量があってもノイズが入らないことがある(図5右)が、電力の需給バランスや設備のメンテナンス等の事情のため太陽光発電を切り離している可能性がある。ある程度の日射量がノイズ発生の必要条件であることが分かった。なお、昭和基地の太陽光発電施設は東オングル島北西斜面に北向きと北西向きにソーラーパネルを並べている(図6)ため、朝の発電開始と夕方の発電終了は全体的に後ろにずれる。

太陽光発電施設からのノイズが基地の電源線を辿ってオーバーハウザー磁力計の電源に混入していると考えられる。オーバーハウザー磁力計の電源は重力計室から分岐しているので、今後はその分岐点にフェライトコアかノイズカットトランスを設置することで、オーバーハウザー磁力計のノイズ状況の改善を目指す。

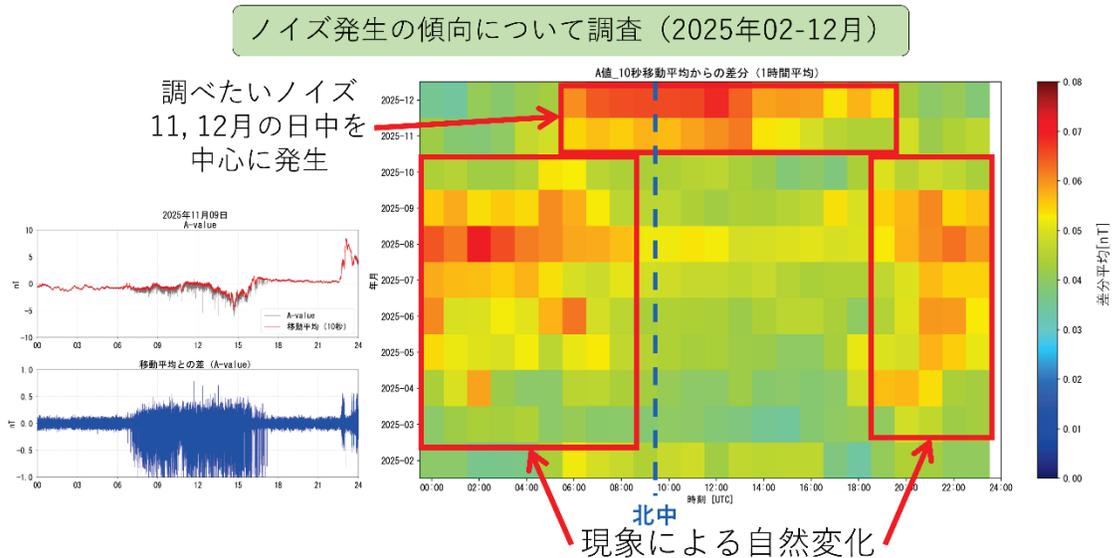


図4 オーバーハウザー磁力計のノイズ状況（左上：A-value 毎秒値と A-value の10秒移動平均、左下：A-value の10秒移動平均と毎秒値の差、右：季節（縦軸）と時間（横軸）によるノイズ強度の分布）

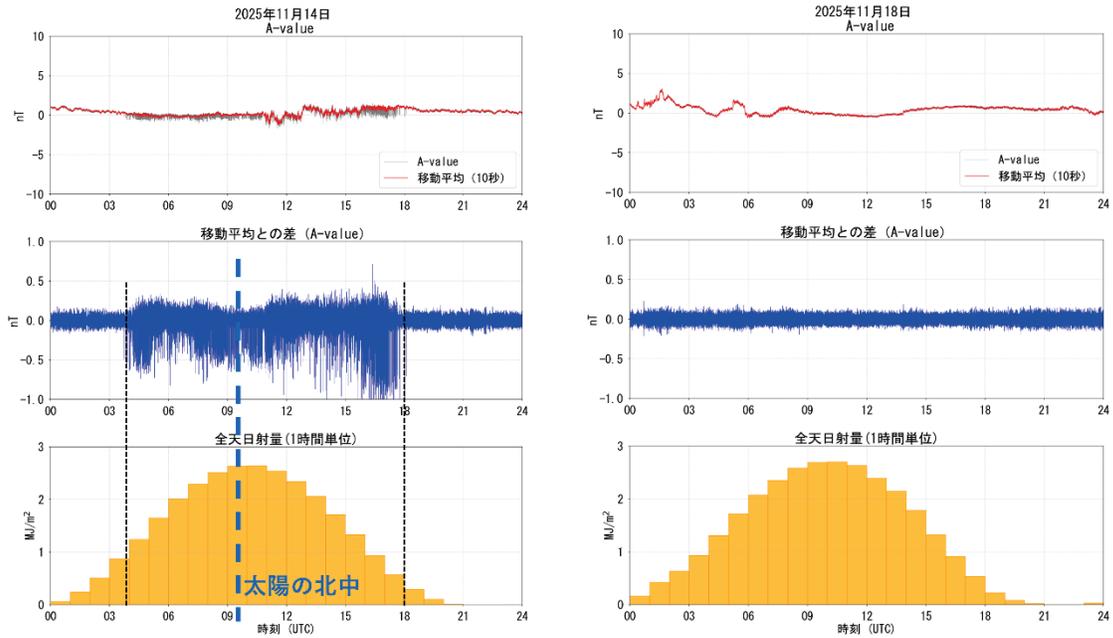


図 5 オーバーハウザー磁力計のノイズ状況（上段と中段）と全天日射量（下段、データ：気象庁）の比較

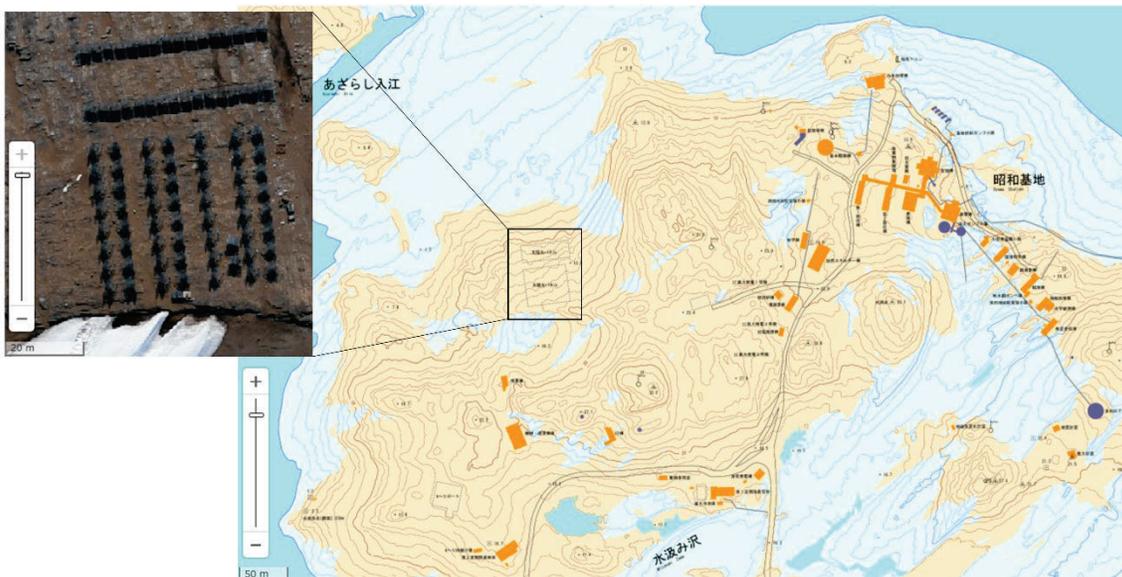


図 6 昭和基地の太陽光発電施設（地理院地図に加筆）

3. 夏季の傾斜補正と観測基線値の補間

過去の調査からフラックスゲート磁力計センサが夏季に大きな傾斜変化をすることが分かっており、センサに電子水管傾斜計を取り付け傾斜の連続観測を行っている。図 7 に 2025 年 2 月から 2026 年 1 月までの観測基線値と傾斜変化から推定される基線値変化を示す。

2025 年 11 月から 2026 年 1 月にかけて傾斜が大きく変化していることが分かる。この期間の D 成分の観測基線値の変化は概ね傾斜変化で説明できる。H 成分と Z 成分については、部分的に傾斜変化で説明できるところもあるが、「1. フラックスゲート磁力計の不調の可能性」で述べたように年間を通して磁力計の不安定性によると考えられる基線値のばらつきが大きく、それらが同程度である。

変化観測値を絶対値化するためには 1 週間程度の間隔の観測基線値を補間して採用基線値を作る必要がある。今期間の観測基線値を INTERMAGNET が使用を推奨しているデータ処理ツール xMagPy を使ってスプライン補間した (図 8)。xMagPy でのスプライン補間では夏季の急激な傾斜変化を表現することはできず、特に D 成分では $1.2'$ ($=6\text{nT}$) 程度観測基線値との差が生じる時期がある。これはインターマグネットの 1min-IMO 基準の 5nT を超えるものであり、データ処理に工夫が必要である。データ処理の候補として①スプライン補間の節点間隔の調整と②傾斜観測データによる変化観測値の補正がある。①は 2023 年度の調査「南極昭和基地の地磁気データの絶対値化に向けた調査」で報告したものであり、傾斜変化の大きい夏季のみ節点を集中させ急変化を表現させる方法である。②は変化観測値の生データを一度傾斜補正し、傾斜補正後の変化観測値に対して観測基線値を計算し、その観測基線値をスプライン補間するものである。②では観測基線値を計算する前に傾斜補正されているため、提出されるデータ (絶対値および基線値) には傾斜変化の痕跡が残らず、データ利用者は観測の実態を知ることができないため、今後はひとまず①でデータ処理を進めてみる予定である。

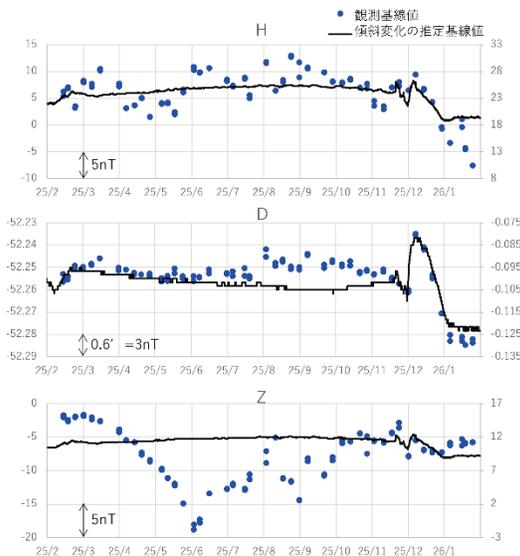


図 7 観測基線値と傾斜変化による影響

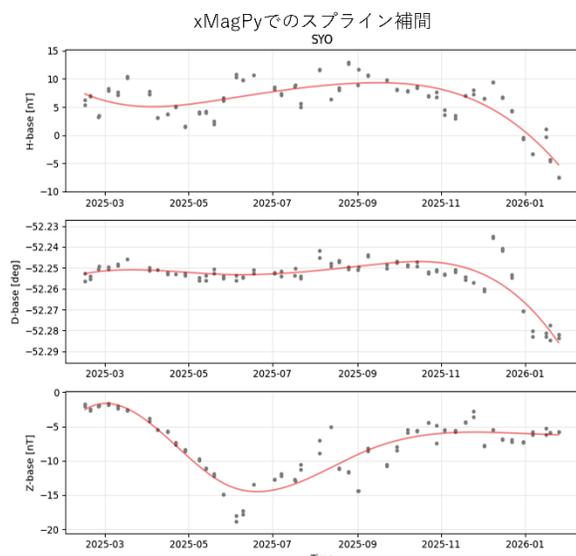


図 8 xMagPy を使ったスプライン補間

4. 車両の磁性検査

車両による地磁気観測への影響量を正確に見積もり、基地運用をより円滑にするため、昨

年度、17台の重機・雪上車の磁性検査を行った。昨年度は測定までだったので、今年度はそれらのデータを基に個々の車両の影響量を算出し、絶対観測中に通行制限をかけるべき車両を特定した（図9、表1）。17台のうち9台は通行制限をかける必要がないことが分かった。同じベースモデルの車両でも数倍の影響量を持つものがあった。今回の解析ではベースモデルのカタログ車重しか把握できず、オプション部品の違いによる実車重の違いは無視したので、今後は車両搬入時の積荷データ等を参照して、実情に近づけたい。また、この磁性検査の手法と測定結果について第16回極域科学シンポジウムでポスター発表した。

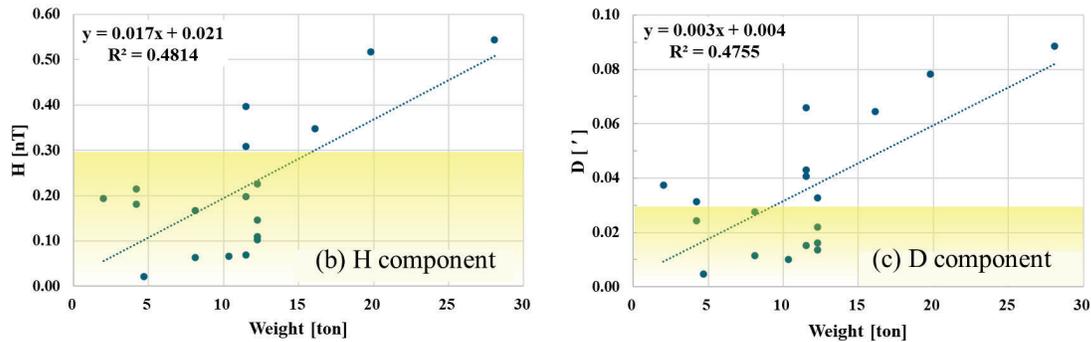


図9 車両の重量と100m離れた場所への影響量の関係（左：H成分、右：D成分）

表1 各車両の磁性検査結果のまとめ

Vehicle type	Weight [kg]	Magnetic Moment [Am ²]				Maximum disturbances in the field							
		Mx	My	Mz	M	r=100m				r=170m			
						H [nT]	Z [nT]	D [']	F [nT]	H [nT]	Z [nT]	D [']	F [nT]
35ton Rough terrain crane	28,055	-2816	306	574	2890	0.54	0.06	0.089	0.20	0.11	0.01	0.018	0.04
16ton Rough terrain crane	19,795	-2508	808	820	2759	0.52	0.08	0.078	0.19	0.10	0.02	0.016	0.04
SM116	11,500	-598	2009	373	2129	0.40	0.04	0.066	0.14	0.08	0.01	0.013	0.03
EG110	16,100	-1856	-564	-241	1954	0.35	0.02	0.065	0.17	0.07	0.00	0.013	0.03
SM117	11,500	-1358	762	626	1678	0.31	0.06	0.043	0.13	0.06	0.01	0.009	0.03
PB304	12,260	-708	875	790	1375	0.23	0.08	0.033	0.12	0.05	0.02	0.007	0.03
SM414	4,200	-969	482	372	1145	0.21	0.04	0.031	0.08	0.04	0.01	0.007	0.02
SM111	11,500	-971	-657	1022	1555	0.20	0.10	0.041	0.17	0.04	0.02	0.008	0.04
2ton Truck	2,000	1058	326	638	1277	0.19	0.06	0.037	0.15	0.04	0.01	0.008	0.03
SM413	4,200	-761	477	443	1001	0.18	0.04	0.024	0.08	0.04	0.01	0.005	0.02
SM653	8,100	-863	129	189	893	0.17	0.02	0.028	0.06	0.03	0.00	0.006	0.02
PB302	12,260	-343	667	952	1212	0.15	0.10	0.022	0.12	0.03	0.02	0.004	0.02
PB303	12,260	-286	453	748	920	0.11	0.07	0.016	0.10	0.03	0.02	0.004	0.02
PB301	12,260	-441	232	887	1018	0.10	0.09	0.014	0.11	0.02	0.02	0.003	0.02
SM106	11,500	-348	-233	1223	1293	0.07	0.12	0.015	0.13	0.01	0.02	0.004	0.02
D5K2	10,350	354	-16	574	675	0.07	0.06	0.010	0.08	0.01	0.01	0.003	0.02
SM652	8,100	2	329	691	766	0.06	0.07	0.011	0.08	0.02	0.01	0.003	0.02
PB100	4,690	-20	-121	110	165	0.02	0.01	0.005	0.01	0.00	0.00	0.001	0.00

[成果の発表]：

Tomoyuki Yara, Junpei Oogi, Shin Arita, Tomomi Inamura, Hideyuki Hirahara and Akira Kadokura, Assessing interference of various vehicles in the geomagnetic absolute measurement - toward optimizing their access restrictions at Syowa Station., The 16th

様式 2 調査研究業務成果報告書 (第 24 条 2)

Symposium on Polar Science, 2025/12

基礎課題

[課題名]: 雌阿寒岳の長期観測データを用いた火山性全磁力変化抽出手法の検討

(令和 7 年度)

[担当者]: ○増子徳道、浅利晴紀 (技術課)

[成果]:

・年周変化の調査

連続点 3 点のうち年周変化が最も明瞭な ME3 から調査した。

次の方法で年周変化成分を抽出した。MMB との全磁力単純差日平均値から MMB の H を用いて短周期成分を補正する。補正後の毎日値について前後 183 日ずつの範囲を平均した 365 日移動平均を求める。毎日値と平均値との差をとることで、年周変化の成分が抽出できる (図 1)。

抽出した年周変化の成分に対し、三角関数を基底とする回帰モデルを最小二乗法で推定した (図 2)。1 次項から 6 次項までを使用したモデルでフィッティングしたところ、1 次～3 次項の回帰係数は有意水準 5% で有意であった。

3 次項までの回帰モデルとその残差および現状の年周変化モデルとその残差を比較すると両者に大きな差は見られず、年周変化の大部分にうまくフィットしているが、2016 年頃と 2024 年頃は年周変化補正後の残差がやや大きい (図 3)。

年によって年周変化の振幅が異なることは周辺温度による寄与があると推察されるが、地中温度のデータには対応すると考えられるような目立った変動は見られなかった (図 4)。

MEA についても ME3 と同様の方法で年周変化成分を抽出し三角関数モデルでフィッティングしたところ、データへのフィットは良好で、現状の年周変化モデルと大きな差異はないことが確認できた (図 5)。

同様に ME2 についても年周変化成分を抽出すると、一見して明瞭な年周変化は見られないうが、細かく見てみると 8 月を中心として 5 月から 11 月にかけて W のような形の変化をしていることが分かる (図 6)。

抽出した年周変化成分に対し三角関数モデルでフィッティングを行ったところ、1 次～4 次項の回帰係数が有意水準 5% で有意であり、8 月頃を中心として 5 月頃と 10 月頃に谷がくるような W 字型のカーブが得られた (図 7)。推定された年周変化の振幅は約 0.3nT で、その補正により観測データが劇的に滑らかになる訳ではないが、データを細かく見る上では有用な補正となると考えられる。

・DI 効果の調査

観測点と参照点における偏角 D と伏角 I の違いにより外部磁場の変化に対して 2 地点間の全磁力差にみかけの変化を生じる DI 効果を、参照点における XYZF、観測点の F を用いて推定した。年周変化補正後の MEA, ME2, ME3 の F を用いて参照点 MMB との全磁力差の 5 日間標準偏差が全期間を通じて最も小さくなるように X, Y, Z の係数をそれぞれ求め、

補正を行った（図8）。

この補正は、磁気嵐などに伴う短周期のDI効果を軽減する効果のほか、長期的なトレンドを変える効果もある。ME3, ME2, ME3のFに年周変化補正後と補正前の両方を使用して補正を行ったところ、長期トレンドへの影響量が異なり、その傾向は年周変化が大きいほど（ME3>MEA>ME2）強かった。係数を適切に求めることで、現状適用しているH成分補正では補正できていない長期的なDI効果によるトレンドを補正することもできるが、係数が適切でないと誤ったトレンドを与えることになり、丁寧な係数の推定が必要である。

・熱消磁源の調査

拡張カルマンフィルタを用いた熱源推定モデル^{*3}により、連続点データのみで熱源を推定した。1か月毎の熱源の位置を見ると、それまでME2付近であった水平位置が2025年9月以降は96-1火口付近に移動した様子が分かる（図9）。これまでは繰り返し観測による多点データで熱源の推定を行っていたが、この方法により連続点データのみでも有意な熱源推定を行えると考えられる。

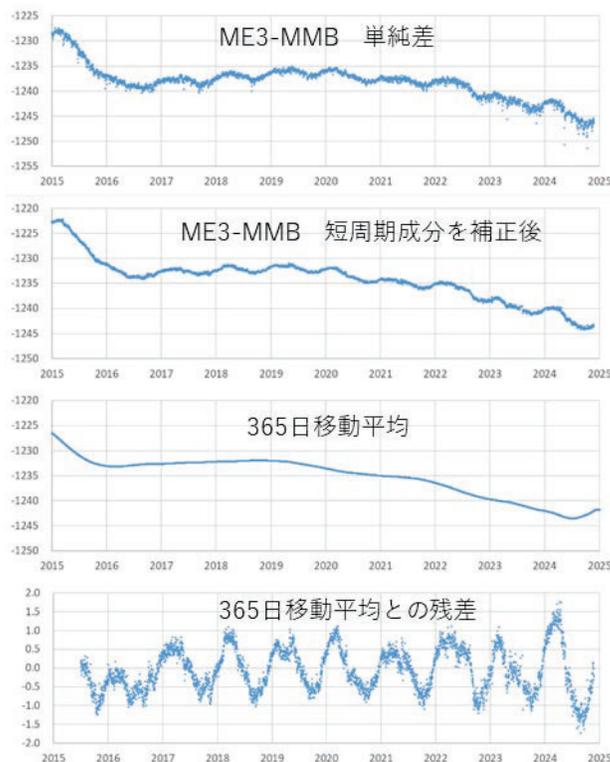


図1 ME3とMMBの全磁力差日平均値から年周変化成分を抽出

様式2 調査研究業務成果報告書（第24条2）

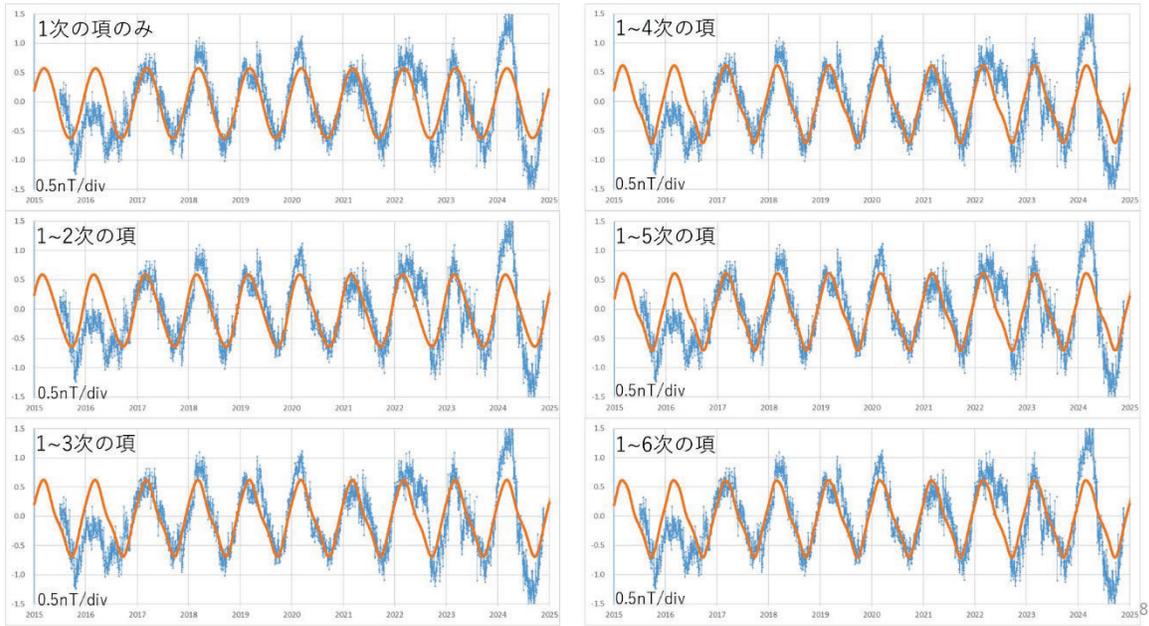


図2 三角関数を用いた最小二乗法で年周変化をフィッティング

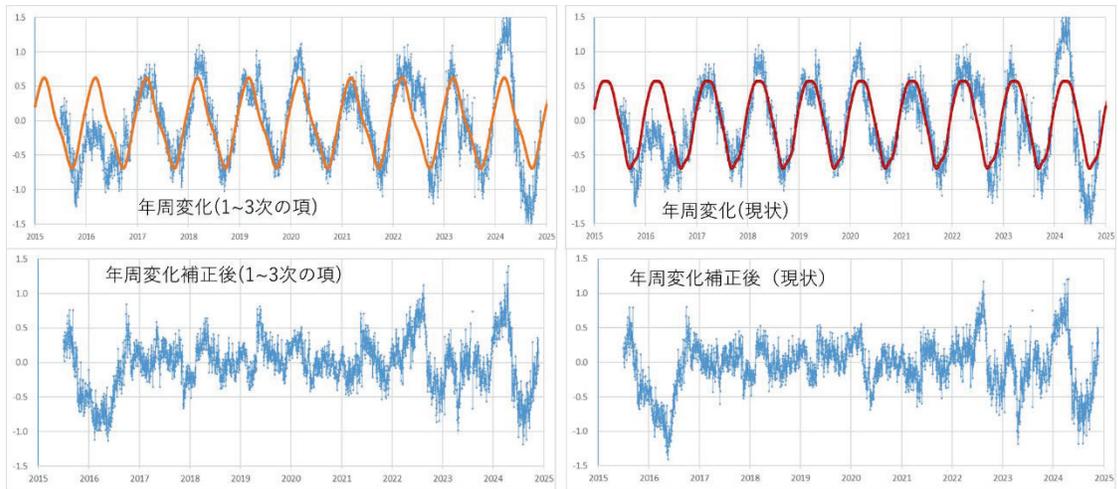


図3 年周変化補正後

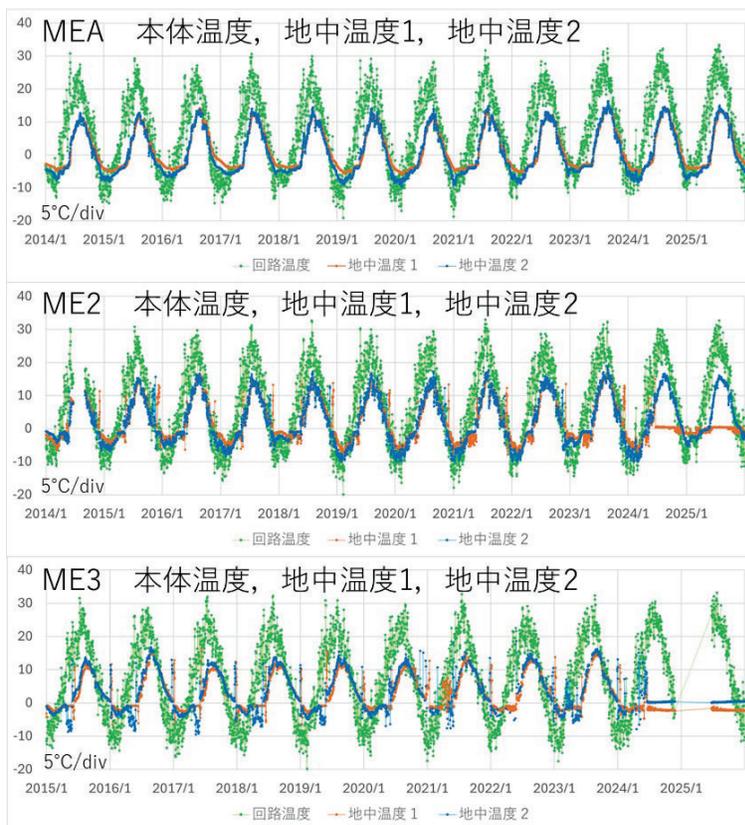


図4 磁力計本体温度および地中温度

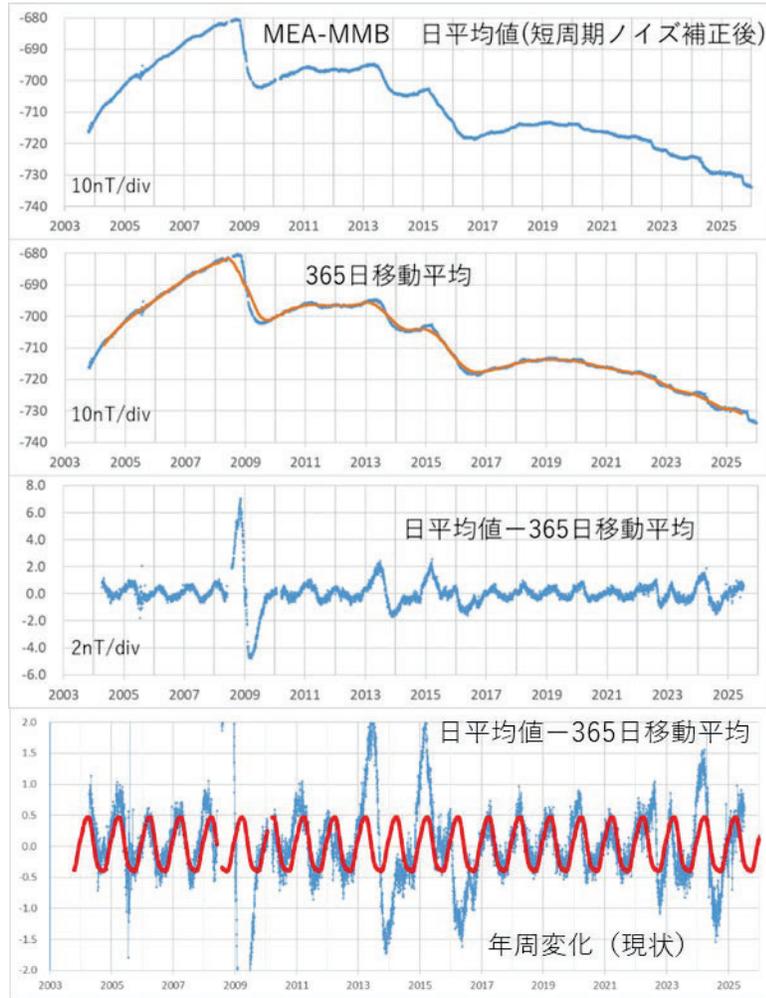


図5 MEAの年周変化

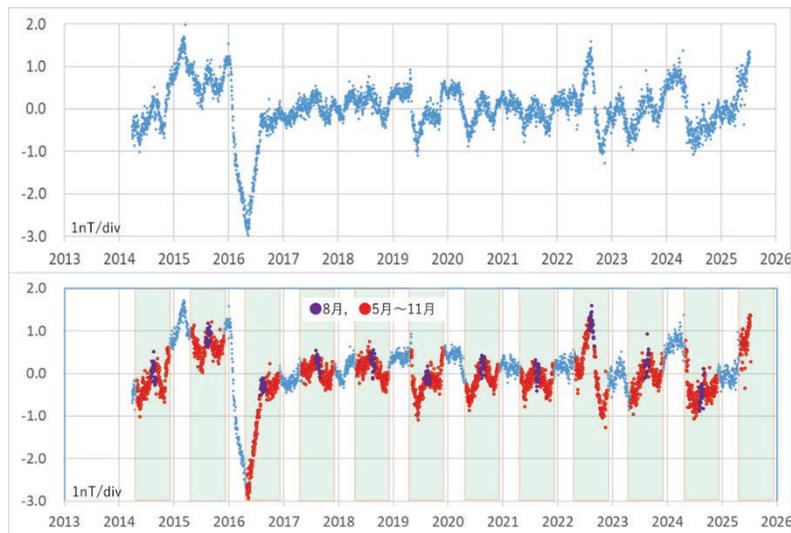


図6 ME2の年周変化成分

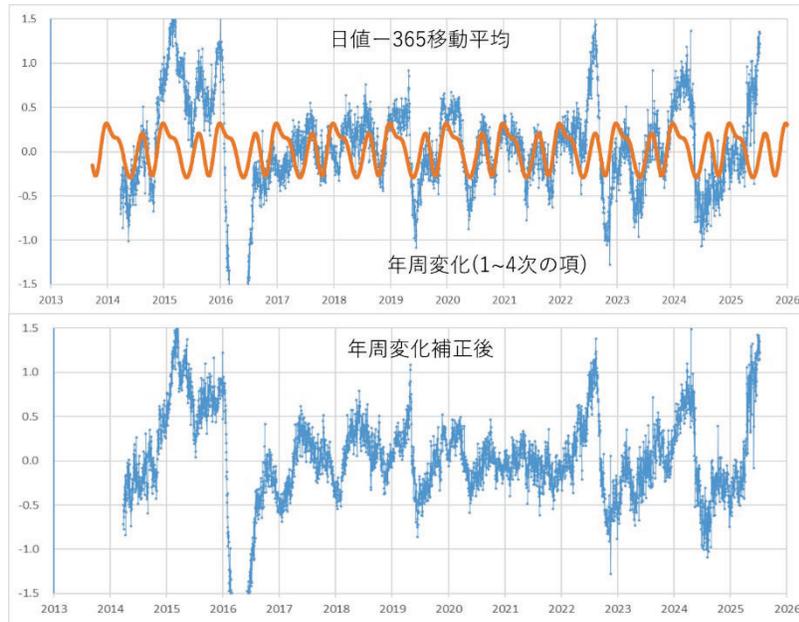


図7 ME2の年周変化フィッティングと補正後

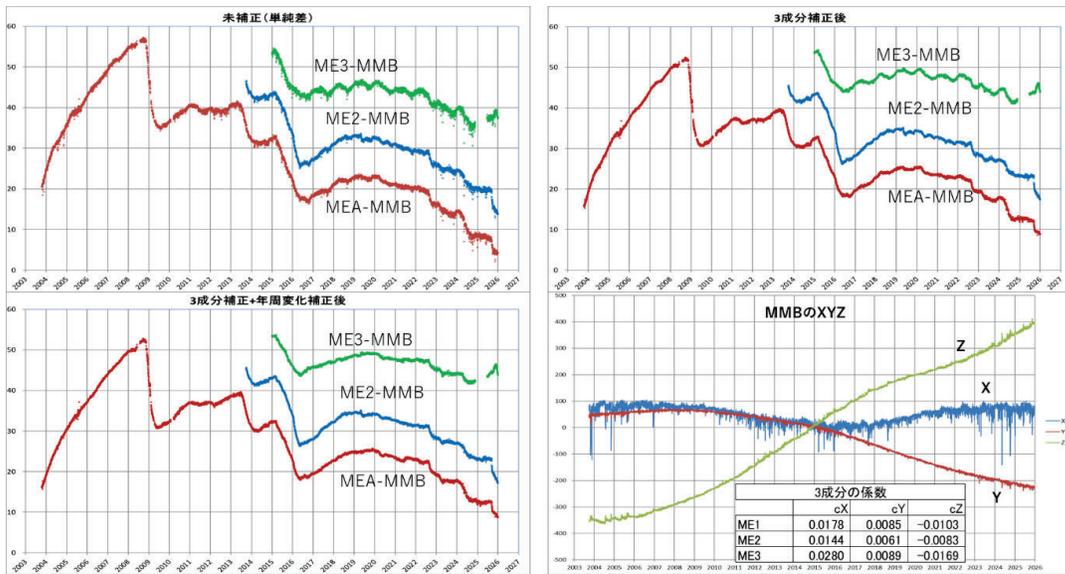


図8 MEA, ME2, ME3とMMBの単純差とMMBのXYZを用いた補正結果

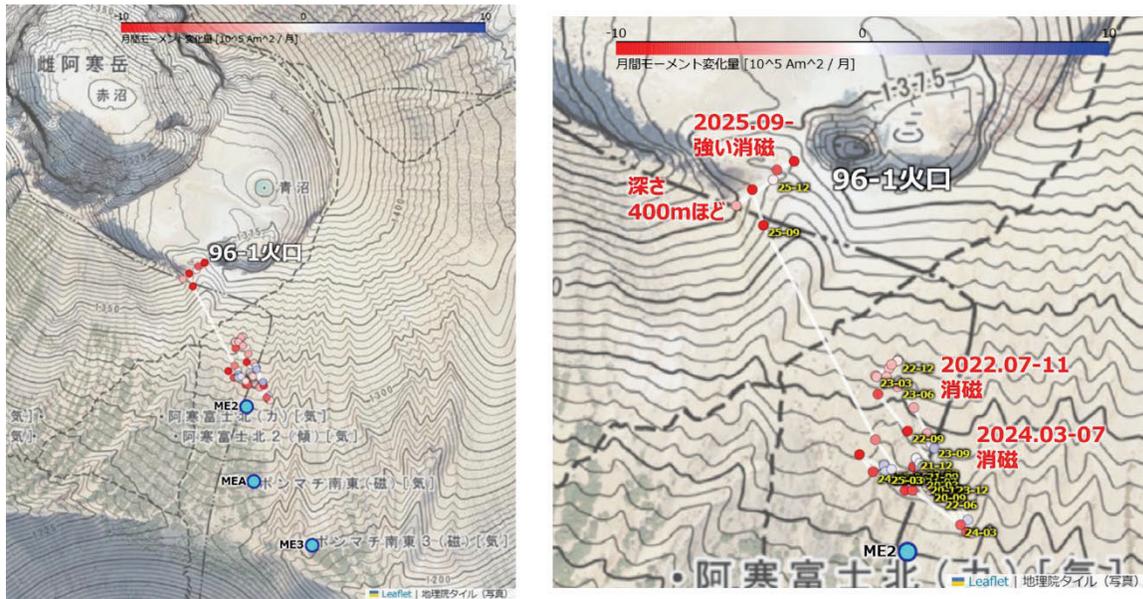


図9 連続点のデータを用いて1か月毎に求めた熱消磁源の変化

[成果の発表]:

なし

基礎課題

[課題名] : 表層磁気分布の影響による全磁力変動の調査 (令和 7 年度)

[担当者] : ○笹岡雅宏、浅利晴紀 (技術課)

[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、MIK2) は透水性の高いスコリア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かったため調査を進めた。昨年度までに、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冷氣沈降に伴う熱対流による温度変化を取り入れ、地中温度の計算手法を開発した。推定した地中温度の鉛直プロファイルから回帰分析により全磁力補正量を見積もった結果、概ね良好な補正となった (図 2)。伊豆大島全磁力は表層の温度依存が大きいことが示唆された。今年度は、観測地点の地下構造・地質の情報収集を進め、観測現場からスコリア及び岩石を採取し、帯磁率及び残留磁化を測定し、常温付近の温度依存について調査した。測定値から広域的な溶岩の残留磁化を推測し、季節的な地中温度変化に伴う全磁力の季節変化量を直方体モデルにより見積もった結果、全磁力観測と同等な季節変化の振幅が見られた (図 3)。また、降雨に伴い地下溶岩の空洞に地下水流が発生する可能性があるため、流速・水量をタンクモデルにより見積もった結果、定常的な流水は発生しない見込みであり、全磁力観測への影響は特にないのではないかと推察された (図 4)。今後は、MIK1 及び MIK2 の時系列変化を再現するような表層磁気分布モデルについて検討したい。

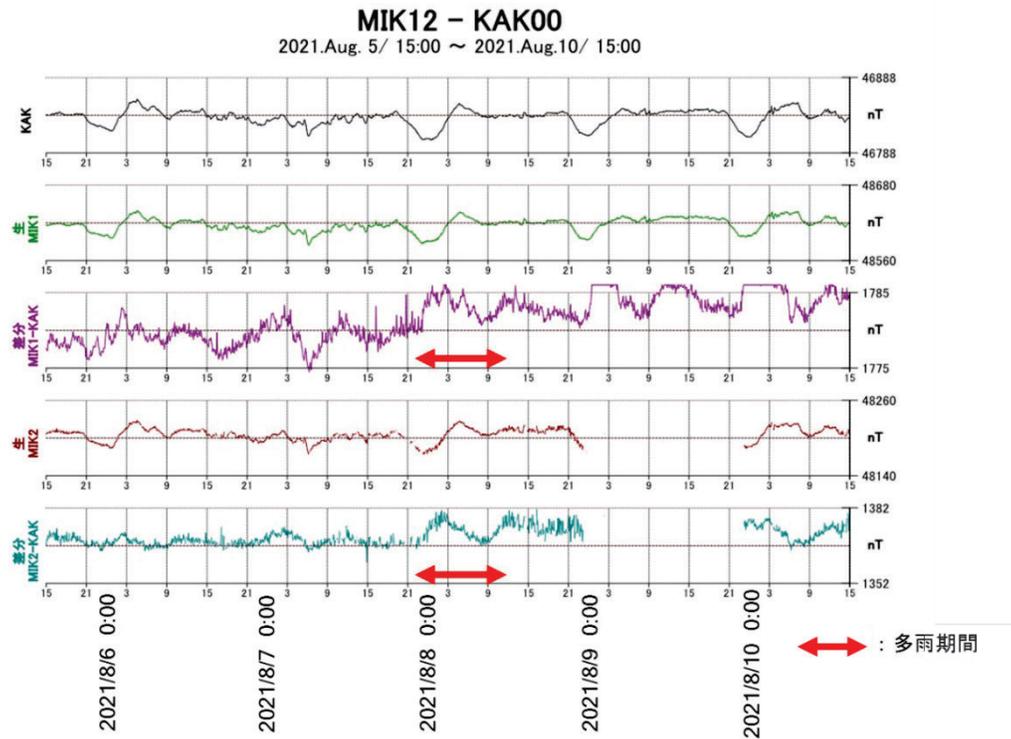


図 1 伊豆大島 (MIK1、MIK2) の全磁力観測 (5分サンプリング)

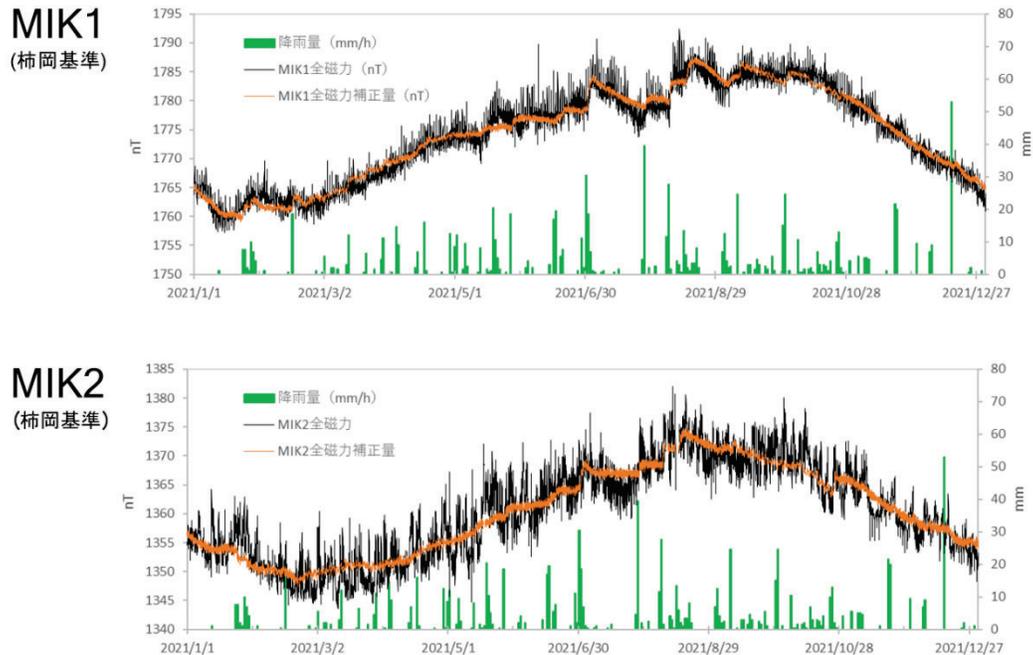


図 2 全磁力と全磁力補正量との比較

(上)MIK1 及び(下)MIK2 の比較：全磁力(nT)、全磁力補正量(nT)、1時間降水量(mm)

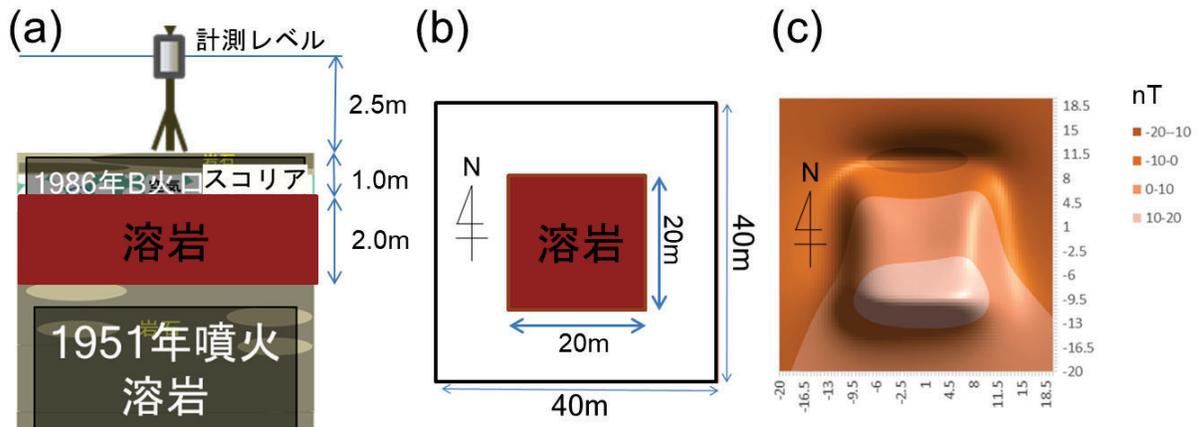


図3 全磁力の季節変化量の推定

(a) スコリア層（地表～地下1m）及び溶岩層（地下1～3m）の地下構造模式図、(b) 溶岩層の水平分布図、(c) 直方体モデルから見積もった全磁力の季節変化量（年較差）

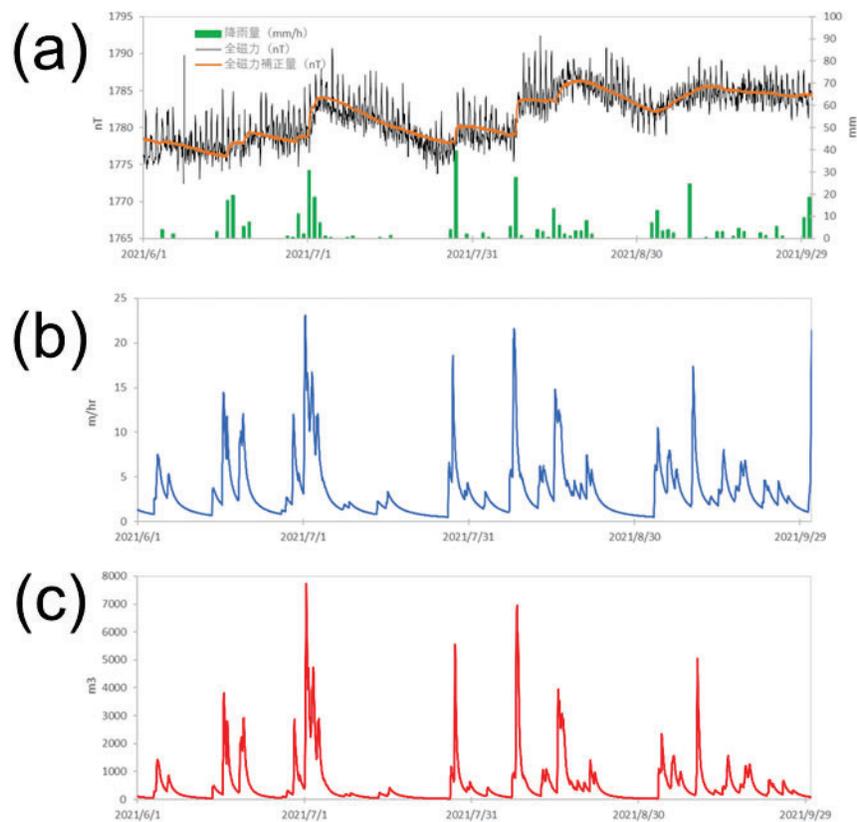


図4 タンクモデルによる地下空洞内における地下水の流速及び水量の推定結果
(a) 図2上図と同様、(b) 地下空洞内流速(m/hr)、(c) 地下空洞内水量(m³)

様式2 調査研究業務成果報告書（第24条2）

[謝辞] 岩石磁化測定においては産総研地質調査総合センター小田啓邦氏に多大なるご協力をいただいた。同センター川辺禎久氏より観測点付近の表層に関して有益な情報をいただいた。また、伊豆大島火山防災連絡事務所杉浦理氏にご協力いただいて岩石試料の採取を行った。

[成果の発表] :

笹岡雅宏・浅利晴紀（気象庁地磁気観測所）・小田啓邦（産総研地質調査総合センター）、伊豆大島火山の全磁力変動に関する研究、2025年度日本火山学会秋季大会、B1-03、2025。

基礎課題

[課題名]：インターマグネット推奨の新しいリアルタイム伝送方式の予備調査
（令和 7 年度）

[担当者]：○神谷亜希子、浅利晴紀（技術課）

[成果]：

1. MQTT プロトコルについて

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) プロトコルは、主に IoT デバイス向けに設計された軽量なメッセージングプロトコルである。IoT デバイスとしては、スマートフォン、スマートスピーカー、スマートウォッチなどが挙げられる。MQTT は通信量が少なく効率的でありながら、セキュリティ認証や暗号化にも対応している。また、Pythonをはじめとする多くのプログラミング言語で利用できるため、テキストデータの送受信や、その後のデータ加工を行う際に非常に有用な通信規格である。

さらに、MQTT の特徴として「Publish/Subscribe (Pub/Sub)」パターンを採用している点が挙げられる。

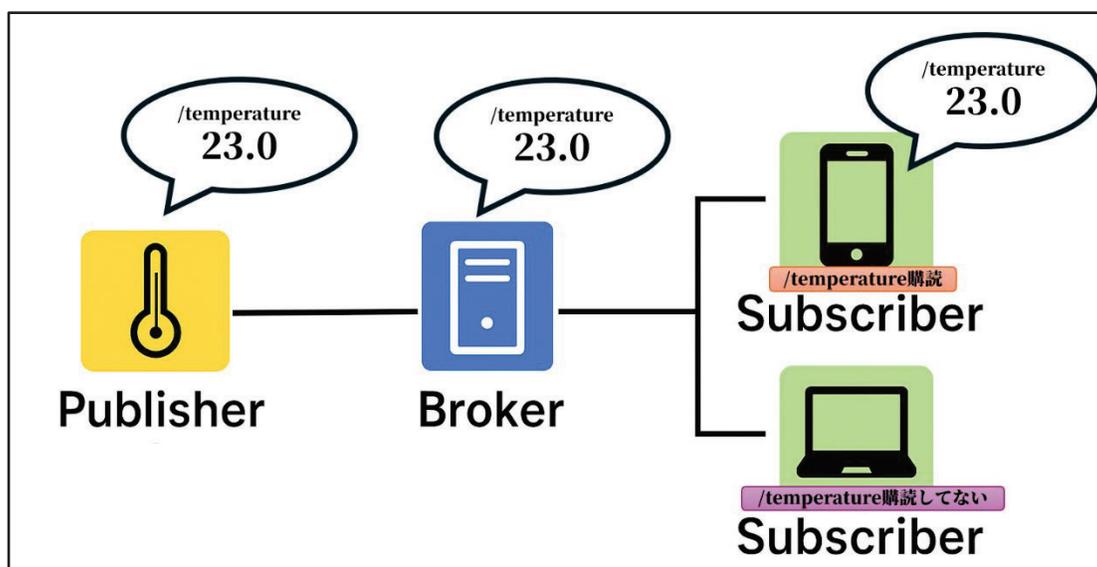


図 1 Publish/Subscribe パターンの概念図

図 1 に、MQTT 通信の概念図を示す。

MQTT 通信では、メッセージ送受信の際に「トピック」を設定する必要がある。図 1 の「/temperature」がその例である。Publisher はテキストデータを送信する際、送信先を区別するためにトピックを指定し、それを Broker に送付する。Broker は、そのトピック（この場合「/temperature」）を subscribe しているデバイスだけにテキストデータを配信する。逆に、subscribe していないデバイスにはメッセージは届かない。このように、Publisher と

Subscriber がそれぞれトピックを指定することで、必要な情報のみが過不足なく配信される仕組みとなっている。

2. MQTT 接続試験（所内）

2-1. 実験用端末の準備

MQTT プロトコルによる接続実験を実施するにあたり、ノート PC を1台、デスクトップ PC 1台を準備した。諸元は以下の通りである。

<linuxPC>

使用 OS：MiracleLinux8（バージョン 3.32.2）

使用ソフトウェア：Mosquitto（バージョン 1.6.15）

MiracleLinux を選定したのは、当実験はインターネットへの接続を前提としているので SEP のインストールが可能な OS が必要と判断したためである。

MQTT 通信には Mosquitto という MQTT-broker 用のソフトウェアをインストールした。他の Linux であれば Epel ディストリビューションからインストールするが、今回は MiracleLinux にプリインストールされていたため、そのまま使用することとした。

<WindowsPC>

使用 OS：Windows11

使用ソフトウェア：Mosquitto for Windows v5/v3.1.1

Mosquitto.org からソフトウェアの安全を確認してダウンロードし、インストールを実施した。また、Windows11 で mosquitto を使用するには事前に mosquitto のインストールフォルダに Path を通しておくことが必要である。

2-2. 同一端末内での MQTT 通信

LinuxPC 内において、publisher、broker、subscriber を起動しテキストデータの送受信を行った。

まず最初にターミナル画面で mosquitto_broker を起動し状態の確認を行う。作業は root ユーザーで実施する。

```
# systemctl start mosquitto
```

```
# systemctl status mosquitto
```

status を取得した際に、表示が active（running）となっていれば broker として動作していることがわかる。

次に subscriber としてターミナル画面（以降、ターミナル_sub）を起動する。subscriber

様式2 調査研究業務成果報告書（第24条2）

起動のコマンドは「mosquitto_sub」である。オプション -t はトピック名（名前はなんでもよい）、-h は接続する broker のホスト名、あるいは IP アドレスを入力する。今回の場合は同一端末内での通信となるため「localhost」と記述する。

```
# mosquitto_sub -t XXXX -h localhost
```

ターミナル_sub はこのコマンドにより受信待ち状態となる。

また、publisher として別のターミナル画面を（以降、ターミナル_pub）を起動する。コマンドは mosquitto_pub を使用する。オプション -t はターミナル_sub と同じものを指定する。発信先の broker についても今回は同一端末内での通信なので localhost となる。

オプション -m にて送信するメッセージを記述することができる。今回は実験として「Hello, world!」と送信する。

```
# mosquitto_pub -t XXXX -h localhost -m "Hello, world!"
```

上記コマンドをターミナル_pub に入力したところターミナル_sub に「Hello, world!」と表示され、MQTT による通信が確立されていることがわかった（図2）。

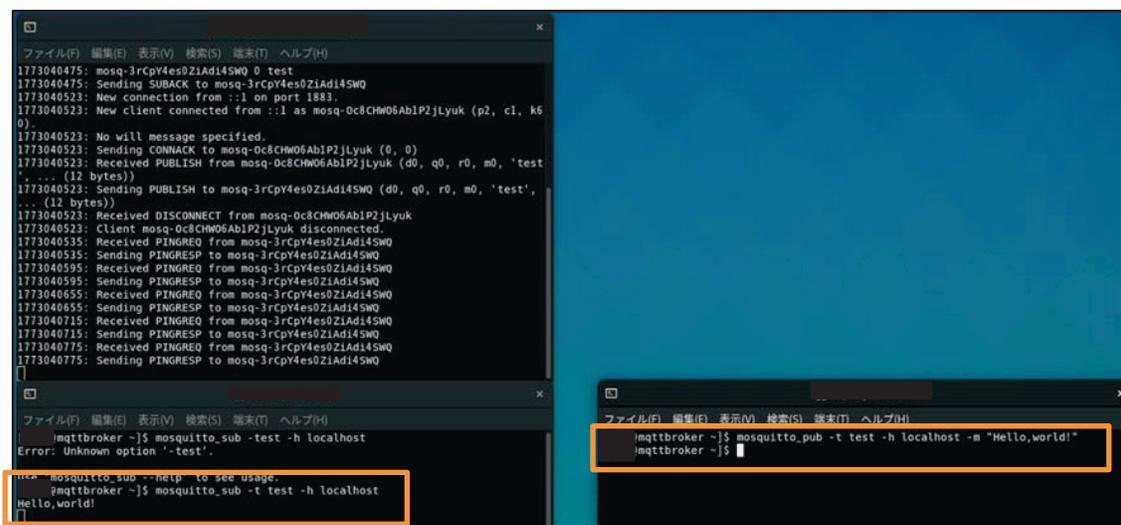


図2 同一端末内での MQTT 通信

2-3. 別端末での MQTT 通信

次に、LinuxPC と WindowsPC の 2 台を使用した別端末での通信試験を実施した。

別端末とのやり取りを実施する場合、mosquitto.conf に通信ポート（listener 1883）を明記しておく必要がある。また、接続の概念図を図3に示す。

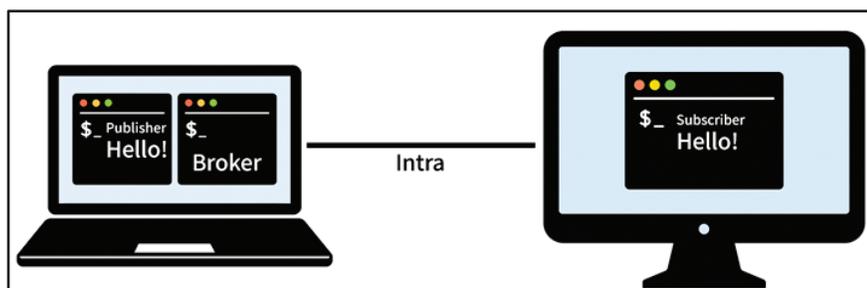


図3 別端末での MQTT 通信（接続概念図）

まず、WindowsPC 側を受信待ち状態にする必要があるため、mosquitto_sub コマンドを入力する。broker は linuxPC となるため、-h オプションには LinuxPC のイントラネットの IP アドレスを入力し、ターミナル_sub を起動する。

```
# mosquitto_sub -t XXXX -h 192.168.1.nnn
```

LinuxPC 上で broker を起動し、ターミナル_pub に以下のコマンドを入力すると、Windows 上のターミナル_sub に「Hello,world!」と表示され、端末間での MQTT 通信が確立されていることがわかった。

```
# mosquitto_pub -t XXXX -h localhost -m "Hello,world!"
```

3. 京都大学 GIN との接続試験

世界に4つある地磁気世界資料センター（WDC for Geomagnetism）のひとつが、京都大学に付属する「地磁気世界資料センター京都（WDC for Geomagnetism, Kyoto）」であり、WDC 京都は地磁気観測リアルタイムデータの結節ポイント（GIN）の役割も担っている（以降、京大 GIN）。京大 GIN では、世界中の INTERMAGNET 地磁気観測所の地磁気観測データを集積、管理している。現在の京大 GIN の地磁気観測リアルタイムデータ通信については以下のような仕様となっている。

- （1）email, ftp, rsync による従来の送受信についても継続して実施している。
- （2）上記の通信によって得られた観測データは、MQTT 通信用の json フォーマットに変換し、GIN から publish している。
- （3）email でのデータ送付の中で一番間隔が短いのが5分であるため、現在、5分毎に publish をしている状態である。
- （4）MQTT 通信は実装されているが暗号化はまだ実装していない。ゆくゆくは暗号化ありでの通信を実装する予定である。

（4）の MQTT 通信について地磁気観測所において送受信が可能かどうか接続試験を実施する。図4に概念図を示す。

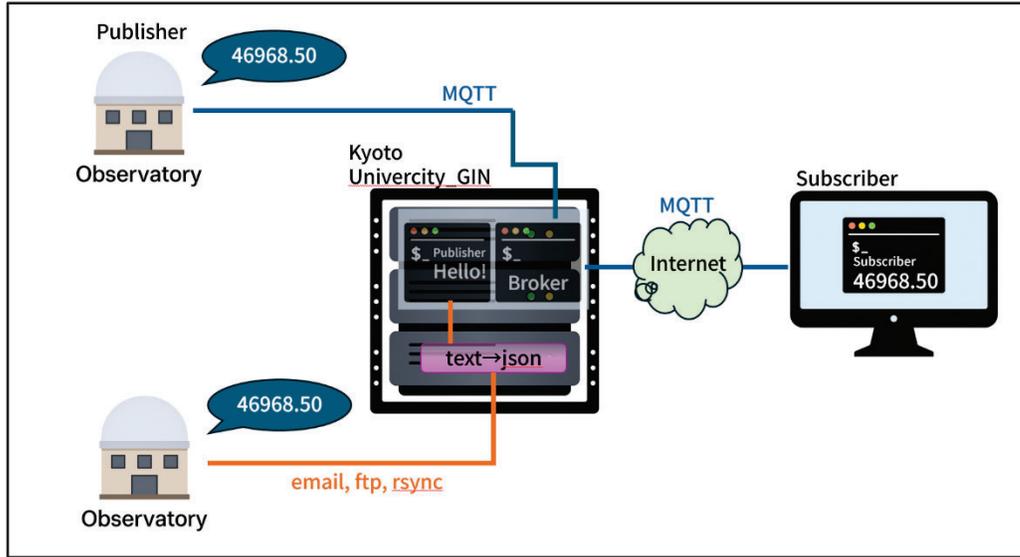


図4 京大GINにおけるMQTT通信データの流れ

3-1. 京大GINからの地磁気データの受信試験

京都GINのbrokerは「impf/#」というトピック名でpublic/subscribeしている。LinuxPCを使用し観測データを受信するため、subscriberとして以下のコマンドを入力する。京大サーバに接続するにあたっては、ユーザ名およびパスワードが必須となっており、オプション -u および -P を使用する。

```
# mosquito_sub
-t 'impf/#'
-h (京大サーバドメイン)
-p 1883
-u (ユーザ名)
-P (パスワード)
```

成功すると、図5のような画面となり、5分毎にデータが受信されていることを確認することができる。

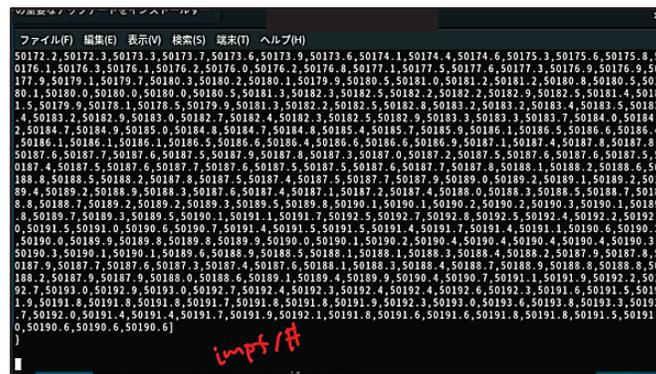


図5 地磁気観測データ受信時の画面の様子

作業開始時に京大 GIN 側との連携をうまくとれていなかったために、試験当初は、GIN 側の設定で host.allow の設定に当所のアドレスが含まれていなかったために接続許可されず「Client (接続 ID) sending CONNECT」が連発したことがあったが、迅速に設定変更のご対応をいただき、無事に京都大学 GIN と MQTT 接続ができることが確認された。

今後、接続試験をする際には、京大 GIN 側としっかり連携をとって進めていくよう留意したい。

3-2. 京大 GIN への Publish/Subscribe

京大 GIN 側にテスト用トピック ('kmo_test') を準備していただき、地磁気観測所からのデータの送受信が可能であるかの試験を行った。

LinuxPC にターミナル_sub とターミナル_pub の 2 つのターミナルを起動し、どちらも京大 GIN の broker に接続して publish/subscribe を実行する。図 6 に概念図を示す。

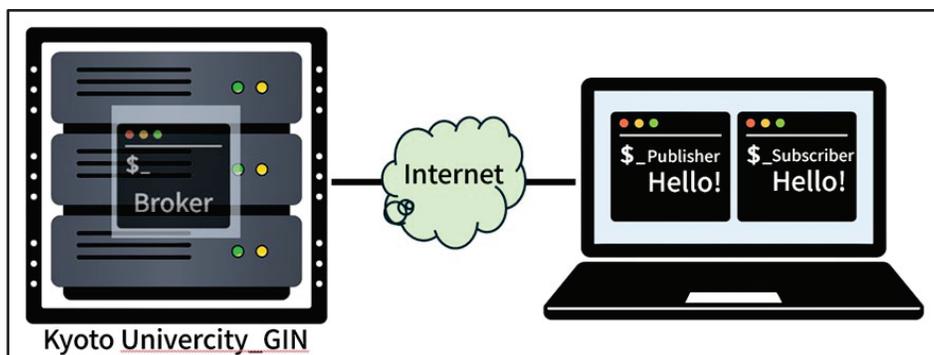


図 6 京大 GIN への Publish/Subscribe の概念図

最初にターミナル_sub に以下のコマンドを入力し、待受状態としておく。

```
# mosquito_sub
-t 'kmo_test'
-h (京大サーバドメイン)
-p 1883
-u (ユーザ名)
-P (パスワード)
```

次にターミナル_pub に以下のコマンドを入力し、テキストデータを publish する。

```
# mosquito_pub
-t 'kmo_test'
-h (京大サーバドメイン)
-p 1883
-u (ユーザ名)
-P (パスワード)
```

-m “Hello, world”

無事に接続できた場合は、図 7 のようにターミナル間でテキストデータ送受信ができて
いる状態となる。見たところ同一端末内の通信試験と結果は同じであるが、broker が同一
端末内か外部ホストであるかというのが異なる点である。

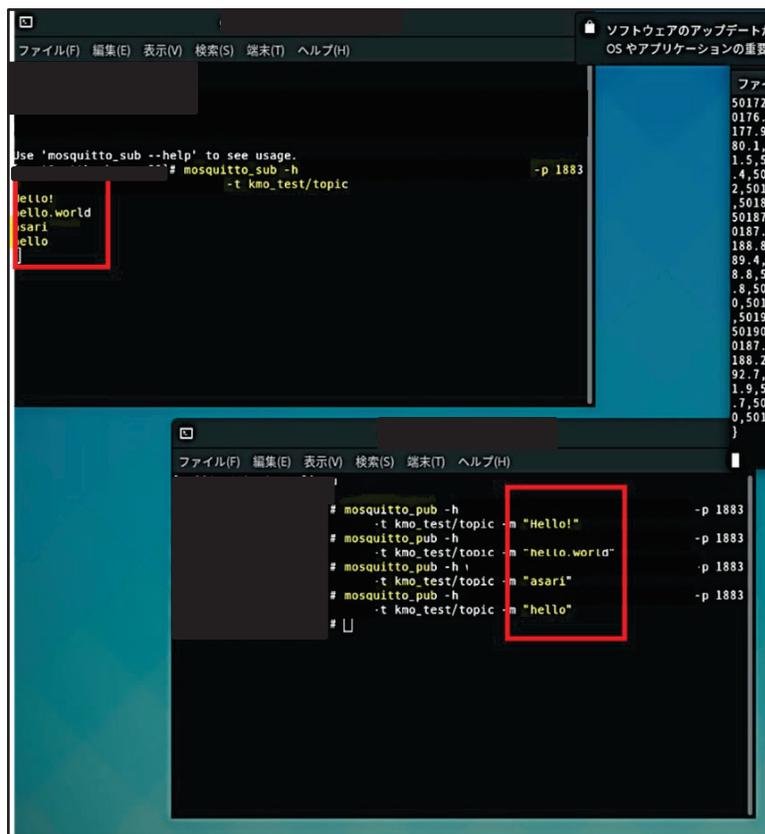


図 7 京大 GIN を broker とした送受信結果

4. まとめと今後の展望

MQTT 通信について、所内および所外への通信が可能であることを確認することができ、
京大 GIN の broker についても接続し地磁気データの受信および、テキストデータの送受信
が可能であることがわかった。

今後のリアルタイム配信については、所内の意見を集約し、MQTT 通信での通信を進め
る方針ということであれば、リアルタイムデータ送信を実装できるようプログラムの開発
を進める。また、京大 GIN が送受信データの暗号化を実装した場合には、追従して対応す
る必要があるため、MQTT 通信のプログラムへの応用についても調査を進めていきたい。

※ 図 1、図 3、図 4、図 6 については一部、生成 AI を使用して作図した。

様式2 調査研究業務成果報告書（第24条2）

[成果の発表]:

なし

基礎課題

[課題名]：女満別観測施設構内における融雪期の全磁力変化（令和 7～8 年度）

[担当者]：○下川 淳、平原 秀行、有田 真、仰木 淳平（観測課）、
飯塚 ふうな（網走地磁気観測連絡事務所）

[成果]：

女満別観測施設では 2022 年 10 月 21 日以降、絶対観測室への人工擾乱等の恒久的な影響の監視のため、作業等で人がいない時間帯にはプロトン磁力計を常時毎分計測としている。絶対観測室のプロトン磁力計と連続観測施設のオーバーハウザー磁力計について、15 時 00 分から 17 時 59 分（UTC）の 3 時間における全磁力差の平均値（以降、夜間値）を確認した。2023 年から 2025 年までの 3 年間の夜間値とアメダス女満別地点の最深積雪深を比較した結果（図 1）、融雪期における夜間値の変化には大きく 2 つのパターンがあることを確認した。2023 年には絶対観測室のプロトン磁力計が 3 月 14 日から 15 日の 1 日で約 0.26nT 急に変化した例、2024 年と 2025 年では融雪期に夜間値が約 0.3nT 緩やかに変化した例である。いずれの変化も最深積雪深の減少と概ね対応していた。ただし、2023 年 10 月頃より夜間値に年周変化のような変動が始まり、この変動は積雪期間中に小さくなり、積雪がなくなる頃に再び変動が見え始めた。2024 年と 2025 年の融雪期における夜間値の変化には、年周変化のような変動が重なっている可能性がある。

以降、今年度の計画に対する成果について、報告する。

○融雪期における地中温度測定方法の検討と女満別構内での地中温度測定

地中温度の計測には温度計 TR-52(T&D 社製)を用いることとした。温度計の設置箇所には、地中か地上、建物内の 3 箇所を想定した。地中に温度計を埋設する場合、磁力計を設置している建物の近くで掘削が必要である。掘削の影響による全磁力変化の可能性、温度計を入れるための防水性の箱などを埋設した場合の地中温度への影響など不確定要素がある。地上の設置については、暴風雪により温度計の破損の可能性がある。磁力計がない建物に温度計のロガーを設置し、センサーケーブルを延長し、地中温度を計測することとした。地中温度を計測する深さについて、過去に女満別構内で 0.1m, 0.5m, 1m で計測が実施され、全磁力変動の年周変化が地表付近の地中温度と相関が高いことが示されている*1。このことから、地表付近で計測を試みたいと考えた。しかし、深さ 0.1m は融雪期の浸食による影響が懸念されるため、地中温度を計測する深さを 0.2m とした。温度計を女満別構内の 2 地点に設置し、毎時計測で地中温度の計測を開始した。

○柿岡の植生のある地点における地中温度及び外気温と全磁力変化の対応

温度計を柿岡に設置し(植生あり、深さ 0.2m)、地中温度及び外気温と全磁力変化の対応を確認した。地中温度の計測期間は 2026 年 1 月から 3 月初旬である。地中温度の計測には温度計 TR-52(T&D 社製)を用いた。構内の全磁力地点差と地中温度及び外気温を比較した

結果、有意な相関は認められなかった(図2)。また、期間中に柿岡構内で積雪状態となり、融解する日があった。今回、女満別で融雪期にみられた1日の急な変化は柿岡では見られなかった。

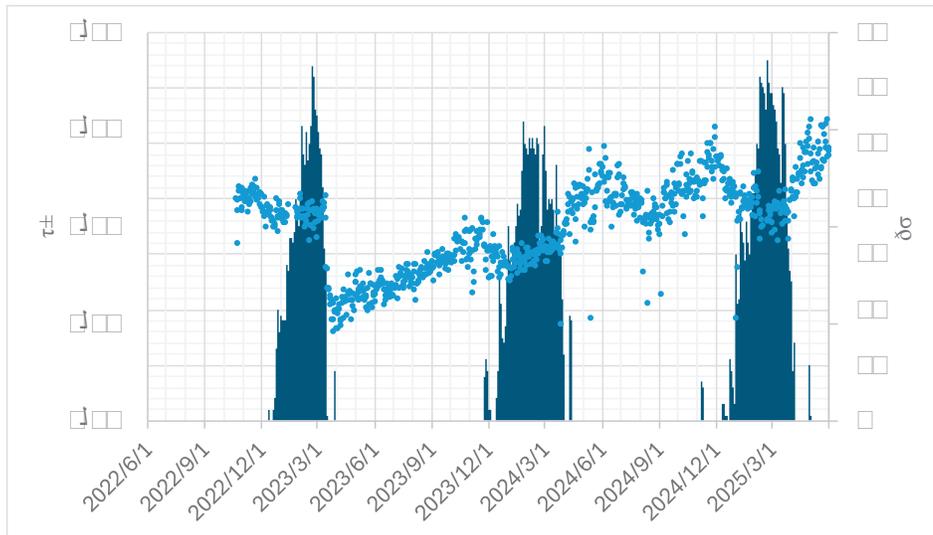


図1 女満別観測施設の夜間値とアメダス女満別地点の最深積雪深

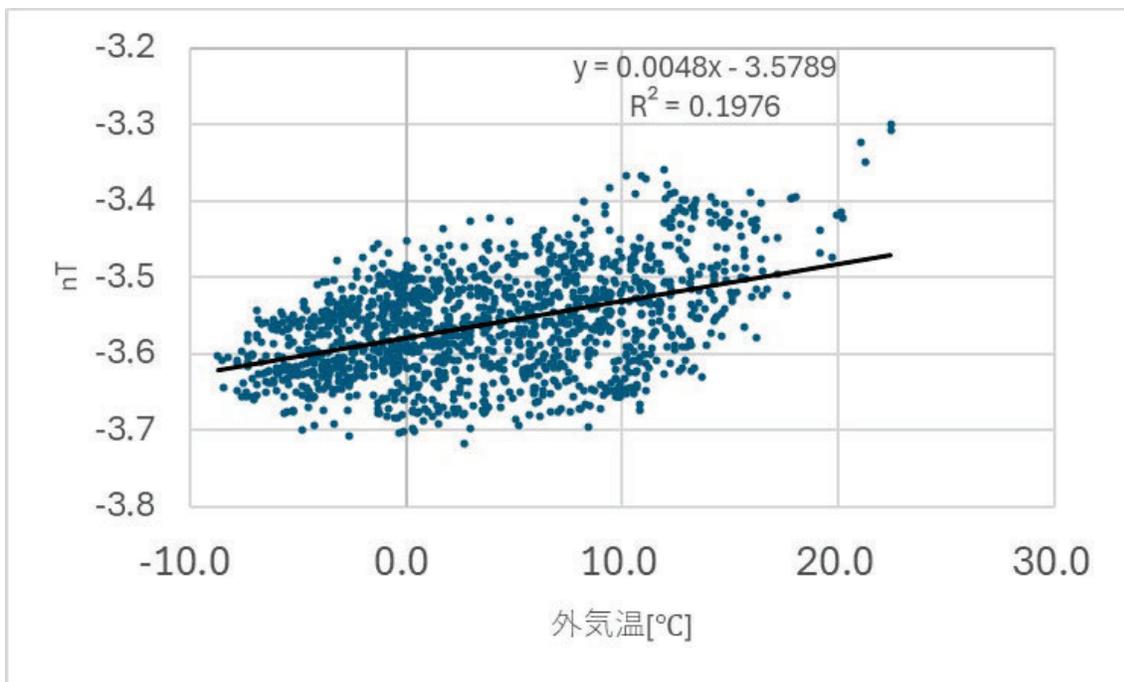
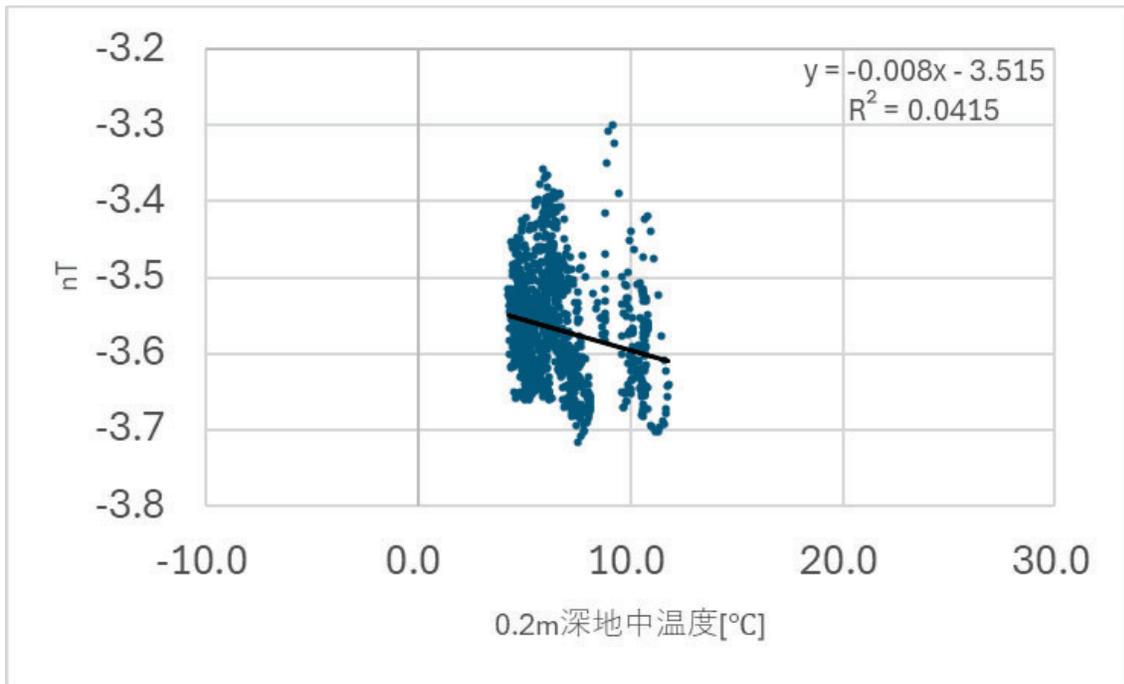


図2 全磁力地点差と地中温度（0.2m）及び外気温の散布図
データには毎時平均値を用いた。R²は相関係数の2乗項、黒線は一次近似曲線を表す。

様式2 調査研究業務成果報告書（第24条2）

[今後の方針] 来年度、融雪期のデータを回収し、地中温度と全磁力変化のデータの解析を実施する。地中温度、植生の有無、磁力計と積雪箇所までの距離などの融雪期の全磁力変化の寄与について、定量的な評価を試みる。

[成果の発表]：

なし

基礎課題

[課題名]：GNSS 真方位観測の業務化に向けた調査（令和 7～8 年度）

[担当者]：○松下拓輝、飯塚ふうな、仰木淳平、平原秀行、有田真、下川淳（観測課）
松浦大輔、谷口秀隆、森永健司（技術課）

[成果]：

1. GNSS 真方位観測の再現性調査

今年度の各点での結果を、前年度の結果とともに表 1 に示す。いずれも前年度比で、柿岡で+11.3 秒、女満別 N 方位標(E 方位標)で-9.5 秒(+7.5 秒)、鹿屋大穴(市販)で-13.0 秒(-22.9 秒)であった。また、図 1～3 にそれぞれ柿岡、女満別(N 方位標)、鹿屋(hole)の天測の結果との比較を示す。ここで、北極星観測（以下、天測という）による真方位観測での鉛直線偏差を考慮して、GNSS 真方位の観測値に鉛直線偏差の影響量（※国土地理院物理測地課平岡氏より提供）を補正していることに注意されたい（GNSS の観測値に補正しているのは、過去との連続性を担保するため）。図から、柿岡と鹿屋については、前年度の観測値が天測の値に近く、女満別は今年度の観測値が天測の値に近いことが分かる。GNSS そのものの観測は、1 秒程度の精度であるため、この差の原因としては考えづらい。水平角観測については、今年度検出した値（図中青星）にばらつきがあることから、水平角観測に原因を求めの方が自然である（この検出において、GNSS そのものの観測値は同じ観測を採用している）。天測で行う水平角観測（所内では、T. Mark の観測という）では、通常 8 回観測するところ、今回は 2 回しか実施していないことが原因ではないかと考えられる。

表 1 令和 6 年度と令和 7 年度の GNSS 真方位観測結果の比較

観測点	GNSS 真方位（令和 6 年度）	GNSS 真方位（令和 7 年度）
柿岡 大穴	0° 32' 44.6"	0° 32' 55.9"
女満別 N 方位標	3° 05' 09.0"	3° 04' 59.5"
女満別 E 方位標	90° 03' 02.5"	90° 03' 10.0"
鹿屋 大穴 (W+)	0° 30' 22.6"	0° 30' 09.6"
鹿屋 市販 (W+)	0° 22' 51.0"	0° 22' 28.1"

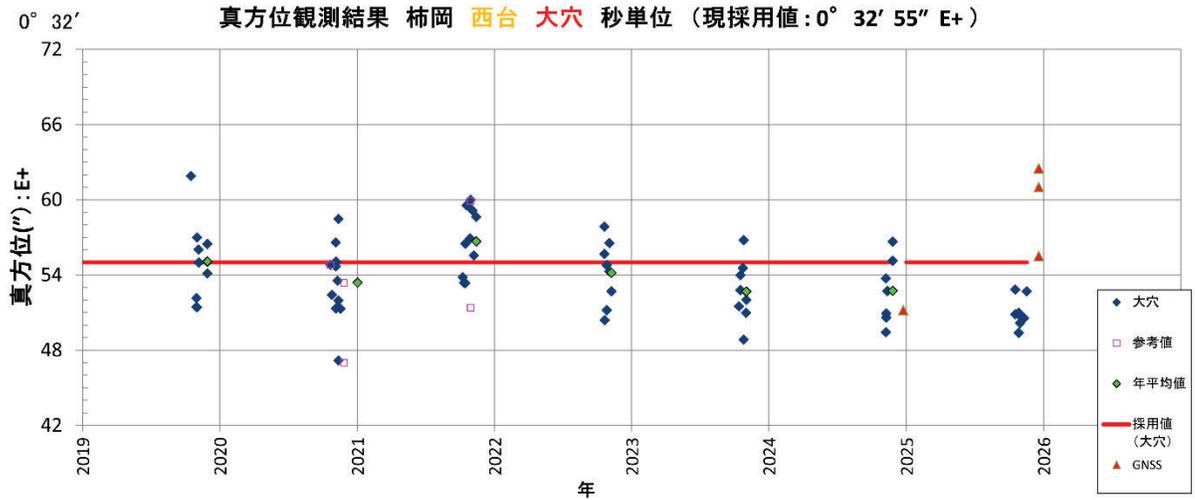


図1 柿岡における天測およびGNSSによる真方位観測の比較

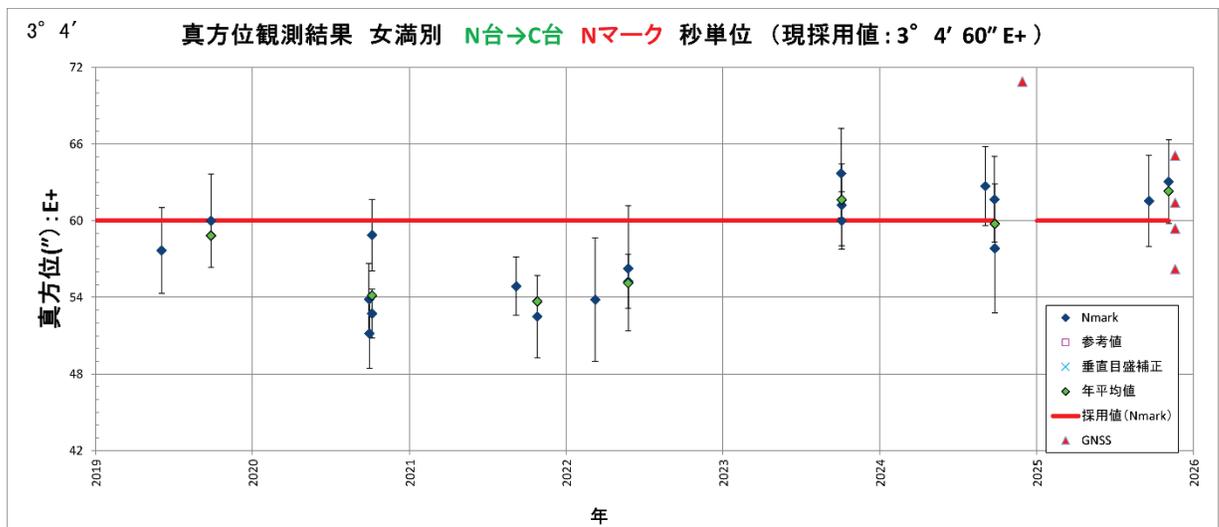


図2 女満別(N方位標)における天測およびGNSSによる真方位観測の比較

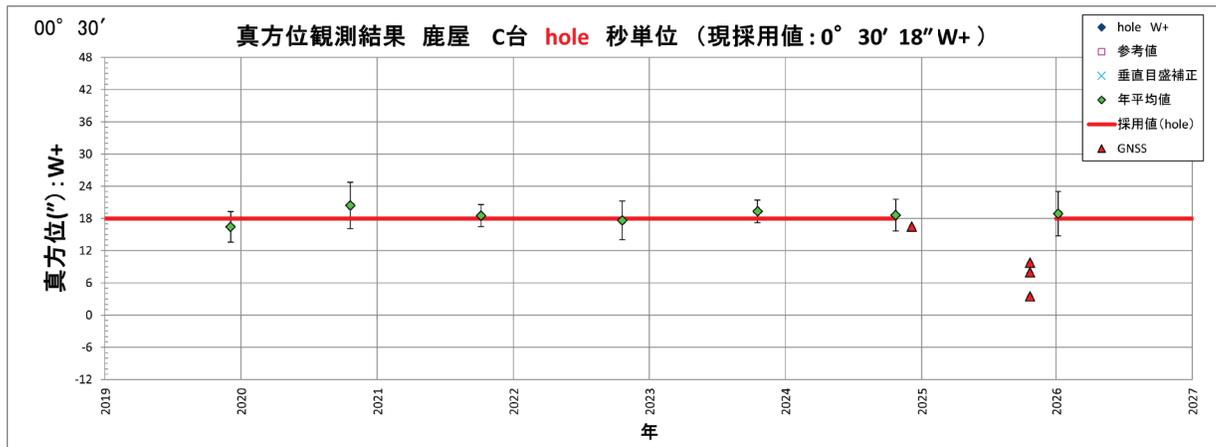


図 3 鹿屋(hole)における天測および GNSS による真方位観測の比較

2. 水平角観測の精度検証

天測による真方位観測と GNSS による真方位観測の手順の対応を考えると、北極星の観測は GNSS 観測（受信機で、GNSS 衛星からの電波を受け取って、位置を決定する）に対応し、T. Mark の観測は水平角観測に対応すると言える。このうち、前者については電波を受け取り位置の決定を行う回数は、1 回/秒×3600 秒以上であるため、十分な回数と言えるだろう。一方で、後者については、天測の 8 回に対して、GNSS 真方位では、2 回しか実施していない。2 回という回数十分かという検証が必要である。また、通常の基準点測量（水平角観測と鉛直角観測）では、プリズムミラーを目標としているが、女満別と鹿屋については、絶対観測を行う基台に磁気儀が据え付けられているため、その磁気儀を目標として用いている。したがって、目標物として、プリズムミラーと磁気儀の間に系統誤差がないかを検証する必要がある。

以上のことを確認するために、地磁気観測所構内において、プリズムミラーおよび磁気儀を目標とした際の水平角度の読み取り値を 30 回ずつ、計 3 名で行い、結果を評価した。図 4 は観測の配置で、図中の青四角のところに望遠鏡（磁気儀）を、赤三角のところに目標（ミラーまたは磁気儀）を設置し、

- ① 屋外に設置したミラーを 30 回視準×3 名
- ② 屋内に設置したミラーを 30 回視準×3 名
- ③ 屋内に設置した磁気儀を 30 回視準×3 名

を実施した。読み取った値は付録の表 2～4 のとおり。この表から、個人差が平均値で最大 5～6 秒ほど、目標物が、ミラーと磁気儀の場合の差は、観測者 hm で 1 秒以下である一方、観測者 th, sj では 2～3 秒であった。観測者 hm は同様の観測の経験が多いことから、観測に慣れることで、磁気儀を用いても同等の精度での観測ができるかもしれない。個人差については、天測における T. Mark の観測においても、3 秒程度の個人差は見られることから、本手法固有の問題ではないだろう。次に、何回の観測が必要かを検証するために、①～③に

ついて累積平均を求め、図5～7に示す。この図から、平均値が落ち着くまでの変化には多少の個人差があるものの、およそ5回程度で安定し、安定したあとの平均値と比較すると、1～2回の観測は、2～3秒の差が出てしまう（観測者によっては、5秒近いものもあった）。実際のGNSSによる真方位観測では、この観測を4方向に対して実施するため、累積の誤差はさらに大きくなるのが想定される。

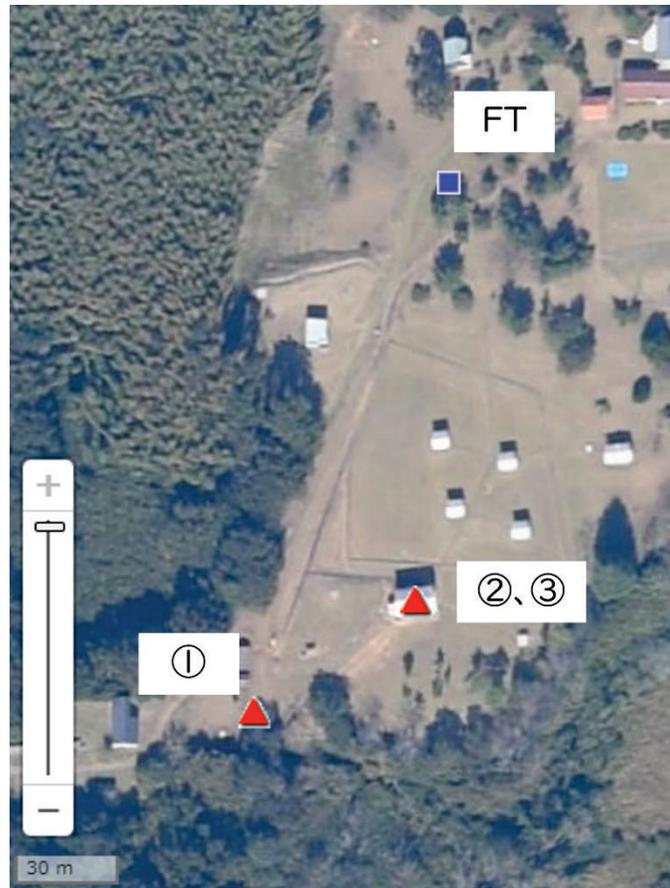


図4 観測の配置（地理院タイルに観測位置等を追記）

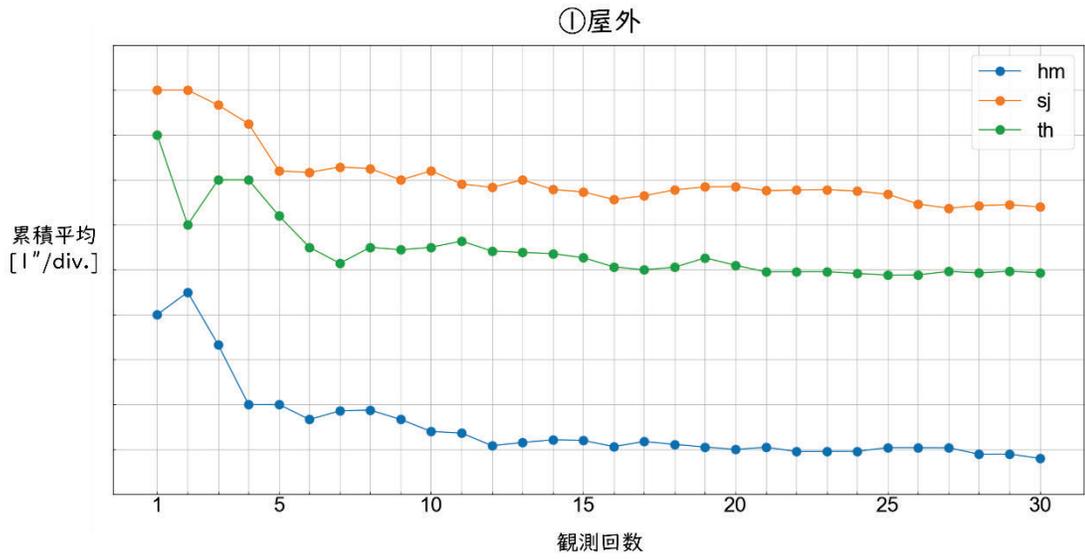


図5 水平角観測の累積平均 (①の事例)

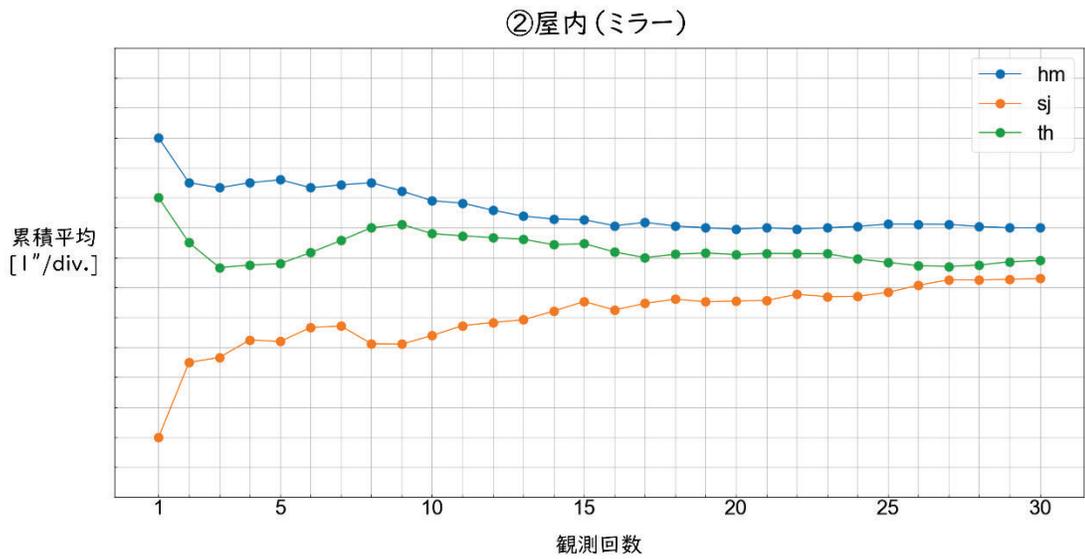


図6 水平角観測の累積平均 (②の事例)

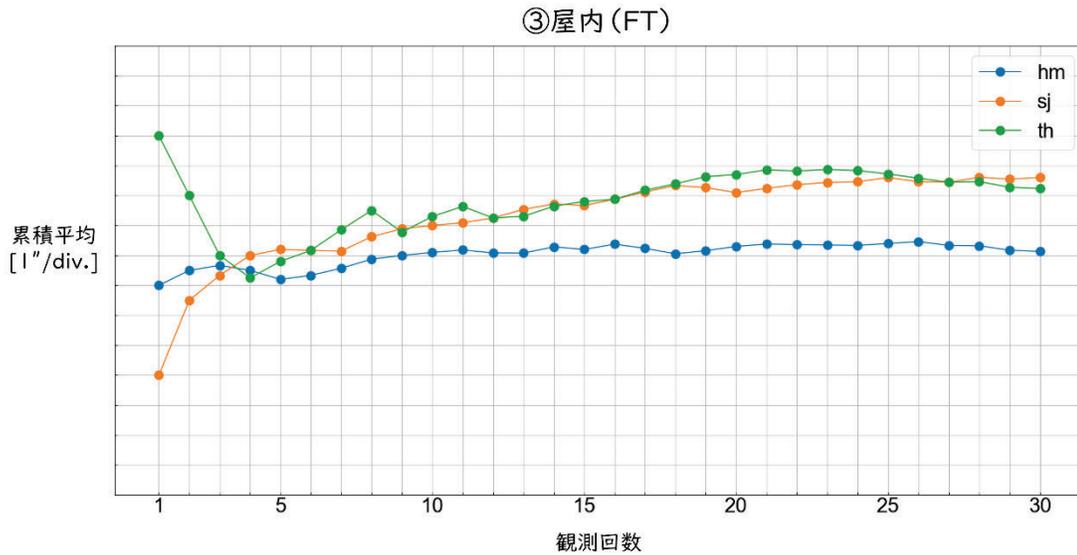


図7 水平角観測の累積平均（③の事例）

3. まとめと今後の課題

本調査研究では、GNSS による真方位角の算出について、再現性の評価および水平観測の精度検証を実施した。今回の結果などを踏まえて、GNSS 真方位観測の手順として以下の流れを提案したい。

- i) GNSS 観測（スタティック法、1時間以上観測、エポック1秒）
- ii) 水平角観測（正反観測×8回）

次年度は、業務化に向けたより実務的な検証として、この流れで観測を実施した場合の人的コストを天測のそれと比較して、GNSS による真方位観測への移行の判断に必要な情報を充実させたいと考えている。また、GNSS 観測で得られた真方位角と天測で得られた真方位角との連続性の担保には、柿岡、女満別、鹿屋それぞれにおける天測に対する鉛直線偏差の影響を考慮しなければならない。今回は、ジオイドモデルから計算された値を提供いただいたが、他にも水準測量とGNSS観測を組み合わせる方法などもある（例えば、Vittuari et al, 2016 [2]）。また、観測場所と方位標の視線上でGNSS観測を行い、方位標の真方位角を直接GNSS観測から求めるという方法も提案されている（He et al, 2025 [3]）。こういった手法を当所でも検証してみる価値はあると考えている。

[謝辞] 鉛直線偏差の影響量の算出にあたっては、国土地理院物理測地課の平岡氏にご協力いただきました、深く感謝申し上げます。

[成果の発表] :

・Matsushita, H., Matsuura, D., Iizuka, F., Oogi, J., and Asari, S.: The azimuth observation by Global Navigation Satellite Systems as an alternative to

様式2 調査研究業務成果報告書 (第24条2)

astronomical method: a case study at Kakioka, Geosci. Instrum. Method. Data Syst.,
15, 7-15, <https://doi.org/10.5194/gi-15-7-2026>, 2026.