令和３年度
地磁気観測所調査研究業務
成果報告書

重点課題

電磁気による火山活動評価の高度化に向けた調査 ・・・・・ 1 頁
次期標準磁気儀設計に向けた予備調査 ・・・・・・・・・・・ 16 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 ・・・ 23 頁

基礎課題

地磁気永年変化の経年成分に関する調査 ・・・・・・・・・ 32 頁
機械学習による K 指数判定手法の開発(その 2) ・・・・・ 34 頁
弱磁場方式による絶対観測の精度調査・・・・・・・・・・・ 37 頁
各観測点における真方位観測の観測誤差に関する調査・・・ 42 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・・・ 44 頁
複数の人工擾乱源把握のための
全方位監視カメラ設置および独自ソフト開発・・・ 48 頁

2022 年 3 月
地磁気観測所

[調査研究の種別]：重点課題

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

[担当者]： ○瀧沢倫明、藤原善明、笹岡雅宏、山崎貴之、浅利晴紀、増子徳道（技術課）、山際龍太郎、豊留修一、有田真、長町信吾、仰木淳平、下川淳、西田重晴、弘田瑛士、屋良朝之（観測課）、斎藤誠

[概要]：

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

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

[具体的な計画と達成目標]：

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

［令和３年度の成果］：

１．各火山における電磁気観測

〇雌阿寒岳

令和 3 年度は、

・全磁力連続観測点 3 点での観測を継続

・ポンマチネシリ火口周辺での全磁力の繰返し観測（2021 年 6 月実施）

・ME2、ME3 観測点において、DI 補正のための偏角観測

・徒歩による全磁力観測（磁気測量）

を実施した。

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

のノイズを有意に除去できた。

ME2、ME3 において、DI 補正のための偏角観測を実施した（図 2、図 3)。ME2 の観測結果は-8.7°であり、昨年度の観測(-8.8°)の再現性が確認できた。また、ME3 では初めて偏角観測を実施した。観測結果のもつ誤差を検討するために、同一地点で高さ及び観測者を変えて観測した。地上高 156cm の観測結果は-9.8°であり、ME2 よりも 1°程度西寄りであることから、ME3 近傍の地形や地質による差が現れていることが示唆される。

昨年度及び今年度の偏角の観測結果を元に、MEA、ME2、及び ME3 観測点の DI 補正を試みた。伏角の観測は実施していない（未知量である）ことから、MEA 観測点の全磁力値（F）と女満別観測施設（MMB）の全磁力（F)、偏角（D)、水平分力（H）を用い、MEA 観測点の伏角（I）を変化させ、全磁力差、DI 補正係数、及び年周変化を差し引き、その分散（5 日間平均）が最も小さくなる値を求めた。さらに、昨年度の観測から得た MEA の D の値（-9.00°）を固定して、分散が最も小さくなる伏角 I（56.9°）を中心として±0.5°変化させた（図 4)。

DI 補正後の MEA と MMB との全磁力差は H 補正（黒線；MMB の水平分力のみ使用した補正）より上側にプロットされ、伏角が小さくなるほど上方にプロットされる。また、いずれの伏角においても、時間の経過と共に長期的なトレンドが H 補正からずれていき、2022 年 1 月の時点で、伏角 1°（57.4°、56,4°）の違いに対して約 4.9nT の相違が表れる。ME2 及び ME3 についても同様の手法で分散が最も小さくなる伏角を計算した上で DI 補正を施したところ（図 5)、ME2 及び ME3 でも H 補正よりも上方にプロットされることが分かる。これまでの H 補正では MMB の 1 成分しか使用していないのに対し、本稿で採用した DI 補正では MMB の 3 成分（X、Y、Z）全てを使用したことから、より正確な全磁力変化の結果が得られたと考える。火山性トレンドの評価については、今回の DI 補正とこれまでの H 成分補正とで、その評価が変わるような全磁力変化はなかったと思われる。

従来から実施している H 成分補正では、太陽活動に伴う短周期のノイズは除去できていたが、それ以外の地球内部起源の地磁気永年変化による DI 効果は補正されていなかった。昨年度及び今年度の偏角観測の実施により DI 補正が可能となったが、伏角は推定値を用いていることから、より精度の良い DI 補正（特に永年変化成分の補正）を施すには、偏角観測と同時に伏角観測も実施する必要がある。

また今年度初めて、徒歩による全磁力観測（磁気測量）をポンマチネシリ火口南麓で実施した（図 6)。徒歩による全磁力観測は、従来の繰り返し観測よりも精度の高い空間分布を得ることが期待される。両観測の比較では、大局的な全磁力分布（南側ほど全磁力値が減少する傾向）は概ね合っているものの、細かいスケールでみた場合は空間分布に相違が見られており、植生や表層の地質等の局所的な要因による可能性がある。来年度も徒歩による全磁力観測を実施し、繰り返し観測との比較及び空間的な全磁力変化を確認したい。

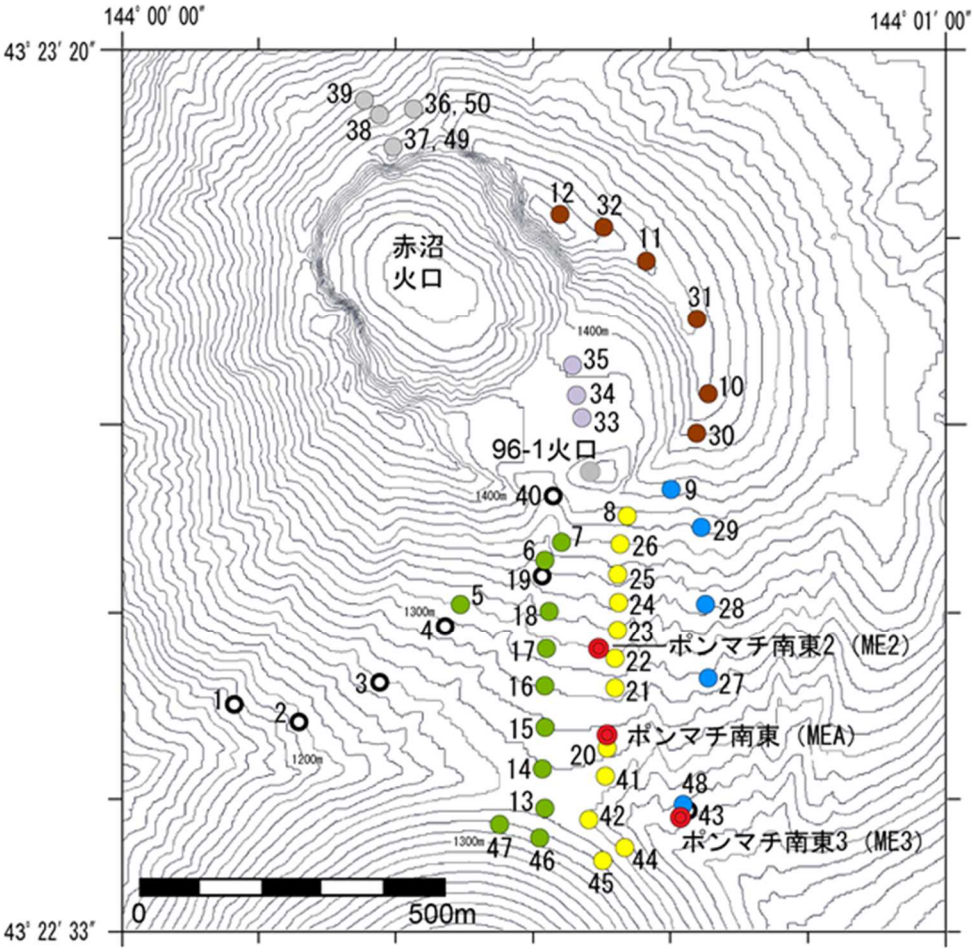


図１　　雌阿寒岳　全磁力観測点配置図

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

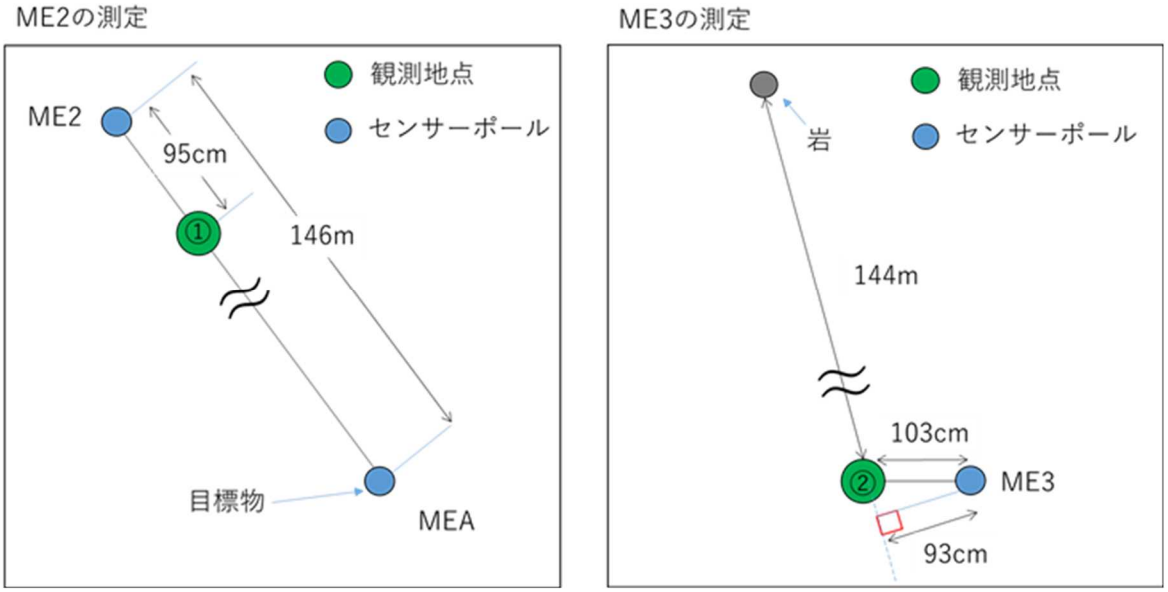


図２　偏角の観測点摸式図（ME2、ME3）

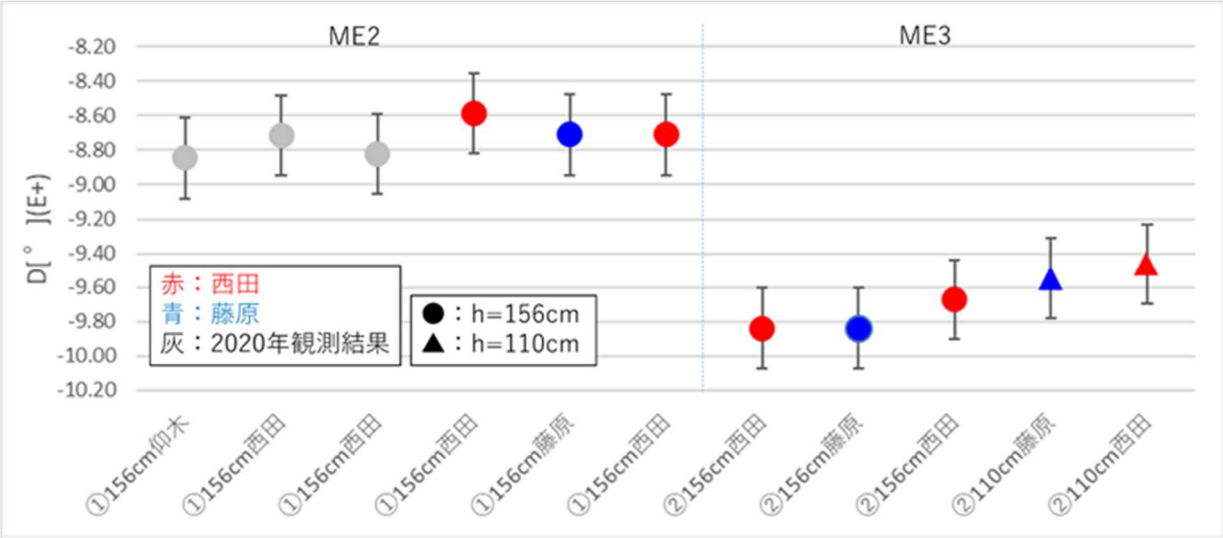


図３　偏角の観測結果（ME2、ME3）

ME3 の観測は、同一地点で高さと観測者を変えた観測を行った。エラーバーは、地磁気観測所比較較正室で 2 人が観測した時のばらつき（0.2°）と、真方位角の誤差（0.08°）を合成（±0.22°）して表している。

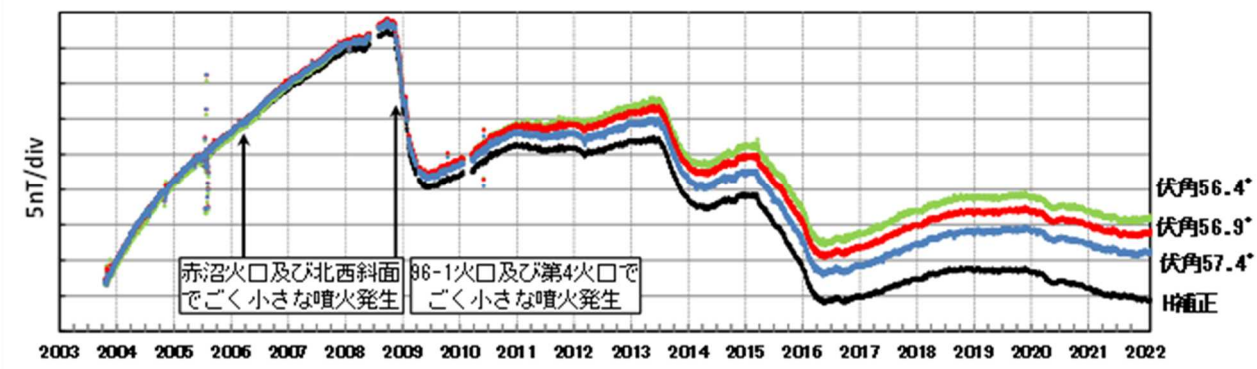


図４　DI 補正前後の全磁力変化（ME2 と MMB との全磁力差）

（全磁力差 MEA-MMB；偏角を固定、伏角を 56.9°±0.5°可変）

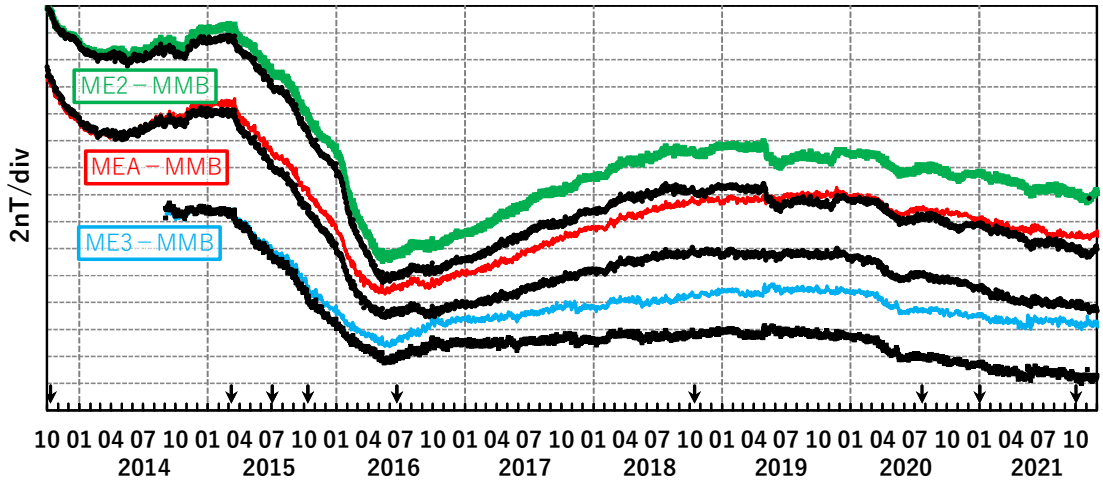


図５　DI 補正前後の全磁力変化（MEA、ME2、ME3 と MMB との全磁力差）

黒線は DI 補正前、色付き線は DI 補正後の全磁力差を示す。

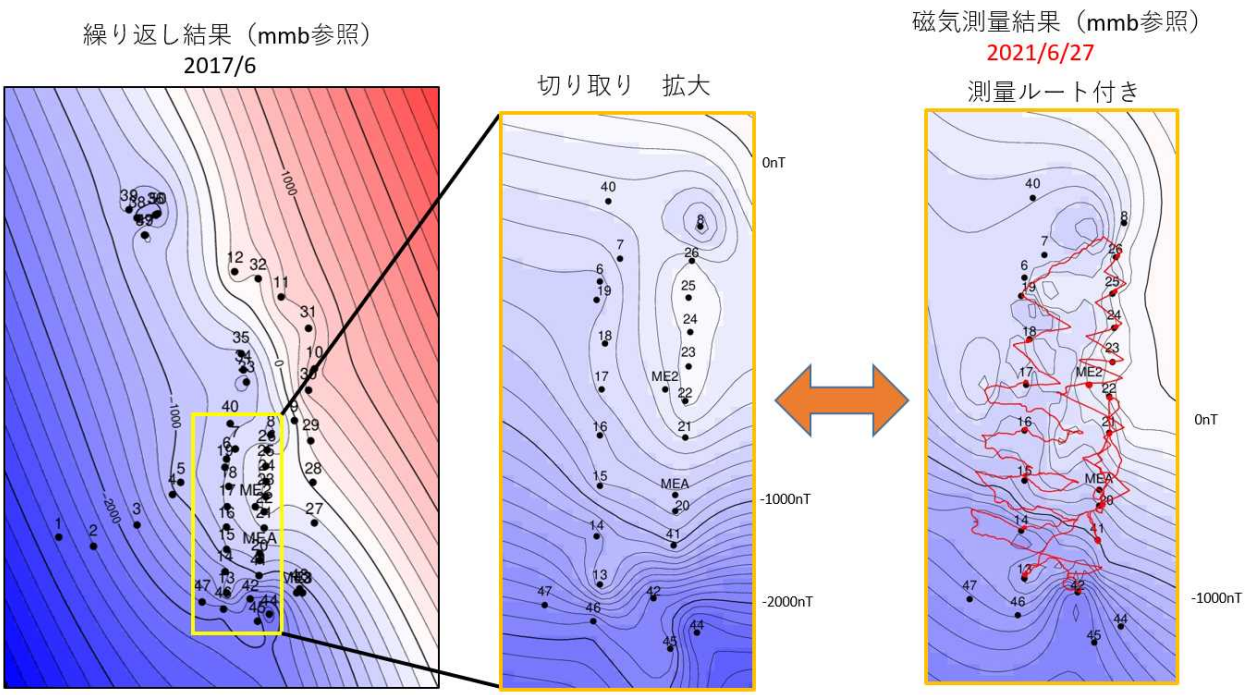


図６　雌阿寒岳　徒歩による磁気観測結果

各点は全磁力繰り返し観測及び連続観測点を示す。コンター値は女満別観測施設（MMB）を基準とした全磁力差。

（左）全磁力繰り返し観測（2017 年 6 月）から作成した等値線（コンター間隔；200nT）

（中）左図の拡大（コンター間隔；100nT）

（右）徒歩による磁気観測結果から作成した等値線（コンター間隔；100nT）

赤線は徒歩測量ルートを示す。繰り返し観測点は図（中）との比較のために表示している。繰り返し観測点の観測値は使用していないため、例えば No44,45 周辺では、図（中）と対応していない。

○草津白根山（白根山（湯釜周辺））

昨年度までの全磁力観測結果では、湯釜南東側で全磁力の顕著な減少傾向が認められたが他の観測点では目立った変化は見られなかった。水釜北 R、湯釜南東 Q、湯釜南新 P 点の最近の連続観測結果を図７に示す。そこで今年度は、水釜付近に想定される熱消磁源以外の全磁力変化の要因を探るために湯釜南東から湯釜南にかけて徒歩により全磁力磁気測量を実施した。この磁気測量の結果は下記の通り。

・湯釜南東側の Q 点付近では東西方向にライン状の強い磁気が見つかったが、湯釜南側の新 P 点付近は特に強い磁気源は無さそうであった（図８）。

センサー高度が 235 cmよりも 185 cmのほうが強い測量値を示す結果が得られたことから、Q 点付近の磁気源は浅い場所にあることが示唆された。一方、地磁気永年変化は直近 10 年間の変化が大きい（図９）。この見つかった強い磁気が原因である現地の DI 異常のため、湯釜南東側で見られる全磁力の減少傾向には永年変化に起因する見掛けの変化が含まれる可能性があることがわかった。

また、湯釜南東 Q 点は、R、新 P 点より融雪期に目立つ全磁力の減少を示す。図 10 に示す最近の草津の降雪は 3 月か 4 月に終わるが、Q 点の全磁力減少のタイミングが降雪の季節の終了月に対応している

ように見えることから、この季節変化の原因について次のように考察する。雪はアルベドが高く降雪により冬季は地表面と大気の間の熱収支が小さいため地表面の温度変化は小さい。連続観測点の年周変化が特定しにくいのは、草津白根山が主として磁化の弱い安山岩質ということのほかに、雪のため冬季の温度変化が小さい理由もあるのかもしれない。降雪の季節の終了とともに地表面が露出し温度変化が大きくなると、地表面付近にある磁性物の磁化変化は大きくなる。降雪の季節の終了と全磁力減少のタイミングがよく対応しているのは、地中ではなく地表面付近の磁性物が温度変化しているからではないか？ 湯釜南東における全磁力磁気測量で確認された異常な磁気を示す磁気源がごく浅い場所にあって地表面の季節的な温度上昇にともない Q 点の全磁力の減少に関与したのではないか？ 新 P 点では地表面に磁気異常がないため季節的な全磁力減少が見られないのかもしれない。

今年度の草津白根山における全磁力観測結果全般については 2022 年 CA 研究会論文集にて報告した。今後は、現地で D と I を測定し DI 異常の有無を確認するとともに、R 点付近の磁気測量を実施する。

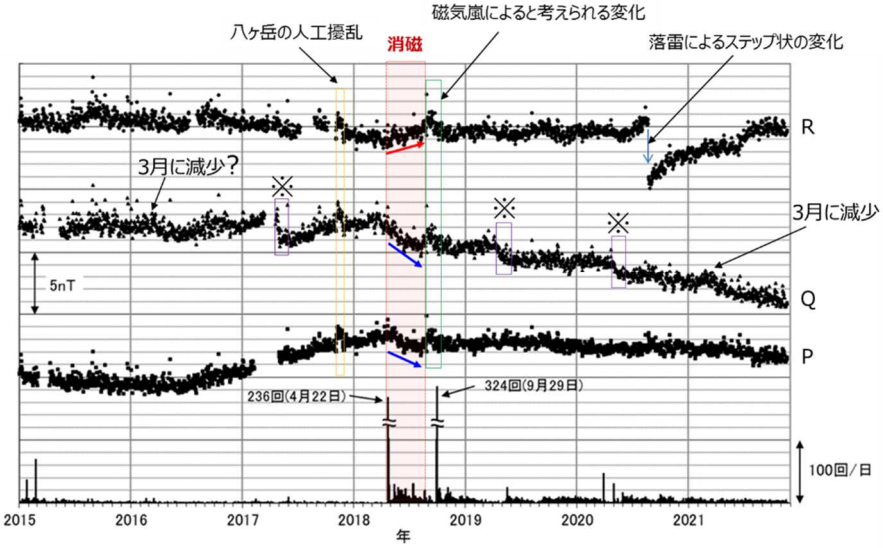


図７　全磁力連続観測結果（2015 年 1 月～2021 年 11 月 20 日）（※：4 月の全磁力減少）

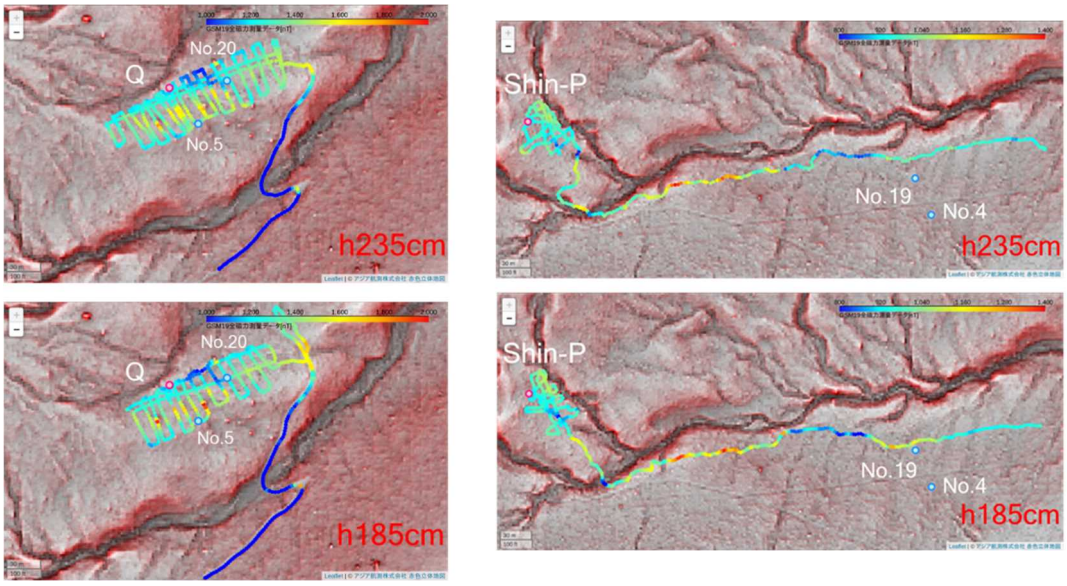


図８　湯釜南東側における徒歩による全磁力観測の空間分布図（2021 年 10 月 8 日）
（左）湯釜南東側、（右）湯釜南側、センサー高度は 235cm と 185cm でそれぞれ測量.

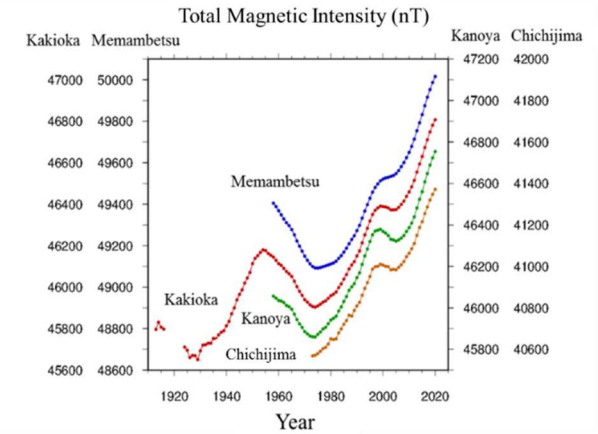
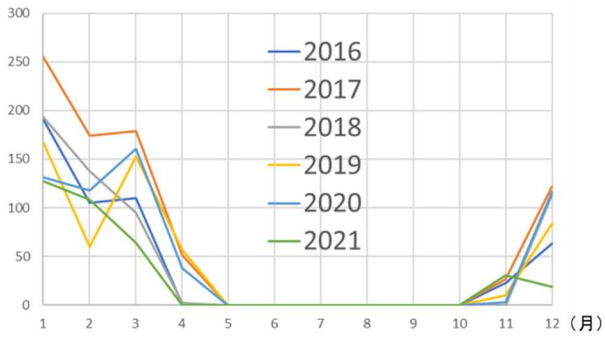


図９　地磁気全磁力の年平均値
（女満別，柿岡，鹿屋，父島）



第 10 図　草津の降雪の月合計（ｃｍ）
期間：2016 － 2021

〇伊豆大島

概要

三原山は過去４回の中規模噴火を 37 年±１年の周期で繰り返しており、次回噴火が非常に差し迫っている可能性は低くない（2023 年）。しかし、1986 年にＡ火口より始まったストロンボリ式マグマ噴火の前兆と見られる地磁気変化（渡辺 1998）は現在（2022 年３月）に至るまで検知されていない。そこで本年度も、来る時に備え、引き続き観測体制の強化とデータ解析手法の改良を行った。表１に年度当初の実施計画と達成状況をまとめる。

表１　令和３年度の実施計画事項と年度末までの達成状況

実施計画	達成状況
定期出張（連続観測点保守・繰返し観測）	完了
東大震研の依頼出張（OSM 絶対観測）	完了
年周変化補正法の検討	完了
論文執筆・出版（偏角伏角測定による長期ＤＩ補正）	未実施

以下、達成した３項目について報告する。

連続観測点 MIK（三原山北）の保守と環境調査、及び繰返し観測（６月）

ここでは要点のみを抜粋する。

- 伊豆大島火山連絡事務所による協力を得た。官用車を用いたことで作業の大幅な効率化を実現した。
- MIK の現地保守点検において、異常は全く無く、状態が良好であることを確認した。（それまで磁力計収納箱の水没による観測障害を繰返していた）MIK の頑強化のため、設計を刷新し、R02.09 から運用開始して経過観察をしていたところ。

- MIK2 のノイズ多発に対しセンサーケーブルの水没を疑い、これを交換した。効果が無いためセンサー自体に原因があることが考えられたが、その後 11 月にノイズが大幅に消滅した（原因不明）。
- MIK2 プロトンセンサー近傍の偏角伏角測定を実施したところ、それらに傾度があったものの、DI 補正に求められる精度では影響しないことが確認された
- A 火口の南側カルデラ内にある繰返し観測地点 1 が昨年度消失していたが再発見された。噴火の前兆がもっとも強く現れる点と期待されているため有意な成果である。
- 次年度の対応プラン案：TBT の磁気的環境調査（定常的にノイズレベルが高い原因として敷地奥に見つかった貯水槽の影響が疑われる）

東京大学伊豆大島地磁気観測所（ＯＳＭ）における絶対観測（11 月）

ここでは要点のみを記す。

- （予定していたジェット船の結構もあり）計画より１日短い１泊２日の作業となったが、予定通りの回数の絶対観測と、１回の真方位観測を実施した。昨年は実施していた偏角伏角測定は依頼側の判断で割愛された。
- 修理を経て再設置されたフラックスゲート磁力計 MB162 に対し基線値を算出して確定するとともに絶対値の経年変化が全球モデルと調和的であることを確認した（別添資料２の図８）。
- 引き続き絶対室内の基準点とプロトンセンサーの間の全磁力地点差に経年トレンド（ここ数年では約 0.7nT/年）があることが確認された（別添資料２の表７）。OSM 構内の局所的な磁気環境の経年変化の可能性もあり、OSM 全磁力データを基準として使用することについて慎重に検討する必要性が示唆された。
- 次年度の対応プラン案：2018 年に実施されていた OSM 構内での徒歩による磁気測量の再実施。

連続観測点 MIK（三原山北）の年周変化補正法の検討

これまでの観測から MIK では振幅が 20nT に及ぶ年周変化が観測されている。これは、基本的には地温の年周変化を反映するが、単純なる正弦波的な様相でもなく、特に近年では MIK1 で夏期に二峰性の変化を見せている（これまでも降雨との相関性が議論されている（田口ほか 2012）が、その原因は定かではない）。火山性のトレンドを抽出するためには年周成分の除去が求められるが 2007 年～2012 年の区間では欠測が至る所にあり（図 11）、疎らなデータから年周成分の推定する適切な方法を検討する必要があった。

今年度は上記の課題に対し、基底周期を 365.25 日としたフーリエ級数による年周成分の表現法を導入し、適切な年周変化モデルを最小二乗推定する調査を行った。モデルに含める高調波の数については赤池情報量基準（AIC）およびベイズ情報量基準（BIC）を参照することで、基底の５倍の周波数まで含めるのが妥当と判断し、年周変化成分を推定およびこれを用いた補正を行った（図 12）。欠測が多いデータにも年周変化補正が実施できている。

令和元年度の施設等機関研究発表会で報告された MIK に対する長期 DI 補正の結果では、年周変化の補正がうまく適用されていなかった。の年周変化補正と長期 DI 補正を施した結果を以て、次年度は学会誌に成果報告を論文として投稿する予定である。

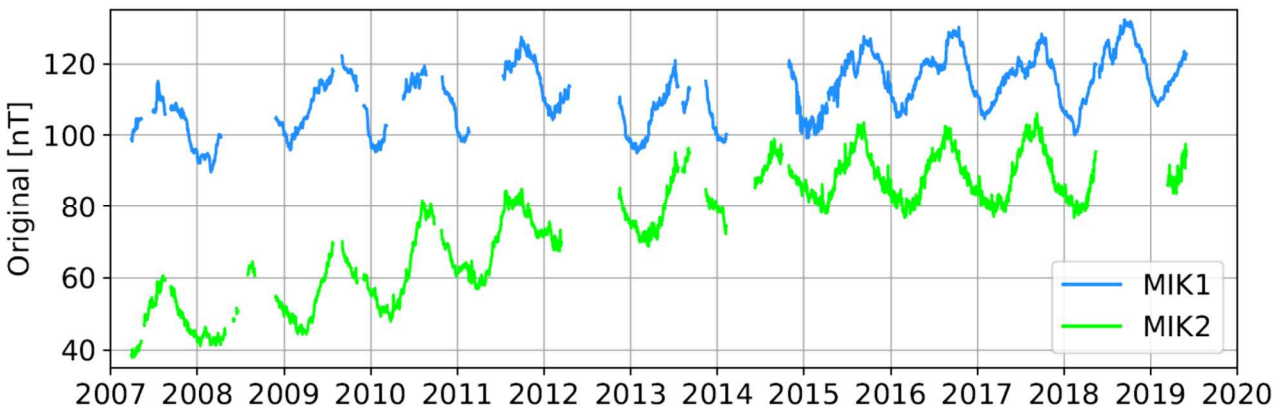


図 11　三原山北連続観測点（MIK）の不規則な年周変化。

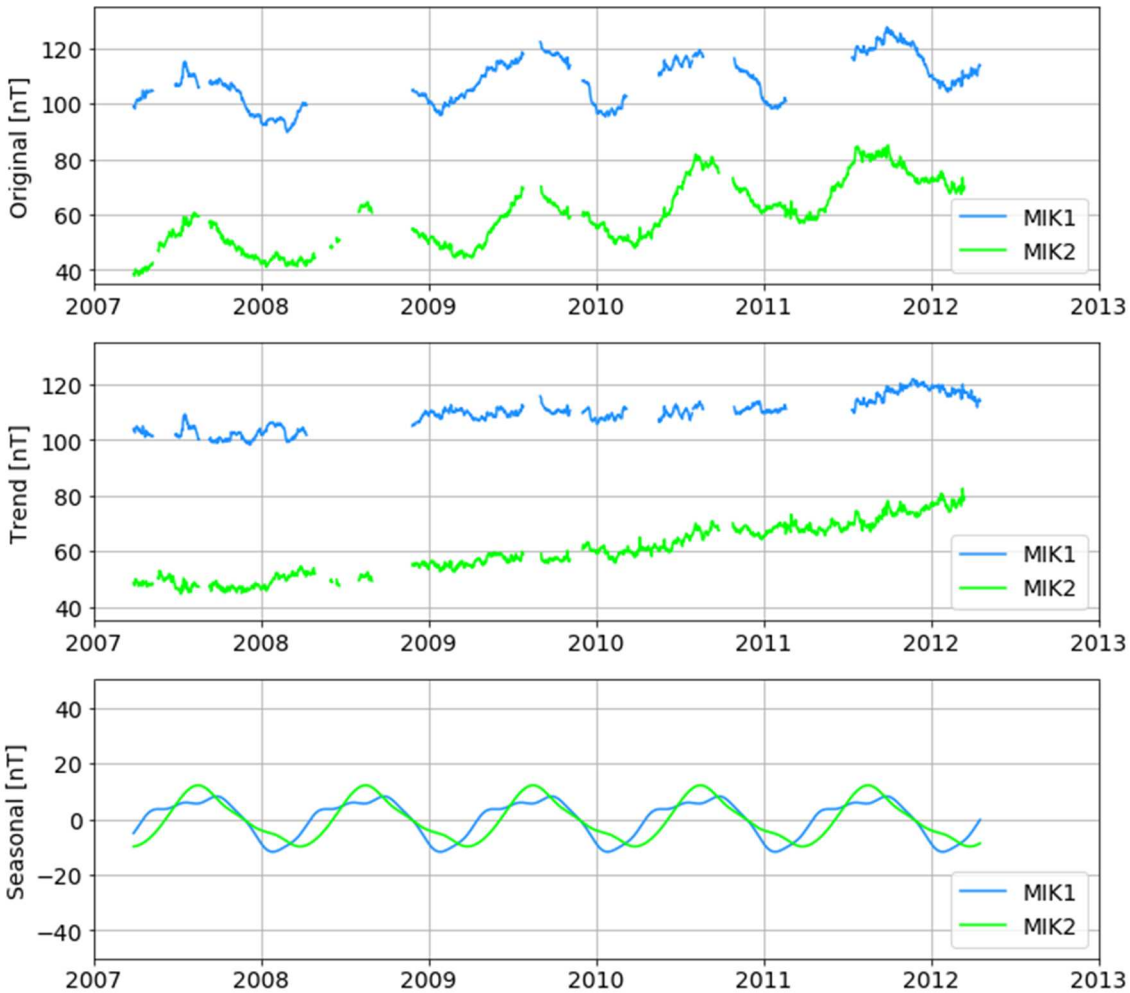


図 12　三原山北連続観測点（MIK）の 2007-2012 期間に対する年周変化補正。
（上段)生データ、（中段）年周変化補正を施して抽出されたトレンド、
（下段）フーリエ級数を用いて推定された年周変化成分。

２．ノイズ低減のためのデータ解析技術開発

気象庁では、活動的火山の状態変化の把握に寄与する物理観測の一つとして地磁気も期待されている。火山地磁気データの解析技術開発を担う地磁気観測所では、信頼度の高い活動評価に資するため、本年度は以下にまとめる２件の調査を進めた。

簡易伏角偏角測定の DI 補正に対する有効性の実証

全磁力は理論的には足し算や引き算の重ね合わせができない物理量である。しかし、山頂観測点と山麓参照点でそれぞれ観測を行い、その差から微小な火山性の地磁気変化を抽出する方法がこれまで一般的に採用されている。このため DI 効果と呼ばれる見掛けの変化が差分に現れることがあり、これを火山性のシグナルと誤認しないよう適切に見積もって補正する必要がある。DI 効果を見積もる方法として、これまで大きく分けて２つの方式により行われてきた。一つは実際に２地点の偏角と伏角を測定する方法であり、もう一つは地点差データと背景磁場変化から DI 効果成分を統計的に推定する方法である。両者はこれまで別々の事例に適用されてきており、直接比較されたことが無かった。

そこで柿岡の構内で人工擾乱監視のため常時運用されているオーバーハウザ―磁力計 J12 と J22（両点間の距離は約 120m）の観測記録を利用し、実際の全磁力地点差と各方式により算出さらえる DI 効果を比較することにした。５月に J12 と J22 のセンサー近傍にて簡易偏角伏角計を用いた測定を実施したところ、両点において偏角と伏角それぞれ約 0.5°の違いがあることがわかった（J12：偏角-8.59°伏角 49.76°，J12：偏角-7.98°伏角 50.22°）。J12 と J22 にて観測された全磁力地点差と、偏角伏角測定から／統計的推定から算出された DI 効果をプロットしたものを図 13 に示す。いずれも互いに良く一致していることがわかる。この試験の結果からは次に挙げる示唆が得られた。

- 柿岡構内の全磁力地点差は主として DI 効果による
- 毎時値データにも DI 補正を適用できる
- 簡易偏角伏角計による 5 秒角刻みの測定は振幅 0.5nT の DI 効果を特定するのにも十分である
- 但し、偏角のみ、あるいは伏角のみの測定結果からは、観測された全磁力差に一致する DI 効果を再現することができなかった。
- 柿岡の構内について高精度の３成分変化データが入手できる理想的な環境であり、火山のようなフィールドでは DI 効果の算出や補正の精度が落ちるかもしれない

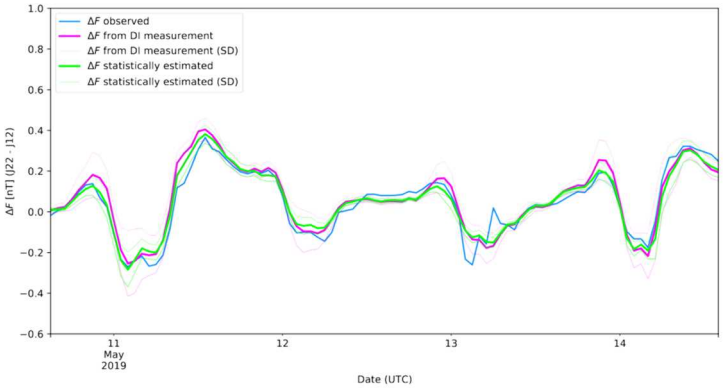


図 13　J12 と J22 の全磁力地点差（水色）、偏角伏角測定から算出された DI 効果（マゼンタ）、統計的に推定された DI 効果（緑）。

この検証試験により、DI 効果の理論、偏角伏角測定による DI 補正、統計的推定による DI 補正、の全てが実際に整合することが初めて確認された。これは DI 補正の正当性を担保するものであり、非常に重要な成果である。火山においては、統計的推定の方が不確定性が大きいことから、可能ならば偏角伏角測定による DI 補正が第一に望まれ、環境条件により測定が出来ないときは統計的推定による DI 補正を行うのが良いだろう。次年度以降は、もっと容易に使える簡易偏角伏角計を設計し、火山センターの機動観測においても使えるよう複数台は生産したいところである。

なお本調査の報告は論文として 2022 年 CA 論文集にも投稿されているので、詳細はこちらを参照されたい。

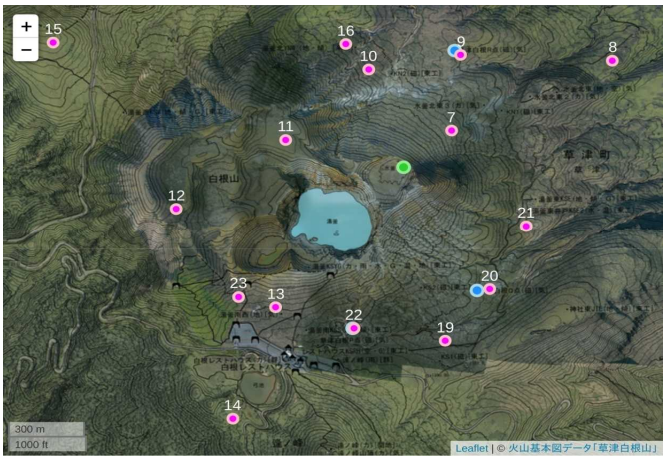
学会講演 浅利晴紀・増子徳道 「DI 補正法の実践的な適用についての考察」 2021 年度 Conductivity Anomaly 研究会

論文発表 浅利晴紀・増子徳道 「DI 補正法の実践的な適用についての考察」 2021 年度 Conductivity Anomaly 研究会論文集

全磁力繰返し観測から逆推定される磁気双極子の誤差評価

全磁力の繰返し観測は、火山体内の比較的浅部（より深部に閉じ込められた熱水貯留域から火口へ伸びる熱の供給路など）の熱状態を把握し、これを活動評価に役立てるため地磁気観測所や各火山センターで実施されている。得られた全磁力変化量データから（熱の供給を示す）消磁あるいは（冷却を示す）帯磁を検知するため、その簡易的なモデルとして山体内の１点における磁気双極子モーメントの強度と変位（計４パラメータ）が推定される。この非線形な逆問題に解を与えるツールとして、近年ではグリッドサーチにもとづく MAGCAP-V が採用されることが多い。MAGCAP-V は、誤差を考慮しない全磁力変化量データを入力として、モデルの４パラメータについて１つの最適解を出力する。しかし、モデル誤差の推定が伴わないため、出力された最適解がどの方向にどの程度の決定精度を持つか、ということについて示唆を与えない。

本調査では、標準偏差を予め与えたガウス分布により仮定した全磁力変化量データの誤差が、どのようにモーメントのモデル誤差に及ぶか調べ、観測点配置の改善や、MAGCAP-V のアルゴリズム改良に資することを目指す。ここでは、地磁気観測所で長い実績のある草津白根山の全磁力繰返し観測事例を題材として調査結果を報告する。草津白根山の全磁力繰返し観測点分布と、湯釜下の構造と、これまでのモーメント推定位置を示すモデルを図 14 に示す。過去の全磁力変化からは（震源域とも重なる）水釜下 600m前後の領域に、モーメントの変化が推定されていたことがわかる。そこで水釜（図 14 右の緑○）直下の異なる深さにモーメント強度が 1.0e6 Am となる解が得られたとして、その変位のモデル誤差分布を全磁力変化量データの観測誤差から計算することにする。



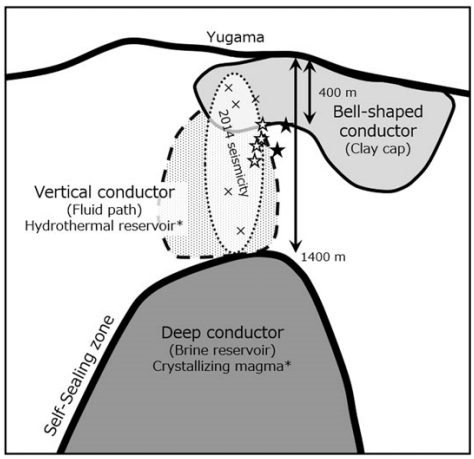


図 14　（左）草津白根山の全磁力繰返し観測点分布（赤○）。（右）湯釜下の構造モデルと Takahashi&Fujii 2014 によるモーメント推定位置（☆★）（Yaguchi et al. 2021 より）。

ここでは、各観測点の全磁力変化量データの観測誤差を互いに無相関とし、各点では標準偏差 1nT のガウス分布により仮定する。問題の非線形性が強くなければ、最尤解として得られるモデルの誤差はガウス分布により近似され、線形問題と同様にデータ誤差から伝播される共分散行列により表現できる（松浦 1990）。変位パラメータの分散共分散は対象行列なので、標準偏差（固有値の平方根）が最大・最小になる軸の方向（対応する固有ベクトルの方向）がわかる。

表 1 に深さを変えて推定された変位の誤差を示す。深さ 600m 程となる標高 1400m では標準偏差が東西方向に大きく（841m）南北方向に小さい（477m）。いずれにしろ水釜からは大きく逸脱するスケールであるが、これはシグナルの非常に小さいはずの遠方の観測点で観測誤差の範囲内であってもノイズが混入した場合に推定されるモーメントの変位に大きく影響を及ぼすということである。

表 1　水釜下の異なる標高に推定されるモーメント変位の標準偏差

高度	最大σ	中間σ	最小σ	最大σ方向	最小σ方向
2000	219.51	159.21	22.07	鉛直	NE-SW
1900	274.19	124.31	15.63	NW-SE	NE-SW
1800	326.68	154.98	36.64	E-W	鉛直
1700	356.91	216.77	93.62	E-W	鉛直
1600	433.27	313.69	176.24	E-W	N-S
1500	576.92	453.30	298.23	E-W	N-S
1400	840.89	650.34	477.31	E-W	N-S

各観測点のモデル決定に対する寄与を確認するため、データセットから 1 点ずつを除いた上でモーメント変位の誤差を求めた（表 2）。水釜から最も近い 7 番を欠くと推定誤差が増大する。同じ距離でも水釜からの方位によっても観測点の寄与は異なり、たとえば新 P 点近傍の 22 番は比較的寄与が大きく、一方、Q 点近傍の 20 番および R 点近傍の 9 番の寄与はそれ程でもない。水釜から比較的近い 11

番も除外されたとしても影響は小さいことがわかる。仮に R 点が 10 番のあたりに、Q 点が 21 番のあたりにあったら水釜下の状態変化の推定においてより都合が良かったであろう。

表２　データセットから各観測点を除いて推定されるモーメント変位の標準偏差
（モーメント標高は 1400m）

	高度	最大σ	中間σ	最小σ	最大σ方向	最小σ方向
7 番抜き	1400	1124.80	785.41	641.97	N-S	鉛直
10 番抜き	1400	1053.37	702.83	483.46	鉛直	N-S
21 番抜き	1400	1027.01	701.34	477.39	E-W	N-S
22 番抜き	1400	963.65	680.41	492.96	E-W	N-S
16 番抜き	1400	936.30	672.34	477.32	鉛直	N-S
13 番抜き	1400	908.41	667.50	477.57	E-W	N-S
9 番抜き	1400	885.96	742.83	478.88	鉛直	N-S
20 番抜き	1400	879.37	660.24	519.50	E-W	N-S
23 番抜き	1400	866.22	659.98	477.46	E-W	N-S
11 番抜き	1400	843.80	658.03	490.57	E-W	N-S
12 番抜き	1400	841.32	651.54	478.36	E-W	N-S
19 番抜き	1400	840.91	660.81	503.81	E-W	N-S

草津白根山では観測点が湯釜の周囲を取り囲むように観測点が配置されているが、水釜の周囲に多く集まっているわけではない。白根山腹に設置された東工大連続点の方が、より良い地点に置かれていると言える。樽前山についてはグリッドサーチによるモデル残差の分布からモーメント変位の推定精度が本調査の結果よりも 1 桁高いことが報告されている（三嶋・高橋 2020）。これはモーメント位置の近傍に多くの観測点が集中するためである。草津白根山では、地理的な条件を考慮したとしても、水釜に近い地域（7 番と 10 番の間や 7 番と 21 番の間）に観測点が欲しいところである。

MAGCAP-V のアルゴリズムについても改良の余地はあると考えられる。4 パラメータについては先情報とモデルの誤差分布があることから、新しく得られたデータと観測誤差を用いてこれらを更新するというベイズ推定を導入すると良いだろう。このとき、より遠方の観測点の観測誤差を大きく与えることで、その寄与を低減させておくと良いかもしれない。

［成果の発表］：

学会等での発表

浅利晴紀・増子徳道　「DI 補正法の実践的な適用についての考察」 2021 年度 Conductivity Anomaly 研究会.

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

論文・報告書など

浅利晴紀・増子徳道 「DI 補正法の実践的な適用についての考察」 2021 年度 Conductivity Anomaly 研究会論文集.

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

[調査研究の種別]：重点課題

[課題名]：次期標準磁気儀設計に向けた予備調査（令和 3～5 年度）

[担当者]： ○山際 龍太郎、谷口秀隆、仰木淳平、西田重晴（観測課）
海東恵美、浅利晴紀、神谷亜希子（技術課）

[概要]：

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

[具体的な計画と達成目標]：

次期標準磁気儀に求められる精度を調査する。当所が保有している FT 型磁気儀のオーバーホールをドイツの専門職人に依頼するとともに、海外での磁気儀開発の状況調査を行う。過去の調査研究課題の内容のまとめを行い、これまでの試作機開発の問題点を洗い出す。あわせて次期標準磁気儀の素案について検討する。

[年次計画]：

令和 3 年度：１．過去に実施した磁気儀の改良に係る調査研究成果の総括

① これまでの調査研究で明らかになった、次期標準磁気儀製作に向けた課題の取りまとめ

② 製作業者から自動 DI 測定装置の製作の困難さの聞き取り調査及び分析

③ ベルギーの AutoDIF についての問題点の整理

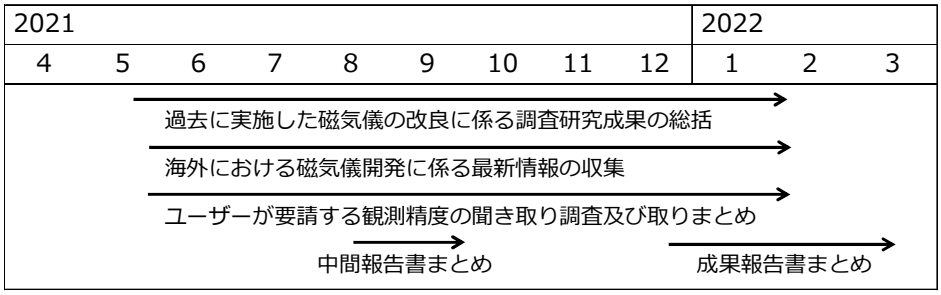
２．海外における磁気儀開発に係る最新情報の収集

３．ユーザー（大学、研究機関、民間会社等）が要請する観測精度の聞取り調査及び取りまとめ

令和 4～5 年度：１．令和 3 年度の成果に基づき、次期標準磁気儀に求められる性能の検討

２．次期標準磁気儀の仕様作成に向けた具体的要件の取りまとめ

[工程表]：



[共同他機関名]：

ドイツ地球科学研究センター(GFZ)・ニーメック観測所（NGK）

パリ地球物理研究所(IPGP)・シャンボンラフォレ観測所（CLF）

東京大学地震研究所

令和３年度の成果として、以下の２点を報告する。

［令和３年度の成果：その１］

１．ドイツ専門業者への FT 型磁気儀のオーバーホール発注

〇FT 型磁気儀について

１軸フラックスゲート磁力計を搭載した非磁性経緯儀（当所では「FT 型磁気儀」と称するが「DI-meter」或いは「DI-flux」とも呼ばれる）は、1980 年代後半に登場して以来、従前のサーチコイル型磁気儀に取って代わり現在に至るまで地磁気絶対観測を行うためのスタンダードな測器として世界中で使われている。特に世界の主要地磁気観測所においては、例外なく Carl-Zeiss 社（旧東ドイツ・イエナ）による経緯儀 THEO 010B（1″読み）と THEO 020B（6″読み）が使用されている。同社の測量機器生産技術（特に経緯儀の非磁性と観測精度の担保）に相当する技術を有する業者が 30 年以上現れていないのは、限られた需要に対し新規に開発コストを投じるメリットの乏しさによると考えられる。Carl-Zeiss 社では THEO の生産は既に終了されており、各ユーザーが独自に保守を施しながら使用を続けているのが世界的な現状である。

〇FT 型磁気儀のオーバーホールに関する課題

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

〇ドイツの専門職人へのオーバーホール発注

当時の Carl-Zeiss 社にて THEO に携わった職人のうち１名が今も現役であり、新興の測量機器メーカーWenger-Wiethüchter 社（ドイツ・イエナ）に籍を移して EU 圏内からの

THEO のオーバーホールを受注している。そこで、KAK No.3 の完全な整備を期し、本調査では同職人に対し初めて EU 圏外からオーバーホールを発注するためのルート開拓を目指した。当所と Wenger 社の間には、国内受注業者とドイツ地球科学研究センター（GFZ）附属の二―メック地磁気観測所を仲介としてオーバーホールの発注・輸送・精算が行われた（図１）。以下では、開拓した国際輸送経路と、Wenger 社によるオーバーホールの内容について報告する。

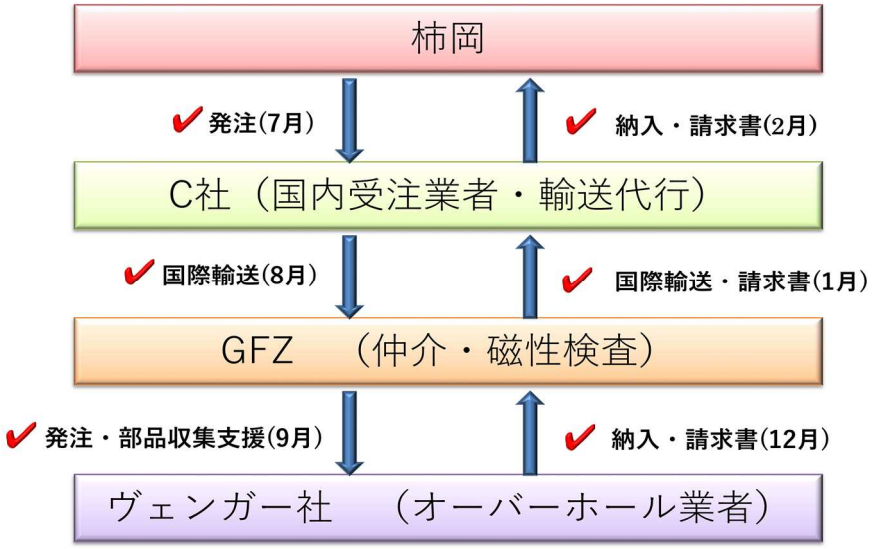


図１　オーバーホール発注の流れ。

〇国際輸送について

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

〇Wenger 社によるオーバーホールの内容

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

表１　Wenger 社による特記されたオーバーホール実施項目。

自動補償機構の調整
自動補償機構の部品の修理
自動補償機構のダンパーの調整
視軸高度ずれの解消
視軸水平ずれの解消
垂直回転軸の調整と注油
マイクロメータの修理と調整
水平回転軸の調整
光学求心装置の調整
V + Hz 微動機構の修理
V + Hz クランプの修理
水平目盛盤回転粗微動ノブの修理
整準台の修理
全体調整

〇今後の展望

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

［令和３年度の成果：その２］

１．観測誤差を考慮した基線値の検討

〇地磁気連続成分データの基線値について

フラックスゲート磁力計のような地磁気ベクトル 3 成分の連続変化観測では、測定の絶対値は保証されない。各成分の絶対値は、手動による絶対観測が実施された時刻にのみ得られる。連続成分データを絶対化するには、絶対観測から算出される「観測基線値」を用いて任意の時刻の基線値を「推定」する必要がある。言い換えれば、絶対化された連続成分データは、純粋な測定に基づくものではなく、「観測基線値」から導出される基線値の時間変化モデルに依存する。「採用基線値」と呼ばれるこのモデルの推定には、標準となる方法が定められておらず、データ生産者のポリシーに従って観測所ごとに異なる。当所の採用基線値は、観測基線値の線形補間により得ている（図２）。これは、観測基線値の誤差がゼロであると前提としていることに他ならない。実際に柿岡では、現標準磁気儀 DI-72 に

よる絶対観測の精度自体が高いほか、１回の観測が２名によりそれぞれ行われることで測定数も多く、観測基線値が比較的精度よく決定されている（分散が小さい）と考えられる（絶対観測で 0.03’を超える観測誤差が疑われる場合は再観測としている）。

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

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

○曲線による基線値の導入

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

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

一方、D 成分では、毎分値の異常基準とする 0.03’を超える箇所が複数見られる。残差のバラつきが、絶対観測に伴うランダムな偶然誤差によるものであるならば、曲線による回帰モデルを採用する判断も妥当であろう。一方、一見して偶然誤差に見えるバラつきが、

磁力計の環境変化に伴う有意な基線値変動であるならば、曲線による滑らかな基線値の表現は単純化しすぎである。現在のところ観測誤差に関する定量的な事前情報が十分収集できていないため、この点の判断に示唆を与えることはできない。D成分の最適な基線値については、絶対観測の誤差や、連続観測の誤差の性質について事前の情報を収集する必要がある。最終的には、これらを総合して採用基線値のモデル誤差を算出し（Lesur et al. 2018)、その妥当性について評価を与えられることが望まれる。

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

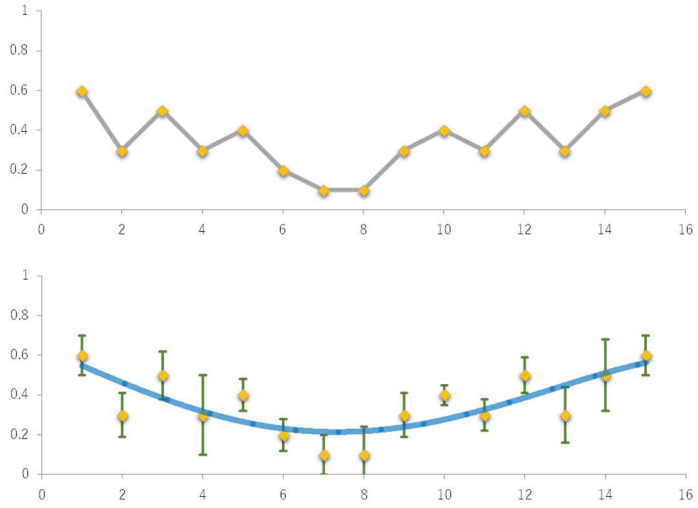


図２　観測基線値（黄点）と採用基線値（線）の概念図。現行の線形内挿（上）と観測基線値の誤差を考慮した曲線回帰（下)。

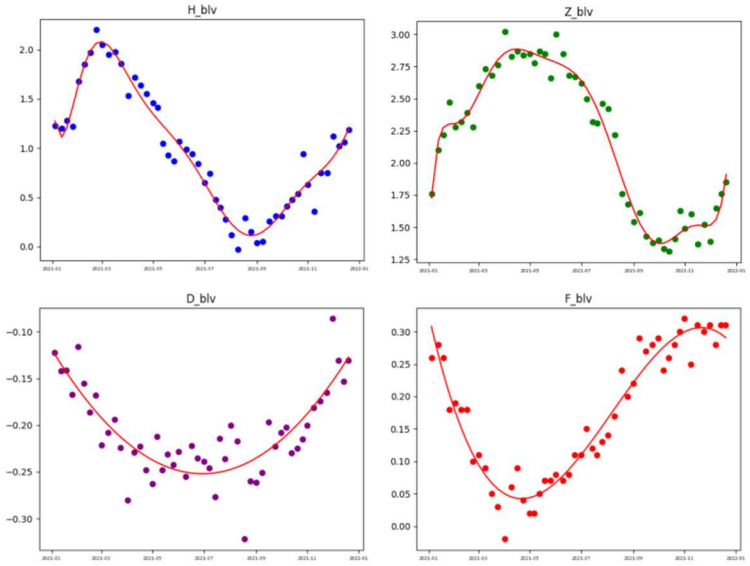


図３　2021 年の柿岡における観測基線値および多項式による基線値の回帰モデル。

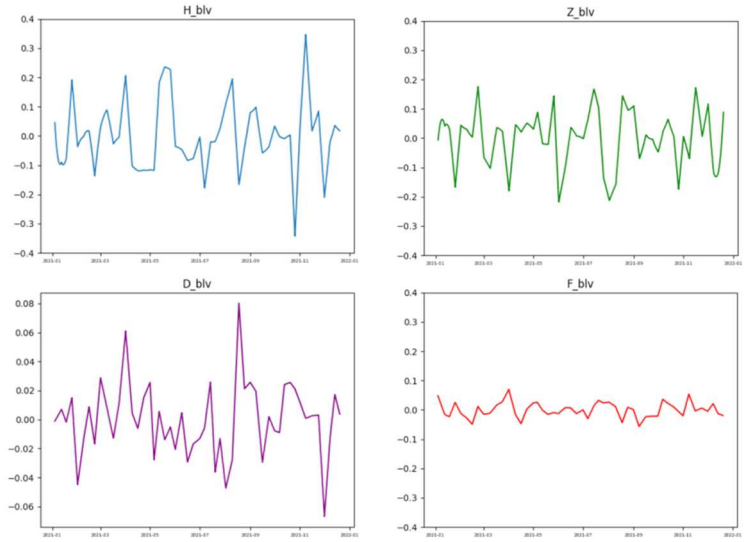


図４　2021 年の柿岡における採用基線値と図２の基線値の回帰モデルとの残差。
偏差二乗平均（RMSE）は、0.12nT（H 成分）、0.10nT（Z 成分）、
0.025’（D 成分）、0.03nT（F 成分）。

[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 3～5 年度）

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

[概要]：

オーロラ帯直下であり、また観測点密度の非常に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貢献につながる。

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

昭和基地は 1960 年に地磁気観測を開始し、観測点の少ない南極域において長期的に観測を継続している貴重な観測点である。観測項目は、ひと月に 1 度手動で地磁気の向きと大きさを測定する地磁気絶対観測と地磁気 3 成分の変化を 24 時間 365 日連続で自動測定する地磁気変化観測である。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二つの側面でメリットがある。科学的なメリットは、他の地磁気観測点や他の観測項目との比較が容易になることである。特に近年、人工衛星観測と地上観測をあわせて解析し、地磁気の全球モデルの開発等の研究が行われているが、観測点密度の低い南極域において、昭和基地のデータが利用できるようになる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、計画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を得るため、地磁気活動が静穏な状態の日時を選んで絶対観測を行っているが、観測に適した状況か直前まで分からず、また、観測中に活動が活発になることがあり、絶対観測を計画的に行うことができない。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計画的に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かめる。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 度のゼロ磁場方式と並行してひと月 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、静穏な状態から計算した月の代表値と従来の方法での月の代表値を比較し、新しい方法を採用できるか評価する。

[具体的な計画と達成目標]：

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

・基線値の安定性の確保（絶対観測の頻度、センサ・制御部の温度管理）

・人工擾乱の把握

JARE62（昭和基地滞在：2020 年 12 月～2022 年 2 月）で当所から越冬隊員を派遣するため、昭和基地の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。国内では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に記載した。

[年次計画]（下線は主に昭和基地派遣職員の現地での実施項目）

令和 2 年度の成果：(2020 年 12 月 JARE62 南極到着)

<u>１．高頻度の絶対観測（弱磁場方式）の開始</u>

<u>２．真方位観測の準備</u>

３．フラックスゲート磁力計センサ庫の温度変化の抑制工事

令和 3 年度：(2022 年 2 月 JARE62 南極出発予定)

<u>１．高頻度の絶対観測（弱磁場方式）</u>

<u>２．全磁力繰り返し観測を用いた各車両の磁気モーメントの算出</u>

３．毎秒値の絶対値化の試行

４．絶対観測の頻度が基線値に与える影響の調査

５．従来の年平均値と毎秒絶対値から計算した年平均値の比較

<u>６．全磁力連続観測装置設置場所の候補地選定</u>

７．新旧の絶対観測手法における絶対値較正の比較による、較正精度の確認

８．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

令和 4～5 年度：

１．高頻度の絶対観測（弱磁場方式）及び毎秒絶対値作成のルーチン化

２．3 年間の調査について南極資料へ投稿

[共同他機関名]：

国立極地研究所　(門倉 昭 教授)

[本年度の成果]：

１．フラックスゲート磁力計 MB162 障害対応

2020 年 2 月の除雪作業中にセンサケーブルを損傷した。応急処置を行ったが、時折 H 成分と Z 成分の測定値が振り切れるようになった。障害切り分けを行い、補償磁場の異常が疑われたため、2020 年 12 月から補償磁場を切り、測定レンジを最大（±50,000nT）にし

て測定を継続した。最大レンジでの観測中は、H 成分と Z 成分に数十 nT のギャップが頻繁に混入した。

障害復旧のため、今年度に新しいセンサケーブル（400m）を調達し、第 2 絶対観測室で動作試験を行った後、昭和基地に搬入・敷設した（図 1）。2022 年 1 月 24 日に新ケーブルに切り替え、センサの水平･軸調整と補償磁場の調整を行い、通常の測定レンジ（±2,500nT）での観測を再開した。以降、データを監視しているが、2022 年 3 月時点で異常は再発していない。

図 1　センサケーブル更新（左：第 2 絶対観測室での動作試験、右：昭和基地での敷設）

２．弱磁場方式の絶対観測の導入についての調査

従来の月 1 回のゼロ磁場方式での絶対観測に加え、月 4 回程度の弱磁場方式の絶対観測を実施し、並行観測のデータを通年で取得することができた。また、観測手法の違いを比較するため、ゼロ磁場方式の観測の直後に弱磁場方式の観測を合わせて行った。第 62 次越冬隊の観測期間（2021 年 2 月～2022 年 1 月）でゼロ磁場方式を 14 回、弱磁場方式を 44 回（平均 3.7 回/月）実施した（図 2）。

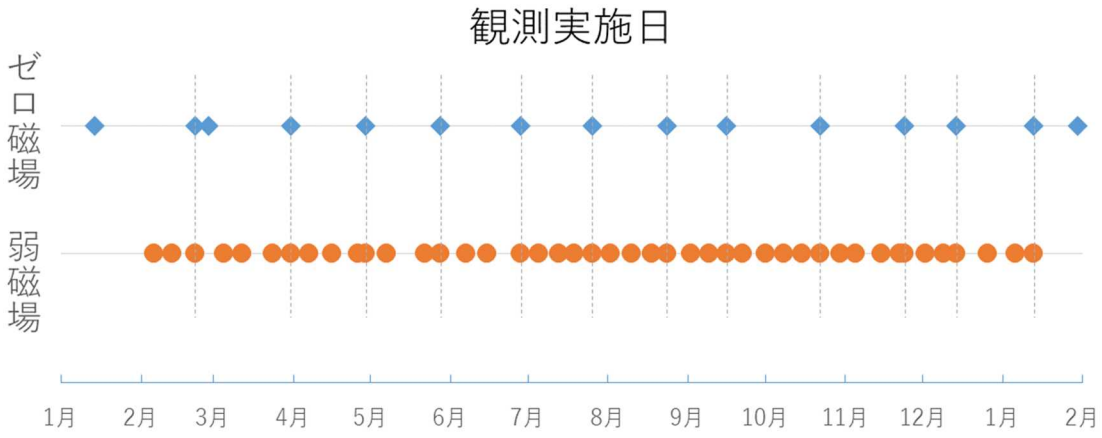


図 2　弱磁場方式とゼロ磁場方式の絶対観測日

各々の観測方式の D 成分の基線値をインターマグネットのデータ処理ソフトである xMagPy を使って計算した。ゼロ磁場方式では、それぞれの観測日について 10 姿勢観測の初めの 8 姿勢を使用し、2 セットの基線値を算出した。弱磁場方式は、基本的には 4 姿勢の観測を行ったので 1 セットの基線値を算出したが、月に 1 度は 8 姿勢の観測を行ったので、その観測日には 2 セットの基線値を算出した。基線値の計算は現在も作業中であるので、本報告では 2021 年 2 月から 10 月までの暫定的な計算結果を載せる（図 3）。2 セット観測した日のそれぞれの基線値の差は、ゼロ磁場方式、弱磁場方式ともおおむね 0.1′弱だった（弱磁場の方がやや差が大きかった）。ゼロ磁場方式と弱磁場方式の基線値を比べると、大きく外れた 5 月 28 日（図 3 の赤矢印）を除き、その差はおおむね 0.1′強であり、手法の差による明瞭な違いは見られなかった。

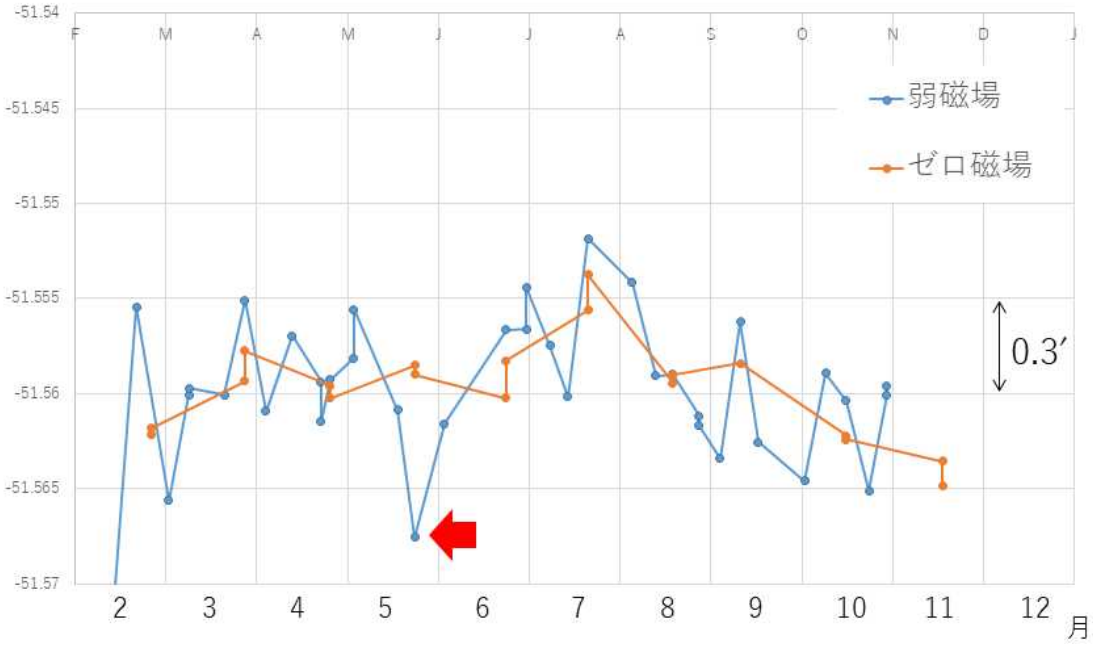


図 3　弱磁場方式とゼロ磁場方式の観測基線値の比較（D 成分）

3．絶対値化の試行

上述の xMagPy を使って連続的な基線値を算出し、毎秒値の絶対値化を行った。弱磁場方式の観測基線値をスプライン補間し、連続的な基線値を計算した（図 4）。D の基線値は安定しているが、H の基線値と Z の基線値はかなり外れたものがある。これは、「1．フラックスゲート磁力計 MB162 障害対応」で述べた、フラックスゲート磁力計の H および Z 成分に頻繁に生じるギャップの影響だと推測される。このギャップは絶対値化した毎秒値（図 5）でも、A-value の頻繁なギャップとして見られる。

今年度は、観測基線値の計算から観測基線値間の補間、連続絶対値の編集まで xMagPy で一貫してやってみた。絶対観測結果の良否判定や使い勝手の面で、一部、Excel などで自作した方がよい部分もあるので、来年度はそれらの開発を行う予定である。

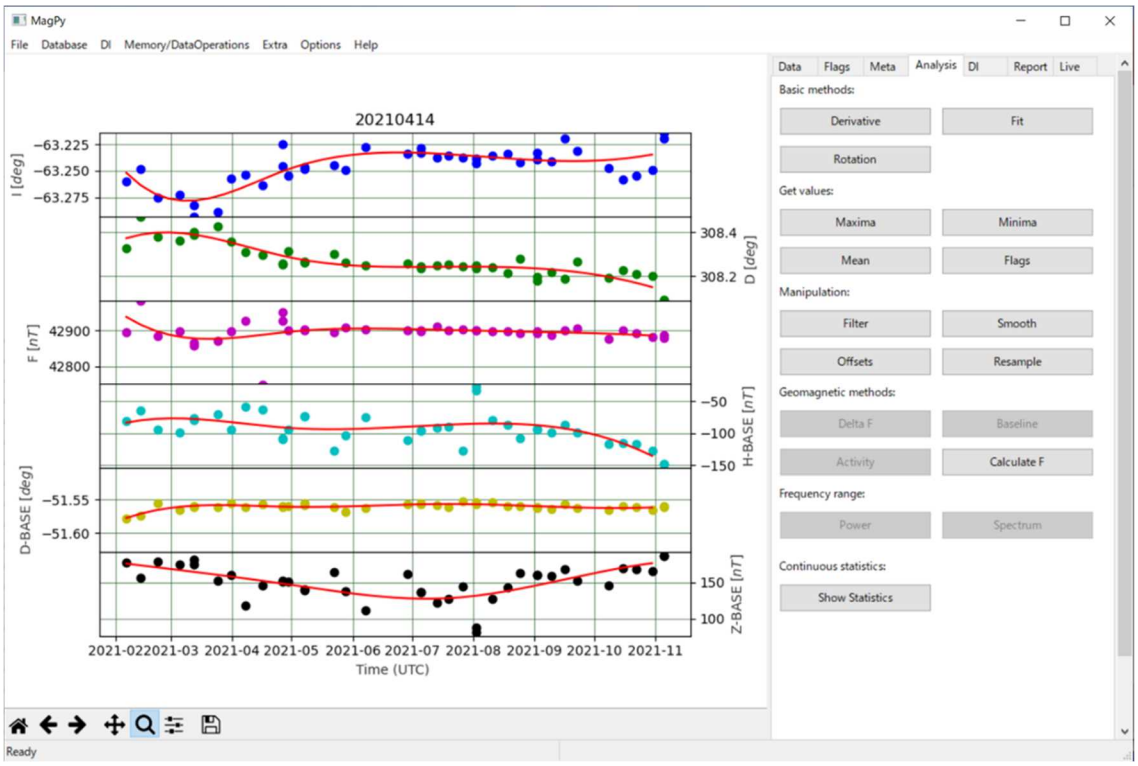


図 4　xMagPy を使った絶対観測値と観測基線値のスプライン補間（上から I、D、F、H 基線値、D 基線値、Z 基線値）

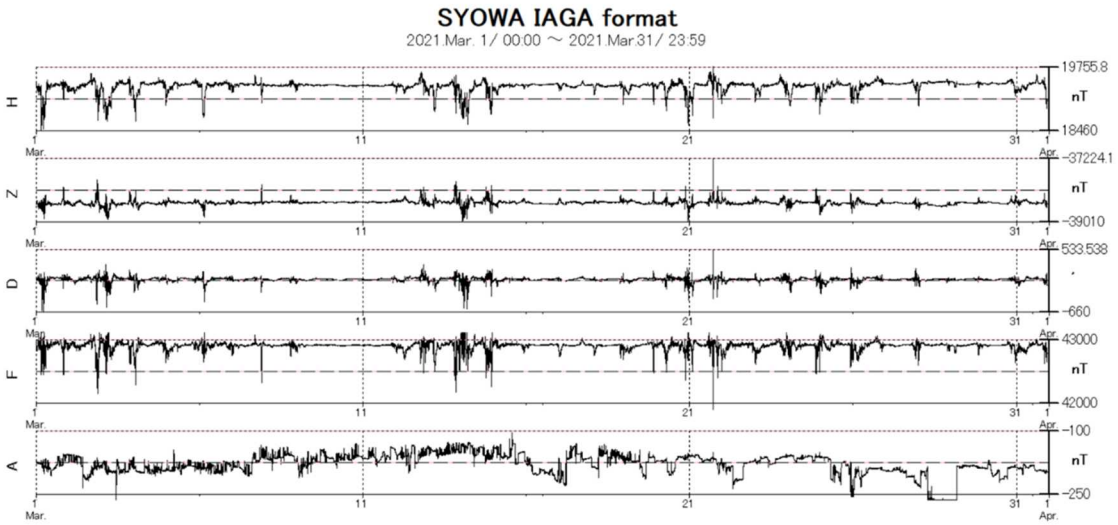


図 5　絶対値化した毎秒値（2021 年 3 月）

４．フラックスゲート磁力計センサ庫の断熱工事の効果の検証

フラックスゲート磁力計は温度変化の影響を受けるため、2017 年と 2021 年にセンサ庫の断熱工事を行った。2017 年 1 月には断熱材を 1 層設置し、2021 年 1 月には断熱材層と

保冷材層を追加した（図 6 左上）。2015 年 12 月（断熱工事前）、2017 年 12 月、2021 年 12 月の夏至付近の 11 日間のセンサ温度を見ると（図 6 左下）温度変化が大幅に小さくなったことが分かる。夏期 1 ヶ月（12 月 5 日～1 月 4 日）のセンサ温度の日変化振幅のヒストグラムでは（図 6 右）、工事前に比べて温度変化が約 1 割にまで小さくなったことが確認できた。今年度は夏期の日射による日変化という短周期の変化のみ調べたが、来年度は数日から数週間の長期的な変化について調べる予定である。また、非磁性ヒータを使った温度制御についても検討したい。

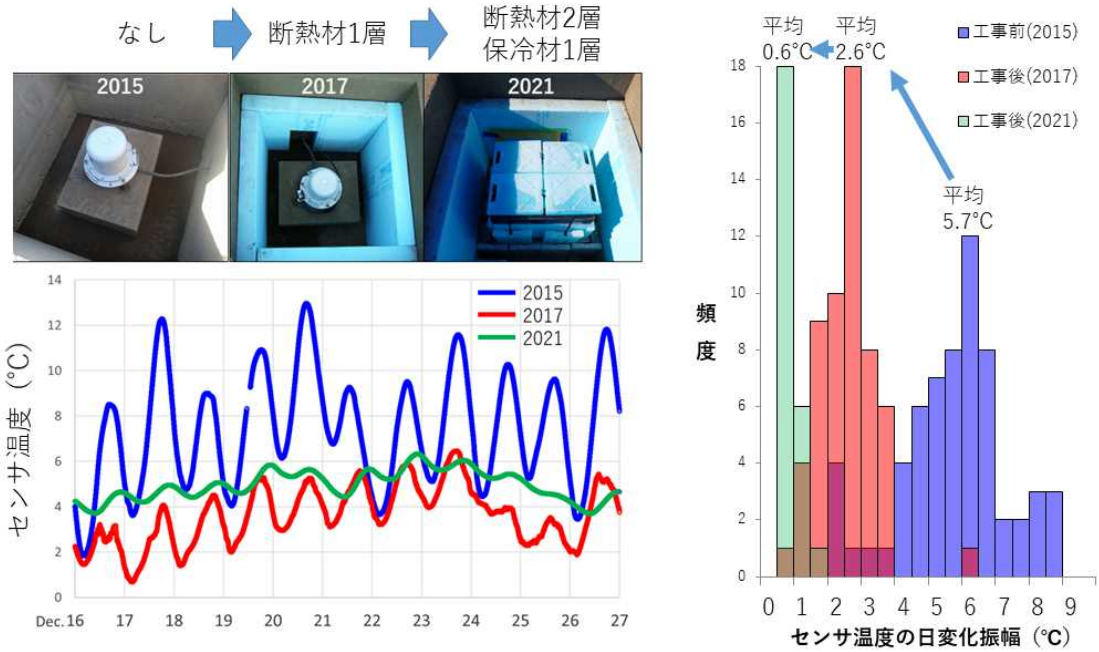


図 6　センサ庫の断熱状況の写真（左上）、夏至付近でのセンサ庫の温度変化の比較（左下）、夏期のセンサ温度の日変化振幅の変化のヒストグラム（右）

５．車両の擾乱量調査

昭和基地では様々な重機や雪上車が運用されており、これらの影響を避けるため、絶対観測時には通行制限を行っている。各車両の擾乱量の把握は通行制限の緩和につながるため、全磁力の繰り返し磁気測量を応用し、擾乱量を推定した。

昭和基地で車両の擾乱量調査を実施するにあたり、予備調査として柿岡構内において職員の車両を使用して全磁力による擾乱量調査を行った（図 7）。予備調査の目的は、昭和基地では、人員、測器、時間、気候と制約条件が多いため、必要最小限の観測点数で実用に足る磁気モーメントを求めることである。予備調査により、柿岡構内での観測・解析結果から、2 点以上の観測点が擾乱源（車両）と同一直線状に並ぶ観測点配置をとらなければ、解析上必要な最低 3 点の観測点であっても昭和基地において実用に足る磁気モーメントが求まることが分かった。この予備調査を踏まえ、測定手順書および野帳を整備した。

昭和基地では、観測点を 5 点設置して 2t トラック 1 台について測定を行った（図 8）。車

両の有無による全磁力変化の大きさが 0.4～1.2nT と小さかったが、倍半分程度の精度で車両の磁気モーメントを推定できた。その磁気モーメントから絶対観測点に最も近い道路（170m）に車両を置いた時の絶対観測点への影響量を見積もったところ十分に小さく、この車両は通行規制の必要がないことが分かった（表 1）。

今年度は作業時間の都合上、1 台しか測定できなかったが、測定の手法を確立することができたので、今後も順次計測する予定である。

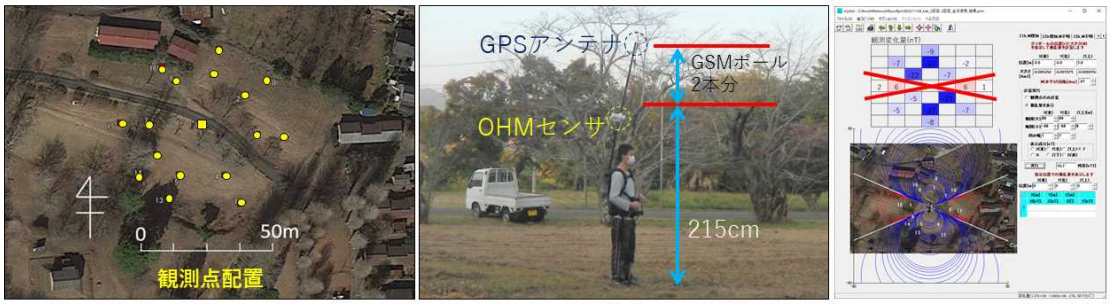


図 7　柿岡での観測点配置（左）、試験観測の様子（中央）、mydist での解析（右）

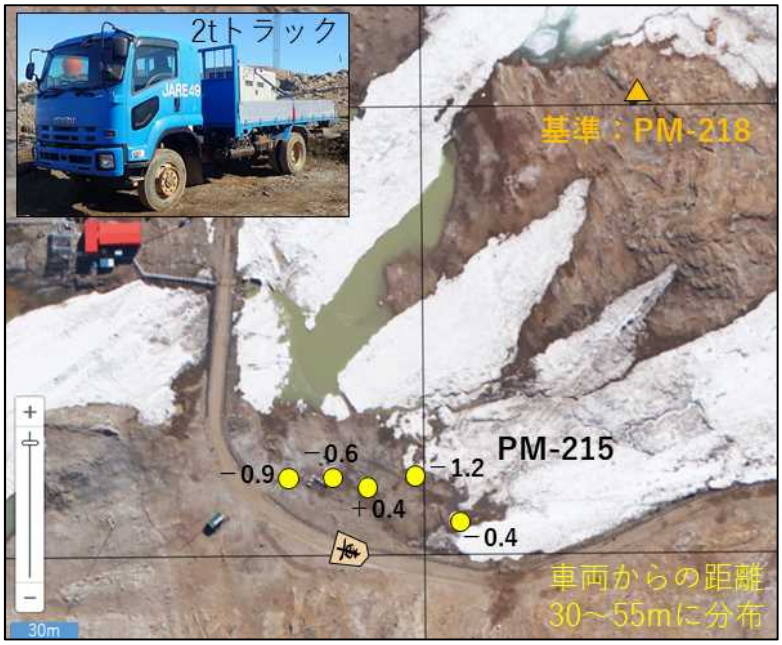


図 8　昭和基地での観測点配置と測定値、対象車両の写真

表 1　車両を中心とした円周上の最大の擾乱量

距離[m]	δH[nT]	δZ[nT]	δD[′]	δF[nT]
50	1.6	0.5	0.3	1.2
100	0.2	0.1	0.04	0.1
170	0.04	0.01	0.008	0.03

６．方位標の真方位観測

昭和基地の真方位角は約半世紀前に 10 次隊で測定した値を使っている。近年、いくつかの方法で測定されたが、1′ 弱の違いが確認されたため、今年度、62 次隊で星の天測、太陽の天測、GNSS 精密測位の 3 通りの方法で測定した（図 9）。すべての測定で建築部門から借用したトータルステーション（最小目盛 1″ ）を使用したが、動作が不安定だったため、残念ながら、すべて参考値とした。

星の天測では採用値から 3′ 程度小さな結果だったが、動きの速いシリウスを対象としたこと、ΔT（＝地球時－世界時）の補正が不十分であることが原因だと考えられる。来年度、ΔT について再計算を行う予定である。太陽の天測では採用値から 1.5′ 程度小さな結果だった。12 対の測定を 2 回行ったが、ばらつきが大きかった。太陽の天測では直射日光が当たるためレベル変動が大きいが、今回の測定では水管レベルの読み取りを行っておらず、レベル補正ができなかったことが一因と考えられる。

当初の計画には無かったが、国土地理院の協力により、GNSS 精密測位による真方位観測角の測定ができた。測定結果は採用値から 1′ 程度小さな結果であった。国内で行った試験観測でも天測と比べて 0.15′ の違いしかなく、ばらつきも小さかったため、この GNSS 精密測位による測定結果のあたりが真値だと考えている。GNSS 精密測位は天候や測定時間帯等の制約が少なく、また、測地の専門家に依頼できる点で、昭和基地での定期的な測定に適した方法である。今回、現地観測での手順書を整備し、実際に測定できたことで、GNSS 精密測位による真方位角の測定方法を確立することができた。次の隊では動作の保証されたトータルステーションで再測定し、その値を新たな採用値としたい。その後は確認のための GNSS 精密測位による測定を数年毎に行えばよいと考える。

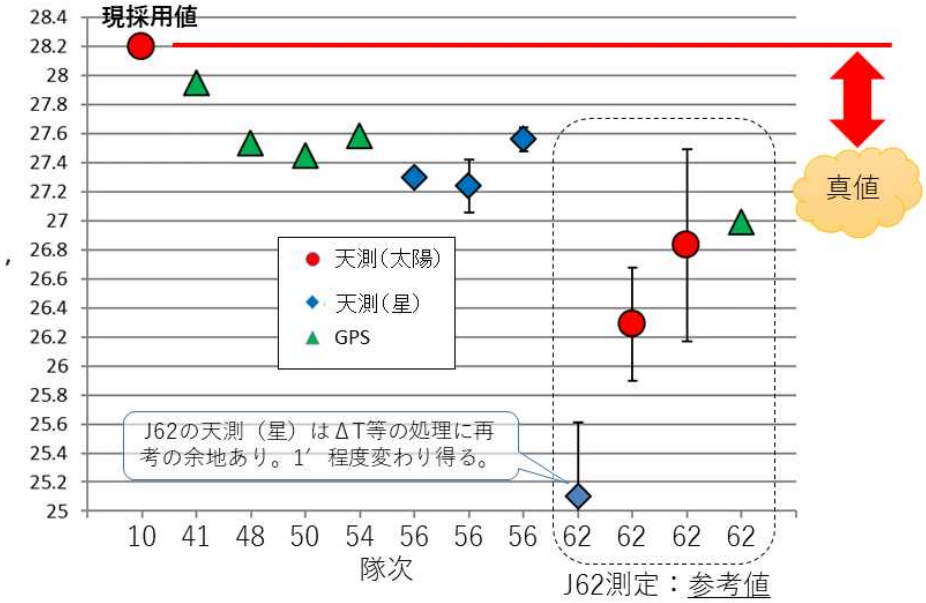


図 9　真方位観測測定結果

７．今年度のまとめと今後の方針

今年度は当所から越冬隊員を派遣していたため、例年ではできないような現地での測定・作業を優先して行った。弱磁場方式での高頻度観測、ゼロ磁場方式との比較観測、車両擾乱量推定のための全磁力繰り返し磁気測量、各種真方位観測などである。いくつかのやり残しはあったが、手法の確立はできた。一方、データの解析はあまり進まず、速報的な結果しか出せなかった。

来年度はデータの解析と絶対値化のシステム構築を中心に進める予定である。

[成果の発表]：

仰木 淳平・稲村 友臣・浅利 晴紀・山際 龍太郎・平原 秀行・有田 真・西田 重晴・屋良 朝之（気象庁地磁気観測所）・門倉 昭（国立極地研究所），南極・昭和基地の絶対値化した地磁気毎秒値の準リアルタイム公開に向けた取り組み, Conductivity Anomaly 研究会, 2022 年 1 月, オンライン

有田 真・仰木 淳平, GNSS 測位を用いた真方位角の測定, 地磁気観測技術連絡会, 2022 年 2 月, オンライン

仰木 淳平・稲村 友臣・浅利 晴紀・山際 龍太郎・平原 秀行・有田 真・西田 重晴・屋良 朝之（気象庁地磁気観測所）・門倉 昭（国立極地研究所），南極・昭和基地の絶対値化した地磁気毎秒値の準リアルタイム公開に向けた取り組み, Conductivity Anomaly 研究会論文集, 投稿中

[調査研究の種別]：基礎課題
[課題名]：地磁気永年変化の経年成分に関する調査（令和２年～3 年度）
[担当者]： ○浅利晴紀、神谷亜希子（技術課）
[推進責任者]：浅利晴紀（主任研究官）
[概要]：

近年の極軌道衛星による連続的な地磁気観測は、地球外核の対流を起源とする地球主磁場の時空間分解能を大幅に向上させた。その成果として、地磁気永年変化のうち非常に微小な振幅しか持たない経年変化成分が検出されるようになった。更にこのうち比較的顕著で定常的な６年周期振動は、理論的に存在が期待される外核中の電磁流体波の存在を示唆するものとされ、特に注目を集めている。しかしながら、その形態やダイナミクスなどの詳細は以下の理由から未だ明らかになっていない。

1. 衛星観測の期間が十数年程度に限られる
2. より長期に及ぶ地表定点観測データベースとそれに基づく永年変化モデルは、現行のものでは経年成分を詳細に検出する十分な精度が無い

精度の劣る従来の長期間永年変化モデルを用いた外核対流経年振動の検出の試みは既に幾つか報告されているが、それらの結果のばらつきは大きい。この原因としては、太陽活動の経年変化の影響などから、特に永年加速（主磁場の２階時間微分）の決定精度の低さが指摘されている。

本研究課題では、地磁気永年変化の経年成分検出に最適化した長期データセットを作成し、それを用いて永年変化モデリングおよび外核対流振動モデリングを行う。これにより、地表定点観測データのみから抽出する経年成分の精度向上の可能性を調査するとともに、より長期の外核対流振動モデルから外核の経年ダイナミクスを議論する。

[具体的な計画と達成目標]：

1. WDC エジンバラと WDC 京都のデータベースから、各観測点の毎時値を取得し、成分ごとに外部起源成分の寄与を最大限排除するような毎月値（とその分散）のデータセットを作成する。除外する外部起源成分の推定には、地磁気擾乱係数を説明変数とした機械学習による予測を用いる。
2. １のデータセットから永年変化モデルを構築し、その精度を衛星モデルと比較する。更に外核対流の経年振動分布を逆推定し、数値シミュレーションから存在が予測される外核流体の波動現象の有無を検証する。

[年次計画]：(複数年度計画の場合のみ要記載)

令和２年度：柿岡の毎時値データから外部起源成分を推定する機械学習モデルを洗練させる。低緯度・高緯度観測所についても同様の機械学習モデルを開発する。最終的に世界の観測所観測データ（1957年以降）の各成分に順次適用していくことで毎月値データセットを作成する。

令和３年度：世界各地の地磁気観測所データを収集する。既に作成された機械学習モ

デルを適用して中緯度観測所の毎月値データ改修を進める。また、高緯度観測所の機械学習モデルの構築も並行して進める（図１）。柿岡・女満別・鹿屋の毎月値データ改修のために開発した機械学習アルゴリズムについて論文を執筆する。

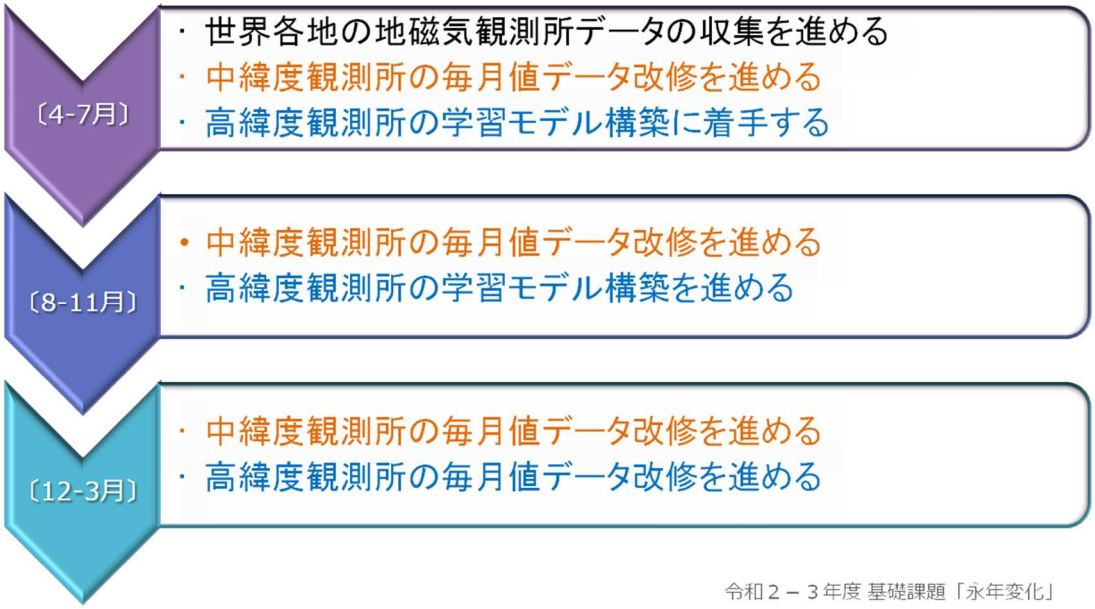


図１　令和３年度の調査スケジュール

[令和３年度の成果]：

本年度は他業務による時間的な制約もあり、次の事項について調査を実施した。

- 国際学会 IAGA-IASPEI 合同集会にて前年度の成果を講演発表した（８月）。発表の内容は、柿岡・女満別・鹿屋の毎月値データセット改修の結果と、そのために開発した機械学習アルゴリズムの導入について。
- 上記学会講演の内容を国際学術誌にて発表するべく論文原稿を執筆した（年度末までの投稿には間に合わなかった）。

[成果の報告]：

Seiki Asari, Masanori Kurihara, Naoto Imamura, Estimating historical monthly magnetic datasets based on a machine learning algorithm, Joint Scientific Assembly IAGA – IASPEI 2021 (Virtual Conference), August 21-27, 2021, at Hyderabad, India.

[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(その 2)
[担当者]： ○長町信吾（観測課）
[概要]：

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

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

[具体的な計画と達成目標]：

昨年度は確定毎分値を入力データとし、「勾配ブースティング決定木」「ニューラルネットワーク」「畳み込みニューラルネットワーク」といった機械学習アルゴリズムを用いた判定モデルの構築を行った。しかしながら、これまでのところ従来の計算機判定を超える精度には至っていない[*5]。今年度は入力データを精査し、判定に有用と思われる特徴量（例えば peak to peak 振幅など）を手動で抽出し、10 段階の K 指数 0 から 9 までをそれぞれ別々の分類アルゴリズムで判定することで、従来の計算機判定手法を超える正答率を目指す。

[工程表]：

1.機械学習に有用な入力データの精査。

2.機械学習による K 指数読み取りアルゴリズムを開発する。

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

工程表

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

[本年度の成果]：

K 指数測定においては、地磁気擾乱が大きくなればなるほど日変化推定の重要性が低くなり、完全に日変化を覆い隠すほど大きな地磁気擾乱に対しては、日変化を推定する必要が全くなくなる*6。そのような場合は、機械学習を実行する必要すらなく、対象期間の最大値と最小値の差（peak to peak 振幅)のみで判定可能となるはずである。

K 指数がいくつまでなら peak to peak 振幅のみで正しく判定できるかを調べるため、柿岡の 1989 年 4 月から 2019 年 12 月までのデータを用い、H,D それぞれの成分で確定 K 指数および peak to peak 判定で 7 以上と判定された事例を比較した。表 1 に両者の一致数と相違数を示す。H 成分においては全 89 事例のうち 82 事例で一致し、7 事例で 1 ランク違いの判定となった。一方で D 成分においては 2 ランク違いの判定が 3 事例あった。H 成分で不一致であった 7 事例を精査すると、確定 K 指数の判定のほうが過剰な日変化推定を行ったものであり、peak to peak 判定のほうがむしろ正しい判定であることが分かった。一方で D 成分の 2 ランク異なる 3 事例の磁場変化は、日変化を想定するほうが自然であり、peak to peak 判定よりも確定 K 指数のほうが正しい判定であることがわかった。

表 1：確定 K 指数と peak to peak 振幅のみで判定した K 指数との一致数および相違数

		Peak to peak 判定									
		H 成分					D 成分				
		5	6	7	8	9	5	6	7	8	9
確定値	5								2		
	6			4					8		
	7		1	70	2				25		

	8				11						
	9					1					

本年度の調査により、H 成分においては 7 以上の K 指数については機械学習の必要はなく peak to peak 振幅のみで正しく判定できることが分かったが、D 成分については peak to peak 判定では K 指数が 7 の判定も正しく行えないことが分かった。一方で、当初計画していた特徴量の抽出と機械学習の実行を行うことはできなかった。本格的な機械学習の実行は次年度以降に行いたい。

[成果の発表]：なし

[参考文献]：

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

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

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

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

*5 令和 2 年度地磁気観測所調査研究業務成果報告書

*6 Mayaud, P. N., Atlas of indices K, in IAGA Bull. No21, IUGG Publ. Office, Paris, 1967

［調査研究の種別］：基礎課題

［課題名］：弱磁場方式による絶対観測の精度調査

［担当者］： ○平原秀行、仰木淳平（観測課）、海東恵美、浅利晴紀（技術課）

［概要］：

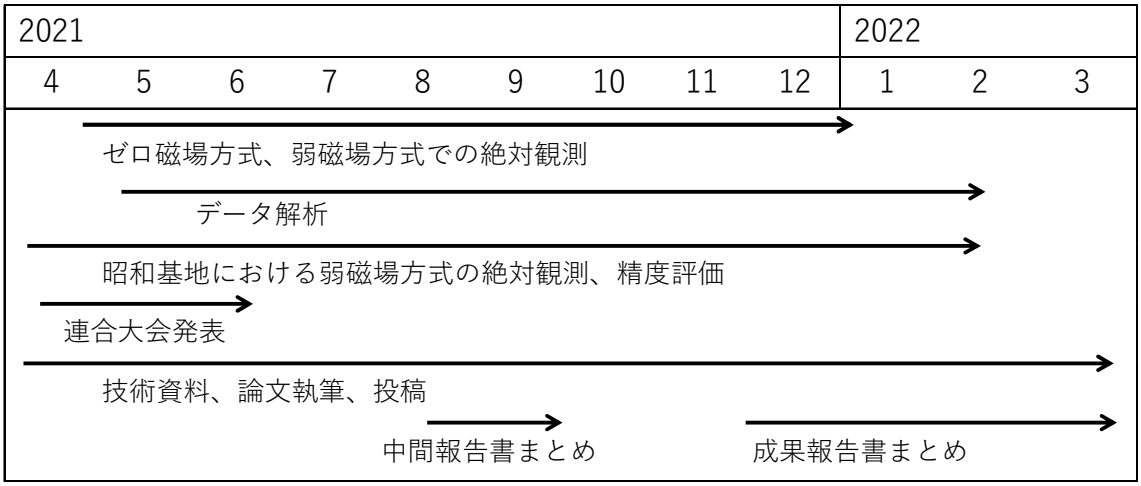
令和 2 年度までに行った地磁気絶対観測の自動計測試作器の調査で、弱磁場方式という地磁気観測所では現在まで行われていない方式での絶対観測手法を知るに至った。その手法は、絶対観測において一定の効率化を図れることを示した。しかし、令和 2 年度の調査では、偏角測定の精度が現在の観測所の基準を満たさないことが多く、観測所では絶対観測に使うことができないことがわかった。今年度は、偏角の標準偏差が大きくなった結果について、それが観測方式によるものか観測器に依存したものなのか原因を調査する。

また、時間的に制限があり天候や虫などによる厳しい観測環境である父島地磁気観測点について弱磁場方式の導入を検討し、定期出張による作業の効率化を目指す。

さらに、昭和基地において第 62 次南極観測隊員が行っている高頻度の弱磁場方式の絶対観測について、観測の評価を行う。

［具体的な計画と達成目標］：

1. 柿岡比較較正室西台で、FT 型磁気儀を用いてゼロ磁場方式および弱磁場方式の絶対観測を行う。
2. 両者の精度を比較し、父島地磁気観測点での絶対観測に適応するか調査する。
3. 昭和基地における弱磁場方式の絶対観測について、観測評価を行う。
4. 連合大会 2021 招待講演で発表する。
5. 観測所技術資料、東京大学地震研究所紀要に投稿する。



［本年度の成果］：

父島地磁気観測点に弱磁場方式を導入

地磁気観測は、自動で行われる変化観測とそれを較正するための間欠的な絶対観測から成り立っている。地磁気絶対観測とは、地磁気ベクトル３成分の絶対値を得るための観測であり、特定の地点と時刻に対する地磁気の大きさである全磁力、地磁気の向きである偏角および伏角の測定から構成される。

全磁力の測定には、プロトン磁力計などのスカラー磁力計が、偏角と伏角の測定には、FT 型磁気儀と呼ばれる磁気儀が用いられる。FT 型磁気儀は、図１のように、１軸磁力計と非磁性の経緯儀から構成され、磁力計は望遠鏡の軸方向の磁場成分を測定するよう搭載されている。

図１　FT 型磁気儀

地磁気観測所で現在まで用いられている手法の「ゼロ磁場方式」には、磁力計軸をゼロ磁場方位（磁力計出力値が 0.0nT となる方位）に厳密に合わせる操作が含まれる。その際の磁気儀の微動ノブの扱いには熟練を要するため、例えば、野外の環境や限られた時間内に観測を実施する必要がある状況では、経験の浅い観測者が観測精度を保つために困難を伴う場合もあった。

これに対し、近年では「弱磁場方式」と呼ばれる手法が世界的に主流になりつつある。この方式では、厳密にゼロでなくてもよいゼロ磁場方位の近傍に向けた磁力計軸の方位（弱磁場方位）と、その時の磁力計の出力値からゼロ磁場方位を算出する。

この方式は、磁力計軸をゼロ磁場方位に正確に合致させる繊細な微動ノブ操作が無く、観測値取得時に FT 型磁気儀から離れられるため、観測者の心身の負担軽減、初心者の習得の速さのほか、観測者の非磁性服装の緩和など、省力化の上での複数の利点が期待される。

弱磁場方式では、測定された弱磁場方位と磁力計の出力値を用いて以下のような補正角を導出することでゼロ磁場方位を得る。

偏角について、水平分力を H としてゼロ磁場方位と弱磁場方位がなす水平角を ε とすると、水平面上のある方向に向けた磁力計の値 R は、

$$R = H \sin\varepsilon$$

となる。 ゼロ磁場方位からの水平補正角 ε は、ゼロ付近で $\sin\varepsilon=\varepsilon$ と近似できるので、

$$\varepsilon = R / H$$

となる。

同様に、伏角については全磁力を F として、ゼロ磁場方位と弱磁場方位がなす鉛直角を δ とすると、磁気子午線面上における磁力計の値 R を用いて、ゼロ磁場方位からの鉛直補正

角 δ は、

$$\delta = R / F$$

となる。

弱磁場方位に対しこの補正角 ε、δ を適用することで、ゼロ磁場方位が算出できる。

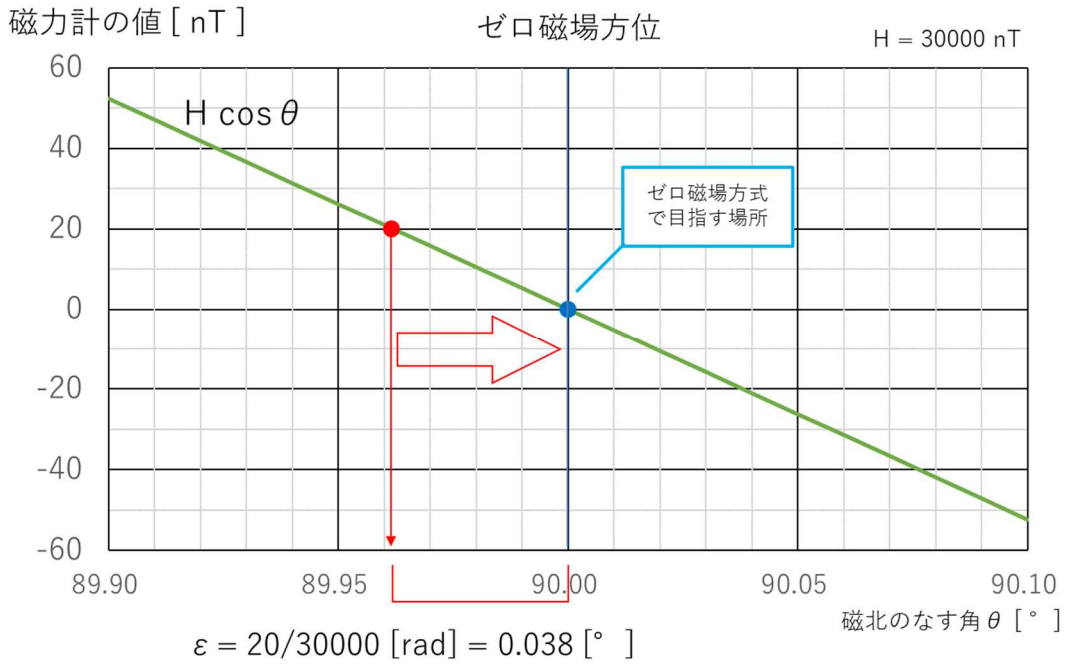


図 2　弱磁場方式における偏角の補正角計算模式図

ここでは、水平分力 H=30000nT、磁力計の値が R=20nT の場合を示している。

令和 2 年度の調査研究で「ゼロ磁場方式」と「弱磁場方式」との比較を行った結果、長期的な観測値のばらつきは、偏角、伏角とも 0.2 分角以内となり良好な結果を得た。また、1 回の観測における観測値の標準偏差は、伏角は弱磁場方式、ゼロ磁場方式ともに柿岡の採用基準を満たした。一方偏角に関しては、弱磁場方式の標準偏差がゼロ磁場方式よりも大きく、柿岡の採用基準を満たさない観測が多かった。しかし、父島地磁気観測点については、この目安が柿岡より緩いため、すべての観測が採用基準を満たしていることがわかった。

本年度は、弱磁場方式における補正角の計算処理を簡略化できる手法を調査した。従来の弱磁場方式の計算方法は、ゼロ磁場方式の単純な観測値平均とは異なり、図 3 のようにそれぞれの観測時の全磁力の値から伏角を求め、その全磁力と伏角から求めた水平分力の値から偏角を求める、という複雑な計算処理を行う。

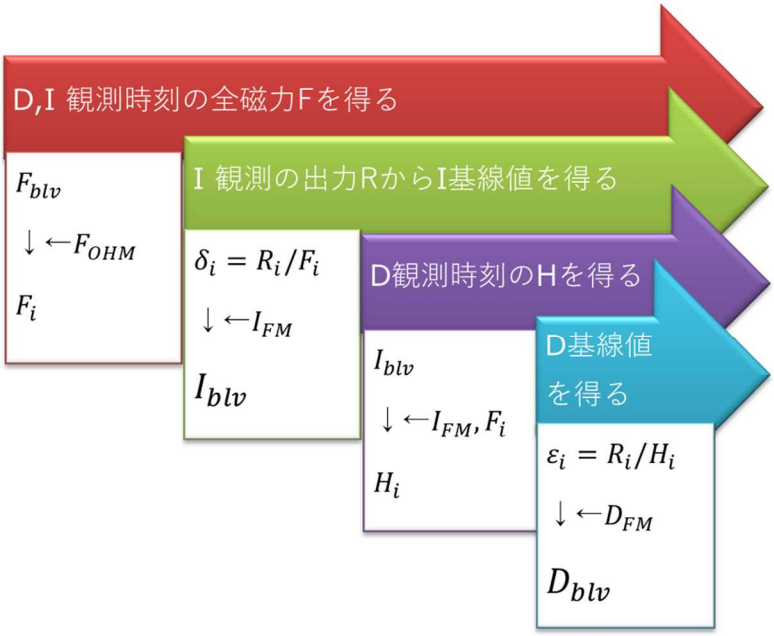


図３　弱磁場方式の計算手順

このときに用いる水平分力および全磁力の値を定数にすることで、補正角を係数化しても結果に影響がないことがわかった。

図４は、偏角観測における FT 型磁気儀の観測値とゼロ磁場方位との補正量を示したもので、水平分力 H が 30000nT±1000nT の範囲 200nT ごとにプロットしている。水平分力 H が 1000nT 異なるとき、磁力計の値が、20（=2.0nT)における補正角の差は、0.5″ 程度であることがわかった。FT 型磁気儀の最小読み取り角が１″ であることと、最大級の地磁気嵐が 700nT 程度の変化なので、水平分力を定数としても計算結果に影響がないといえる。

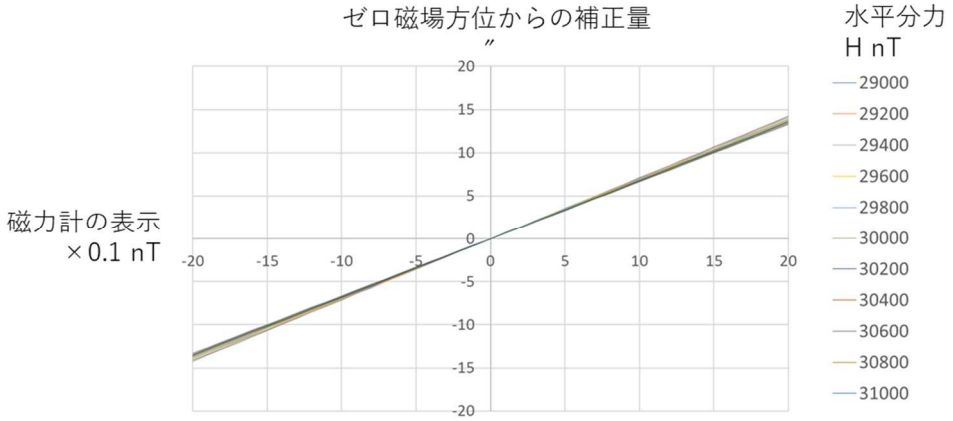


図４　FT 型磁気儀の観測値（×0.1nT）とゼロ磁場方位からの補正量（ ″ ）

父島地磁気観測点における弱磁場方式の偏角および伏角の補正角係数は、磁力計の表示（×0.1nT）に対して、

偏角　　×0.63 ″

伏角　　×0.50 ″

となった。この係数の項を観測野帳に加えることにより、野帳上でゼロ磁場方位が求まり、計算機処理や観測細則を変更せずに弱磁場方式を導入することができる。野帳を図５に示す。父島地磁気観測点における絶対観測の弱磁場方式は、令和４年度から導入する。

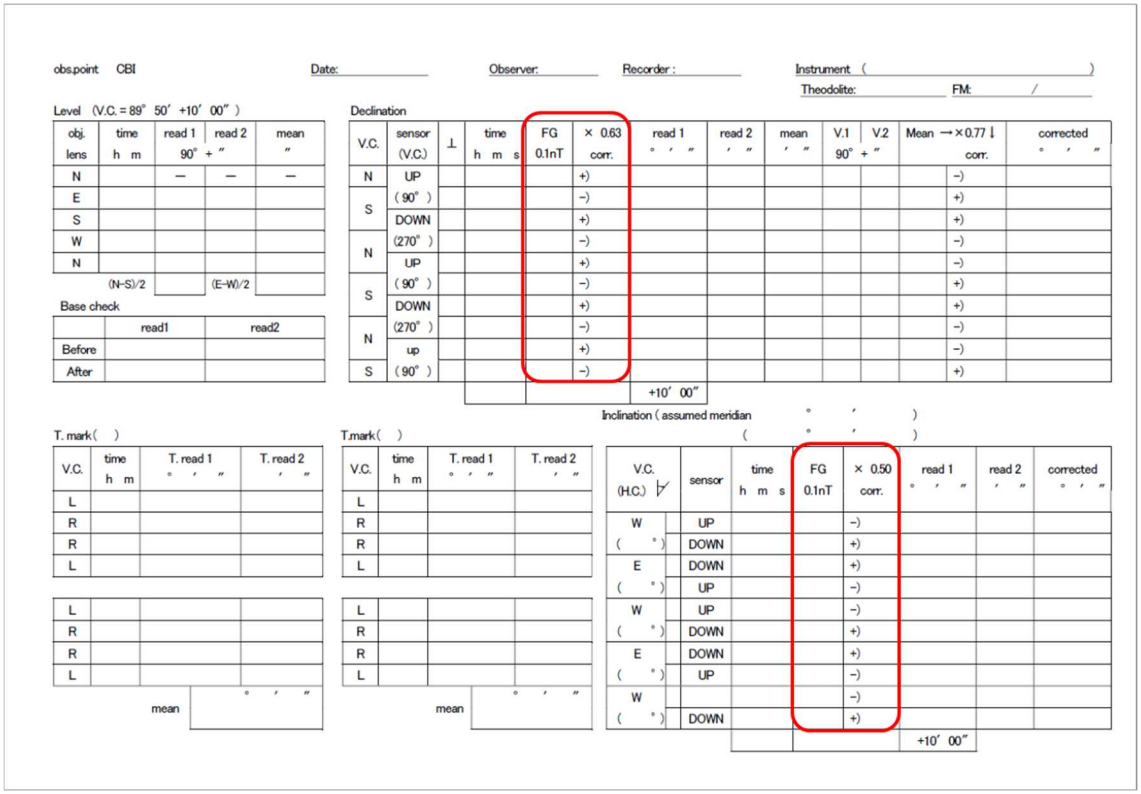


図５　父島地磁気観測点の弱磁場方式野帳

赤く囲んだ部分が弱磁場方式を加えた箇所

［成果の報告］：

平原 秀行・仰木 淳平・海東 恵美・浅利 晴紀，地磁気絶対観測の新手法の精度評価, Japan Geoscience Union Meeting 2021（招待講演）, 2021 年 6 月 3 日，オンライン発表

平原 秀行，地磁気絶対観測の新手法に向けた調査，令和３年度施設等機関研究報告会，2022 年 2 月 4 日，オンライン発表

海東 恵美・大川 隆志，自動絶対観測装置 AutoDIF（RMI 開発）の試験観測，地磁気観測所技術報告資料　投稿中

[調査研究の種別]：基礎課題
[課題名]：各観測点における真方位観測の観測誤差に関する調査（令和３年度）
[担当者]：〇弘田瑛士、下川淳、森永健司（観測課）

[概要]：

2011 年度に女満別・鹿屋の両観測施設が無人化して以降、観測施設において年間に実施できる真方位観測の回数が極端に減少した。通常、真方位観測は数回の観測を実施しその平均をとることで観測結果の信頼性を判断するが、1～2 回程度しか観測することができない両観測施設においては、観測結果の良否判定が困難であり地磁気観測精度を維持するうえで問題となっている。

本調査では真方位観測の観測誤差を誤差要因毎に確認し、観測点別に１回の観測で得られる結果の信頼度を検討する。調査結果を基に、観測回数を増やすことが難しい女満別・鹿屋両観測施設、祓川比較観測点の真方位観測の良否判定基準を決定する。

[具体的な計画と達成目標]：

１.各観測点の個々の真方位観測のばらつきを方位標の読取りのばらつきと北極星の読取りのばらつきに分けて検討する。
２．同年に複数回真方位観測を実施した場合の結果のばらつきを検討する。
３．個人差に起因する誤差やばらつきを検討する。
４．上記の結果を基に、各観測点の真方位観測の期待される精度を決定し、観測結果の良否判定基準を決定する。
５．調査結果をまとめて所内技術資料へ報告する。

[工程表]

<table>
<tr><td>４月</td><td>５月</td><td>６月</td><td>７月</td><td>８月</td><td>９月</td><td>10 月</td><td>11 月</td><td>12 月</td><td>１月</td><td>２月</td><td>３月</td></tr>
<tr><td colspan="2">過去の文献を集める</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">観測点ごとの方位標読取及び星の読取のばらつきの調査</td><td colspan="3">個人差に起因する誤差の調査</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td colspan="2">良否判定基準の決定</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td colspan="4">所内技術資料作成</td><td></td><td></td></tr>
</table>

[本年度の成果]：

FT 型磁気儀を使用した真方位観測結果の良否判定基準の作成を目的とし、個々の観測における誤差要因（Tmark 読取のばらつき、星の読取のばらつき、傾斜補正のばらつき等）をまとめたデータセットを作成した。

観測数が多く、信頼性の高い採用値が得られている柿岡 W 台のデータセットを対象として、観測結果が採用値を中心とした標準偏差の幅の中に納まっているデータ（以降“誤差範囲内データ”という）と、標準偏差の幅に収まっていないデータ（以降“誤差範囲外データ”という）に分類した。

誤差要因と推測される個々の観測項目について、誤差範囲内データと誤差範囲外データで、バラツキや偏りなどの統計的な違いがあるのかを検証することで、観測データの個々の誤差要因項目の良否から観測結果の良否を判定できないかと考えた。今年度は、誤差要因のうち、方位標読取時のメモリ板読取用照明器が右にある場合の読み取り結果と、左にある場合の読み取り結果の差（以降、“LR 差”という）に着目して、誤差範囲内データと誤差範囲外データで違いがあるかを確認した。

LR 差の誤差範囲内データと誤差範囲外データのばらつきを見ると、誤差範囲内データの標準偏差の平均は 3.2″、誤差範囲外データの標準偏差の平均は 4.0″であり、誤差範囲外データのほうが若干 LR 差のばらつきが大きいという結果が出た。この差は決して大きいとは言えず、LR 差のみで観測結果の良否を判断することができないが、複数の誤差要因について誤差範囲内データと誤差範囲外データの傾向の違いを比較することにより、複数の項目の組合せで観測結果の良否を判定するための指標を決定できる可能性を見出した。

年当初に計画した達成目標と工程表に沿って調査を開始するにあたり、最初に始めたのは調査の基礎資料となるデータセットの作成であったが、柿岡、女満別、鹿屋で 2010 年以前の計算方法に違いがあり、データセットの作成が思うように進まなかった。また、最終的にどのように観測結果の良否を判定するかという課題の解決策がなかなか見いだせず、調査方針が明確に定まらなかったため、本年度の調査は当初想定していたスケジュールより大幅に進捗が遅れることとなった。今年度は調査方針を決定することにほぼ 1 年間を費やしたという状況であり、作成したデータセットも誤差要因の項目の不足を大幅に追加するなどの改良が必要と考えている。

本年度の調査の結果を踏まえて、調査方針を見直して来年度も継続して調査を進めていく予定である。

［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

［担当者］： ○屋良朝之、谷口秀隆、森永健司（観測課）

［概要］：

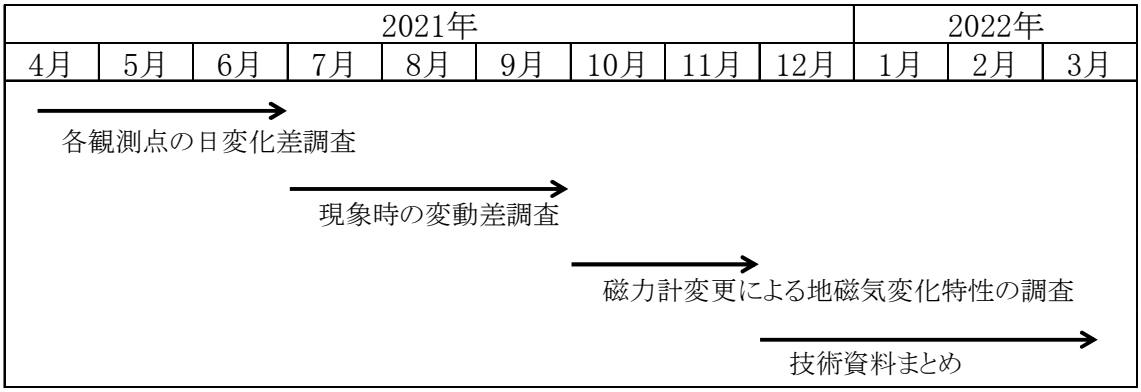
鹿屋と祓川では日変化や地磁気現象発生時に、地磁気変化に対する振幅の差があることが明らかになった。例えば、静穏日の日変化では鹿屋と祓川の振幅の比（鹿屋÷祓川）は0.3～0.7%であり、磁気嵐では 0.3～1%、SC では 0.4～2%程度である。一方、女満別では、2015 年 6 月 22 日に発生した磁気嵐において、同じ構内に設置されている主観測点と副観測点の H 成分の振幅差が、鹿屋と祓川の振幅差よりも大きいことがわかった。女満別構内の各観測点の距離は最大でも 200m 程度であり、鹿屋と祓川は直線距離にして約 3.4km であるにも関わらず、女満別構内の方が大きいという結果が得られた。

これまで副観測点の地磁気変化特性に関しては、詳しく調査されていない。本調査では主観測点と副観測点における日変化および地磁気現象時の地磁気変化の違いについて調査し、各観測点の地磁気変化特性を把握することを目的とする。

［具体的な計画と達成目標］：

1. 2011 年 4 月から 2020 年 3 月の期間で、国際 5 静穏日と国際 5 擾乱日を対象に地磁気日変化特性を調べる。
2. 2011 年 4 月から 2020 年 3 月の期間で、磁気嵐と地磁気急変化現象(SC)を対象とし、各観測点の最大振幅や位相に違いがあるか調べる。
3. 同一観測点で磁力計の変更が行われた事例を対象に、磁力計変更の前後で地磁気変化特性に違いがあるか調べる。
4. 調査結果を技術資料にまとめる。

［工程表］：



[本年度の成果]：

1. 日変化差調査

日変化差調査では観測点ごとに地磁気日変化の大きさに違いがあるかを確認した。調査を進めるにあたり、構内の除草作業によって混入したノイズや、車両ノイズなどの人工的に発生した擾乱が含まれる日は除外した。図 1 に 2013 年 1 月から 2020 年 3 月までの静穏日と擾乱日の kny00 観測点の H 成分と kny04 観測点の H 成分の日変化差の大きさ別の出現割合を示す。kny04 観測点は 2014 年 2 月に MB163 から MB10 に磁力計を交換している。図 1 は MB163 を設置していた時期の出現割合を赤で、MB10 を設置していた時期の出現割合を青で示している。いずれの磁力計を設置していた期間においても、日変化差は 0 とはなっていない。この理由として、各観測点周辺の土壌の電磁誘導の違いや、観測点の温度変化の違いが考えられる。観測点の温度変化の違いについては、例えば kny00 と kny04 では本体の温度制御の程度が異なっており、1 日の温度変化は kny00 で約 0.4℃、kny04 では約 2～3℃である。これらの温度変化の違いが地磁気変化特性に影響していると考えられる。また設置期間の違いにより、単純に比較することはできないものの、明らかに MB163 を設置していた時期と MB10 を設置していた時期で日変化差の大きさの出現割合が異なっている。この違いから磁力計そのものの特性も地磁気変化特性の違いに影響を与えていると考えられる。

磁力計の違いが地磁気変化特性にどの程度影響しているのかという点について、2012 年 3 月～2015 年 3 月の期間、鹿屋観測施設の地下変化計室において並行運用されていた FM10 と 95FM について調査した。これらは共に高感度フラックスゲート磁力計で性能はほぼ同じである。FM10 と 95FM の日変化振幅差の標準偏差（データ数 N=312）は、H 成分で 0.17nT、Z 成分で 0.12nT、D 成分で 0.01’ であった。この結果より、ほぼ同じ性能の磁力計をほぼ同じ環境に設置したとしても、最大で 0.2nT 程度のばらつきが現れることがわかった。

今年度の調査では、観測点周辺の土壌の地磁気変化特性だけでなく、設置環境の温度変化の違いや磁力計そのものの違いが地磁気変化特性の差として大きく影響することが示唆された。

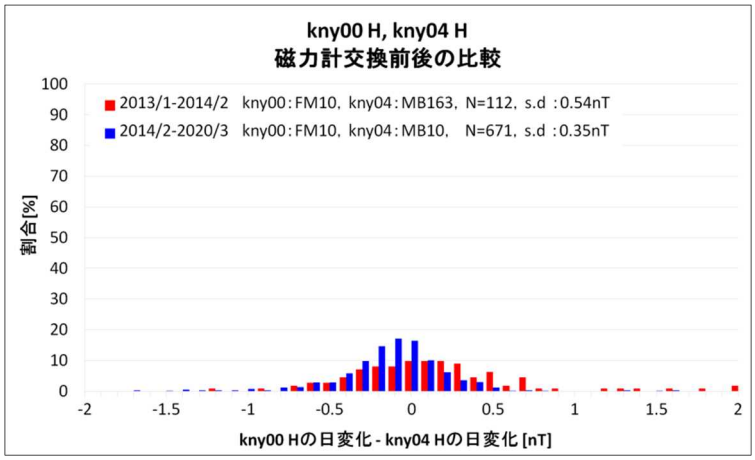


図 1：磁力計交換前後の kny00 H と kny04 H の日変化差比較

2．現象時の変動差調査

時間スケールの短い地磁気急変化現象（以下、SC）について女満別の各観測点を対象に調査した。

2.1　FM10 と FM96 の振幅差について

図 2 に mmb00 と mmb01 に設置されていた FM10 と FM96 の SC が発生したときの振幅と振幅差を示す（N=51）。H 成分では振幅と振幅差に相関があるようにみえるが、Z、D 成分では相関はほとんど無かった。2013 年 12 月 4 日～2017 年 9 月 13 日の期間に mmb01 に設置されていた FM90 においても同様の傾向が見られた。他の副観測点を確認しても、明瞭な線形相関がみられる観測点はなく、地磁気急変化現象時の観測点別の変化特性の違いは単純な振幅の違いではないことが示唆された。

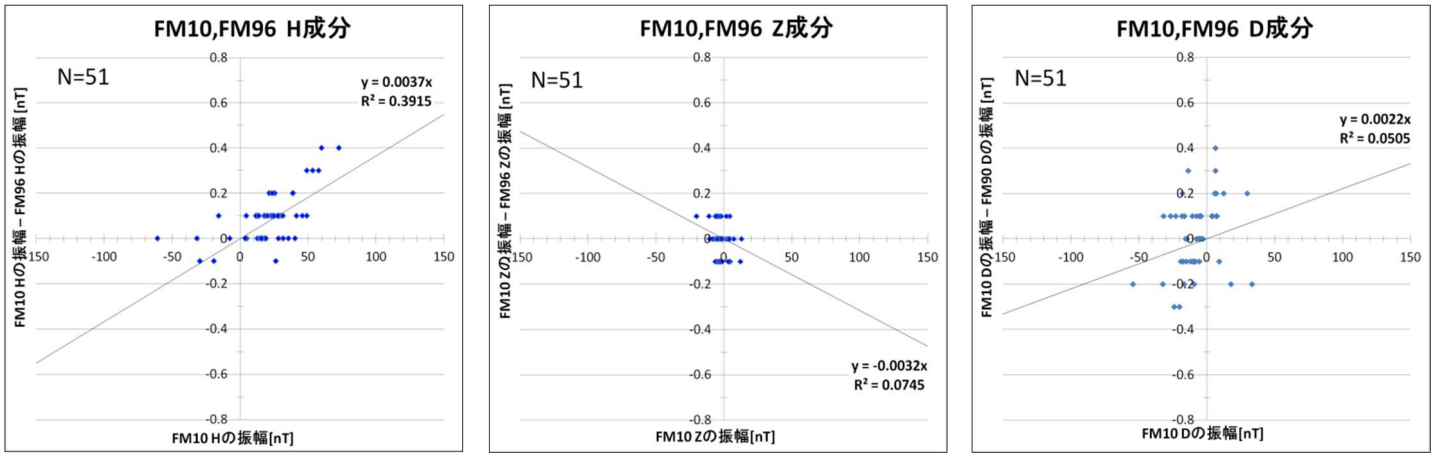


図 2：2013 年 12 月 4 日～2017 年 9 月 13 日の期間に発生した SC の
振幅に対する振幅差（FM10 と FM96 の比較）

2.2　調査期間中の最も大きい SC 発生時の女満別の各観測点の変化特性の違い

SC 発生時の地磁気変化特性の差が単純な振幅で表されるものではないという結果を受け、調査期間中で最も振幅が大きかった 2015 年 6 月 15 日の SC を対象に、各観測点の地磁気変化差を調査した。図 3 に SC 発生の前後 5 分間程度の女満別の各観測点の変動差を、mmb00 観測点を基準としたプロットで示す。図 3 より各成分とも SC の振幅がピークとなる時間と振幅差がピークとなる時間は一致していないことが見て取れる。これらの地磁気変化特性の違いは各観測点の地質が違うことによる伝搬の差が現れているのか、磁力計の地磁気変動に対する応答性の違いによるものなのかは、今年度の調査では明らかにできなかった。さらに詳しい解析が必要である。

また Z、D 成分は SC*型の変化をしているが、振幅差では単純増加（減少）もしくはあまり変化がなく差のプロットには SC*型の変化は現れないことがわかった。

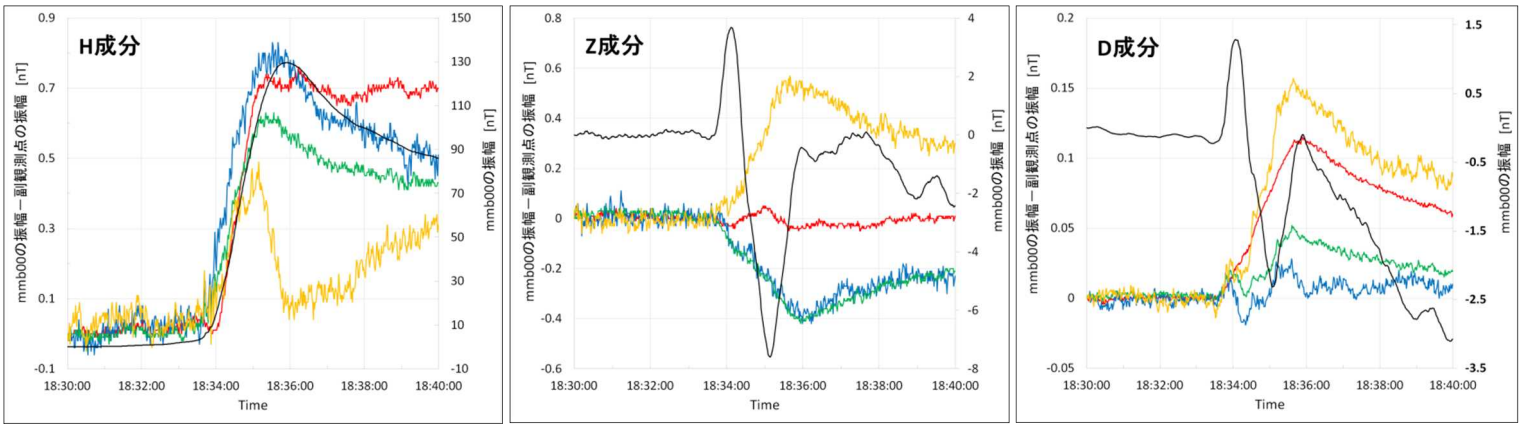


図 3：2015 年 6 月 22 日に発生した ssc*の mmb00 を基準とした各成分の差

図中のデータ線はそれぞれ以下の通りである。

mmb00 振幅、 mmb00-mmb01、 mmb00-mmb02、

mmb00-mmb03、 mmb00-mmb04

3. まとめ

（1）各観測点の日変化差の違いは、日変化スケールでは観測点による違いだけでなく、磁力計の設置環境の温度変化や性能の差が誤差要因として含まれていると考えられる。またほぼ同じ性能の磁力計をほぼ同じ環境に設置しても 0.2nT 程度のばらつきがあることがわかった。

（2）地磁気急変化現象における振幅差の調査において、女満別構内で振幅差を調べた結果、地磁気急変化時の各観測点の変化特性の違いは、単純な振幅差ではないことが示唆された。

（3）SC の振幅が大きい事例では mmb00 を基準とした各成分との間に、振幅がピークとなる時間と振幅差がピークとなる時間が一致しないことがわかった。また Z、D 成分では振幅が SC*型であっても、振幅差は SC*型にはならないことが明らかとなった。

1 年計画で開始した本研究であるが、調査対象となる観測点数が多く、磁力計を交換するたびに変化特性も変わっていることが判明したため、過去の使用測器の調査などデータ整理に時間がかかった。また、調査を進めると地磁気変化特性の差は、複数の要因が影響していることがわかってきて、1 年ですべてを調査してしまうことができなかった。今年度の調査結果を踏まえ、調査手法を改良して来年度も継続して調査を実施する予定である。

［調査研究の種別］：基礎課題

［課題名］：複数の人工擾乱源把握のための全方位監視カメラ設置および独自ソフト開発

［担当者］： ○平原秀行、下川淳、西田重晴、屋良朝之、弘田瑛士（観測課）

［概要］：

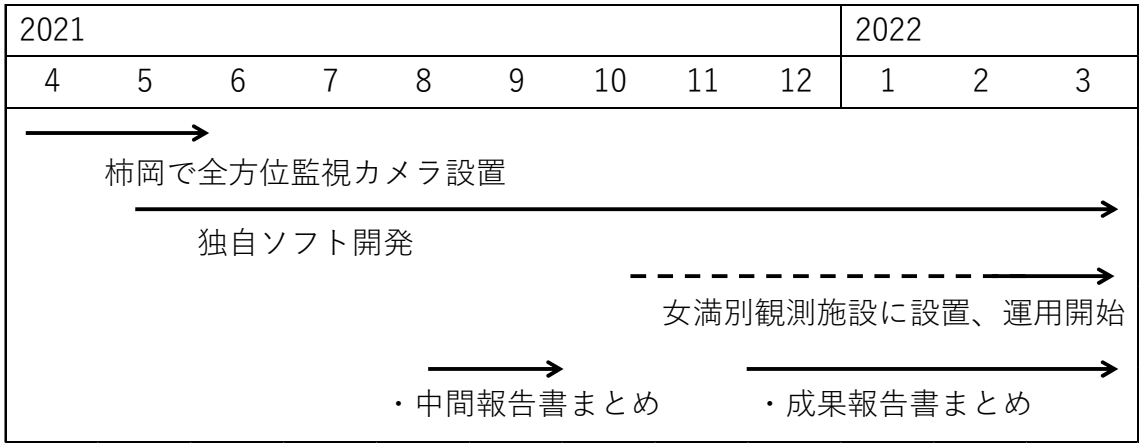
女満別観測施設では、近傍のノイズ源からの擾乱量を把握するために、複数の磁力計を展開している。また、周辺の情報を視覚的にとらえるため、監視カメラを設置している。現在設置されている監視カメラは、遠隔操作であらゆる方向に向けられるが、監視対象が複数ある場合は、的確に捉えられないことがあった。

本調査では、全方位監視カメラについて、取付調整、画像アーカイブ構築および任意の方向を自在に監視できる独自ソフトを開発し、観測施設に設置して運用開始する。

さらに、カメラで特定した複数の人工擾乱源の位置から、地磁気連続観測点への擾乱量を推定する独自ソフトを開発する。

［具体的な計画と達成目標］：

1. 柿岡で全方位監視カメラ（Panasonic WV-S4550L）の取付調整、ネットワーク設定および画像データベースの構築を行う。
2. 全方位画像の連続表示、トリミングおよびキャプチャが行える独自ソフトを開発する。
3. 女満別観測施設に全方位監視カメラを設置し、運用を開始する。
4. 監視カメラで特定した人工擾乱源の位置と女満別観測施設に展開した磁力計の値から、地磁気連続観測点への擾乱量を推定する独自ソフトを開発する。



［今年度の成果］：

１．柿岡における全方位監視カメラの設定

昨年度購入した全方位監視カメラ（Panasonic WV-S4550L、以下「カメラ」）に加えて、今年度はカメラ取付キットおよび Ethernet 電源装置を購入し、柿岡地磁気観測所計測室で図１のように PC1 台と閉じたネットワーク環境を構築して、取付訓練および以下に示す各設定を行った。

・カメラの設定

(1) ダブルパノラマ画像で、05 時 - 19 時（日本時間）の 60 秒ごとに画像を取得する。

(2) FTP を使ってサーバ（PC）に画像を送信する。

・PC の設定

(1) FTP サーバ機能を ON にする。

(2) 日付ごとにフォルダを作成し、画像をアーカイブする。

図１　柿岡地磁気観測所計測室での作業風景

2．全方位画像の連続表示、トリミングおよびキャプチャが行える独自ソフトを開発

調査研究担当職員の各 PC に、プログラム言語 Python3 および開発環境 Anaconda3 をインストールし、並列でソフト開発ができる環境を整えた。目指す画像表示ソフトの仕様は以下のように設定した。

(1) 画像を表示させる。
(2) 画像の拡大、縮小ができる。マウスホイールでもできる。
(3) 画像をスクロールできる。マウスドラッグでもできる。
(4) 時刻を指定すると、一番近い時刻の画像を表示する。
(5) 拡大、スクロールのまま、前後の画像をワンボタンで表示できる。
(6) 表示している範囲を保存できる。
(7) 640×480 の枠を表示させ、その範囲を保存できる。

(1)～(5)までの機能を搭載したソフトが完成した。外観を図２に示す。今後は残りの機能を付け足していく予定である。

図２　作成した画像表示ソフト

３．女満別観測施設でのカメラ設置および運用

2022 年 3 月 7 日から 11 日に実施した女満別業務支援出張において、女満別観測施設庁舎屋根の木製櫓にカメラを設置した。カメラからの配線は、屋外部はフレキ管を新たに設置

して庁舎壁のプルボックスから庁舎屋根裏に引き込み、計測室天井から計測室ラックに設置した Ethernet 電源装置まで LAN ケーブル 1 本を通した。外観を図 3 に示す。

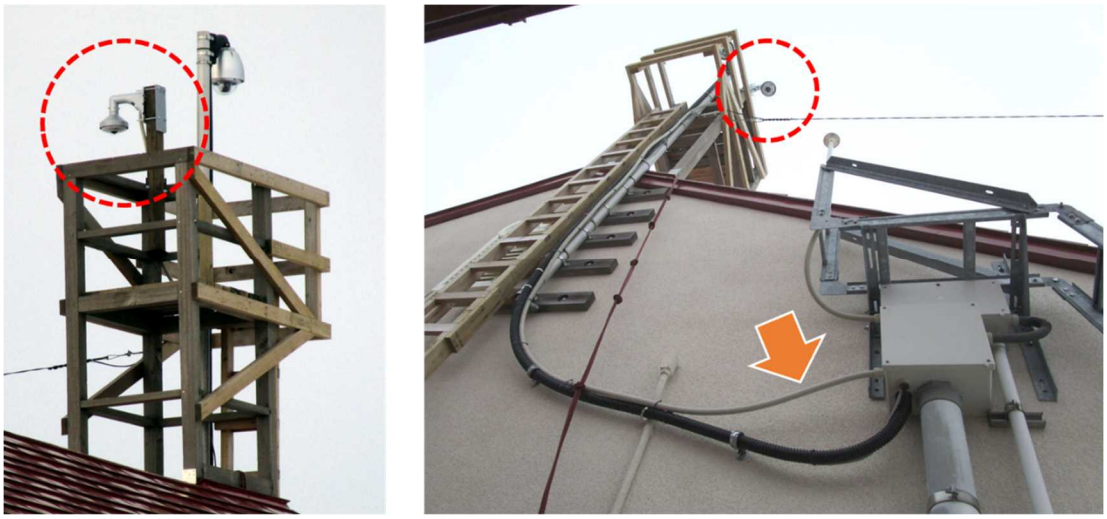


図 3　女満別観測施設に設置したカメラ外観
赤丸が今回設置したカメラ、矢印がフレキ管

2022 年 3 月 10 日から運用を始め、女満別解析端末 PC の FTP フォルダに画像を集積し、1 日に一度フォルダ作成とアーカイブのタスクを実行するようにした。
取得した画像ファイルを図 4 に示す。構内をはじめ施設北側の道路、東側の自動車学校、西側の畑まで 1 枚の画像で確認することができる。

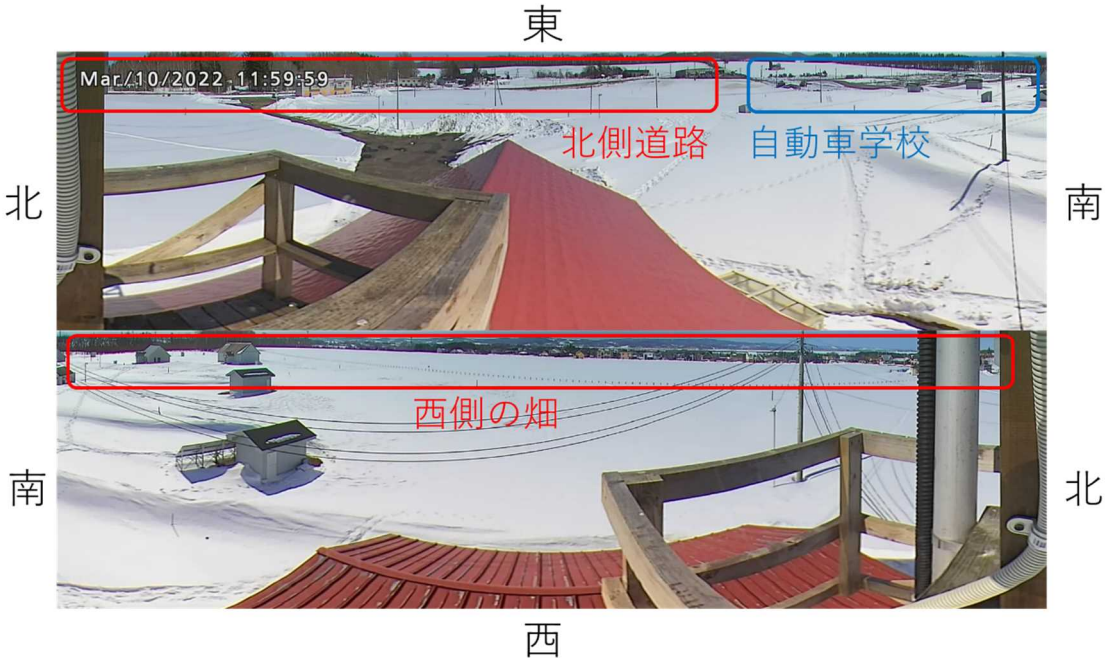


図４　カメラ画像（2022 年 3 月 10 日）

［今後の方針］：

今期間は、女満別観測施設にカメラを設置して画像取得およびアーカイブ構築まで進んだ。今後は、現在の手法である各観測点の磁場の変化量から一つの人工擾乱の位置と磁気モーメントを計算して観測点への影響量を推定する方法を拡張して、取得した画像から複数の擾乱源の位置を特定し、それを基に複数の擾乱源から観測点への影響量を推定するソフトを開発していきたい。