令和2年度

地磁気観測所調査研究業務

成果報告書

重点課題

地磁気短周期現象の情報活用に関わる調査 ・・・・・	•	•	1頁
地磁気絶対観測の自動計測試作器の改良に向けた調査	•	•	21 頁
電磁気による火山活動評価の高度化に関する調査 ・・	•	•	30頁
地磁気ブロマイド記録のデジタル化 ・・・・・・・	•	•	49頁

基礎課題

南極昭和基地の地磁気連続観測値の

絶対値化に向けた調査	•	•	52 頁
地磁気永年変化の経年成分に関する調査・・・・・	•	•	62頁
大気電場の変化と短時間強雨を伴う			
積乱雲の接近の関連の調査	•	•	67頁
機械学習による K 指数判定手法の開発 ・・・・・	•	•	89頁

地磁気観測所

[調査研究の種別]:重点課題

[課題名]:地磁気短周期現象の情報活用に関わる調査(平成 30 年度~令和 2 年度) [担当者]: 〇笹岡雅宏、山崎貴之、海東恵美、吉武由紀、浅利晴紀(技術課)

平原秀行、森永健司(観測課)

[概要]:

電子機器や人工衛星の利用が現在の社会生活に浸透しており、電波障害や急峻な磁場変 化に伴う誘導電流による機器障害など、磁気嵐などの地磁気現象が社会的影響を及ぼすこ とが懸念される。被害を軽減するための方策には、例えば地磁気現象発生とそれに伴う地電 流変動との相関関係の活用や、磁気嵐に先行する ssc などの急変化現象の情報提供などが効 果的と期待され、これら地磁気現象の早期把握が課題となる。地磁気観測所では、長期間に わたり蓄積した地磁気及び地電位差の変化観測データを地磁気現象データベースの登録情 報として整理するとともに、地磁気活動状況の即時提供コンテンツの開発*1、地磁気短周期 現象の統計的調査による適切な Quality(明瞭度、顕著さ)基準値の導出*2、また、変動の 激しい磁気嵐に対応する地磁気誘導電流(GIC)の推定*3,*4 を試みてきた。地磁気現象デー タベースは、現象の諸元(観測時間など)をトゥルースとして参照可能となることによる地 磁気現象の関連研究への支援が、地磁気短周期現象の早期把握のための調査研究及びツー ル開発は、地磁気現象の監視への活用が、それぞれ期待される。

本課題は、高度情報化社会に与える影響を評価するための基礎資料を提供するため、地磁 気変動と地電位差変動の比較解析を進め、地磁気現象の特徴を抽出する。また、地磁気観測 所のデータ活用の促進及び利用者へ利便性向上のため、地磁気短周期現象データベースの 拡充を図るとともに、地磁気短周期現象の早期把握に向けた衛星観測データの有効活用に 係る調査研究、及び地磁気短周期現象を自動検出するツールの開発に取り組む。得られた成 果は現象監視の業務支援として還元する。

- *1 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、2015年3月)
- *2 森永健司、大川隆志、「地磁気急変化現象 ssc 及び si の Quality 判定基準の再検討」、地 磁気観測所テクニカルレポート(第16巻 第01号、2020年3月)
- *3 平原秀行、「女満別の変電所で観測された GIC (Geomagnetically Induced Current)と 女満別観測施設における地電流観測値との比較」、所内技術資料(2019年3月)
- *4 平原秀行、「1960 年 11 月 13 日に発生した観測史上最大の Si (Sudden impulse) による GIC (Geomagnetically Induced Current)の最大推定量」、所内技術資料(2019 年 3 月)

[具体的な計画と達成目標]:

地磁気短周期現象(pi、pc)及び地電流嵐のデータベースの拡充・品質向上を図るとともに、 ひまわり8号搭載の宇宙環境データ取得装置(SEDA)データの有用性の調査、及びpiの 早期情報提供に向けた調査研究として、下記の事項に取り組む。

- 1) 1999 年以前の pi、pc 及び地電流嵐について電子ファイル化を進め、データベースへ登録を行う。
- 2) SEDA データのほか、太陽風観測衛星(ACE)、ジオスペース探査衛星「あらせ」(ERG)に よる衛星データと地磁気変化の比較調査を行い、その有用性を確認する。
- 3) 暫定毎秒値とブロマイド記録デジタル 7.5 秒値を用いて、脈動 pi の検出(発現時刻、周 期、振幅)とそのクオリティ決定を自動で行うツールを開発し、その妥当性を検証する。

[平成 30 年度~令和 2 年度の成果]:

1. 地磁気短周期現象(pi、pc)及び地電流嵐のデータベースの拡充

本研究期間で作業した成果について下記のよう表にまとめ、報告とする。

①原簿の PDF 化:

1999年4月以前の地電流嵐について原簿のスキャンを行い PDF 化した。

②piの集計表入力およびデータ公開:

すでに PDF 化された原簿をもとに、pi について集計表エクセルシートに入力を行った。

入力した集計表を、入力者とは別の担当者が入力内容に誤りがないか精査を行い、確認が とれた期間については外向け HP でデータを公開した。

③pc のデータ公開:

すでに入力されたデータのうち、精査し確認がとれた期間については外向け HP でデータ を公開した。

④データベース登録関連:

所内イントラ HP で 1997 年以前の脈動現象に対応できるよう Web データベースを改良 した。また、精査を進めている期間の pi と pc のデータを所内イントラ Web のデータベ ースに登録し閲覧できるようにした。

	現象	柿岡	女満別	鹿屋	
原簿の PDF	地電流	1062 1 - 1000 2	1060 7 - 1000 0	1962.7~1999.3	
化	嵐	1902.1~1999.3	1902.7~1999.3		
集計表	ni	1957.7 ~ 1958.12	1057 7~ 1090 12	1958.1~1998.12	
入力	рі	1997.6 ~ 1998.12	1937.7** 1980.12		
ᇣᄵᄪ	pi	1997.6 ~ 1998.12	1997.4~1998.12	1996.6~1998.12	
	рс	1997.6~1998.12	1997.4~1998.12	1996.6~1998.12	

表 本研究期間に実施した作業の成果

2. 気象衛星ひまわりによる宇宙環境データ (SEDA) の有用性の調査

2.1. SEDA データ

静止衛星ひまわりは、およそ 6.6Re(Re:地球半径)の放射線帯外帯に位置しており、 SEDA(Space Environment Data Acquisition monitor)は静止軌道上の宇宙環境をモニタす る目的で陽子線および電子線を計測し、衛星のハウスキーピングおよび故障解析に用いる ことを目的に設置している。

電子線は1 個の電子センサに、測定エネルギー感度の異なる8 個のプレートを直列に配置し、0.2MeV~5MeV のエネルギー範囲の電子線の計測を行っている¹。

SEDA データの観測値は科学目的ではないため、キャリブレーションは行われておらず、 絶対値を表すものではない。



図 1. 電子線センサのエネルギー感度特性 (「静止地球環境観測衛星「ひまわり 8 号及び 9 号」の宇宙環境データ 取得装置(SEDA)概要(2012/9/11 気象庁作成)」に加筆)

2.2. 周期7分の周波数変動現象の解析

2.2.1. 周波数変動現象

SEDA データでみられる特徴的な周期変動について、周波数解析の調査方法を検討した。 周期変動の例として、2017 年 6 月 6 日のひまわり 8 号の ch1 の電子フラックスを図 2 に示 す。



7時および10時付近に特徴的な周期変動現象がみられる。このような周期変動は、SEDA データプロットで頻繁にみられる。この周期変動が出現する傾向を、2017年1月から12月 までのch1電子フラックスデータを使って調査した。

2.2.2. 周波数の調査

周期変動の代表的な例として、2017 年 6 月 6 日の 10 時から 5120 秒間(512 個)のデー タを使って、FFT 解析を行った。データと FFT の結果を図3に示す。周期は 7.11 分とな り、おおむね7分間の周期であることがわかった。



2.2.3. ウェーブレット解析

特徴的な周期変動の成分の抽出するため、ガボールウェーブレット変換を用いて周期7分 のパワーを算出した。

ウェーブレット変換は、次式で定義される。

WT(a, b) =
$$\frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)}$$

aは周波数の逆数、bは時間に対応する。

また、ガボールウェーブレット関数 $\psi(t)$ は、次式で与えられ、

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} e^{i\omega t}$$

 σ は窓の幅を示す定数、 ω は角速度、tは時間である。



周期が7分で、 $\sigma=0.5$ および $\sigma=1$ のときのウェーブレット関数を図4に示す。

2017 年 6 月 6 日の 6 時から 12 時までの SEDA データについて、 $\sigma=0.5$ 、 $\sigma=1$ それぞれのウェーブレット関数を掛け合わせて得られるパワー値を、10 分ごとに求めた。その結果を図 5 に示す。



 σ =0.5 は、 σ =1 の結果に比べて、時間分解能が高いことがわかった。また、いずれの σ についても、周期変動に対してよい対応を示すことがわかった。今回の調査は、特徴的な周期変動の出現特性を見る目的なので、 σ =1 を採用して調査を進めた。

2.2.4. 計算結果

2017 年 3 月 24 日の結果を図 6 に示す。周期 7 分の変動が 0 時から 5 時ごろまで検出で きているが、ch1 で頻繁にみられるインパルス状の変動について顕著にパワーが現れている ことが見て取れる。今回のウェーブレット解析では、調査のきっかけとなった地磁気でいう Piのような変動ではなく、Siのようなインパルスの出現特性を見ることになった。



図6 2017年3月24日のch1電子フラックス(上)とウェーブレットパワー(下)

2017 年1月1日から12月31日までのウェーブレットパワーを図7に示す。上段に太陽 風平均速度、中段に各日のパワーの積算、そして、下段に世界時におけるパワーの強さを 濃淡で表した。下段からは衛星の位置(観測時刻)における出現依存性は見られなかっ た。



(中) ウェーブレットパワー積算、(下) 縦軸世界時におけるパワー

電子フラックスの突発的な変動は、太陽風平均速度の変動に依存しているようにみえ る。2017 年前半の約 27 日の周期的な変動から、2017 年後半の小刻みな変動に変化してい るところが太陽風平均速度の変動と類似している。このことから、突発的なフラックス変 化は、太陽活動に依存していることが考えられる。

2.3. SEDA データとジオスペース探査衛星「あらせ」(ERG)との比較

2.3.1. 放射線帯における電子フラックス増加

静止軌道領域の外帯電子フラックスは、コロナホール流到来時に大きく増加することが 知られている²。電子エネルギーフラックスの増加と太陽風速度の関係を、2017年前半の SEDA データおよび ace 衛星データから求めた。SEDA データは、変動が見られた ch1(200keV)から ch7(5Mev)の7つのチャンネルデータを用いた。

2017 年前半の太陽惑星間空間は、コロナホールによる太陽風速度の増加が周期的に発生しており、電子フラックス増加の特徴を見るには好都合である。

図8に2017年1月から6月の電子フラックス(ch1-ch7)、太陽風速度および柿岡地磁 気水平成分を示す。電子フラックスは明瞭な日変化をしており、昼間が夜間より高い。



図8 2017年1月から6月の電子フラックス、太陽風速度および柿岡地磁気水平成分 太陽風速度が増加した日(赤ハッチ)の太陽面画像。黒い部分がコロナホール。

図8から周期的に太陽風速度が増加し、それに伴い各チャンネルの電子フラックスが増 加していることが見て取れる。このことから、観測される高エネルギー電子は太陽起源であ り、地球の磁気圏に捕捉されていることがわかる。図9に4月20日から5月1日までのデ ータと、4月20日の太陽面画像を示す。





図 9 2017 年 4 月 20 日の SDO_AIA193 カメラによる太陽コロナ(左)と、2017 年 4 月 18 日から 5 月 1 日までの SEDA データ、太陽風速度および柿岡地磁気水平成分(右)

この調査で明らかになったことは、低エネルギー電子フラックス (ch1-ch4) は、コロナ ホール流が到達するころに増加する傾向がみられた。一方、高エネルギー電子フラックス (ch5-ch7) は、太陽風速度のピークが過ぎてから増加する傾向がみられた。その傾向は、 エネルギーが大きくなるにつれて太陽風速度のピークより遅くなっている。

2.3.2. 高エネルギー電子フラックスの遅れ

図8の明瞭な前半6回のコロナホール流による電子フラックス増加について、各チャン ネルのピークと太陽風速度のピークとのずれを求めた。前項で述べた通り、電子フラックス は日変化をするので日平均値を使った。太陽風速度がピークになった日を起点日として前3 日間、後8日間の電子フラックスの日平均値を規格化して表示した。結果を図10に、計算 結果を図11に示す。

ch1、ch2 および ch3 は太陽風速度のピークから 1 日後、ch4 および ch5 は 2 日後、ch6 は 4 日および 5 日後、ch7 は 5 日後となり、電子フラックスのピークは、エネルギーが高く なるにつれて、遅くピークをむかえることがわかった。また、低いエネルギー電子フラック ス (例えば、ch1) が減少していくときに高いエネルギー電子フラックスが上昇している。



図 10 7回のコロナホール流到達時の電子エネルギーフラックスの日変化 電子フラックスは最大値で規格化しており、太陽風速度は7回の平均値である。

	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	ch6	ch7
-3	0.46	0.46	0.44	0.36	0.27	0.25	0.63
-2	0.47	0.46	0.43	0.35	0.26	0.25	0.63
-1	0.64	0.54	0.46	0.36	0.26	0.23	0.63
0	0.96	0.83	0.72	0.61	0.49	0.39	0.67
1	1.00	1.00	1.00	0.98	0.90	0.75	0.79
2	0.94	0.95	0.97	1.00	1.00	0.91	0.87
3	0.88	0.92	0.94	0.94	0.94	0.92	0.91
4	0.79	0.84	0.89	0.93	0.97	1.00	0.98
5	0.62	0.69	0.77	0.84	0.92	1.00	1.00
6	0.52	0.56	0.60	0.63	0.69	0.80	0.91
7	0.43	0.44	0.45	0.46	0.49	0.55	0.78
8	0.40	0.39	0.36	0.31	0.28	0.35	0.70

図11 各チャンネルの計算結果。四角い枠が太陽風速度のピークの日。

2.3.3. ジオスペース探査衛星「あらせ」(ERG)との比較

前項で示された、より高い電子エネルギーフラックスが遅れて観測される現象は、高いエ ネルギーの電子ほど太陽から遅れて到達するのではなく、放射線帯で励起されたコーラス 放射による波動粒子相互作用によって、外帯電子が加速されエネルギーが高くなることが 最近の考え方の主流になっている³⁴。

コーラス放射との関連を調査するため、ジオスペース探査衛星「あらせ」(ERG)のデー タを使用して比較した。「あらせ」衛星は、ヴァン・アレン帯に存在する高エネルギー電子 を直接観測するための探査衛星で、2016 年 12 月 20 日に打ち上げられた⁵。衛星に搭載さ れたプラズマ波動・電場観測器(PWE)の観測データから求められたコーラス放射(電場)バ ーストリスト⁶を用いて、1 日ごとのコーラス放射継続時間を算出した。ここで求めたのは 継続時間であり、放射強度ではない。

2018 年 8 月 1 日から 9 月 30 日までの SEDA データ ch1、ch4、ch7、柿岡地磁気 H 成 分、柿岡 K 指数日合計値および「あらせ」 衛星コーラス放射継続時間(秒)を図 12 に示す。

赤枠の8月15日から22日までは、低い電子フラックスは増加しているが、高い電子フ ラックスは増加していない。この期間はコーラス放射継続時間が短かった。

一方、緑枠の8月25日から9月1日までは、コーラス放射継続時間が長く、高い電子フ ラックスが増加した。また、矢印の9月17日の高い電子フラックスの増加は、前日のコー ラス放射継続時間が長く、コーラス放射によって一時的にフラックスが増加したものと考 えられる。このことから、高い電子エネルギーフラックスの増加は、現在の主流の考えを支 持する結果となった。また、コーラス放射は柿岡地磁気水平成分から、地磁気嵐の回復相で 長く発生することも確認できた。



図 12 2018 年 8 月 1 日から 9 月 30 日までの SEDA データ ch1、ch4、ch7、 柿岡地磁気 H 成分、柿岡ΣK および「あらせ」衛星コーラス放射継続時間

2.4. SEDA データの柿岡フォーマット編集

磁気観測所が取得している SEDA は、図 13 に示すように JDDS(JMA Data Dissemination System)から 10 秒ごとの値をテキストデータで取得している。一般ユーザには、NICT を 通じて 5 分間平均値が公開されており、我々が取得しているデータは、5 分以内の現象の事 例解析に関しては大きなアドバンテージがある。

テキストデータは、地磁気観測所総合処理装置のデータベース

¥¥ fs0 ¥ dbp ¥ SEDA ¥ daily ¥

に衛星と項目ごとに1ファイルで格納され(2衛星、2項目で1日4ファイル)、その容量 は、1つファイルで1.1MBである。また、何らかの原因でデータが途絶えたときに、新た なファイルが作成され、データ処理が煩雑になることがあった。



図 13 SEDA データのデータ提供の流れ

このデータを地磁気観測所内で誰もが自由に簡単に調査できるように、平均毎分値とし て地磁気データと同じ柿岡フォーマット毎分平均値ファイル7として、1日1回(02:10UTC) 作成してデータベースに格納するようにした。この柿岡フォーマット毎分値ファイルは、1 か月1ファイルのバイナリデータで構成され、データ容量は、31日分で 372KB である。 また、柿岡フォーマットファイルは地磁気観測所で地磁気データプロットに使われている 独自ソフト pg6mag⁸で表示することができる。

柿岡フォーマット毎分平均値ファイルの格納先は、

¥¥ fs0 ¥ dbp ¥ SEDA ¥ mm ¥ mmYYYY (YYYY は西暦)

である。

柿岡フォーマットの特性を考慮して、各チャンネルに係数をかけた毎分平均値を収録している。その説明文と代表的な表示パラメータを同じフォルダに保存している。2021 年 1

月のひまわり9号の電子および陽子のフラックス表示画面を図14に示す。



図 14 独自ソフト pg6mag で表示した 2021 年 1 月の 電子フラックス(左)と陽子フラックス(右)

- 2.5. まとめ
- 2.5.1. 周期7分の周波数変動現象の解析

2017 年の ch1 電子フラックス SEDA データを、周期7分のウェーブレット関数でパワー を求めたところ、突発的なフラックス変化に対応したパワーの出現特性を調べることがで きた。このパワーの日変化を太陽風平均速度と比較したところ、その周期的な変化が類似す ることが分かった。このことから、突発的なフラックス変化は、太陽活動に依存しているこ とが示唆された。

2.5.2. SEDA データとジオスペース探査衛星「あらせ」(ERG)との比較

高い電子フラックスの増加は、太陽風によって磁気圏に浸入した低いエネルギー電子が、 コーラス放射によって加速されることが、SEDA データおよびジオスペース探査衛星「あら せ」(ERG)観測データから確認できた。

2.5.3. SEDA データ利用ツールの整備

地磁気観測所内で各自が自由に SEDA データを調査できるように、毎分平均値の柿岡フ ォーマットを毎日作成しデータベースに格納するように整備した。このことにより、独自ソ フト pg6mag で SEDA データの変動現象を簡単に把握できるようになった。また、10 秒値 での解析は、元のテキストデータを使っていくことになる。

参考文献など

横田 寛伸、佐々木 政幸「静止地球環境観測衛星「ひまわり8 号及び9 号」の紹介」 気 象衛星センター技術報告 第58号 2013 年 2 月.

小野高幸ほか、太陽地球圏(共立出版) 2012.

Miyoshi, Y., et al.(2003) J. Geophys. Res., 108, 1004, doi:10.1029/2001JA007542.

東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻 加藤雄人教授 私信. http://www.isas.jaxa.jp/missions/spacecraft/current/erg.html https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp/data/ergsc/satellite/erg/pwe/wfc/ancillary/ 観測資料作成編集細則 第2章 2-3-1 毎分値ファイル 業務用プログラムデータベース (イントラホームページ) http://192.168.1.234/program_kanri pg6mag Ver.5.00 (2016 年 2 月 26 日)

3. 地磁気脈動 pi の早期情報提供に向けた調査研究

3.1. pi 諸元の自動検出のテスト

暫定毎秒値から自動で pi を検出し、各 pi 諸元(発現時刻、振幅(最大変化量)、周期)のリ ストを作成する処理プログラム*1を用いて、女満別及び柿岡について pi 検出のテストを行 った(図1及び図2)。図1及び図2について、2018年以降の特に女満別に関してX成分に 比べてY及びZ成分は相関が認められる。このことから2017年以前の過去データを用い た pi 諸元の経年変化の調査においてはZ成分を省いてX及びY成分のみを算出すること とし遡って計算した。また、5秒毎の検出にすることにより、計算時間を毎秒検出の場合の およそ3分の1にまで短縮することができた。pi 諸元の月統計の確からしさを確保するた めに、短周期の異常値を検出した場合を除去する簡単な自動処理を作成したが、pc や si な ど他の急変化を伴う地磁気現象、人工擾乱、感度入力などが原因の不要な検出などについて は、除去しきれなかったため、可能な限り目でチェックして取り除いた。

検出数について、女満別は X 成分より Y 成分のほうが多く、柿岡は Y 成分より X 成分の ほうが多い。これは地磁気観測所における観測者の手動読取りの経験と一致する。周期につ いて、柿岡は X 成分と Y 成分に女満別ほど差が無いようにみえる結果となった。太陽活動 が期間中最も低調であった 2009 年頃には、女満別、柿岡とも pi 検出数が少なく、周期が 大きい傾向となることも、これまでの手動読取記録により得た知見と調和的な結果である (この自動 pi 検出手法による結果は、地磁気観測所の内部規定による Quality が C 以上の pi についてのみカウントしたものとは異なるものであることに留意)。

一方、この pi 諸元の自動検出手法では、地磁気観測所の手動読取りの対象となっている pi シリーズの開始と終了時刻の情報が取得できない。現在、地磁気観測所では、pi の Quality については pi の振幅の大きさに基づいてクラス(A、B、C)を決定しているが、pi か他の 地磁気現象等であるかどうかについては観測者の目で判断している。自動で pi 諸元を検出 するという目的のためには、pi と他の地磁気現象等を区別する Quality の自動決定手法の 開発が必要であると考える。

13



図 1 女満別 3 成分(X,Y,Z)における pi の月検出数(N)と月平均周期(T) (2015 年 1 月~ 2022 年 2 月)

(上段)各成分の月検出数、(下段)各成分の月平均周期



図2 柿岡3成分(X,Y,Z)におけるpiの月検出数(N)と周期(T)の月平均(2015年1月~2022 年2月)

図1と同様

3.2. piの Quality の自動決定手法の開発

先行研究*1では、2012年の女満別 pi について手動読取記録と自動検出した pi の諸元の 比較(66事例)のうち Quality(AとBのみ)の一致割合は70%と低かった。これは、手 動読取記録では、0.1 秒値のグラフから数値を読み取っているのに対して、自動検出では毎 秒値を用いた違いがあるためである。ここでは、女満別の pi の報告基準 (A≥6nT, 6nT>B>3nT, 3nT>C≥1nT) に対して、自動 pi 検出用の基準を作って、Quality の一致割 合の向上を図る。先ず手動読取と自動検出との差を X 及び Y 成分毎に求めた (図 3)。





図 3 中の X、Y 成分及び両成分のうち振幅の大きい方について、差の平均はそれぞれ、-0.3 (±0.5)nT、-0.3 (±0.7)nT、-0.5 (±0.6)nT であった。女満別の pi 報告基準にこれらの差を 反映させると、Quality の一致割合はそれぞれ、83%(X、Y 成分)、89%(pi の振幅が大き い方の成分)となり、いずれも 8 割以上となり改善した。手動読取記録は、pi の振幅が大 きい方の成分を採用しているので、後者の方がより一致する結果となったと考えられる。pi 自動検出用の Quality の基準を作成することにより、手動読取記録と調和的な Quality を 得ることが可能であることが示された。

次に、方位選択性ニューロンに基づくニューラルネットワークを用いて、pi と他の急変 化を伴う地磁気現象を自動で区別するためのツールの開発を進めた経過について報告する。 ニューロンの 3 層モデルを用いて、トレンドを除いた時系列(180s)を入力値として、ネ ットワークの出力パターンから Quality の A、B、C を決定する。一般的な地磁気現象の Quality の意味は、A は"非常に確からしい"、B は"確からしい"、C は"疑わしい"である。

図4は、piとsscに対して自動決定されたpiのQualityを図中に記載しており、手動読 取記録との整合性が取れた結果を示す。また、Quality自動決定を毎分繰り返し、AとBを 1、Cを0と置き換えると、piシリーズの期間を示す時系列を得る。図5は、3つのpiシリ ーズの期間と全体のpiシリーズの開始時刻と終了時刻を示唆する。



(左) piのQuality、(右) ssc に対する piのQuality



図 5 女満別の pi の期間における Quality の例 (A, B = 1, C = 0)

但し、pcのような連続して出現する脈動についても pi の Quality の自動決定では A や B を付与することがある。このことは、180s 程度の期間では、急変化の特徴から pi と pc の区別がつかないことがあることを示す。一方、熟練した観測者は、ローカルな急変化の 特徴だけでなく、シグナルの継続性を判断して pi と pc を区別している。シグナルの継続 性が Quality の決定に反映されるように、入力値の長さを 180s から 600s に変更したとこ ろ、pc に対して Quality が C と判定する区間が増加した(図 6)。



⁽上) 180s の入力値、(下) 600s の入力値を用いた場合

方位選択性ニューロンのネットワークモデルを用いた pi の Quality の自動決定法から、 地磁気観測所では現状手動読み取りの必要のある pi シリーズの開始と終了の時刻の情報が 得られることを示した。pc などの他の急変化現象に対しては、シグナルの継続性を入力値 に反映させるように取り扱うことにより、pi を否定する決定ができるかもしれない。

今後は、本ニューラルネットワークのパラメータの調整を図りつつ、piと他の急変化を 伴う地磁気現象を自動で区別できる確度を高めたい。内容については論文にまとめる予定 である。

3.3. ブロマイド記録デジタル 7.5 秒値から自動読取りした pi 諸元の検証

ブロマイド記録から求めたデジタル 7.5 秒値(以下、ブロマイド 7.5 秒値)について、デジ タル毎秒値を用いて比較検証した結果について述べる。本検証は、柿岡において同時平行観 測を行っていた期間中の 1994 年 4 月及び 8 月のブロマイド 7.5 秒値(技術課増子氏から提 供されたブロマイド記録のデジタル毎分値化による検証済みデータ)とデジタル毎秒値を 用いた。図 7 に両データからの pi 検出頻度分布を示す。ブロマイド 7.5 秒値の頻度分布は、 周期 80s 以上の検出頻度が大きい、周期 80s 以下の検出が少ない。 ブロマイド 7.5 秒値とデジタル毎秒値からそれぞれ検出した pi の周期と振幅の比較結果 を図 8 に示す。検出された全ての pi が比較できることはなかった。両データの比較に際し ては、発現時刻が概ね一致するデータについて、同じ pi イベントの諸元と判断し比較可能 としたが、一方のリストに該当する検出例が無ければ比較不能とした(図 8 左)。比較可能な ブロマイド 7.5 秒値のほうの割合は、X、Y、及び Z 成分について、82%、53%、及び 65% であり、X 成分は比較できた割合が高く、Y 及び Z 成分については同程度で低かった。周期 比較に関しては全体的に良い一致が見られる(図 8 中)。検出された全ての pi の平均周期は、 ブロマイド 7.5 秒値のほうがデジタル毎秒値に対して、X 成分は+11s、Y 及び Z 成分は共 に+9s の偏差がみられた。また、振幅比較ではデジタル毎秒値のほうがブロマイド 7.5 秒 値よりも全体的に大きい(図 8 右)。両データの間に、pi の周期について整合性がみられた。



図 7 自動 pi 検出による柿岡 3 成分(X,Y,Z)の周期(T)の頻度分布(1994 年 4 月及び 8 月) (左)ブロマイド 7.5 秒値、(右)デジタル毎秒値を用いた結果



図 8 柿岡 3 成分(X,Y,Z)の周期(T)及び振幅(最大変化量)の比較結果(1994 年 4 月及び 8 月)





図 9 デジタル毎秒値の時系列とフーリエ変換(X 成分 1994 年 4 月 2 日 14:00-15:00) (上左)デジタル毎秒値と(上右)そのフーリエ変換、(下左)ウェーブレット分解後のデジタ



図10 ブロマイド7.5秒値の時系列とフーリエ変換(X成分 1994年4月2日 14:00-15:00) (上左) ブロマイド7.5秒値と(上右)そのフーリエ変換、(下左) ウェーブレット分解後のブ ロマイド7.5秒値と(下右)そのフーリエ変換

一方、デジタル毎秒値からのみ pi が検出されることがあり、ブロマイド 7.5 秒値はデジ タル毎秒値よりも振幅が小さく短周期成分が少ない。また、ブロマイド 7.5 秒値からのみ pi が検出されることもあり、原因が特定されない事例、並びにデジタル毎秒値では読取りにく い pi をブロマイド 7.5 秒値からは検出される事例などがある(図8右図に示すように、各成 分の pi の振幅は 1nT 以下が多く、ブロマイド 7.5 秒値から卓越周期が検出されても、デジ タル毎秒値からは当該周期の振幅が小さく pi として検出されないことがある)。

図9及び図10は、デジタル毎秒値及びブロマイド7.5秒値について、ウェーブレット分 解により短周期成分を除く前後の時系列とフーリエ変換を示す。両図の比較は、デジタル毎 秒値に含まれる短周期成分を除けば、デジタル毎秒値とブロマイド7.5秒値の変動成分は基 本的に似ていることを示唆する。即ち、ブロマイド7.5秒値は、短周期成分を除いたデジタ ル毎秒値に近い。ウェーブレット分解後の時系列の比較について、特に後半時間(緑線囲い) はよく似ている(図9下左図と図10下左図)。

pi の周期別頻度分布に偏りが生じる可能性のある原因には、ブロマイド 7.5 秒値におけ る短周期成分の欠如が挙げられる。吊り磁石変化計においては、振動する吊り磁石から印画 紙への感光は短周期変動から pi を検出するのに十分な振幅を記録しないため、ブロマイド 7.5 秒値を用いて求めた pi の周期別頻度分布には 80s 以上の区間に偏りが生じることが示 唆された。調査した内容については地磁気観測所内技術資料にまとめた。

参考文献:

*1 笹岡雅宏、「ウェーブレット解析及びファジィ・ロジックを用いた地磁気脈動 Piの 諸元の自動読取り手法」、地磁気観測所テクニカルレポート(第14巻 第02号、2017 年8月)

[成果の発表]:

笹岡雅宏、「女満別における自動読取り手法により検出した脈動現象 Pi の周期に関する統計的特徴」、地磁気観測所テクニカルレポート(第15巻第01号、2019年3月)
笹岡雅宏、「ブロマイド 7.5 秒値から自動読取りした Pi 諸元の検証」、所内技術資料(2020年3月)

[調査研究の種別]:重点課題

[課題名]:地磁気絶対観測の自動計測試作器の改良に向けた調査(平成 30 年度~令和 2 年 度)

[担当者]: 〇平原秀行、仰木淳平(観測課)、海東恵美、浅利晴紀(技術課) [推進責任者]:船山 亘(観測課長)

[概要] :

地磁気観測は連続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。 連続観測は自動化されているが、絶対観測は手動で行っているのが現状である。絶対観測を 自動で行なうことができれば、観測の頻度をあげることで連続観測値の精度向上などが期 待できる。この絶対観測の自動化を目指し、海外で開発が進められている自動絶対観測装置 の試験・評価を実施し、問題点の整理と改良の可能性を探り、導入のための技術的検討を行 う。また、観測点環境に適した装置への改良や保守を容易にするため、現在の絶対観測基線 値を補間するような自動計測器の開発を目指して、国内での独自開発に向けた調査を実施 する。

[具体的な計画と達成目標]:

1. 海外で開発されている装置(AutoDIF)の安定性調査を行う。

2. 弱磁場方式による絶対観測手法の検討を行う。

[成果]:

1. 海外で開発されている装置(AutoDIF)の安定性調査

ベルギー王立気象研究所(RMI)が開発した自動絶対観測装置 AutoDIF の柿岡での試験 観測データを精査し、精度、安定性を評価した。回転駆動部の不良により、前調査研究期間 の 2017 年 12 月から測定を停止していた AutoDIF は、2018 年 4 月 25 日に RMI の技術者 が来所し調整して復旧した。



図1 比較制御室での設置風景 2016年5月24日 一番左はベルギー王立気象研究所(RMI)のラッソン氏

また、2017 年 9 月から 2018 年 12 月にかけて DI-72 の観測日に比較制御室の西台で FT 型 磁気儀よる観測を実施し、AutoDIF の観測値と比較した。その結果、以下のことがわかった。

- 日単位程度の短期間では約0.1分の不確定がみられた。
 これは、比較制御室と測器との地点差の影響の可能性がある。(図2)
- ② 数か月程度の長期間では、約0.3分の不安定がみられた。(図3)
- ③ 方位標測定が特に冬季に不安定になった。(図4)
- ④ AutoDIFの構造から、磁気儀の中心位置が不明確であり、別の経緯儀を 用いて方位標の真方位角を求めてもそのまま AutoDIF に適用させること はできない。

以上のことから、AutoDIF は地磁気観測所で採用することはできないと結論付けた。



図 2 絶対観測値(I 成分) 2018 年 5 月 22 日~2018 年 6 月 3 日



図3 絶対観測値(I成分) 2018年4月20日~2018年12月26日



図4 方位標測定月別回数(青:成功,赤:失敗)

2. 弱磁場方式による絶対観測手法の検討

地磁気絶対観測の自動計測試作器の調査にあたり、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。

令和元年度は、FT型磁気儀を用いて弱磁場方式による絶対観測の有用性を調査した。その目的は、弱磁場方式の導入によって想定される業務効率化の程度を調査することである。 弱磁場方式自体はFT(Fluxgate-Theodolite)磁気儀が登場した当初(80年代後半)から存在 しており、

測定環境が悪くても実施しやすい。

習得が容易である。

観測者がメガネなどの磁性物を身に付けていても実施できる。

というメリットがある。

一方、地磁気観測所で一貫して業務で採用されてきたゼロ磁場方式は、上記の面では必ず しも都合が良いとは言えない。特に、初心者がゼロ磁場方式でまず直面する課題が「微調に よるゼロ磁場合わせ」であり、この操作にはある程度の集中力と技量が要求される。

弱磁場方式は、この過程が無いことから、初心者に習得しやすく、また野外など比較的酷な環境でも実施しやすい。また「テイ」の際に観測者は磁気儀から十分に離れられるため、 磁性のあるパソコンを使って記録を行う業務においても全て単独で実施することが可能で ある。

弱磁場方式による絶対観測の普及が特に進んでいる欧州では、多数の地磁気観測所にて 同方式がルーチン業務として導入されている。そこで、東京大学地震研究所の支弁によりド イツのニーメック地磁気観測所に滞在し、弱磁場方式の実技的な研修を受けるとともに基 線値の算出方法を調査した。また、フランスのパリ大学の支弁によりシャンボンラフォレ地 磁気観測所に訪問する機会も得たので、同所で業務化されている弱磁場方式の手順および 基線値の算出法について調査を行った。

ニーメック観測所(NGK)

滞在期間:令和元年10月29日~11月12日(14日間)

応対者: ユルゲン・マツカ博士、カトリン・トルノウ氏

地理座標:52.07°N 12.68°E (磁気緯度:51.66°N)

磁気儀: Zeiss THEO 010B (度分秒) + Bartington Mag-01H

絶対室: 器械台 16 個、スカラー磁力計無し、基準台と記録机との距離 4m

方位測定:構外の給水塔を方位標とする(窓開放、距離約1.2km、真方位はGNSS測位 による)

観測回数:絶対観測日は週に1日、2回×8姿勢(1回につき野帳1枚)

観測内容:担当所員(磁性有り)による1回の所要時間約20分、

器械台と記録机の距離約4m、方位読み取り単位1"

〔方位測定〕合わせ直し有り、ベース読み無し

センサーup2回 down2回(偏角測定の前後に1セットずつ)

〔偏角測定〕弱磁場追い込み有り(±5.0nT以内)、水平目盛値読み直し有り

各姿勢につき水平目盛値読み取り2回、弱磁場値の読み取り2回

〔伏角測定〕弱磁場追い込み有り(±5.0nT以内)、垂直目盛値読み直し有り

各姿勢につき垂直目盛値読み取り2回、弱磁場値の読み取り2回

〔全磁力測定〕無し(地点差を既知とする)

<u>シャンボンラフォレ観測所(CLF)</u>

滞在期間:令和2年2月6日(1日間)

- 応対者: ヴァンサン・ルスュ博士、ブノワ・ウメ氏
- 地理座標:49.02°N 2.27°E (磁気緯度:50.41°N)
- 磁気儀: Zeiss THEO 010B(グラード) + Bartington Mag-01H
- 絶対室: 器械台4個、スカラー磁力計有り(GEM オーバーハウザー)
- 方位測定:構内の方位標を用いる(ガラス窓越し、距離約 50m、真方位は GNSS 測位に よる)
- 観測回数:絶対観測日は週に2日、2回×8姿勢(2回で野帳1枚)
- 観測内容:担当所員(磁性無し)による1回の所要時間約10分、
 - 器械台と記録机の距離約1.5m、
 - 方位標の方位読み取り単位 0.0001 グラード(0.324")、
 - 磁場測定における設置方位の単位 0.1 グラード(5.4)
 - 〔方位測定〕合わせ直し無し、ベース読み無し
 - センサーup1回 down1回(偏角測定前と伏角測定後に1セットずつ)
 - 〔偏角測定〕弱磁場追い込み無し(数十nT程度)、水平目盛値読み直し無し 全姿勢に対し水平目盛値読み取り1回、
 - 各姿勢につき弱磁場値の読み取り1回
 - 〔伏角測定〕弱磁場追い込み無し(数十nT程度)、垂直目盛値読み直し無し 全姿勢に対し垂直目盛値読み取り1回、
 - 各姿勢につき弱磁場値の読み取り1回
 - 〔全磁力測定〕有り(方位測定の前)

実際に柿岡で、FT型磁気儀 Kak No.3 を用いて比較較正室西台にて観測を行った。ここでは、調査を担当する2名に加えて協力者として、ゼロ磁場方式による絶対観測の経験が少ないもしくは殆ど無い所員が調査に当たった。

手順と野帳はニーメック地磁気観測所にて習得した「ニーメック式」に従った(ただし方 位標測定にはベース読みを追加した)。磁気儀と記録机は2mほど隔てられており、観測者 は試験的に非磁性の装いに着替えなかった。概要を表1に示す。

観測者	ゼロ磁場方式 の経験	観測者の磁性	観測日	観測回数	平均所要 時間(分)
1	ほぼなし	眼鏡・ベルト(≃5nT)	12月5日	1	53
2	少ない	眼鏡(≃0nT)	12月6日	1	39
3	ほぼなし	補聴器(≃2nT)	12月9日	1	77

表1 弱磁場方式による観測の概要

4	十分あり	腕時計(≃1nT)	12月11日	2	24
5	十分あり	眼鏡(≃3nT)	12月11日	2	22

観測で得られた Kak No.3 器差により観測結果を評価した(図5)。5 名の観測者による計 7 回の観測から得られた伏角と偏角の標準磁気儀 DI-72 との差は、それぞれ 0.1'以内に収 まった(ただし、異常値が含まれていた偏角の観測の1つを除く)。

よって、観測の容易さに反し、精度に関してはゼロ磁場方式と比較しても遜色のない結果 が示唆された。



令和2年度は、FT型磁気儀を用いた弱磁場方式による絶対観測の有用性をさらに調査し、 観測精度をゼロ磁場方式と比較した。今回は連続2回の絶対観測を行い、16通りの4姿勢 で得られた標準磁気儀 DI-72 との差の平均値および標準偏差を、令和2年度までに行った ゼロ磁場方式の絶対観測の結果と比較した。

FT 型磁気儀 Kak No.3 を用いて比較較正室西台で観測を行い、弱磁場方式は 35 回、ゼロ磁場方式は 27 回の結果を得た。偏角および伏角の測定結果を図 6 に示す。



図 6 弱磁場方式とゼロ磁場方式の観測結果。(上) 偏角、(下) 伏角。 エラーバーは観測値 16 個の標準偏差 ±1 σ を示す。

観測の効率化を図るうえで最も重要な観測時間は、ゼロ磁場方式が平均 56 分 09 秒に対し、弱磁場方式は 44 分 24 秒と約 12 分間(20%)の時間短縮効果があった。

また、観測精度は、長期的な観測値のばらつきは、偏角、伏角とも 0.1' 程度であった。 1 観測(2回連続観測)における観測値のばらつき(ここでは、標準偏差±1g)は、伏角は 弱磁場方式、ゼロ磁場方式ともに同程度だったが、偏角に関しては、弱磁場方式の標準偏差 がゼロ磁場方式のよりも大きな値になった。

この標準偏差は、地磁気観測所では観測の有用性の目安にしており、柿岡では標準偏差 σ=0.03′を超えた場合、1観測のばらつきが大きいとして再観測をしている。今回の弱磁 場方式の偏角観測は、35回中14回(40%)が採用基準を満たした結果となり、ゼロ磁場方 式の70%より成績が悪かった。

父島地磁気観測点については、この目安が標準偏差 σ =0.3' となっているため、すべて の観測について採用基準を満たしていた。観測結果の集計を表 2 に示す。

	観測時間 (平均値)	偏角(D) ばらつき	伏角(l) ばらつき	標準偏差 偏角(D) 観測施設 0.03分角	標準偏差 伏角(l) 観測施設 0.03分角	標準偏差 偏角(D) ^{父島} 0.3分角	標準偏差 伏角(I) ^{父島} 0.3分角
弱磁場方式	44分24秒	0.15分角	0.09分角	14/35 <mark>40%</mark>	33/35 <mark>94%</mark>	35/35 100%	35/35 100%
ゼロ磁場方式	56分09秒	0.18分角	0.14分角	19/27 <mark>70%</mark>	25/26 <mark>96%</mark>	27/27 100%	26/26 100%

表2 弱磁場方式とゼロ磁場方式の絶対観測結果の比較

地磁気観測の国際的枠組みである INTERMAGNET (International Real-time Magnetic Observatory Network)の地磁気観測点に求められる確定値の精度 1は±5nT であり、柿岡 では偏角は±0.57′、伏角は±0.24′となり、弱磁場方式の観測において、十分基準を満た すことが分かった。

今後は、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予定である。また、観測基準を満たす父島地磁気観 測点について、父島は出張で観測するため時間的に制限があり、天候や虫などによる厳しい 観測環境であるので、出張期間の観測の効率化を図り、弱磁場方式を導入することを目指す。

参考文献

Intermagnet Technical Manual V-5.0.0, 6page, 2020.
 https://intermagnet.github.io/docs/Technical-Manual/technical manual.pdf

[協力機関名]:

ベルギー王立気象研究所(RMI) (平成 30 年度まで)
 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

[成果の発表]:

・平成 30 年度

学会などでの発表

Rasson, J.*, Gonsette, A.*, Okawa, T., Owada, T., Ogi, J., Kaitoh, M.
「Definitive data vs AUTODIF measurements at Kakioka Magnetic Observatory」
第 18 回 国際地球電磁気・超高層物理学協会(IAGA)地磁気観測国際ワークショッ
プ、(平成 30 年 6 月 28 日、 オーストリア・トラーフェルベルク)

浅利晴紀「Residual Method ~ DI メーターによる海外で主流の絶対観測手法~」第 45 回地磁気観測技術連絡会(平成 30 年 12 月 17 日、茨城県つくば市)

- · 令和元年度
 - 学会などでの発表
 - 浅利晴紀、「弱磁場方式による地磁気絶対観測」、第46回地磁気観測技術連絡会 浅利晴紀・仰木淳平、「弱磁場方式による地磁気絶対観測」、令和元年度 CA 研究会 論文・報告書など

浅利晴紀、ドイツ出張報告(2019年12月)

技術協力

国土地理院、弱磁場観測の技術指導(2020年2月)

- 令和2年度
 - 学会など発表

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」 JpGU 2021 招待講演

論文、報告書など

大川隆志・海東恵美、「AutoDIF (RMI)の試験観測」 所内技術資料 (2021 年 3 月 予定)

[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]: 〇山崎明、瀧沢倫明、笹岡雅宏、山崎貴之、浅利晴紀、増子徳道、稲村友臣、西田重晴(技術課)、船山亘、山際龍太郎、豊留修一、有田真、長町信吾、仰木淳平、下川淳、栗原正 宜、弘田瑛士、屋良朝之(観測課)、宮村淳一

[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。

なお、2018年1月に噴火した本白根山では2018年および2019年に山頂部周辺において自然電位観 測を実施した。その観測成果については昨年度末に験震時報に投稿し現在査読中であるが、今年度改 稿し受理となる予定である。

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D I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、地磁気永年変化のDI補正においては、参照点の地磁気三成分値として衛星主磁場モデル が有用であることを踏まえ、火山業務への活用を目指して、衛星主磁場モデルに基づく補正処理プロ グラムを開発するとともに、次期計画更新の保証がない衛星モデルに依存せずに、国土地理院観測点 データを用いた日本地域の主磁場モデル開発をパリ地球物理研究所との共同研究として実施する。

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2年度の成果]:

各火山における電磁気観測
 ○雌阿寒岳

令和2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(2020年8月実施)

- ・MEA、ME2 観測点において、DI 補正のための偏角観測
- ・繰返し観測点(全42点)の環境省、森林管理署への申請

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。データ受信の不具合が生じた際は、データ受信プログラムに問題が ある可能性が疑われたため、プログラム制作業者と連絡をとりあいながら、原因を調査し不具合解消に 至った。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ノイズを有意に除去できた。

MEA、ME2 において、DI 補正のための偏角観測を初めて実施した。観測は観測結果のもつ誤差を検討 するために同一地点で高さ、観測者を変えた観測を行った。観測結果は MEA:-9.0°、ME2:-8.8°であ った(図 2)。

連続観測点データの補正方法のうち、ME2の年周変化量の推定を試みた。推定された年周変化量の変化の振幅は、±0.25nTと非常に小さかった。地中温度との相関は、正の相関がある部分もあるがそうでない部分も見られた(図3)。火山性トレンドの除去において、より検討を重ねる必要はあるが補正量についての見通しはたった(図4)。

MEA 観測点において、偏角の観測結果 D(-9.0°±0.5°)を基にした値と、計算によって推定した I を用いて、DI補正を試みた。これまで実施してきた 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。 DI補正(地磁気 XYZ 成分を使用した補正)を実施した結果、H 成分補正にくらべて、全磁力変化が、右 肩上がりの変化になることが確認された(主に、Z 成分の変化に対応する)が、これまでの火山性トレ ンドを損なわない形でより正確な全磁力変化の結果が得られたと考えられる(図 5)。

雌阿寒岳での全磁力観測結果については毎月の本庁主催の合同検討会、火山噴火予知連絡会に報告 した。





図2 偏角の観測点摸式図と観測結果 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3 ME2 における年周変化量と地中温度 年周変化量は、2014/5~2015/12、2017/12~2020/12の平均。地中温度は 2015-2020の平均。



図4 ME2-MMB について年周変化補正前(上)と補正後(下)



図 5 MEA-MMB について、従来の H 成分補正と女満別の XYZ 成分を使用した DI 補正の結果の比較 DI 補正は、観測点の I を 57.0°, 観測点の D を -9.0±0.5°として補正係数を求めて補正した。
○草津白根山(白根山(湯釜周辺))

今年度は全磁力連続観測点3点での観測を継続すると共に、2020年10月に定期の全磁力の繰返し観 測を実施した。

2018年4月から7月にかけて、水釜付近地下の熱消磁を示唆する全磁力変化(新P点およびQ点で減少、R点で増加)が観測された。しかし、それ以降は熱消磁を示すと言い切れるような明瞭な全磁力変化は認められていない。

連続観測点(新P点,Q点,R点)、および参照点である東京大学地震研究所八ヶ岳地球電磁気観測所 の全磁力の夜間日平均値差に柿岡の水平地磁気成分のみを用いた DI 補正を試みた。その結果、短周期 現象である磁気嵐等の DI 効果をやや軽減できた(図7)。

全磁力繰返し観測では前年の観測結果と比較して、湯釜の東から南東側の比較的狭い領域で 2nT 程度 の全磁力値の減少を観測した。2018 年度以降、連続観測点 Q 点の近くの観測点で、全磁力の減少傾向が 継続している。湯釜南側の連続観測点新 P 点では全磁力変化が横ばいであるのに対して、周辺の繰返し 観測点ではわずかながら減少が観測された。一方、湯釜北側の観測点では変化が小さい結果が得られた (図 8)。

草津白根山(湯釜付近)での全磁力観測結果については毎月の本庁主催の合同検討会、火山噴火予知 連絡会に報告した。また、2020年度CA研究会で最近の草津白根山の観測結果やH成分補正について発 表すると共に同論文集に投稿した。





図7 柿岡のH成分補正前後の連続観測点の全磁力変化(八ヶ岳基準)



図8 湯釜周辺の全磁力繰返し観測結果(2018-2020)

青丸で囲んだ観測点:前年の観測結果と同じ全磁力変化傾向 赤丸で囲んだ観測点:前年の観測結果と異なった全磁力変化傾向

○草津白根山(本白根山)

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



図9 本白根山全磁力繰返し観測点配置図



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

○伊豆大島

1) 全磁力連続観測点(MIK1,2)の復旧

MIK1 と MIK2 観測点は、2019 年 9 月の台風により本体磁力計を収める収納箱が水没したことで観 測が停止していたが、2020 年 9 月にようやく復旧させることができた。復旧後は順調に収録されて いる。復旧した MIK はそれまで繰返されていた水没問題の対策として、新しい設計の収納箱が導入 された(図 11、写真 1)。収納箱自体が 4 つ足により高床式にするとともに、箱の中でもテーブル が置かれて上げ底となっている。更に内部で帯水しないよう箱の下面に穴が開けられ、そこにケー ブルを通すフレキ菅が接続されている。今後は、新設計による設置の安定性と水没対策としての有 効性を観察評価したい。



図11 MIK 観測点の新収納箱の構造図



写真1 復旧後の MIK 観測点

2) 全磁力繰返し観測点の新設

今年度観測を実施した既存点、消失した既存点、および新設点を図 12 に示す。今回の観測では既存点のうち8点で観測を実施した。一方で、植生の拡大、或は、土砂の堆積により、新たに3点が 消失した。残念ながらカルデラ南側の点1と2が失われたことは、活動評価において影響が大きい と考えられる。



3) 東京大学地震研究所 OSM 観測点における絶対観測、真方位観測

地震研究所からの依頼を受け、例年通り 11 月中旬に OSM 観測点で絶対観測を実施した。また天 候にも恵まれたことから、前年に引き続いて真方位観測も実施することができた。F 成分の基線値 (地点差)が約5年の間に9nT変化しているがその原因は定かではない。基線値を適用した観測値 の衛星モデル CHAOS-7 との比較すると(図13)、D と Z 成分については年周変化および2019年から の Z 成分に見られる異常値を除き、概ね衛星モデルとは整合的である。一方 H と F 成分については 2019年以降にわずかにトレンド差があるように見受けられるが、有意なものかは断定できない。



図13 基線値を適用した 0SM4 成分値と衛星モデル CHAOS-7 との比較

4) 東大地震研の連続点における偏角伏角その場測定

今年度は、地震研究所からの依頼としてカルデラ南側の3点MI0,MI1,MI2近傍におけるDI測定 を試みた。このうちMI2では、悪天侯のために測定を断念した。MI0とMI1での測定値とCHAOS-7 の永年変化モデル値を用いて両点に対しDI補正を施したところ、特に近年では横ばいだったMI0 が引き続き増加傾向であることが判明した(図14)。伊豆大島での全磁力を使った活動評価におい ては、DI効果を考慮することが決定的に重要であることが改めて確認された。



図14 MIOとMI1に対するDI 補正

⁵⁾ OSM 全磁力連続データの基準としての妥当性評価

2015年あたりから OSM 全磁力観測値と衛星モデルのトレンドに乖離が生じている(図 15 左上) ため基準点として妥当性が問われているが、そもそもそのトレンド差の原因も定かではない。そこ で OSM データの近年のトレンドが、観測点近傍の局所的な異常によるものか、広域な異常として現 れたものなのかを議論することを目的とし、地震研究所共同利用の枠組みで提供された全 9 点の伊 豆大島全磁力観測データを用いて主成分分析を行った。展開して得られた第1~第9モードのうち、 第1モードが広域異常変化(図 15 右上)、第2モードが年周変化(図 15 左下)と解釈され、残りの モードの和(図 15 右下)は観測点間で相関の低い局所的異常、或はノイズと解釈される結果とな った。2015年以降に現れる CHAOS-7 に対する OSM のトレンド異常は、広域異常の寄与に依るところ も大きいが(図 12 右上点線)、局所的な異常としても約+2nT/年ほど現れている(図 15 右下点線)。

OSM での基線値適用後のF観測値(図13右下)が衛星モデルと整合的とするならば、F基線値の 変化は全磁力センサー近傍における約+2nT/年の異常となる。これは主成分分析から解釈された OSM 全磁力点での局所的な変化と一致していることは興味深い。OSM 全磁力点のごく近傍で 2015 年以降 にトレンド異常が現れたか、或はDI 効果による見掛けの変化が現れたことを示唆するものである。 前節の偏角伏角その場測定の結果を用いて、後者が原因となりうるかを調査することは今後の課題 とする。

2021 年 3 月現在、TBT(近隣に設置されている気象庁の全磁力参照点)は現地収録による仮復旧の状態で運用されており、近いうち伝送も含めた完全復旧が見込まれている。OSMの長期変化をTBT ほか、東大地震研の旧基準点NOM(図 15 のプロットも参照)と比較し、基準点としての各々の妥当 性を評価したい。



図15 衛星モデル CHAOS-7を基準とした地震研究所全磁力観測点の毎月値(左上)と、その第1モード(右上)、第2モード(左下)および第3~第9モードの和(右下)。

○三宅島・神津島

三宅島島内全磁力連続観測点(雄山北東・村営牧場南3・大路池北)の機器障害発生時、不具合の出 ている磁力計等の機器を当所まで送付いただき、不具合調査や動作確認を実施し、観測点不具合箇所の 切り分けに資する情報を本庁に提供した(2020年4月~6月)。

また、三宅島島内全磁力繰り返し観測が 2021 年 3 月 16 日~17 日に行われた。当所からも関係官が出 張し、同観測を支援した。

三宅島での全磁力観測結果については第146回火山噴火予知連絡会に報告した。



○阿蘇山

昨年度できなかった大平調査観測点の観測機器を撤去し、原状回復をおこなった。阿蘇山麓観測点 (AHK)は順調に計測を継続しているが、2020年11月26日及び28日に搬送用パレット状のものが近傍に 置かれたため約300nTのギャップが発生している。11月29日以降作業は行われていないようだが、4月 以降再び擾乱が発生する可能性が高い。阿蘇山上(ASJ)、火口西観測点(CW4)は11月の出張時に復旧を 試みたが、データ収録装置および磁力計が故障しており復旧を断念、現在観測を休止している。

全磁力繰返し観測は、2018年5月に新設した6点で2010年11月10日に実施した。

阿蘇山での全磁力観測結果については第146回火山噴火予知連絡会に報告した。



図18 阿蘇山の全磁力連続観測点配置図

2. DI 補正

本年度は、火山における全磁力データのノイズ低減処理を高度化するためのデータ処理技術を発展さ せることを目的として、理論的側面から以下について考察した。

・統計的推定法により得られる DI 補正係数の誤差

・草津白根山や雌阿寒岳で実施されている磁場1成分のみを用いた DI 補正の改良

また、長周期の DI 補正に応用できるよう、任意の座標および時刻に対して人工衛星モデル CHAOS-7 のモデル値を算出できるような業務用プログラムを開発して地磁気観測所にて共有した。

1) 統計的推定法により得られる DI 補正係数の誤差についての調査

2 点間の全磁力観測の差において見掛けの変化として現れる DI 効果を補正するためには、一般的に 3 つの未知数からなる補正係数が必要である。これら係数は、以下の 2 つの方法のいずれかにより得る ことができる。

(ア)2つの全磁力観測点における磁場の方位を直接測定する。

(イ) 観測された全磁力観測の差の変化が DI 効果によるものと仮定し、与えられた 3 成分の背景磁場変動を用いて逆推定する。

今年度の調査では、上記のうち(イ)に伴う誤差の評価を行った。ここでは、全磁力観測の差の観測誤 差を仮定し、最小二乗法で推定される補正係数の誤差を算出する。全磁力観測に伴う観測誤差の統計的 情報が得られていないことから、以下のような単純な誤差分布を仮定した。

異なる時刻の全磁力差の誤差は互いに無相関である

- 各時刻の全磁力差の誤差は、その値を中心として、標準偏差σΔF = 0.2nTとした正規分布に従う

統計的推定法において DI 補正係数 $\mathbf{k} = (\mathbf{k}_x, \mathbf{k}_y, \mathbf{k}_z)^T$ は、線形の連立式 $\Delta \mathbf{F} = A\mathbf{k}$ を回帰させるように推定される。ここで、3×n 行列 A=[\mathbf{x}^T , \mathbf{y}^T , \mathbf{z}^T]は3成分の変化計時系列から成り、 $\mathbf{x} = (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n)$, $\mathbf{y} = (\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_n)$, $\mathbf{z} = (\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2, \dots, \mathbf{z}_n)$ はフラックスゲート磁力計あるいは磁場モデルから得られる3成分変化、 $\Delta \mathbf{F} = (\Delta \mathbf{F}_1, \Delta \mathbf{F}_2, \dots, \Delta \mathbf{F}_n)$ は全磁力差である。 $\Delta \mathbf{F}$ の誤差行列 $C_{\Delta \mathbf{F}}$ は上述の仮定により $C_{\Delta \mathbf{F}} = \text{diag}(\sigma^2)$ $_{\Delta F1}, \sigma^2 _{\Delta F2}, \dots, \sigma^2 _{\Delta Fn}$ であるので、最少二乗法で推定される \mathbf{k} の誤差行列は $C_k = (A^T C^{-1} _{\Delta F} A)^{-1}$ より与えられる。

柿岡と女満別の毎日値3成分(X,Y,Z)変化を用い、推定される DI 補正係数の標準偏差(C_kの対角要素の平方根)を算出した(表 1)。その結果、どのようなデータセットを用いても k_xの誤差が最も小さく、k_zの誤差が最も大きいことがわかった。これは毎日値3成分の短周期変化のうちZ成分の振幅が小さく、かつシグナルの大きいX成分と相関が高いことによる。また1年の時系列から推定する場合では0.01 程度の大きさの補正係数に対し(特に k_zでは)誤差が十分に小さくならないことがわかった。

秋元・他(2019)の手順では、補正係数の推定の為にシグナルの大きい地磁気嵐前後 10 日間のみを データとして採用していた。この方法の誤差への影響を調べるために、Dst 指数に従いデータを選別し た場合の誤差も算出した(表 2)。その結果、データ選別を行うことより、とにかく多くのデータを用い る方が DI 補正係数の推定誤差を小さくできることが確認された。

以上の調査から、 k_z の決定精度が最も低く、 k_x の決定精度が最も高いということがわかった。悪いこ とに現在の永年変化は、例えば女満別の Y 成分と Z 成分で 100nT 程度と大きく、X 成分で 50nT と小 さい。従って、推定精度の低い k_z と k_y を用いて長期にわたる DI 補正を施すと、長期のトレンドを誤っ て補正する結果に陥りやすい。このことから、DI 補正を統計的手法に頼るしかない場合は、長期のトレ ンド補正を捨て、推定精度の高い k_x のみを用いて短周期の DI 補正を行うのが合理的である。この思想 が草津白根山や雌阿寒岳で適用された H 成分補正の背景にある。

データ	データ		KAK			MMB	
期間	個数	kx	k_y	kz	kx	k_y	k_z
2017.01-2019.12	1095	0.0009	0.0017	0.0026	0.0008	0.0014	0.0021
2019.01-2019.12	365	0.0019	0.0034	0.0057	0.0020	0.0029	0.0058
2019.10-2019.12	92	0.0044	0.0073	0.0134	0.0051	0.0058	0.0148
2019.12-2019.12	31	0.0114	0.0226	0.0287	0.0112	0.0219	0.0306

表1 夜間値(15h00-17h00UT)平均を用いて推定された DI 補正係数の標準偏差(nT)

表2 Dst 指数で分類した日の夜間値平均を用いて推定した DI 補正係数の標準偏差(nT)

データセット	データ		KAK	
2017.01-2019.12	個数	kx	ky	kz
条件なし	1095	0.0009	0.0017	0.0026
Dst < -10	347	0.0015	0.0024	0.0043
Dst < -25	66	0.0027	0.0042	0.0084
Dst < -50	9	0.0048	0.0226	0.0287

2) 磁場1成分のみを用いた DI 補正法の改良についての調査

1 成分のみを用いた DI 補正法は、長周期の誤った補正を回避し、短周期の DI 補正を確実に行う上で 有効な方法である。これを最も効果的に実現する上で、選択すべき最適な方向は、一般には必ずしも X 成分方向、或は H 成分方向とは限らない。そこで 1 成分補正を行うための最適な方向について考察す る。このような方向は、すなわち磁場の変化が以下のようになる方向である。

- 短周期変化の振幅が大きい

・ 永年変化の振幅が小さい

直交する3成分の磁場変化の時系列より最適な方向を探すには、上記の3×3 誤差行列 C_k(正定値対称行列)の逆行列 A^T C⁻¹Δ_FA の固有ベクトルの方向を求めればよい。一般に、これら固有ベクトルは固 有値の大きい方から対応する順に最大主軸、中間主軸、最小主軸と呼ばれ、今回の場合は、最大主軸が 磁場変化の振幅の大きい方向、逆に最小主軸が振幅の小さい方向である。

柿岡と女満別の短周期変化の最大主軸、および長周期変化の最小主軸(または中間主軸)の方向を算 出したところ表3のようになった。女満別の3成分変化を参照として、1成分補正を行う場合の理想的 な方向は、長短周期変化において都合の良い方向が偶然にもほぼ一致しており、偏角ではおよそ真北の 方向(X方向)、伏角では-16°(つまり16°見上げる方向)である。一方、柿岡では伏角がズレている ものの、やはり偏角ではおよそX方向、伏角では間をとって-20°程と言える。これまで採用してきた 1成分補正ではH方向が採用されていたが、そこから更に16~20°ほど見上げる方向が最も理想的であ る。

得られた 3 つの固有ベクトルを各列の要素とする 3×3 ユニタリ行列 U=[u_1, u_2, u_3]は、XYZ 軸から主 軸方向に座標系を回転変換させる行列であり、対応する各固有値 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ の逆数は各軸方向の DI 補 正係数の分散である。短周期変化が卓越する最大主軸方向(表 3)の DI 補正係数の標準偏差 λ_1 ·^{1/2} は、 表 1 の kx の標準偏差と比較して小さいことが確認できる(表 4)。

今後は、雌阿寒岳など実際の火山データに対し主軸方向での1成分 DI 補正の適用を試みる。従来の H 成分補正の結果(図5)と比べ、処理の高度化に資する効果の有無または程度を評価する。

公·》 追關((及旧)) 工指()/) [5]					
短周期変化が卓越する方位 (2016.01-2019.12)					
<u> </u>	て満別		柿岡		
偏角 -0.25°	伏角 -16.17°	偏角 -0.82°	伏角 -13.90°		
長周期変化が卓越しない方位 (2016.01-2019.12)					
דַ	て満別	柿岡			
偏角 -4.86°	伏角 -16.30°	偏角 +2.06°	伏角 -26.15°		

表3 地磁気変化の主軸の方向

表4 夜間値を用いて推定された最大主軸方向の DI 補正係数の標準偏差(nT)

データ	データ		
期間	個数	KAK	MMB

2017.01-	1095	0.0005	0.0006
2019.12			
2019.01-	365	0.0013	0.0014
2019.12			
2019.10-	92	0.0029	0.0033
2019.12			
019.12-	31	0.0074	0.0067
2019.12			

3. これまでの観測成果等のとりまとめ

今年度は、雌阿寒岳、草津白根山、伊豆大島、阿蘇山における所内、所外での全磁力観測についての 文献調査を実施した。雌阿寒岳での全磁力観測は専ら当所が行ってきたが、全磁力変化は 96-1 火口下 の温度の状態をよく反映しているとみられる。特に 2008 年 11 月の 96-1 火口での噴火に際しては大き な全磁力の減少の変化が観測されたが、噴火の2日程前に2nT 程の前兆的な全磁力の急激な減少が観測 されたことは注目に値する。この急激な全磁力変化はピエゾ磁気効果の可能性も示唆されている。草津 白根山の全磁力変化は水釜周辺地下の温度変化を反映したものであり、消磁期と帯磁期のソースが推定 されている。消磁ソースが水釜周辺、帯磁ソースが湯釜と水釜の中間あたりに求まり、両者がやや離れ ていることは興味深い。周知されている成果であるが、伊豆大島では東京大学地震研究所により 1986 年 12月の噴火の約1年前から三原山火口の南側の観測点で全磁力の減少が観測された。この全磁力変化は 三原山火口下でのマグマの上昇によるものと解釈されている。阿蘇山では京都大学火山研究所が中岳第 一火口周辺に複数の全磁力観測点を展開し、火山活動との関連性を研究している。その成果については Tanaka (1993) に詳述されているが、中岳第一火口周辺の全磁力変化は火山活動と密接に関係しているこ とを報告している。1989~1990年の活動期の熱消磁、帯磁のソースはすべて中岳第一火口下に求まり、 全磁力変化は中岳第一火ロ下の温度変化で説明できるとしている。Tanaka(1993)が提唱した「熱消帯磁 モデル」は、中岳第一火口下への地下深部のマグマだまりからの熱の供給、噴火活動による地表への放 熱、火口周辺の地下水の吸収と排出の三要素のバランスの変化によって中岳第一火口下で温度変化がお こり、熱消磁または帯磁が発生するというモデルであり、基本的な考え方は今日でも変わっていない。 なお、当所の観測により阿蘇山の杵島下観測点で発見された、近接した2地点での逆センスの全磁力年 周変化は、その後全磁力年周変化の原因の解明に貢献したと言える。

本調査に関連し、2020年度 CA 研究会において全磁力観測における DI 効果や年周変化、落雷による磁場の異常変化等の問題について整理した結果を発表した。

[成果の発表]:

学会等での発表

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

山崎明,火山での精密磁場観測における諸問題, Conductivity Anomaly 研究会シンポジウム,オンラ

イン開催,2021年1月

下川淳・山崎明・笹岡雅宏・増子徳道・弘田瑛士,草津白根山における全磁力観測の現状について, Conductivity Anomaly 研究会シンポジウム,オンライン開催,2021年1月

<u>論文・報告書など</u>

- 飯野英樹・山崎明・有田真・田中達朗・下川淳,2018年の本白根山噴火後の自然電位観測, 験震時報, 2021年1月受理
- 下川淳・山崎明・笹岡雅宏・増子徳道・弘田瑛士,草津白根山における全磁力観測の現状について,2020 年度CA研究会論文集,2021年2月

[調査研究の種別]:重点課題

[課題名]:地磁気ブロマイド記録のデジタル化(令和2年度)

[担当者]: 〇山崎貴之、笹岡雅宏、海東恵美、吉武由紀、増子徳道、西田重晴(技術課)、 山際龍太郎、森永健司、有田真、長町信吾、神谷亜希子、下川淳、栗原正宜、屋良朝 之、弘田瑛士(観測課)

[概要] :

100年を超える歴史を持つ地磁気観測所(柿岡)においてもデジタル値として保存 済のデータは最近40年余りに過ぎず、それ以前の地磁気観測記録の多くはブロマイ ド印画紙のアナログマグネトグラムとして蓄積されている。これら過去の観測によ り蓄積したアナログ記録をデジタルデータ化した上で、当所ホームページで公開す ることによりデータアクセス性を高め、現象等の検索・閲覧、データ比較、数値計算 などの利便性を向上させることで、その価値は飛躍的に高められる。特に、過去の長 期にわたるアナログ記録を近年の計測データとデジタルで接続することにより、同 一地点での連続した長期データを容易に扱えるようになり、太陽活動の地球環境へ の影響調査等の推進に大きく貢献することが期待される。

[具体的な計画と達成目標]:

これまで当所では、平成20年度以降、地磁気ブロマイド記録をデジタルデータに 変換する手法*1の開発と、ブロマイド記録をデジタル化したデータ(柿岡1956~1983 年、女満別・鹿屋1973~1984年)、ブロマイド印画紙の画像データ(柿岡1924~ 1983年、女満別1968~1984年、鹿屋1968~1984年)の作成・公開を行ってきた。

令和2年度は、名古屋大学宇宙地球環境研究所(ISEE)データベース作成共同研 究として、女満別(1966~1967年)・鹿屋(1967年)のブロマイド記録について高 精度スキャンを業者委託し、画像データを作成する。また、これまでに作成した女満 別・鹿屋(1971~1972年)の画像データを用い、デジタルデータ(毎分値、7.5秒 値)を作成する。作成した画像データ及びデジタルデータを当所ホームページに掲載 する。

(具体的作業)

- 1. 地磁気ブロマイド記録の高精度スキャンによる画像データ作成(業者委託)
- 2. 高精度スキャン画像から各記録の開始点座標値の読み取り
- 3. 高精度スキャン画像から地磁気変化記録の読み取り
- 4. 読み取られた変化記録に基線値及び寸法値を適用することによるデジタルデータ 作成
- 5. 画像データ及びデジタルデータのホームページへの掲載

(参考文献)

*1 Mashiko, N., T. Yamamoto, M. Akutagawa, and Y. Minamoto (2012), Digitization of bromide paper records to extract one-minute geomagnetic data. Proceedings of 1st ICSU-WDS conference 'Global data for global science' (pp. 251-254). Kyoto. [Available online at www.icsu-wds.org.]

[共同他機関名]:

名古屋大学宇宙地球環境研究所(ISEE)

[工程表]

=田 6万	2020									2021		
計起	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
		, ,										
画像スキャン		・枚数チュ	⊑ック					・WEB用	リサイズ画	像作成		
			・業者に引	き渡しス	キャン作業					・WEBサー	-バーへの7	^ァ ップロード
						・品質確認	刃 心					
デジタル化		・観測原簿	₿PDF化 Ó		・ブロマイ	′ド記録線0	の手動読み	取り				
		・開始点座	を標値の読る	み取り						・チェック	, 「作業	
			・ブロ	コマイド記録	禄線の自動	読み取りソ	フトによる	読み取り		・WEBサー	-バーへの7	^ア ップロード
										・ 京大WD	Cヘデータ	送信

[本年度の成果]:

- (1) 画像データ作成
 女満別(1966~1967年)と鹿屋(1967年)のブロマイド記録について画像データを
 作成し、地磁気観測所ホームページで公開した。
- (2) デジタルデータ作成
 女満別(1971年~1972年)と鹿屋(1971年~1972年)のデジタルデータ(毎分値、
 7.5 秒値)を作成し、地磁気観測所ホームページで公開するとともに、京都大学 World Data Center にデータを送信した。

[成果の発表]:

学会等での発表

有田真,地磁気観測成果のデータベース化,「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研 究計画(第2次)」令和2年度成果報告シンポジウム,web 会議システムによるオンライ ン開催,令和3年3月16日



図1 ブロマイド記録 (アナログマグネトグラム) デジタル化のまとめ。

[謝辞]:

これまでに実施した本調査研究データの作成に当たっては、以下の研究助成を受けています。記して感謝いたします。

·日本学術振興会科学研究費補助金

(研究成果公開促進費:課題番号 248032,268023,15HP8028,16HP8026,18HP8018)

- ・「1920年代にまで遡る高時間分解能地磁気デジタルデータベース」
 - ・名古屋大学 太陽地球環境研究所 所外データベース作成共同研究 (平成 26,27 年度)
 - ・名古屋大学 宇宙地球環境研究所 データベース作成共同研究 (平成 28,29,30,令和元,2 年度)

[調査研究の種別]:基礎課題

[課題名]: 南極昭和基地の地磁気連続観測値の絶対値化に向けた調査(令和2~4年度) [担当者]: 〇仰木 淳平、平原 秀行、有田 真(観測課)、稲村 友臣(技術課) [概要]:

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、その観測項目は絶対観測と変化観測である。絶対観測は地 球の主磁場の長期変化をターゲットとし、ひと月に1回手動で地磁気の向きと大きさを測 定している。変化観測は電離圏や磁気圏に流れる電流による短周期の変化をターゲットと し、地磁気3成分の変化を24時間365日連続で自動的に測定している。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い変化観測の連続観測値を較正する絶対 値化は行われていない。本研究では連続観測値の絶対値化に向け、観測方法の変更やその影 響等について調査を行う。

昭和基地の連続観測値の絶対値化には、観測点運営と科学の二つの面でメリットがある。 まず、観測点運営面でのメリットについて述べる。絶対観測は月に1回行っているが、その 時得られた絶対値をそのまま月の代表値とするので、上空の電流の影響を避けるため、観測 時の地磁気の活動状況に基準を定め(地磁気の静穏条件)、その条件を満たすタイミングで 絶対観測を行っている。実際には、地磁気の静穏条件の他に、天気や観測隊全体の作業予定 等の条件がすべて整う必要があり、絶対観測を行えるのは月に数日で、状況によっては実施 できない月もある。地磁気の活動は予想が難しいため、絶対観測の計画・実行は担当隊員の 大きな負担となっている。そこで、絶対値化した連続値を使って地磁気の静穏条件を満たす 時間から月の代表値を算出できるようになれば、絶対観測では観測基線値(絶対観測で得た 絶対値とその時刻の変化観測で得た連続観測値の差)を得られればよく、地磁気の静穏条件 を大幅に緩和できる。天気と観測隊の作業予定はある程度予測と調整ができるので、静穏条 件を大幅に緩和することで、絶対観測を計画的に実行でき、担当隊員の負担を大きく減らす ことができる。

次に科学面のメリットについて述べる。変化観測結果として公開している連続観測値はX 軸をほぼ磁北に向けて設置した三軸フラックスゲート磁力計の出力値であり、基準となる 座標系に変換していないので他の観測点や他の観測項目と比較しにくく、較正もしていな いので長期的な精度も保証されていない。絶対値化は真北基準の座標への変換と絶対観測 による較正を行うことであり、これにより他の観測との比較が容易で長期的にも高精度な データを提供できるようになる。特に近年、人工衛星観測と地上観測をあわせて解析した高 時空間分解能の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 南極域の昭和基地のデータが利用できるようになればモデルの精度向上につながる。また、 月の代表値(絶対値)についても、絶対観測を計画的に実施するため欠測がなくなり、上空 の電流の影響がより少ない時間のデータから代表値を算出するため、その妥当性も向上す ることが期待できる。 連続観測値を絶対値化するためには、定期的な絶対観測で得た観測基線値からすべての 時刻の基線値を作成し、その基線値に変化計の連続観測値を加算する必要がある。つまり基 線値の精度・安定性が絶対値化された連続観測値に直接影響を及ぼすことになる。本研究で は、基線値の精度として、インターマグネット毎秒観測所の基準*1をクリアすることを目指 す。インターマグネットは地磁気のデータ流通についての国際標準であり、これをクリアす ることでより多くのユーザーに観測データを利用されることが期待できるからである。こ れまでの調査により、磁力計センサの傾斜が夏季に大きく変化し、現在の月1回の絶対観 測ではこの傾斜変化に伴う基線値の変化を十分な精度で追うことはできないことが分かっ ている*2が、絶対観測の頻度を上げることで基線値の精度を保つことが期待できる。

連続観測値を絶対値化を目指すため、絶対観測の省力化と高頻度化の試験を行い、担当隊 員の負担を増やさずに較正の精度を確保できるかどうかを確認する。省力化に向けて、観測 時間の短縮が見込まれる弱磁場方式*3,*4を導入し、現行のひと月1回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。さらに、試験的に絶対値化した連続観測値を用いて静穏な状態から算出した月の代 表値と従来の方法での月の代表値の比較検討により、新しい方法を評価する。

[具体的な計画と達成目標]:

変化計による連続観測値を絶対値化するには、基線値が安定していることが必要である。 特に、絶対観測の頻度が月に1回と少ない昭和基地では絶対値の精度が低下してしまう。 H23年度の調査では、基線値に影響を与える磁力計センサの傾斜変化が確認されたため、 H24年度以降、傾斜計を使った傾斜変化の詳細な把握と基線値の補正について調査が行わ れてきた。H31年度の調査では、温度変化の大きな現在の環境では傾斜計データの温度特 性の影響により補正が困難であると結論されたが、絶対観測に弱磁場方式を取り入れ省力 化することで観測頻度を上げ、絶対観測間の基線値の変動を小さくできることが予想され た。

これらを受け、本研究では、弱磁場方式で高頻度の絶対観測を実施し、連続観測値の絶対 値化に向けた調査を行う。

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・制御部の温度管理等)

・人工擾乱の把握

第62次南極地域観測隊(昭和基地滞在:2020年12月~2022年2月、以下JARE62) 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シ ステムの整備や解析を行う。 [共同研究に係る関係官署及び所外関係機関]:

国立極地研究所 (門倉 昭 教授): 観測点の運営 (データの取得・公開、機器の維持・更新)

[本年度の成果]:

1. 弱磁場方式の絶対観測の導入についての調査

現在、昭和基地の絶対観測は月1回の頻度だが、インターマグネット観測所の基準では、 週1回の頻度が推奨されている。観測者である現地隊員の負担を考慮すると、現在の観測 方法(ゼロ磁場方式)で頻度を増やすことはできない。そこで負担の少ない弱磁場方式の導 入の効果と運用方法を調査するため、従来の方法・頻度の絶対観測とともに弱磁場方式での 高頻度(月3回程度)の絶対観測を行う。当所派遣の稲村隊員の昭和基地滞在が2020年12 月下旬から2022年2月上旬の予定であり、その期間で両方式での並行観測を可能な限り長 期間行う。

本調査の準備として、2020年5月に稲村隊員へ弱磁場方式での観測方法を指導した。その後、9月までに8回(計18セット)の観測を行い、観測技術を習得した。

昭和基地到着後は、2021年2月6日に弱磁場方式の観測を開始し、月3回の頻度で観測 を継続している(図1)。



図1 弱磁場方式とゼロ磁場方式の絶対観測日

2. オーバーハウザー磁力計による全磁力連続観測

弱磁場方式での絶対観測は磁場が静穏でないときにも行うが、そのデータ処理には全磁 力の毎秒連続観測値が必要である。また変化計の安定性の把握にも必要なため、オーバーハ ウザー磁力計を持ち込み、地磁気変化計室の隅に設置し、2021 年 1 月 26 日から観測を開 始した(図 2)。

また、インターマグネット毎秒観測所へ認定されるためには 30 秒以下の測定間隔での全磁力観測が求められている。JARE62 では一時的に当所の磁力計を持ち込んだが、極地研究所内でオーバーハウザー磁力計の整備手続きが進んでおり、数年以内に導入できる見込みである。



図2 地磁気変化計室に設置したオーバーハウザー磁力計のセンサ

3. 観測環境の整備

フラックスゲート磁力計による変化観測では、センサの温度・傾斜変化が磁力計出力値に 影響を与える。温度変化による影響量は 0.3nT/℃程度であり、現状では、夏期の日射によ る 3℃程度の日変化が確認されており、日射の影響のない冬季でも外気温の変化による数日 スケールで 10℃弱の変化が確認されている*5。温度変化と磁力計の出力変化の間の相関は 十分な精度で決まらないため、温度補正は適していない。一方、傾斜変化による影響量は NS 方向の傾斜変化で X 成分に 0.2nT/″ および Z 成分に 0.1nT/″、EW 方向の傾斜変化で Y 成 分に 0.2nT/″ の程度であり*2、傾斜変化は夏期にのみ数日で 30~50″ 程度の大きな変化が 確認されている*5。インターマグネットの推奨に従って絶対観測を週1回行えば、必要な精 度で補正できる。

当初の計画では、今年度は温度管理の改善を検討するところまでだったが、断熱材と水を 組み合わせて外部からの温度変化の影響を3%程度にまで低減できたという報告*6を参考に、 昭和基地用にアレンジした改善策を作成し、物資の調達と施工を行うことができた。改善策 は、①断熱層の追加、②センサ庫内の熱容量の増加、③日射の影響の軽減、を組み合わせた ものである(図3)。断熱層の追加により温度を伝わりにくくし、追加した断熱層と既存の 断熱層の間に熱容量の大きな保冷材を配置することで熱慣性を大きくすることを目指した。 複数の温度帯で凝固熱・融解熱も利用できるように、凝固温度が0℃、-11℃、-16℃の3 種類の保冷材を用意した。また、センサ庫の蓋の重石を白色の非磁性コンクリートブロック にすることで、日射による影響の低減を目指した。

磁力計センサの傾斜・温度環境を把握するため、2021 年 1 月 25 日に磁力計センサに温 度計付き傾斜センサを取り付け、26 日に収録を開始した(図 4)。「①断熱層の追加」のた め、2 月 6 日に磁力計センサに被せる断熱箱を製作し、設置した(図 5)。「②センサ庫内の 熱容量の増加」のため、1 月 26 日にセンサ庫内に保冷材を設置した(図 6)。「③日射の影 響の軽減」のため、1 月 26 日にセンサ庫の蓋に白色の非磁性コンクリートブロックを設置 した(図 7)。非磁性コンクリートブロックは、国内で作成(図 8)し、持ち込んだ。材料は、 水、白色セメント、砂(寒水石 1mm)、砂利(寒水石 10mm)である。作成時は、コンクリートの標準的な材料比である水セメント比 0.5 付近になるように表 1 を目安に作業を行った。

磁力計センサの傾斜・温度の変化を図 9 に示す。断熱層を追加した 2 月 6 日以降、セン サ温度の日変化振幅が顕著に小さくなっていることが分かる。今回実施した改善策による 効果の定量的な検証は来年度に行う予定である。



図3 センサ庫の温度環境改善策



図4 傾斜・温度計設置(左:クーラーボックス内にロガー、右:センサ取り付け状況)



図5 断熱層の追加(左上:製作中、左下:完成、右上:設置中、右下:設置後)



図6保冷材の設置(左:設置前、右:設置後、上:断熱蓋上、下:センサ庫内)



図7 白色非磁性コンクリートブロック(左:設置前、右:設置後)



図 8 白色非磁性コンクリートブロックの作成(左上:材料、左下:完成品と型、右:コン クリート作成作業)

	使用量 [L]	密度* [kg/L]	使用重量* [kg]
水	4.5	1	4.5
セメント	3	3	9.0
砂	14.5	1.7	24.7
砂利	4.5	1.6	7.2

表1 非磁性コンクリート作成時の素材の使用量

* 密度は本作業での実測値ではなく、一般的な値。水セメント比(水重量/セメント重量) の計算のための使用重量[kg]は使用量[L]と密度[kg/L]から推定したが、実際の密度とはかな り差があるので、次に作成する際は、実際に重量を測った方がよい。



図9磁力計センサの傾斜・温度及び傾斜計プリアンプ温度(2021年1月26日~3月4日)

4. 天測の準備

偏角測定のためには方位角の基準となる方位標の真方位角の情報が必要である。現在の 真方位角採用値は、50年以上前のJARE10が太陽天測で決定したものであるが、GNSS (JARE48,50,54)や星を使った天測(JARE56)で得られた真方位角と1分角弱のずれが あることが分かっている*7。採用真方位角の変更と今後の真方位角の測定方法について調査 するため、JARE62では、JARE10と同じ太陽を使った天測、所内で実施している星を使 った天測、GNSSを使った精密測量(国土地理院へ依頼)の実施を計画している。

太陽を使った天測は、近年は所内の業務の中で行われていなかったため、IAGA ワークショップ 2016 で受けた講習*8を元に観測手順をまとめ、稲村隊員に観測方法を指導した。また、観測精度を高めるため、観測に使うノート PC に USB 接続の GPS アンテナを取り付け、時刻を同期することで、屋外の観測においても時刻精度を保つシステムを構築した(図10)。



図 10 GPS アンテナを用いたノート PC の時刻精度の確保

5. 今年度のまとめと今後の方針

今年度から来年度まで当所から越冬隊員を派遣でき、現地での様々な調査を予定してい る。昭和基地への人員・物資の輸送は年1回(11月頃に出発)であり、隊員の技術習得と 物資の準備はそれまでに行う必要があるので、今年度はその準備と現地到着後の調査観測 開始を最優先とした。年度当初の計画では予備的なデータ解析や全磁力繰り返し観測を応 用した車両擾乱量調査等も予定していたが、昭和基地で使用しているフラックスゲート磁 力計とFT型磁気儀が相次いで故障し、その対応等に時間がかかったため、上記の観測準備 を優先し、来年度に見送った。弱磁場方式の絶対観測の開始(2月上旬)と温度計付き傾斜 計の設置(1月下旬)は予定よりやや遅れたものの、順調に実施している。やや遅れた原因 は、新型コロナウィルス感染症の影響で昭和基地での引継ぎ期間が半分程度に短縮された ことにより、引継ぎ作業を優先させたためである。

来年度は、現在進行中の観測を継続するとともに、ゼロ磁場方式と弱磁場方式の精度・運 用面での比較、センサ温度管理の改善策の効果検証、連続絶対値からの月代表値の算出方法 の検討等を行う予定である。

[成果の発表]:

仰木淳平、「南極昭和基地における地磁気観測の改善と地球磁場研究への国際貢献」、令和2 年度施設等機関研究報告会

[参考文献]:

*1 INTERMAGNET Technical Manual, https://intermagnet.github.io/publications.html *2 有田真, 井智史, 仰木淳平, 高橋幸祐, 門倉昭, 源泰拓: 昭和基地における地磁気観測 基線値とセンサーの傾斜の変動, 南極資料, Vol. 64, p. 1-20, 2020

*3 Jankowski, J., Sucksdorff, C.: Guide for magnetic measurements and observatory practice, IAGA, Warsaw, p. 87-98, 1996.

*4 Worthington, E., W., Matzka, J.: U.S. Geological Survey experience with the residual absolutes method, Geosci. Instrum. Method. Data Syst., 6, 419–427, 2017

*5 仰木淳平,高橋幸祐,平原秀行,有田真: 南極昭和基地の地磁気データの品質及び基線 値安定性についての調査,平成 29 年度調査研究成果報告書

*6 R. Egli, R. Kornfeld, R. Leonhardt, B. Leichter, Development of a constanttemperature box for variometers, COBS Journal, 15, 2018

*7 仰木淳平,昭和基地における地磁気関連業務,第 56 次南極地域観測隊気象庁帰国報告 会

*8 仰木淳平,太陽を使った真方位観測の精度についての調査, 第 44 回地磁気観測技術連絡 会 [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(技術課)、森永健司、長町信吾、栗原正宜(観測課)
[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ⁱ。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ⁱⁱ。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ⁱⁱⁱ。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iv。

[具体的な計画と達成目標]:

- 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(図1)。
- 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。

[共同研究に係る関係官署及び所外関係機関]:

Raithing(会社) (今村 尚人 博士) 独・GFZ ドイツ地球科学研究センター(Achim Morschhauser 博士) 神戸大学(堀 久美子 助教) [本年度の成果]:

前年までの成果として、共同研究者の今村博士の協力のもと、過去(1957-1998)の地磁気毎 月値のノイズ(外部擾乱)を除去するための機械学習モデル pyMEGO (パイミーゴ)の構築 が進められていた (pyMEGO については令和元年度の成果報告を参照のこと)。今年度は 先ず、衛星モデルから各観測点での外部擾乱成分を与えられる 1999 年-2015 年の期間で pyMEGO を学習させ、それを用いて衛星モデルの存在しない 1957-1998 年における外部擾 乱成分の予測をさせるため、1957 年まで遡って入力変数となるグローバル地磁気擾乱指数

(Dst 指数、AE 指数、HMC 指数)および柿岡・女満別・鹿屋の太陽天頂角の毎時データ セットを作成した。

本研究では、毎月値 Xmonth の算出において加重平均

 $X^{month} = \sum_{i} w_{i} X^{hour_{i}} / \sum_{i} w_{i}$

を使用する(具体的な加重の表現は表1の通り)。 w_0 , w_1 , w_2 は従来の毎月値算出において もデータ選別の基準として一般的に用いられてきたものである。一方、 w_3 と w_4 は本研究で 新たに導入されるもので、それらの外部擾乱の除去に対する効果の調査が行われた。ここで、 X_{prd} が pyMEGOによる外部擾乱成分の予測値である。ap 指数とは GFZ ドイツ地球科学研 究センターにより公開される 3 時間毎の惑星スケールの地磁気擾乱指数である。国際静穏 日も GFZ により公開されるもので、ap 指数を参考にして各月の最も静穏な日を選出した ものである。

表1 毎時値に対する加重 wiの定義

対象	加重	定義
全毎時値	\mathbf{w}^0	1.0 (一様)
夜間値 0h-3h LT(日変化が最小)	\mathbf{W}^1	1.0(他は 0.0)
国際5静穏日	\mathbf{W}^2	1.0 (他は 0.0)
ap 指数(グローバル擾乱具合)	\mathbf{W}^3	$\propto \exp(-ap^2/2)$
機械学習	\mathbf{W}^4	$\propto \exp(-X_{\rm prd}^2/2)$

毎月値に含まれる外部擾乱の影響除外の効果は、X^{month}の標準偏差

$$\sigma$$
 month = $(\sum_{i} w_i (Xhour_i - Xmonth)^2 / \sum_{i} w_i)^{1/2}$

によって評価する。短周期で卓越する外部擾乱成分が効果的に除去されていれば、σ month が

小さくなることが期待できる。

本報告では毎月値算出の事例として柿岡の X 成分に対して得た結果を示す。従来の方法 (加 重 w^1w^2) で得た σ month、および機械学習を用いない方法 (加重 w^1w^3) により得た σ month を 比較すると (図1)、いずれも 11 年太陽活動周期に合わせて増減していることから、十分な ノイズ除去効果が得られていないことがわかる。 σ month の値は 10nT から 50nT あたりを 推移しており、振幅の微細な永年変化の経年成分を抽出する上で都合の良い毎月値データ セットが作成されたとは言えない。

ー方、pyMEGOの予測 X_{prd} を用いる方法(加重 $w^1w^3w^4$)で得られた毎月値では、 σ month が1桁ほど小さく(1nTから5nTあたり)、また11年太陽活動周期に合わせた増減もほぼ 見られない(図2)。このことは、pyMEGOの導入による顕著なノイズ除去効果が得られた ことを示しており、永年変化の経年成分を抽出する上で X^{month} が大きく最適化された。目 的に叶う毎月値算出アルゴリズムを得ることができたと言える。図2の毎月値 X^{month} では、 Dstによる全体的な「X成分の下がり」が解消され、ベースラインが上がっていることが確 認できる。



図1 毎月値 X^{month} (上) と標準偏差 σ^{month} (下)。加重を w^1w^2 とした従来の方法(オレンジ)と、 w^1w^3 とした ap 指数を用いる方法(青)による。



図 2 毎月値 X^{month} (上) と標準偏差 σ month (下)。加重を w^1w^2 とした従来の方法 (オレンジ) と、 $w^1w^3w^4$ とした pyMEGO の予測を用いる方法 (青) による。

今年度は、pyMEGOを用いる毎月値算出アルゴリズムにより、柿岡・女満別・鹿屋の毎月 値データセットの整備を完了した。次年度以降は、開発した手法を用いて他国の中緯度観測 所データセットの整備を進める。また高緯度観測所の整備に適用できるような pyMEGO の 最適化も行う。

[成果の発表]:

「機械学習に基づく地球主磁場の経年揺動検出に適した長期毎月値データセットの構築」浅利晴紀・栗原正宜・今村尚人、SGEPSS 第148回総会及び講演会 R004地磁気・ 古地磁気・岩石磁気セッション、2020年11月、オンライン開催

[参考文献]:

¹ Finlay, C.C., Olsen, N., Kotsiaros, S., Gillet, N. and Toeffner-Clausen, L., (2016) Recent geomagnetic secular variation from Swarm and ground observatories as estimated in the CHAOS-6 geomagnetic field model. Earth, Planets, Space, 68, 112, <u>https://doi.org/10.1186/s40623-016-0486-1</u>.

ⁱⁱ Asari, S., Wardinski, I. (2018), Rapid fluctuations of Earth's core - Towards a better detection with ground-based magnetic observations. CobsJournal 5 - Special Issue IAGA Workshop 2018. <u>ISBN:978-3-903171-05-3</u>.

Asari, S., Wardinski, I. (2017), Interannual fluctuations of the core angular momentum inferred from geomagnetic field models, In book: Magnetic Fields in the Solar System, pp.111-123, <u>https://doi.org/10.1007/978-3-319-64292-5_4</u>.

iii Gillet, N., Jault, D., Canet, E. et al. Fast torsional waves and strong magnetic field

within the Earth's core. Nature 465, 74–77 (2010). <u>https://doi.org/10.1038/nature09010</u>. 浅利 晴紀・栗原 正宜・森永 健司・長町 信吾、地磁気観測による地球回転経年変化への 示唆、SGD03-10、日本地球惑星科学連合 2019 年大会、幕張.

iv R02 基盤研究 C 計画調書「動的モード分解による地球コア磁気流体波の検出」(別添資料)

[調査研究の種別]:基礎課題

[課題名]: 大気電場の変化と短時間強雨を伴う積乱雲の接近の関連の調査

[担当者]: 熊本真理子(観測課)

[概要]:

発達した積乱雲によって、突然の短時間強雨や突風、降雹、ダウンバースト、竜巻、落雷などのいわゆるシビアウェザー(severe weather)は、5~数10分程度の短時間かつ数100m~数km程度の狭い領域で発生し、時には人的被害、家屋や車両の損壊、果樹の損傷、農作物への被害など様々な被害を伴うことがある。これまでの事例によって、レーダーやドップラーレーダーによる積乱雲の3次元構造から、上空の雹域コアや降水コアの形成から落下に至るプロセスが解析されている^{(1),(2),(3),(4),(5),(6),(7),(8),(9),(10)}。最近では、フェーズドアレイレーダーによる雹域コアや降水コアの詳細な3次元構造の発達が報告されている⁽¹¹⁾。しかしながら、シビアウェザーは局所的に発生するため、現在の約17kmメッシュのアメダスなどの観測網では、被害や降雹の実態をとらえることが難しい。 ー方、短時間強雨を伴う雷雲が通過した場合には、概ね水平方向5km以内では大気電場がW型(+

-+-+) などの特徴的な変化が見られることが、かなり以前から報告されている (12),(13),(14),(15),(16),(17),(18)。近年では、地上の複数地点の大気電場の観測網から、雷雲内の正負の電荷分 布を算出した報告がある^{(17),(19),(20)}。

地磁気観測所では水滴集電器を用いた大気電場の連続観測を実施していた。これまでの観測成果 として、統計調査から雷雲時には急変化がみられることが示され、晴天時や降水時の緩変化につい ては単独の積雲や乱層雲の雲モデルによる電荷パターンが示されている⁽²¹⁾。レーダーや LIDEN と 大気電場から、落雷を伴う雷雲接近時には、−10℃高度のレーダーエコーの反射強度と大気電場の 変化の対応が示され、また、降水がない場合も雷雲接近時に、雷雲の3極構造に対応する W 字型の 変化を示すことが報告されている^{(22),(23)}。

シビアウェザーを事前に察知し、安全な場所に避難するなど、人的被害を防止に役立てることを 目指し、水滴集電器とフィールドミルの大気電場データと、レーダーエコー、アメダス及び部外雨 量データ、LIDEN などの積乱雲発達推移をとらえた各種データを用いて、シビアウェザーをもた らす積乱雲の鉛直構造の時間変化と大気電場の関係を調査する。昨年度実施した降雹を伴う積乱雲 4 例と大気電場の関連の調査から、降雹を伴う積乱雲の接近時には、水平方向 5km 以内に近づいた ときに数 10 分前から大気電場の変動が見られることがわかった⁽²⁴⁾。また、2017~2019 年の 3 月 ~10 月期における大気電場の変化が顕著な事例の調査から、発達した積乱雲接近時には、スコール ラインなど一部を除き、大気電場の変動が見られたが、実際に降水が観測された場合や観測されな い場合もあった。

今年度は、レーダーエコーやドップラーレーダーと大気電場の時間変化から、直前 10 数分前に 上空の雹域コアの探知の可能性を検討するため、昨年度の成果を踏まえ、雹域コアや降水コアと大 気電場の解析、積乱雲接近事例のパターン分類、簡単な構造の積乱雲について電荷モデルを用いた 大気電場の見積もりなどの調査を実施する。

[具体的な計画と達成目標]:

- 1. 降雹を伴う積乱雲3事例のドップラーレーダーによる雹域コアと大気電場の解析
- 2. 発達した積乱雲の事例の抽出

2020年4月~10月において、顕著に発達した積乱雲の事例を抽出し、以下の3種類に分ける。

- i. 地磁気観測所で短時間強雨が発生した場合
- ii. 地磁気観測所では降水が少ないが、付近で短時間強雨が発生した可能性がある場合
- iii. 降水現象が見られない場合
- 3. 積乱雲の接近と大気電場の変化との関連
 - i~iiiについて大気電場の変化の違いを調べる
- 4. 単純な構造の積乱雲における雲内電荷と地上の大気電場の関係

[令和2年度の成果]:

1. 降雹を伴う積乱雲3事例の詳細な解析

2017 年 6 月 16 日地磁気観測所の観測課・技術課事務室周辺にて、0707UT 頃から雨と共に霰 (0.5 cm未満)が降り始め、土砂降りの雨と共に0710-0720UT (10 分間)雹(球状、1-2 cm)が降 り、最大直径は2 cmであった。翌 2018 年 5 月 24 日同じ場所にて、0717UT 雨と雹(0.6 cm程度) が降り始め、0717-21UT (4 分間)、雹(不規則な形状、1-2 cm、最大 4 cm)が雨と共に垂直に降り、 その後、降雨のみとなった。地磁気観測所では 1939 年から大気電場の連続観測を実施しており、 大気電場は顕著な変動が観測された。過去の当所の降雹の記録を調べると、2012 年 5 月 6 日 0353 UT 構内宿舎にて雹(球状、3 cm)が降った記録があり、同日 0415 UT 笠間市で雹(球状、5 cm)が降 った記録があった。このほか、観測課では 2014 年 4 月 4 日 0833 UT 撮影の雹(0.6 cm)の写真が 記録されていた。これらについて、降雹が発生する前から大気電場は顕著な変動が見られた⁽²⁴⁾。今 年度は、降雹の時刻が特定できる 3 事例についてドップラーレーダーのデータから積乱雲の構造と 大気電場の関連について、詳細な解析を行った。

1.1 概要 降電発生状況と観測機器の配置

表1に降雹3事例の状況、図1に空中電気室(水滴集電器)とフィールドミル、図2に構内の機 器の配置図と降雹地点を、図3に周辺の地形図と降雹3事例の経路及び関東地方の地形図を示す。 図2のように、大気電場は、アメダス柿岡から約100m南西にある水滴集電器(空中電気室:セン サーの設置高は地表面から約 2.5m) で、地表面付近から垂直方向の電場(静穏時は正電荷で約 100V/m)を観測していた。フィールドミルはオリジナルデータであり、感度補正などを実施してい ないデジット値のため、絶対値として使用できないが、水滴集電器の正負の極性の変化を確認する など参考資料として使用した。図2のように、22017/6/16と32018/5/24の降電場所はほぼ同じで あり、アメダス柿岡の雨量計との距離は 20~40mと近かったが、①2012/5/6の降雹地点は 150m ほど離れており、雨量は 0.5 mmであった。図 3 から、①2012/5/6 は 0335-53UT 竜巻が発生し、 0351UT 頃北条では竜巻による人的被害および家屋の甚大な被害が発生し、スーパーセルであった ことが報告されている⁽²⁵⁾。この2分後0353UTに構内で降雹(3 cm)があり、さらに22分後0415UT 笠間市で降雹(5 cm)が記録されている。②2017/6/16と③2018/5/24の積乱雲の経路は、栃木県・ 茨城県県境付近から加波山方面を経て発達し、同じような経路を通ってほぼ同じ時刻に地磁気観測 所で降雹があった。雹の形状は①2012/5/6と②2017/6/16は球状、③2018/5/24は不規則状と異なっ ていた(図4)。図3右のように③2018/5/24の事例では、八王子駅周辺でも降電2cmが記録されて おり⁽²⁶⁾、ドップラーレーダーによる解析がされている⁽²⁷⁾。どちらも西側に南北走向の山があり、 地形の影響が推察される。

1.2 日本付近の気象状況

降雹3事例とも高層天気図(300hPa)では-45℃の強い寒気移流があり⁽²⁴⁾、図4のように衛星の 水蒸気画像⁽²⁸⁾から関東地方付近に暗域がかかり、中層から乾いた空気が移流し、大気不安定な状 態で、下層と上層の鉛直シアーは大きく、水平スケールは小さいながら、鉛直方向に活発な積乱雲 が発生している。これらの日には関東地方の他の地点でも降雹が発生している。

1.3 降雹発生前のレーダーと LIDEN および気象データの時間変化

レーダーエコーによる雹の目安として、1) 反射強度 45dBz 以上であること⁽³⁰⁾、また、被害の発生した降雹では反射強度 55dBz 以上であったこと⁽³⁾、2) Vild (Vertically Integrated Liquid Water density:鉛直積算降水量密度)が 1.0g/m³以上という条件が 15mm 以上の降雹の必要条件であること⁽⁵⁾、3) 暖候期の雹判別の閾値として 3.5g/m³、top(頂高度)8km が適当であるとされていることから⁽⁷⁾、これらを雹域の参考とした。図 5①、2、3はそれぞれ事例 2012/5/6、2017/6/16、2018/5/24 に関するもので、上段から(1)レーダーエコー頂高度、(2) - 10℃面 40dBz 以上(高度①約4km、2)約6km、③約5km)、(3)降水強度(高度約2km)、(4)LIDEN(▲雲間放電、×対地放電)、(5)雨量(10分値)*、(6)アメダスの気温と風、中心は地磁気観測所、①の太い×は笠間市。円は半径 10km と 20kmである。時系列は左から右に進む。

図5の(3)より、レーダーエコー53dBz以上の領域(雹域に相当)は①2012/5/6と②2017/6/16は進行方向20km、直交方向10kmの拡がりがあり、③2018/5/24は進行方向10km、直交方向5kmと小さい。同図(1)より積乱雲の雲頂高度は①と②は13km以上の領域が20×20km広がり、③は12km以上の領域が10×10km程度である。同図(2)より一10℃面高度50dBz以上(橙から赤の部分)は①、②、③は10km程度の領域で、時間と共に、地磁気観測所付近で急減し、同図(5)によれば広がりが数km程度の狭い地域で雨量が観測されている。同図(2)より①2012/5/6は、笠間市付近で急減が見られ、同図(5)によれば雨量が観測されている。同図(4)LIDENより雲間放電、対地放電が活発で、地磁気観測所付近で対地放電が見られる。同図(6)より①は南風の暖気移流、②は東北東風で南北走向に温度傾度があり、③は東南東風で東西走向に温度傾度があり、ともに地磁気観測所付近で寒気と暖気の境界があった。

1.4 降雹を伴う積乱雲の接近(ドップラーレーダー)と大気電場の変化

図6は3事例の羽田ドップラーレーダー、成田ドップラーレーダーによる積乱雲の進行方向の5 ~6分毎の鉛直断面図で、地磁気観測所の位置を「×」で示す。反射強度の赤い部分は、レーダー エコー53dBz以上(雹域に相当)の領域で、赤枠の時刻は、上空に雹域コアがかかりはじめた時刻 を示す。図7に降電3事例の大気電場と降水強度(1分値)を示す。降水強度(1分値)は1分毎 の降水量(0.5mm単位)の時間変化から求めたものである。大気電場は確定値(1分値)と参考デー タとして1m(分値:オリジナルデータ)と1s(秒値:オリジナルデータ)に平面較正1.3を掛け た値を記す。②③は保守点検のための作業欠測が1-2分ある。5~6分毎のドップラーレーダーの鉛 直構造と図7の大気電場と降水強度(1分)を合わせてみると、積乱雲の接近に伴い上層雲がかか り始めた頃に、I大気電場は①②では正、③では負に変化し、中層雲がかかり始めると、II大気電 場は①②では負、③では正の極性に変化している。IIIヴォールト(上昇流域)の領域になり、上空 に雹域コアがかかり始めると(図6の赤枠の時刻)、大気電場は①②③で正の極大となり、直後に負 の極小に急変している(図7の赤矢印)。この頃、ドップラーレーダーでは後方に雹域コアの降下が 見られる。図7の青点線のように、降雹の時刻は①②③とも大気電場は0付近で変動している。こ れらは②③の霰や雹の降り始めおよび①②③の降雹があった時刻と一致している。

1.5 積乱雲内の電荷構造と地上付近の大気電場 降電2事例

1.4の降雹事例から、進行方向にヴォールト(上昇流域)があり、積乱雲の構造がシンプルな② 2017/6/16 と③2018/5/24 について、積乱雲の電荷構造と地表面付近の大気電場の概念図を図 8 に 示す。②は積乱雲の接近に伴い、I上層雲(+電荷)がかかり始め、地表付近では+が増加し、II 次第に雲が厚くなり中層雲(一電荷)がかかり始め、地表付近では大気電場が一の極小となり、III ヴォールト(上昇流域)の領域に入り、上空に雹域コアがかかり始めると、地表付近では+極大と なり、その直後、雹域が下層に降下し始めると地表付近では一の極小となり、雹域が地上に達する と0付近となり変動がみられた。地表面付近では一の電荷のなかに+の電荷も混ざり合い、土砂降 りの雨と雹がアースされたと推測する。③はI中層雲(一電荷)がかかり始め、地表付近は一から +となり、II中・下層雲がかかると、地表付近は+の極大となり、その後-に急変し(この頃、付 近でエコーの降下あり)、IIIヴォールト(上昇流域)の領域に入り、上空に雹域コアがかかり始める と、地表付近は+の極大となり、強雨域の接近に伴い、地表面付近の大気電場は一極小に急減し、 降雹の発生とともに大気電場は0付近となり変動がみられた。

図9のように、積乱雲内の電荷分布を+と-のシンプルな構造とし⁽³¹⁾、ドップラーレーダーの雹 域コアの高度と水平距離および地表付近の大気電場の極大、極小値から、積乱雲の+電荷と-電荷 を変えて、図7の②と③の大気電場の極大、極小値となるように見積もった。

1.6 球状と不規則な形状の雹形成の違い(ドップラーレーダー)

図 10 に①2012/5/6、②2017/6/16 および③2018/5/24 の成田と羽田ドップラーレーダーによる PPI (Plan Position Indicator:ビーム方向の水平面)の反射強度とドップラー速度を示す。①はス ーパーセルであり、中層(高度約6km)付近で反時計回りの回転がみられ、下層で収束、上層で発 散している。②は中層(高度約6km)付近で反時計回りの回転が見られ、上層(高度約7km)でド ーナツ状のWER (Weak Echo Region)があり、雲頂付近の上層(高度約13km)では発散、下層 (高度約1km)で収束があり、スーパーセルの形状をしている。③は下層(高度約1km)の進行方 向前面でエコーの後方に向かう風が卓越し、後面からエコー前面に入り込んでくる風と収束し、中 層(高度約4km)から上層(高度7km)の後方では、後面に向かう流れがみられる。上層(高度約 7km)では前述したエコーの前方から後方へ流入してくる風を挟んで、進行方向の後方から前方へ 向かう流れが卓越している。図11から③2018/5/24ではエコーの進行方向後方でヴォールト(上昇 流域)があり、これに直交する方向の後方西端で、上空高度9kmで発散し、強い西風にぶつかり、 高度7kmではエコーの西端を進行方向に向かう流れとなって、小さいながらヴォールト(上昇流 域)が見られる。

表2に②と③の違いを示す。②2017/6/16では中層の反時計周りの回転がみられ、ヴォールトは 円形のひとつのシステムで、一様な球状の雹が形成されている。③2018/5/24 は進行方向に細長い 小さなシステムで、幅の狭い領域の中で、エコーに向かって、下層から上層に上昇流があり、上層 の後方西端で進行方向にまわり込むような流れとなり、両者が交わるあたりで、過冷却水をまとう 雹がくっつきあって、不規則な形状の雹が形成され、また、一部はそれらの雹がくっついて大きく 成長したと考える。

2. 大気電場の変動が顕著な事例

本報告の調査期間は2020年4月~10月とした。図12のように2020年4月~10月において、

1時間降水量が大きくなる時は、大気電場の変化が顕著であった。そこで、大気電場の変化が500V/m 以上 67 例について、大気電場の変化と積乱雲の発達および降水の関係について調べた。大気電場 は 1m (分値:オリジナルデータ)を使用した(1分確定値はおおよそオリジナルデータに平面較正 1.3を掛けた値)。表3に調査項目を示す。大気電場の変化パターン、地電流の雷対応による欠測や ノイズおよびgap、降水強度(1分値)、降水量、積乱雲の構造として、レーダーの-10℃面 40dBz 以上、CAPPI (Constant Altitude PPI:等高度面データ)23dBz 以上の最も高い高度、LIDEN、 付近の雨量、および最大降水強度となるときの大気電場の型について調べた。

2.1 最大降水強度発生時の大気電場の変化

最大降水強度が発生時の大気電場の型を図 13 に示す。大気電場が一で小となる事例が最も多 く 40%近くあり、次に 0 付近で変動の事例が 25%、次に一から+、+から一に変化する事例が約 10%、+で極大時は 1 例のみであった。雨無しや降水量 0.5mm も合わせて 24%であった。典型的 な 2 つの例を図 14 に示す。図 14 右のように、大気電場の変化が一極小となる時に短時間強雨が発 生した事例は、降雨が継続中に発達したエコーがかかってきた場合であり、次第に降水強度が大き くなる山型の変化であった。これは、「暖かい雨」型⁽³²⁾、ウォームレイン⁽¹⁷⁾と考える。図 14 左のよ うに、大気電場の変化が 0 付近に急変する時に短時間強雨が発生した事例は、突然強い雨が降り出 すことが多く、孤立した雷雨が到来する場合であった。これは、霰を含む「冷たい雨」型と考える ⁽³²⁾。大気電場は降水の降り出す数 10 分前から大きな変動が見られた。後者は降らないところに急 な短時間強雨が発生するため、屋外で作業中の場合など、特に注意が必要である。

2. 2 雹域コア(-10℃面 40dBz 以上)発生時および雷電の事例

表4上段にレーダーの-10℃面40dBz以上が水平距離5km以内にあった場合7例、水平距離7-15kmにあった場合6例を示す。前者は1例を除き、近くで雷鳴があり、地電流にノイズやgapがみられた。雨無しの場合は、大気電場は+-または-変動など大気電場の変動はシンプルであった。

表4下段に地電流にノイズやgapが見られた17例を示す。1例の遠雷を除き、近くで雷鳴が発生していた。大気電場の大きさはいずれも2000V/m以上であった。

2.3 地磁気観測所で降水現象がほとんど見られなかった事例

表5 に降水無しと降水量0.5 mmの事例を示す。降水無しの場合は、大気電場の変動が+-、-+、 -変動など、67 例の中では大気電場の変動が小さかったが、0.5 mmの場合は、大気電場の変動の急 変が見られるものもあった。図 15 にこのような事例を示す。降水が観測されなくても、大気電場 が短時間に急変しており、レーダーエコーの変化から、付近で降雨があったと推測される。

3. まとめ

地磁気観測所で発生した3事例の降雹を伴う積乱雲と大気電場の調査から、図6、図7のように、 I上・中層雲が接近すると大気電場は+または-となり、II中層雲が厚くなると-または+となり、 III中層の雹域コアが上空にかかると+極大となり、直後に急変し一極小となり、この頃付近で雹域 の降下が見られ(①は-が小さかったが、0.5 mmでこの付近では降水の降下が小さかったためと考 える)、降雹時には0付近で変動が見られた。IIIの変化は、降雹直前に上空の雹域コアの接近を検知 することに有効と考える。
これは、図8のように電域コアは高度4-6km (0℃~-10℃付近) にあり、図16のように雷雲 の霰の電荷分離は-10℃以下で-電荷、-10℃以上で+電荷と分かれることから⁽³²⁾、上空に電域コ アが接近した時には、電域コア下部の+電荷の影響、その後、電域コアが降下する時には、降水と 共に電域コアの-電荷の降下の影響が大きくなり、降雹時には-の電荷に+の電荷が合わさって地 表面にアースするためと考える。

これまでの雷雲の強雨域の際には、上空の+の強雨域が地上に降り、地上ではW型の変化となり 強雨域は+となると報告されているが^{(12),(13),(17)}、降雹3事例については、上空の雹域コアは+電荷 であったが、降雹直前に-となり降雹時には0付近での変動であった。

2020年7~10月の大気電場の変化が顕著な事例(500V/m以上)から、発達した積乱雲において 最大降水強度は、主に大気電場が一極小時と0付近の時に見られ、前者はウォームレインと考えら れ、後者は降雹事例と同様な変化であり、短時間強雨の数10分前から大気電場の変動が見られた。 突然の短時間強雨の発生前に大気電場が急変することを知ることは、数10分前の探知に有効と考 える。

電形成や-10℃付近の電荷分離について、まだ不明なところが多く、今後の防災のために Severe Storm の研究が発展するためには、レーダーやドップラーレーダーの時間変化と共に大気電場のデータも有効と考える。

[謝辞]

雨量*につきまして、茨城県土木部河川課、国土交通省関東地方整備局、国土交通省霞ヶ浦河川事 務所および独立行政法人水資源機構のデータを利用させていただき、気象研究所の吉田 智様およ び元気象研究所の高谷美正様にはご助言をいただきました。降雹の写真につきまして、地磁気観測 所の職員(当時を含む)の方々のご協力により収集することができました。 写真1、写真2、写真 3 は職員の方からご提供いただき、写真4 は職員の方々にご協力いただき撮影しました。ここに謝 意を表します。

[成果の発表]:

- 2021年1月8日日本大気電気学会第99回研究発表会(オンライン開催)発表 「降雹発生直前の大気電場の変化と雷雲の構造―2012年5月6日・2017年6月16日・2018 年5月24日地磁気観測所―」 大気電気学会誌,Vol.15 No.1 (No.98), 61-62. 2021
- 2. 日本気象学会「調査ノート」への投稿予定

[参考文献] :

- (1) 中村一・森真理子(1999): 1996 年 7 月 15 日の下館・つくばのダウンバースト, 気象研究ノート, (193), 111-123.
- (2) 奥田泰雄・伊藤 弘(2000): 平成 12 年 5 月 24 日関東北部で発生した降ひょう被害, 日本風工 学会誌, 84, 15-20.
- (3) 森真理子・高谷美正(2004): 関東地方で発生した降ひょう・ダウンバーストを伴ったスーパーセルの事例解析, 天気, 51(8), 567-581.
- (4) 出世ゆかり・坪木和久(2006): 非定常で短寿命の対流セルのもたらす降雹の水平規模と雹の大き さー2002 年 5 月 26 日の阪神間の降雹事例について一, 天気, 53(11), 31-37.
- (5) 吉田公一ほか (2006): 降雹時のレーダー3 次元データの特徴,関東甲信地区調査研究会.平成 18

年度東京管区調査研究会誌.

- (6) 山下浩史(2007): 2005 年 5 月 15 日東京都八王子に降雹と突風をもたらした積乱雲の特徴について, 天気, 54(9), 21-36.
- (7) 内田顕司ほか(2010): 気象レーダーによる雹(ひょう)の監視の試み, 調査ノート, 天気, 57(8), 112-116.
- (8) 国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人建築研究所(2012): 平成24年5月6日に茨城県つくば市で発生した竜巻による建築物被害(速報), 1-16.

https://www.kenken.go.jp/japanese/contents/activities/other/disaster/kaze/2012tsukuba/120506-tsukuba.pdf

- (9) 山本晴彦ほか(2013): 2012 年 5 月 6 日に茨城県つくば市で発生した竜巻災害, 自然災害科学, 32-1, 45-59.
- (10) 林修吾, 吉田智, 楠研一 (2015): 2014 年 6 月 24 日に調布・三鷹に激しい降雹・落雷をもた らした積乱雲の発生発達とその構造、2015 年度秋季大会講演予稿集, 108, 403, 日本気象学会.
- (11) 足立透(2019):フェーズドアレイレーダーを用いた顕著な大気現象の観測,日本風工学会誌, 44(4),371-380.
- (12) Simpson, G. C. and F. J. Scrase (1937) : The distribution of electricity in thunderclouds, Proc.
 R. Soc. London, Set. A, 161, 309-352. J.Meteorol. 7, 322-332.
- (13) 畠山久尚・久保時夫(1946):昭和15年8月中旬以後の雷雨の際の前橋に於ける電位傾度の
 變化,中央気象台彙報,271-275.
- (14) 今道周一・菊池繁雄(1950):柿岡附近の雷による急變化電場に就いて, 雷の研究, 54-61.
- (15) Kuettner, J.(1950) : The electrical and meteorological conditions inside thunderclouds, J.Meteorol. 7, 322-332.
- (16) 北川信一郎(1996): 大気電気学, 東海大学出版会, 200pp.
- (17) 高橋劭(2009): 雷の科学, 東京大学出版会, 270pp
- (18)藤原博伸ほか(2020): 2014年6月24日の降雹セルと非降雹セルの雷活動について、大気電気 学会誌、Vol.14 No.1 (No.96), 107-108.
- (19) Jaques, R. and Lacerda M.(2014) : Method LMA-EF for determination of position and intensity of electric charges inside thunderstorm clouds, XV International Conference on Atmospheric Electricity, 15-20 June 2014, 1-10.
- (20)山下ほか(2019):雲内電荷推定を目的とした静電界計測網構築の検討,日本大気電気学会誌,94, 172-173.
- (21) 外谷健・角村悟(1998);空中電気変化パターンに関するいくつかの考察,技術報告,373-4,58-71.

TOYA, T., and Tunomura, S. (2008): Discussion of Variation Patterns of Atmospheric Electricity, 地磁気観測所テクニカルレポート 別冊 第06巻, 11-22. (英語版)

http://www.kakioka-jma.go.jp/publ/journal_DB/pdf_files/technical_report_of_KMO_sup_06_02.pdf

- (22) 森永健司ほか(2008): 雷監視システム支援に向けた大気電場データ活用の基礎調査(平成19~20年度), 平成20年度地磁気観測所調査研究業務成果報告書.
- (23) 長町信吾ほか(2012): 冬季雷を対象とした庄内平野における大気電場観測, 日本大気電気学会誌, 101-102.
- (24) 熊本真理子(2020):降雹を伴う積乱雲と大気電場の関連の調査(令和元年度),令和元年度地磁気観測所調査研究業務成果報告書.

(25) 気象研究所(2012): 平成24年5月6日に茨城県つくば市付近で発生した竜巻について、報道 発表資料、平成24年5月11日.

https://headlines.yahoo.co.jp/hl?a=20180524-00003549-weather-soci

(26) https//headlines.yahoo.co.jp/hl?a=20180524-00003549-weather-soci

- (27) 石原正仁(2020):降雹の二重偏波レーダー解析 -2018 年 5 月 24 日八王子事例-、気象研究 所台風・災害気象コロキウム,2020 年 2 月 6 日.
- (28) 高知大学 気象情報頁、<u>http://weather.is.kochi-u.ac.jp/</u>
- (29) Atmospheric Soundings, University of Wyoming, http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html
- (30) Waldvogel, A., B. Federer and P. Grimm, 1979 : Criteria for the detection of hail cells. J. Appl. Meteor., 18, 1521-1525.
- (31) Rakov, Vladimir A. and Martin A. Uman(2005) : Lightning: Physics and Effects, Cambridge University Press.
- (32) 高橋劭(2004): 雷雲電荷発生機構·霰の電荷符号逆転の謎、天気, vol.51, No.1, 7-15, 日本気象 学会.

							降雹				降水	
事例	日付	発生時刻 [UT]	継続 時間	雹の形状	主な雹 の 大きさ	最大	雹の特徴	発生地点(地磁気 観測所又は職員 が写真撮影)	雨量計 との距離 [m]	降水 最大降水強 量 度(1分) [mm] [mm/h]		備考(大きさは雹)
1	2012/5/6	03:53 [04:15]	不明	球状	不明	3cm [5cm]	不透明の球状 [直径5-10mm位の粒が集 まって直径5cmの球体に なっている]	構内宿舎周辺 [笠間市]	145 [NE13km]	0.5*2	0.5*2	 ・[] 笠間市*1 ・0335-0353UT 竜巻、0351UT 北条 の竜巻被害⁽²⁵⁾ ・竜巻狭生前つくば市 電*3 ・0415UT水戸2.8cm^{*4}、0450-55UT盛 図0.5cm^{*4}
3	2017/6/16	07:10-20	10分	球状	1-2cm	2cm	不透明の球状が 透明な氷で覆われている	観測課・技術課 事務室周辺	17 38	19.0	72	・0707UT雨と霰(0.5cm未満)降り始 め、降電時は雨まじり ・0434UT 宇都宮2cm ^{*4}
4	2018/5/24	07:17-21	4分	不規則な 形状	1-2cm	4cm	いろいろな形(突起状もあ り)の雹あり、中が不透明 が多いが透明もあり、不透 明の層が重り中心部分が 透明なものもある	観測課・技術課 事務室周辺	17 38	3.5	85.7	•0717UT雨と雹(6mm程度)降り始め、 降雹時は雨まじり,垂直降り、0721UT 雹無くなり降雨のみ •0430UT頃八王子駅周辺 大粒の雹 (2cm余り) ⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾

表1 降雹3事例

*1[] 笠間市、*2 降電発生時の降水量と最大降水強度、*3 SNS、*4 地上気象観測日表



図1 空中電気室(水滴集電器)とフィールドミル 左:建物の側面中央あたりから細管が出ており、小さな水 滴が噴出落下している。本体は室内。右:フィールドミル



図2 地磁気観測所の構内配置図(地 理院地図(2020)) 空電室(水滴集電 器)、アメダス(柿岡)、①,②,③降電地 点とそれぞれの距離





図3 降雹地点(①2012/5/6と②2017/6/16と③2018/5/24地磁気観測所、①2012/5/6笠間市)と ①竜巻の経路²⁵³と②、③レーダーエコーの経路および地形図(地理院地図(2020)) 右図 +:地磁気観測所、〇:八王子駅(③降雹2 cm)^{26),(27)}

① 2012年5月6日



•0353UT 最大3cm •0415UT 5cm 構内宿舎 笠間市(NE13km)

・雹 水戸(2.8cm)^{*4}、盛岡^{*4}(0.5cm)
 ・0351UT 北条竜巻など⁽²⁵⁾
 ・北条竜巻発生前 つくば市 雹^{*3}

② 2017年6月16日



・0710-20UT 1cm(最大2cm)土砂降りに混じる ・0434UT 宇都宮 雹(2cm)^{*4}



・0717-21UT 1-2cm(最大4cm) 雨に混じる

・0430UT頃 八王子駅周辺 大粒の雹 (2cm余り)^{(26),(27)}



水蒸気画像 高知大学気象頁より(2018) (20) (コントラストを明暗+30に調整した)







図4 降電3事例の写真と気象衛星水蒸気画像とホドグラフ *3,*4 は表1参照





図 5 降雹 3 事例のレーダーエコーと雷と気象データ (1)レーダーエコー頂高度、(2)-10℃面 40dBz 以上(高度①約4km、②約6km、③約5km)、(3)降水強度(高度約2km)、(4)LIDEN(▲雲間 放電、×対地放電)、(5)雨量(10 分値)*、(6)アメダスの気温と風、中心は地磁気観測所、①の太い ×は笠間市。円は半径 10kmと20km。時系列は左から右に進む。





図7 降電3事例の大気電場と降水強度(1分値) ②2017/6/16 0646-47UT、③2018/5/24 0701UT 作業欠測 1m、1s は参考値(オリジナルデータに平面較正1.3 補正) 青点線: 霰ま たは降雹の降り始めと降り終り、赤矢印:降雹直前の大気電場の+極大から-極小への急減



図9 積乱雲内の電荷分布と大気電場(Rakov and Uman(2005)⁽³¹⁾)





図 11 ③2018/5/24 0650UT 進行方向断面(成田 DR)と直交方向(羽田 DR)の反射強度 とドップラー速度

項目	②球状の雹	③不規則形状の雹						
上層		発散						
下層	収束							
鉛直シアー	下層ESE	風、上層WNW風						
高層	不安定	上空の北西風が顕著						
地上気温分布	南北に温度差	東西に温度差						
中層	回転	2つの気流が顕著						
53dBz以上の領域	約20km×20km	長さ10km×幅5km						
-б	円形	前方に細長い						
-77 -766	ひとつのシステム	後方西側に小さなヴォールト						

表2 ②2017/6/16 球状の雹と③2018/5/24 不規則な形状の雹の比較

上昇気流と雹域コアの模式図 ②2017/6/16



32018/5/24





図12 大気電場の変化と1時間降水量 2020年5月、6月 水滴集電器(分値:オリジナルデータ)、フィールドミル(分値:オリジナルデータ、 参考資料)、地電流(分値:EW・NS)、1時間降水量(柿岡) 地電流観測の欠測 は、近くに雷鳴があり落雷のおそれがあるときに機器の保護のため停止

			大気電	**			<u>降水</u>	U-	-9		「日見足」			1 17	K 🕿	_
dete [JST]	調査事例 [UT]	大気電場の大 きさ HitFが計画	大気電場の変化	降り始め直前の 電場変化 R毎・勝水毎	最大降水時 の大気電場	強雨の型	部外雨量(5km) など	ー10℃面40dBz 以上(電域コア) など	23dBz以上の 最大高度 oappi	LIDEN ▲雲間,×対 始故雪	地電波opr N:ノイズ, タ·タゴ	智対応	日合計	1時 間景 大催	時分 [JST]	10分 開景 大俊
v	▼ 04.15.441		¥		*X -1- (+) C		Ψ	with v	¥		v u v u u v	v.	¥	L HAI \vee	¥	
4/1	01d5-14h	-1000	-	回時	極小行近 D冊	地雨 中冊		層祆	5-6km			なした	33.5	5.5	21:50	1.5
4/5	05d3-7h	±2000	- +-+-+-+	-10分	極小	少雨			2km以下			なし	2.5	2	13:22	0.5
4/9	09d7-12h,12-16h	±5000 H	-+↓-±±脈動-	—30分	極小	地雨			4km	0810▲	0805N,0810-25	遠雷 201805-40	12	3	19:05	1
4/11	11d13-14h	±3000 H	-+-+凸-極小↓変動+	-20分	極小	0.5			3km			なし	0.5	0.5	23:41	0.5
4/12	11d15-16h	+500,-1000	- /]\+	同時	0.5	0.5	1510八鄉柿間0.5		3km			なし	4	1	6:37	0.5
4/13	13d1-6h, 6-8h	±3000 H	-+-脈勸++-+、-+-↓+-	同時、一10分	極小.極小	地雨、凸雨			5km通過, 4km0650	0410▲S2km, 0220▲N10km,	0410N,0410- 20欠	遼宙 雪0400-20	35	7.5	14:13	2
4/18	1.8d2-8h	+3000 H	— +- + NF型h	同時	極小付近	地雨			5km0210,4km2120-	0540 A F5km	0600N,0600-	遠雷	87	19	12.33	6
	19d20-21h.23h-										0/40火	motor.				
4/20	20d1h	-1000	-0-,-0-	同時	極小行近	地雨			5km1可 <u>划</u> 12010			なし	10.5	3.5	9:21	1
4/23	22d15-17h	+1000,-2000	+-+-+	R無	R無	R無			m通過1030,付近で			なし	0	0	24:00	0
									少し降下模様		0730 0845 085					-
4/24	24d7-14h	+6000,-4000 H	+-+-++	+15分	極小付近	地雨			4km0900_10-40上_5	D滅	2,0904N,0903-	近雷 ==0500-20	7.5	4.5	19:35	- 1
									4kmかかる0820		1130欠					
4/27	27d5-12h	±3000 H	土土紙動、一・一・一土紙動	R無、一20分	極小付近	地雨			5km真上1000_10過			なし	2.5	1.5	19:35	0.5
4 /00			0 1		15 4415				<u>きる</u> 水色5km,1230小エ	0040 1 001		es.		0.5		0.5
4/28	28d6-10h,12-14h	+2000,-3000 H	-0-1+, -+-1+	R無、+25万(-5万)	極小竹近	0.5			⊐一通過.3km	0640 🛦 S3km		なし	1	0.5	24:00	0.5
3/ 3	0308-131	+1000	+0+0+	101 Md	AP 199	地面の地域			3-4KM	0640 4 10	0650N	140	0	2	20.01	0.5
5/6	06d6-13h	±3000 H	+0付近+-脈動	同時	0付近変動	地雨()588) 強雨山型		0700-10 かかり減少	11km	NNW	gap,0752N	近面 10655-1000	28.5	15	16:54	8
										0610▲W2kmと	X,0033 X					
5/13	13d5-7h	+1000,-500	+	R無	R無	R無		0610S10km,top10km	9km(S5km)	E,0600▲ 13kmSW283\$		A送 田 雪0500-0630	0	0	24:00	0
5/19	18d15h-19d3h	+500,-1000	-0-	同時	極小付近.強雨あり	地雨			6km	TORTION JUST		なし	61.5	19	7:20	6.5
5/23	23d0-7h	+200	小+0-	同時	0付近	0.5			水色3km			なし	5	3	2:19	1
5/26	20013-10h	+300,-1000		〒回町(降水張度増加)	11並小小小工		1050瓦会1.0,	1010/J\NE5km,	小世8Km,4Km		100211-000	なし 近雷	11.5	8.5	24:00	2.5
5/27	∠/uə−12n	±2000		コミヘルら減少時	v.u +	0.5	1110八鄉柿岡0.5	1020E2km通過	oAIIIIUU,5~6km1040		1000N,1008-11	≅1000	1.5	ษ.5	U:13	2
5/28	28d12-16h	+2500,-3000	/)+-、/)+-+↓+-+-	小+-15分	極大付近,14h過ぎ. 15h過ぎ+雨	凸雨			様5km,1410発達 雨,1420_5km真	1330▲SW5km	1336N	なし	3	3	24:00	1.5
								0600-10SE5km/小,	<u>5km1510.1540</u> 調			法册			<u> </u>	
5/30	30d6-7h	+1000,-2000	+	R無	R無	R無	1	付近で急発達。 top10km 0620音:9	1–9km	0610▲7kmSE免達		28 册 室0600	0	0	24:00	0
6/11	11d5-12h	+1000,-1500	-+-+脈動0-	同時	極小付近	山型			1-7km			なし	26.5	11	18:28	3.5
6/12	12d7-10b	+2500	W型+-0-0+-+-	+15分0付近	0付近	凸山型		0810-20SW5km小 エコー付近で急発	12km0810 1-9km	0810-10▲付近 1-	0755gap,0821-	近雷	15.5	15.5	18-02	5.5
0/12	120/ 1011	12300	W ± . 0 0	137101112	015.21	цщт		違.top13km	128110010,1 3811	10km.0910	0906欠	2 0810-50	10.0	10.0	10.02	0.0
6/13	12d22h-13d7h	±2500	-+-脈動+-+-+- 変動	同時	0付近、極小付近	凸雨、地雨		付近で発達	6km22h,7km05h			なし	39.5	7	14:20	3.5
6/16	16d10-13h	+2500,-3500 H	∨型+-0付近↓	+60分一極小40分	0付近	0.5 × 2		1210W15km+N15km	7km1130,6km1140	多数▲	1120gap,1136-	近雷	1	1	22:19	0.5
6/19	19d8-10h	+500,-1000	-+-	ーから+同時	ーから+0付近	地雨、山型			6km0810		*	なし	27.5	6	18:02	1.5
6/22	22d0-4h	+1000,-1500	-0-+,/]\+↓-、/]\+	+同時	0.5×3.R無小 +R毎	0.5 × 3			8km			なし	4	2.5	12:08	- 1
6/28	27d19h-28d4h	+2000 -2500	+脈動-+-+-+-+		服動+.極小付近	地面+山型			7km2120,6km2310,			<u>م</u> ا.	82.5	22.5	9.48	6
6/30	30d7-16h	+1000 -1500			極小付近	地面+山型			28d0030 7km0750 • 15h			** なし	26	5.5	17.14	2
7/1	01d14-17h	±2000	W型風土脈動-+-+	同時	極小付近	山型			7km1450			なし	20	10.5	0:26	3
7/3	03d14-24h	-1000		同時	極小付近	山型			6km1820-30			なし	6	3	23:54	1
7/4	04d14-15h	-1000	小-0-	-5分	0付近 小-から+、極	凸向 凸雨、地雨+			7km1430-40通送减少			なし	40.5	9	4:14	4.5
7/5	05d16h-06d2h	+500,-1000	小-+-,-+-+、-		小付近×2	山型			7km1620•2040			なし	1	5	0:31	0.5
7/6	06d14-16h 07d19-21h	-500		同時 	<u>極小付近</u> - から0付新+	並向+山型 05 凸面			6km1440-50 5-7km2020 直上通過			なし	22.5	4	6:33	1.5
7/8	08d20b=09d3b	+1500 -1000	(h+- +	同時、+から-、-	極小付近×2	並雨+山型、			0Km2220,7Km2240 祭達+付近強L\工			なし	2.5	2	6.13	1
		1000, 1000		から+	12-1-11-222	0.5×2			7-8km1200-10発達				2.0		0.10	
7/9	09d11-13h	+1500,-1000		同時	極小付近	山型			真上			なし	23	8	21:53	4.5
7/11	11d5-6h,10-12h	±1500	₩型風-+↓-+、+-	-20分+、R無	0.5,+,R無	0.5、R無			5-7km0530,5-6km 1050-1100・R無			なし	0.5	0.5	15:32	0.5
7/12	12d4-5h	+500	小+	R無	R無	R無			5-6km0430SW10km 西本-D第			なし	0	0	24:00	0
							1020八鄉柿間1.0		H1H-11							
7/14	14d9-12h	+1000	/]\+-+	R無	R無	R無	小エコー,+付近エ コー		5-6km1020小			なし	12.5	3	10:05	1
7/17	17d12-15h	-500	小-↓0-、小-	同時	極小付近	山型+地雨			5-6km1220,7km付近			なし	7.5	3	22:25	1
7/10	17422-245 0840-25	+ 2000	+-+脈動、-0-0-		極小0.5極大	0.5×5、0.5			SJRM E Ekm			¢-1	5	2	0.40	1
//10	17022 2411,0000 211	12000	+↓-+-		× 3	× 2	1710万余101720八		5-0MII			40	3	2	0.40	
7/21	20d14-19h	±1000	/]++0+1-+-0-,+1-+-	小+10分	+0何近極 小.+極小	凸雨	錫柿園0.5,1730柿園		9km1650-1820,7-8 km1730			なし	9.5	7	0:59	4
7/23	23d3-4h	+500,-1000	-+-↓	-20分	0.5×2	0.5 × 2			4km0230,5-6km0330			なし	6	2	10:55	1
7/24	24d18-21h	+3000,-2000	-0-+-+-0-0-+服動	-10分	+から-強雨×2	山型	1950瓦会8.0	1910 20kmS,	8km近く1950.vildあり			なし	0	0	24:00	0
<u>ا</u>								19201JKm SW	5km0130,5kmvild					-	<u> </u>	
	25d1-3h.4-7h 9-		W型-↓+-+-+-+	10/2	変動時、一か	0.5×3.凸	05 40 / 1993		U200,8km0520真上, 0530発達6-8km	0510 1 011		遠雷				
7/25	11h,19-22h	+2500,-3000	実期、+-↓+-↓+- 変動、-+-、-+-+-	-10分、+-25分	6+0付近	雨.同時 0.5,0.5×6	₩340/\珈祎間4.5		0540vild,+7km,5-7	u≎iu≜SW10km		雷0510	25	9	4:56	5.5
									xmused,5=6km1000, 20h前急にエコー							
7/26	26d0-2h,4-9h	+2500,-3000	-0-↓+-+主変助		急変時0.5×2	0.5×3.山 型.0.5.0.5×2			6-7km			なし	9.5	3.5	22:57	1.5
7/31	30d21-31d1h	-500,-500	/♪-0↓/♪-0-	-8分.同時	-から+.極小付	凸雨、凸雨、 凸雨、			5-7km			なし	8.5	5.5	9:29	2
0.40	1242_0-0-10	+2000 - 2000	_+-変動有0↓-0-	12042 2077	- 10 - 10 - 10 - 10 - 10 - 10 - 10 - 10	08 07		0400WSW100	5_0km00L	0300 4 0200	0358N,0358-	近雷		-	14.0-	
6/12	1203-011,8-12h	2000,-3000 H	+_+_+		ル・G=U1リ近 4.2 - · · · ·	0.3	34 Z	on tour and toking any	5 toluction		0521欠.0915N 0902#ap	章0357-0627 近雷	2.0	2	14:23	1.0
8/13	13d-12h	+2500,-3000 H	W型+-0↓付近変動-+	+10分-20分	-から+0付近	凸向	9號時120mm/h	0940W7-12km減少	5-10km,9kmまで0920		N 0908-1004	20906-1102	22.5	22.5	19:38	12
8/15	15d12-15h	+2000,-1500	W型一変動0↓+-+-	-30分+	-から0+種大付近	0.5	1330R0.5	200BZ以上12 km,1320降下 1-2km	12kmから急減 1250-1320		1228N,1250ga	遠雷 ==0630-0630	0.5	0.5	23:21	0.5
-			and the state of the state				0920五余1230同	增.1230-40W20km	.200 1020		0855N,0910-N	近雷				\square
8/17	1/d8-12h	+1000,-2000	₩型一変動0↓+-+-		+から-極小付近	0.5	11.40同1.0	0910付近,0920NE5km	12km0910		多.0915-欠	20500-	0.5	0.5	21:06	0.5
8/22	22d9-13h	+1500,-1000	+-	R無	R無	R無			iuntopii-12km,6- 8km1050,2km以下			なし	0	0	24:00	0
					_		0330W10km12		エコー無 5-10km0300-0410**					-	1	\vdash
8/23	23d3-5h	+1000,-500	-+	R無	R無	R無	雨強し		9 10kiii0300-0410N 発達	0240▲N10km		なし	0	0	24:00	0
9/2	02d5-6h	-500	-	小-15分	極小付近 -から04+25+5	凸雨			5-8km付近 1-9km0220-20/+**		0522ノイズ	なし	4.5	4	15:18	3
9/3	03d3-5h	+1000,-2000	-0付近↓-+	-10分	大	凸雨			通過,5-6km		gap,0308-0417	雷0310-	2	2	13:11	1.5
		1.4000	a. 1 . e.		法同後+	0.5.5.5			S5km0410 7km2230-2250付诉		Х.	0400				-
9/7	ued22-23h,07d0-1h	±1000	小+- ↓、小+-		U.5.R.無	U.5、R無			Eを通過		092051	なし	0.5	0.5	8:48	U.5
9/9	09d8-10h	+2000,-3000	小+-↓変動大+	小+30分小-15分	-からU付近極 大	凸雨	180mm/h,0840- 50商量運過10	0840E通過	i-12km0830-40S-E 通過.1-8km小0810-	0750×付近	gap,0827-	紅面 雷0826-	8.5	8	18:34	8
 					強雨後−+		som 重速回 IU		20S付近通過 1-9km0330W		0918欠	0935			 	
9/10	10d3-6h	-3000 H	一変動 一変動	R無	R無	R無	10.0mm0840-	通過	0430W通過.5km以内	0550 × NNE8km	U310-N,0340- N多,0348-	近雷 雷0345-	0	n	24:00	0
L							50通過		15 近小急発達,0530 弱8kmW側通過		0615欠	0619				Ľ
9/14	11d13-17h	+2500 -2500 11	0- かま+・	同時	極小付近.極小	の面と?			1-8km1400百 ト			<i>t</i> 1	ßF		22.52	2.5
9/11		- 2000, "3000 H	、0 。 支刺入+-	1971 I U 71	319 近世小3座 雨後-+				. 0km1+00具上				0.0	4	20:02	0.0
9/12	11d19-21h	-500	小0-↓変動+-	同時	極小付近	山型.凸雨			3-8km0530 1-4km			なし	17	11	0:58	7.5
10/7	07d5-8h	±2000	+-↓、-+↓		0.5×2	0.5 × 2			05405km以上通過			なし	7	1.5	20:47	0.5
10/8	08d0-4h,8-14h	-500		同時	極小付近	山型			5km0020,5-6km0910			なし	34	4	22:14	1
10/9	17d2-9h	-500	- -		極小付近	地雨						なし	32	3.5	21:24	1
10/23	22d18-19h,23d2-3h	-500	小-、小-	同時	極小付近	0.5、山型						なし	14	6	11:53	2

表3 大気電場の変化が顕著な事例 2020 年 4~10 月 500V/m 以上(分値:オリジナルデータ) 67 例

最大降水時の大気電場





図 14 短時間強雨の発生した時の主な 2 つの大気電場の変動 左は図 13 の「0 付近」、右は「一極小」の例 上段:図説は図 12 と同じ、下段:図説は図 5 と同じ、但し、雨量はアメダスのみ、Vild(鉛 直積算降水量密度)と解析雨量

表4 大気電場の変化が顕著な事例の抽出 表3の事例から 上段:-10℃面 40dBz 以上の領域が5km 以内にあった場合と、7-15km 以内にあった場合、 下段: 雷電(地電流にノイズやgap があった場合)

	日時		大気電	場			降水	ν	4-		曾開進			弊水		
iate JST]	間査事例[UT] *	大気電場の 大きさ H:ヒゲ状有	大気電場の変化	降り始め直前 の電場変化 R無:降水無	最大降水 時の大気 電場 ▼	強雨の型	部外雨量(5 km)など 、	ー10℃面 40dBz以上(君 城コア)など	23dBz以上の 最大高度 cappi	LIDEN ▲雲間,×対 地放電	地電流epr N:ノイズ, 欠:欠測	言対応	日 合 計 ^[3] ~	1時 間最 大値	時分 [JST]	10分 間線 大使
5/6	06d6-13h	±3000 H	+—0付近+-脈動	同時	0付近変動	地雨の始め 強雨山型		0700-10 かかり減少	11km	0640▲10km NNW	0650N gap.0752N 大.0655-欠	近雷 會0555-1000	28.5	15	16:54	
5/27	27d9-12h	±2000	+-+	極大から減少時	0.5 +	0.5	1050瓦会1.0, 1110八郷柿岡0.5	1010小NE5km, 1020E2km通過	8km1100,5-6km1040		1006N,1008- 1156欠	近雷 1000	1.5	9.5	0:13	
5/30	30d6-7h	+1000,-2000	+	R無	R無	R無		0600-10SE5km小,付 近で急発達。 top10km,0630衰退	1–9km	0610▲7kmSE発達		遠雷 190600	0	0	24:00	
6/12	12d7-10h	±2500	W型+-0-0+-+-	+15分0付近	0付近	凸山型		0810-20SW5km小工 コー.付近で急発 達.top13km	12km0810,1-9km	0810-10▲付近 1-10km,0910▲ W3km	0755gap,0821 0906欠	近雷 190810-50	15.5	15.5	18:02	5.
8/17	17d8-12h	+1000,-2000	₩型一変動0↓+-+-		+から-極小付近	0.5	0920瓦会12,30 同11,40同1.0	0910付近,0920NE5km	12km0910		0855N,0910- N多,0915-欠	近雷 119900-	0.5	0.5	21:06	0
9/9	09d8-10h	+2000,-3000	小+-↓変動大+	小+30分小-15分	-から0付近 極 大 強雨後-+	凸雨	180mm/h,0840- 50雨量通過10	0840E通過	1-12km0830-40S-E 通過,1-8km小0810- 20S付近通過	0750 × 付近	0820N gap.0827- 0918欠	近雷 雷0826- 0935	8.5	8	18:34	
9/10	10d3-6h	–3000 H	一変動 一変動	R無	R無	R無	10.0mm0840- 50通過	通過	1-9km0330W 0430W 通過.5km以内付近小 急発達.0530弱8kmW 側通過	0550 X NNE8km	0310- N.0340-N 多.0348- 0615欠	近雷 雷0345- 0619	0	0	24:00	
5/13	13d5-7h	+1000,-500	+	R無	R無	R無		0610S10km,top10km	9km(S5km)	0610▲W2km とE,0600▲ 13kmSW発達		遠雷 會0500-0630	0	0	24:00	
6/16	16d10-13h	+2500,-3500 H	V型+-0付近↓	+60分-極小40分 変動有0付近	0付近	0.5 × 2		1210W15km • N15km	7km1130.6km1140 始めそれ程ふらず	多数▲	1120gap.1136 -欠	近雷 1130	1	1	22:19	0.
7/24	24d18-21h	+3000,-2000	-0-+-+-0-0-+脈動	-10分	+から-強雨×2	山型	1950瓦会8.0	1910 20kmS, 192015kmSW	8km近く1950,vildあり			なし	0	0	24:00	
8/12	12d3-8h,8-12h	+2000,-3000 H	-+-変動有0↓- 0-+、+-+-+	+30分-20分	-から+0付近	凸雨、0.5		0400WSW10km減少	5-8km09h	0300▲,0320	0358N,0358- 0521欠,0915N	近雷 ^{雷0357-0527}	2.5	2	14:23	1.
8/13	13d-12h	+2500,-3000 H	W型+-0↓付近変動-+	+10分-20分	-から+0付近	凸雨	強雨120mm/h	0940W7-12km減少	5-10km,9kmまで0920		0902gap N. 0908-1004欠	近雷 102-1102	22.5	22.5	19:38	1
8/15	15d12-15h	+2000,-1500	₩型一変動0↓+-+-	-30分+	-から0+極大付近	0.5	1330R0.5	28dBz以上12km,1320 降下 1-2km増,1230- 40W20km	12kmから急減 1250-1320		1228N,1250g ap-1307N	遠雷 20830-0530	0.5	0.5	23:21	0.

雷	電															
	日時		大気電	場			降水	ν-	-4		言則注			- 降力	K 🗮 👘	
date [JST]	調査事例[UT] ▼	大気電場の 大きさ H:ヒゲ状有	大気電場の変化	降り始め直前 の電場変化 R無:降水無	最大降水 時の大気 電場 ▼	強雨の型	部外雨量(5 km)など 、	ー10°C面 40dBz以上(君 域コア)など	23dBz以上の 最大高度 cappi ▼	LIDEN ▲雲間,×対 地放電	地電流epr N:ノイズ, 欠:欠測 _、	雪対応	日 合 計	1時 間景 大値 	時分 [JST]	10分 間景 た。
4/9	09d7-12h,12-16h	±5000 H	-+↓-±±脈動	-30分	極小	地雨			4km	0810▲	0805N,0810- 25欠	遠雷 110605-40	12	3	19:05	1
4/13	13d1-6h, 6-8h	±3000 H	-+-脈動++-+、-+-↓+-	同時、一10分	極小,極小	地雨、凸雨			5km通過, 4km0650	0410▲S2km, 0220▲N10km,	0410N,0410- 20欠	遠雷 會0400-20	35	7.5	14:13	2
4/18	18d2-8h	±3000 H	-土−土脈動	同時	極小付近	地雨			5km0210、4km2120-	0540 ▲ E5km	0600N,0600- 0740欠	遠雷 會0602	87	19	12:33	6
4/24	24d7-14h	+6000,-4000 H	+-+-++++	+15分	極小付近	地雨			4km0900_10-40上_	50減	0730,0845,08 52,0904N,090 3-1130欠	近雷 會0900-20	7.5	4.5	19:35	1
5/6	06d6-13h	±3000 H	+-0付近+-脈動	同時	0付近変動	地雨の始め 強雨山型		0700-10 かかり減少	11km	0640▲10km NNW	0650N gap.0752N 大.0655-欠	近雷 會0655-1000	28.5	15	16:54	8
5/27	27d9-12h	±2000	+-+	極大から減少時	0.5 +	0.5	1050瓦会1.0, 1110八郷柿岡0.5	1010小NE5km, 1020E2km通過	8km1100,5-6km1040		1006N,1008- 1156欠	近雷 1000	1.5	9.5	0:13	2
5/28	28d12-16h	+2500,-3000	/]\+-、/]\+-+↓+-+-	小+-15分	極大付近.14h 過ぎ. 15h過ぎ+雨	凸雨			1210付近滅降下模 様5km,1410発達 雨,1420_5km真 上,5km1510,1540過	1330▲SW5km	1336N	なし	3	3	24:00	1.5
6/12	12d7–10h	±2500	W型+-0-0+-+-	+15分0付近	0付近	凸山型		0810-20SW5km小工 コー.付近で急発 達.top13km	12km0810,1-9km	0810-10▲付近 1-10km,0910▲ W3km	0755gap,0821 -0906欠	近雷 會0810-50	15.5	15.5	18:02	5.5
6/16	16d10-13h	+2500,-3500 H	∨型+-0付近↓	+60分一極小40分 変動有0付近	0付近	0.5 × 2		1210W15km+N15km	7km1130,6km1140 始めそれ程ふらず	多数▲	1120gap,1136 -欠	近雷 1130	1	1	22:19	0.5
8/12	12d3-8h,8-12h	+2000,-3000 H	-+-変動有0↓- 0-+、+-+-+	+30分-20分	-から+0付近	凸雨、0.5		0400WSW10km減少	5-8km09h	0300▲,0320	0358N,0358- 0521欠,0915N	近雷 會0357-0527	2.5	2	14:23	1.5
8/13	13d-12h	+2500,-3000 H	W型+-0↓付近変動-+	+10分-20分	-から+0付近	凸雨	強雨120mm/h	0940W7-12km減少	5-10km,9kmまで0920		0902gap N. 0908-1004欠	近雷 10906-1102	22.5	22.5	19:38	12
8/15	15d12-15h	+2000,-1500	₩型一変動0↓+-+-	-30分+	-から0+極大付近	0.5	1330R0.5	28dBz以上12km,1320 降下 1-2km増,1230- 40W20km	12kmから急減 1250-1320		1228N,1250g ap-1307N	遠雷 180830-0930	0.5	0.5	23:21	0.5
8/17	17d8-12h	+1000,-2000	W型一変動0↓+-+-		+から-極小付近	0.5	0920瓦会12,30 同11,40同1.0	0910付近. 0920NE5km	12km0910		0855N,0910- N多.0915-欠	近雷 180900-	0.5	0.5	21:06	0.5
9/2	02d5-6h	-500	-	小-15分	極小付近	凸雨			5-8km付近		0522ノイズ	なし	4.5	4	15:18	3
9/3	03d3–5h	+1000,-2000	-0付近↓-+	-10分	-から0付近極 大 強雨後+	凸雨			1-9km0320-30付近 通過.5-6kmS5km 0410		0255N,0302N gap,0308- 0417欠	近雷 雷0310- 0400	2	2	13:11	1.5
9/9	09d8-10h	+2000,-3000	小+-↓変動大+	小+30分小-15分	-から0付近 極 大 強雨後-+	凸雨	180mm/h,0840- 50雨量通過10	0840E通過	1-12km0830-40S-E 通過.1-8km小0810- 20S付近通過	0750 × 付近	0820N gap.0827- 0918欠	近雷 雷0826- 0935	8.5	8	18:34	8
9/10	10d3-6h	-3000 H	一変動 一変動	R無	R無	R無	10.0mm0840- 50通過	通過	1-9km0330W 0430W 通過.5km以内付近小 急発達.0530弱8kmW 側通過	0550 × NNE8km	0310- N,0340-N 多,0348- 0615欠	近雷 雷0345- 0619	0	0	24:00	0

	日時		大気管	場			降水	ν-	- <i>4</i> -		合制法			- 勝7	大量	
date [JST]	間査事例[UT]	大気電場の大 きさ H:ヒゲ状有 _マ	大気電場の変化	降り始め直前の 電場変化 R無:降水無 、T	最大降水時 の大気電場 ▼	強雨の型	部外雨重 [*] (skm) など	ー10°C面40dBz 以上(君城コア) など	。 23dBz以上の 最大高度 cappi	LIDEN ▲雲間,×対 地放電	地電流opr N:ノイズ、 欠:欠測	雪対応	日合 計 [J8**]	1時 間最 大値	時分 [JST]	105 開調 大使
4/2	01d23-24h	+1000,-500	-+	R無	R無	R無						なし	0	0.5	0:22	
4/23	22d15-17h	+1000,-2000	+-+-+	R無	R無	R無			5km15h,3km16h,3k m通過1030,付近で 少し降下模様			なし	0	0	24:00	
5/13	13d5-7h	+1000,-500	+-	R無	R無	R無		0610S10km,top10km	9km(S5km)	0610▲W2kmと E,0600▲ 13kmSW発達		遠雷 110500-0630	0	0	24:00	
5/30	30d6-7h	+1000,-2000	+-	R無	R無	R無		0600-10SE5km小, 付近で急発達, top10km.0630衰退	1–9km	0610▲7kmSE発達		遠雷 180600	0	0	24:00	
7/12	12d4-5h	+500	/]/+	R無	R無	R無			5-6km0430SW10km 西右・R毎			なし	0	0	24:00	
7/14	14d9-12h	+1000	/]>+-+	R無	R無	R無	1020八郷柿岡1.0 小エコー.+付近エ コー		5-6km1020/J			なし	12.5	3	10:05	
8/22	22d9-13h	+1500,-1000	+-	R無	R無	R無	_		10htop11-12km,6- 8km1050,2km以下 エコー毎			なし	0	0	24:00	
8/23	23d3-5h	+1000,-500	-+	R無	R無	R無	0330W10km12 面強1。		5-10km0300-0410N 発達	0240▲N10km		なし	0	0	24:00	
9/10	10d3-6h	-3000 H	一変動 一変動	R無	R無	R無	10.0mm0840- 50通過	通過	1-9km0330W 0430W通過,5km以内 付近小急発達,0530 頭8kmW側通過	0550 X NNE8km	0310-N,0340- N多,0348- 0615欠	近雷 雷0345- 0619	0	0	24:00	'
4/11	11d13-14h	±3000 H	-+-+凸-極小↓変動+	-20分	極小	0.5			3km			なし	0.5	0.5	23:41	0.
4/12	11d15-16h	+500,-1000	一小+	同時	0.5	0.5	1510八郷柿岡0.5		3km 水布印			なし	4	1	6:37	0.
4/28	28d6-10h,12-14h	+2000,-3000 H	-0-↓+、-+-↓+	R無、+25分(-5分)	極小付近	0.5			スピックロン コー通過,3km	0640▲S3km		なし	1	0.5	24:00	0.
5/23	23d0-7h	+200	/]\+0-	同時	0付近	0.5	1050百会10	1010/bNE5km	水色3km			なし	5	3	2:19	-
5/27	27d9-12h	±2000	+-+	極大から減少時	0.5 +	0.5	1110八郷柿岡0.5	1020E2km通過	8km1100,5-6km1040		1006N,1008-11	21 m 雷1000	1.5	9.5	0:13	-
7/11	11d5-6h,10-12h	±1500	₩型風-+↓-+、+-	—20分+、R無	0.5,+,R無	0.5、R無			5-7km0530,5-6km 1050-1100・R無			なし	0.5	0.5	15:32	0.
8/15	15d12-15h	+2000,-1500	W型一変動0↓+-+-	-30分+	-から0+極大付近	0.5	1330R0.5	28dBz以上12 km.1320降下 1-2km 增.1230-40W20km	12kmから急減 1250-1320		1228N,1250ga p-1307N	遠雷 10830-0930	0.5	0.5	23:21	0.
8/17	17d8-12h	+1000,-2000	₩型一変動0↓+-+-		+から-極小付近	0.5	0930瓦会11.09 20同12.11同11	0910付近,0920NE5km	12km0910		0855N,0910-N 多.0915-欠	近雷 10900-	0.5	0.5	21:06	0.
9/7	06d22-23h,07d0-1h	±1000	//>+-↓、//>+-		0.5.R無	0.5、R無			7km2230-2250付近 E 左通過			なし	0.5	0.5	8:48	0.

表5 大気電場の変化が顕著な事例の抽出 表3の事例から 降水量無しと降水量0.5mmの場合

降水量0.5mm



図15 大気電場の変化が顕著な事例の抽出 2020年5月27日 降水が観測されなくても、 大気電場の急変あり レーダーエコーの時間変化から、付近で降雨があったと推測される 左:水滴集電器(分値)、フィールドミル(分値:参考資料)、水滴集電器(秒値)、フィール ドミル(秒値:参考資料)、フィールドミル(分値:参考資料)、いずれもオリジナルデータ、 降水強度(1分)と降水量、右:図説は図14下段と同じ



図16 雷雲の3極構造(左)と霰の電荷分離(右)(高橋 劭(2004) (32))

図10 雷雲の3極構造(左)と霰の電荷分離(右)(高橋 劭(2004))

[調査研究の種別]:基礎課題

[課題名]:機械学習によるK指数判定手法の開発
[担当者]: ○長町信吾、森永健司(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}。計算機 のよる手法は当所でも試験が行われたが^{*2.*3}、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。そこで本研究では、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]:

1.機械学習について、その手法等の概要を学習、理解する。

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	11月	12	1月	2月	3月
							月		月			
項目1												
項目2												
項目3												

89

[本年度の成果]:

ハンドスケーリングによる読み取りは、人の手を介することから、どうしても観測者によ る読み取り値のずれが生じる。しかし、熟練者同士の読み取りを比較すると、80%は一致 し、異なっても1以内であると報告されている*1。したがって、計算機による読み取り値が、 ハンドスケーリングと比較して80%の一致、異なっても1以内となることを最終目標とす る。

試みた機械学習アルゴリズムは以下の 3 種類で、いずれも教師あり学習のアルゴリズム である。

1. 勾配ブースティング決定木: GBDT *5

2. ニューラルネットワーク: NN *6

3. 畳み込みニューラルネットワーク: CNN *6

このそれぞれで 1989 年~2008 年までの毎分値を入力データ、ハンドスケーリングによる K 指数の読み取り値を教師データとして学習を行い、2009 年~2015 年の K 指数を予測さ せた。結果を表1に示す。

K指数	事例数		正答率	
		GBDT	NN	CNN
K=0	9615	67.7%	58.6%	77.7%
K=1	5748	71.5%	54.3%	70.6%
K=2	3351	62.6%	41.7%	57.4%
K=3	1335	61.7%	38.3%	51.7%
K=4	321	57.9%	34.0%	51.1%
K=5	64	45.3%	34.4%	37.5%
K=6	14	14.3%	35.7%	35.7%
K=7	0			
K=8	0			
K=9	0			
Total	20448	67.3%	52.8%	70.1%

表1:機械学習によるK指数判定結果

トータルの正答率では CNN が最も高いが、ようやく 70%を超える程度で、目標として いる 80%には届かない。また、どの手法でも大きい K 指数の正答率が低い。これは教師デ ータが少ない(大きい K 指数の出現頻度が低い)ことで学習が進まないことが原因と考え られる。また、K=0の判定では CNN が、K=2,3,4の判定では GBDT が他の手法よりも明 らかに高い正答率を記録しており、アルゴリズムにより得意とする K 指数が異なるようで ある。

次年度以降は、以下のような改善を行い、正答率の改善を試みる予定である。

1. 学習に使えそうな特徴量(例えば peak to peak 振幅など)を手動で切り出し、学習の

効率を上げる。

K 指数の読み取りの困難さは実際の地磁気変化から日変化を切り分けることが難しい点 にあるが、大きな K 指数ほど日変化の重要性は低くなり、peak to peak の振幅が K 指数判 断の多くの部分を占めるようになると考えられる。よって、教師データの少ない大きい K 指数判定では、判定に有用であると思われる特徴量を人の手で与えることによって判定精 度を高められると考えられる。

 異なる K 指数の判定に異なるアルゴリズムを適用する(例えば K=0,1の判定には CNN、 K=3,4の判定には GBDT を用いるなど)。

それぞれの機械学習アルゴリズムで得意とする K 指数が異なることから、K 指数ごとに アルゴリズムを変えて判定することで、より精度を高めることができると考えられる。

[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 Andreas C. Muller · Sarah Guido, Python ではじめる機械学習, オライリージャパン, 2017
- *6 斎藤康毅, ゼロから作る Deep Learning, オライリージャパン, 2016

[成果の発表]:なし