

地磁気観測所ニュース

No. 81

令和6年（2024年）6月



目次:

○巨大磁気嵐発生	1
○所長着任のご挨拶	5
○地磁気観測技術連絡会を開催しました	5
○南極だより	7
○コラム	9
・地磁気観測の歴史 番外編 地電流観測	

巨大磁気嵐発生

世界時刻2024年5月10日17時5分に巨大な磁気嵐が発生しました。この磁気嵐による杣岡での地磁気の変動量は、1924年の統計開始以来9番目の大きさで、トップ10が入れ替わったのは1989年以来、実に35年ぶりの出来事です（表1）。今回の磁気嵐は各種メディアでも大きく報道されていたので、日本の各地でオーロラが観測されたというニュースはみなさんの記憶にも新しいのではないのでしょうか。

今回の磁気嵐がどのように発生し、どういった特徴があるのかを、記事執筆時点（5月16日）までで分かっている範囲で詳しく解説します。

●地磁気と太陽風の関係

磁気嵐とはそもそもどのような現象なのでしょう。それを理解するために、まず太陽と地磁気の関係から見ていきましょう。

太陽からは「太陽風」と呼ばれるプラズマ（電気を帯びた粒子）が絶えず噴き出しています。太陽風は温度約10万度、速度300~800km/s（新幹線の4000倍以上！）という高温かつ高速の「風」です。このようなものが地球に絶えず吹き付けていると思うと心配になる方もいるかもしれませんが、でも大丈夫です。実はここからが地磁気の出番なのです。

太陽風は、プラズマと同時に太陽が発する磁場も一緒に引き連れてくるのですが、プラズマには「磁力線をまたいで移動が難しい」という性質があります。太陽風の持つ磁力線と地磁気磁力線は繋がっていないので、太陽風のプラズマは地磁気が支配する領域（これを磁気圏と呼びます）に侵入することができず、磁気圏を避ける形で流れ去っていきます。このように、地磁気は太陽風から地球をガードするバリアの役割を担っているのです（図1）。

順位	発生日	振幅
1	1941年7月4日	700nT以上
2	1940年3月24日	661nT
3	1989年3月13日	644nT
4	1982年7月13日	630nT
5	1958年2月11日	617nT
6	1941年9月18日	604nT
7	1941年3月1日	560nT以上
8	1959年7月15日	533nT
9	2024年5月10日	532nT
10	1967年5月25日	509nT

表1：杣岡で観測された磁気嵐TOP10

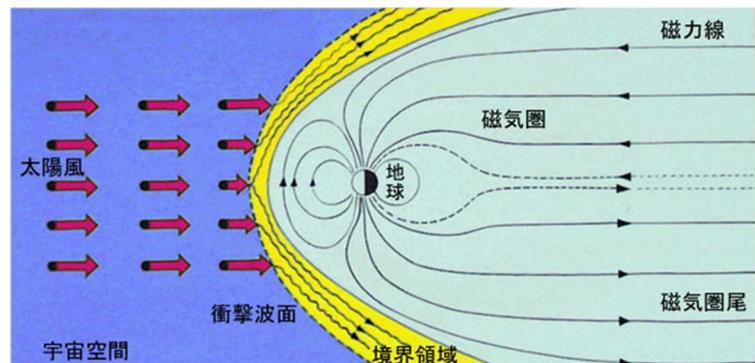


図1：地球磁気圏と太陽風の関係

太陽風により磁気圏は吹き流された形になるが、太陽風は磁気圏に侵入できない

●磁気嵐の引き金：太陽フレアとCME

このように地磁気は常に太陽風にさらされているため、太陽風の状況に変化が生じると、それに応じて地磁気にも乱れが生じることがあります。磁気嵐とは、正確な定義は別にありますが、大まかなイメージとして太陽風の変化によって生じる地磁気の大きな乱れのことを指すと考えて大きな間違いはありません。

では磁気嵐を発生させる太陽風の変化とはどのようなものなのでしょうか。その引き金を引くのが、太陽黒点付近で起こる爆発現象「太陽フレア」です。

太陽表面をX線（レントゲンなどで使う光の一種）で観測すると、黒点付近で時折明るく輝く現象が見られます。これが太陽フレアです（図2左）。太陽フレアはそのX線強度によって大きい順にX, M, C, B, Aクラスにランク分けされており、Mクラス以上の太陽フレアでは規模の大きい「コロナ質量放出（Coronal Mass Ejection : CME）」という現象が付随することがあります（図2右）。CMEとはフレアに伴って大量のプラズマが放出される現象で、いわば太陽風の台風のようなものです。これが地球に到達すると磁気嵐に発展する可能性が高くなります。逆にXクラスの大規模フレアであってもCMEを伴わない場合や、CMEが発生しても地球には届かない方向に放出された場合は磁気嵐につながることはまずありません。ということで磁気嵐を起こす1つめの条件は、「地球から見た太陽の正面の中心付近でCMEを伴ったMクラス以上の太陽フレアが起こる」こととなります。

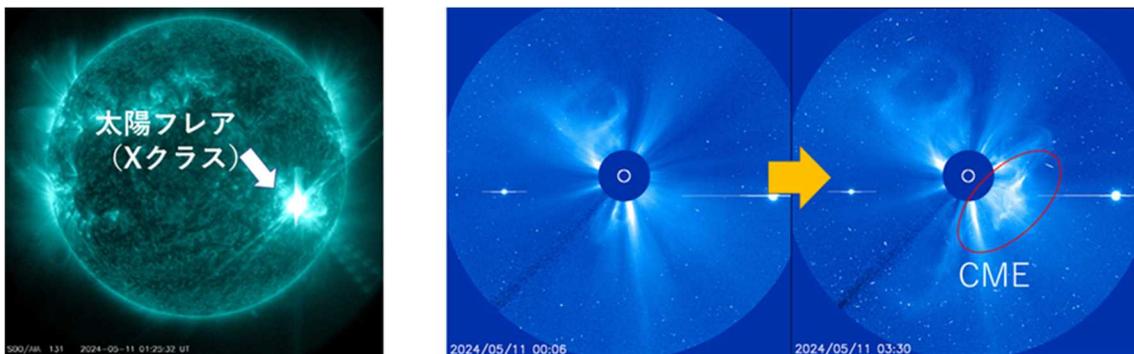


図2：5月11日に発生したXクラスの太陽フレア（左）とそれに伴うCME（右）
SDO衛星（NASA）およびSOHO衛星（ESA&NASA）のデータを使用

めでたく(?)CMEが地球直撃コースで向かってきたとしても、これだけでは大きな磁気嵐に発展するかどうかはまだ分かりません。思い出してください。地球は地磁気というバリアで太陽風から守られています。地球に影響を与えるような大きな磁気嵐となるためには、地磁気バリアを何とかこじ開ける必要があるのですが、CMEといえどもこのバリアを突破するのは容易ではありません。この地磁気バリアの突破に大きな役割を果たすのが「磁力線の繋ぎ変え」という現象です（図3）。

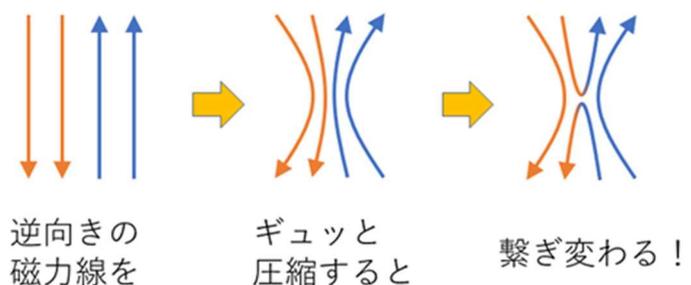


図3：磁力線の繋ぎ変え

互いに逆に向いた磁力線同士をぎゅっと圧縮すると、磁力線が繋ぎ変わり本来は繋がっていなかった磁力線同士が結合するという現象が起こります。もしこれが地磁気と太陽風の磁場の間で起これば、太陽風の磁力線と地磁気の磁力線が繋がることになり、太陽風のプラズマが地磁気バリアをこじ開けて内部に侵入できるようになります。このようにして大量のプラズマが磁気圏に侵入して初めて大きな磁気嵐となります。地磁気の方法は北向

きなので、磁力線の繋ぎ変えを起こすためには太陽風の磁場が南を向いている必要があります。この状態が長く続けばプラズマがどんどん磁気圏に侵入し、大きな磁気嵐へと発展していくことになります。これが磁気嵐を起こすための第2の条件となります。

少し長くなったので、磁気嵐が発生するための条件を改めてまとめておきます。

1. 地球から見た太陽の正面の中心付近でCMEを伴ったMクラス以上の太陽フレアが起こる
2. 地球に当たった太陽風（CME）の磁場が南を向いている状況が長時間続く

●2024年5月10日に発生した磁気嵐の詳細

磁気嵐の発生条件が整理できたところで、いよいよ今回の磁気嵐の詳細を見ていきましょう。

図4（上段左）を見ると、太陽中心付近から少し右下側に大きな黒点があるのが分かると思います。この黒点が今回の主役です。

5月8日から9日（世界時）にかけて、Xクラスの大規模フレアが4回と、Xクラスには届かなかったもののそれに近い規模のフレアが4回の、合計で8回もの中・大規模フレアが起きました（さらに小規模のものを含めればもっとたくさんあります）。それに伴うCMEも筆者が調べた限りでは少なくとも5回は放出されているようです。そして黒点が太陽正面付近に位置しているので、これらのCMEは地球直撃のコースに乗ることになります。これで磁気嵐発生第一条件はクリアです。

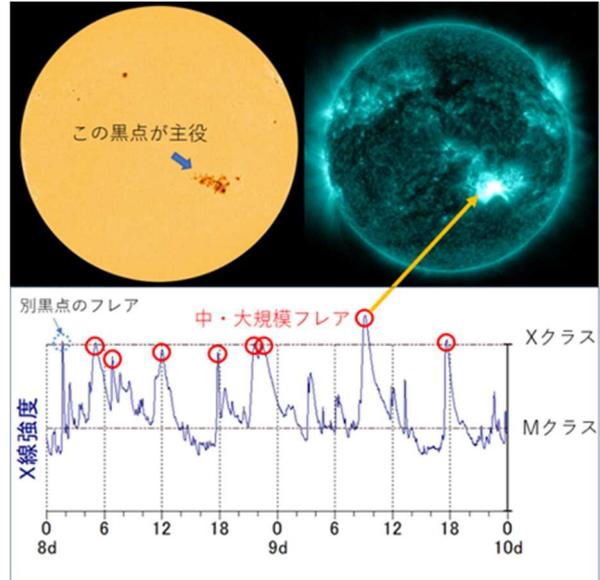


図4：5月9日の太陽表面（上段左）と大規模フレア時のX線画像（上段右）およびX線強度グラフ（下段）
赤丸が中・大規模フレアで、グラフの上端を超えるものがXクラスフレア
SDO衛星（NASA）およびGOES衛星（NASA&NOAA）のデータを使用

そして5月10日の17時5分、ついにCMEが地磁気バリアの表面まで到達します。

図5に柿岡の地磁気観測データと人工衛星による太陽風磁場の観測データを示します。

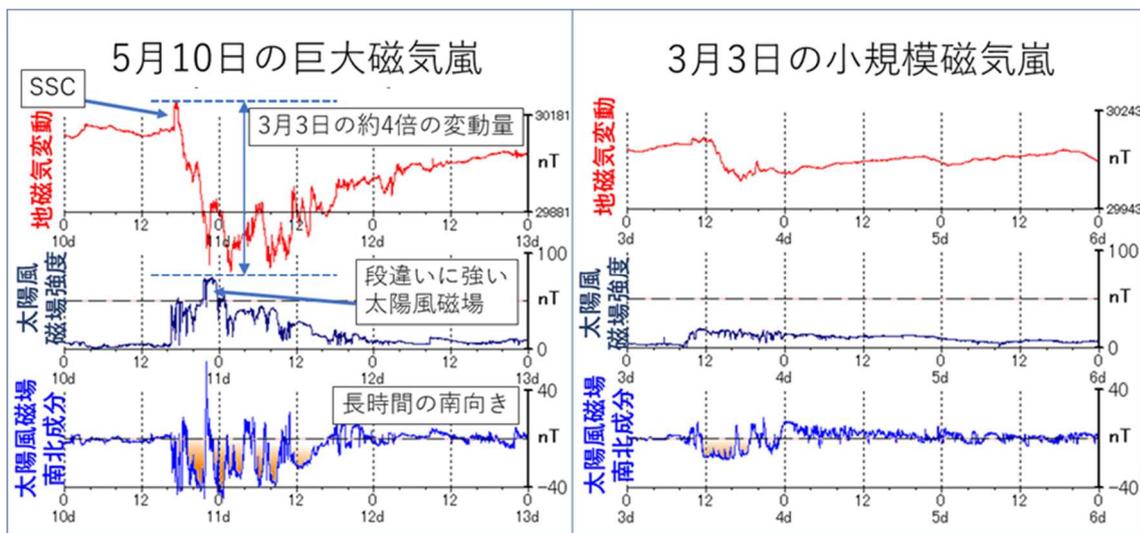


図5：2024年5月10日の巨大磁気嵐（左）と2024年3月3日の小規模磁気嵐の観測データ
上段：柿岡での地磁気水平成分変動、中下段：人工衛星で観測された太陽風磁場データ（中段：磁場強度、下段：南北成分）
DISCOVER衛星（NASA）のデータを使用

CMEの到達により、太陽風磁場強度（図5中段）が一気に上昇しているのが分かります。さらにCMEが地磁気バリアの表面に与えた衝撃で、柿岡の観測データも急激に上昇しているのが分かります（図5上段：地磁気変動）。この地磁気の急変化が磁気嵐の始まりを告げる「SSC(Storm Sudden Commencement)」という現象です。ただし、この段階ではその後に磁気嵐へと発展していくかは定かではありません。このまま磁気嵐となるかどうかは、磁気嵐発生の第二条件が満たされるかどうかにかかっています。ではここで実際の太陽風磁場の観測データを見てみましょう（図5下段：太陽風磁場南北成分）。

このグラフの縦軸は中央から上（プラス）の状態なら北向き、中央から下（マイナス）の状態なら南向きであることを表しており、南向きの部分をオレンジ色で表示しています。CMEの到達後、細かな入れ替わりはあるものの、長時間に渡って南向きの状態が続いていることが分かります。このように磁気嵐発生の第二条件も無事にクリアし、磁気嵐へと発展していきました。

では、次に今回の磁気嵐が歴代9位となるほどの大きな規模になった理由を考えてみます。図5右に示した2024年3月3日に発生した小規模な磁気嵐のデータと見比べてみましょう。太陽風磁場強度（中段）に注目すると、3月の小規模磁気嵐を引き起こしたCMEに比べて、今回のCMEが持つ磁場強度が段違いに強いことが分かります。磁場が強いということはすなわち、磁力線の数が多いということを意味します。この大量の磁力線が猛烈な勢いで繋ぎ変えを起こし、3月3日の磁気嵐の約4倍という巨大な磁気嵐へと発達していったのだと考えられます。また、CMEの持つ磁場がこれほど大きくなったのは、（これはあくまで筆者の想像ですが）短期間に連続して発生したCMEが折り重なるようにして巨大な塊になったためではないかと考えられます。

●次の巨大磁気嵐はいつ？

今回のような巨大磁気嵐は、数十年に1度あるかどうかという非常に珍しいものでした。実際、柿岡での100年にわたる観測の歴史の中でも、このような大規模な磁気嵐は20回程度しか経験がありません。今回の磁気嵐については、これから多くの研究がなされ、さらに詳しいことが分かってくることでしょう。一方で、このような巨大な磁気嵐のデータは少なく、長期的な予測などを行うにはまだまだ事例の蓄積が足りないのも事実です。

では次の巨大磁気嵐はいつ起こるのでしょうか？表1を見ると、割と近い年に巨大磁気嵐が連続することもあるということが分かります。太陽活動は約11年周期で消長を繰り返しているのですが、大きな磁気嵐はその活動期のうちで特に活発な時期に集中する傾向があるため、このような偏った発生分布になります。

実は現在、太陽は活動期に入っており、あと1、2年でピークに達すると予想されています。もしかすると数年後、ややもすれば数日後に再び巨大磁気嵐が発生するかもしれません。地磁気観測所ではいつこのような巨大磁気嵐が起こっても対応できるよう、日々万全の態勢で観測を続けていますので、今後の地磁気活動にも是非注目してください。

（観測課 長町信吾）

参考文献

NASA, SDO衛星HP, <https://sdo.gsfc.nasa.gov/>

ESA & NASA, SOHO衛星HP, <https://soho.nascom.nasa.gov/>

NOAA, 宇宙天気予報センターHP, <https://www.swpc.noaa.gov/>

所長着任のご挨拶

4月1日付で地磁気観測所長を拝命いたしました内藤宏人です。

当所は1912年に柿岡に移転し、1924年に国際測地学・地球物理学連合（IUGG）総会で日本における地磁気の標準観測所として指定されてから今年で100年の節目を迎えます。この間、先人の弛まぬ努力のもと高精度な観測を継続し、その成果により、国内はもとより海外からも「世界のKAKIOKA」と称され高い評価を受けてまいりました。この度、縁あってこの歴史に加わることができたことは大変光栄であり、私の責務として次の世代にこのブランドを引き継いでまいりたいと思いますのでよろしくお願いいたします。



ところで、私は3月まで香川県で暮らしていましたので今回の異動に伴う手続きで新勤務地を口頭で伝える機会が多かったのですが、その際「チジキ」とはどういう意味か、漢字ではどう書くのかと問われることが多く、さらに一部のスマートフォンでは情報入力時に一発で漢字変換ができないという事態に遭遇しました。地磁気に関しては、その影響でコンパスのN極がほぼ北を指すことぐらひは小学校で習っても、气象台で扱う天気や地震などと違い人の五感で捉えることができないためか、世間にはなじみの薄い自然現象であることを改めて認識させられた次第です。

当所の業務についても、地磁気を観測しデータを提供するという学術的な役割は一般になじみが薄いと思います。しかし、それ以外に、古来より航行の指針となっている羅針盤などの磁気観測精密機器の検定や磁気図・海図作成のための基準観測値の提供を通じての交通安全への寄与、通信機器などのインフラに深刻な影響を与える可能性がある磁気嵐（太陽活動によって引き起こされる地磁気の急激な変動）を監視し関係機関に情報提供、最近では電磁気的な手法を用いた火山活動評価など、実は生活に近い分野でも社会的な役割を果たしています。また、南極や技術支援が必要な国々への職員の派遣、国際会議への参加などの国際的な活動も行っています。そして、これらは永年蓄積してきたデータと所員の高い観測技術に支えられていることは言うまでもありません。

皆様におかれましては、当所の実績と役割をご理解いただき、引き続き業務遂行へご協力を賜りますようよろしくお願いいたします。なお、当所では年1度の一般公開をはじめ随時施設見学を受け付けております。五感で捉えられない地磁気を「体験」できる機会となりますので是非ともご利用ください。

地磁気観測技術連絡会を開催しました

地磁気観測についての情報交換及び技術力向上を目的に、国土交通省国土地理院（以下「国土地理院」）と地磁気観測所は、2023年12月15日に柿岡で地磁気観測技術連絡会を開催しました。本連絡会は48回目を数えますが、コロナの行動制限も解除され、4年ぶりの対面での開催となりました。今回は国土地理院と当観測所以外にもゲストとして東京大学地震研究所と名古屋大学の関係者にもご参加頂き、所内を見学していただいたのちに課題発表形式で議論を行いました。

当観測所では長年にわたって地磁気を観測しています。その歴史は1883年（明治16年）に東京で始まり、旧・茨城県新治郡柿岡町（現・茨城県石岡市柿岡）に移転してからも100年以上の歴史を数えています。

地磁気は地球深部の外核で作られると考えられています。そのため観測された地磁気データには、地球外核の流体運動によるダイナモ作用における磁場変動はもとより、太陽からやってくるX線や高エネルギー粒子の影響、それに観測地点近傍の影響など様々な場所の多くのデータが含まれています。当観測所ではこの地磁気を高い精度で定常的に連続観測し、地球内外の地磁気の状態及びその変化の監視・解析を行っています。また、これらのデータは宇宙天気予報をはじめとする太陽地球系の環境監視、航空機及び船舶の安全運航の確保、無線通信障害の警報、火山活動評価等のために重要な情報として活用されています。

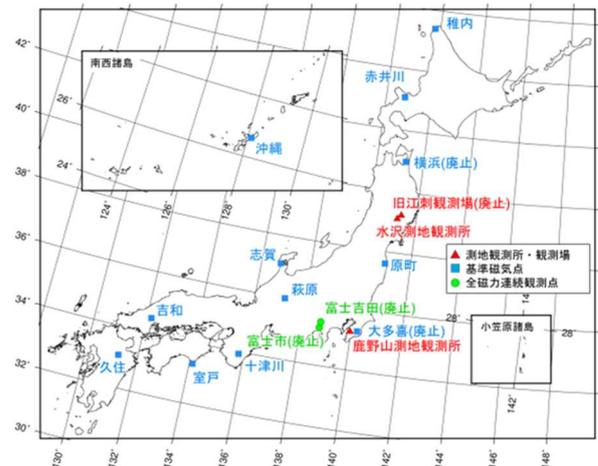
今回の地磁気観測技術連絡会では、観測装置の開発や運用に関するもの、火山活動が地磁気データに与える影響に関するものなど計6題の発表があり、非常に活発な討議が行われました。ここでは以下の2題についてご紹介します。

国土地理院からは地磁気連続観測装置の更新についてお話しいただきました。国土地理院は日本全国12か所で地磁気連続観測を実施しており、当観測所も令和4年に技術協力を行っております。地図の北（真北）と方位磁石の北（磁北）には、ずれがあります。日本では磁北はおおむね4～11度ほど真北より西に向いており、これは時間とともに少しずつ変化しています。この真北からのずれを把握するために地磁気の観測が必要です。これらの情報は地形図に記載されているほか、磁気図としても刊行されています。電子コンパス、あるいはスマートフォンなどではこの情報を利用することで正しい北を示しています。この磁気図を作成し、アップデートするのが国土地理院の業務のひとつです。今回の更新により地磁気測定値の分解能が向上し、測定間隔を短くすることができるなど観測性能が向上し、また研究者向けに秒値データを公開できるようになりました。半年間で全国全ての装置を更新し、絶対観測を行って基線値を決定するというハードなスケジュールであったこと、また機器トラブルの具体的な事例などを伺い、大変参考になりました。

当観測所からは、全磁力観測に伴うDI効果を補正するために、磁気センサーを回転台に乗せて360度回転させることによって誤差を相殺し、実用上十分な精度の伏角を得るという発表も行われました。火山などの繰り返し観測の作業効率改善に大きく役立つと期待できます。

ゲストの東京大学地震研究所と名古屋大学の大学院生の方にもご発表いただき、参加者のみなさんにもよい刺激となったものと考えています。これからもこのような情報・意見交換および討議を通じて日本の地磁気観測の発展に寄与できればと考えています。

（観測課 大竹和生）



国土地理院の地磁気観測点
(出典：国土地理院ウェブサイト)



簡易偏角・伏角計の試作品



参加者一同で記念撮影

南極だより

前号では南極出発に向けた訓練など出発前の様子を報告しました。今号では日本を出発し南極到着まで、そして越冬期間が始まってからの出来事についてレポートします。

私たち、第65次南極地域観測隊本隊は2023年11月24日に東京・羽田空港を出発しました。オーストラリア西部のフリーマントル港にて我々本隊より先行し日本を出発していた南極観測船「しらせ」に乗船し、11月30日に南極・昭和基地へ向けて出港しました。これまでの日常や文明とのお別れに多少の寂しさもありましたが、未知の環境に行けることの楽しみの方が大きかったです。

昭和基地に向け「しらせ」は南下を進めました。「吠える40度、狂う50度、叫ぶ60度」と呼ばれる暴風圏は、一年を通して強い風が吹き、高い波が発生しています。この暴風圏に入ると、船体も大きく揺れ、船に打ち寄せる波も凄まじくなってきます（写真1）。このエリアに入ると船酔いでダウンする隊員も増えてきました。かく言う私も半日程度ダウンしてしまい、その日が楽しみにしていた週1回のカレーの日であったものの、カレーを美味しく味わうことができず、とても残念でした。その後は船酔いも無くなり、船の揺れも心地良く感じるまでになりました。



写真1：「しらせ」に打ち寄せる波

そうこうしているうちに「しらせ」での船旅も終わり、同年12月20日に昭和基地に到着しました。昭和基地到着時には、前次隊の64次隊が盛大に出迎えてくれました。初めて目にする昭和基地に感動すると同時に、「これから頑張るぞ!」と気持ちを引き締めたのも束の間、到着後4日目にしてブリザードの襲来を受け、予定していた作業を中断せざるを得なくなりました。ブリザード中は最大瞬間風速35.4m/sもの非常に強い風がビュービューと吹き、建物がキシキシと軋む音がしていました。昭和基地の窓から外の様子を見ると100m先も見通せないくらいの吹雪で、雪が真横に通り過ぎてゆきます。さっそく南極という地の自然の厳しさを味わいました。

私たちが昭和基地に到着した時期は南極の夏にあたります。この期間に、65次隊で計画している夏期間の作業や、前次隊からの引継ぎ作業を行います。

私が担当している地磁気観測では、昭和基地のある東オングル島の磁場環境を調査するため、磁気測量用のセンサーを背負い、島中を歩き回りながら観測を行いました（写真2）。また、GPSを使用した真方位観測（写真3）や、新たに建設される建物が地磁気観測に与える影響量の調査などを実施しました。



写真2：東オングル島内の磁気測量



写真3：GPSを使用した真方位観測

その他に、昭和基地を離れた様々な場所（野外）での作業も行いました。昭和基地は東オングル島という南極大陸から約4km離れた島に位置しており、夏期間に野外で作業を行う際には主にヘリコプターで移動します。遠いところでは100km以上も離れたインホブデという場所まで移動し（図1）、無人磁力計と呼ばれる太陽光で発電した電力を動力源として地磁気を観測する機器の保守作業を行いました。作業内容は観測データの回収や、太陽光で発電した電力を蓄えるバッテリーのメンテナンスですが、これらは基本的に1年に1度しか行うことができない作業なので、作業が終わったときはプレッシャーから解放されてホッとしました。インホブデは南極大陸の沿岸部に位置しており、近くにある氷河はとても壮大なものでした。初めて見る光景にただただ圧倒され、自然の雄大さや美しさに浸っていました（写真4）。

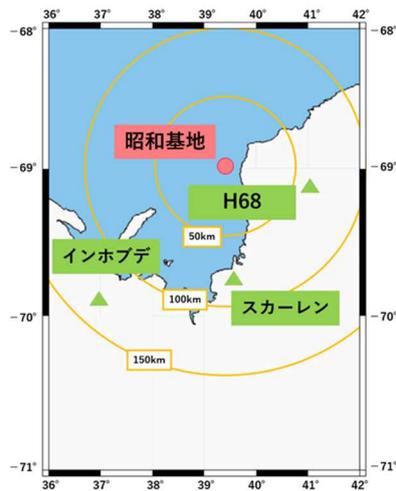


図1：昭和基地周辺の無人磁力計設置点



写真4：インホブデの氷河

長いようで短い夏期間にも終わりが見えてきた2024年2月1日に、前次隊から基地の運営を引き継ぐ越冬交代式が行われました。これからの1年間は自分達だけで昭和基地での観測や基地を維持していかなければならない重責に身の引き締まる思いがしました。

越冬が始まると、夜が徐々に長くなっていくことを感じます。最近までは太陽が昇っている時間の方が長かったのですが、気づけば太陽が沈んでいる時間の方が長くなっています。それに伴い楽しみも増えてきます。その一つがオーロラです。オーロラは太陽からやって来た電気を帯びた粒子が地磁気と相互作用し、酸素や窒素といった大気に衝突することで、大気が発光する現象で、昭和基地では夜になるとその現象を肉眼でも見ることができます。夏期間は南極では太陽が沈まない日が多いためオーロラを見ることはできませんでしたが、越冬開始以降は何度かオーロラを見ることができました（表紙写真）。写真で見るととても色鮮やかに見えますが、実際に肉眼で見ると写真ほど鮮やかではなく、淡く色づいた霧（もや）のように見えます。しかし、時には肉眼でも鮮やかに見えることもあり、空を覆うようなオーロラの色や形が時々刻々と変化する様子にはとても感動します。写真を撮ることも忘れるくらいに見とれるときもあり、寒空にもかかわらず、気づけば明け方になっていたこともあるくらい夢中にさせてくれます。南極・昭和基地に来て良かったと心から思う瞬間の一つです。

南極では4月に入ると気温も下がっていき -20°C を下回るようになります。越冬が始まった2月頃は、海氷の一部は凍っておらずとところどころ海面が見えていましたが、最近の東オングル島周辺はすっかり海氷に閉ざされるようになりました。この時期から、昭和基地から離れた野外での観測や作業に向けた準備が進められます。夏の間は野外への移動は主にヘリコプターを使用していましたが、越冬期間中はヘリコプターの使用ができないので、スノーモービルや雪上車で海氷上を移動する必要があります。ただ、海氷上にはタイドクラック（海氷の割れ目）や氷厚が薄く危険が予想される箇所があるため、事前に安全に移動できる道を確保するためのルート工作が行われます。

先日、昭和基地の隣にある西オングル島にルート工作に行ってきました。ルート工作ではスノーモービルに乗って、約100～300mおきにドリルで海氷に穴を空けて氷厚を測定し（写真5）、それを目的地まで繰り返していきます。氷は厚いところで3m程度ありました。一方で、氷厚がかなり薄いと思われる危険な箇所もありました。無事に西オングル島に到着したときには、ホッとすると同時に南極という地が常に危険と隣り合わせであることを改めて感じました。



写真5：ルート工作での氷厚測定の様子

今号のレポートはここまでです。次号は越冬生活後半の出来事についてレポートしたいと思います。どうぞ期待！

(屋良朝之)

コラム 番外編：地電流観測

地磁気観測業務について知っていただくために、地磁気観測所の歴史を連載している本コラムですが、今回は本編をちょっとお休みし、コラム第5、6回地磁気観測の歴史で触れていた【地電流観測】についてのお話しをします。

地電流とはその名の通り、地面を流れる電流のことを指します。「え！地面に電気が流れているの？」と意外に思った方も多いのではないのでしょうか。それもそのはず、普段は卓上電気スタンドも光らせることができないほどのわずかな電流しか地面には流れていないのです。気付かないのは当然ですね。ではこのようにとても小さな電流である地電流の存在はどのようにして明らかになったのでしょうか。

時は遡って1830年代、電線に流れる電気を使って情報を速くまで届ける「電信」が発明されました。電信はいわゆるモールス信号に代表される、電気のオン、オフの繰り返しを文字にあてはめるような仕組みで、現在の電話のように直接「声」を届けることはできませんでした。しかし、遠くの人と意思疎通を行うためには手紙を書くか直接会うかしか方法がなかったこの時代に、一瞬で遠くまで情報を届けられる電信は画期的な発明として瞬く間にヨーロッパやアメリカに普及し、広大な電信網が構築されることとなります。1866年には大西洋を横断する海底ケーブルが開通したというのですから驚きですね。そんな電信の利用者たちは普及の初期の頃から、時折混じる妙な雑音に悩まされてきました。この雑音の正体について、1847年にイギリスの技術者バーローが調査に乗り出しました。その結果、電線の両端が地面に接触されている場合にのみ雑音が見られることを突き止め、地面に流れる電流、すなわち地電流が電線に漏れ出すことが雑音の原因であることを明らかにしました（図1）。これが地電流の存在を客観的に示した最初の報告とされています。

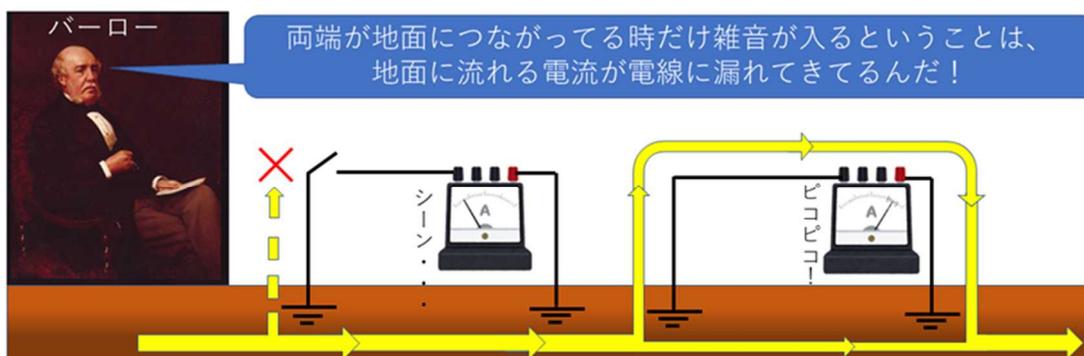


図1：バーローの電信雑音調査

次は、この地電流がどのように発生するのか、その原因について考えてみましょう。

まず前述のパーローですが、その報告の中で「電信に雑音が生じた日にはオーロラが見えていた」という興味深い指摘をしています。現在ではオーロラ活動と地磁気の変動に大きな関わりがあることは研究者の間では常識となっていますが、19世紀中ごろはようやく世界中に地磁気観測所が設立され始めたころで（ガウスとウェーバーの功績でしたね、詳しくは本コラム第2回を参照）、それらの観測からオーロラと地磁気の関係が徐々に明らかにされつつある、そういう時代でした。加えて1831年にファラデーは磁場が変化すると電流が流れる、いわゆる電磁誘導の原理を発見していました。

これら当時の最新の研究成果を組み合わせると、パーロー自身がそのことを自覚していたかは分かりませんが、彼の指摘は「地電流は地磁気の変動による電磁誘導で生じるのではないか」ということを示唆しているように思えます。

それを裏付けるかのように1859年9月に起こった巨大な磁気嵐では、地磁気の変化の記録（図2）に加えてハワイなどの低緯度地域でもオーロラが観測され、さらには雑音というには巨大すぎる電流が電信網を襲い、一時的ではあるにせよ電信網の機能不全を引き起こしました。

細かな原因はいろいろ考えられるのですが、これらの事実から地磁気の変動が地電流の主な発生原因であることがわかったのです。ちなみにこの巨大磁気嵐は「キャリントンイベント」と呼ばれており、近代文明が遭遇した最大の磁気嵐かつ人類が初めて経験した宇宙天気による災害と言われています。

このように地磁気と地電流の関係が強く示唆されるようになってきたことから、科学的な地電流の観測が開始されるようになります。

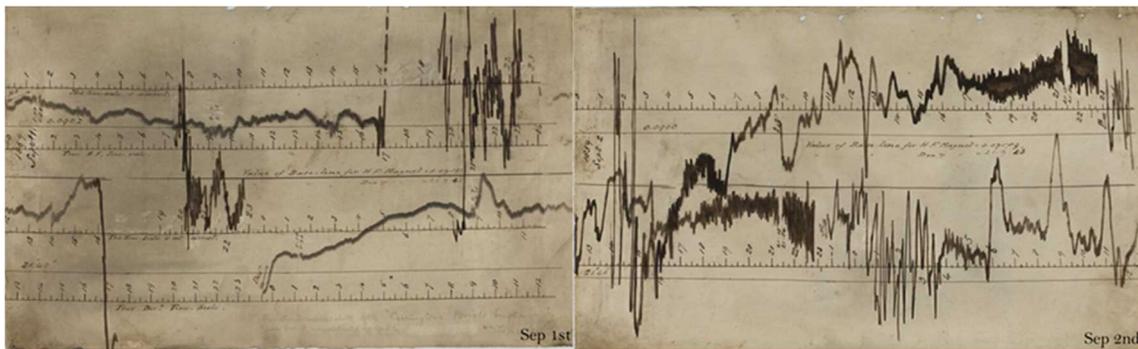


図2：イギリスのグリニッジにおけるキャリントンイベントの地磁気記録
変化が大きすぎて記録が振り切れている部分が多い（イギリス地質調査所HPより）

地電流の観測とはどのように行うのでしょうか。

地面に流れる電流はとても弱いので、それを直接測ることは困難なため、代わりに地面の2点間に電極を差し、その間の電位差（電圧）を測ることにします（図3）。電極間の距離（以後この距離のことを「基線長」と呼ぶ）を離せば離すほど、得られる電圧は大きくなるので、基線長を十分長くすれば観測可能な程度の信号を得ることができます。このように直接測っているのは2点間の電位差なので、地電流観測はしばしば「地電位差観測」とも呼ばれます。

19世紀後半から20世紀前半にかけては、地磁気観測所で地電流観測も行うことがトレンドだったのか、例えばイギリスのグリニッジ（1868-1895）、スペインのエプロ（1910-1938）、オーストラリアのワザールー（1923-1946）、ペルーのワンカイヨ（1926-1946）、アメリカのツーソン（1931-1943）といった場所で観測が行われました。ただ、地電流観測は人工的な電流や電極の不安定化などの問題で観測を長期間維持することが難しく、地磁気観測よりも短期間に観測を終了してしまう場合が多かったようです。

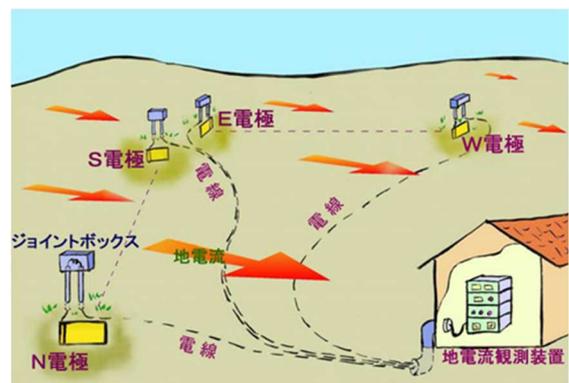


図3：地電流観測の概要
南北方向、東西方向に一組ずつ電極を差し、その間の電位差を測る

日本の地磁気観測所での地電流観測は、1932年の第2回極年を契機に柿岡と豊原（現在のサハリン、ユジノサハリンスク）で開始されました（図4）。

柿岡での観測は、まず100m程度の基線長で開始されたのち、1934年からは1～1.5kmほどに基線長を拡大して観測が続けられました。第二次世界大戦後、豊原観測所はソビエト連邦に引き渡されることとなりますが、1946年には北海道の幾寅で地電流観測を再開し、その後1949年には女満別に移転し観測を継続しました。また、1946年に宮崎県の都城で開始された観測も1948年に鹿屋に移転し観測を継続しました。

この柿岡、女満別、鹿屋の3地点は2021年に観測を終了するまで実に70年以上もの長期にわたって地電流観測を続けた、世界でもまれにみる観測点となっています。少なくとも筆者が把握する限り、日本の3地点以外で50年以上観測を継続しているのはハンガリーのナジツェンク（1957-継続中）のみです。また、この3地点以外でも1946年に盛岡（1946-1951）、原ノ町（1946-1957）、尾鷲（1946-1955）でも地電流観測が開始されました（図4）。これは地磁気観測所の母体である中央気象台（現在の気象庁）が、「地震予知のために地電流観測を充実させる」という方針を打ち出したためです。

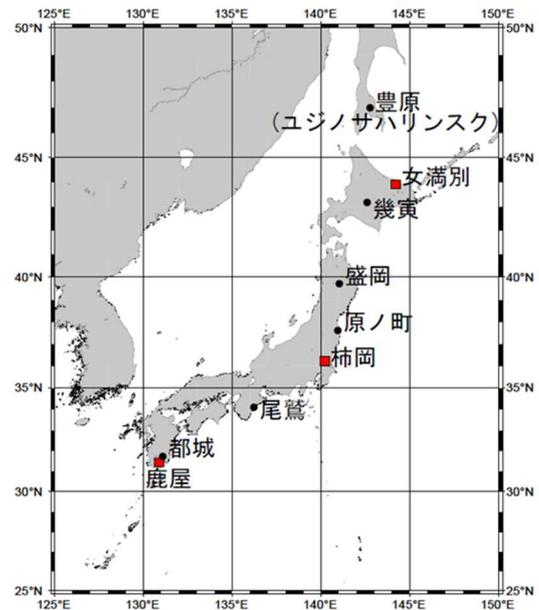


図4：地磁気観測所の地電流観測網
赤い四角：長期観測 黒丸：短期間で観測終了

古くは19世紀終わりから（そのメカニズムは不明ではあるものの）地震と地電流を関連付ける報告は存在していたようで、当時の中央気象台は地電流を地震予知に資するデータのの一つと位置付け、観測の強化を図ったわけです。盛岡、原ノ町、尾鷲での観測は比較的短期間で終了していますが、柿岡、女満別、鹿屋で長期間の観測が実現した背景には、地震大国日本というお国柄も大きく関係していたということでしょう。

残念ながら、地電流を用いた地震予知は現在でも確立されていません。しかし、20世紀末ごろから別の分野において地電流観測の重要性が認識されるようになってきました。それは約150年前に経験した前述のキャリントンイベントのような巨大磁気嵐による災害であり、最近の言葉で言うと「宇宙天気災害」の分野に該当します。

キャリントンイベントでは電信網が大きなダメージを受けたわけですが、当時これらは一般家庭には普及していなかったため、キャリントンイベント自体が市民の生活に大きく影響するほどの大災害とは言えないものでした。しかし現在では一般家庭にも電力線等が引き込まれており、その送電網にダメージがあれば停電等を引き起こし、市民のみならずにも大きな影響を与える可能性が十分考えられます。実際に、1989年3月に起こった大きな磁気嵐がカナダの変電所を破壊してしまい、約600万世帯に及ぶ大停電を引き起こしました。

このような災害を未然に防ぐためには、磁気嵐時にどのような電流が地面に誘起されるかを知る必要があります。そこで地電流観測の出番となるわけです。

磁気嵐の変動は緯度が高い（北極や南極に近い）ほど大きくなる傾向があり、それらの地域では誘起される地電流の影響も大きくなると考えられます。このため、ヨーロッパや北アメリカといった比較的高緯度な地域で地電流観測網が新たに展開され始めており、例えば2012年からイギリスのラーウィック、エスクデルミア、ハートランド、2016年からはアメリカのボールダーに地電流観測が整備されました。一方で巨大な磁気嵐は発生頻度が低く、せいぜい数十年に一度くらいしか起こりません。最近整備された観測点で良質なデータを得るには、そのような大きな磁気嵐の発生を待つしかありません。日本の観測点は2021年に観測を終了してはいますが、過去70年以上にわたる観測期間に大きな磁気嵐をいくつも記録しています。研究者から見れば、これはまさに宝の山です！我々の諸先輩方が脈々と守ってきた長期間の観測データは、最新の研究に資することも可能な人類の財産と言えるものなのです。

最後に地電流の重要な応用例を紹介します。

地磁気の変動によって誘起される地電流の大きさは、その場所の地下の電気の流れやすさ（電気伝導度）によって異なります。逆に言えば、地磁気と地電流を同時に測って両者を比較すると、地下の電気伝導度が分かる、ということになります。地下水を多く含む部分や鉱脈、マグマのように溶けた岩石がある部分では電気伝導度が上がる、すなわち電気を流しやすい性質があり、地下の電気伝導度の分布を調べることで地下資源や地下水の位置、火山における熱水だまりやマグマの位置などを推測することができます。地磁気と地電流の観測データ

から電気伝導度分布を調べる手法は「地磁気地電流法 (Magnetotelluric Method: MT法)」と呼ばれ、地下の構造探査などに広く利用されています (図5)。

このMT法は長らく1950年代にロシアとフランスの研究者によって初めて開発されたとされてきました。しかし最近になって、それより10年以上前の1934年に豊原観測所の初代所長であった平山操氏が、MT法の基礎となる地磁気と地電流と電気伝導度の理論的関係を導き出していたことが知られるようになりました。彼が発表した論文は日本語であったため、当時は世界の研究者の目に留まることがなかったのです。彼がもし英語論文として発表していれば、MT法研究の歴史は違ったものになったかもしれないと思うと残念な気持ちにもなりますが、豊原観測所での日々の観測業務をこなしながらもこのような先駆的な研究を行っていたことに胸が熱くなります。

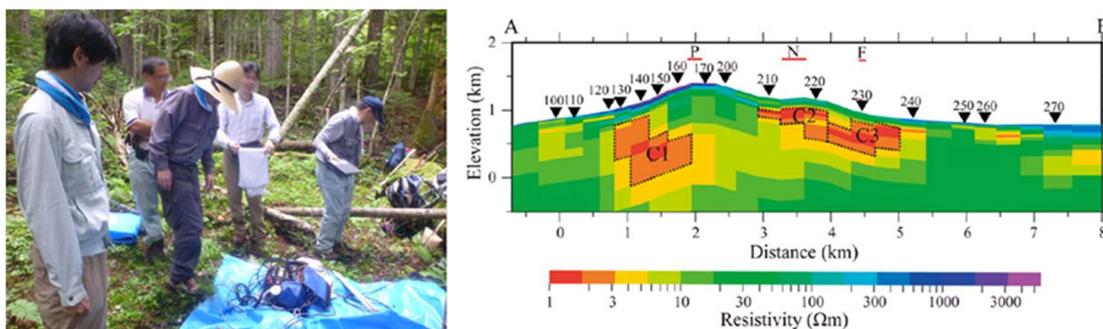


図5：2013年に北海道雌阿寒岳で行われたMT観測の様子 (左図、左端の人物が筆者) とその結果得られた電気伝導度構造 (右図、赤い部分が電気伝導度の高い領域 (Takahashi et. al. 2017より))

地磁気観測所における地電流観測は、このような偉大な先輩方のDNAを受け継いできたものだと筆者は感じています。残念ながら我々の地電流観測は2021年にピリオドが打たれましたが、これまで受け継がれてきた観測者としての魂を後世にも伝えていかねばならない、歴史を振り返る本コラムに関わるたびにそう強く感じます。

今回は「国際地球観測年 (IGY)」についてです。

(観測課 長町信吾)

(参考文献)

地磁気観測所 (1983) 「地磁気観測百年史」

平山 操 (1934), 地電流及び地磁気変化の間の関係に就いて, 気象集誌, 2, 12, 1, 16-22.

イギリス地質調査所HP, The Largest Magnetic Storm on Record...or is it?, <http://www.geomag.bgs.ac.uk/education/carrington.html>

Barlow, W.H. (1849) On the spontaneous electrical currents observed in the wires of the electric telegraph. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 139, 61-72. <https://doi.org/10.1098/rstl.1849.0006>

Beggan, C.D., Richardson, G.S., Baillie, O., Hübert, J. & Thomson, A.W.P. (2021) Geoelectric field measurement, modelling and validation during geomagnetic storms in the UK. The Journal of Space Weather and Space Climate, 11, 37. <https://doi.org/10.1051/swsc/2021022>

Blum, C.C., White, T.C., Sauter, E.A., Stewart, D.C., Bedrosian, P.A. & Love, J.J. (2017) Geoelectric monitoring at the Boulder magnetic observatory. Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems, 6, 447-452. <https://doi.org/10.5194/gi-6-447-2017>

Bör, J., Sători, G., Barta, V., Szabóné, A. K., Szendrői, J., Wesztergom, V., Bozóki, T., & Buzás, A. (2020): Measurements of atmospheric electricity in the Széchenyi István Geophysical Observatory, Hungary. History of Geo- and Space Sciences, 11, 1, 53-70, <https://doi.org/10.5194/hgss-11-53-2020>

British Geological Survey. (2013). UK Magnetic Observatory Magnetograms. British Geological Survey. (Dataset). <https://doi.org/10.5285/4eeec93c-12e6-4244-9b99-52c61350f9aa>

Fujii, I. & Nagamachi, S. (2022) History of Kakioka Magnetic Observatory, History of Geo- and Space Sciences, 10.5194/hgss-13-147-2022, 13, 2. <https://doi.org/10.5194/hgss-13-147-2022>

Nagamachi, S., Arita, S., & Hirota, E. (2021) Historical data of geoelectric field observations in Japan, Geoscience Data Journal, 10, 18- 38, <https://doi.org/10.1002/gdj3.139>

Rooney, W. J. (1949) Earth-current results at Huancayo Magnetic Observatory, 1932-1942. Res Dep of Terr Magn Vol.15, Carnegie Inst Washington

Rooney, W. J. (1949) Earth-current results at Watheroo Magnetic Observatory, 1932-1942. Res Dep of Terr Magn Vol.16, Carnegie Inst Washington

Takahashi, K., Takakura, S., Matsushima, N., & Fujii, I. (2017) Relationship between volcanic activity and shallow hydrothermal system at Meakandake volcano, Japan, inferred from geomagnetic and audio-frequency magnetotelluric measurements, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 349, pp. 351-369.

はれるんカード特別版のご紹介

気象庁マスコットキャラクターのはれるんは、平成16年6月1日（第129回気象記念日）に誕生し、今年で20周年を迎えました。気象庁は、国民のみなさまとのつながりを深め、気象業務への興味を持っていただけるような企画のひとつとして、令和4年度から「はれるんカード」の配布を行っております。はれるんカードとは、気象官署に訪れた方が、施設情報・豆知識などを得られる画像データです。庁舎に掲示されているポスター中央のQRコードをご自身のスマホで読み取っていただくと、画像データを取得することができます。

今年度ははれるん誕生20周年を記念し「はれるんカード特別版」を6月1日から配布していますので、当所にお立ち寄りの際はぜひお試しください。

気象庁HP

<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/info/harerun.html>

気象友の会HP

<https://www.e-watcherstomo.com/>

はれるんインスタグラム

https://www.instagram.com/harerun_jma/

気象庁X

https://x.com/JMA_kishou



年2回(6, 12月)発行

編集・発行 気象庁地磁気観測所 総務課

〒315-0116 茨城県石岡市柿岡595

TEL : 0299-43-1151 (総務課)

ホームページ : <https://www.kakioka-jma.go.jp/>

E-mail : kakioka@met.kishou.go.jp

表紙写真：南極昭和基地で撮影されたオーロラ（写真：屋良朝之）