



講座 宇宙天気研究に基づく社会インフラ防護と被害予測

3. 宇宙天気に関する研究の様々な広がり
～磁気嵐の成因に関する研究紹介～

3. Research Fields of Space Weather Forecast Featuring Magnetic Storm

片岡 龍峰

KATAOKA Ryuho

国立極地研究所

(原稿受付：2023年10月6日)

宇宙天気予報の社会的ニーズが増加する一方で、学問的な興味も日々高まっている。特に、百年に一度、千年に一度の巨大磁気嵐を、どう理解できるか、ということは、アカデミックな研究課題の代表例だろう。本章では、複雑に関連する宇宙天気関連の観測データのみならず、日本や中国におけるオーロラを目撃を記した史料も用いて過去の巨大磁気嵐を調べる研究例、物理シミュレーション研究の現状や課題、機械学習の活用などについて紹介する。

Keywords:

magnetic storm, aurora, solar wind, coronal mass ejection, interplanetary shock, machine learning

3.1 巨大磁気嵐の現代記録

柿岡地磁気観測所の長期間連続の地磁気記録は、大規模な磁気嵐を含む高品質なデータとして知られ、今や日本の財産となっている。1913年に始まった柿岡の観測結果は東京の中央気象台に送られていたため、残念ながら1923年の関東大震災で初期の観測結果は焼失してしまった。つまり、2023年現在で約100年の連続データの蓄積がある。著者が巨大磁気嵐の研究を系統的に始め、今も続けているのも、2013年1月に柿岡地磁気観測所において開催された観測開始百周年記念講演会に参加し、その存在と歴史に感銘を受けたためである。

宇宙天気に関する講座をはじめると、まず紹介したいアイテムがある。それは、柿岡地磁気観測所で今も職員らによる丁寧な判定作業を介して続けられている「急始」と「磁気嵐」の規模をまとめたイベントリストである。急始とは、主にコロナ質量放出に伴う衝撃波の影響を受けて地磁気全体が急激に圧縮され、地上での磁場南北成分 (ΔH , 北向きがプラス) が分単位で一時的に強まる現象のこと。磁気嵐とは、主にコロナ質量放出に伴う強い南向き磁場の影響を受けて、内部磁気圏に西向きの環電流が生じ、 ΔH が時間単位で弱まる現象のことである。

これら「急始」と「磁気嵐」はいずれも、地殻中を流れる誘導電流を介して電力網を破壊しうるため、現代の宇宙天気予報において最重要のターゲットのひとつとなっている。参考値として、カナダ・ケベック州において実際に停電事故に発展した1989年3月13日の磁気嵐イ

National Institute of Polar Research, Tachikawa, TOKYO 190-8518, Japan

イベントは、過去50年で最大の磁気嵐であるが、このときの柿岡の ΔH は -644 nTであった。

この柿岡のイベントリストの統計解析を行い、大規模な磁気嵐の発生頻度や、百年に一度、千年に一度の急始や磁気嵐の規模を推定した研究例をいくつか紹介したい。小規模なイベントほど数が多く、大規模なイベントほど数が極端に少なくなる特徴があるため、単純なヒストグラムでは全容を掴みにくい。この場合、イベントリストを、ある $|\Delta H|$ の規模 x における発生確率 $p(x)$ として料理するのではなく、イベントリストを累積確率分布 P 、つまり $|\Delta H|$ がある規模 x を超えるイベント発生確率を連続的に出すように、

$$P(x) = \int_x^{\infty} p(x) dx \quad (1)$$

とすれば見通しが立てやすい。仮にべき乗分布 $p(x) \propto x^{-\alpha}$ の場合には、

$$p(x) \propto x^{-\alpha+1} \quad (2)$$

となる。イベントリストに最小二乗フィットする α も、

$$\alpha = 1 + n \left[\sum_{i=1}^n \left(\ln \frac{x_i}{x_{\min}} \right) \right]^{-1} \quad (3)$$

と解析的に求まる。ここで、 x_{\min} は、フィットに用いないようカットするイベント規模である。こうして決めた累積確率分布を用いて、さらにポアソン分布を仮定すれば、今後、期間 Δt の間に x_{critical} を超える規模のイベントが発

author's e-mail: ryuho.kataoka@gmail.com

生ずる確率 P_c は

$$P_c = 1 - \exp\left(-\frac{N\Delta t}{\tau} P(x_{\text{critical}})\right) \quad (4)$$

と求められる。ここで、 τ は全データ期間、 N はイベント数である。

最大級の磁気嵐の例としては、1859年9月1日のキャリントン・イベントが知られており、インド・ボンベイの磁力計での ΔH 最小値は -1600 nT にも達する [1]。柿岡のイベントリストを用いて上記の計算を行うと、今後10年間で ΔH が -1600 nT に達するイベントが1度発生する確率は約5%と推定される [2]。なお、キャリントン・イベントの -1600 nT に達するスパイク状の ΔH 変動は、おそらく環電流とは別物、つまり磁気嵐の指標に用いることには問題がありそうだ、という研究も報告されている [3]。

べき乗分布にはイベント規模の上限がないため、上記の方法はオーバーな推定になりがちであることは注意を要する。2020年の春、まさかのパンデミックが起り、緊急事態宣言が出され、ステイホームが中心となってしまった日常で、この「まさかの」巨大磁気嵐の発生分布のことが、ふと気になったタイミングがあった。そんなある日、著者は念のため、この疑問に関して再考を試みることにした。最も素朴な発生分布として、対数正規分布も考慮に入れることにした。一般に複雑系の出力は、掛け算のランダムウォークである対数正規分布を示すことも多いからである。

急始イベントの大規模なものは、それでも不思議なことに、べき乗分布が比較的良好にフィットする (図1下)。そこから100年に1度、1000年に1度の ΔH を推定すると、それぞれ230 nT、450 nT となる [4]。ところが、磁気嵐のイベントリストでは、べき乗分布がオーバーな感は否めない。対数正規分布が、よりフィットしている (図1上) として、そこから100年に一度、1000年に1度の磁気嵐の $|\Delta H|$ を推定すれば、770 nT、1100 nT となる [4]。ちなみに、これは柿岡地磁気観測所のローカルな推定であり、グローバルに捉えた磁気嵐規模の推定-次章で紹介する Dst 指数-とは多少の差異があることに注意されたい。

3.2 巨大磁気嵐の古記録

巨大磁気嵐の際には、日本のような中低緯度にも夜間に赤いオーロラが出現することが知られている。日本や中国の古典籍に見られる「赤気」という語が、これにあたる。赤気を目撃した人々は、その異様な夜空の在り方に驚き、その発生の様子について日時や方向も含めて詳細に記録を残してきた。

100年程度に限られる現代的な磁力計による観測データのみから、非常に稀に起こる巨大磁気嵐の実態を明らかにするには限界がある。しかし、日本や中国に残る古典籍には、この赤気が1000年以上の長期にわたって記録されているため、これらの古典籍を丁寧に読み解けば、現代的なデータからは推定できない長期にわたり、巨大磁

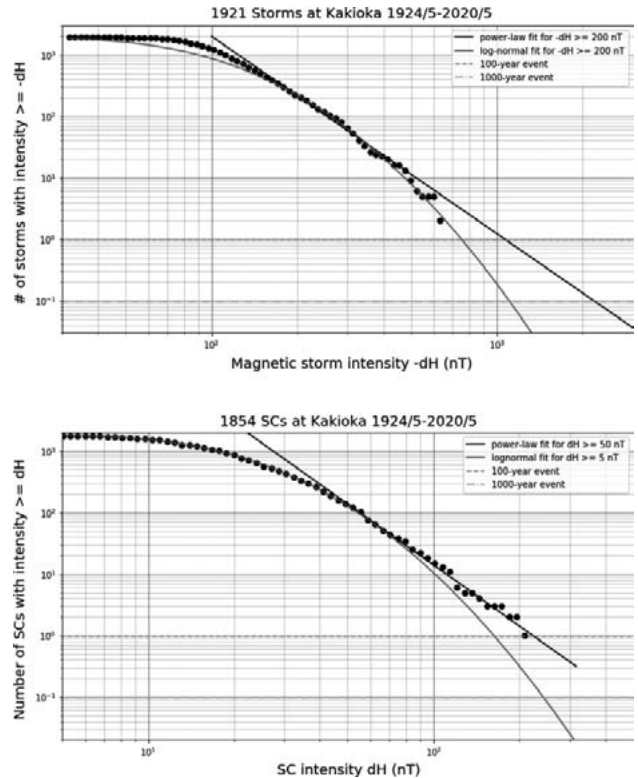


図1 柿岡地磁気観測所で同定されてきた磁気嵐の累積頻度分布 (上) と、急始の累積頻度分布 (下)。直線がべき乗分布、曲線が対数正規分布によるフィットである。

気嵐の発生頻度の傾向に関してヒントを得られるはずである。また、巨大磁気嵐の際に、夜空に現れた赤気がどのように時間空間変化するものなのか、という実態についても、その記述や絵図から学びとれることもあるだろう。

ところで、オーロラは地球規模で環のように分布することから、オーロラオーバルと呼ばれていることはご存じだろうか。大きな磁気嵐であればあるほど、このオーロラの環も世界的に低緯度に拡大する。このオーロラオーバルの拡大は、普段はプラズマを寄せ付けない内部磁気圏に、それだけプラズマが侵入してしまうことと関連している。プラズマの侵入する領域の双極子磁場が距離の -3 乗で強まることなどを考慮すれば、磁気嵐の規模と赤気の出現緯度、より正確には赤いオーロラの磁気緯度フットプリントの低緯度限界、あるいはその L 値 (\cos^{-2} 磁気緯度) との関係は、次のように見積もることができる [5]。

$$Dst = -1000 \left(\frac{\varepsilon}{10\%} \right) \left(\frac{L}{1.26} \right) \left(\frac{B_0}{3 \times 10^4 \text{ nT}} \right) \text{ nT} \quad (5)$$

ここで Dst とは、磁気嵐の規模あるいは環電流の強さを表す指数であり、世界各地で観測された ΔH を平均したものである。 ε は地磁気の磁場エネルギーの何割が、環電流を担うプラズマの運動エネルギーに相当するものか、というパラメータ、 B_0 は地上赤道面での主磁場である。つまり、こういった推定式を用意すれば、古記録に残る目撃情報などからでも、磁気嵐の規模感についてラフな議論はできる。

この章では、磁気嵐の古記録としての「赤気」に関する、比較的新しい研究例を幾つか紹介したい。古典籍中のキーワードを探って歴史に学ぶ研究アプローチは「古天文学」とも呼ばれている。古天文学のパイオニアである神田茂は『日本天文資料』（昭和35年発行）として、流星、彗星、日蝕などに加えて赤気のイベントリストをまとめている。中国では、1988年に『中国古代天象記録全集』が発光され、これには赤気に加え、太陽黒点を表す黒子のイベントリストも豊富に掲載されている。

著者は、東京都立川市にある国立極地研究所の立地を生かし、建物を同じくする国文学研究資料館の研究者らと協力し、好奇心ベースで赤気に関する共同研究を進めてきた。2015年の夏、ゼロからのスタートであったキックオフ会合において、国文研の大学院生（武井氏）が、自己紹介にあたる発表で具体的に指摘した記述が、その後の発展の引き金となった。『明月記』中の赤気の記述を丁寧に読めば、西暦1204年2月21日と2月23日と、なぜか近接した日に発生していますね（なぜでしょうか）、というものである。

太陽黒点の近くで起こるプラズマの爆発現象というのは、X線の放出を見れば太陽フレアと呼ばれるが、大規模なものは特に一度爆発をはじめると数日間ほど、長ければ1週間以上にわたって何度も繰り返し爆発を続ける。したがって、1週間のうちに何度も赤気が現れた、つまり磁気嵐が連発している、ということは、私たちの興味を引く巨大磁気嵐イベントの典型的な発生パターンとしてふさわしい。これを、中国の『宋史』の数百年の連続記録の中から機械的に洗い出して検証してみた。今は歴史書のキーワード検索ができる時代である。

結論としては、10～13世紀の赤気現象のうち連続発生するものに限ってみれば、太陽11年周期の極大期付近に発生する例が比較的多いこと、太陽活動が長期間低下したオールド極小期には見られないこと、ほかにも先述の『明月記』中の連続赤気の例は日本の磁気緯度が歴史的に高かった13世紀前半に発生していたこと、などが明らかとなった[6]。

なお、このような解析で比較される太陽活動の長期変動の基本パターンは、樹木年輪中の炭素同位体・宇宙線生成核種の高精度測定によって明らかにされてきたものである[7]。また、日本の磁気緯度が13世紀前半に高かったことに関しては、世界に残る残留磁気のデータから明らかになるものだが、実は7世紀前半にも日本の磁気緯度は高かった[8]。この7世紀前半の時代には、日本最古の天文記録として、『日本書紀』推古天皇二十八年（西暦620年）に赤気が記録されている[9]。したがって、日本の記録から過去に遡るのは、この約1400年前の記録が限度になる。

より新し目の古記録にも、宇宙天気を論じる上で非常に興味深いヒントが残されていたことを紹介してから、この章を終えたい。江戸時代になると、赤気のカラ絵図、つまりグラフィカルなヒントが見つかるのである（図2）。日本のあらゆる地域で赤気が見られた明和七年秋（1770

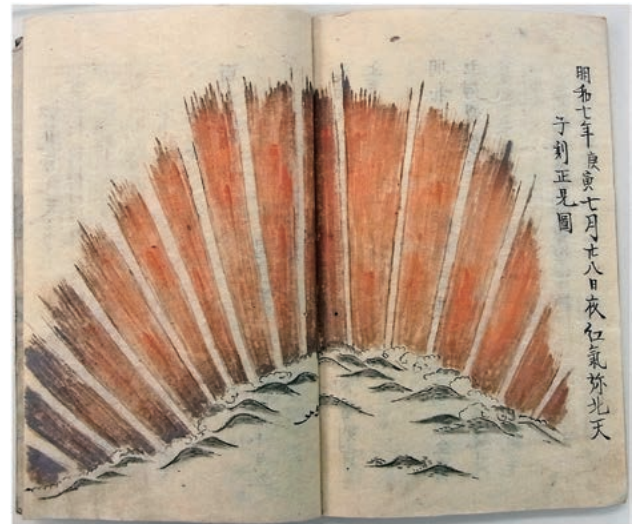


図2 『星解』のオーロラ絵図。松阪市提供。

年9月)の、赤い扇を開いたような『星解』中の赤気絵図は以前から知られていたが、その絵図の「扇形」の意味などが科学的に論じられることは、これまでなかった。実際、東京から見た富士山ほどの小さな風景を描いたものか、空全体の大きな風景を描いたものか、規模感のわからない絵図では、それ以上踏み込んだ議論が難しい。

当時、国文研に努めていた岩橋清美氏は、ある日、現地踏査によって、京都の東丸神社に残る同日の日記中に「白氣一筋銀河ヲ貫き」という一文を新たに発見し、著者に教えてくれた。お互いのオフィスが徒歩1分の距離なので、いつもの気軽な連絡であったが、これは重大なヒントであった。銀河とは天の川であり、秋の天の川は天高く、これで『星解』のオーロラ絵図が、空全体の大きな絵であったことが確実となった。オーロラは、人間の目には見えない磁力線を、プラズマの発光によって可視化する現象である。それならば、京都から北に見た磁力線のパターンを描いてみれば、空全体に扇を開いたように見えるものだろうか。その結果は、やはり絵図そっくりの扇形になる。

この絵図の磁力線パターンから、オーロラの磁気緯度を同定すると、史上最大と言われるキャリントン・イベント時のオーロラの磁気緯度（L値で1.26）と同程度である。また、(5)式を用いて磁気嵐の規模を見積もれば、1770年の主磁場 B_0 は1859年よりも1割ほど大きいため、明和七年の赤気イベントの磁気嵐の規模は、キャリントン・イベントのそれと同程度かそれ以上と推定される[5]。現在では、この明和七年イベントは、過去500年最大の磁気嵐という位置づけで受け止められているようである[10]。

3.3 大規模な磁気嵐の成因

発展著しい機械学習を用いた研究手法が宇宙天気予報の研究にも相性がよいということは、近年の宇宙天気分野において機械学習を用いた論文数が急激に増加していることから顕著である。確かに、複雑なシステムの場

合には、入力と出力を物理的(例:磁気流体シミュレーション予測, 図3)あるいは解析的(例:経験モデル予測)に関係づけるよりも、機械学習(例:ニューラルネット予測)で関係づけるほうが、最終的な予測パフォーマンスが高くなる。

磁気嵐の予測研究も例外ではない。磁気嵐の予測を行うには、地球に吹き付ける太陽風プラズマの密度、スピード、磁場の時系列が必要である。これらはまとめて、地球軌道での「太陽風パラメータ」と呼ばれている。太陽風パラメータがあれば、入出力の解析的な経験モデルから、磁気嵐のDst指数の時間プロファイルが高精度で予測できる[11, 12]。そして近年では、こういった解析的な経験モデルも、より高性能な機械学習モデルに置き換わってきている。

ところで、この地球軌道での太陽風パラメータの観測データが、ほぼ欠損なく得られているのは、地球から235 Re上流に位置するL1点でのACE探査機による定点観測がはじまった1998年以降であり、太陽活動の第23期(1996年~2009年)の大部分と第24期(2009年~2020年)、そして現在の第25期(2020年~)の上り調子の部分5年分ほどを合わせて、まだ約25年分のデータの蓄積しかない。

第23期最大級の磁気嵐は、2003年10月~11月に起こった一連の磁気嵐、いわゆるハロウィン・イベントであり、第24期最大の磁気嵐は、2015年3月の聖パトリック・イベントである。筆者たちは、これらの最大級の磁気嵐を生み出した太陽風パラメータを、太陽の磁場データやフレア直後の情報のみに基づいて、コロナ質量放出の磁気流体シミュレーションを行うことで再現できるものだろうか、という研究を行ってきた[13, 14](図3)。少なくとも、地球軌道での太陽風パラメータを当てるには、コロナ質量放出が飛び出す前の背景となる内部太陽圏全体の太陽風構造と、飛び出すコロナ質量放出そのものの構造の、両方の再現性を高める必要があることは明らかになった。

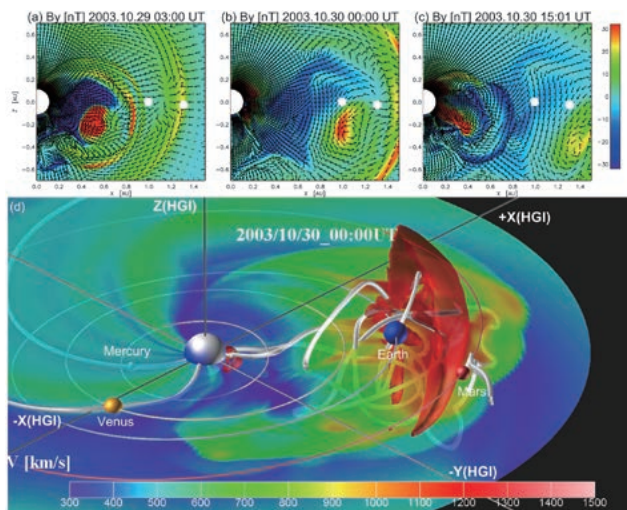


図3 2003年ハロウィン・イベント時の太陽風構造について、磁気流体シミュレーションによる復元を試みた一例。

L1点から地球までの距離であれば、太陽風はわずか1時間ほどで通過してしまうが、太陽から地球までの距離であれば数日はかかる。L1点での太陽風パラメータ観測データのみを当てにしているのは手遅れになることもあるだろうから、予報のリードタイムを数日ほど伸ばせないか、という応用研究とも言える。類似の研究は多くあり、各国で発展を続けているが、太陽表面から太陽風の領域までをシームレスに、コロナ質量放出の初期から磁気流体方程式を解く計算コストが膨大であることと、内部太陽圏全体の背景太陽風の構造やコロナ質量放出の計算結果を修正するための観測データに乏しいことから、磁気嵐を予測できるほどに高精度な太陽風パラメータ予測の実現には至っていない。それならば、ありとあらゆる太陽画像データを入力として、地球軌道での太陽風パラメータを、とにかく当ててしまおう、という機械学習を用いた力技でも、まだまだ性能が出ない。この研究分野は、発展の余地が大きい。

大規模な磁気嵐の成因がコロナ質量放出であることに疑いの余地はない。よくわからないのは、コロナ質量放出が、地球位置において、どこまで大きな太陽風の密度・速度・磁場をもたらすものか、ということである。それならば、過去に起こった、より大規模な磁気嵐を多く参照し、その成因を探ればよいだろう。しかし、ここで突き当たる最大の壁は、過去の太陽風の観測データが殆ど欠損している、ということである。実は、この根本的な問題に関して、機械学習の強みが発揮できる。太陽風のデータには確かに欠損が多いが、Dst指数に代表される地磁気活動指数には、50年以上の長期間にわたって欠損が殆どない。つまり、地磁気指数と太陽風パラメータの時系列の相互関係を機械学習させることで、地磁気活動指数の時系列から太陽風パラメータの時系列を逆推定し、データ欠損を埋めるような推定することもできるはずではないか、という研究を行ってみた。

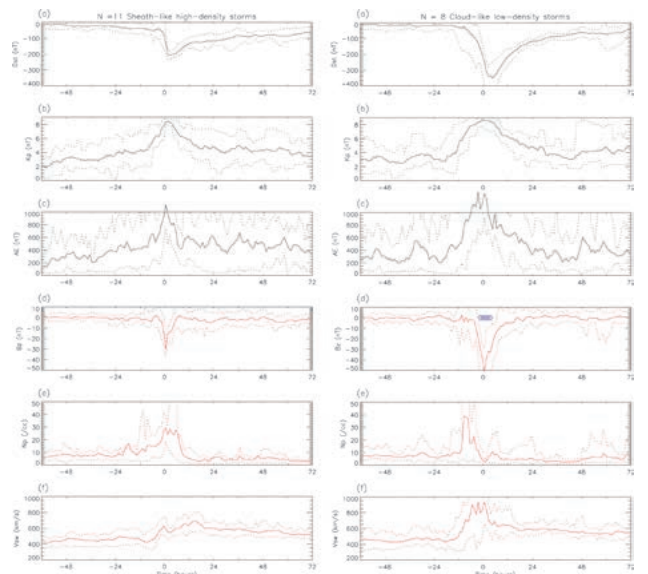


図4 上三段は地磁気活動指数 Dst, Kp, AE, 下三段は機械学習によって復元された大規模な磁気嵐時の太陽風パラメータ。

そうして、過去に発生した大規模な磁気嵐に共通する太陽風変動パターンを復元すると、過去50年で観測された大規模な磁気嵐を引き起こす平均パターンは、衝撃波下流の圧縮された太陽風が主な原因であるシース型(図4左)と、コロナ質量放出が太陽から引きちぎってきた磁場が主な原因である磁気雲型(図4右)の2種類に分類できること、過去50年で最大の磁気嵐(1989年3月)を引き起こした南向き磁場の強さは約100 nT, ということなどが推定できた[15].

この研究で使用した機械学習モデルは、時系列ベースのEcho State Network (ESN) というものである[16]. このモデルの最大の特徴は、深層学習とは違い、少量の学習データでも比較的高い予測性能を発揮できることにある。困り果てていたパンデミック前半の暮らしの中でも、やはり建物を同じくする統計数理研究所で徒歩1分の距離にオフィスのある中野慎也氏に、「なかなか面白い機械学習モデルがあるよ」と教えてもらったことがあった。確かに、これは妙手である、と感動し、パンデミックを生き抜く勇気をもらうことになった。学習データの限られる様々な分野で幅広く有用かつ基礎的な機械学習モデルと思われるので、この場を借りて、その概要も紹介しておこうと思う。

ESNの出力ベクトル y は、リザーバー状態ベクトル x を用いて、 $y(n) = W_{\text{out}}x(n)$ と表される。ここで、 W_{out} は出力結合重み行列である。ESNの学習は、すべての時刻 n で、目標出力 $d(n)$ と一致する W_{out} を求めることに尽きる。時系列方向に連結したリザーバー状態ベクトルと目標出力ベクトルの行列をそれぞれ X と D とすれば、 $W_{\text{out}}X = D$ と書けるが、 W_{out} を求めるには、最小二乗法で線形回帰を行えばよい。つまり $W_{\text{out}} = DX^T(XX^T)^{-1}$ という行列計算を一度行えば、学習は完了である。

ESNのリザーバー状態ベクトルの時間発展は、

$$\mathbf{x}(n+1) = \tanh(W_{\text{in}}\mathbf{u}(n+1) + W\mathbf{x}(n)) \quad (6)$$

と書かれる。右辺第一項から入力ベクトル \mathbf{u} の影響を受け(W_{in} は入力結合重み行列)、右辺第二項から過去の記憶を持つ(W はリカレント結合重み行列)ことがわかる。深層学習では、この W も学習するために膨大な目標出力ベクトルを要するのに対し、ESNでは、 W はあらかじめランダムかつスパースに与えて固定する。

ちなみに、ESNの応用は一次元時系列に限らない。多次元分布の時系列は、主成分分析などで次元を圧縮すればよい。一言だけ、その一例を紹介してから、この章を終わりとしよう。たとえば、太陽風パラメータを入力としたオーロラ電流系の物理シミュレーション結果、つまり南北極域の電流、電場、伝導度の2次元マップの時系列出力を、ESNを用いて予測する「オーロラ電流系エミュレータ」を作ることができる[17]. こういったエミュレータを用いることで、物理シミュレーションよりも100万倍以上高速に、実質的には瞬時に計算結果を得られるため、即時的なオーロラ電流系の宇宙天気予報に有用であるこ

とはもちろん、今後は十分なアンサンブルによる観測データとのデータ同化研究なども可能となってくるだろう。

3.4 小規模な磁気嵐の成因

大規模な磁気嵐を理解し予測することが困難なのは、イベント数が少ない故に当然のことである。それでは、小規模の磁気嵐の予測は簡単なのだろうか。とても意外なことに、2022年に起こった、ある磁気嵐によって、小規模な磁気嵐の予測も、かえって難しいものであるということに認識した。その詳細と教訓を述べて、本稿を終えようと思う。

2022年2月上旬、磁気嵐が複数回発生した。その結果、2月3日にスペース・エクスプロレーション・テクノロジー(以下、スペースX社)が打ち上げた49機のスターリンク衛星のうち、38機が大気圏へ再突入して失われた。当時のスペースX社のウェブサイト上での発表を要約すれば「衛星の打ち上げ後に大気ドラッグが50%ほど増加したことを受け、約210 kmの低高度において大気ドラッグを低減する安全モードへ移行したが、約40機が復旧不可能となり、目標の高度350 kmまで上昇することができずに失われた」ということになる。この時発生した磁気嵐の規模は、ひと月に1回程度は必ず発生しているようなありふれたレベルであり、Dst指数で-61 nTに過ぎない。それにもかかわらず、多数の人工衛星が大気へ再突入した点で、広く注目を集めている。

この衛星事故を引き起こした磁気嵐も、コロナ質量放出が地球に到来して発生したものである。しかし、1度目の磁気嵐が終了した直後に、もう一つ別の磁気嵐が起こる、という変則的な特徴があった。特に、この2度目の磁気嵐の予測は困難だったことが災いした。つまり、2度目の磁気嵐の発生直前に、そのまましばらく放置していれば大気へ突入してしまう210 kmという低高度へのチャレンジな衛星投入という新たな試み、というタイミング的な問題と前例のない新規性との両方が重なったことが、事故の主な原因だと考えられる。

磁気嵐が発生している最中であれば、約200 km高度において、大気ドラッグが50%ほど上昇することに不思議はない。磁気嵐時のオーロラ電流系に伴う極域大気のジュール加熱による宇宙空間への大気膨張が原因であることは明白で、物理シミュレーションによれば、この大気膨張は高緯度地域に収まらず、中低緯度までじわじわと伝搬していた様子が再現される[18].

ちなみに、この事故から約1年後の2023年2月28日、ほどほどの規模の磁気嵐(Dst指数で-132 nT)が発生し、世界中で撮影された美しいカラフルなオーロラ写真や動画がSNS上を賑わせていた中で、スペースX社は磁気嵐の影響を考慮し、21機の次世代スターリンク衛星の打ち上げを延期していることも、ここに紹介しておきたい。

実は著者にとっては、この1度目の磁気嵐が発生タイミングからして予想外であった。コロナ質量放出の本体が地球に到来する際には、前兆現象となる衝撃波が地球に到来し「急始」が起こることは冒頭で説明したとおり

である。このイベントの場合にも、2022年2月1日に衝撃波が地球に到来し、急始が起こった。通常であれば急始から6時間～半日程度で、コロナ質量放出の本体のデータが見えはじめるのだが、この1度目の磁気嵐の際には、急始から24時間ほど経って、ようやく本体が現れたのである。「おそらく空間的に広がった衝撃波だけが地球に到来し、コロナ質量放出の本体は地球に当たらなかったのだろう」という私の予想は見事に外れた。この「急始から一日遅れ」というタイミングでの、1度目の磁気嵐の発生が、著者にとっては、まず驚きだったのである。

このような例、急始と本体との時間間隔が24時間ほど長引く例は、前例がないわけでもない。起こってみれば、一旦は納得である。しかし、2度目の磁気嵐発生を見て、著者は本当に困惑していた。全く予想外だったのである。おそらく世界中の宇宙天気予報のプロたちも、スペースX社の担当者も、著者と同様に「一度目のサブライズ磁気嵐は終了したのに、なぜ再び磁気嵐が？」と心底、驚いたのではないだろうか。このような騙しのきかないスリリングな感覚は、リアルタイムで観測データを普段からエンジョイしている宇宙天気マニアでないと共感して頂けないことかもしれないが。

さて、スペースX社の宇宙天気予報担当者を困惑させた、この2度目の磁気嵐を起こした原因は、著者たちの事後解析によれば、「微妙な見え方で、とても見つけにくい」2段階のコロナ質量放出だったのであり、1度目の、急始から一日遅れの磁気嵐の原因も、「地球に当たるか当たらないか微妙な方向へ飛んだコロナ質量放出の脇腹を地球がかすった」ことが原因であったと考えられる[19]。これらはいずれも、大規模な磁気嵐では殆ど問題にならないような微妙なセッティングである。

近年、コロナ質量放出の生成や伝搬を物理的に計算するシミュレーションは高性能化しており、大規模な宇宙天気イベントの事後解析であれば、実際の観測データと、あらかた整合するような結果も得られている。しかし、従来であれば気にしなかったレベルのスターリンク・イベントのような、中途半端な規模の太陽フレア活動、コロナ質量放出、磁気嵐を、それぞれ詳細に見ていくと、宇宙天気予報の物理シミュレーションに入力する情報抽

出も、シミュレーションの解像度も、まだまだ足りないこともまた、事実なのである。

以上、人間の宇宙利用が高度化し続けており、宇宙環境の微妙な変化にまで、敏感になりつつある、という一例を紹介した。パンデミックの最中であった2022年は、それほど詳細かつ正確な宇宙天気環境の理解と、宇宙天気予報が必要な時代に突入した、ともいえるのではないだろうか。

参考文献

- [1] B. Tsurutani *et al.*, *J. Geophys. Res.* **108**, 1268 (2003).
- [2] R. Kataoka, *Space Weather* **11**, 1 (2013).
- [3] S. Ohtani, *J. Geophys. Res. Space Phys.* **127**, e2022JA030596 (2022).
- [4] R. Kataoka, *Eearth Planets, and Space* **72**, 124 (2020).
- [5] R. Kataoka and K. Iwahashi, *Space Weather* **15**, 1314 (2017).
- [6] R. Kataoka *et al.*, *Space Weather* **15**, 392 (2017).
- [7] H. Miyahara *et al.*, *Earth Planet Sci. Lett.* **272**, 290 (2008).
- [8] R. Kataoka and S. Nakano, *J. Space Weather Space Clim.*, **11**, 46 (2021).
- [9] 片岡龍峰 他：総研大文化科学研究 **16**, 17 (2020).
- [10] D. Knipp *et al.*, *J. Space Weather Space Clim.* **11**, 29 (2021).
- [11] T.P. O'Brien *et al.*, *J. Geophys. Res.* **105**, 7707 (2000).
- [12] K. Keika *et al.*, *Earth Planets, and Space* **67**, 65 (2015).
- [13] R. Kataoka *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **42**, 5155 (2015).
- [14] D. Shiota and R. Kataoka, *Space Weather* **14**, 56 (2016).
- [15] R. Kataoka and S. Nakano, *Geophys. Res. Lett.* **48**, e2021GL096275 (2021).
- [16] G. Tanaka *et al.*, *Phys. Rev. Res.* **4**, L032014 (2022).
- [17] R. Kataoka *et al.*, *Earth Planets, Space* **75**, 139 (2023).
- [18] R. Kataoka *et al.*, *J. Space Weather Space Clim.* **12**, 41 (2022).



かた おかりゅうほう
片岡龍峰

情報・システム研究機構 国立極地研究所 先端研究推進系 宙空圏研究グループ・准教授。主な研究分野は、宇宙空間物理学、特にオーロラや磁気嵐。著書に『オーロラ!』、『宇宙災害』、『日本に現れたオーロラの謎』、『Extreme Space Weather』などがある。