

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

Social Infrastructure Protection and Damage Prediction Based on Space Weather Research

1. はじめに

1. Introduction

草野 完也, 三好 由純, 中村 紗都子*

KUSANO Kanya, MIYOSHI Yoshizumi and NAKAMURA Satoko¹

名古屋大学宇宙地球環境研究所

(原稿受付: 2024年2月18日)

宇宙天気とは地球と社会に影響を与える様々な宇宙環境変動現象を意味する。宇宙天気の乱れは電力・通信・測位・航空・人工衛星・宇宙における人間活動などに様々な障害をもたらすため、現代社会における潜在的なリスクでもある。特に、大規模な太陽フレアに伴う宇宙天気現象は文明の発展と共に被害が拡大する「文明進化型災害」を生み出す可能性がある。本講座では宇宙天気の社会影響とそれを軽減するための宇宙天気予報の取り組みについて多角的に解説する。

Keywords:

space weather, geomagnetic storm, solar flares, coronal mass ejections, the Carrington event, disasters with civilization's evolution

地球上の生命と文明は太陽がもたらす黒体放射のエネルギーによって生まれ、進化し、発展してきた。地球環境と人類にとって太陽は不可欠な天体である。太陽はまた100万度の高温プラズマからなるコロナ（太陽大気）を有しており、その膨張加速の結果として太陽系の外縁まで到達する太陽風を生み出している。太陽風は太陽から約100天文単位の距離まで超音速で流れ出しており、太陽系の全ての惑星はその影響を免れることができない。平均公転半径が1天文単位である地球はこの太陽が生み出す高温プラズマのバブル、すなわち「太陽圏」の奥深く、太陽のすぐそばに位置しているのである。それ故、太陽活動は地球に多様な影響を与える。

英国のキャリントンとホジソンはそれぞれ独立に1859年9月1日11:18 UTから5分間、太陽黒点領域の一部が明るく輝く現象を目撃し、特異な太陽現象として報告した[1, 2]。太陽で起きる巨大な爆発現象である太陽フレア

の発見である。さらに、その日から翌日にかけて、それまでに無い大きな地磁気の変動（磁気嵐）が起きると共に[3]、パナマや日本など磁気緯度の低い地域でもオーロラが見られた記録が残っている[4, 5]。「キャリントン・イベント」と呼ばれるこれらの一連の事象は、太陽が光の放射以外にも地球に影響を与えることを物語っている。

太陽フレアは太陽磁場が持つエネルギーが突発的にプラズマの運動エネルギーや熱エネルギーに変換される現象である。その結果、電波からガンマ線に至る様々な波長の強力な電磁波が放射される。また、keVからGeVに至る高エネルギー粒子（太陽高エネルギー粒子：SEP）が生成され、惑星間空間に放出される場合がある。さらに、大量の太陽コロナプラズマが磁場を伴って惑星間空間へ放出されるコロナ質量放出（CME）もしばしば発生する。

太陽フレアやCMEが発生しない場合でも、太陽風は太陽表面の磁場構造と共に様々に変動する。特に、コロナ

* 2023年7月逝去

Institute for Space-Earth Environmental Research (ISEE), Nagoya University, Nagoya, AICHI 464-8601, Japan

corresponding author's e-mail: kusano@nagoya-u.jp

からのX線放射が極端に少ないコロナホールと呼ばれる領域からは、高速高温の太陽風が吹き出している。この高速太陽風が周辺の低速の太陽風と接触することで、回転接触領域（CIR）と呼ばれる領域を作り出す。

これらはいずれも地球に到達すると、地球の電磁環境や放射線、粒子環境を大きく乱す。それにより、現代社会を支える電力供給、通信・測位、航空機・列車の運航、人工衛星の運用に様々な障害が発生する場合がある（図1）。実際に1989年には太陽フレアに伴うCMEを原因とした磁気嵐の影響によって、カナダのケベック州で大停電が発生し、その影響は北アメリカ大陸全体に拡大した[6]。また、適切な措置を取らなければ宇宙飛行士の被曝量を増大させる危険もある。人工衛星の障害もしばしば発生しており、2003年に起きたハロウィン磁気嵐では、ヴァン・アレン帯の粒子やオーロラ粒子によって我が国の「みどり」衛星など、複数の人工衛星が損傷、機能不全を起こした。さらに、最近では2023年の磁気嵐時に、超高層大気の変動によって、スターリング衛星40機が軌道投入に失敗し、失われるなど様々な影響が生じている。このように人間社会に影響を与える宇宙環境の変動を気象現象になぞらえて「宇宙天気（space weather）」と呼ぶ。

宇宙天気に関する学術研究は近年、急速に拡大している。Web of Scienceでの検索によるとタイトルまたはアブストラクトに“space weather”を含む学術論文の出版数は2000年以前には年に20～40編程度であったが、その後急増し、昨年（2023年）には約500編の論文が出版されている。こうした背景には、文明の急速な発展と宇宙開発の進展がある。インターネットや携帯電話網は現代社会を支える最も重要なインフラである。また、衛星による地球観測は防災の要であり、GPSなどの衛星測位システムは生活に不可欠となっている。そうした状況のなかで、宇宙に関連した民間事業は急増しており、宇宙産業は今後さらに拡大すると考えられている。月の有人計画も着実に進んでおり、火星有人探査も将来実現するであろう。人類の生存圏が地球を超えて大きく広がりつつある今、宇宙天気の変動が過去には考えられなかった新たな影響を我々の社会にもたらすと考えられている。

「キャリントン・イベント」は19世紀末に普及しつつあった電信網の一部に障害を与えたことが記録されているが、その社会影響は極めて限定的であった。しかし、現代に

おいて同等の事象が発生したならば、その社会影響と経済被害は甚大なものになると考えられる[7,8]。すなわち、宇宙天気による社会影響は文明の発達と共に拡大するという意味で宇宙天気現象は、「文明進化的災害」を引き起こす潜在的なリスクであると言える。「キャリントン・イベント」規模の宇宙天気擾乱現象はその後発生していない。しかし、2012年に「キャリントン・イベント」と同等規模のCMEが放出されていたことが、衛星観測によって確認されている[9]。幸いにも、その際のCMEは地球に対して太陽の裏面に放出されたため、偶然にも地球への影響を無かったが、同様のCMEは今後も繰り返し発生するであろう。

キャリントンらによるフレアの発見以前には、太陽面爆発を直接観測した記録は存在しない。ただし、フレアやCMEに伴って地球に到達する太陽高エネルギー粒子は、地球大気中で核反応によって炭素同位体 ^{14}C を生成するため、樹木年輪に含まれる ^{14}C から過去の太陽フレア活動を推測することができる。三宅らはこの方法によって西暦774年から775年にかけて ^{14}C が急増する現象を発見した[10]。検討の結果、その原因は恐らく太陽フレアと考えられており、その規模は1859年のキャリントン・フレアの10倍を超えるエネルギーを放出した可能性がある。そうした巨大フレアは極端な宇宙天気現象によって人類がこれまでに経験したことのない惑星規模の甚大な災害を引き起こす可能性がある[11]。

こうした宇宙天気災害の想定を科学的に明らかにするとともに、その被害を軽減するために宇宙天気予報（space weather forecast）の精度と信頼性を高めることが求められている。そのための取り組みが各国国際機関や各国で進められている。我が国でも宇宙天気の科学研究と宇宙天気予報運用の相乗的な発展をめざした文部科学省新学術領域研究「太陽地球圏環境予測：我々が生きる宇宙の理解とその変動に対応する社会基盤の形成（平成27～31年度、領域代表：草野完也）」が進められた[12]。その成果は文献[13]にまとめられている。さらに、令和4年度には総務省が「宇宙天気予報の高度化の在り方に関する検討会」報告書を取りまとめ、公開した[14]。これらは今後の我が国における宇宙天気影響に対する社会対応と予報技術の研究開発の指針となるものである。

前述したように宇宙天気は太陽と宇宙空間と地球が一体となって発生するプラズマ現象であると同時に人間社会に直結した自然現象でもある。そこで本講座では宇宙天気研究の現状と課題を概観すると共に、宇宙天気による人工衛星、航空機、通信、送電への影響を解説する。磁気嵐と太陽面爆発の予測研究の最前線についても紹介する。各章のタイトルと著者は以下の通りである。

1. はじめに（草野完也，三好由純，中村紗都子）
2. 宇宙天気予報の動向（石井守）
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～（片岡龍峰）
4. 航空機被ばく（佐藤達彦，久保勇樹）



図1 宇宙天気現象と様々な社会影響。

5. 電波・測位障害 (斎藤享, 津川卓也)
6. 送電網に対する太陽活動の影響 (海老原祐輔, 亘慎一)
7. 磁気嵐の予測 (三好由純)
8. 宇宙飛翔体および有人宇宙活動への宇宙放射線影響 (永松愛子)
9. 太陽面爆発現象の予測 (草野完也)

本稿が宇宙天気研究とその社会的役割に関する理解の一助となれば幸いである。なお、本講座は2023年7月に逝去された中村紗都子氏を中心として企画・構成されたものである。

参考文献

- [1] R.C. Carrington, Mon. Not. R. Astron. Soc. **20**, 13 (1859).
- [2] R. Hodgson R, Mon. Not. R. Astron. Soc. **20**, 15 (1859).
- [3] B.T. Tsurutani *et al.*, J. Geophys. Res.: Space Phys. **108**, 1268 (2003).
- [4] J.L. Green and S. Boardsen, Adv. Space Res. **38**, 130 (2006).
- [5] H. Hayakawa *et al.*, Space Weather. **17**, 1553 (2019).
- [6] D.H. Boteler, Space Weather. **17**, 1427 (2019).
- [7] H. Schulte in den Bäumen *et al.*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. **14**, 2749 (2014).
- [8] C.J. Schrijver, Space Weather. **13**, 524 (2015).
- [9] D.N. Baker *et al.*, Space Weather. **11**, 585 (2013).
- [10] F. Miyake *et al.*, Nature. **486**, 240 (2012).
- [11] E.W. Cliver *et al.*, Living Reviews in Solar Physics. **19**, 1, article id.2 (2022).
- [12] K. Kusano, Earth Planets Space. **73**, 1 (2021).
- [13] K. Kusano ed., Solar-Terrestrial Environmental Prediction, Springer-Nature (2023).
- [14] 総務省「宇宙天気予報の高度化の在り方に関する検討会報告書」
https://www.soumu.go.jp/main_content/000821116.pdf



くさ の かん や
草野 完也

名古屋大学宇宙地球環境研究所・教授。北海道室蘭市出身。理学博士。広島大学、海洋研究開発機構を経て、2009年より名古屋大学教授。2017年より2022年まで名古屋大学宇宙地球環境研究所所長。主たる研究分野は太陽物理学、プラズマ物理学、計算物理学、宇宙天気・宇宙気候、雲微物理など。家族は妻と二男一女。妻の草野理恵子は詩人、長男の草野原々はSF作家として活躍中。趣味は山歩き、トランペット演奏など。



み よし よし ずみ
三好 由純

名古屋大学宇宙地球環境研究所統合データサイエンスセンター センター長・教授。太陽圏システム科学、宇宙天気を専門とし、オーロラや、波動粒子相互作用などの研究を衛星・地上観測、シミュレーションによって進めています。また、データ同化や機械学習を用いた宇宙天気予報の研究も行っています。ジオスペース探査あらせ衛星のプロジェクトサイエンティストをつとめるとともに、「あらせ」衛星、水星探査「みお」衛星のサイエンスセンターマネージャーとしても従事しています。最近では、月面における放射線計測の開発にも従事しています。



なか むら さ と こ
中村 紗都子

2016年京都大学大学院理学研究科を修了後、京都大学生存圏研究所特任助教、名古屋大学宇宙地球環境研究所特任助教等を経て、2023年より名古屋大学宇宙地球環境研究所特任准教授。非線形波動粒子相互作用に関する研究で多くの成果を上げるとともに、日本における地磁気誘導電流研究 (GIC) のパイオニアの一人としてGIC研究でも新たな成果を創出し、地球電磁気・地球惑星圏学会 大林奨励賞、笹川科学研究奨励賞をはじめ多くの賞を受賞。今後のわが国の宇宙空間物理学、宇宙天気研究を牽引する若手として活躍が期待されていましたが、2023年夏に急逝されました。