

宇宙の嵐を正確に予報する新システム

岩井 一正
Iwai Kazumasa

1. はじめに

「宇宙空間」と聞いて多くの人々は真空な空間が、どこまでも広がっているようなイメージを浮かべるかもしれないが、それは厳密には誤解である。実は、宇宙は完全な真空ではない。そこは極めて希薄ではあるが電子やイオンに電離した粒子によって満たされ、それらが秒速数百 km もの超高速な風となって常に吹き荒れるダイナミックな世界が広がっている。

太陽系内で吹く風を作っているのは、太陽である。太陽の大気「コロナ」は 100 万℃もの高温で、大気を構成する粒子は電子とイオンに電離したプラズマ状態になっている。その大気の一部は太陽の重力を振り切り宇宙空間へ超音速の風となって流れ出ている。これを「太陽風」と呼ぶ。太陽風は秒速 300 km から秒速 800 km 程度まで時々刻々と変化しながら地球にも常に吹き付けている。それに加えて、太陽では爆発現象「太陽フレア」が発生し、太陽大気の一部が周辺の磁場構造と一緒に塊として宇宙空間に向けて吹き飛ばされる。この塊は地球に到来すると地球周辺環境に擾乱をもたらし、電波通信、人工衛星の運用、航空機の航行、GPS 測位等、社会生活に様々な影響を与えることがある。宇宙空間の利用が年々広まり、更には宇宙旅行まで計画されるようになった現代においては、この太陽によって引き起こされる宇宙の嵐「太陽嵐」の到来を事前に予報することが極めて重要になってきた。

太陽表面で起きるフレアや発生直後の太陽嵐は高密度で明るく、X 線から電波までの様々な波長で観測される（図 1）。一方、太陽から遠く離れた宇宙空間を伝搬中の太陽嵐は希薄で、それ自体の発光を

捉えることは難しい。太陽嵐は定常的に宇宙空間を流れる太陽風と相互作用することで時々刻々と加速・減速しながら伝搬するが、残念ながらそのメカニズムは詳しく解明されていない。そのため太陽近傍の観測から得られた初期速度を使って太陽嵐の伝搬を外挿し、地球への到来時刻を予想する既存の予報手法では、10 時間以上の誤差が生じている。太陽嵐は地球の台風にも例えられることもあるが、もし、到達まで 10 時間もあって思っていた台風の暴風域にいきなり入ったら、更にそこが避難所も何もない宇宙空間であつたら、大変なことになると思ってしまうだろうか。本稿では、その予報を正確に

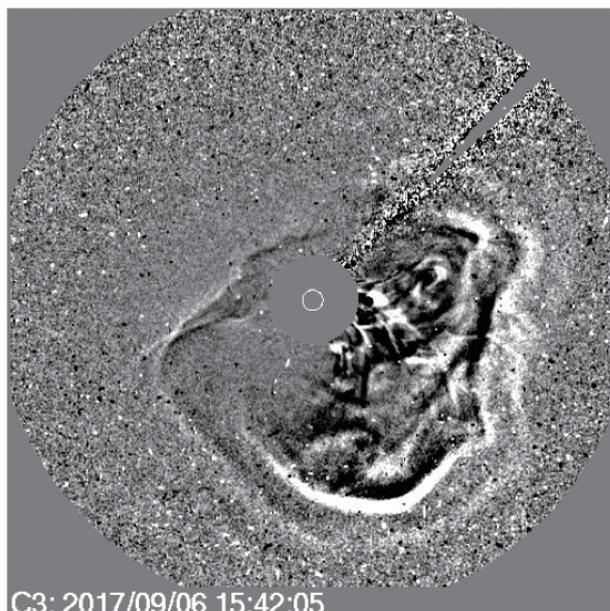


図 1 太陽嵐の観測例

白色光で観測した太陽近傍。左下に展開する円弧状の構造が放出直後の太陽嵐。中心の白丸が太陽に対応する領域で、太陽からの強い光を遮るために周辺はマスクで隠されている



図2 名古屋大学宇宙環境研究所豊川分室（愛知県豊川市）にあるIPS観測用の大型電波望遠鏡

行うための新しいシステムを紹介する¹⁾。

2. 太陽嵐の地上電波観測

名古屋大学宇宙地球環境研究所（ISEE）では独自に開発した大型電波望遠鏡（図2）を用いた電波観測から、太陽風や太陽嵐の観測を行っている²⁾。図2の写真では電波望遠鏡とは分かりにくいかもしれない。実際は曲線を描く鉄柱と鉄柱の間には約2,000本のステンレスできた細いワイヤーが3cm間隔でびっしりと張りめぐらされている。この望遠鏡で観測する周波数は327MHz、波長にして約92cmなので、3cm間隔のワイヤーで十分に電波を反射することができる。全体の構造はシリンダカルパラボラアンテナと呼ばれる形状をしている。これは放物線を金太郎飴のように奥行き方向に伸ばしたものである。放物線は平行に入射した電波を1箇所の焦点に向けて反射する。放物線の焦点には192本ものダイポールアンテナがやはり奥行き方向に並んで配置されている（図3）。それぞれのダイポールアンテナが受信した信号が強め合うように位相を揃えて合成することで、1台の望遠鏡として機能させる、いわゆるフェーズドアレイ方式の望遠鏡である。信号の合成方法を変えるだけで、位相の揃う方向が変わるため、アンテナを動かさなくても異なる方向の天体を観測できるという利点がある。図2のアンテナの大きさは約100m×40mもあり、国内にある電波天文観測用の望遠鏡としては最大級の規模である。



図3 焦点に並ぶダイポールアンテナと反射面

左上に奥行き方向に並んでいるのがダイポールアンテナ。右下に見える曲線が放物線の形状をしており、その奥行き方向に多数の細いステンレス線が張られているのが見える

太陽嵐は希薄で、それ自体が放射する電波を地上から観測することは難しい。そこで図2の電波望遠鏡を用いて太陽系外の天体（例えばクエーサーと呼ばれる電波を放射する銀河）を観測する。その観測中に太陽風や太陽嵐が天体と地球との間を横切ると、天体からの電波を散乱する。特に太陽嵐は周辺の太陽風よりも強く電波を散乱する特徴がある。そのため、ある天体を電波で観測中に、その電波強度が激しく変動すれば（＝瞬けば）、電波を強く散乱する媒質、つまり太陽嵐が地球と天体の間を横切っていることが分かる（図4）。この電波での瞬き現象を惑星間空間シンチレーション（Interplanetary scintillation: IPS）と呼ぶ。夜空の星が瞬いて見えるのは、地球の大気が可視光を散乱するからだ、それと類似の現象が電波の波長では宇宙空間で発生しているのである。

3. 太陽嵐の数値シミュレーション

太陽嵐や背景を流れる太陽風は磁気を帯びた電離大気であり、その運動は磁気流体方程式を数値的に解くことで予想することができる。現在は、太陽を中心に3次元的に広がる宇宙空間を模したシミュレーション空間の内側境界に、太陽風や太陽嵐を模した構造を入れ、外側への伝搬を解くのが主流で、近年世界各国で開発が進んでいる。本研究で用いるシミュレーションモデルはSUSANOO-CME³⁾という日本で開発されたモデルである。このシミュレーショ

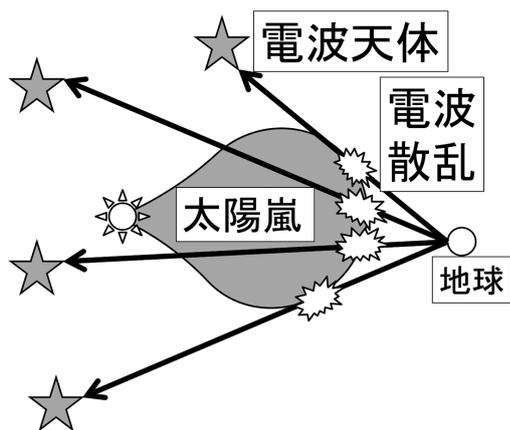


図4 IPS観測によって太陽嵐の接近を検出する模式図

観測対象である電波天体と地球との間を太陽嵐が通過すると、天体からの電波が散乱されることを図示している

ンでも、内側境界から太陽風を模したプラズマが流れ出しているが、加えて、太陽嵐を模擬したプラズマと磁場構造の塊を任意の場所に任意の初期速度で放出でき、太陽嵐の予報に有効なモデルと言える。

4. 観測と数値シミュレーションの融合

太陽嵐の観測データを用いて、どのようにして予報精度を上げるか。その鍵はデータ同化と呼ばれる手法にある。3次元の磁気流体方程式からは太陽嵐によって時々刻々と変化する宇宙空間の密度分布が得られる。一方、電波の散乱の度合は、地球から各電波天体への視線に沿った密度分布等をもとに理論的に計算することができる。つまり、磁気流体シミュレーションから得られた宇宙空間の密度分布を用いて、地球から様々な方向へ向かって電波の散乱を計算すれば、擬似的なIPSデータが再現されるのである。そこで、太陽嵐の発生を察知したら、あらかじめ様々な初期速度を持つ太陽嵐を用いて磁気流体計算を行い、それぞれの計算結果から擬似IPSデータを計算しておく。実際の太陽嵐は、やがて電波天体と地球の間を通過し、天体からの電波を散乱する。このとき観測されたIPSデータの分布と、あらかじめ計算してある多数の擬似的なIPSデータの分布とを比較する(図5)。IPSが強く反応する領域の分布が最も近い結果から予想される太陽嵐の到来時刻は、太陽近傍の観測だけから外挿するものに比べて精度が高いと期待される。

この予報システムを検証するために、2017年9月に発生した、近年で最大規模の太陽フレアに伴う太陽嵐に対して予報実験を行った。その結果、実際のIPS観測に最も近い擬似IPSデータを生成するシミュレーションが、太陽嵐の地球への到来を最もよく予報できた。この結果は、IPSデータを用いることで太陽嵐の予報精度を向上させることが可能であることを意味する。

5. 宇宙天気予報への応用

宇宙空間では太陽嵐の他にも、太陽フレアによって発生するX線や紫外線の放射、太陽や太陽系外から飛来する高エネルギーな放射線、太陽嵐の影響を受けて地球周辺で生成される高エネルギーな放射線等、人類の活動に対して脅威となる自然現象が多数存在する。これらの発生を予報し、防災・減災につなげることは、地球の天気予報のように重要になる。このことを「宇宙天気予報」と呼び、現在では世界各国で公的機関が業務的に予報を行っている。日本では(国研)情報通信研究機構(NICT)が、宇宙天気予報業務を担っている。今回開発した予報シミュレーションは、NICTの予報システムに導入することを目標に作られており、その一部は既に導入され、定常的に運用が開始されている。現在、予報シミュレーション全体の実装作業も着々と進められている。

名古屋大学が行うIPS観測は非常に信頼性が高く、1年を通じてほぼ毎日観測データが得られる。そのデータは観測後すぐに研究室のWebページ⁴⁾を通じて全世界に公開され、日本だけでなく、海外の研究機関・宇宙天気予報機関でも利用されている。

6. さらなる太陽圏探査へ

最後に、本稿では紹介できなかったIPS観測や今後の展望について紹介したい。名古屋大学のIPS観測用望遠鏡は1980年代に開発・運用が始まった。そもそもの目的は、太陽風や太陽嵐が、どうしてできるのか、どうして加速されるのか、11年周期で変動する太陽活動とどのように関係しているのか、将来どう変化するのか、といった宇宙空間物理学の根源的な問題に迫るためであり、これまでに主に基

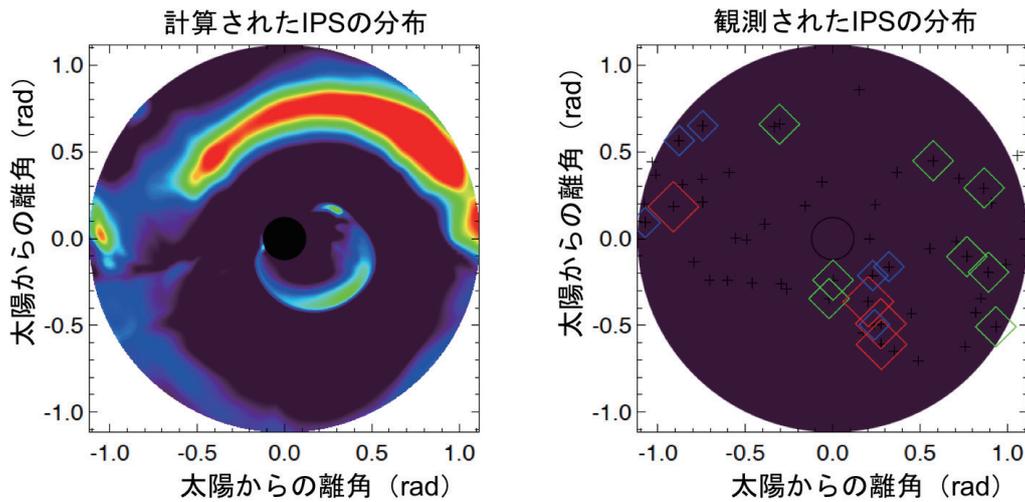


図5 シミュレーションと観測で得られたIPSの分布の比較

左：本研究で開発した予報システムによって計算された擬似IPSデータの分布。色が青から赤になるほど強いIPS反応が予想される。右：名古屋大学ISEEによって実際に観測されたIPSデータの分布。◇はIPSが観測された天体の位置を示し、その色が青く緑く赤の順に強いIPS反応があったことを意味する。両図の座標は太陽からの離角（見かけ上何度離れているか）をラジアンで表示したもので、中心付近の黒い円がおおよそ図1の画像の視野に対応し、IPS観測の視野の広さが分かる

礎研究において成果を上げてきた⁵⁾。今回のプロジェクトは基礎研究を行う大学と現業の予報機関が相補的に協力することで、効率的に新しいシステムを作った点がポイントである。

実は太陽風や太陽嵐は、そもそもどうしてできるのかといった根本的な部分すらまだ完全には理解されていない。そのため、欧米を中心に世界各国が太陽近傍まで接近する大型探査機計画を推進する等、近年、非常に活発に研究されている分野である。また、我々も、より詳細にIPS観測データを取得すべく新型望遠鏡の開発を進めている。これらの観測装置や今回開発したシミュレーションシステム等を用いて、太陽風や太陽嵐が織りなす世界「太陽圏」の理解がより深まることが期待される。

謝辞

本研究は新学術領域「太陽地球圏環境予測」の一環として実施され、名古屋大学宇宙地球環境研究所、情報通信研究機構の協力のもと、以下の科研費からの支援を受けました（18H04442、15H05813、15H05814）。

参考文献

- 1) Iwai, K., *et al.*, *Earth, Planets and Space*, **71**, 39 (2019)
- 2) Tokumaru, M., *et al.*, *Radio Science*, **46**, RS0F02 (2011)
- 3) Shiota, D., *et al.*, *Space Weather*, **14**, 56-75 (2016)
- 4) 名古屋大学宇宙地球環境研究所, 太陽圏研究部
http://stsw1.isee.nagoya-u.ac.jp/ips_data.html
- 5) Kojima, M., *et al.*, *J Geophys. Res.*, **103**, 1981-1989 (1998)

(名古屋大学 宇宙地球環境研究所)