

月と火星の宇宙天気予報 — 太陽活動予測の視点から —

小原 隆博

(東北大学大学院理学研究科)

大気と磁場を持たない「月」、磁場を持たない「火星」の宇宙天気予報は、大気と磁場の両方を持つ「地球」の宇宙天気予報とは、異なった性格を有している。ここでは、太陽からの放射線（X線、高エネルギー粒子）が最大の懸念であるが、太陽から放出されるコロナ大気の塊（CME）についても注意を払う必要がある。本稿では、月と火星の宇宙天気予報について概説を行う。

1. 序

地球を取り巻く宇宙空間には、薄くなった地球大気と地球に起源を持つ電離大気（プラズマ）が存在する。また、地球は、固有の磁場を有しており、磁力線は宇宙空間に向かって伸びている。この磁力線が、外から来たプラズマや宇宙放射線を補足することになり、宇宙環境は、起源を異にするプラズマと放射線粒子から構成されている。宇宙空間を飛翔する宇宙機（人工衛星）そして宇宙飛行士は、時に宇宙環境から悪い影響を受けることがある。宇宙天気という呼び名は、悪影響を与える宇宙環境の変動に対して用いられている言葉である。

この宇宙天気は、いくつかのカテゴリーに分類される。第1は太陽である。第2は地球磁気圏である。そして、第3は、電離圏である。しかし、大気と磁場を持たない月や磁場を持たない火星の宇宙天気は、大気と磁場の両方を持つ地球の宇宙天気予報とは、異なった性格を有して

いる。ここでは、太陽からの放射線（X線、高エネルギー粒子）が最初の懸念であるが、太陽から放出されるコロナ大気の塊（CME）についても、注意を払う必要がある。そして、火星に於いては、大気を有している事から、電離層が形成されている。太陽からのX線や紫外線の増加が電離を促進し、CMEに伴う衝撃波は、火星電離層に擾乱を引き起こす。以下では、月と火星の宇宙天気予報を念頭に、太陽放射線、CME、そして電離層の順で述べていく。

2. 太陽活動

太陽には、よく知られたように強い磁場が存在し、それらは、11年の周期性を持って太陽表面に出現する。黒点として知られるこの磁場構造は、複雑なプロセスを経てエネルギーを解放する。太陽フレアである。黒点と太陽フレアは、11年の周期で発生数が変化するが、最も多く発生する時期を太陽活動極大期、ほとんど発生しない時期を太陽活動極小期と

呼んでいる。この太陽フレアが、月と火星の宇宙天気において最大の懸念であり、ここから放出されるX線、放射線粒子は、宇宙活動における大きな脅威である。また、太陽フレアに伴って、周囲のコロナガス（プラズマ）が、大量に惑星間空間に放出される。コロナ質量放出（CME）と呼ばれるこの現象は、地球からも観察されるが、放出後2日程度で、地球に到達し、磁気嵐と呼ばれる地球規模の嵐を発生させる。太陽表面には、コロナの穴（コロナホール）と呼ばれる領域が広がっていて、ここからは、速い速度の太陽風（プラズマの流れ）が吹き出している。この高速太陽風が地球に達すると、地球では、やはりCMEと同じような磁気嵐が発生する。太陽風は、惑星間空間を飛翔する宇宙機や、地上からも観測されている。

3. 電離層の擾乱

序で述べた宇宙天気のカテゴリーの最後が、電離圏であった。電離圏は太陽からの紫外線やX線によって形成される電波を反射する層の総称であるが、太陽フレアの発生に伴って、火星に於いても急速に形成が進む。また、電離層のもう一つの特徴として、中性大気との相互作用により、密度を大きく変化させる事があり、地球では電離圏嵐として知られている。また、嵐の直後には、電離層の中に不規則構造が発生し、通信に障害を及ぼす。電波伝搬環境の著しい悪化は、人工衛星本体の異常や、宇宙飛行士の被曝と並んで、宇宙天気の大きな懸念の一つである。

4. 月と火星での宇宙天気リスク

月での宇宙天気の最大のリスクは、間違いなく宇宙放射線である。放射線は生物にとって非常な脅威であるが、宇宙空間は、多量の放射線で満ち溢れている世界である。1972年8月4日に、史上最大級の太陽放射線が発生し、地球周辺はその影響を受けた。1972年8月は、アポロ16号と17号の間の時期で、月面には宇宙飛行士は誰もいなかったが、その後の検討の結果、宇宙飛行士が船内にいたとしても、生涯被曝制限値に達する放射線を浴びたほどの、強い太陽放射線であった。

人工衛星に目を転じてみると、ここにも、宇宙天気によるリスクがある。その一つが、太陽電池の、太陽放射線による劣化である。非常に大量の太陽放射線（陽子）が太陽電池セルに照射すると、セルの結晶構造に欠陥が生じて、発生電力が低下する。1994年にアポジモータの故障で、きく6号は遷移軌道に入ったが、カバーガラスなどの対策が無かったので、2年間で発生電力は1/3にまで下がり、機能が停止した。また、放射線の影響は、半導体デバイスに損傷を与え、リーク（漏れ）電流などが増大し、永久故障に至ることがある。これらは、いずれも時間的な蓄積であるが、非常に短い時間で発生する現象もある。シングルイベントと呼ばれている現象が代表例であるが、高エネルギーの陽子、重イオン、中性子

の照射により、電子部品が動作不良を起こす。

火星に於いても、宇宙放射線のリスクは大きい。これは、地球に於ける人工衛星や宇宙ステーションが受けるリスクと同じである。そして、電離層においても、リスクがある。大きな太陽フレアが発生すると、大量のX線が放射されるが、この影響で、地球の場合は、高度80 km領域の大気が電離を起こす。ここでの特徴は電子と中性大気との衝突が大きい事である。この衝突の影響で300 kHzから3 MHzの、いわゆる中波帯の電波が減衰し、通信が途絶える。この現象は発見者の名前をとってデリンジャー現象と呼ばれている。中波通信にとって、太陽フレアは、通信障害を起こす原因である。火星に於いては、観測が少ないことから、電離層のリスクについての知見は不足しているが、将来の火星表面活動に於いては、懸念事項であると言える。

5. 宇宙天気災害の防止

宇宙天気災害防止に向けて取り組まれている2つの試みについて、現状をまとめる。一つは、天気環境の突然の変化を予報しようとする試み（宇宙天気予報）で、もう一つは、事前に宇宙環境対策を行おうとする設計基準（衛星設計標準）の策定である。

5. 1 宇宙天気予報

宇宙天気予報を実現するためには、1) 定常観測、2) モデル研究、3) 予報ツール開発が必要であるが、最初に観測の現状から説明する。

1) 定常観測

太陽の観測は、地球（地上）からの観測と、宇宙（スペース）からの観測に分けられるが、最初に地上からの観測について述べる。太陽を観測する望遠鏡は、公共天文台も入れると世界で相当数になり、可視光を中心にして連続的に監視・観測されている。太陽黒点など活動領域のモニターには、波長は6553 Åの可視光が広く用いられている。H α 線と呼ばれるこの光は、水素原子の出す光で、太陽光球を薄く取り囲む彩層と呼ばれる領域から主に発せられ、活動領域、フレア、フィラメント、そして、外縁部のプロミネンスなどが観測される。宇宙天氣的に、最も重要なのが、フレアであるが、黒点などの活動領域が突然明るくなる。この時、上空のコロナ領域では激しいエネルギー解放が起こり、X線などの放射、高エネルギー放射線粒子が発生している。フィラメントは、太陽光球上空の彩層にあった濃いプラズマが上方のコロナに持ち上げられた構造で、黒い筋のように地球から見える。このフィラメントが、太陽のリム（淵）に移動したのが、プロミネンスで、火山の爆発のように周囲に向かって伸びている様子が、地球から見られる。このフィラメント（プロミネンス）が、外に向かって飛び出すことがある。フィラメント消失と呼ばれる現象である。太陽望遠鏡は、広い範囲をモニタ

一するとともに、活動領域を高解像度で観測する。世界では、CHAIN (Continuous H-alpha Imaging Network) プロジェクトと呼ばれる研究用のH α 望遠鏡ネットワークが出来ているが、世界の主だったH α 望遠鏡が参加している。こうした取り組みで、太陽の全面像が、リアルタイムで連続的にとられている。

太陽黒点は強い磁場を持っている。磁場のひずみが上方に展開するコロナ領域に伝わり、コロナ中の磁場がある限界を越えると、フレアを起こすと考えられている。よって、磁場のひずみの観測が重要で、マグネトグラフと呼ばれる太陽観測が世界で行われている。これらを有機的に結合することで、太陽黒点磁場の連続観測が可能になる。

太陽を電波で観測する試みも、続けられている。太陽からの地上に届く電波は、波長1mmから30m程度で、それ以上の長い波長は、電離層で遮断される。電波を発射しているのは、光球上空のプラズマで、領域としては、彩層、コロナである。太陽フレアの発生に伴って、様々な周波数(波長)で強い電波が出ることが知られているが、これらは太陽コロナ中で、磁場エネルギーの解放によって発生するものである。これまでの研究によって、太陽電波は、大きく5つに分類されていて、それぞれについて、発生機構が提唱されているが、共通して言える事は、太陽フレアによって生成された高いエネルギーの電子が、磁場に巻き付いて電波を発射させている描像である。一方、

太陽電波を面的に観測する試みも行われているが、このためには、多数の太陽電波望遠鏡が必要で、例えば80機以上の望遠鏡を東西南北に並べて、太陽電波を面的に観測している。太陽ヘリオグラフと呼んでいるが、観測周波数は、17GHz、34GHzと非常に高い。この装置で太陽電波を観測すると、放射域が外に向かって移動している様子が明らかになり、太陽フレアに伴ってコロナガスが、周囲に向かって飛び出している事が分かる。太陽からの脅威として、先に述べたように、高エネルギー粒子(太陽放射線粒子)の発生がある。太陽放射線の発生は、太陽フレアの大きさに関係があるといわれているが、近年になって、太陽コロナガスが周囲に向かって飛び出していく現象(CME)が、人工衛星によって見いだされ、この現象と、太陽放射線の発生が強い関係があることが明らかになって来ている。

次に宇宙からの太陽観測の現状について、述べていく。宇宙時代になって、数十年。NASA衛星、スカイラボ、そして、各国の太陽観測衛星による太陽観測はめざましく、現在も、Hinode、SOHO、STEREO、TRACE、SDO、REHSSIなどが稼働している。大気の影響のない宇宙空間では、精度のよい可視光観測、軟X線、硬X線、紫外線などの観測も行われ、新しい太陽像が得られている。地上から限界があった空間分解能は、宇宙からの観測で飛躍的に向上した。衛星による高精度観測の結果、黒点に代表される活動領域の全体像と詳細

像が得られた。光球面から磁力線が浮上する様子、磁力線がよじれたりする様子、そして、突発的に爆発現象を起こしている様子が衛星から捉えられている。こうした新しい知見は、太陽フレア現象の解明に向けて大きな手がかりになる。

宇宙飛行士や宇宙機にとって、大きな脅威になるのが、太陽放射線である。陽子が主成分であるが、電子やヘリウム、時に重元素も含まれることがある。太陽放射線の発生については諸説ある状況であるが、コロナ中で発生するフレアに伴って発生する成分と、フレアによって発生するCME（コロナ質量放出）前面の衝撃波から発生する成分があると言われている。発生した放射線粒子は、太陽から太陽風によって周囲に持ち出された磁場（太陽風磁場）にガイドされて、外側に伝搬していく。太陽の自転によって、磁場はスパイラルになるが、地球に到達する太陽風磁場は、太陽の西側（向かって右側）に起点を持つ場合が多い。よって、西側の活動領域が、放射線被曝の視点から重要である。

宇宙からの太陽観測の大きなメリットは、太陽の裏側を観測できることである。現在、STEREO衛星が、太陽の裏側の観測を行っている。このことは、太陽活動の先行観測の意義があり、危険領域の発生をいち早く察知することになる。また、前に述べたように、太陽活動領域が西のリム（淵）に沈んだ後も、継続監視ができることになり、この領域から非常

にしばしば地球にやってくる太陽放射線の警戒も可能になっている。

太陽放射線とCMEの直接計測について、最後に述べる。代表的な衛星はACE衛星であるが、この衛星は太陽と地球の重力の均衡する場所（ラグランジュポイント）に位置して、常時、太陽風を計測している。ラグランジュポイントと地球の距離は150万kmで、秒速500kmの太陽風が地球に到来するには50分を要する。よって、ACE衛星は約1時間先の太陽風の情報を事前に観測している。ACE衛星の観測結果は、電波で即刻、地球に送られるが、地上に複数台配備された受信アンテナを交互に稼働させることで、太陽風のデータは、途切れることなく、連続的に入手出来る。ACE衛星の観測する太陽風速度、密度、そして、惑星間空間磁場データは、宇宙天気予報に用いられている。

2) モデル

宇宙天気モデルについて、特に、太陽フレア、CMEに焦点を当てて述べる。太陽黒点上空の活動領域に蓄積された磁場のエネルギーが突発的に解放され、高温プラズマを放出する現象が、太陽フレアである。黒点領域の磁場線は、光球からループ状になって浮上していくが、上昇途中でコリオリ力を受けてよじれていく。最初は緩やかだった磁場のねじれが、光球表面できつくなり、次第に、テンションが高い状況になっている。このような状態で、互いに逆向きになった磁力線同士が結合（磁気再結合）すると、磁気エ

エネルギーが解放され高温プラズマが放出される。太陽フレアの開始である。このシナリオに沿って、太陽フレアを予測するモデルが提唱されている。活動領域の磁力線は、磁力線に平行に流れる電流によって、ねじれを持つ状態になっている。シアを持つ磁場と呼ばれるこの磁場配位のエネルギーを求める手法が出来つつある。これを逐次求めていく事で、エネルギーの蓄積状況を推定する事が出来る。非常に多くのエネルギーが蓄積されると、大規模の太陽フレアの発生が予想される。太陽フレア予報に於いて、磁場のエネルギーの算出は重要な情報となることから、この手法は、フレア発生に応用できると期待されている。

太陽フレアが発生すると、太陽コロナのプラズマは宇宙空間に放出される。先に述べたCME（コロナ質量放出）が発生する瞬間である。磁気再結合によって噴出したプラズマ構造が、周囲のコロナや磁場を取り込み、大きな構造となって惑星間空間へ飛び出していくのが、CMEである。現在、電磁流体力学（MHD）をもとに、噴出構造の磁場を初期条件として、CMEの発展を数値計算で求める試みがなされている。

CMEは、惑星間空間に出ていくとICMEと呼ばれるが、CMEは初速度で2000 km/mに達することもあり、惑星間空間でも1000 km/mを維持することもしばしばである。前面に衝撃波を伴うこともあり、ICMEは、衝撃波の後方のキャビテ領域そしてコア領域

に区分できる場合が多い。コア領域は、遠隔から太陽の散乱光を用いて観察することができるが、衝撃波は見えない。MHDシミュレーションを用いたICMEのモデリングが進んでいる。

ICMEで、もう一つの重要事項に、放射線粒子の問題がある。太陽放射線は、太陽コロナ中の磁気再結合領域で発生するとともに、ICME前面の衝撃波で生成するという考えもある。MHD場の中で、衝撃波構造の運動を取り入れたプロトン加速のモデルが作られている。

3) 予測ツール

宇宙天気予報を実現したいとする関係者の努力は、宇宙天気予測ツールの開発へと向かっている。経験モデルやシミュレーション技術を用いているが、境界条件・初期条件として観測値を導入する、データドリブン（データ主導）の予測ツールである。予測したい項目は、太陽フレアの発生、太陽放射線の発生、CMEの伝搬であるが、以下に、それぞれについて、現在の状況をまとめる。

太陽フレアは、発生するX線強度によって、いくつかのクラスに分けられている。これまでの20年以上に渡る観測の結果、黒点領域の複雑さや大きさ、そして成長のスピードから、これから2日以内に発生するフレアの大きさが、それぞれの活動領域について予想されている。ここでは、磁場構造が複雑になっていく度合いが、最も重要な指標であるが、最近では、磁場エネルギーの蓄積具合も、観測デー

タから計算され始めている。今の状況から、これからの太陽フレアの発生を予測するというアプローチが、目下世界で行われている太陽フレア予測のスキームであるが、精度の良い予測は、まだ出ていない。

太陽フレアに伴う、最も大きな脅威の一つが、太陽放射線の発生である。放射線粒子の発生過程については、太陽フレアが発生する太陽近傍のコロナ中で加速・生成されるという説がある他に、CME 前面の衝撃波領域から発生するという説もある。それぞれ、発生予測のアプローチは異なり、太陽放射線の正確な予測は、確立されていない状況である。CME 説の場合は、CME の詳細な観測が、太陽放射線発生に対して重要な情報になる。

太陽フレア発生に伴って、太陽コロナガスが塊となって周囲の宇宙空間に放出されるのがCMEである。太陽表面を詳細に地上から観測することと、宇宙空間からコロナの変化の状況を人工衛星で観測する事で、発生したCMEの、その後の伝搬が予測されている。現在、太陽を真正面と両脇から3次元的にCMEが観測されていて、地球に向うCMEが同定されている。また、CME領域からは、周波数の低い電波が発射されていて、この周波数低下から、CMEの移動速度が算出される。この速度を外挿することで、CMEの地球への衝突も予報できるようになっている。

5. 2 減災に向けた工学的取組

人工衛星が軌道上で受ける宇宙環境からの影響により、時に、以下のような重大な故障や不具合を起こす。

- ・帯電故障(electro-static Discharge)
- ・半導体メモリ、コンピュータ誤動作、焼損(Single event upset, Single event latch up)
- ・半導体放射線劣化(Total Dose Effect)
- ・太陽電池、CCDの変異損傷(Displacement Damage)

統計的な分析によると、帯電による故障は50%、シングルイベント30%、トータルドーズ20%となっていて、帯電による事故が最も顕著である。宇宙環境の影響を事前に防ぐ対策が、現在、行われている。月や火星に於いて、問題されるのは、放射線影響であるが、以下では、帯電対策、シングルイベント対策、トータルドーズ対策について述べる。

a. 帯電対策

高エネルギー電子は、露出した衛星表面に付着して表面電位をマイナスにする。通常であれば、光電子放出で負の帯電を補うが、絶縁体や誘電体の部位では、衛星は数百Vから数千V以上に、負に帯電する。帯電が一定以上の高圧になると、放電が発生し、衛星上で強い電磁干渉が発生する。電子機器の不具合、特にトリガカ回路、スイッチング回路などの論理回路の誤動作、テレコマンド異常、衛星表面の局部間のアーク放電に伴う半導体素子の損傷が多く報告されている。

対策としては、衛星表面に絶縁部分や誘電体を置かないように、さらに、電氣的に浮いた部分を極力少なくするように、対策が取られている。具体的には、表面の物体間を全て導線で結線して同電位にする。また、太陽電池のカバーガラスに導電性被膜を塗布するなどの対策がとられている。一方、実際のプラズマ環境を入力にした、衛星帯電モデルの開発が進められている。このモデルを用いて、それぞれの人工衛星の最悪の帯電状況が模擬され、もし、帯電が大きければ、表面材料の電氣的特性の見直し、配置の変更などを行い、衛星の製作に入る前に、帯電環境を改善する事が出来ている。

次に、衛星内部の帯電（深部帯電）について述べる。内部帯電とは、衛星の外壁を貫通した放射線帯の1 MeV以上の電子が、内部の電子機器の基板の間や同軸ケーブル線間の浮遊容量や、誘電体に帯電する事をいう。耐圧を超えると、弱い箇所で放電して故障に至る事が多い。内部帯電による事故の発生は、蓄積効果によることから、時間的に放射線MeV電子が増加する時、および高いMeV電子フラックスに長時間さらされている時が危険である。

対策としては、アルミ3mm厚に相当するシールドで囲む、テフロンやカプトンなどの誘電材料の使用を最小限に抑える、回路基板やコーティングのリークパスを必ず設ける、スポット的な放射線シールドの金属材には、必ずリークパスを付ける、などである。

具体的な仕様については、各宇宙機関では、衛星設計基準の中の、この項目をとり入れて対策を講じている場合が多い。

b. シングルイベント対策

人工衛星搭載のコンピュータが誤動作を起こしたり、半導体メモリがビット反転を起こす事が観測されていて、シングルイベントと呼ばれている。これらの現象は全て、宇宙放射線（銀河宇宙線、太陽宇宙線、バンアレン放射線帯の陽子など）が1個入って来た事が原因である。シングルイベントを低減するには、宇宙放射線が入って来た時の感応領域が狭い材質を選ぶことが重要である。現在は、電子デバイスのシングルイベントを評価する計算コードが開発されていて、これに放射線環境モデル（銀河宇宙線、太陽宇宙線）を入力する事により、シングルイベントの発生確率を求める事が出来るようになっている。

発生確率が低くなった場合でも、シングルイベントは現実的には発生する。遮蔽が困難なことも多々あるので、デバイス側での対策がとられている。チップ内のエラー自己検出、自動訂正回路を内蔵するなどの対策が、それである。具体的な仕様については、各宇宙機関では、衛星設計基準の中の、この項目をとり入れて対策を講じている場合が多い。

c. トータルドーズ

入射した放射線の蓄積によって、半導体のリーク電流の増加や、特性劣化が起きるが、これをトータルドーズ効果と呼ん

でいる。遮蔽は、スポット的に行う事が多いが、その部分には、内部帯電対策が必要である。遮蔽は、約4mm程度が、適当と言われている。具体的な仕様については、各宇宙機関では、衛星設計基準の中の、この項目をとり入れて対策を講じている場合が多い。

6. 国連宇宙天気専門家会合のガイドライン (まとめにかえて)

国連宇宙空間平和利用委員会では、2010年から、今後の安全な宇宙の利用を確保する事を目的に、科学技術小委員会（STSC）の下に、長期的宇宙活動維持WGを新たに設置した。このWGでは、宇宙デブリ（人為環境）と並んで、宇宙天気（自然環境）も取り上げられ、対応する専門家会合が設置され、本論文の筆者である小原が、議長に選出された。宇宙天気専門家会合は、宇宙天気に関する報告書およびガイドラインを2014年初頭に以下の内容の報告書を提出した。それは、

- ア) 宇宙天気観測、モデル、予測の現状
- イ) 宇宙天気重要情報ネットワーク
- ウ) 衛星被害減災手段

であるが、ア)とイ)は、宇宙天気予報という科学的アプローチが主役である一方、ウ)は、衛星設計など、宇宙技術からのアプローチといえる。

世界の各国・各機関で実施されている宇宙天気観測については、先にレビューした通り、考えられる様々な項目が、観測されていると言ってよい。今後は、これ

らをいかに維持していくが重要である。モデルの開発、特に予測ツールについては、今後の発展に期待する部分が多い。太陽のフレア発生、太陽放射線の発生については、科学的に難しいテーマである。

宇宙天気予報については、米国NOAAが本部になり、世界15機関の参加によって、宇宙環境情報サービス（ISES）が作られ、日々の宇宙天気予報が行われている。予報項目は、太陽フレア、太陽放射線、地磁気擾乱（磁気嵐、オーロラ嵐）のほか、地球放射線、電波伝搬であるが、更に、利用者にとって便利な情報提供にすることが、大きな要請になっている。本稿で述べたような、月や火星での宇宙天気予報は、今後、ユーザーが発生するアイテムと思われる。

現在の日に1度の予報の頻度を上げることや、利用者が利用しやすい形で可視化することなど、ISESで議論が始まっている。一方、世界の宇宙関係機関では、独自に宇宙環境情報の発信を始めている。大学・研究所においても、科学研究・啓蒙教育の視点から、研究の成果を現実の宇宙環境に対して応用し始めている。

宇宙天気専門家会合の役割は、こうした世界の宇宙天気予報に向けた試みを集約して、現業部門に、適切にフィードバックすることである。引き続き宇宙天気専門家会合のアウトプットが、宇宙空間における長期に渡る安全な活動の維持に貢献できるよう、確実に進めていきたいと考えている。