

## 5-4 宇宙天気予報の未来 —国際宇宙ステーション以後—

### 5-4 Space Weather Forecast in the Future Manned Space Era

富田二三彦  
TOMITA Fumihiko

#### 要旨

宇宙天気は現代でも様々な形で人間活動に対して影響を及ぼしている。数十年後には、誰もが宇宙旅行を楽しむことができる時代がやってくるが、その時代には、宇宙天気科学は更に実用性の高い科学として完成の域に達していなければならない。

Space weather is the conditions of the Sun and in the solar wind, magnetosphere, ionosphere and thermosphere that can influence the performance and reliability of space-borne and ground-based technological systems and can endanger human and animal life or health. In 2050, everyone will be able to enjoy his/her space tour. The space weather research will transform into more and more practical science in that future manned space era.

#### [キーワード]

宇宙天気予報, 有人宇宙活動, 宇宙放射線

Space weather forecast, Manned space activities, Space radiation environment

## 1 はじめに

宇宙天気とは、地上数十kmの高度から上空に向かって太陽～太陽系の宇宙空間にまで広がる領域の、主にプラズマ大気的环境に対して、その中で自然に生起する様々な物理・化学現象の全体を指す。よって、宇宙天気の研究は、地球物理学から天文学にまたがる超高層大気物理学、宇宙空間物理学、太陽物理学を包含する一つの横断的・インタラクティブな研究である。

しかしながら、あらゆる地球物理学がそうであるように、宇宙天気の研究も太陽から地球までの自然環境がどのように人間活動に影響を及ぼすかという応用面に興味の対象がある。それが宇宙天気という造語のゆえんでもあり、定義は、地上及び地上から宇宙の間に存在する様々な人工のシステムの維持・運用に影響を及ぼし、直接的又は間接的に、生物や人間の生活や健康に影響を及ぼす、超高層大気から太陽までの宇

宙の環境ということになる。

宇宙天気の応用面の際たるものが、その予報のための研究であり、人間生活の益になるように宇宙の天気を予測することを目指して、基礎から応用まで幅広い研究がその中で行われる<sup>[1]</sup>。

本稿では、この応用面に着目し、宇宙天気の研究及び予報がどのように人間生活に役立っているのか、国際宇宙ステーションが本格的に運用される近い将来、また、今世紀半ばの有人火星探査や宇宙観光が行われる時代にはどのように役立つようになるのかという観点から、その全体の状況をまとめて記述する。

## 2 宇宙天気変動の源

様々なシステムや人々の安全を守るためには、それらに影響を及ぼす宇宙天気の、源と全体の状況についてよく研究して理解しなければならない。超高層大気から太陽までの個々の研究成

果については既に紹介されているので、ここでは、宇宙天気を変動させる一次的な源についてまとめておく(図1)。

超高層大気から宇宙空間までの領域に対する最大のエネルギー源は太陽にある。

地球磁気圏の周辺には、太陽から太陽系空間に向かって磁場を伴って吹き出す「太陽風」が常時存在するが、その特性が太陽近傍の源流域で時間的・空間的に大きく変動するため、その影響により地球磁気圏及び超高層大気変動する。

これとは別に、太陽表面の特異的に活動的な領域を源として、突発的に、磁場を伴った「プラズマ雲」(CME:Coronal Mass Ejection)の放出や「フレア」が発生し、しばしばそれらが宇宙天気変動の原因となる。

以上太陽を源とする変動要因のほかに、「銀河宇宙線 (Galactic Cosmic Ray)」、「隕石 (Meteorite)」や人工の「デブリ (Debris)」が宇宙天気の変動の要因として挙げられる。

これらを源とする宇宙天気の変動が、どのように人間生活に影響を及ぼしているのかについて以下に述べる(図2)。

### 3 地上への影響

#### 3.1 無線通信

無線(電波)を利用するあらゆる通信は宇宙天気の影響を受ける。特に、オーロラが出現するような磁気圏・電離圏嵐時の極域の短波(HF帯)無線電波は、電離層に吸収されてしまい、地上に戻ってこない。

既に無線携帯端末の周波数はUHF～SHF帯に移り、これから先将来にわたって地上通信がHF帯にのみ頼る時代は来ないことが予想される。しかしながら、世界中の多くのHAM無線局は依然として活発に活動し、送受信システムが簡便なことから、国際的な短波放送、人口密度の低い地域における情報通信、災害時や非常時、軍事目的の通信のほか、その他の通信のバックア

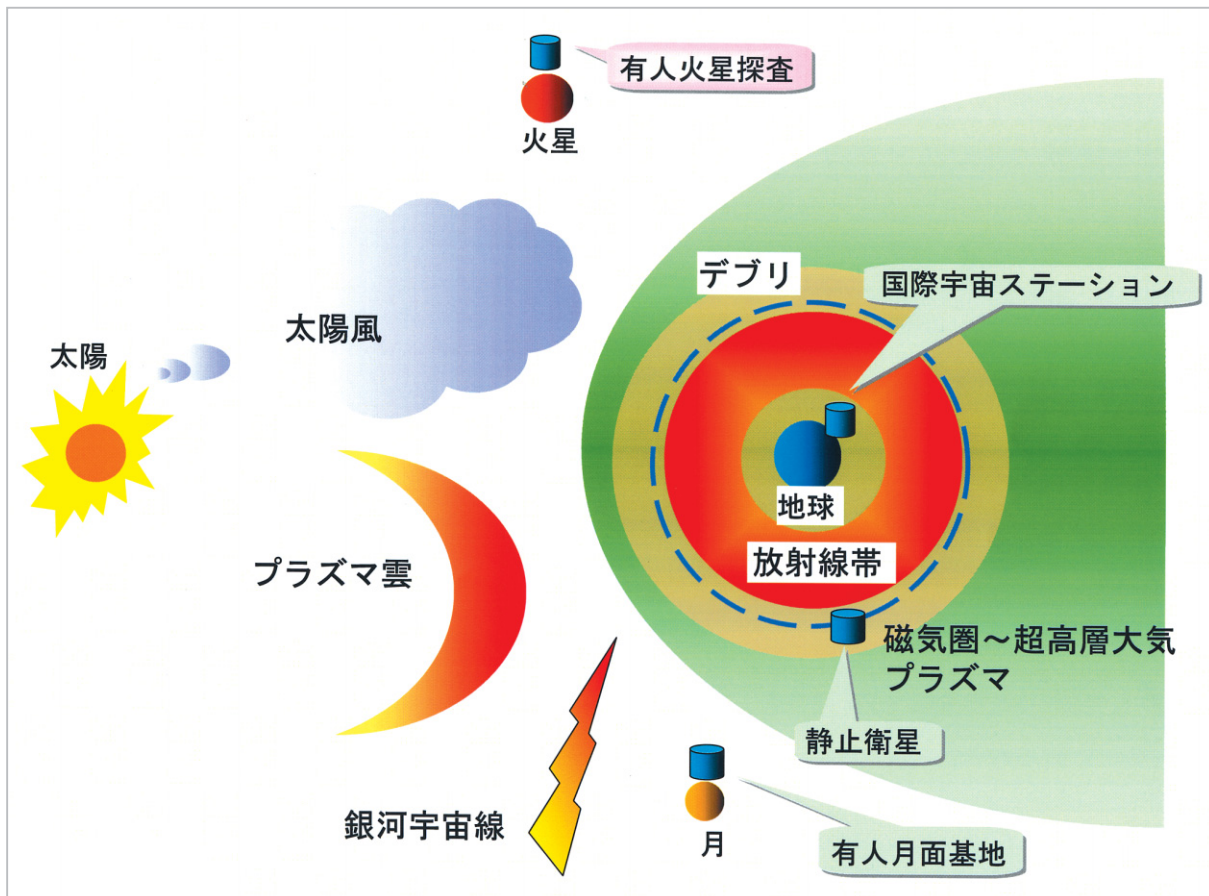


図1 地上～宇宙空間における人間活動に影響を及ぼす宇宙天気変動の源





図2 様々な人間活動に対して影響を及ぼす宇宙天気予報。場合によっては生命の安全を脅かす

アップ回線としてのHF帯無線通信の役割は今後も引き続き見込まれる。よってその安全運用を支えるため、電離圏嵐の現況把握と予測は今後も引き続き必要な役割を果たすことになる。なお、航空機や船舶の航行用通信は、徐々にその主流が衛星通信に移行しつつあるが、地上とのVHF帯(近距離)とHF帯(遠距離)通信はまだ多くのユーザが利用しているのが現状である。

衛星と地上の間の衛星放送・衛星通信は現代では生活の一部となっているが、その伝搬路は電離圏の中にあるため、磁気圏・電離圏嵐はこれらVHFからSHF帯の電波伝搬にも悪影響を及ぼす。なお、静止衛星-地上通信で可能性が高いが、電波伝搬方向と太陽方向が接近している場合には、太陽電波ノイズやバーストにより直接的に悪影響を受けることがある。

近年になって爆発的に利用者が増加している携帯電話(モバイルフォン)に対しても宇宙天気の影響を及ぼす。太陽電波バーストにより雑音レベルが上昇して携帯電話がつながりにくくなる回数は、太陽活動極大時期には3.5日に1回以上、極小時期でも18.5日に1回以上発生すること

が予測されている[2]。今後も、健康への影響抑制や電話機の小型化による携帯電話の送受信電力の低下により、宇宙天気変動による悪影響を更に受けやすくなることが考えられる。なお、基地局-携帯電話間通信への太陽電波による混信の被害は、日出・日没の太陽高度が低い時期に発生する。

磁気嵐やオーロラなど自然現象による無線通信・放送への悪影響は、宇宙天気予報が高い精度で発令されても事前に避けることはできないが、その時間帯には重要な情報通信を控えたり、必要であれば衛星回線、光ファイバーや有線等他の回線へ切り替えたりすることにより、被害を最小限に食い止めることができる。

### 3.2 ナビゲーションに対して

LORANやOMEGAなど、LF、VLF帯を使っている船舶の航行システムには、電離層の高度の正確な把握が重要である。磁気嵐/電離圏嵐時の電離層各層の高度変化は、位置の計算にキロメートルオーダーの誤差を生じる。

GPS(Global Positioning System)は、自動車の

ナビゲーションシステムの普及等により日常生活に欠かせない存在となっており、また、将来には航空機の離発着や自動車間隔の制御のような高精度で信頼性の高い位置情報を利用していく計画がある。磁気圏・電離圏嵐に伴う電離圏の電子密度の変化によりシンチレーションと呼ばれる電波の短周期変動が発生し、GPS信号に悪影響を及ぼすことが知られているので、現在よりも更に精度の高い位置計測を利用する場合には、宇宙天気予報が必須となる。なお、米国等では高精度のGPSを軍事目的等で使用するため、既に積極的に宇宙天気予報を利用している。

宇宙天気予報とそれに基づく即時的な通信状況(位置の誤差情報)を知ることにより、GPSナビゲーションにのみに頼ることに起因する重大事故等を回避することができる。

### 3.3 地上の長距離通信線や送電線等

既に1849年には人工のシステムに対する宇宙天気の影響が報告されており、それは地上の有線通信(電信:telegraph)に対する地磁気嵐に伴う電磁誘導現象であった。その後中長距離通信の主役は一部マイクロ波等を経て衛星通信とファイバーによる光通信に取って代わっているが、衛星通信は前述のように、またファイバー通信は中継機への長距離の電力伝送(後述)により、少なからず宇宙天気の影響を受けている。

一方、現代の生活は膨大な電力エネルギーにより支えられている。それらは主に、水力・火力・原子力発電に頼り、わずかではあるが風力・地熱・太陽光発電等も利用されはじめている。電力エネルギーの消費量は人口密度に伴い極端に局在化し、また、発電施設の住宅地に対する悪影響をできるだけ軽減するため、電力の消費地と生産地は遠く離れていることが多く、世界の各地で国内外に大電力の長距離送電線が張り巡らされている。

長い距離にわたって電力を送る送電線は地球磁場変動による誘導電流の影響を受けるが、特に地磁気の変動が大きな高緯度地域において、その影響は深刻なものとなる。実際その例として、1989年3月にカナダで9時間に及ぶ停電が発生し、約600万人の人々が被害を受けた。図3は同じ磁気嵐により米国ニュージャージー州の発



図3 宇宙天気により焼損した電力トランス内部のコイル

1989年3月13日の磁気嵐によるもの(写真は米国電力研究機構による)。

電所で焼損したトランスの内部を示す。

現在、世界各国の電力会社等はこの誘導電流(GIC:Geomagnetic Induced Currents)の影響を最小限に抑えるため、宇宙天気予報を含む様々な研究開発を実施し、同時に会社間の協定により複数の経路網を構成して、危険な時期には安全な経路で電力を供給するシステムを確立しつつある。よって、宇宙天気予報によって事前に磁気圏嵐の情報が得られれば、地磁気擾乱の影響を受けにくい経路を選択したり、嵐の時間帯には常にバックアップ回線を準備したりして、停電等最悪の事態に備えることが可能となりつつある。

油田から発電施設までの、特に高緯度地方の長距離パイプラインも同様に地磁気嵐の影響を受ける。パイプ表面の誘導電流がパイプの接合部及び接地部の腐食を促進するため、石油採掘・輸送企業は誘導電流の有効な処理方法を研究開発している。

### 3.4 動物・人間の磁場感知能力

魚類、鳥類、哺乳類等の中には、鼻の周辺に地磁気を感じる器官を持つものがあり、実際、伝書バトやイルカが地球の磁場を頼りに行動していることは、よく知られている。

かつて、大きな地磁気嵐により、国際伝書バトレースで多くの鳩を失う事件が発生した。そこで現在でも、大きな国際伝書バトレースでは宇宙天気予報による情報を参照している。また、人体に対する磁場(変動)の影響の研究も始まっている[3]。



### 3.5 オーロラ予報

18世紀初めにガウスが初めて地球の全磁力を測定して以来、地球の磁力は着実に減少傾向にある。このままの割合で現象が進行すれば、約700年後には日本からも毎晩見事なオーロラが見られるようになり、その後約500年で地球磁力はゼロになるという計算になる。それは、生命に危険な宇宙の高エネルギー粒子が、それだけ地上に降り注ぎやすくなるということでもある。

このオーロラは、高緯度地域に発生する自然現象としてアラスカや北欧等の観光の対象にもなっているが、特に華麗に乱舞するカーテン状オーロラやオーロラ爆発を見るためには、宇宙天気予報によって地磁気嵐の到来を予測し、その時期に高緯度地域へ出かけて行くことが有効である。

### 3.6 地上の半導体機器等への影響

地上における放射線はそのほとんどが放射性物質を含む地質、建物、空気、食物等によるもので、宇宙からの放射線の寄与は全体の1/3程度である。しかも、この源は高エネルギーの銀河宇宙線にあるため、太陽活動によるその10%程度の変動が地上の生活に直接影響を及ぼすことはない。

しかしながら、後に航空機や宇宙機の搭載機器への影響で述べるように半導体部品や集積回路等は、技術開発により年を追うごとに小型化し集積化・高性能化が進んでいる。また、高性能な部品ほど小電流で動作するようになっており、これは逆にますます半導体部品や集積回路への宇宙起源の高エネルギー粒子の影響が、たとえ地上であっても無視できなくなっていることを示している。

宇宙天気の変動成分が特に大きな影響を及ぼすわけではないが、定常的な宇宙からの放射線の影響を避けることが必要である。例えば、高精度な半導体部品やCCD等を長期間安全に保存しておくためには、コンクリートによるシールド室等が必要となる。

### 3.7 気候変動への影響

宇宙の天気は地球の超高層大気環境を含むものであり、この超高層大気は対流圏から地上ま

での地球大気と連続的につながっている。よって、銀河宇宙線や太陽活動を起源とする宇宙天気の変動が、地球の気候や気象に影響を及ぼすことが予想される。実際、様々な気象データと銀河宇宙線や太陽粒子線の変動を比較してその相関を見いだした研究も行われており、太陽活動(黒点数)や地磁気と気候変動の関係も研究されている[4][5]。

しかしながら、宇宙天気変動が気象や気候変動に及ぼす影響の大きさが、その他の要因、大気(微量)成分、エアロゾル、雲(水蒸気)、海洋、風系、地軸等に比較してどの程度であるか、また、その相互作用がどうなっているかについては、引き続き観測と研究が必要である。

## 4 航空機への影響

航空機と基地局との短波帯無線による直接通信や衛星通信、GPSを用いたナビゲーションなどに宇宙天気の影響することについては前述したので、本項では宇宙の高エネルギー粒子線(宇宙放射線)による影響について述べる。

国際線の航空機の本数が増え利用者が増加するにつれて、特に大圏航路により高緯度の上空を飛行する航空機については、その乗員や機器に対する宇宙放射線の影響が無視できなくなっている。その源は、おおよそ定常的に存在する銀河宇宙線(GCR:Galactic Cosmic Ray)、定常的に存在するが強度が変動する放射線帯粒子(Radiation Belt Particles)、そして突発的に発生し数日間大きな影響を及ぼす太陽高エネルギー粒子(SEP:Solar Energetic Particles)である。航空機の乗員と乗客のどちらの立場であっても、高緯度を飛行する路線に何回も搭乗すると、一般人の許容年間被曝線量である1mSv(ミリシーベルト)を超える可能性があることが報告されている。特に、業務として定常的に高高度被曝を受ける乗員の場合は、3mSv/年の被曝量も報告されており、高緯度航路の利用時間が年間数百時間を超えるような乗客の場合も被曝量は無視できない[6]。

特に、たまたま高緯度でしかも高高度を飛行中に太陽高エネルギー粒子現象(SPE:Solar Particle Event)に遭遇するとその被曝量が跳ね上

があるので、コンコルドのような高緯度・高高度旅客機の場合は、宇宙天気予報による航路や高度の変更が実施されている。

さらに、航空機の制御に使用される電子部品は、年々高性能化・高集積化しているため、後述の衛星搭載部品と同じく、耐宇宙放射線性についても研究と開発が進められている。

## 5 宇宙機への影響

### 5.1 宇宙機搭載機器に対する高エネルギー粒子線の影響

高エネルギーの粒子線は、人工衛星内の電子部分に損害を与え、誤信号を発生させたり(SEE: Single Event Effect)、機能を急速に劣化させたり停止させたりする。また、累積の被曝はTotal Dose Effectとして、太陽電池パネル等衛星表面機器の寿命を短くする。過去には、1回のSPEにより太陽電池パネルの劣化が、SPEに遭遇しない場合の数年以上進む事故も報告されている。

このような被害は、高エネルギー粒子線の飛来や、衛星周辺のプロズマ環境を前もって予測することができれば、高圧電源を落としたり、バックアップの計算回路を作動させたり、太陽電池パネルを一時的に収納するなどの対策により、被害を最小限に食い止めることができる。

衛星周辺の比較的低エネルギーのプロズマ環境が、衛星表面に過剰電荷を与えて帯電放電現象(ESD: Electro Static Discharge)による誤操作を引き起こしたり、衛星自体の寿命を短くしたりする。今日では、衛星表面の導電及び絶縁性の設計、帯電防止塗料の利用等により、多くの表面帯電・異常放電現象による障害が回避できるようになってきている。

一方、近年大きな問題になってきているのが、主に放射線帯外帯の高エネルギー電子群によると考えられている深部帯電現象(Deep charge)あるいはバルク帯電現象と呼ばれるものである。この現象は、衛星内部にまで侵入した高エネルギーの電子(数100keV以上)が、ケーブルや半導体基板等の誘電体内部に電荷を蓄積させ、その電荷が絶縁限界を超えた時に異常電流パルスが発生するものである。これに対処するため、基板やケーブルの接地設計を綿密に行ったり、実

効的なシールド厚を高めたりする工夫がなされているが、たまに発生する数MeV以上の電子フラックスの増加現象に対しては効果的な対処方法が見つかっていない。

集積回路は、技術開発により年を追うごとに小型化し集積化が進んでいる。また、高性能な集積回路ほど小さな電流で動作するようになっており、これは逆にますます単発現象や深部帯電現象等の影響を受けやすくなっているということになるので、宇宙天気予報を含めてその対策は今後も引き続き重要な耐放射線性向上のための課題となっている。なお、このような耐放射線性の高い機器部品の開発は、製造部品の用途が限定されるだけコストパフォーマンスが悪く、衛星全体の価格を引き上げている要因の一つにもなっている。よって、適正な放射線環境モデルの設定とできるだけ正確な放射線帯のシミュレーション技術、放射線障害予測技術(例えば単発現象発生率の予測)の開発は、宇宙機の設計やコストに直接メリットのある重要な技術開発課題である。

### 5.2 宇宙機の軌道制御に対する大気の影響

オーロラから発生する熱(最大 $10^{13}$ ワットに達する)や太陽光(主に紫外光)の増強は、超高層大気中の大気密度(組成及び温度)や風系を変化させる。そのため、特に近地点が高度数100km程度の周回衛星では、大気摩擦の増加により衛星軌道や姿勢が狂うことになる。短期的には軌道維持のための余分なスラスタ噴射、長期的には衛星の短命化として影響が現れる。最悪の場合は衛星の早期落下を招くこともある。また、スペースシャトル等有人宇宙機の大気圏突入に際しては、この効果を入れた正確な計算を行わなければ、乗組員の生命が危ない。

### 5.3 宇宙機の姿勢制御に対する地磁気の影響

地磁気嵐が、地磁気センサーにより姿勢制御を行っている衛星に悪影響を及ぼす。その結果、姿勢に依存する各種衛星機能が一時的に麻痺し、頻繁な姿勢回復にスラスタ燃料が必要になるため、衛星寿命にまで影響が及ぶ。

この場合は、宇宙天気予報によって、一時的に地磁気センサーによる姿勢制御を中断するな

どの対策により、被害を最小限に抑えることができる。

#### 5.4 宇宙空間における人間活動への影響

人工衛星や宇宙機の搭載機器への悪影響だけでなく、宇宙空間を飛来する高エネルギー粒子(宇宙放射線)は、国際宇宙ステーションや将来の月面や火星表面における人間活動に重大な悪影響を及ぼす。場合によっては、放射線被曝による死亡事故も予想される。

特に有人の長期宇宙滞在が始まっている国際宇宙ステーション(ISS:International Space Station)(高度約400km、軌道傾斜角51.6度)に関しては、シャトルやミールを用いた放射線計測と各種モデルを組み合わせて、できる限り綿密な放射線被曝予測が行われている。その結果、SPE現象がない通常的环境下で船内に滞在する場合には、実効線量当量はおよそ1mSv/日で、SPE時の数日間にはその値が10数倍~数10倍となることが予測される。また、船外活動(EVA:Extra Vehicular Activity)時には、船内の場合に比較して数倍の被曝量となるとともに皮膚及び体表面に近い臓器の被曝量が相対的に増大する。

図4に示すように、地上の一般人は1回のX線撮影でおおよそ1mSv被曝するが、年間の基準値として5mSvが設定され、日本の原子力発電施設等放射線従事者の基準は特殊な業務上のリスクを考慮して一般人の10倍、NASA(米国航空宇宙局)宇宙飛行士の場合は、更にその任務の特殊性を考慮して年間の基準値は骨髄に対して500mSv(0.5Sv/年)となっている[7][8]。

ISSの場合、SPEのような突発現象に遭遇せず、またEVAも行わない場合であっても、数か月の滞在で日本の放射線従事者の基準を上回ることが予想される。そこで、有人による宇宙実験あるいは将来の月面や火星への探査という特殊な任務に就く職業人の放射線被曝によるリスクの基準をどの程度とすべきかが論点となる。

専門家による検討の結果、米国放射線防護委員会(NCRP:National Council on Radiation Protection and Measurements)及び宇宙開発事業団は、寄与生涯がん死亡確率(生涯にわたってがんで死亡する確率(一般に15~18%)の、放射線の寄与による増加分)3%により宇宙飛行士の線量限度を設定するのが適当であるとしている。その結果を表1に示す[9]。

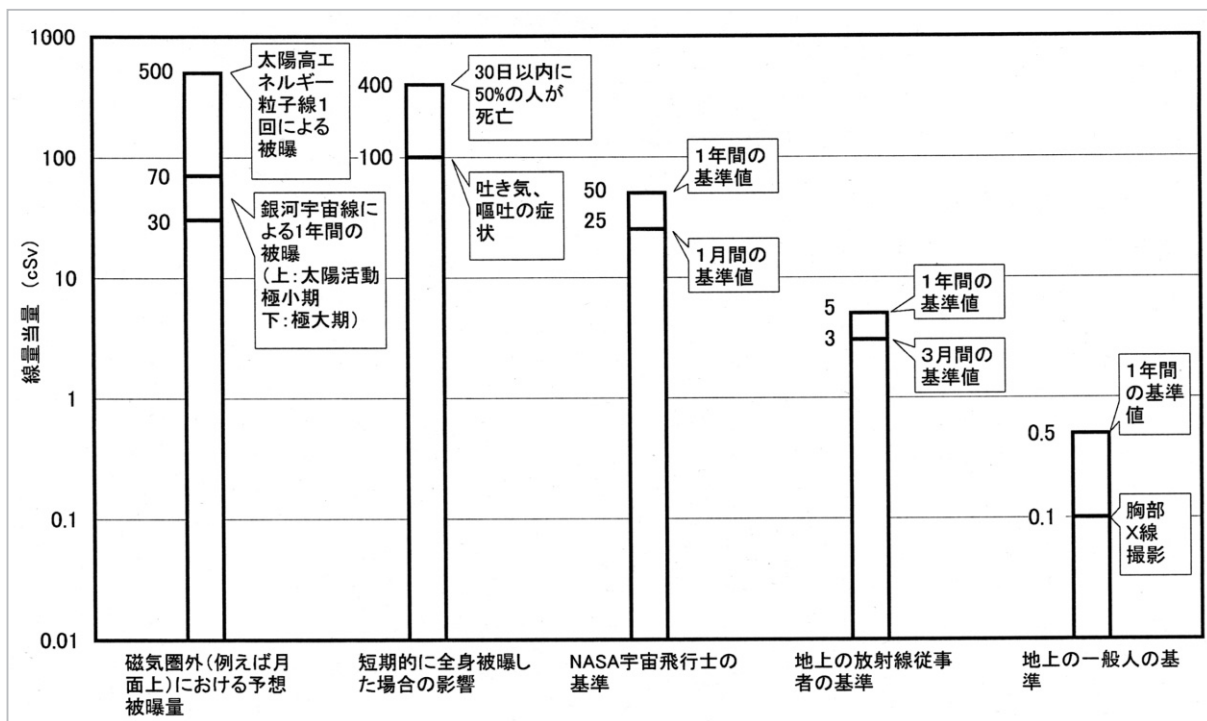


図4 宇宙空間における予想被曝量と被曝線量の基準値との比較。縦軸は対数で表示した線量当量(単位:cSv センチシーベルト)



**表1** ISS 搭乗日本人宇宙飛行士の線量制限値

ISS 搭乗宇宙飛行士の生涯実効線量制限値

初めて宇宙飛行を行った年齢	男性 (mSv)	女性 (mSv)
27～29歳	600	600
30～34歳	900	800
35～39歳	1000	900
40歳以上	1200	1100

ISS 搭乗宇宙飛行士の組織等価線量制限値

組織・臓器	1週間(Sv)	1年間(Sv)	生涯(Sv)
骨髄	—	0.5	—
水晶体	0.5	2	5
皮膚	2	7	20
精巣	—	1	—

上は生涯実効線量制限値。下は組織等価線量制限値。宇宙開発事業団有人サポート委員会宇宙放射線被曝管理分科会報告書及び事業団との私信より。

さらに、将来(2020年～2050年以降)には、地球磁気圏の外に有人宇宙活動が進出し、有人による月面利用や火星探査が行われるようになる。この場合、放射線帯粒子による被曝がなくなる代わりに、磁気圏バリアの外に出るため銀河宇宙線やSPEによる被曝量が増大する。その結果、SPEに遭遇しない場合の総被曝量はオーダーとして同等となる(300～700mSv)。しかしながら、この場合には、シャトル等により比較的容易に安全な地上に帰還可能なISSの場合と異なり、太陽活動周期にもよるが、少なからずSPEに遭遇することになるので、そのための対処方策をあらかじめ綿密に検討しておくなければならない。少なくとも、SPEに関する精度の高い宇宙天気予報と、その場における放射線計測と、避難のためのシェルターの設置が必要である。

なお、同じく将来には地球周辺の宇宙観光が実現している可能性が高いが、その場合の宇宙放射線被曝基準値は上述のISS基準値を上限として、宇宙空間滞在日数に応じて設定され、SPEに遭遇した(することが予想される)場合には可及的速やかに地球へ帰還する方策が考えられる。

## 6 近い将来の国際宇宙ステーション運用のために

宇宙飛行士を宇宙放射線の被曝から守るシステムは、米国ではNASAがジェミニ計画のころ(本格的にはアポロ計画)から設立し、初期のこ

ろから宇宙天気情報を有人宇宙活動のために利用している。現在では商務省海洋大気庁(NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration)の宇宙環境センター(SEC: Space Environment Center)及び米国空軍(USAF: U. S. Air Force)第55気象中隊(55<sup>th</sup> WX: 55<sup>th</sup> Weather Squadron)が相互に協力して宇宙天気予報を担当し、シャトルのミッション期間中には、SECとジョンソン宇宙センター(JSC: Johnson Space Center)の放射線解析グループ(SRAG: Space Radiation Analysis Group)が24時間体制で情報交換を行っている。大きな擾乱警報等がSECから発令された場合には、SRAGを通じて(又は直接)シャトルのミッションコントロールにまで即時的に警報が伝えられ、EVAの中止等を即断するシステムが稼働している。一方、ロシアにも生物医学問題研究所(Institute for BioMedical Problems)が設置され、無重力等の影響と並んで宇宙放射線の影響が大きな研究テーマとなっている[10]。

ISSの安全な運用のために必要な方策は、まず第一に宇宙飛行士それぞれの個人被曝線量をISS搭乗前から搭乗中、搭乗後、生涯にわたってモニター/評価し、その記録を保存して放射線生物学研究に役立てることである。搭乗中は、個人の線量モニターだけでなく、ISSの内部各所と外部における高エネルギー粒子環境が、粒子の種類やエネルギースペクトル等網羅的に継続的に計測されていなければならない。

これと並んで必要な要件が宇宙天気のモニタリングであり、特にSPE等ISS周辺の宇宙放射線環境を変動させる要因の現況把握(Nowcast)と予測(Forecast)が定期的に(必要な場合はそれ以上頻繁に随時)行われていなければならない。

ISS運用のシステムはこの数年以内に参加各国の合意により確立されていくと考えられるが、現用の米国のシステムから類推して、図5のような運用システムが考えられる。図中の各パートの役割分担を表2に示す。

宇宙天気はISES(International Space Environment Service)により常時監視され、その現況・予報情報も数時間ごとに発令される。その結果はISS周辺の放射線環境を専門に解析・検討する国際共同のSRAGに送られ、ISESとSRAGの協議の結果、ISS周辺の放射線環境に関



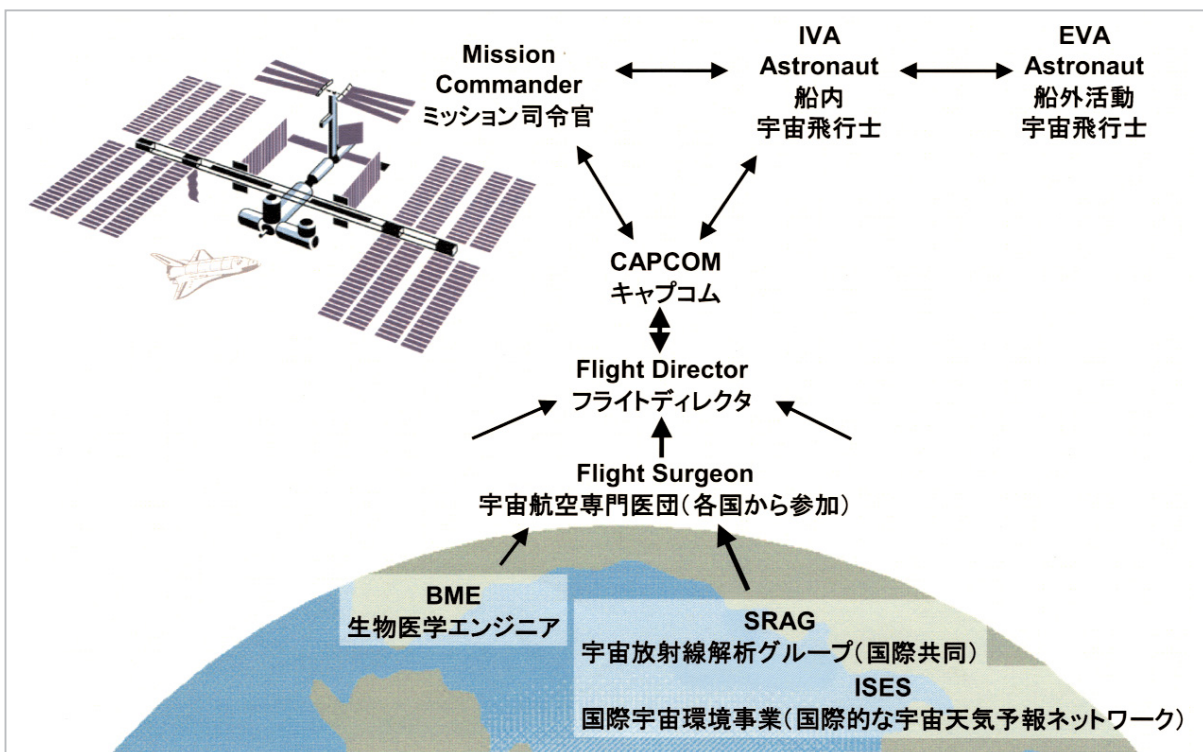


図5 予想されるISS運用体制

表2 ISS運用の各パートとその役割分担

分担名称		役割
Mission Commander	ミッション司令官	宇宙空間における有人ミッションの最高責任者
IVA Astronaut	船内宇宙飛行士	船外活動を監視し支援する宇宙飛行士
EVA Astronaut	船外宇宙飛行士	船外活動を行なう宇宙飛行士
CAPCOM	キャプコム	宇宙飛行士と直接交信。情報交換の重要な中継点。
Flight Director	フライトディレクタ	地上における有人ミッションの最高責任者
Flight Surgeon	宇宙航空専門医団	飛行士の活動状況及び健康を管理する医師団
BME	生物医学エンジニア	飛行士の健康状態を生物医学的に監視
SRAG	宇宙放射線解析グループ	宇宙放射線環境を監視、解析
ISES	国際宇宙環境事業	宇宙天気を監視する国際組織

する現況と予報が確定する。確定した情報は各国から参加する宇宙航空専門医のグループに送られ、宇宙飛行士の健康に対する影響評価が行われて、その結果がISS運用の最終責任者であるフライトディレクタに報告される。なお、ISSでは、宇宙放射線だけでなく、無重力や長期の閉鎖空間などその他の生物医学的な要因が複合的に人体に対して影響を及ぼすため、それらの状況解析及び予測結果も各専門の生物医学エンジニア(BME:Bio-Medical Engineer)から宇宙航空専門医(Flight Surgeon)のグループに送付される。

フライトディレクタ(Flight Director)は、情報と解析結果と助言をもとに、キャプコム(CAP-

COM)を通じてISS搭乗員と通信し、EVAなど有人宇宙活動の詳細スケジュールを決定して宇宙飛行士が実行する。

## 7 2050年のインフラとしての宇宙天気予報

これまで述べてきたように、既に現代において宇宙天気は様々な人工のシステムへの影響を通じて、人々の生活や健康に影響を及ぼしている。実際、国際短波放送、それ以外に通信手段を持たない航空機や船舶の無線通信、高緯度地域の長距離送電、高精度のGPSナビゲーション

などは宇宙天気の変動により危機的な状況となる可能性があり、宇宙天気の現況及び予報がそれらの安全運用に役立つ。しかしながら、現代の社会生活の全体から見れば、これらの各課題に対する宇宙天気予報の実用的な価値は、地上の天気予報に比較すれば高くはない。

宇宙天気予報がより密接に人々の生活に関係し、社会生活に必要な実用的研究とみなされるようになるのは、筆者は2020年～2050年と見込んでいる。

既に、気象衛星や放送衛星の利用は生活の一部となりつつあり、GPS衛星群を利用したナビゲーションも利用者が増加している。中国等東南アジア諸国や太平洋の島々のように通信衛星の利用が社会生活に必要なインフラとなりつつある地域も多い。衛星間通信を利用した全地球規模の高速宇宙通信網の利用や地球環境保全のための人工衛星を用いた全地球環境のモニタリングも更に活発に行われるであろう。更に高度な衛星利用のためには、準天頂のように新しい軌道に投入される衛星群も増加していくであろうし、太陽光発電衛星も現実のものとなってい

く可能性がある。また、世界の安全保障のための宇宙利用もますます盛んになっていくことが予想される。これら地球周辺の人工衛星に対して、宇宙天気はしばしば甚大な悪影響を及ぼすため、その予報は各種実用衛星の運用のために、ますます必要不可欠となっていく。

さらに、宇宙インフラストラクチャ研究会の報告書に記載されている図6に見られるように、また2003年には中国が世界第3番目に有人宇宙飛行に成功するであろうことなど考慮すると、有人による宇宙開発・宇宙環境利用も今後活発になっていくことが予想される[1]。

太陽系惑星の中で唯一生命の痕跡を持つ可能性のある火星に対しては、無人による探査だけでは限界があるため、できるだけ早い機会に有人探査により地球型生命誕生の謎を解明すべきである。火星往復に必要な2年余りの宇宙飛行中、搭乗員の生命の安全は宇宙天気予報によって守らなければならない。

様々な状況に柔軟に対処して最大限の効果を上げるため、有人宇宙機による地球観測も活発に行われる可能性がある。また、宇宙往還機な

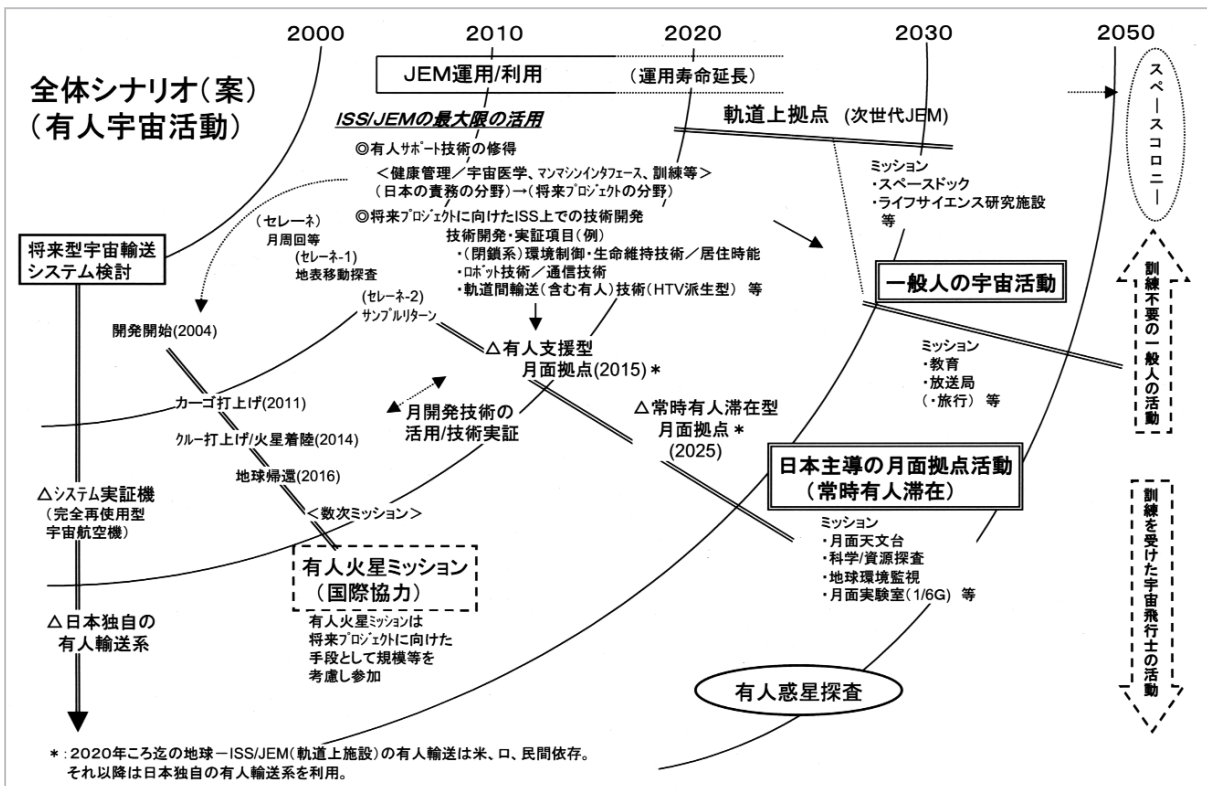


図6 有人宇宙活動の全体シナリオ(案)。宇宙インフラストラクチャ研究会報告書より



ど輸送技術が更に進歩することにより、一般の人々の宇宙旅行がビジネスとして成立し、宇宙空間に出て行く人の数が飛躍的に増加する可能性もある。さらに、資源探査や各種観測・実験のサイトとして月面に再び人類が降り立つ可能性もある。これら地球周辺を周回したり月面で作業する人々の安全もまた宇宙天気予報によって守られなければならない。

現在は基礎的な研究と必要な技術開発のフェーズにある宇宙天気予報は2050年には、社会のインフラとして必要不可欠となっていると考えられる。

## 8 おわりに

約45.5億年の昔に、ビッグバンから数えて数世代目の惑星系として我が太陽系が形成され、ほぼ同時期に、地球型生命体を生み出すのに都合のよい大きさの惑星が都合のよい場所に形成された。その後惑星上では、10億年もしないうちに初期の生命体が発見し、海洋植物が大気中に酸素を放出すると同時にオゾン層が形成され、初めに植物群、次いで動物群が陸上に姿を見せた。そのような動物群のごく一部がその未来を暗示させる巨大な脳を有するようになったのは約100万年前、これまでの地球史を1年間に例え

れば、12月31日午後10時53分のことである。ここまでの進化は、多くは必然的に、たまには偶然のイベントがその流れを左右しながら地球史が綴られてきた。巨大な脳を持つ人間が、大きな地球史の流れの中にわずかな人間史を形成するようになり、ごく短時間のうちに、地球大気環境にまで影響を及ぼしてしまうほどの進化を遂げて現代がある。

このような歴史の流れの中で、人間が自らの惑星が丸いことを知って、それを信じて広大な海洋へ乗り出していったバスコダガマ、マゼラン、コロンブスらがそれぞれの探査・探検を通じて人類に新しい知見と夢をもたらし、人間の生活圏を積極的に広げてきた。

以上の歴史を思い起こせば、1961年4月のガガーリンの有人宇宙飛行と1969年7月のアポロ11号の月面着陸は、コロンブスのアメリカ大陸発見(1492年10月)以上に、人類にとって大きな出来事と言わざるを得ない。このような歴史的な大イベントが発生した20世紀に生きて、たまたまそれを目にするのができた幸運を次の世代の幸福へとつなげていくために、我々は更に努力して宇宙開発を行わなければならない。宇宙は、人類が進出することにより更に大きな知見を獲得して進化していくのを待っている。

### 参考文献

- 1 ウエーブサミット講座, 宇宙環境科学, オーム社, 3月, 2000年.
- 2 米国地球物理連合ニュース, American Geophysical Union / Bell Laboratories / New Jersey Institute of Technology Joint Release, 6, March, 2002 AGU RELEASE NO. 02-08.
- 3 前田 坦, "太陽惑星環境の物理学", 共立出版, 12月, 1982年.
- 4 Tinsley, B. A., and Deen, G. W., "Apparent tropospheric response to MeV-GeV particle flux variations: A connection via electrofreezing of supercooled water in high-level clouds?", J. Geophys. Res., 96, 22283-22296, 1991.
- 5 Watanabe, T., and Fujita, E., "Meteorological correlation with solar-terrestrial phenomena: a provisional study", Proc. NIPR Symp. On Upper Atmos. Phys., No. 7, 60, 1994.
- 6 "Study of Radiation Fields and Dosimetry at Aviation Altitudes", Contract Number: F14P-CT950011, Final Report January 1996- June 1999.
- 7 NCRP, "Guidance on Radiation Received in Space Activities", National Council on Radiation Protection and Measurements, Report-98, 1989.
- 8 NCRP, "Acceptability of risk from radiation \_ Application to human space flight", National Council on Radiation Protection and Measurements, Symposium Proceedings No. 3, 1997.

- 9 有人サポート委員会宇宙放射線被曝管理分科会報告書, 宇宙開発事業団, 12月, 2001年及び事業団との私信.
- 10 井尻憲一, "宇宙の生物学", 朝倉書店, 12月, 2001年.
- 11 宇宙インフラストラクチャ研究会報告書, 5月, 2000年.



とみた ふみひこ  
富田二三彦

企画部企画室長 理学博士  
有人宇宙活動のための宇宙天気