

特集③

宇宙環境観測・変動監視の研究動向



総括ユニット 辻野 照久

1. はじめに

人類の活動が小さな集落内から国家レベルさらには地球レベルにまで広がり、宇宙開発や利用が本格化した今日においては、人類の生存や活動が太陽活動、地球磁気圏、宇宙飛行物体など、地球の外

部に広がる宇宙環境と密接に関係しているという認識が高まってきている。

本稿では、地球を取り巻く宇宙環境の変動を監視する上で、代表的な観測対象として、宇宙天

気、宇宙デブリ、地球近傍小惑星 (NEA) などの研究動向を紹介し、今後求められる政策の提案を行いたい。

2. 宇宙天気

2-1

宇宙天気と宇宙天気予報

「宇宙天気」とは、宙空領域（電磁圏 - 大気圏）での宇宙利用活動に最も影響のある宇宙放射線、電磁プラズマなどの環境変動を地上での雨や風などの気象現象にたとえたものである。

2003年10月23日以降、太陽表面に最大級の黒点が出現し、フレアと呼ばれる大規模な爆発現象が連続して発生し、地球が激しい磁気嵐に見舞われた。同時に、通信や放送の障害、電子機器の誤動作、人工衛星への影響、カーナビにも使われる衛星利用測位システム (GPS) の障害などの警報が米国海洋大気庁 (NOAA) から出された。太陽風中の衝撃波は10月24日15時25分 (世界標準時) に地球磁気圏境界に到達し、およそ15分後に極域では最大級のオーロラが発生し、計測された磁場変動は2,000nT (ナノテスラ) にも及んだ。(極域の地磁気はおよそ

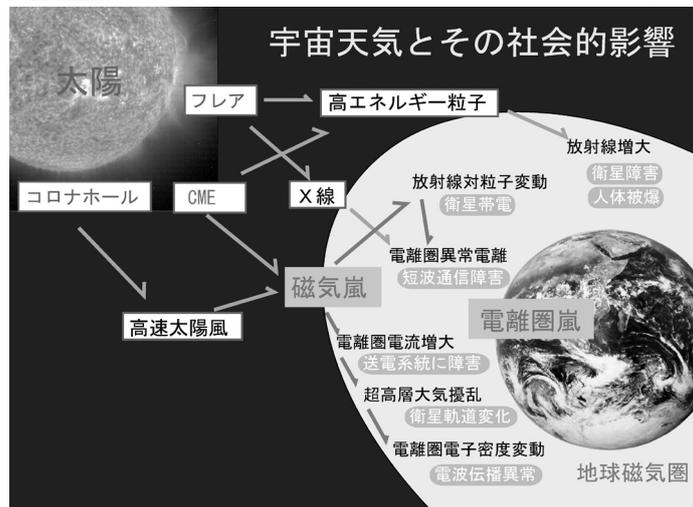
50,000nT、通常のオーロラでの磁場変動は500nT程度)

宇宙空間においてこのような現象が起こるメカニズムはおおむね図表1に示す太陽活動と地球磁気圏の相互作用として理解されている。今日では、宇宙天気の変動メカニズムの解明が進み、日常の観測体制の整備とデータの蓄積を通じて、宇宙天気の変化がある程度予想できるようになってきている。これを「宇宙天気予報」と

いい、既に国際的な取組みが始まっている。

宇宙天気予報の応用の例として、地球を周回する人工衛星に対する安全対策がある。宇宙天気の異常が予測された場合に、我が国や外国で過去に実際に行われた宇宙機の安全対策としては、①衛星運用をセーフモードに移行する (使わなくてよい機器の電源をオフにするなど)、②宇宙ステーションに搭乗している宇宙飛行士を

図表1 宇宙天気の概念



安全な場所へ待避させる、③打上げを一時見合わせる、④太陽電池パドルの向きを変える、⑤通信や観測ミッションを一時中断する、などの例がある。宇宙天気予報の精度向上や情報連絡体制の整備により、迅速かつ適切に衛星運用面での対応がとれるようになることが期待される。

2 - 2

宇宙天気の観測

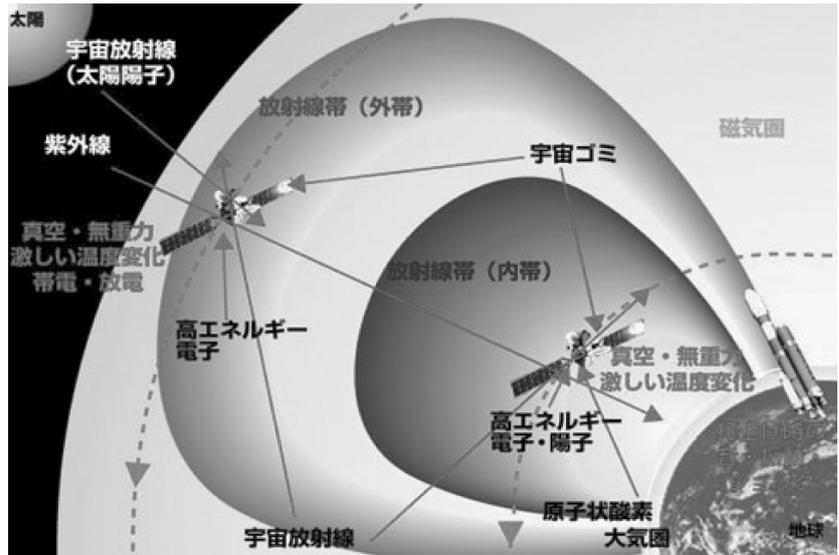
太陽面で爆発が発生したとき、高エネルギーの荷電粒子、放射線や巨大なプラズマ雲が太陽面から放出され、一部は地球に襲来するが、地球自身が磁石となって宇宙空間に向けて出している磁力線（地磁気）や大気がそれらを遮り、地球の生物を守っている。その地球の周りの、地磁気の影響が大きい宇宙空間は「宙空」と呼ばれる。特に、大気が中性から電離気体に変化する地球大気遷移領域（高度80km以上）から磁気プラズマに満たされた磁気圏（高度70,000kmまで）にいたる領域は、地上での人間活動と密接に関係している。

(1)宇宙放射線環境の観測

宙空領域では図表2に示すようにバンアレン帯と呼ばれる放射線帯（外帯と内帯）があり、形成と変動のメカニズムやその背景にある磁気圏ダイナミクスならびに粒子加速の物理などを総合的に理解する必要がある。宇宙放射線は宇宙機が故障する原因となるが、特に太陽面爆発に伴う放射線異常により宇宙機に不具合が発生することが多い。機能を喪失した人工衛星は宇宙デブリ（宇宙ゴミ）となる。

宇宙放射線環境はこれまで各国の衛星により計測されてきた。1989年に打ち上げられた欧州宇宙機関（ESA）の静止天文衛星ヒッパルコス、静止トランスファ

図表2 宙空領域における放射線環境と宇宙機障害



情報通信研究機構提供

ー軌道投入後、アポジモータの不具合で静止軌道投入に失敗したため、予定外にバンアレン帯を高頻度で通過することになり、その結果宇宙放射線環境に関する豊富なデータをもたらした。我が国ではMDS-1衛星が民生部品の耐放射線性を調べるために最初から静止トランスファー軌道投入を目指して打ち上げられた。

放射線環境の変動が衛星に与える影響を把握するためには、様々な軌道の衛星に放射線観測装置を搭載する必要がある。そのために、観測衛星の打上げ数の増大とセンサの小型・軽量化により他のミッションの衛星にも搭載できるようにすることは極めて有意義である。

今後重点的に研究すべきエネルギー範囲は、電子は0.01～20MeV（メガ電子ボルト）、陽子は0.1～500MeVである。

(2)電磁プラズマ環境の観測

電磁プラズマ大気により地球の中緯度には渦電流が、高緯度地方では磁力線に沿った電流が3次元的に流れている。この電流が変動すると地上における地磁気変動し、高緯度地方ではオーロラが発生する。従って、地磁気の変動を

地球規模で計測すれば、逆変換により100km高度の電離層における電磁プラズマ環境の変動を等価的に観測できることになる。

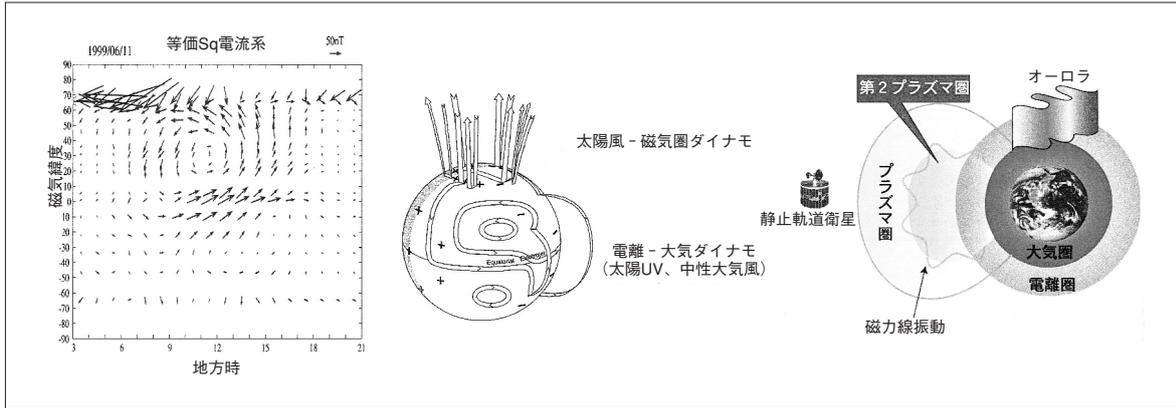
九州大学では環太平洋地磁気ネットワーク観測システム(MAGDAS)を構築し、世界54箇所の観測点から取得されるデータを九州大学に集めてリアルタイム解析を行い、地球近傍の宙空領域における3次元電流系のイメージングと大気プラズマ環境のモニタリングを行っている。

各観測点では、磁場観測点ペアを設置し、傾斜法(gradient method)によりペアの中間地点を通る磁力線に沿ってプラズマ密度を測定している(図表3)。

(3)地磁気の観測

地磁気は厳しい宇宙環境から地球を守る役割を果たしている。地磁気は日変化、月変化などの短期的な変動だけでなく、永年変化として70万年前に地球磁場が反転したことや、数百年前の観測との比較で地球の磁極が移動していることなどが判明している。21世紀から始まる1,000年間には人間活動が宇宙空間に広がる一方、世界的に地磁気の強度が小さくなっていく。そのために、太陽からの宇宙

図表3 MAGDASによる地磁気変動からの宙空電磁場観測

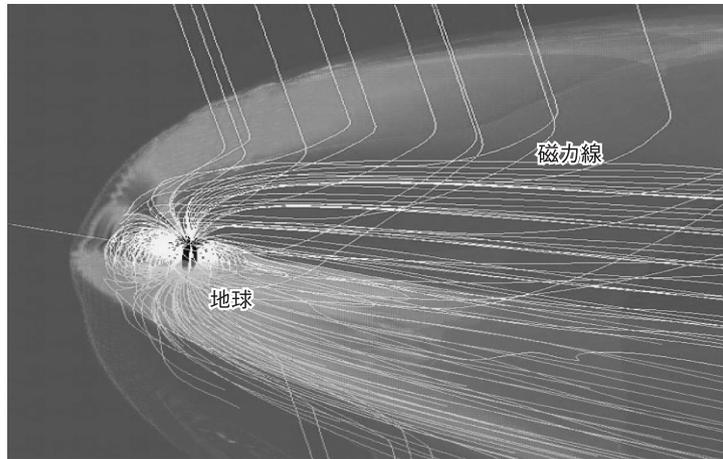


左) 収集された磁場データから推定される電離圏(高度100km上空)に流れる等価電流パターン
 中) 推定されるグローバルな宙空3次元電流系 (Richmond,1998)
 右) 磁力線振動から宙空プラズマ密度を推定

九州大学提供

放射線や荷電粒子流による生体の被ばく、電波障害や人工衛星の宇宙線被ばくによる故障、高緯度地方での送電線のショートなどの懸念がある。既に、ブラジルでは地磁気の異常な減少が観測されており、この地域への宇宙線の異常な降り込みなど、地球環境や生物への悪影響が出始めている。

図表4 磁気圏 - 電離圏グローバルシミュレーションの例



情報通信研究機構提供

2 - 3

数値シミュレーションの動向

コンピュータの高性能化や低価格化に伴い、各種の物理モデルに関して数値シミュレーションが行われている。宇宙環境の分野では、数値シミュレーションにより様々な太陽風変動に対して電離圏までの複合系の電磁エネルギー輸送過程や磁気圏 - 電離圏結合系の動特性を地球規模で解析し、統一的に理解することができる。宇宙天気を予測する磁気圏 - 電離圏複合系を研究する上で必須の道具となるものであり、より正確なプログラム、数値モデルの開発を行わなければならない。

磁気圏 - 電離圏モデルは個々の荷電粒子を流体に近似してシミュレーションを行うのに対し、個々の粒子の運動を方程式で解く粒子モデルも、近年の数値計算技術の進展と計算機の能力向上により地球規模でシミュレーションが行え

るようになり、磁気圏 - 電離圏擾乱、対流の変動、粒子効果などが矛盾なく理解できるようになった(図表4参照)。

2 - 4

宇宙天気予報に向けた世界的動向

(1)宇宙天気の国際的な観測計画

国際太陽地球系物理学委員会(SCOSTEP)は、太陽からの宇宙放射線や高エネルギー粒子による悪影響を最小限に抑えるために、宇宙環境変動の予報や人類の生活環境への影響の研究などについて国際的に対応することを関係各国に要請している。

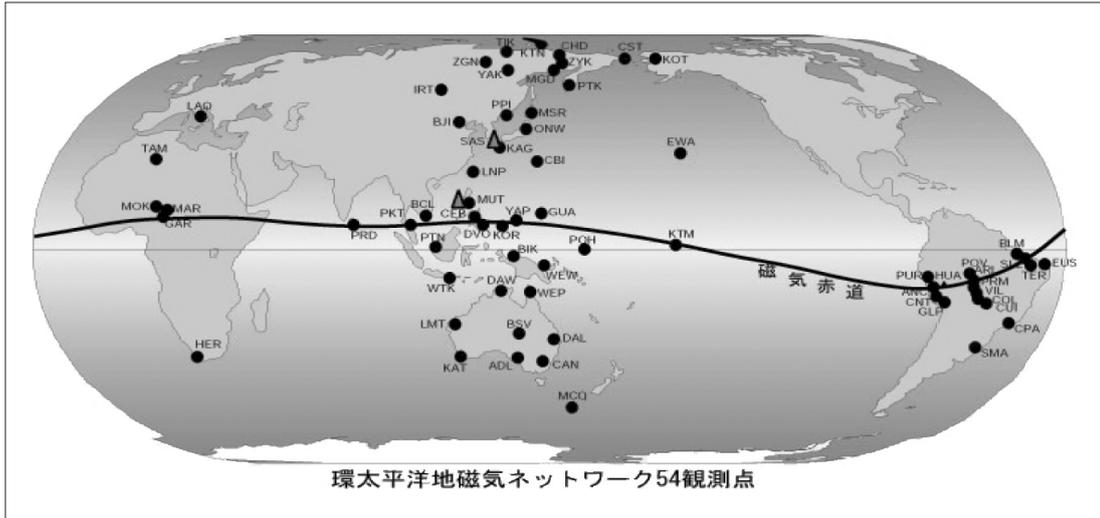
SCOSTEPは、2004年から国際協同観測研究事業として「太陽 -

地球系の天気観測」(CAWSES)を新たに設定した。米国、ロシア、欧州、日本などが連携協力して宇宙天気の観測と予測に取り組むべく準備中である。

米国では全米科学財団(NSF)の予算により、ボストン大学を中心に2004年から5年間で宇宙天気予報のシミュレーションシステムが開発される予定である¹⁾。

また、宇宙機での不具合発生の原因と考えられる太陽面爆発現象に伴う放射線異常増加や地球を取り巻く放射線帯の再形成と変動などの現象について、米国カリフォルニア大学(UCLA)及び英国南極調査局(BAS)から、ULF(超低周波)波動による高エネルギー粒子加速理論などが新たに提案されている。

図表5 環太平洋地磁気ネットワーク



環太平洋地磁気ネットワーク54観測点

九州大学提供

我が国では、情報通信研究機構 (NICT)²⁾、宇宙航空研究開発機構 (JAXA)³⁾、気象庁地磁気観測所⁴⁾、東京大学⁵⁾、名古屋大学⁶⁾、京都大学⁷⁾、九州大学⁸⁾等の国内の研究機関がそれぞれ得意とする分野や領域の観測研究に責任をもって役割分担し、かつ組織的に組み合わせた観測研究ネットワークを構築することによって国際的貢献を果たそうとしている。

(2)我が国の主要な観測システム

我が国では、1991年から2003年にかけて、九州大学が中心となって極東ロシア、赤道域の発展途上国等との国際的な協同研究事業を行い、環太平洋地磁気ネットワークシステム (図表5)を構築している。

このような地球規模のネットワークにより、地球近傍の宙空領域

における3次元電流系のイメージングなどが可能となるが、現状では空間分解能が十分ではない。今後システム性能を向上するためには、以下のような課題がある。

- ① 3次元電流系のイメージング及び大気プラズマ環境のモニタリングを行うのに十分な地球規模での磁場観測点ペア及び電離層レーダ観測網を整備し、取得データをリアルタイムで処理できるシステムを構築すること。
- ② 刻一刻と変動する宙空領域における3次元電流系を可視化し、宙空領域における電磁環境をリアルタイムに監視するとともに、人工衛星ではカバーしきれない近地球領域における高エネルギープラズマ粒子分布のリモートセンシングと宙空領域における電磁環境のイメージングシ

ステムを開発すること。

- ③ GPS衛星の時刻信号を用いた電離層プラズマ密度多点観測との比較によって宙空領域と電離層の相互作用をモニターできるシステムを構築すること。GPS地上受信機は現在地上の広範囲にわたって分布しているが、空白域もあり、観測点を充実していく必要がある。

世界各国が長年研究してきた地球規模での電磁気観測の研究成果、新たな複合系のシミュレーション解析法の導入、継続的な観測データの蓄積などが有機的に組み合わせられることによって、「宇宙天気」の研究が推進され、より精度の高い「宇宙天気予報」がリアルタイムで得られるようになることが期待される。

3. 宇宙デブリ

3-1

宇宙デブリとは

宇宙デブリとは、人類が宇宙開発活動を開始して以来、宇宙に放出してきた多数の人工衛星やロケット上段の残骸などの宇宙のゴミ

のことである。図表6に示すように、宇宙デブリは地球の低軌道に集中しており、中高度や静止軌道、その外側まで広がっている。不測の事態で運用が停止してしまったり、ミッションを完遂して運用を終了した低軌道 (高度1,000km以下)の衛星は、宇宙ゴミとなって

も引き続き毎秒7キロメートル程度の超高速で地球を周回しており、国際宇宙ステーションや作動中の衛星と衝突すれば損傷や故障の原因となり、船外活動中の宇宙飛行士に対する障害の発生も懸念されている。宇宙デブリは、高度1,000km以上のものはほとんど落

下してこない。それ以下の高度でも600kmを越えるものでは落下まで20年以上の長い期間がかかり、その間、宇宙デブリ対策を念頭に置かずに宇宙開発をこのまま続けられれば、宇宙にはこれらの宇宙デブリが増え続けるだけになる。宇宙デブリの観測、防御、除去、低減対策などに関わる基礎研究の推進が緊急の課題となってきた。

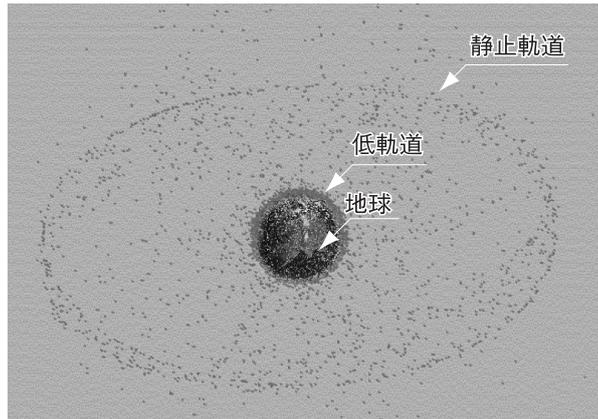
3-2

宇宙デブリの危険性

近年、地球周回軌道から回収された人工衛星や地球に帰還したスペース・シャトルの窓などの表面を検査して多数の衝突痕が見つかり、既存の地上観測システムでは検知できないような多数の微小宇宙デブリ（直径がミリメートル級以下のデブリ）の存在が予想以上に深刻であることが明らかになった。これらの微小な宇宙デブリは地球周回軌道にある人工衛星やロケット上段の爆発などによって発生したものであるが、微小とはいえ、毎秒7キロメートルという軌道速度を考えると、その破壊力は想像をはるかに絶する（例えば直径1センチメートルの宇宙デブリが低高度で衝突すると、その衝撃は乗用車が時速60キロメートルで衝突した衝撃と等価である）ので、時には活動中の人工衛星に対して、致命的な破壊をもたらす。エネルギー的観点から直径1mm以上であれば船外の宇宙飛行士に危険をもたらす、1cm以上なら、国際宇宙ステーション自体に深刻なダメージを与える可能性さえある。

このように宇宙デブリは将来の宇宙活動にとって大きな障害となるので、そのような危険を避けることが重要なテーマとなってくる。

図表6 微小な宇宙デブリの分布状況



九州大学提供

3-3

宇宙デブリの観測

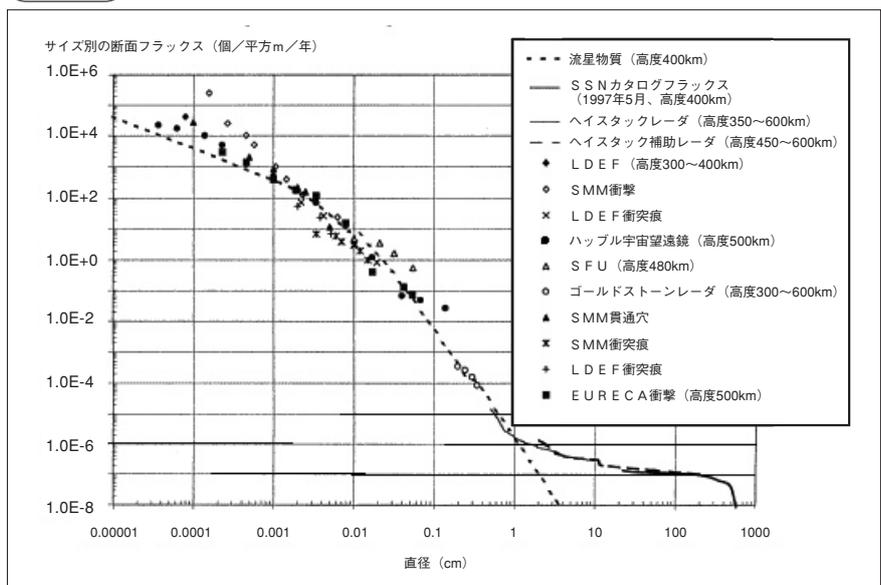
低軌道の宇宙デブリのうち、直径10cm以上の大きさのものは大型レーダなどを用いた地上観測により軌道が把握され、データベース化されている。宇宙デブリの軌道は、軌道上で受けるさまざまな外的な力（摂動力＝大気抵抗や月・太陽の引力等）の影響で刻々と変化するので、定期的に追跡を行い、最新の軌道データにアップデートしている。直径数mm以

下くらいはかなり小さい宇宙デブリについては、低軌道から回収されたLDEF（米）、EURECA（欧）、SFU（日）などの人工衛星の表面検査により、図表7に示すようにほぼサイズ別分布が分かるようになってきた。

数mmから数cmくらいの中間のサイズの宇宙デブリや中・高軌道の宇宙デブリの観測は未だ不十分である。観測技術の向上により中間サイズや中・高軌道のものでカタログ化が進むことが望まれている。

国際的な宇宙デブリ観測の動き

図表7 宇宙デブリのフラックスモデル



国連資料⁹⁾より

として、1993年4月に設立された国際機関間スペースデブリ調整委員会 (IADC) は、1999年より静止軌道近傍及び低軌道の宇宙デブリ観測キャンペーンの実施をメンバー国に要請し、各国は光学望遠鏡や地上レーダにより宇宙デブリの観測を行った。

(1)宇宙デブリの光学観測

光学観測は宇宙デブリが反射する太陽光を観測しており、ある程度高い高度の宇宙デブリに適用される。光学望遠鏡の性質上、原理的に夜間しか観測ができないが、特に低高度の宇宙デブリの場合、夜間には地球の陰に入ってしまう、太陽光を全く反射しない時間帯が大半であるため、観測可能時間は夜明け前や日没時の数時間に限定される。

静止軌道近辺の宇宙デブリは春分や秋分の時期に地球の陰になる期間の一定時刻を除けば観測可能である。米航空宇宙局 (NASA) が50cm以上の宇宙デブリの観測、ESAでは20cm以上の観測を行っている。日本では美星スペースガードセンター (岡山県小田郡美星町) において、現在は50cm以上、システムアップできれば20cm以上の観測を目標として努力が続けられている。

現在、世界の主要国で宇宙デブリを観測している光学望遠鏡の比較を図表8に示す。望遠鏡の視

野角は、数値が大きいほど視野が広くなり、同時に観測できる天空領域が広がる。我が国の望遠鏡は米国に比べて主鏡直径は小さいが、視野角が非常に大きく、かつ宇宙デブリ観測専用であることから、外国の望遠鏡に比べてフルに観測できる利点があり、極めて条件の良い施設といえる。

静止軌道あるいは中・高軌道 (静止トランスファ軌道など) から回収された人工衛星はこれまでになく、地上での光学観測の重要性は大きい。

より小さな宇宙デブリの観測を可能にする光学望遠鏡を開発し、運用を行って、宇宙デブリの光学観測を充実させることが必要である。

(2)宇宙デブリのレーダ観測

レーダによる観測は、地上から発射した電波が宇宙デブリで反射し、その反射波を地上で受信するという原理から、光学観測に比較して、探知性能に物理的な制約があり、およそ1,000km前後の距離が実用的な観測の限界である。

NASAはアリューシャン列島にある軍事用のコブラ・デー (Cobra Dane) システムを使って、直径1cmに迫る感度で宇宙デブリの実験的観測に着手しているが、実用的には前述のように直径10cm以上のデブリの観測が大半を占めている。ただし、このシステムは元来旧ソ連のミサイル発

射を監視するための施設であり、北緯52.7度という高緯度にあるため、宇宙デブリの中でも軌道傾斜角の小さいものは観測できない。

ESAは応用自然科学研究協会 (FGAN) のレーダで直径2~3mmまでのデブリが観測可能であるが、レーダの方式がパラボラ方式であるため、広範囲の瞬間的な電波サーチができないことから、極めて限定した空間における能力しかない。

我が国では上齋原スペースガードセンター (岡山県苫田郡上齋原村) のレーダによるデブリの実験観測が2004年4月より開始された (2004年4月号トピックス参照)。当該システムは、世界的に待望されている直径10cm以下の低高度宇宙デブリを探知できるような能力を持つ実用システムを将来開発するための技術的な知見を得るために、常時実験観測を行っている国内唯一の宇宙デブリ観測専用レーダである。

小口径の天体望遠鏡があれば民間人でも参加できる光学観測と異なり、大型施設を必要とするレーダ観測は国家プロジェクトでないと実現できない。我が国はこれまでレーダ観測に対して組織的な取り組みが十分でなかったが、上齋原スペースガードセンターのレーダ観測システムの成果を踏まえて、我が国でもコブラ・デーやFGANに匹敵するシステムを低緯度帯に建設し、米欧と同等以上の宇宙デブリ観測を行うようになることが望まれる。

(3)衛星によるデブリ観測

衛星による宇宙デブリの観測はまだ実現していないが、もし実現すれば微小な宇宙デブリを観測する上で地上観測とは全く異なる効果が期待できる。衛星による観測方式としては、例えばPVDF、プラズマ、イオンなどによる方式が

図表8 世界の宇宙デブリ光学観測施設の比較

国名	運用機関	主鏡直径 (m)	視野角 (度)	観測可能等級 (等星)
アメリカ合衆国	NASA	3	0.3	21.5
日本	JAXA/JSF	1	3	19.5
スイス	ベルン大学	1	0.5	19.5
ロシア	RSA	1	0.2	19
フランス	CNES	0.9	0.5	19
イギリス	グリニッジ天文台	0.4	0.6	18

国連資料⁹⁾より

提案されているが、何れも微小デブリの衝突数をカウントするだけである。

人工衛星は搭載機器等に電力を供給するために太陽電池を利用しているが、要求電力を供給するために太陽電池パネルの面積は広く、静止衛星などでは100m²を超え、そのために微小デブリの衝突が絶えない場所となっている。このことを逆用して、太陽電池アレイを検査対象とするオンボードの表面検査システム（カメラ）を開発すれば、衛星によるデブリ観測を行えることになる。

衝突痕画像を取得する方式は太陽電池の損傷状況を把握する上でも重要なデータであり、実現が望まれる。九州大学では、オンボード表面検査システムの概念設計を行い、カメラと画像処理システムを組み合わせたモデルを試作した。衝突痕を発見するとそこにカメラを向けてクローズアップし望遠画像を撮影するという一連の動作を自動で行うことに成功している。

3 - 4

宇宙デブリ防御対策

宇宙デブリが万一衝突しても宇宙機の運用を継続できるように、宇宙デブリから防護する研究も行われている。例えば、国際宇宙ステーションで進行方向の最前部に接続される日本実験モジュール「きぼう」には、宇宙デブリ緩衝用のバンパーを設け、直径1cm以下の宇宙デブリであれば機体貫通を防げるようにしている。

また、バンパーで防御しきれない大きな宇宙デブリに対しては、国際宇宙ステーションと宇宙デブリの軌道計算を常に行い、衝突を回避するように高度を変更する等の措置をとっている。

3 - 5

宇宙デブリの低減と除去

人類が安全に宇宙活動を永续させるためには、宇宙デブリとの衝突を回避する等の対処療法のみならず、根本的に宇宙デブリによる

宇宙の環境悪化を防がなければならない。そのためには、まず「宇宙デブリを発生させない」という原則を尊重し、宇宙デブリをほとんど放出しない人工衛星、ロケットを設計・開発することが重要である。

こういった観点では、我が国では、世界各国に率先して、ロケット上段や衛星に対するデブリ低減対策を施しているところであり、世界的にもデブリ発生低減に関する評価がかなり高い。

こうした一例として、静止軌道上で役目を終えた衛星に対して、より高い軌道へ移動させることにより、貴重な資源である静止軌道に宇宙デブリを残さないようにしているような運用は、世界的にデブリ問題が活発に論じられるようになった90年代よりも10年も早い段階で、自発的に実施してきた実績がある。

先端的な研究としてはレーザーにより宇宙デブリの軌道を変えて大気圏に再突入させるというようなアイデアもあるが、実現はかなり先のことになるとと思われる。

4. 地球近傍小惑星 (Near Earth Asteroid : NEA)

火星と木星の間に小惑星帯（アステロイド・ベルト）がある。小惑星は惑星になれなかった天体であるとか、あるいは惑星が破碎されて多数の小惑星が生じたという説がある。小惑星の最初の発見は1801年1月1日のことである。その後19世紀には100個あまりが見つかった。多くの小惑星は火星と木星の間の軌道で公転しているが、長楕円軌道を取り、地球軌道と交差していて、地球と衝突する恐れがある小惑星もあり、それらは地球近傍小惑星（NEA）と呼ばれる。NEAが最初に見つかったのは1898年のことである。

4 - 1

NEA 衝突による被害の例

1908年6月30日の朝方、ロシア極東部の僻地ツングースカに直径80m程度の小惑星が突入し、地上数kmの所で大爆発を起こした。80km × 100km程度の範囲の樹木がすべてなぎ倒され、爆発直下には巨大な穴があげられた。もし、この災害が東京のような人口密集地で起れば、何百万人、千数百万人が一挙に死亡していたであろう。このような小惑星の衝突が起こる確率は全地球上で約1,000年に1回である¹⁰⁾。

より巨大な小惑星の衝突確率ははるかに低くなり、直径1kmのもので、100万年足らずに1回、直径10kmでは1億年に1回である。これらの確率は図表9のように地球軌道と交互している小惑星の推定値から求められていて、かなり正しい値を示している。

1980年、ノーベル賞学者のルイーザ・アルバレッツらは、6,500万年前に恐竜が絶滅したのは直径10kmの小惑星衝突が原因であると発表した。その衝突により生じた直径180kmにも及ぶクレーターが発見されたのは1991年のことである¹¹⁾。

衝突による人類社会への影響

は、人類絶滅から人類文明壊滅、小さな国一国の壊滅まで多様である。小惑星衝突の頻度は非常に低い、発生すれば巨大な災害をもたらす問題であることに留意しなければならない。

4 - 2
NEA の観測について

(1) NEA 観測動向

1960年代以降天文学者が新しい観測装置を開発してから、その発見は飛躍的に増え、発見小惑星の数は100万個にせまり、NEAも3,000個に近づきつつある。

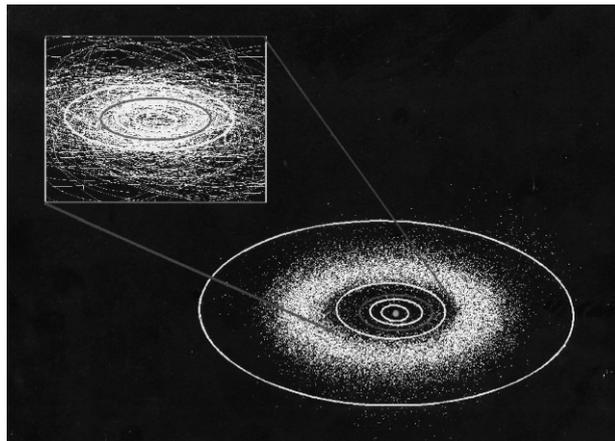
このような観測を積極的に進めているのはアメリカである。我が国でも特定非営利活動法人(NPO)日本スペースガード協会¹²⁾が未発見の地球近傍小惑星の発見に努力している^{13, 14)}。後に述べるように、NEAが地球に衝突すると判った時の対策はかなり大がかりなものになるが、地球に衝突する恐れのある危険な小惑星を発見し、その追跡観測を行い、軌道を求めなければ何事も始まらないことを強調しておきたい。小惑星の飛行軌道はニュートン力学で解ける範囲にあり、衝突予測を十分早い段階で出すことができる。

(2) NEA 観測継続の必要性

NEAをすべて発見し尽くさなければ、ある日突然未確認の小惑星が衝突して巨大災害が起りうる確率が残る。それを避けるためにはすべてのNEAを発見し尽くすのに十分なNEA検出に特化した望遠鏡を世界に数十台配置する必要がある。

さらに、せっかく発見しても見失ってしまったら意味がなく、常に最新の軌道状況を把握しておくために追跡観測用の望遠鏡が必要である。現在のところ、この部分はアマチュア天文家のボランティ

図表9 太陽系内(木星より内側)の小惑星の分布



地球軌道より内側まで達するものも多く見られる。左上は火星より内側の拡大図で、地球軌道周辺に達する小惑星の軌道が示されている。

日本スペースガード協会提供

ア観測に頼っている部分が多い。新しい小惑星の発見数が増えているのに伴い、専門家で組織した追跡観測を推進すべき時期が近づいている。

4 - 3
NEA 衝突を防ぐために

万一、小惑星が地球に衝突することが判れば、それによる災害を防がなければならない。衝突で解放されるエネルギーは、図表10に示すように広島型原子爆弾の何万倍、何億倍にもなるので、そ

れによる災害を防ぐことはできない。地球には大気があるおかげで、毎月1回くらいの頻度で地球大気に突入してきている直径10m程度より小さなものは、超音速のまま地表まで落下することはないので、大きな災害にはつながっていない。直径数十m以上の大きな小惑星に対しては衝突を避ける手段が必要である¹⁵⁾。

先にも記したように小惑星の軌道はニュートン力学で求められる範囲にあるので、1度軌道が確定すれば、何年先に衝突するかが示される。仮に30年先のことであ

図表10 衝突天体のエネルギー

いろいろなサイズの天体の地球衝突での解放エネルギー		
小惑星 (m)	彗星 (m)	エネルギー (TNT 火薬でメガトン)
10	6	0.024
I 国規模の破壊		
60	36	20
80	48	50
150	90	340
II 全地球規模の破壊		
500	300	13000
1,000	600	100,000
10,000	6,000	100,000,000
広島型原爆		0.02
核の冬		10000

れば、その時点で小惑星の軌道運動に対して1 cm/sの速度変化を正しい方向に加えることができれば、30年後には地球の直径以上離れた場所を通過させられる。ただし、正しい方向に押すためには、NEAの質量分布、組成、形状（パウダー状か塊状か）などの物理的パラメータを明らかにしなければならない。このためにも事前に宇宙機による探査が必要である。このような技術の開発は簡単ではないが、すでにアメリカや日本の探査機が特定の小惑星に向かって接近するという実験を行っており、そのようなプロジェクトを飛躍的に拡大すれば解決しうる問題である。いずれにしてもその前にやらねばならないことは、危険な小

惑星を発見し尽くし、突然衝突が起る確率を零に近づけることである¹⁶⁾。

4 - 4

今後必要となる観測網の整備

我が国における組織的な観測としては日本スペースガード協会が美星スペースガードセンターにおいてNEAを観測しているのが唯一の活動である。一方、アメリカでは5つのチームがNASAの支援を受けてNEA観測を推進し、NASAの第一目標である直径1 km以上の千数百個（推定総数）のうち600個以上をすでに検出している。

我が国がこの面で十分に貢献す

るには、美星スペースガードセンターのような施設を増やしていく必要がある。整備の順序としては以下のような段階がある。

- ①直径1 km以上の巨大NEAの検出をより効率的に行う美星スペースガードセンターの直径1 mの光学望遠鏡に匹敵するものを早急に複数台建設し運用する。
- ②既発見NEAの増加に伴い、軌道が確認されたNEAを継続的に追尾するための小型望遠鏡を多数設置する。
- ③できうれば、直径100m以上のNEA探査のために口径4 m以上の望遠鏡を建設する。

5. まとめ

5 - 1

人類としての危機管理

我々の身の回りには多くの潜在的脅威がある。地震や水害などの突発的な自然災害や、事故・テロなどの人為的災害、食糧危機やエネルギー危機など、生活基盤を脅かす事態がある日突然我が身に降りかかる可能性があることを認識しておくことは危機管理の第一歩である。

(1)宇宙天気に関して

宇宙開発及び利用の進展により、GPS、通信放送、気象観測など、宇宙利用による効用は国民生活に深く溶け込んでいる。これらのミッションを遂行する衛星は宇宙から地上へそれぞれ意味のある電波を送っており、もしそれらが途絶えたときに地上の活動にどのような影響を及ぼすかを危機管理の観点から考慮しておかなければならない。宇宙天気の激変が宇宙

機の健全な運用を妨げる事例はいくつも発生しており、宇宙天気予報によって宇宙天気の変化を知らせ、宇宙機を運用する機関が事前に所要の対策を施せるような活動を継続・強化する必要がある。そのためには、本文中に述べたような宇宙天気を観測する各種システムの開発・整備が求められており、国としてできるだけ支援を行うことが望まれる。

(2)宇宙デブリに関して

今後打ち上げる宇宙機の健全性を高める上で、宇宙デブリの低減や除去などの対策を行っていく必要があり、そのような活動は衛星打上げ国の責務である。宇宙デブリの観測においても、我が国は国際的な役割を担いうる技術や施設を備えており、一層強化していく必要がある。

(3)地球近傍小惑星に関して

今後数年程度のうちに地球近傍小惑星との衝突の危機に直面する

可能性は低いと思われるが、これまであまり考慮されてこなかった小頻度大災害問題に対する危機管理の観点から言えば、危険を把握できる体制を整備しておくことが是非必要である。

5 - 2

地道な観測研究に対する組織的な支援

宇宙環境の変動が地上の人間活動にどのように影響を及ぼすかはこれから本格的に解明される場所であるが、現状では国内各研究機関がそれぞれの得意な領域を分担してボランティア的な努力も含めて研究や運用が行われている状況である。

特に、国立大学法人などでは、観測機器の開発や整備に多額の費用を要するだけでなく、定常的な観測の実施のためにもある程度の費用や人員を割く必要がある。ボランティア的な研究体制に頼っていると、組織的に地道な研究を継

続することが困難となる。学問的関心とは別の動機を持つ人々によって、継続的な観測を支えることが必要になる。

地球を取り巻く宇宙環境の観測・監視は国際的な協力の下で行われているが、我が国が国際社会の有力なメンバーとしての責務を果たすには、第一線の研究者の努力だけに頼るのではなく、運用体制まで考慮した国の組織的な支援が望まれる。

5 - 3

我が国の水準

宇宙天気、宇宙デブリ、地球近傍小惑星に関して、米国は技術的レベルにおいても施設設備の物量においても世界各国をはるかに凌駕する存在であるが、我が国は九州大学の環太平洋地磁気ネットワークや宇宙デブリの防御、低減対策、美星スペースガードセンター

の広視野角大型望遠鏡の活用などで世界でも一目置かれる存在である。しかし、残念なことにその活動を支える関係者の地道な努力がその人たち以外にあまり知られていない。有識者やボランティアの活動を支援することで、我が国は宇宙環境観測・変動監視の分野での国際的な役割を一層高めることができる。

6. おわりに

地球に生きるものにとって、宇宙は決して縁遠い存在ではない。宇宙は地球生命にとってかけがえない環境であるとともに、時には牙を剥く存在でもあることを認識する必要がある。そのような宇宙の状況を観察し、変動を把握して地上での活動を安全・安心なものとするために、研究者の活動を支援し、若い世代の関心を高めることの重要性を強調しておきたい。

謝 辞

本稿をまとめるにあたり、宇宙天気に関しては国立大学法人九州大学宙空環境研究センター長の湯元清文教授、宇宙デブリに関しては宇宙航空研究開発機構の田島徹副主任開発部員、地球近傍小惑星に関しては特定非営利活動法人日本スペースガード協会の磯部 瑋三理事長ならびに美星スペースガードセンターの関係者に討議や資料提供などで多大な協力をいただきました。ここに厚く感謝の意を表します。

参考資料

- 1) 朝日新聞 2002年9月30日夕刊
- 2) 情報通信研究機構 (NICT) の太陽地球環境情報サービスのホームページ：
<http://hirweb.nict.go.jp/index-j.html>
- 3) 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の宇宙環境データベース (SEES) ホームページ：
<http://sees2.tksc.jaxa.jp/Japanese/index.html>
- 4) 気象庁地磁気観測所のホームページ：
http://www.kakioka-jma.go.jp/index_j.html
- 5) 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻のホームページ：
<http://www.eps.s.u-tokyo.ac.jp/>
- 6) 名古屋大学太陽地球環境研究所のホームページ：
<http://shnet1.stelab.nagoya-u.ac.jp/ste-www1/index-j.html>
- 7) 京大大学生存圏研究所のホームページ：
<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/>
- 8) 九州大学宙空環境研究センターのホームページ：
<http://www.serc.kyushu-u.ac.jp>
- 9) Technical Report on Space Debris 1999 国際連合宇宙空間平和利用委員会
- 10) 朝日新聞、1999年11月24日、社説「天体の衝突 人類としての危機管理」
- 11) 中央公論 1998年 p.216～225 「“小惑星 地球に衝突” という恐怖」
- 12) 日本スペースガード協会ホームページ：
<http://www.spaceguard.or.jp>
- 13) 日本経済新聞、2000年6月4日、「衝突の危機から地球を守る」
- 14) 読売新聞、2000年12月14日、「地球ニアミス小惑星探せ」
- 15) 朝日新聞、2003年6月18日、直言「小惑星の衝突にも備えを」
- 16) ニュートンプレス、1998年7月、「小惑星衝突～最悪の被害をいかに回避するか?」、日本スペースガード協会編

《用語のフルスペル・解説》

BAS	British Antartic Survey 「英国南極調査所」
CAWSES	Climate and Weather of the Sun-Earth System 「太陽-地球系の天気観測」
CME	Coronal Mass Ejection 「コロナ質量放出」
CNES	Center National d' Etudes Spatiales 「フランス国立宇宙研究センター」
ESA	European Space Agency 「欧州宇宙機関」
EURECA	European Retrievable Career 「ユーレカ (欧州回収型無人フリーフライヤー)」
FGAN	Forschungsgesellschaft fur Angewandte Naturwissenschaften 「応用自然科学研究協会」 (ドイツ)
GPS	Global Positioning System 「全球測位システム」
IADC	Inter- Agency space Debris Coordination committee 「国際機関間スペースデブリ調整委員会」
JAXA	Japan Aerospace eXploration Agency 「独立行政法人宇宙航空研究開発機構」
JSF	Japan Space Forum 「財団法人日本宇宙フォーラム」
LDEF	Long Duration Exposure Facility 「エルデフ (長期曝露装置)」
MAGDAS	MAGnetic Data Acquisition System 「環太平洋地磁気ネットワーク観測システム」
MDS- 1	Mission Demonstration test Satellite - 1 「民生部品・コンポーネント実証衛星」
NASA	National Aeronautics and Space Administration 「米国航空宇宙局」
NEA	Near Earth Asteroids 「地球近傍小惑星」
NICT	National Institute of Information and Communications Technology 「独立行政法人情報通信研究機構」
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration 「海洋大気庁」(米国)
NPO	NonProfit Organization 「特定非営利活動法人」
NSF	National Science Foundation 「全米科学財団」
PVDF	Polyvinylidene Fluoride 「ポリフッ化ビニリデン (圧電性があるプラスチック)」
RSA	Russian Space Agency 「ロシア宇宙庁」
SCOSTEP	The Scientific Committee On Solar-TErrestrial Physics 「国際太陽地球系物理学委員会」
SEES	Space Environments Effects System 「宇宙環境データベース」
SFU	Space Free Flyer Unit 「宇宙実験・観測フリーフライヤー」
SMM	Shuttle Mir Mission 「シャトル・ミールミッション」
Sq	geomagnetic Solar Quiet daily variation field 「地磁気静穏日日変化場」
SSN	Space Surveillance Network 「宇宙監視ネットワーク」
TNT	TriNitroToluene 「トリニトロトルエン」
UCLA	University of California, Los Angels 「カルフォルニア大学ロサンゼルス校」
ULF	Ultra Low Frequency 「超低周波 (1mHz ~ 1Hz)」

