

### 3 社会との関わり

2章で詳述したように、本学会は、太陽地球環境、超高層領域、固体地球系に生起する様々な現象について研究を行ってきた。その活動は地球・宇宙電磁気学の萌芽に始まり、宇宙物理学の開拓、それを推進するための宇宙工学の発展にも大きく貢献している。例えば、科学衛星による宇宙環境観測の推進、宇宙機と宇宙プラズマの相互作用の精査、宇宙推進システムの開発などは、本学会の研究活動と密接に結びついている。

一方、機械化・情報化が高度に進み、人類がその活動域を拡大した現代社会は、常に様々な自然災害の脅威にさらされるようになってきている。それに伴い、本学会で行われる研究活動は、災害の原因となる自然現象を理解しそれに対処する方策を示すという実学的側面にもまた広がってきた。日本列島はプレートの沈み込み帯縁部という地殻活動の活発な地域に位置するため、我が国はこれまで、地震・津波や火山噴火などによる災害をたびたび経験してきた。そして、いまや社会基盤の一部となった、成層圏を網の目様に飛行する航空機群、科学探査、環境モニタリング、資源調査、通信、測位といったあらゆる用途の人工衛星、およびそれらを結びつけるネットワークインフラストラクチャーは様々なレベルでの宇宙災害を被る可能性があり、人類の活動領域が宇宙空間へと拡大する中、宇宙飛行士の人体被曝リスク低減も避けて通れない大きな問題となっている。このように高度に発達した人類の活動を安定的に維持し、それに対する災害のリスクを最小限にとどめるために、我々はこれまで蓄積してきた科学成果を知識基盤として再構築し、社会に還元する必要がある。今後進めるべき科学的施策も太陽地球惑星圏システムに発露する現象の発見と理解だけではなく、そのモニタリング・予測へと踏み込むことを躊躇すべきではない。

宇宙工学の発展や宇宙地球電磁気現象のモニタリング・予測成果を知識基盤として整え、宇宙工学の発展、自然災害・宇宙災害のリスク軽減等を通じて社会に還元することが、太陽地球惑星圏科学への信頼、ひいてはその発展へと繋がっていくであろう。本章では、宇宙地球電磁気学、宇宙天気・気候科学、宇宙工学の進展について、人類活動を支える知識基盤の構築という観点から、現状の報告と将来への提言を行う。

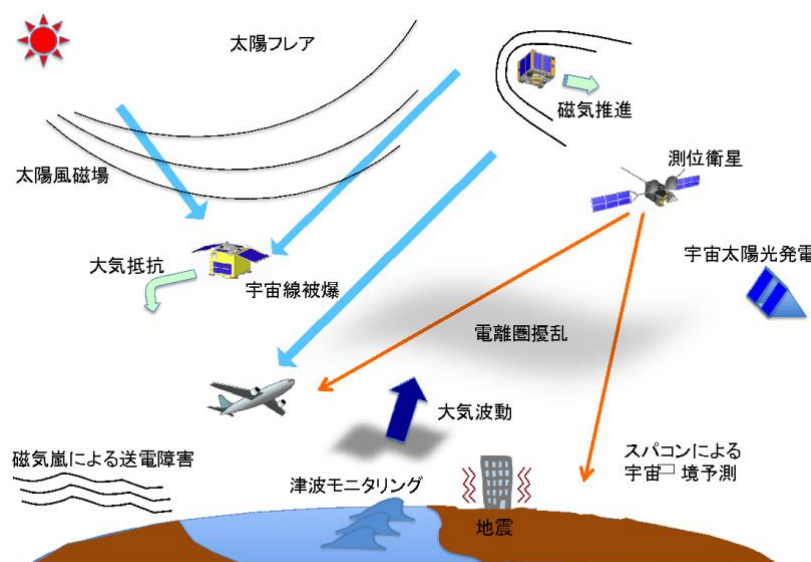


図 3.1 太陽地球圏と人間活動とのかかわり

## 3.1 人類社会基盤への影響

### 3.1.1 太陽地球圏現象が人類の宇宙での活動に与える影響

宇宙利用時代に入って半世紀以上、人類は宇宙への進出を続け、そこに構築されたシステムは日常生活の社会基盤と密接に結び付くまでに至った。このように人類が新たな生存圏を開拓した結果、特有の問題も生じるようになった。

宇宙機・観測機器への影響：過去には、多くの重大な衛星異常や故障が報告されている。故障の主因は、

- ①表面帯電：サブストームに伴う粒子の注入により、衛星表面にプラズマが帯放電し障害を引き起こす現象
  - ②内部帯電：磁気嵐後の放射線帯の高エネルギー電子フラックスの増加により、衛星交代を突き抜けた電子が内部ケーブル等に帯放電し障害を引き起こす現象
  - ③シングルイベントアップセット：太陽フレアに伴う高エネルギー粒子等により、衛星の電子機器（半導体素子）に衝突した際に信号エラーを引き起こす現象
  - ④トータルドーズ：太陽フレアに伴う高エネルギー粒子等による衛星の損傷が蓄積し衛星機能が低下・喪失する現象
  - ⑤大気ドラッグ：太陽活動の増大により地球大気が膨張し、低高度衛星との摩擦が増加することにより衛星軌道が変化する現象
- などがある。

原子状酸素による表面材料・被膜の酸化、その結果生じる剥奪も、特に低高度衛星には深刻である。これらの影響については、「受けた影響（発生後の原因究明）」と「受ける可能性の影響（発生する可能性と軌道上運用対策）」の両方を考えて行く必要があり、“発生環境の予測”についても研究を深めていく必要がある。また、月着陸や惑星表面探査などの計画に向けては、宇宙線等による二次的に発生する中性子等の影響についての検討も議論していく必要があろう。

大気ドラッグに関しては特に高度 500 km 以下を飛翔する低高度衛星においては、軌道保持のために大気密度変化に伴う空気抵抗を考慮する必要があり、宇宙天気との関連では、磁気嵐などの突発現象による空気抵抗の変化が宇宙機に及ぼす影響を理解し予測する必要がある。現在、宇宙機の落下予測を精度良く実施することが不可能な原因の一つには、このような大気密度変動を正確に予測できていないことが挙げられる。今後の課題としては、地上磁場擾乱、電離層電場観測などから見積もられた大気膨張率と実際の衛星軌道変化の比較研究による経験モデルの作成と、磁気圏-電離圏-熱圏結合シミュレータによる第一原理的な衛星高度での大気密度変動モデル作成等が挙げられる。特に、高度 150-250 km での大気密度は計測例が極めて少なく、例えば、超低高度衛星技術試験機「つばめ」などによる実測データも磁気圏-電離圏-熱圏結合シミュレータに反映させることが望まれる。

新たな宇宙探査・宇宙インフラの実現に向けた課題：人類の新たな可能性を拓くためには、宇宙探査の継続も不可欠である。そして、深宇宙の探査には、長時間にわたって推進力を得ることのできる装置が必要である。はやぶさ、はやぶさ 2 に利用されたイオンエンジンは代表例である。そして、そのイオンエンジンの動作や高効率化には本学会がもつプラズマに対する知見が有用である。また、更に、太陽光圧による薄膜推進、太陽風圧による磁気プラズマ推進など新しい推進装置開発に対し、当学会における宇宙プラズマの視点・知見から貢献していくことも重要である。

宇宙太陽発電衛星（SPS）は、クリーンで安定した新エネルギー源を確保する手段として有望視されているが、巨大建造物を宇宙空間に構築することによる宇宙環境への影響や、エネルギー伝送用マイクロ波と宇宙プラズマや大気との相互作用による影響などは、宇宙プラズマ中の物理素過程の理解が不可欠である。すなわち、宇宙建造物やプラズマとマイクロ波の相互作用などに関わる大規模シミュレーション、さらにはロケット実験による直接計測など、将来の宇宙利用を視野に入れた研究が必要であろう。

一方、宇宙における人類の次の大規模活動の場となる月面環境は、本学会がもつ知見が大きな貢献を果たす場となるであろう。月面は絶縁体に近いレゴリスと呼ばれる砂で覆われている。そのため、周囲のプラズマの温度・密度などにより容易に帯電状況が大きく変化する。更に、その帯電は光電子の放出によっても変化するため、日照・日陰の差によっても帯電状況は変化する。その空間スケールは、月の半球(日照域と日陰域)から、レゴリス砂粒表面の日照・日陰スケールまで様々であり、これは、月面における人間活動に対し、機器から人間の健康までさまざまな影響を与える可能性がある。そして、月は、地球磁気圏と太陽風中を移動するため、帯電に及ぼす物理パラメータが大きく時間によって変化する他、磁気圏中のプラズモイド、太陽風中の CME など突発的な現象の影響も受ける。これらの宇宙プラズマの影響による月面の帯電現象と、それを計測し、変化を予測するための知見を本学会は有しており、今後の月面における人間活動の拡大に対し、大きな役割を担う必要がある。

### 3.1.2 太陽地球圏現象が既存の社会基盤に与える影響

電離圏擾乱がもたらす通信・放送・測位への影響：短波通信・放送は比較的安価な装置で地球全体に情報を提供することができる経済的なシステムであり、現在でも様々な分野で他の通信手段の補完的な役割を果たしている。短波は電離圏で反射する性格があるため、電離圏と地上の間での反射を繰り返すことで見通し外の領域まで伝搬することが可能である。電離圏が太陽活動等により通常の状態から変化すると、短波が反射しなくなり通信・放送利用が制限されることが知られている。例えば太陽フレアで発生する紫外線により電離圏 D 領域の電子密度が増大することで発生するデリンジャー現象、高エネルギー粒子による極冠域吸収、磁気嵐に伴い発生する負相電離圏嵐などで短波利用は大きく制限されることが知られている。

また近年利用が増大する衛星測位に使用されるマイクロ波 (L 帯) は電離圏を通過する電波を利用して行われるが、磁気赤道に対称に南北に発達するプラズマバブルの発生はロック損失をもたらす、測位利用が制限されることが知られている。また正相電離圏嵐によって電離圏の厚みが増大することで電離圏遅延が大きくなることで測位誤差が増大することも知られている。

現在防災無線等に使用される VHF 帯の電波は通常電離圏伝搬は発生しないため、見通し外の領域では同一周波数を別用途で使用することがある。しかしながら、スプラディック E 層が発達すると、通常発生しない VHF 帯の電離圏での反射が発生し、遠方からの予期しない電波による干渉が発生することが知られている。

空気シャワーがもたらす航空機乗員被爆：フレア、CME 衝撃波により GeV レンジまで加速された太陽高エネルギー粒子は、成層圏下部から対流圏において空気シャワーを生じさせ、大量の放射線 (GLE) を生成する。最大級の GLE は、一度で航空機乗務員の年間管理目標値の線量に匹敵する被爆をもたらすことから、航空機乗務員・乗客の健康被害を最小化するための方策を検討する必要がある。その第一歩は、太陽高エネルギー粒子の地球到達を正確に予測するモデルを開発することであろう。更に、空気シャワーの生成と宇宙天気を結びつけた研究を展開するために、今後宇宙線分野の研究者との連携を深める必要がある。その第一歩は、太陽高エネルギー粒子のリアルタイムモニター観測や、速やかな実況解析の環境を充実させることであろう。更に、定量的な予測にもつながるモデリング研究を展開するために、今後宇宙線分野の研究者との連携を深める必要がある。2019 年 11 月から開始された国際民間航空機関 (ICAO) による宇宙天気情報サービスにおいても、航空機被ばくは通信・測位と並んで検討されており、社会的にも現況把握・予測の必要性は高まっている。

GIC の地上インフラへの影響：宇宙空間に生起する擾乱現象は、様々な過程を経て地上での地磁気変動を引き起こす。この地磁気変動に伴い励起される誘導起電力は、送電線やパイプラインに誘導電流を生じさせる。このような誘導電流は GIC (Geomagnetically Induced Current) と呼ばれており、電力系統の障害や、パイプラインの金属腐食を助長することが知られている。さらに海底ケーブルの中継器に電源を供給するケーブルや鉄道の線路を使

った信号の伝送などにも影響を与えることが報告されており、GIC 障害の影響は広範囲に及ぶ。高緯度地域ではオーロラ活動に伴う強い電流が GIC の主な原因であるが、CME に伴う衝撃波の到来による SC (Sudden Commencement) や SI (Sudden Impulse) といった磁気嵐に伴う地磁気の急激な変化は、中低緯度領域でも GIC 障害の原因になると考えられている。GIC の正確な予測のためには地面に誘導される電場（地磁気誘導電場）の性質を十分に把握しておく必要がある。そのためには地磁気及び地電場観測網の充実及び継続的な観測に加え、地下の精密な 3 次元比抵抗モデルの構築が求められる。GIC の直接的な原因となる磁気圏・電離圏電流の予測モデルも不可欠である。高精度化するリアルタイム磁気圏シミュレーションに磁気圏電離圏地圏結合アルゴリズムと適切な地下比抵抗モデルを組み込み、全球における地磁気変動と GIC 励起を予測可能とすることは、人類社会を支える重要な知識基盤整備事業のひとつとして積極的に進めていくべきであろう。

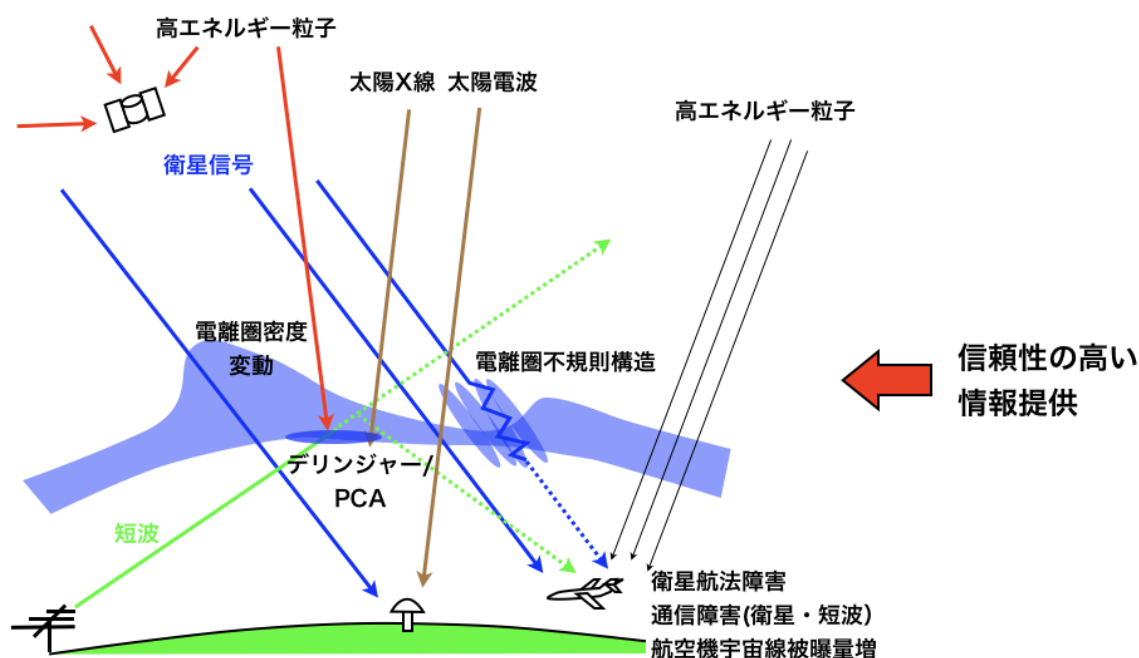


図 3.2.1 宇宙利用システムに影響する太陽地球系現象。電離圏密度変動は短波通信の不安定、衛星測位誤差の増大などの影響を、電離圏不規則構造は衛星信号にシンチレーションによる障害を引き起こす。太陽電波強度の増大は衛星信号の雑音を増大させる。高エネルギー粒子の増大は、衛星環境の悪化、航空機宇宙線被曝量の増大、極回り短波通信の途絶などの障害の原因となる。

### 3.1.3 地震・津波・火山噴火による災害

日本はプレートの沈み込み帯縁部に位置するため、地震・津波や火山噴火による多大な災害をこれまでに経験してきた。このため、第 2 章にて述べたような地震・津波の発生や火山噴火を学術的に理解するための電磁気学的研究にとどまらず、地震・津波や火山噴火等のハザードの発生と推移を早期に察知して警戒情報に繋げる各種観測のリアルタイムモニタリングや、火山ハザードマップ作成のための過去の溶岩流の形成年代の推定等、減災に貢献するための研究を継続して推進する必要がある。電磁場は様々な原因により幅広い時間スケールで常に変動しているため、ハザードとなる現象に起因する信号を抽出するためのリファレンスとなる定常観測点の維持も重要である。

地震に関する電磁気現象：東北地方太平洋沖地震を引き起こした海底の断層運動は、海面の急激な変動をもたらし、津波の原因となった。この海面変動は、大気圏と電離圏に音波と重力波を通して影響を与え、電離圏電子密度の変動が伝播する様子が GNSS 全電子数観測や、

海底ならびに陸上の電磁場観測、イオノゾンデ、SuperDARN などによりとらえられた。一方、実在性や物理的機構は明瞭ではないが、地震発生前に大気圏および電離層で擾乱が発生していたとの報告もある。福島原発事故に伴う放射能汚染のモニターは、大気中の電気伝導度の上昇と、それに伴う静電・電磁気現象への影響という形で、地球電磁気学と関係があり、複数の論文も報告されているが、この影響は観測装置の進化に伴い、将来的には飛行体やレーダー・人工衛星からも可能になると思われる。それは日本に限らず、世界のどこで起こっても役立つ技術であり、同時に大気核実験のモニターにも役立つと期待される。

津波電磁気現象：海水は良導体であり、地球磁場中で運動することにより、誘導起電力を発生する。近年の海底電磁場観測により、チリや東北地方太平洋沖等の巨大地震による津波がとらえられた。また、東北地方太平洋沖地震については、東北地方太平洋沿岸や父島において、津波を起源とする磁場変動が観測された。これらの磁場変動は、津波の到達に先行して生じることがあることが観測および理論的研究から示されている。また、海面の上下変動を観測する従来の観測手法と異なり、電磁場は津波の伝搬方向の情報も含んでいる。これらことは、電磁場観測が津波の到来予測において有用なツールとなり得ることを意味する。このため、海底での電磁場リアルタイムモニタリングは将来の津波の早期警戒のための観測項目の一つとして期待される。

過去の火山活動に伴う古地磁気記録：火山活動に伴い溶岩流が形成されると、当時の地磁気を反映した熱残留磁化が獲得される。地質学的・火山学的に同一の溶岩流と推定される場合でも、古地磁気方位を分析してみると異なる方位を記録していることが分かることも多く、異なる時期に形成された溶岩流であることが推定されることも多い。古地磁気永年変化の速さを仮定すれば、相対的な年代の差についても 50-100 年の精度で推定することが可能であり、地磁気方位の永年変化を年代ごとに追ったいわゆる標準曲線が構築できれば、数値年代(絶対年代)としてさらに精密に推定することが可能である。地質学的・火山学的な知見に基づいて組み立てられている火山ハザードマップの精度向上に、大きく役立てられる可能性がある。

## 3.2 知識基盤の構築に向けた研究課題

### 3.2.1 宇宙環境計測機器開発の充実

これまで行われてきた地球磁気圏（静止軌道から低軌道）の放射線計測を継続（充実）すると共に、エネルギー計測範囲を拡大し、帯電現象評価に必要なプラズマ（keV オーダー）計測を実施する必要がある。さらに、国際的に欠落している宇宙環境データ（微小デブリ、大気密度）および放射線帯の変動に影響を与える太陽活動に起源をもつ宇宙環境データ（X線、紫外線）の計測を随時実現していくことも宇宙天気研究を進めて行く上で非常に重要である。こうした研究開発を実現するためには、JAXA の関連部門、大学や他研究機関と連携をとることにより対象領域をこれまでの磁気圏周辺から惑星空間に、影響評価領域を搭載コンポーネントから有人に関わる領域まで拡大していくことが望ましい。なお、これら人類の知識基盤としての成果を基に、宇宙機関会合、国連および ISO 等を通して国際的な連携/イニシアティブを発揮していく努力も重要となるであろう。

将来の有人活動が地球外の天体へ展開していくことが予想される今後、惑星や衛星環境のモニタリング観測は重要な課題である。惑星分光観測衛星「ひさき」は2013年の打上げ以降キャンペーンベースでの木星・金星・火星・水星のモニタリング観測を継続しており、その成果は海外からも高く評価されている。惑星監視設備は今後も世界的に要求が高まっていくインフラであるため、次世代惑星紫外望遠鏡 LOPYUTA へと受け継ぎ、日本が引き続き担当する必要がある。氷衛星の水噴出や火星・金星大気散逸監視を主眼とする科学目的を主眼に据え、同ミッション提案が検討されている。

地球外の天体において有人活動が展開されていくであろう今後、これまで得られた惑星環境の知見をより一般的・基本的な社会知識基盤へと拡張することが必須である。このためには、他分野との学際共同による惑星探査に参加し、惑星の環境や進化をより広く根源的に理解することが必須である。このためには、SGEPSS が長年に渡って技術ヘリテージを蓄積してきた、プラズマ・中性粒子質量分析器、波動観測器、磁力計、紫外分光器等の、惑星科学分野の探査機への搭載が鍵であると考えられる。これらは、火星、月、小天体、小惑星、氷衛星、タイタンなどの、地球外生命環境の理解に重要な天体向けに、表層・内部構造を探査する強力なツールになりうる。質量分析器は、天体表層や大気から放出される物質の組成を測定し、着陸探査できない天体の表層や大気物質組成を推定できる。波動観測器や磁力計は、レーダーや磁場サウンダーとして応用できれば、天体の内部海や地下水資源を着陸せずに探査できる唯一無二の搭載機器となるだろう。紫外分光器は、地球周回の宇宙望遠鏡や探査機の搭載機器として、天体表層の反射率測定から、ソリン、芳香族系の有機物などの検出が可能である。タイタンや氷衛星などの水、炭化水素、窒素、アンモニア等が豊富な天体における有機物生成過程をリモセンできる可能性がある。

### 3.2.2 宇宙天気分野における予測研究

宇宙天気と社会とのつながりについては、総務省の研究会「宇宙天気予報の高度化の在り方に関する検討会」においても強調されている（[https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000820488.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000820488.pdf)）。本検討会では、太陽フレア爆発等の極端宇宙天気現象が通信・放送・測位、人工衛星、航空無線、電力等の社会インフラに異常をもたらし、社会経済活動に多大な影響を与える恐れがあるという我が国初となる「極端な宇宙天気現象がもたらす最悪シナリオ」を策定している。また、これを宇宙天気現象を現実のリスクとして捉え、国家全体としての危機管理の必要性が提言されている。このことを踏まえ、宇宙天気研究を人類活動を支える知識基盤へと昇華させるには、予測研究は必要不可欠である。羅列的であるが、太陽活動長期変動の予測、フレア発生予測、プロトン現象予測、高速太陽風予測、磁気嵐・サブストーム予測、放射線帯粒子予測、電離圏擾乱予測（電離圏嵐、プラズマバブルなど）、地磁気擾乱予測等が挙げられる。これらの各現象に着目した予測型研究の一部については、既に各研究機関において実施されており、今後もそ



の高精度化の試みは継続的に進められるべきである。一方、これらの物理量は多圏間結合、階層間結合の文脈で互いに関連し合っている。今後はこうした宇宙天気現象の包括的理解、記述へとつながるシステム予測へと発展すべきであろう。

予測研究を実現させるためには、大規模データ解析技術、大規模数値シミュレーション技術、予測技術、データ同化技術の向上が必須である。平成 27-31 年度に実施された科学研究費・新学術領域「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（領域代表：名古屋大学宇宙地球環境研究所 草野完也）」では、様々なモデリングフレームワークと観測を組み合わせた予測研究の実現を目指した取り組みが行われ、予測研究のユーザーとの情報交換を通じた予測研究の最適化がなども精力的に進められた。このような取り組みを通じて、こうした数理物理学手法と実際に取得されるデータが統合され、システムの包括的理解へと進む方向性は、今後我々の分野が開拓すべきフロンティアの 1 つであろう。

宇宙天気観測を睨んだ衛星計画も積極的に推進すべきである。環境把握という側面においては、超小型および超々小型衛星の活用によるその場観測によるジオスペース・モニタリングの多点化も方向性の一つであろう。また、地上観測においては、超多地点グローバル観測技術を向上させ、宇宙天気環境の把握に有用な指数を開発することが望ましく、ネットワーク観測が可能な各種データについては、それらを統合していく施策を積極的に推進していくべきである。その他、低高度衛星による超高層大気観測の空白高度域（高度 100-200 km）への 3 次元レーダーによる（中性温度、風、成分）アプローチも環境把握のためには必須である。また、電磁気的な地下構造のモニタリング手法の確立は、GIC のより正確な把握へと繋がる。これらについては、超高層・固体分野のより強い連携が求められる。

### 3.2.3 極端宇宙現象の把握と対策

キャリントン事象のように数百年に一度おこるような極端な事象が報告され、マウンダー極小期のように長期にわたり太陽地球系が極端な状態にあったことを示唆するデータもある中、頻度の低さとデータ取得の難しさが相まって、これらの極端な事象についての理解はあまり進んでいない。しかし、1989 年の巨大磁気嵐群や、2009 年の極小期を含む長年のデータの蓄積と、シミュレーション技術の発展により、過去の極端事象を理解し、人類が観測したことの無い極端な太陽地球系を予測する手掛かりは揃いつつある。人類の社会基盤に対する大きなリスクとなり得る極端宇宙現象については、太陽活動や気候変動などに関する数十年-数百年スケールの変動から、磁気嵐、サブストーム、オーロラ、中層大気変動などに関する数分-数日スケールの変動など、様々な時間スケールでおこる事象をデータベース化するとともに、極端条件を組み込んだシミュレーション研究も発展させる必要がある。なぜ極端事象がおこるのか、我々が現在獲得している枠組みの延長としてこれらの極端事象を考えてよいのか、物理的要因によって決まる上限や下限があるのか、人類活動への影響はどれほどか、などの問いかけを通し、極端事象も物理的に予測することを可能とする、太陽地球系物理を目指す必要がある。

### 3.2.4 将来の宇宙環境利用に向けた研究課題

外惑星ミッションにおける惑星間航行や低高度軌道での地球周回においては、多くの搭載燃料を必要とする化学推進ではなく、イオンエンジンなどの電気推進や太陽光圧を利用したソーラー電力セイル推進など、高効率な先端的推進システムが不可欠である。イオンエンジン推進は既に多くの人工衛星や宇宙探査機で使用実績があり、近年では地球超低高度軌道の希薄大気を推進剤とした電気推進器や、イオンエンジンと太陽光圧推進技術を組み合わせた日本独自のソーラー電力セイルによる外惑星往復探査技術の開発も始まっている。また、太陽風と衛星の人工磁場との相互作用による推力システムや、電極摩耗のない無電極電気推進など、次世代推進システムの検討も行われている。

これらの先端的宇宙推進器の開発においては、宇宙プラズマと衛星システムとの相互作

用や、衛星推進系から放出される人工プラズマと衛星システム、および宇宙プラズマとの相互作用が推進効率に与える影響について、十分な検討を行う必要がある。推進システムからの能動的プラズマ放出による衛星環境への影響に関する定量的評価も、観測データに含まれる人工的擾乱の除去において非常に重要である。

推進システムに限らず、人工衛星そのものやステーションなどの大型建造物と宇宙プラズマとの相互作用の理解は今後の宇宙利用において非常に重要な研究テーマである。衛星などの宇宙機は宇宙プラズマとの接触により帯電などの悪影響を受ける。時にはこの帯電が原因で宇宙機表面や内部で放電が起こり衛星破損などの事故が起こることもある。また、宇宙機に電力を供給するために用いられる太陽電池パネル内で生じる電圧は宇宙機周辺のプラズマ環境に影響を与える。これらの影響は、将来の衛星システムの大電力化、高電圧化に伴い、宇宙環境利用や計測において大きな問題となる可能性があり、SGEPSS の貢献が期待される研究領域である。

宇宙環境利用の観点から今後研究が進められるべき観点として、月面プラズマ電磁気環境が挙げられる。月は濃い大気や強い磁気を有していないため、宇宙プラズマの荷電粒子が月面に直接到達することができ、月の土壌やそれを構成するレゴリス粒子を帯電させる。帯電したレゴリス粒子は大気や風が無いにも関わらず、静電気力により自然に浮揚し、帯電ダストとなる。このダストは月有人活動における様々な問題、すなわち機械や装置の目詰まりによる故障、機械の摩滅や熱制御装置の性能低下などの原因であり、さらには人体と接触、もしくは吸入すると種々の健康被害を引き起こすことが懸念されている。これらの現象の引き金となっているのはプラズマ電気力学的な効果であり、将来の月面利用を見据えた環境予測および計測技術の研究開発に SGEPSS が貢献できる。

### 3.2.5 固体地球科学における知識基盤の構築

地球の内部構造とその時間発展を明らかにすることは、固体地球科学における中心的課題のひとつである。さまざまなスケールで行われている電気伝導度分布の探査は、今や地球内部構造研究の重要な一角を占めるようになってきている。地震学、火山学、測地学、資源工学など、地球電磁気学の関連分野との協働を通じて、地球内部の静的構造や動的過程の包括的な理解を深め、さらには新たな研究の創出や社会的課題の解決にも貢献できる可能性がある。例えば、我が国は地球上の変動帯に属しており、地震や火山噴火などの脅威を免れることはできない。自然災害に対して強靱な社会を構築することは、国民生活において極めて重要な課題である。また、エネルギー資源に乏しい日本では、地下や海底下の利用可能な資源を確保することは安全保障の観点からも重要である。こうした諸課題に対処するための知識基盤を構築するための第一歩は、関連分野も含めた研究コミュニティが参照できる構造モデルを、非専門家にも使いやすい形で提供することであろう。さまざまな制約から、こうした取組は電気伝導度構造研究の分野では現時点ではあまり進んでいるとはいえない。しかし、我が国でもシステムティックかつ大規模な探査が行われる例が増えており、過去の探査で取得されたデータの提供を受けて新たな手法で統合解析するなどの動きも盛んになってきている。今後、こうした取組から得られる電気伝導度構造を3次元的にイメージングしたモデルを、周辺分野と共有することで得られるアウトカムは確実に増えていくと期待される。

一方、世界各地の地質試料・考古資料からの古地磁気測定データは、世界中の関連研究者の協働により、その多くがデータベースに登録され、参照することが可能になっている。地球史スケールでの年代をカバーする MagIC データベース (<https://www2.earthref.org/MagIC/>) や PINT データベース (<http://earth.liv.ac.uk/pint/>)、過去 50,000 年間をカバーする GEOMAGIA50 データベース (<http://geomagia.gfz-potsdam.de/>) などがある。これらのデータに基づいて、過去数千年間の全球地球磁場連続時間変動モデルや、過去約 200 万年間の地磁気双極子連続時間変動モデルなどが提案されつつあるが、依然として基となるデータの量は圧倒的に乏しい。



より信頼度の高い古地磁気データを数多く得ていくことで、これらのモデルの時空間分解能・信頼性をともに向上させていく必要がある。

とくに考古資料に着目すると、関連する古地磁気学的研究は日本では1950年前後より行われ、1970年代には地磁気方位の永年変化を年代ごとに追ったいわゆる標準曲線が確立された。その後2010年代になると新しいデータを加えた考古地磁気のデータベースが構築され、それを用いて標準曲線を引き直す動きが出てきた。同曲線の年代精度はかなり高く、永年変化の速度が速い時代では20年程度の精度で古地磁気年代推定を行うことができるようになってきている。実際に、考古学の分野では様々な適用事例があり一般的なツールとなっているほか、最近では火山の溶岩に対する古地磁気測定結果と比較することによって溶岩流の同定や噴火史研究にも役立つことがわかってきた。今後、これらの分野以外へも年代ツールとして情報とノウハウを提供できるよう進めるべきであろう。

### 3.2.6 周辺研究分野との連携

太陽が地球気候に与える影響については、SGEPSSを主体とした宇宙空間や電離圏・磁気圏、超高層の研究者と、大気・海洋変動の専門家との連携が不可欠である。近年、海上ブイにGPS受信機を設置し、電離圏全電子数の観測を行うことが検討されているが、このような試みは超高層大気地上観測の空白域を埋めるという大きな意義を持つ。このような取り組みを通じて、大気・海洋変動の専門家と共同で研究コミュニティを立ち上げ、情報共有と意見交換ができる体制を構築することが望まれる。

また、宇宙天気の研究は、衛星の製作および運用などの実利用面での応用にも重要であるが、実際には関連分野との情報共有と意見交換は必ずしも十分とはいえない。衛星工学に関しては、大気密度、放射線粒子、酸素などの予測が有用と言われるが、それらがどのような精度で求められると、何がどのくらい意味があるのかなどの議論を行う、コミュニティ同士の交流は殆どないのが現状である。これは国際的にも似た状況で、サイエンスの業界として、工学分野とも太いパイプを築く必要がある。

### 3.3 オープンサイエンスと研究データ

#### 3.3.1 知の源泉としての研究データ

科学研究を行う上で、インターネット基盤、デジタルデータプラットフォーム上でのデータや情報の交換が、近年は容易に高速に行うことができるようになってきている。これは、単なる情報交換の難易度や速度の問題ではない。例えば科学政策面からは、デジタルデータ・情報をキーとした新しい方法論を通じて、研究手法や科学研究のあり方、科学と社会の相互関係の本質にとって、新しい局面をもたらすと期待されている。

「オープンサイエンス」は、このような新しい考え方・パラダイムや、それを実現するための原則や実践を指す名称として使われることが多い。近年、G8 および G7 科学大臣会合や経済開発協力機構 (OECD) などの国際科学政策や、AGU、EGU など国際的な学界で「オープンサイエンス」、およびそこでの研究データの取扱いを中心とした議論が盛んに進められている。科学研究における「データ」は「知の源泉」(内閣府、統合イノベーション戦略、2018) であり、国際学会や政府当局において、その整備・利活用が重視されるとともに、科学的発見の根拠、また更に深い知を生むため次世代へ引継ぐべき研究資産、と再認識されるようになってきている。2012 年の研究評価に関するサンフランシスコ宣言 (<https://sfdora.org/>) や 2017 年の G7 科学大臣会合合意 ([https://www8.cao.go.jp/cstp/kokusaiteki/g7\\_2017/2017.html](https://www8.cao.go.jp/cstp/kokusaiteki/g7_2017/2017.html)) 等においても、データを論文とならぶ学術業績として認める動きが明文化されている。

科学において、研究活動および論文執筆が本質的に重要な活動であることは言を俟たないが、同時に、それだけでは科学という存在は成立しない。例えばジャーナル出版社は、論文出版業という商業活動が主とみなされがちであるが、研究成果物の公開について社会的・道義的責任をもって運営される。世界で最初に成功した学術ジャーナルの発明は、1665 年、英国王立協会とフランス国立アカデミーによるものである。以来、350 年以上にわたり、読者の有無や引用の多寡に関わらず、科学論文はすべて、出版者と図書館の協業により出版・保存され科学者や社会に提供されてきた。現代社会における基盤となっている発見や発明、これに基づく社会基盤(例えば電話、鉄道、航空機、インターネット等)は、すべてこれらの印刷されたジャーナル論文上の科学知を使って実現されてきたものである。今後は、インターネットや計算機システム上の研究データが同様に、新たなイノベーション、新たな科学知の源泉として論文と同様に不可欠なものとなるであろう。

#### 3.3.2 国際社会での研究データの捉え方

国際学術連合 (ICSU、現在の国際科学会議 ; 2018 年より ISC、国際学術会議に改組) が、1957-1958 年に実施された国際地球観測年 (IGY) で取得された大量の観測データを国際的に交換・保存する必要性を提示し、世界資料センター (WDC) 組織が設立された。地球電磁気・地球惑星圏科学データは、歴史的にこの枠組を利用して世界中の研究者に提供されてきた。近年では、国際科学会議 (ICSU) の太陽地球系物理学科学委員会 (SCOSTEP) が主導した、太陽地球系エネルギー国際協同研究計画 (STEP: 1990-1997)、STEP-Results、Applications and Modelling Phase (S-RAMP:1998-2002)、Climate and Weather of the Sun-Earth System (CAWSES: 2004-2008)、および CAWSES-II (2009-2013) などの国際研究計画を通して、各研究機関でのデータベース化が進められてきた。

こうした ICSU (ISC) 関連組織をはじめとするデータに関する国際的活動は、地球電磁気・地球惑星圏科学分野だけのものではない。データのオープン利用と流通が学術発展の根幹の一つであるという認識は、国際科学会議における ISC-WDS (World Data System) 事業や

ISC-CODATA<sup>1</sup> (Committee on Data for Science and Technology あらため Committee on Data of ISC)他関連機関でも共有され (例えば <https://codata.org/initiatives/data-together/>等)、国際連合下の学術やデータ、地球観測の関連組織群、また GEO (地球観測に関する政府間会合) において、データ体制の根本理念として共有されているところである。

地球科学のデータベース整備・開発の現状はデータの種類や取得機関によって大きく異なっている。例えば、人工衛星により取得されるデータは、我が国においても比較的データベース整備が進んでいるが、これはデータが地上局に転送された時点で既に計算機上に乗っていてデータベース化などの処理フローに乗せやすいためである。また、主なデータ生産者は宇宙航空研究開発機構に限定されるので一元管理ができ、かつデータセンターが業務として明確に位置づけられているために、他機関とくらべて比較的定常的なリソースを投入しやすい点が重要と考えられる。それに比べて、地上観測データは取得者は広く分布する上に、所得者と管理者が同一人物であることが多いことから組織的な整備が遅れている。

### 3.3.3 科学としての研究データ整備とデータシステムのあり方

社会のデジタルトランスフォーメーション (DX) が叫ばれる中、科学知についても、科学界の DX の中で、新たな科学のあり方と社会との共存関係、これを可能とする科学研究のデジタル基盤とそこでの新しい科学活動のサイクル (= 科学研究の「エコシステム」(生態系) と呼ばれる) が求められている。我が国では、近代科学は欧米からの輸入文化であり、自らこうした総合的科学基盤や、科学研究システムを構築した経験を持たない。しかし現代では先進諸国の一角として、オープンサイエンスの議論に加わり、国際的な科学システムの構築に、積極的に関与することが求められている。

研究データに関しては、研究に必要なデータの取得・処理・保存を行う情報ネットワークや、構築されたデータベースおよびアーカイブ、さらに、それらを共有 (または公開) し、科学界の共通資産として長期保存する機能、そしてその組織の運営までを含めた幅広い活動は、まさに前述の科学論文の生産、保存、公開に対応する科学研究の基盤であり、かつ科学という「社会システム」にとって今後、必要不可欠な存在となっていくと考えられる。データを処理する計算機ハードウェアやソフトウェアとしての狭義のデータシステムを包含したうえで、さらに上記の科学活動のための基盤システム全体をとらえてわたしたちの今後の科学研究活動のデータ・情報アクティビティやワークフローについての科学的考察・調査研究が不可欠となろう。当学会ではこれを、「オープンサイエンス」を構成する要素の 1 つである研究データに関わるあらたな科学研究分野として「データシステム科学」と捉える。

### 3.4 広報活動・人材育成の観点から

本節では広報活動・人材育成の観点から社会との関わりに関して述べる。SGEPSS のアウトリーチ部会 (2004 年度に発足) は多くの広報活動を行っており、これらの活動は社会と密接に関わっている。アウトリーチ部会の活動の詳細は 6 章で述べるが、秋学会時におけるアウトリーチイベント (6.2.1 節)、秋学会時におけるプレスリリース (6.2.2 節)、衛星設

---

<sup>1</sup> ISC-WDS は 2008 年に、WDC および天文地球物理恒久事業連盟 (FAGS) が発展的に統合されて設立された。ISC-CODATA は、1966 年に Committee on Data for Science and Technology として ICSU に設置され、物理常数の国際推奨値の策定やデータサイエンス、オープンサイエンス等 に貢献してきた。近年、名称が Committee on Data of ISC に変更された。

計コンテスト（6.2.3節）、教育機関や公共団体等への講師派遣（6.2.4節）、若手アウトリーチ活動”STEPLE”（6.2.5節）、Web 広報（6.2.6節）などが主な活動である。アウトリーチイベントは、主に小学生や未就学児などとその保護者をメインターゲットにして、SGEPSS 分野の研究成果を社会に還元することを主な目的としている。また、イベントによる研究者と市民の相互交流を通して、研究成果を含めて SGEPSS の認知度を向上させると共に、科学の楽しさや面白さを伝え科学リテラシーの向上に貢献することができる。プレスリリースはマスコミを通じた最新の研究成果の社会への還元という位置づけで行なっている。プレスリリースによって研究領域や SGEPSS の存在感をアピールする意義がある。衛星設計コンテストは、高専・高校生から大学院生までを対象としたコンテスト形式の教育プログラムであり、SGEPSS からは委員を派遣している。教育機関や公共団体等への講師派遣は、会員を学校教育現場や市民の集まりに派遣し講演や出前授業を行う活動である。若手アウトリーチ活動”STEPLE”も講師派遣を行っており、生徒や一般市民との交流を通して、研究成果の社会への還元に寄与している。またオンラインによるアウトリーチ活動として Twitter や Facebook を用いた広報活動も展開している。

このような広報活動は、将来の人材育成(6.3 節)にも密接に関連している。アウトリーチイベントや衛星設計コンテスト、講師派遣などは初等・中等教育課程の年齢層との関わりが大きい。研究成果の社会への還元に加えて、SGEPSS そのものを知るきっかけや、SGEPSS 分野への進路を考えるきっかけになって欲しいという期待も持っている。また、学校教育ワーキンググループがアウトリーチ部会発足直後に立ち上がり、学校教育課程への働きかけを目指して、「太陽地球系科学」を発刊（2010年）した。別の観点として、SGEPSS の扱う研究対象は地球規模の現象を扱うことが多いため、国際協力で研究を進めることが必須となる。高等教育においても、このような国際交流の機会は次世代育成という観点からも非常に重要である。