

太陽地球惑星圏の研究領域の目的・戦略・工程表

太陽地球惑星圏探査検討グループ
代表：中村正人（宇宙科学研究所）

(1) 分野のビジョン

(1-1) 概要

太陽からは、可視光や紫外線等の電磁波に加え、プラズマ流（太陽風）と太陽磁場（惑星間空間磁場）が吹きだしており、100AUにまで至る広がりを持って太陽圏(Heliosphere)と呼ばれる領域を構成している。太陽圏の中には、地球をはじめとした惑星、小惑星が存在しており、電磁波や、太陽風、惑星間空間磁場の影響を受け、それぞれの惑星に特徴的な大気圏、電磁気圏が形成されている（図1）。

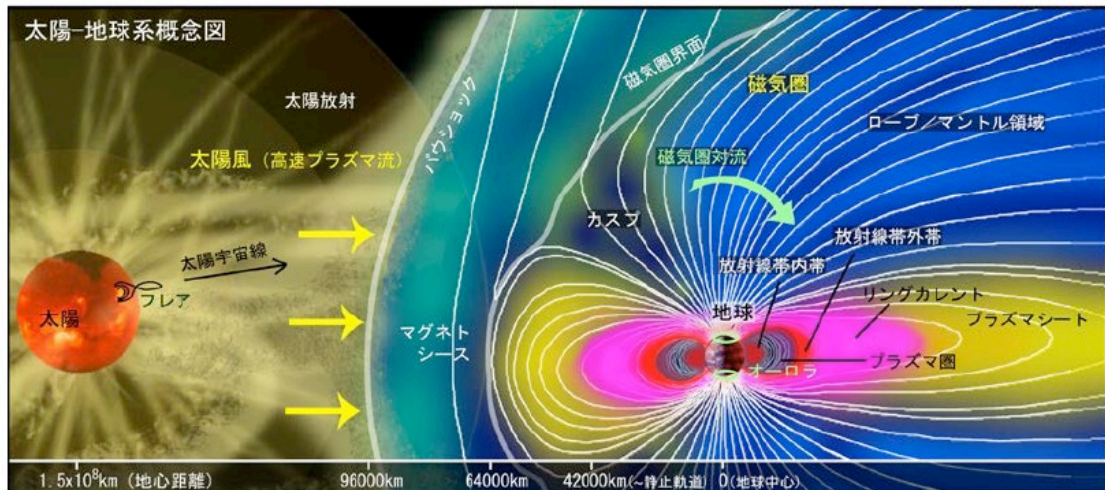


図1: 地球電磁気圏・大気圏とそこで生起する現象

太陽系の惑星の中には、地球のように大気圏や電離圏を持ち、また固有磁場によって磁気圏を形成している惑星、水星のように磁気圏のみを持つ惑星、金星のように大気圏や電離圏（および誘導磁気圏）のみを持つ惑星など、大気や固有磁場の有無によって多様性に富んだ環境が形成されている。太陽からの電磁放射や、太陽風、惑星間空間磁場は、分単位から太陽活動周期に相当する10年、さらにはより長い時間スケールで変化しており、その影響を受けて地球および惑星圏環境もダイナミックな変動を示す。また、地球の電磁気圏のように、太陽風の影響が支配的な惑星圏がある一方、木星のように自転周期が短く、惑星本体の持つエネルギーが電磁気圏の形成に大きな影響を及ぼしたり、内部の衛星がプラズマ源となる惑星圏が存在するなど、それぞれの惑星に特徴的な世界が形作られている。

私たち「太陽地球惑星系科学分野(STP 分野)」のビジョンは、1) 太陽の影響を受ける多様性に満ちた地球・惑星系の大気圏・電磁気圏を理解し、また太陽がどのように太陽圏の環境を作り出しているかを解明すること、そして、2) 太陽圏を宇宙プラズマの実験室ととらえ、粒子加速や磁気再結合、無衝突衝撃波などのプラズマ物理現象の素過程を明らかにすることである。

太陽圏探査の特徴の一つは、飛翔体による「その場」での直接探査と、電磁波などによる遠隔探査の双方が可能であることである。直接探査においては、現象が起きている場所

の粒子の密度や温度のみならず、速度分布関数や電磁場などの精緻なデータを取得し、詳細な物理過程の議論を行うことができる。一方、オーロラや大気光の観測に代表されるように、遠隔探査によって地球や惑星圏の全体像を観測することも重要な観測手法である。

1950年代末の米国による放射線帯の発見以来、地球そして各惑星圏の探査が精力的に展開され、近年は「Voyager」が太陽圏の外に脱出しつつあるなど、太陽圏全領域にわたる探査が行われている。我が国においても、1970年代の「きょっこう」「じきけん」衛星以来、地球の電磁気圏、大気圏の直接探査を進めるとともに、「さきがけ」「すいせい」によるハレー彗星探査、「のぞみ」「あかつき」による惑星圏探査や「かぐや」による月周辺環境探査が行われている。過去の探査の結果、各惑星電磁気圏の基本的な形状や太陽風に対する応答過程が理解されるに至っている。さらに、1990年以降の衛星、地上観測、さらに数値シミュレーションによる研究によって、非一様・非定常システムとしての電磁気圏の理解も進んでいる。また、磁気再結合に代表されるようなマイクロな物理の理解も進展するとともに、マイクロな物理がマクロなシステムに与える影響の研究も推進されている。

このような流れの中で、電磁気圏の非線形性、非定常性、および異なるスケールの現象が動的に結合する「スケール間結合」、電離圏と磁気圏のような異なる領域をプラズマが磁力線を介して結合する「領域間結合」、そして異なるエネルギー階層がプラズマの波を介して動的に結合する「エネルギー階層間結合」などの新たな問題意識が生まれている。このような問題意識を解き明かすには、編隊飛行や、高時間分解能観測、複数衛星および地上観測との連携、さらには広いエネルギー範囲の観測といった、従来の衛星計画では技術的に実現が困難であった観測を新たな技術開発によって実現する必要があり、それらの開発要素が今後の探査計画の立案にとって重要となる。たとえば、ジオスペース探査衛星「あらせ」は、「エネルギー階層間結合」を軸として、地球内部磁気圏における相対論的電子加速の解明を目指しているもので、これまでにない広いエネルギー範囲のプラズマ粒子観測を実現し、地上観測との連携によって「領域間結合」の観点からも内部磁気圏のダイナミクスを明らかにしつつある。また、今後の計画として、磁気圏と電離圏の領域間結合およびスケール間結合の解明を目指し、世界に先駆けて編隊飛行と粒子・撮像同時観測による高時間分解能観測にもとづいて時空間分離を実現する計画が検討されている[候補ミッション S-1, O-2]。一方、新たな取り組みとして、太陽風の変動に伴って過渡的に応答する動的な磁気圏の振る舞いを解明するために、磁気圏全体の構造変化を撮像観測から明らかにしようとする計画も検討されている[候補ミッション T-2]。撮像観測と上述のプラズマ「その場」観測の組み合わせは、宇宙プラズマに普遍的な物理現象の理解にも大きく貢献する可能性を秘めている。衝撃波や磁気再結合などの物理過程は、宇宙プラズマ中で普遍的に起きている現象である。唯一、その場観測が可能な太陽圏において、これらの物理現象を精密に観測しその素過程を解明することも分野の方向性として掲げられており、「SCOPE」衛星計画の問題意識を継承した新たな探査ミッションの検討も進められている[候補ミッション O-1]。ここでは編隊飛行によるその場での高い時間分解能の観測と、X線による周辺プラズマ状態の撮像とを組み合わせ、スケール間結合の観点から宇宙プラズマの素過程を理解し、磁気圏ダイナミクスにマイクロな物理過程の果たす役割を理解する。

これらの太陽圏の探査で得られた知見は、過去の太陽圏惑星環境の理解、そして系外惑星圏の理解にも貢献するものである。そして、太陽系内惑星電磁気圏の比較だけでなく、系外惑星観測と組み合わせることによって、地球を含む多様な惑星における生命圏環境の理解に繋がる、電磁気圏・大気圏環境の包括的な理解が期待される。

さらに、地球電磁気圏、大気圏は、人類が活動・利用する場であり、地球電磁気圏、大気圏の環境や生起する現象、すなわち宇宙天気を理解することは、このような人類の活動領域を理解、利用する上で必須となる知見を与えるものである。将来的には、人類の活動領域は惑星圏へと拡大していくことが予想され、惑星の宇宙天気を理解していくことも重要な課題となる。STP分野は太陽コミュニティとの連携も通して、このような地球、そして惑星圏の宇宙天気研究にも貢献していく。

本文書は、このような分野全体の共通の問題意識を踏まえた上で、分野全体をA) 地球電磁気圏・宇宙プラズマ、地球大気圏・電離圏、B) 惑星電磁気圏・大気圏の領域に整理し、各領域におけるビジョンを述べる。また、現在検討が行われているミッションについて概述するとともに、地球電磁気圏・大気圏探査と惑星電磁気圏・大気圏探査とを整理して、分野全体の工程表について述べる。

なお、本分野は「地球電磁気・地球惑星圏学会(SGEPSS)」の太陽地球惑星系科学領域を

母体とするコミュニティであり、本文書に述べられる計画は SGEPS における将来構想検討の議論を継続するものである。この将来計画に関する議論は「地球電磁気学・地球惑星圏科学の現状と将来」(<http://www.sgepss.org/sgepss/shorai.html>)にまとめられており、こちらにもぜひ参照していただきたい。SGEPS では、学会の将来探査検討分科会において将来計画の検討を行っており、分野全体の将来探査の検討を継続して行っている。

また、隣接分野である太陽研究者連絡会および日本惑星科学会では、それぞれ独自の問題意識をもち先鋭化したミッションが検討されているが、本分野と探査対象を共通とする部分が多い。このことから、互いのビジョンを理解し、魅力的かつ国際的に第一級の太陽・太陽圏探査のミッションをともに作り上げていくための情報交換と議論が欠かせないと考えており、今後も機会をとらえて検討を行っていく。

(1-2) 分野の各領域のビジョン

(A) 地球電磁気圏・大気圏

地球磁気圏・宇宙プラズマ

1-1 で述べたように、太陽圏は「その場」観測が唯一可能な領域であり、特に地球磁気圏においては多くの観測が行われている。磁気圏には、衝撃波、磁気圏界面といった太陽風との接触領域、プラズマシート、放射線帯といった多様性に富むプラズマ・粒子群が存在し、さらに宇宙空間から地球に向かって粒子が降りこむことによって起こるオーロラ、磁気圏と電離圏を流れる電流系と、バラエティに富んだ環境が形作られている。

これまでの探査によって、地球の磁気圏構造の平均的な描像やそこで生起している様々な現象の基本過程や平均描像は理解されてきており、「あけぼの」衛星「Geotail」衛星による日本の磁気圏探査も大きな成果をあげてきた。一方、厳しい放射線環境などの理由により十分な探査が行われず、その理解が進んでこなかった内部磁気圏についても、1990 年代に「あけぼの」衛星等の観測によって、放射線帯がダイナミックに変化している様子が世界的に注目を集めるようになり、2012 年には米国によって「Van Allen Probes」衛星が打ち上げられた。そして 2016 年にジオスペース探査衛星「あらせ」が打ち上げられ、内部磁気圏の基本的な描像を明らかにしつつある。

極域探査については、1989 年に打ち上げられた「あけぼの」衛星や、「Viking」衛星等が、オーロラ加速粒子や沿磁力線電流の包括的な探査を行い、静的な磁気圏-電離圏結合の理解を押し進めてきた。そして 2000 年代に入ると「Fast」衛星、「れいめい」衛星が従来よりも 100 倍程度以上高速な数十ミリ秒でのプラズマ観測を実現し、磁気圏-電離圏結合系における小スケール構造の存在やプラズマ波動を介した動的結合の重要性を指摘した。さらに、「れいめい」衛星は、世界で初めてオーロラ発光層とオーロラ降下電子の微細構造に関する同時観測を実現し、オーロラの 2 次元空間構造の中での降下粒子の分布の詳細な観測を実現した。これらの観測によって、オーロラの空間構造の階層性に代表される磁気圏-電離圏結合の多スケール性や動的な結合過程が重要な問題として認識されるようになり、2020 年代の打ち上げに向けて米国および欧州で新たなミッションの提案が行われている。このような問題意識を踏まえ、「あらせ」衛星に続くジオスペースミッションとして、本分野においても極域電磁圏探査を目指した検討を行っている[候補ミッション S-1, O-2, I-3]。この中の FACTORS 計画[S-1]においては、粒子-電磁界-光学同時観測を行う編隊飛行観測によって、これまでの観測から明らかにされていないプラズマ波動を介した磁気圏-電離圏の動的結合、および磁気圏-電離圏結合の多スケール性、オーロラおよび磁気圏-電離圏結合を担う沿磁力線電流の階層構造、さらにプラズマと中性大気の相互作用を解明することを目指している。この計画では、人工衛星の観測に加え、現在急速に整備が進んでいる地上から行われるオーロラの光学観測やレーダー等による電離圏諸量の観測と連携し、磁気圏-電離圏結合の 3 次元構造とその時間変動を明らかにする科学戦略も検討している。

一方、これまで磁気圏現象に係る撮像は、「あけぼの」衛星や「れいめい」衛星によるオーロラ光学観測、「のぞみ」探査機や「かぐや」探査機、「IMAGE」衛星によるプラズマ圏撮像等、近地球領域のものが多かった。2010 年代に入り、米国「IBEX」衛星によって磁気圏界面における高速中性粒子観測が行われ、磁気圏境界の可視化が初めて行われた。さらに、「すざく」衛星等によって、この磁気圏界面からの電荷交換反応による軟 X 線放射が発見され、この軟 X 線放射観測によって磁気圏界面やカスプの時間変化を可視化し、

太陽風-磁気圏相互作用の過渡的な応答を可視化するミッションの検討が始まっている[候補ミッション T-2]。

磁気圏における「その場」観測によって明らかにされる宇宙プラズマの素過程の理解、すなわち「宇宙ガスを支配する普遍的な法則の解明」は、よりマクロな宇宙プラズマ現象をその本質的なメカニズムも含めて理解し、宇宙における普遍的なプラズマ過程を予測する上で必須である。「Geotail」衛星は電磁界観測に加えプラズマ粒子の3次元速度分布関数を取得し、磁気圏尾部ダイナミクスおよび、磁気再結合や衝撃波といったプラズマ素過程の理解を大きく押し進めた。そして、地球磁気圏で初めて数百 km レンジのミクロスケールの現象を明らかにした。また、欧州の「Cluster」衛星は同レベルのスケールの現象を編隊飛行で時間変化、空間変化を切り分けて観測することに成功した。さらに2015年3月に打ち上げられた米国「MMS」衛星は、数 km レンジのミクロスケールの現象を4機の衛星からなる編隊飛行で時間変化、空間変化を切り分けて明らかにしつつある。これまでの観測から、磁気流体力学的なマクロスケールな現象と運動論的なミクロスケールの現象のダイナミックなカップリング（スケール間結合）という考え方が重要であることがわかってきており、磁気流体力学の時空間スケール、イオンの時空間スケール、そして電子の時空間スケールへと踏み込みつつある。また、「あらせ」衛星においては、プラズマ波動と粒子の相互作用過程の定量的な観測を世界で初めて実現するために、波動粒子相互作用解析装置と呼ばれる我が国独自の装置を搭載し、無衝突プラズマ系における波動と粒子のエネルギー交換過程を実証的に明らかにしつつある。

本分野では、これらのミッションの先に、最小のスケールであると考えられる電子のダイナミクスを高時間分解能と編隊飛行によって観測し、磁気流体力学的なマクロスケールの現象と運動論的なミクロスケールの現象のダイナミックなスケール間結合を明らかにするミッションを実施することを目指している。特に i) 磁気リコネクション、ii) 衝撃波、iii) 境界層混合、iv) プラズマ波動・乱流という宇宙プラズマの重要な現象の詳細を解明していく。具体的には、これまでの「SCOPE」衛星の検討と、新たに浮上しつつある X 線による磁気圏撮像の可能性とをあわせ、編隊飛行のその場観測と X 線による磁気圏境界面撮像観測を組み合わせたスケール間結合解明のための衛星を計画している[候補ミッション O-1, I-2]。

これらの物理過程は、太陽や他惑星磁気圏をはじめ、宇宙で普遍的に生起している現象であり、地球電磁気圏の研究者と天文学分野との共同研究も活発に行われている[候補ミッション S-4]。本分野では直接探査の知見を持って、これらの現象の理解に貢献していく。

地球大気圏・電離圏

1-1で述べたように、地球の大気圏・電離圏環境は太陽からの粒子および電磁エネルギーの流入によって支配されると同時に、地球大気圏内の鉛直方向の結合による影響を強く受けるという特徴を持っている。この領域に現れる諸現象を理解するためには、(i)太陽から大気圏・電離圏への物質・エネルギーの流れ、(ii)地球大気圏内での物質・エネルギーの流れ、の2つを定量的に捉える必要がある。ここでは、(i)、(ii)のそれぞれの観点について、海外の動向をふまえながら述べていく。また、近年の超小型衛星の急速な発展により、大気圏・電離圏領域は比較的容易に利用可能な宇宙空間となっており、従来にはない観測が実現できるという科学的な面と、宇宙利用システムの変動の理解が必要であるという実利用的な面との両面を持ち始めている。この実利用としての観点から、大気圏・電離圏環境の変動の宇宙・社会システムに与える影響の評価・予測の重要性は高まっており、GPS衛星等の測位衛星を利用した電離圏動態把握やその宇宙天気予報への応用は広く行われている。社会基盤としての宇宙天気および宇宙天気予報の取り組みは、宇宙利用が進む今後さらに高まると考えられる。

(i) 太陽から大気圏・電離圏への物質・エネルギーの流れ

大気圏・電離圏環境は、太陽からの粒子および電磁エネルギーの流入によって、短期的・長期的な変動を示す。2000年代以降に、「CHAMP」衛星によってそれまで不足していた中性大気変動の観測が進んだ事でプラズマから中性大気へのエネルギー輸送の変動の激しさが明らかにされ、さらにこの影響は、窒素酸化物 (NOx) や水素酸化物 (HOx) の生成を通じて中間圏から上部成層圏にまでおよび、成層圏のオゾン破壊を引き起こすこと

も地上観測などによって明らかにされつつある。このような、太陽、磁気圏からの粒子および電磁エネルギーの流入がプラズマを介して成層圏以下の大気にまで及ぼす影響の解明が今後の大きな科学的課題であり、そのためには、特にプラズマおよび電磁エネルギーが中性大気へエネルギーを受け渡す領域である高度80km-400kmの領域の観測が重要となる。SMILES-2衛星[候補ミッションS-3]は高度10-150kmのオゾン、窒素酸化物、水酸化物などの大気組成と、温度、風と電離圏におけるプラズマを測定することにより、太陽から大気圏・電離圏への物質・エネルギーの流れを明らかにするものである。さらに、FACTORS衛星[候補ミッションS-1]は、高度300kmのプラズマ・中性大気の同時その場測定によって、無衝突プラズマ系から衝突系である弱電離プラズマ系へのエネルギー注入機構と中性大気の応答の解明を行う。

また、これらの高度域の飛行体による観測として、観測ロケットおよび再使用ロケットによるキャンペーン的直接観測[候補ミッションO-3]と、超低高度衛星による継続的的直接観測[候補ミッションO-5]が期待されている。これらの観測では、プラズマ・中性大気双方の同時観測による両者の結合過程の解明が重要であり、特に中性大気計測のためには高精度化および小型衛星への搭載に向けた小型化が必要である。また、再使用ロケットと超低高度衛星は推進システムを含めた開発も必要となる。なお、これらの飛行体による観測は、EISCAT 3DレーダーやPANSYレーダーを中心とした地上拠点観測や、SuperDARNレーダー網などの地上ネットワーク観測との連携により、全地球的な粒子・エネルギーの流入とそれに対する応答の解明が可能となる。また、海外の動向として、衛星観測においては欧州「SWARM」衛星磁場観測によって電磁エネルギー流入の観測などが進められているが、超低高度域の観測はまだ実施されていない。米国では「CARINA」衛星として超小型衛星による試験的観測が計画されている。

(ii) 地球大気圏内での物質・エネルギーの流れ

大気圏・電離圏環境は、下層大気で励起された大気波動によるエネルギーや運動量の輸送、温室効果ガスの増加等の様々な要因により、短期的・長期的な変動を示す。地球大気において、地表付近や下層大気の変動が、中層および超高層大気にどのような影響を及ぼし、我々の生活にどのように関わるのかを提示することは重要である。1990年代以降の光および電波による撮像観測技術の発展により、超高層大気領域においても大気波動およびそれが引き起こす現象の観測が可能になってきた。2012年から国際宇宙ステーションにおいて観測を行っている「ISS-IMAP」はこのような下層大気と超高層大気との大気波動による結合を明らかにする先駆的な観測である。

このような、超高層大気を含む大気圏全体にわたる大気波動によるエネルギーの流れとその影響の解明が今後の大きな科学的課題である。SMILES-2衛星[候補ミッションS-3]は、高度10-150kmの成層圏・中間圏・熱圏を、昼夜を問わず、赤道域から高緯度域にかけて、連続的に測定できる世界で初めての衛星であり、下層大気と超高層大気との大気波動（主に潮汐波）による結合を解明することができる。2017年打ち上げの米国「ICON」衛星も同様の目的で観測を行なっているが、観測は赤道域に限られており、観測装置の制限から昼夜の観測精度の違いが大きくSMILES-2衛星による全球的な観測を必要としている。また、観測ロケットや再使用ロケットによるキャンペーン的観測[候補ミッションO-3]も鉛直分布の直接観測によって大気の上下結合の解明に重要であり、これら飛行体による観測は、新規の大型レーダーである赤道MUレーダーを中心とした高精度拠点観測と、光学観測網OMTIや、GPSや磁力計などによって広範囲の展開が進みつつあるネットワーク観測との連携と全大気モデルGAIAなどの大規模数値モデルとの結合によって全地球的な大気圏内の物質・エネルギーの流れとそれに対する応答の解明を可能にする。海外の動向として、米国「ICON」衛星の他に米国「GOLD」衛星の観測も静止軌道からの水平2次元撮像観測として計画が進められている。

(B) 惑星電磁気圏・大気圏

1-1の概要で述べたように、20世紀後半に行われた飛行体による惑星探査によって、多様性に富んだ惑星電磁気圏・大気圏の基本的特徴が明らかとなった。今世紀に入り、惑星探査の新たな方向性として、(i) 生命や生命圏環境の探査、(ii) 巨大惑星-衛星系の電磁気圏・大気圏探査、(iii) 地球型惑星の電磁気圏・大気圏探査、(iv) 太陽・太陽圏探査、(v) 小天体探査、(vi) 月探査など、米欧を中心に多様な探査が実施されてきている。このうち、本分野に密接に関わる探査の切り口として、(ii)から(vi)について概述し、(i)への波及

効果について述べる。

(ii)の巨大惑星-衛星系の電磁気圏・大気圏の探査は、地球電磁気圏探査における支配物理の探究を基軸として、比較惑星電磁気圏・大気圏の観点から、巨大磁気圏における粒子加速、衛星の大気や内部構造、ガス惑星系の起源と進化などを明らかにすることを目的としている。2004年より米国「Cassini」探査機による土星-衛星系探査、2016年より米国「Juno」探査機による木星極軌道周回探査が行われ、また、2022年打上げ予定の欧州「JUICE」探査機には日本も参加して木星-衛星系探査が予定されている。さらに、米国 Decadal Survey では天王星探査の検討も進められている。

(iii)の地球型惑星の電磁気圏・大気圏探査では、金星における2006-2014年の欧州「Venus Express」探査機の大気化学に重点を置いた観測に続き、2015年には我が国の「あかつき」探査機が気象力学に重点を置いた観測を開始した。金星をはじめとする各惑星の平均的な大気組成・熱構造・風系は20世紀の探査によって明らかにされたが、今後はそれら平均的な姿が太陽光エネルギー入力を基にどのような化学的・力学的プロセスによって動的に維持されており、どのように変化させられるのかという素過程の理解が求められており、「あかつき」はこの問題意識のもとに実施されている。一方、水星は1974-5年の米国「Mariner10」探査機によるフライバイ観測以降は未探査であったが、2008年からの米国「MESSENGER」探査機によるフライバイ観測と周回観測、並びに2018年打上げ予定の日欧共同「BepiColombo」探査機による周回観測によって、その希薄な大気と小さな磁気圏という特異なパラメータ空間における磁気圏過程などの総合探査が行われる。地球電磁気圏とは異なるパラメータでの磁気圏-電離圏（地圏）結合、粒子加速を観測し、地球電磁気圏と比較することで、惑星電磁気圏についての普遍的な理解を目指す。

一方、(iv)の太陽・太陽圏探査では、米国の「Voyager」探査機や「IBEX」探査機などにより太陽圏-星間風相互作用の観測が行われ、一方で2018年打上げ予定の欧州「Solar Orbiter」探査機や、2018年打上げ予定の米国の「Parker Solar Probe」探査機などの太陽近傍におけるその場観測によって、太陽風加速・コロナ加熱などの太陽風中の素過程のその場観測から得られる知見と、分光撮像観測・シンチレーション観測で得られる太陽表面・近傍現象の知見を整合することが期待されている。また、日本を中心とした国際ミッションによって太陽から宇宙空間までのダイナミクスをシームレスに解明することを目指す「Solar-C」計画も太陽地球惑星圏の知見を得る上で重要である。

(v)の小天体探査においては、より始原的な小惑星や彗星のサンプルリターンに挑戦する流れに加えて、火星衛星を探査する「MMX」計画の検討が進められている[候補ミッション L-1]。「MMX」計画では火星衛星の起源論争に決着をつけるとともに、地球型惑星・衛星の進化過程の手がかりを得ることが期待される。衛星の起源と進化の理解においては、衛星からの揮発性物質（水など）の宇宙空間への分子放出や、周辺プラズマやダストとのイオン旋回半径スケール以下の相互作用過程（宇宙風化）の理解が重要となる。(iii)にも関連するが、火星衛星近傍軌道からの観測によって、火星大気の散逸史や、火星大気中の水やダストの動的な輸送を担う素過程に制約を与えることも期待される。

(vi)の月探査では、将来の有人月面活動を目指した国際協働による探査の検討が進みつつある[候補ミッション O-4]。有人月面活動に向けた重要課題の一つとして、月極域の水の量と質の調査がある。月の水の分布を理解する為には、太陽風プロトン起源の水酸基・水分子生成を含む「水の生成・濃集原理」の理解が重要となる。また、人類の活動領域を月以遠に拡大するにあたり、STP分野が宇宙天気研究で培ってきた放射線・高エネルギー粒子・帯電などの宇宙環境の知見の活用と更なる発展が求められる。

このような国内外の惑星探査の潮流の中で、本分野は地球電磁気圏の探査と同様に、従来の探査で得られた統計的描像から、ダイナミカルに変化する過渡的な描像の観測を目指し、様々な太陽（中心星）パラメータにおける (a) 太陽風から惑星磁気圏-電離圏への運動量・エネルギー輸送、(b) 惑星表層-大気圏-電離圏-磁気圏間での物質・運動量・エネルギーの輸送・循環、(c) 太陽風相互作用や太陽紫外放射等による非熱的成分の生成、(d) 中心星との電磁氣的相互作用、(e) そしてその帰結として生じる高エネルギー粒子の生成や惑星大気の散逸等のスケールリング則を定量的に理解し、過去や系外に演繹する知見を得ることが必要である。

このような問題意識のもと、本分野は (ii)に関して「JUICE」探査機による木星圏および水衛星周辺の宇宙環境探査、(iii)に関して「あかつき」探査機、「BepiColombo」探査機による地球型惑星（金星、水星）の電磁気圏・大気圏環境探査を遠隔観測と連携して実施する[候

補ミッション T-1]。さらに(iii)と(v)に関して「MMX」探査機による火星衛星および火星大気の探査を実施する[候補ミッション L-1]。また(iii)に関して、火星の電磁気圏・大気圏環境探査、特に火星周辺の宇宙環境や大気散逸が気候変動に果たした役割の理解を目標にして、新たなミッション検討を行っている[候補ミッション S-2]。この火星宇宙天気・宇宙気候探査は、過去の探査機によって得られている火星大気圏・電離圏の平均的な描像をふまえ、さらに太陽風と火星電離圏の相互作用の過渡応答を理解することを目指すものであり、様々な太陽風パラメータでの観測データを取得し、過去 40 億年間への演繹を可能とするものである。また、下層大気から超高層大気までの大気上下結合を明らかにすることも目指している。なお、「JUICE」探査機による氷衛星周辺の宇宙環境探査や、火星宇宙天気・宇宙気候探査による過去 40 億年間への演繹は、(i)の生命圏環境の理解への波及効果も大きい。

これらの太陽系内の探査で得られた知見は、過去の太陽圏惑星環境の理解、そして直接探査が及ばない系外惑星圏の理解に貢献するものである。そして、太陽系内惑星電磁気圏の比較だけでなく、系外惑星観測と組み合わせることによって、地球を含む多様な惑星における(i)の生命圏環境の理解に繋がる電磁気圏・大気圏環境を包括的に理解することが期待される。そのため、本分野は系外惑星の分光探査、特に海外では実施できない紫外線領域での分光観測のミッション検討も行っている[候補ミッション I-1]。

(2) 現在検討されているミッション

2.1 太陽地球惑星圏の研究領域が主導するミッション

[S-1] 候補ミッション名： 編隊飛行による地球電磁気熱圏探査衛星計画 (FACTORS)

ミッションカテゴリ： 公募型小型衛星計画 (イプシロンロケットによる複数衛星同時打ち上げ)

目的：

正午・真夜中子午面内で低高度 (300~4000km) の太陽同期軌道を、約1km~100km(可変)の間隔で編隊飛行する2~3機の衛星群により、大気惑星、特に磁化大気惑星における宇宙惑星結合系として作用している普遍的で多様性に富む物理機構の定量的理解を得る。

研究領域内での位置づけと世界の類似ミッションとの比較：

地球周辺の宇宙空間と電磁的・物質的に接合している地球極域磁気圏・電離圏では、領域間結合系機構により、宇宙空間物質の加速・輸送、それらに関わる波動の励起・伝搬、大規模な電場構造、そして地球超高層と宇宙空間における電流が、多様な形態と様々な空間・時間スケールで発現し、相互作用機構を担っている。磁気圏プラズマダイナミクスにより駆動された現象が、磁力線により地球極域へと投影・伝達され、地球極域電磁気圏・超高層大気においては、宇宙プラズマ粒子の加速・輸送、電磁気圏電流系の形成・変動、オーロラ発光、地球大気プラズマの加熱・流出、あるいは中性大気加熱が引き起こされている。

このような宇宙惑星結合系は、系内・系外惑星を問わず、中心星(太陽)からの恒星風(太陽風)に晒される大気惑星、特に地球と同じ磁化惑星においては多様で普遍的な物理過程であり、それらの惑星周辺の宇宙空間を含む惑星圏の形成や惑星大気進化に深く関わる基本的な物理機構として作用する。特に地球極域電磁気圏・熱圏の結合過程は、大気惑星における宇宙惑星結合系を代表するだけでなく、衛星による直接観測と、それらと相補的・多角的な地上観測との統合的観測体系により、最も精密で定量的に理解出来る探査対象である。

更に、ERG衛星計画において世界で初めて実証されつつある波動・粒子相互作用解析によるエネルギー授受機構の定量的評価の実績を継承し、電離圏イオンのプラズマ波動による加速・流出現象、極域磁気圏で励起するアルベン波やイオンサイクロトロン波によるプラズマ加速現象における素過程の定量的な物理機構の同定が可能である事も特筆される。これらの波動観測や波動粒子相互作用解析においては、複数衛星による同時観測が、波動のモード・伝搬特性、加速領域の空間分布・時間変動の定量的解析には不可欠となる。

また、従来の単独衛星による直接観測では時間変化と空間分布の分離がほぼ不可能であるのに対し、高時間・空間分解能によるオーロラ発光の2次元空間分布・時間変動の画像データとの比較・相関解析により、複数探査衛星での同時・多点観測データの取得・解析が実現すれば、自然事象の成長/励起・伝搬/輸送・消滅/減衰に関する定量的な評価が可能となる。これにより、広く宇宙科学全般において最も詳細で多面的な物理量(6桁に及ぶエネルギー帯域でのプラズマ粒子の速度分布関数の取得、7桁以上の周波数帯域におけるプラズマ波動の電界・磁界の多成分

スペクトル・波形の計測、オーロラ・大気光の高速2次元単色撮像、等)を、統合的にもたらしめて来た実証科学としての宇宙空間物理学の分野に、まさに質的な転換をもたらすと期待される。

国外では編隊飛行衛星計画が着実に実現されて来ており、その学術的意義と将来展開の方向性は明瞭である。しかしながら、欧米に比肩する成果を輩出して来た日本の宇宙空間物理学分野には、未だに編隊飛行による探査衛星計画が実現しておらず、加えて、着実に実績を積み重ねつつ世界の第一線に並びつつある中国・インドにおける宇宙科学の将来計画に鑑みても、日本独自の構想と技術による編隊飛行探査衛星計画の早期実現が不可避である。

この状況下において、他の探査計画とは大きく異なる観点で、本探査衛星計画は独創的・進歩的である。それは、無衝突プラズマ系としての宇宙プラズマと弱電離プラズマ系としての地球超高層中性大気との領域間結合の直接探査である。無衝突系である磁気圏プラズマや電磁場・プラズマ波動が、磁力線に沿って地球極域電離圏・熱圏へと侵入・入射される過程において、衝突系であり弱電離プラズマを有する超高層大気領域との相互作用を経て、中性大気・プラズマ結合系を主体とする領域結合系を形成しているという事は、宇宙地球結合系を代表する特長の一つである。この様に、無衝突プラズマ領域から衝突系としての弱電離プラズマ領域へと変化する結合系を、様々な物理量に渡って統合的・直接的に精密観測し得るのは、2020年代においても地球超高層大気領域を対象とする本計画が唯一と言える。つまり、本計画のほぼ全ての高度領域において、最先端の学術的視点における科学観測意義・目的に合致した観測項目を提案している。

本計画では通常の太陽同期円軌道ではなく、近地点高度300~400km・遠地点高度4000kmの楕円軌道で正午・真夜中子午面内の太陽同期軌道に、3軸姿勢安定方式の衛星を投入し、観測・運用を行う。この独創的な軌道は2つの大きな特長を有する。第一点は、れいめい衛星と同様に、プラズマ粒子分析器が有する360度の平面状視野に磁力線を捕捉する姿勢制御により、ピッチ角分布を瞬時に取得可能で、1台の分析器でも高い時間分解能を達成出来る事である。また、オーロラ発光を撮像している領域内にプラズマ粒子計測地点の磁気共役点を捕捉する姿勢制御を行う事で、オーロラ発光領域へ降下するオーロラ電子、あるいはオーロラ帯から上昇してくる電離圏イオンのエネルギー・ピッチ角分布を長時間に渡って同時計測する事も可能になる。次に、低高度での中性大気粒子計測においても、姿勢制御により衛星の進行方向を粒子分析器の視野内に捕捉し続ける事で、中性大気の密度・風速・温度計測が実現可能となる。この姿勢制御は近地点高度での空気抵抗を低減するにも有効である一方で、近地点・遠地点維持には衛星搭載推進系による制御も検討する必要がある。更に、イオンの旋回位相を分離しつつ、フラックスを計測するという世界初の旋回位相同時計測も可能で、波動粒子相互作用と併用する事で、波動・粒子間のエネルギー授受素過程の定量的直接観測が実現する。最後に、地球固有磁場の(双極子)磁軸と自転軸の傾きに、正午・真夜中子午面の太陽同期軌道でも、南北極域のオーロラ帯とその内部の極冠のほぼ全域を1日でも横切る場合(季節)があり、極域全体に渡る大局的観測が可能である。この特長的な軌道による地球極域電磁気熱圏探査は前例が無い。

前述の通り、本計画はERG衛星計画の発展型としても位置付けられる。ERG計画では衛星観測・地上観測・モデリング/シミュレーションからなる三位一体型研究体制を新規軸の研究体制・手

法として確立し、無衝突プラズマ系における波動・粒子間のエネルギー収支を定量的に評価出来る波動粒子相互作用解析として提案したが、本計画ではこれらを更に深化させ、世界的にも類を見ない研究活動を展開する事を目指している。従って、本計画はERG計画の次のコミュニティーミッションとして分野の総意で提案されているものである。国外(米国・欧州・中国)においても、2020年代の実現に向けて、地球極域における磁気圏・電離圏・熱圏の探査衛星計画が複数(OHMIC、MEME-X、Alfven、ESCAPE、CONNEX、MIT、等)提案されており、宇宙空間物理学や超高層大気物理学において、今後10年間に於ける最も重要な観測領域として広く認識されている。その中でも本計画は、宇宙地球結合系に作用する素過程の定量的・統一的理解を目指すという点で獨創性・独自性が高く、広範な高度・領域・現象を網羅的、かつ統合的に観測する唯一の探査衛星計画として位置付ける事が出来る。また、本計画に衛星本体を提供し、同時打ち上げ・同時共同観測を行う可能性を見通し、スウェーデンの王立宇宙物理学研究所と国立宇宙機関も関心を持っており、実質的に推進する研究者間の検討・意見交換がなされつつある状況である。

サイエンス成果が与えるインパクト：

系内・系外の大気惑星において不変的な宇宙惑星結合系の定量的理解を得る事が目的であり、編隊飛行による探査計画という日本初の手法を基盤として実施する。更に、極軌道探査衛星計画においては世界初となる高時間・高空間分解能を達成し、衛星観測と相補的な地上観測、およびモデリング・シミュレーションとも連携することで、磁気圏・電離圏・熱圏の領域間結合における多様な電磁的・物質的エネルギー授受過程の定量的理解、波動粒子相互作用におけるエネルギー授受の素過程の理解、無衝突プラズマ系から衝突系である弱電離プラズマ系へのエネルギー注入機構と中性大気の応答に関する統一的理解、をもたらしものと期待される。

主要キー技術とその戦略の中での位置づけと開発状況：

100-200kg級衛星による編隊飛行観測技術、および、複数衛星の同時打ち上げ技術。これらの編隊飛行観測技術・同時打ち上げ技術は地球電磁気熱圏探査のみならず、様々な宇宙計画にとって将来必要な技術であると思われる。

準備・検討体制：

宇宙空間物理学（特に電磁気圏・超高層大気物理学）における衛星・地上観測関係者

準備状況：

ワーキンググループ申請予定

検討のための外部資金獲得状況等：

多くの理学観測機器には、過去の飛行体計画での技術的実績がある。3軸姿勢安定型の超小型衛星に搭載する伸展アンテナについては、SCOPE計画で基礎開発を行ったアンテナを基礎にして開発する計画である。光学観測機器に関しては、地上観測で既に多用されているEMCCDの宇宙仕様化を検討している。編隊飛行衛星群の打ち上げ、編隊飛行の形態・方法、推進系を含めた衛星バスについては、それぞれの専門のJAXAの工学研究者と明星電気M-SAT計画室と協同で初期検討・基礎設計を行いつつある。これらに関して、現在は各大学・機関等の研究費や基盤研究(S)(A)等の複数の科研費を獲得して検討・開発途上にある。

[S-2] 候補ミッション名： 火星宇宙天気・宇宙気候探査計画

ミッションカテゴリ： 公募型小型衛星計画

背景と目的：

約 40 億年前の火星は海を持ち温暖湿潤な気候であったと推定される一方で、現在の火星は寒冷乾燥した気候を持つ惑星である。このような気候変動を引き起こすには、表層を覆っていた海水と 1 気圧分程度の CO₂ 大気が地下に貯蔵もしくは宇宙空間に流出して表層環境から取り除かれる必要がある。火星宇宙気候研究の重要課題として、水と CO₂ 大気を宇宙空間に逃がすことができる物理機構の解明が挙げられる。現在の火星はグローバルな固有磁場を持たず、太陽風と大気が直接相互作用し、これまでに、NASA の火星探査機 MAVEN 等によって火星大気散逸現象を含む火星圏環境について多くの基本的描像が得られつつある。特に、惑星間コロナ質量放出(ICME)時の大気散逸率の増加や太陽高エネルギー粒子(SEP)によって引き起こされるオーロラ、残留磁化による誘導磁気圏の非対称、水素散逸率の短期変動などの、最近の MAVEN による発見は、火星周辺の宇宙環境や大気散逸率に太陽変動・固有磁場・下層大気や表層からの水輸送が大きな影響を与えることを示した。一方で、一機によるその場観測の限界から、グローバルな宇宙環境・大気散逸の様相の把握や、太陽の激しい変動への応答の理解が、過去への演繹に向けた喫緊の課題となっている。

太陽高エネルギー粒子の火星大気への侵入は、この相互作用の形態に依存するが、最近発見された新しい火星オーロラを使うことで、この相互作用の形態を可視化できる可能性がある。また、将来の火星有人探査にとっても、火星周辺の宇宙放射線環境把握は重要である。火星の宇宙放射線環境と太陽変動の関係を理解することは、火星の宇宙天気研究の重要な課題となっている。このように、新しい火星オーロラの発見は、グローバルに高エネルギー粒子環境を探査する手段として、火星オーロラのイメージングが有用な手段になることを示唆している。

本計画は、こうした火星宇宙天気・宇宙気候に関する課題と新発見を踏まえ、火星オーロラの動態を明らかにし火星圏での高エネルギー粒子環境の理解を目指す。また、火星圏の太陽風・太陽放射変動への瞬時応答を明らかにし、大気散逸が気候変動に果たした役割を理解しようとする我が国主導の火星探査計画となっている。具体的には、2つの達成目標（1. 火星圏の太陽風・太陽放射変動への瞬時応答を明らかにし、宇宙への大気散逸が気候変動に果たした役割を理解する、2. 火星オーロラの動態を明らかにし、火星圏での高エネルギー粒子環境を理解する）を設定し、そのために、6つの観測項目（磁場観測、高エネルギー粒子観測、オーロラ撮像、太陽風・太陽放射観測、電離大気流出観測、中性大気流出観測[一部オプション]、大気上下結合観測[オプション]、レーダーサウンダ観測[オプション]）を実現する。

サイエンス成果が与えるインパクト：

近年、太陽の活動が惑星環境に与える影響の理解は大きく前進し、地球においては太陽活動が我々の生活に及ぼす影響を予測する宇宙天気研究が多方面で推進されている。また、多数の系外惑星が発見される中、惑星の生命居住可能性（ハビタビリティ）の理解の観点から、主星の活動

と惑星圏環境の関係をより普遍的に理解しようという惑星の宇宙気候探求の機運が高まっている。我々の検討している「火星宇宙天気・宇宙気候探査」は、この学際的な新しい研究の大きな流れの中にあり、本計画で得られる知見は、遙か彼方の系外惑星がどのような大気と表層環境を持ちうるかを、推定する手がかりを提供する。また、火星有人探査にとっても、火星周辺の宇宙放射線環境把握は必須といえる。世界的には、宇宙天気フォーラムなどで、火星周辺の放射線環境の議論が始まっているとともに、火星有人地表探査へのステップとして、火星有人周回探査の検討なども始まっており、本計画は、学問的な価値に加えて、将来人類の活動領域を火星にまで拡大するために重要な探査であるという側面も持っている。

主要キー技術とその戦略の中での位置づけと開発状況:

○火星エアロキャプチャ技術実証：本計画を実現する探査機システムの可能性の一つとして、上述のように工学主導の火星エアロキャプチャ技術実証検討に協力している。エアロキャプチャは、惑星周回軌道投入において推進系を用いる場合よりもオービタの質量を増大させることができる有望な技術であるが、これまで惑星探査において実現された例がない。この検討では小型科学衛星標準バスの利用を想定しており開発要素が少ないが、火星地表系との火星標準通信系（UHF）は新規開発要素となる。その他、軽量エアロシェル、空力誘導、推進系などのエアロキャプチャに関するものがキー技術に含まれるが、小型回収カプセルによって2018年に部分実証される計画である。エアロキャプチャはシステム技術としての難易度が高く、地球近傍でのシステム実証が必要である。また、我が国の火星圏探査ロードマップの中で、火星エアロキャプチャは、火星着陸探査に必要な前駆ミッションとして位置付けられ、小型ミッションとしてコストを抑制しながら、火星着陸探査に必要な EDL 技術などを部分的に実証し、データリレーや地上観測など火星着陸探査ミッションに必要なプラットフォーム機能を実現するという側面も持つ。

○モデル科学機器：本計画では、モデル科学機器として、下表の項目(オプションを除く総重量約 30kg、電力約 80W)を設定している。その開発状況・搭載実績等は下表を参照されたい。

モデル科学機器	検討責任者	開発状況	搭載実績
磁場観測器	松岡(ISAS)	要求を満たす技術は既存。小型・省電力が必要な場合には開発が必要。(他計画用に現在開発中)	あらせ, MMO
高エネルギー粒子計測器	笠原(東大)	観測原理は確立。小型・省電力化が現状の課題。(三軸探査機用を2018年度に飛翔実験予定)	あらせ (スピン探査機用)
電子計測器	齋藤(ISAS)	搭載実績は多数。小型省電力化は発展的課題。	あらせ他
イオン質量分析器	横田(大阪大)	搭載実績は数例。小型省電力化や高質量分解能は発展的課題。(MMX用[M/dM=100]を現在開発中)	あらせ, かぐや他
大気流出観測カメラ	山崎(ISAS)	高コントラスト光学の要素実験は了。小型・軽量化のためオーロラカメラとの共通化を検討。(BBMによる迷光総合評価を今後実施予定)	あかつき(ベース機器)
オーロラカメラ	中川(東北大)	IMAP/VISIをベースに、MAVEN/IUVSチームと協力	

		して SNR・光学概念設計を検討中。迷光対策等のため大気流出観測カメラとの共有化を検討。	
レーダーサウンダ*	熊本(東北大)	技術的な実現性のリスクはなし。但し前搭載から 10 年を経ており、担当可能なメーカーによる高周波化・新規部品によるリソース削減見通の再検討が必要。	のぞみ、 かぐや
中性大気流出観測器*	TBD	海外協力での搭載を検討。	
テラヘルツ分光器*	前澤(大阪府大)	天文・地球観測ミッションで、技術・手法は確立され、観測実績も豊富。小型省電力化が発展的課題。	Herschel, SMILES 他

* オプション機器。

準備・検討体制:

ISAS、東大、東北大、大阪大を中心に約 40 名と宇宙研工学約 10 名で検討を実施。

準備状況－技術的準備状況、検討のための外部資金獲得状況等:

本計画は、ISAS にて戦略型中型計画公募への提案を目指し 2011 年末に設立された、火星大気散逸探査（のぞみ後継機）検討 WG と SGPSS 地球型惑星圏環境分科会が中心となり検討を進めてきた探査計画で、2013-2014 年度に戦略的開発経費によってミッション要求に基づいた探査機システム検討を行った。SGPSS 運営委員会の承認を得て同学会長名で提案した「火星における宇宙天気・宇宙気候探査計画」が、日本学術会議のマスタープラン 2017 において、学術大型研究計画の一つとして選定されている（計画番号 79、学術領域番号 24-2）。一方、その後の国内外の新たな火星圏探査計画の動向と、MAVEN の新発見を受け、科学目的を先鋭化した結果、2016 年末に公募型小型計画として検討を進めることを決定した。現在は、インハウスでの検討を進めつつ、火星環境探査 RG における火星探査のシリーズ化による分野横断的なロードマップの議論を深めている。加えて、工学主導の火星エアロキャプチャ技術実証検討チームとの連携などを通じ小型計画での技術的成立性について検討を行ってきており、2018 年度中頃に小型計画を目指した WG 提案、2019～2020 年頃のミッション提案、2026 年頃の打ち上げを目指している。また、各観測機器の開発要素の検討を、科研費や基礎開発経費、各担当者の持つ資金で行っている。

[T-1] 候補ミッション名： FUJIN (風神^{ふうじん})

ミッションカテゴリ： 小規模計画 (気球)

目的:

地球に関しては気象、地震、電離層、地磁気、オーロラ等の物理現象を常時監視するシステムが構築されている。しかし、他の惑星に関しては、可視光領域でさえも常時監視システムは構築されておらず、観測はキャンペーン的な期間限定観測に限られている。ところが、既存のシステムによって惑星の常時観測を実現しようとする、大気透過率、シーイング、連続観測可能時間、コスト等の問題がある。極周回成層圏望遠鏡 (風神、FUJIN) は気球によって極域成層圏に浮遊する光学望遠鏡システムで、衛星望遠鏡に匹敵する観測可能波長領域、空間解像度、連続観測可能時間を低コストで実現する。FUJIN は世界初の惑星常時光学監視システムとして定常的に運用されるとともに、突発天体を対象とする機動的な観測にも対応する。観測対象は太陽系内の惑星やそれらの衛星、準惑星、小惑星、彗星を想定する。

研究領域内での位置づけと世界の類似ミッションとの比較:

近年 NASA は気球に搭載された望遠鏡による太陽系内天体の観測の重要性に気づき、気球ゴンドラの開発および実験を精力的に実施し始めている。NASA および米国の惑星科学コミュニティーが成層圏を浮遊する気球の惑星科学分野への利用について調査した結果、Planetary Decadal Survey で上げられた科学的問題のうちおよそ 1/4 は気球による観測が適していると結論づけた。2014 年 9 月に打ち上げられた BOPPS (Balloon Observation Platform for Planetary Science) と呼ばれる成層圏気球ミッションは複数のオールト雲彗星を含む太陽系内天体を観測し、惑星科学を目的とする気球搭載望遠鏡のプラットフォーム、観測機器、サブシステムの有用性および性能を示した。さらに NASA は Gondola for High-Altitude Planetary Science (GHAPS) と呼ばれる次世代気球プラットフォームを検討している。NASA はこの気球プラットフォーム構想によって多数の重要な科学的な問題を解き明かすことができるとしている。

サイエンス成果が与えるインパクト:

FUJIN が実現することで、地上では観測できない波長帯域で、シーイングの影響なく、24 時間以上連続して惑星観測が可能な気球搭載望遠鏡を、低コストで実現できるメリットは大きい。金星大気に存在する未同定の紫外吸収物質、スーパーローテーションの維持メカニズム、水星のナトリウム大気、金星の大気重力波や雷放電、火星の極冠の消長、ダストストーム、大気メタンの変動、木星のオーロラや大気ダイナミクス、木星や土星の衛星の火山や流体の活動等、太陽系内天体の変動現象を探査機を送り込まずとも地球からの観測によって解き明かすことができる。そして、太陽系内の天体の地表面や大気中での熱環境や物質循環を理解することで、人類にとって根源的な問いである生命の起源に対する答えにつながる。

主要キー技術とその戦略の中での位置づけと開発状況:

流体中を浮遊するゴンドラの姿勢制御および目標天体捕捉・追尾技術はプロジェクト立ち上げ当初から開発を続けており、FUJIN-1において基礎技術は確立した。FUJIN-2ではそれを更に発展させ、姿勢制御を鉛直軸周りの1軸制御から3軸制御にすることで、より高精度の姿勢制御および目標天体追尾を達成する。

準備・検討体制:

理学グループ：理学と光学系・電源系の開発を担当

田口 真（立教大学）

佐藤光輝（北海道大学）

高橋幸弘（北海道大学）

工学グループ：姿勢制御系・通信系を担当

莊司泰弘（大阪大学）

中野壽彦（大分工業高等専門学校）

準備状況－技術的準備状況、検討のための外部資金獲得状況等:

ゴンドラ姿勢制御や天体捕捉・追尾の基礎技術開発は15年前から続けられている。2009年度に実施された第1回のBBT2009気球実験および2012年と2013年に実施されたFUJIN-1気球実験によって、姿勢制御および目標天体捕捉・追尾技術における課題解決に見通しを立てた。その結果を受けて、これまでに交付を受けた科研費等を開発資金として、FUJIN-2の主要なコンポーネントはすでに製作されている。今後、3年間をかけてシステムとして仕上げていく。2019年に姿勢制御の検証を的とする気球実験を実施し、必要であればその結果をFUJIN-2にフィードバックする。放球場所となるスウェーデン・キルナのESRANGEとは頻りに情報交換をしており、FUJIN-2はESRANGEの気球実験実施計画に盛り込んでいる。2018～2022年度の5年計画で科研費を申請している。

[I-1] 候補ミッション名 : World Space Observatory UV/UV Spectrograph for Exoplanet
ミッションカテゴリ : 小規模計画 (海外ミッション (ロシア) への観測装置の提供)

目的:

バイオマーカーの最有力候補である酸素と水を有する地球型惑星(生命保有惑星候補)を検出し、そして、海洋・大陸の有無や気候状態等の惑星表層環境の制約を得ることを目的とする。Kepler宇宙望遠鏡の可視光トランジット観測による系外惑星サーベイによって、地球と同程度の輻射を主星から受け(つまり、地球と同程度の放射平衡温度で)、地球程度の大きさを持つ惑星が存在することが明らかになった。残念ながら、Keplerによって検出された惑星は地球から遠いため大気特性の制約などの特徴付けはほぼ不可能である。しかし、既にTRAPPIST-1系のように複数の地球型惑星を有する惑星系が発見されたことに加え、(WSO-UV打ち上げ以前に行われる)K2やTESS、CHEOPSといった次世代トランジット観測サーベイによって、地球から比較的近い恒星(近傍星)のまわりに同様の惑星が多く発見されることはほぼ確実である。本計画では、それらの惑星を観測ターゲットとする。紫外線トランジット観測で遠方まで広がる外圏大気を捉えることによって観測限界を緩和し、生命保有惑星に特徴的な要素を検出することを目標とする。

研究領域内での位置づけと世界の類似ミッションとの比較:

国内のSTP分野では、系外惑星観測に関する検討はほとんど進められていないが、本計画の紫外線領域での観測対象は超高層大気であり、より低層の大気を対象とする他の大型計画とは異なる。また、WSO-UVは現在開発が進んでいる唯一の大型紫外線望遠鏡であり、想定寿命を超えたハッブルの運用終了後の活躍が期待されている。国内STP分野が主導して、系外惑星において超高層物理学を発展させる貴重な好機となりうる。

サイエンス成果が与えるインパクト:

系外惑星の研究は、発見から特徴づけに移りつつある。2020年までの小型・中型計画で新たにハビタブルゾーンに存在する地球型惑星が見つかると考えられ、2020年代にこれらの惑星の持つ大気の観測を目的として、JWSTや30m地上望遠鏡など大型の計画が複数予定されている。一方、その惑星大気の加熱源となる紫外線輻射量を測定し、加熱された外圏大気の検出を狙う計画は他にない。本計画によって、大型計画でも困難な、太陽系外地球型惑星の特徴付けを進めることができる。

主要キー技術とその戦略の中での位置づけと開発状況:

日本から提供する機器の主要キー技術は、真空紫外線用のトロイダル型回折格子とMCP検出器である。太陽観測装置CLASPに搭載されたラミナー型回折格子の使用を想定して目標(最低限)を設定しているが、ブレード型に変更し、特に重要な酸素輝線(130nm)波長での効率を向上させることで、観測可能な惑星の数を大幅に増やし、惑星の多様性について統計的な議論を進めるこ

とを狙う。また、PROCYON/LAICA に用いた検出器を使用する予定であり、最低限の目標は達成できる見込みであるが、MCP 表面形状や光電物質の変更により効率向上に取り組む。

準備・検討体制:

国内では亀田真吾（立教大）（代表）、生駒大洋、小玉貴則、成田憲保、田村元秀、吉川一朗、杉田精司（東大）、村上豪、塩谷圭吾（宇宙研）、西川淳（国立天文台）、寺田直樹（東北大）、倉本圭（北大）の12名で検討を行っている。

ロシア側の主要メンバーはAlexander Tavrov, Oleg Korablev (IKI), Mikhail Sachkov (INASAN), Yuri Kulikov (PGI) である。

準備状況－技術的準備状況、検討のための外部資金獲得状況等:

凹面回折格子を用いた紫外線分光器であり、宇宙実績のある既存の技術によって15個程度の地球型系外惑星の観測が可能となる。この機会を最大限に活かすために、回折格子の効率向上に向けた技術開発を「超広帯域同時分光器の開発：系外惑星大気の高精度観測に向けて」（2015-2018年度 基盤B 代表 塩谷圭吾）で進めている。また、光検出器の効率向上を「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業「地上実験・飛行体観測と理論による宇宙像研究の拠点形成」（2014-2018年度 研究分担者 亀田真吾）や「紫外線宇宙望遠鏡による太陽系外惑星大気の研究」（2016-2018年度 基盤B 代表 亀田真吾）によって進め、MCPの表面形状の変更により、ひさき・プロキオンに使われた検出器に対し、1.5倍程度の効率向上が達成可能であることを実験実証した。また2017年度にはJAXA「国際共同ミッション推進研究」によって、ロシア IKI/INASAN との調整を進め、2018-2020年度国際共同研究加速基金（交付内定）で共同研究・検討を進める

[I-2] 候補ミッション名 : THOR (Turbulence Heating Observer)

ミッションカテゴリ : 小規模計画 (海外ミッション (欧州) への観測装置の提供)

[2018/4/3 追記]

2018年3月末にESA COSMIC VISION M4 ミッションダウンセレクションの結果がESAからアナウンスされた。THORはダウンセレクションで採択されなかったため、THOR WG活動は2017年度末で終了する。

目的:

THOR ミッションはESAの中型ミッションM4のA0に対して、ヨーロッパのグループが中心となって提案し、Phase-Aスタディーに進む3つのミッションのひとつとして選定されたミッションであり、乱流プラズマにおけるプラズマの加熱および加速メカニズムの解明が主な目的である。乱流プラズマは、宇宙において普遍的に存在し、様々な天文現象において重要な役割を担っている。定常状態の太陽風や衝撃波近傍の太陽風、そして準平行衝撃波は、近地球領域においてイオン・電子スケールで乱流プラズマの観測的研究を行うのに最も適した観測ターゲットである。THOR ミッションは、これらの領域において、従来よりも、高い感度、および角度、時間、エネルギー分解能でイオン・電子スケールの乱流プラズマ観測を行うミッションである。このTHOR ミッションに、米国のMMS ミッション搭載低エネルギーイオン観測装置の開発で培った技術や、これまで検討を進めて来たSCOPE ミッションで開発を進めて来た高時間分解能プラズマ計測技術を活かして日本の得意とする低エネルギーイオンの質量分析器の一部を提供するという形態で参加し、乱流プラズマの加熱および加速メカニズムの解明に関する世界初の成果を獲得すると共に、衝撃波をターゲットとする日本の将来のミッションを補う観測を実施する。

研究領域内での位置づけと世界の類似ミッションとの比較:

2015年3月に米国のMMS衛星が打ち上げられ、地球磁気圏観測において電子スケールの観測を世界で初めて実施する。しかしながらMMSの主ターゲットは、磁気圏昼間側の磁気リコネクションの電子スケールの物理であり太陽風や衝撃波の観測には特にプラズマ粒子の観測装置が感度の上で対応していない。そこで、MMSの成果が明らかになった後の2020年前半の時期に、MMSと観測装置の性能、特に時間分解能やエネルギー範囲という意味で同等かそれ以上のものを打ち上げて太陽風や衝撃波の観測を実施することで、乱流プラズマの加熱および加速メカニズムの解明に関する世界初の成果を獲得することができる。

サイエンス成果が与えるインパクト:

THORミッションが解明しようとしている、乱流プラズマの加熱および加速メカニズムは、プラズマ現象の素過程であり、STP分野の成果に止まらず、Astrophysicsなど他分野に対しても、実測パラメータを提供することによって大きなインパクトを与える事ができる。

主要キー技術とその戦略の中での位置づけと開発状況:

特に新しい技術開発の必要は無い

準備・検討体制:

ミッション全体の検討は、スウェーデンIRFのAndris Vaivadsが中心となって行っているが、そのうちの質量分析器IMSについては、フランスLPPがPI、米国UNHがCo-PI、ドイツMPSがCo-Iと宇宙研が協力者という体制でM4のA0へ提案した。日本国内の体制は、大阪大学の横田勝一郎がWG主査となり、宇宙研太陽系科学研究系の齋藤（義）研究室と共同でハードウェア面の作業を実施する他、サイエンス面では、米国MMSミッションの日本国内グループを母体に太陽風乱流の研究者などを加えた国内チームを形成している。

準備状況－技術的準備状況、検討のための外部資金獲得状況等:

この THOR ミッションには、米国の MMS ミッション搭載低エネルギーイオン観測装置の開発で培った技術や、これまで検討を進めて来た SCOPE ミッションで開発を進めて来た高時間分解能プラズマ計測技術を活かして日本の得意とする低エネルギーイオンの質量分析器の一部を提供するという形態で参加する（低エネルギー電子エネルギー分析器の一部を提供する可能性もある）。従って、技術的には既に保有している技術を利用して参加するものであり、特に新しい技術開発の必要は無い。また、ターゲットは異なるが、宇宙プラズマにおけるマイクロプロセスを理解するという意味では、現在参加している、米国 MMS ミッションと同様の方向性を持った研究テーマであり、Geotail 衛星による磁気圏尾部のイオンスケールの観測に始まる一貫性を持った研究であると言える。現在、欧州側はPhase-A studyを進めている段階である。2017年11月頃に3つから1つへのダウンセクション結果が明らかとなる予定であったが、最終結論が出るのは2018年2月に延期となった。ダウンセクションされ次第、小規模計画へ申請する予定である。なお、本ミッションへのハードウェア提供のための費用の一部として使用出来る科研費は獲得済みである。

[I-3] 候補ミッション名 : ESCAPE (European SpaceCraft for study of Atmospheric Particle Escape)

ミッションカテゴリ : 小規模計画 (予算的に小規模計画の範囲を超える)

(海外ミッション (欧州) への観測装置の提供)

目的:

過去 30 年ほどの地球や火星等の各ミッションから、惑星から宇宙空間の大気の流出は、惑星大気の歴史、ひいては惑星の進化の鍵の一つであるという認識が深まって来た。流出には大きく熱的流出 (熱化学反応に大気加熱が根本原因) と非熱的流出 (イオン化と電磁現象の組み合わせが主因) とがあり、実は両者とも、その流出量を定めるものが何なのか未だに不明瞭である。特に前者は、最近 5 年ほどの Exosphere (外気圏) の散発的な観測に伴って、外気圏が極めてダイナミックかつ非一様で、それを知らないことにはモデルの組みようがないことが分かっている。

そこで、本ミッションでは、周期約 10 時間の人工衛星 (各観測要素は 2 分分解能) を使って、紫外線による撮像と、イオンや中性粒子の直接観測を組み合わせるとい世界に前例のない手法を用いて、外気圏のダイナミクスを高さ方向 100km、空間方向数度の解像度で調べる。

一方、非熱的流出に関しては、イオン観測を組み合わせ、過去にない質量解像度ならびに質量幅で、その成分を調べる。その際、熱的イオンに関しては同位体比まで求めて、非熱的流出がどこまで重力によるフィルターを受けているかを調べる。これは各惑星における同位体比の違いを理解する上で不可欠である。

同位体比に関しては外気圏の中性粒子に関しても同様に調べる。さらに、2020年代に完全運用となるEISCAT_3D極地レーダーと組み合わせることにより、これらのダイナミクスの空間的・時間的構造の分解も行なう。

研究領域内での位置づけと世界の類似ミッションとの比較:

欧州宇宙機関 (ESA) の M クラスミッションに日本から PI 観測装置を 2 つ載せるという形の国際協力となる。

サイエンス成果が与えるインパクト:

世界初の本格的な外気圏探査であり、水素以外全く分かっていなかった分布や温度を世界に先駆けて測定する。電離層/外気圏/磁気圏での本格的な同位体比の測定も同時に世界初となり、更に中性粒子と熱的イオンを同時に系統的に調べることで、宇宙におけるイオン-中性相互作用の解明という基礎物理にも貢献する。これらは、他の観測と合わせ、大気流出の直前で何が起きているかの物理的・化学的基礎過程の解明にも繋がる。

主要キー技術とその戦略の中での位置づけと開発状況:

極端紫外光を効率よく集光する技術。既にひさき、ISS、かぐや、BepiColombo 計画にて技術実証済。地上試験中のオペレーションに大きな制約を与えてきたが (レイトアクセス)、現在開発中

の GSE を用いれば、レイトアクセスの困難は軽減される。

準備・検討体制:

本ミッションの欧州側の PI はフランス・トゥールーズ (IRAP) の I. Dandouras で、山内は CoPI である。

搭載観測装置：極端紫外線 spectrometer (PI 吉川)、オーロラ・大気光カメラ (PI 坂野井)、
波動 (CoI 笠羽)

地上観測 (小川)

モデル (海老原)

準備状況－技術的準備状況、検討のための外部資金獲得状況等:

衛星の基本的な設計は 2015 年 1 月に提案した NITRO の母機 (提案時に概要は設計済み) に despun platform を加えたものであり、ESA の技術で可能なことが分かっている。

日本から提供する観測装置

極端紫外線 spectrometer (PI 吉川) : ひさき搭載の装置の小型版

2016 年 10 月に、この計画を主導しているフランスの IRAP を訪問し、ESCAPE 計画に必要な観測機の緒言を確認した。当面の AI を確認し、開発途中において問題となりえるポイント (主に GSE に対する要求) への対処法について認識を一致させた。

科学研究費 基盤研究 (B)H29-31 : 欧州研究者との打ち合わせを行っている

ISAS 基礎開発費 H29 : レイトアクセス時の負担軽減のための GSE の新規開発

オーロラ・大気光カメラ (PI 坂野井) : れいめい搭載装置の簡易版

基本的にれいめいに載せたオーロラカメラを、波長を 2 つに絞って、最新の部品を使って制作する。れいめいより放射線が多くなるので、いくつかの部品でそれに対応する必要がある。

波動 (CoI 八木谷) : PI チーム (サーチコイルと Langmuir Probe) への協力

地上観測やモデルのサポート

これらがどのレベルの協力になるのかは、3 つの最終候補に選ばれた場合に検討を始める。

その他のミッション候補

[0-1] NEO-SCOPE/SHOCK EXPLORER

公募型小型衛星計画

磁気圏・宇宙プラズマの大規模ダイナミクスは、これまで主としてMHD方程式に基づいて議論されて来た。しかしながら、磁気圏・宇宙プラズマにおいて多彩な現象がおこる真の原因を突き詰めていくと、全体としては大規模な運動であってもその中で鍵となる小さな領域が出現すること、その領域で鍵となるプロセスが発動すること、鍵プロセスはプラズマ粒子がMHDの制約から解き放たれて振舞うことに強く関係することが、Geotail, Cluster, THEMISなどによる最近の衛星観測から明らかになってきた。特に1992年打ち上げのGeotail衛星以降、精密「その場」観測結果に基づいてMHD近似の範囲を越えた議論が行われるようになった。2015年3月に打ち上げられた米国のMMS衛星は4衛星による編隊観測を電子スケールで展開している。鍵となるプロセスを理解するためには、鍵となる場所で、電子スケールでのプラズマ粒子の振る舞いを理解しなければいけない。しかしながら鍵となる場所の観測だけではスケールをまたがったダイナミクスの連携があるため十分とは言えず、鍵領域での電子スケールを分解すると同時に、イオンスケール、MHDスケールでのマルチスケール観測を行う必要がある。NEO-SCOPEはポストMMSのサイエンスを担うミッションであるが、旧SCOPEの反省の上に立ち、50-100kg級超小型衛星を本格的な磁気圏観測に投入することで、旧SCOPEよりも小さい予算規模でSCOPE以上の成果を目指す。現時点では高性能の50kg級衛星、およびそれに搭載可能な高性能観測装置の開発が途上であるため、ミッションの実現時期は確定できていない。

[0-2] 超小型オーロラ観測衛星計画

該当カテゴリー無し（予算的に小規模計画の範囲を超える）

近年50kg級の超小型衛星の開発が盛んに進められている。しかしながら、搭載できる機器の重量や機能に制限があることから、プラズマ粒子・波動・電磁場の統合直接観測が可能な世界標準の衛星は未だ存在しない。STP分野において、複数編隊飛行衛星による時空を分離した観測が世界的に当たり前になる中、我が国の比較的小型の打ち上げロケットを用いて複数編隊飛行衛星による観測を実現するためには、衛星の高性能、小型化が必須となる事は自明である。超小型オーロラ観測衛星計画では、搭載装置の小型・高性能化を進めて50kg級の超小型衛星を、ピギーバック衛星としてオーロラ領域を横切る軌道に投入し、磁場、電場、プラズマ波動、粒子、オーロラ光等の観測を行うことで、50kg級の超小型衛星がSTP分野の世界第一線の衛星観測を実施できることを実証する。現時点では高性能の50kg級衛星を実現できる資金源が無いため、実現時期は未定。

[0-3] JAPAN-NORWAY SOUNDING-ROCKET EXPERIMENT

観測ロケットプログラムに申請して実施

「極域電離圏におけるグローバルからメソスケール現象発生の鍵となるマイクロフィジックスの統一的理解とその役割（スケール間結合）の解明」を計画全体の目的として、日本-ノルウェーの国際協力の下で観測ロケット実験を中核とした地上観測・衛星観測を含む総合観測を実施する。

[0-4] LUNAR GLOBE

小規模プロジェクト（海外ミッション（露）への機器提供）

ベッピコロボ計画の海外との共同開発実績を生かし、惑星大気の探査を実行する。具体的には Lunar globe 計画（ロシア）への機器提供を目指し、ロシア州立大学と IKI、日本の大学の間で若手の人事交流を交えながら検討を進めている。

[0-5] 超低高度衛星によるイオン・中性大気の観測

カテゴリ未定

本ミッションは、高度 200km～300km の電離圏・熱圏領域で、プラズマ・中性大気の密度・温度・速度や電磁場環境を世界で初めて全球的に直接観測し、大気プラズマや大気波動の構造と運動、熱圏大気の寒冷化、大気プラズマの相互作用過程を解明することを目的としている。2017 年 12 月に打ち上げられた超低高度衛星技術試験機「つばめ」(SLATS) による高度 300km 以下の直接観測データを元に検討を行う。

2.2 他コミュニティとの合同ミッション

[L-1] 候補ミッション名：火星衛星探査計画 (MMX)

ミッションカテゴリ：戦略的中型衛星計画 (プリプロジェクト移行段階)

目的：

火星衛星フォボス・ダイモスは、唯二つの地球型惑星付随小型衛星である。共に低アルベドでD型/C型小惑星類似スペクトルをもつが、ほぼ火星赤道面内円軌道をとるという特徴がある。成因については、前者の特徴に整合的な始原的小惑星の捕獲 (捕獲説) か、後者に調和的な火星周囲の破片円盤からの集積 (円盤説、地球の月の成因に類似) かで論争が続いている。2024年の打ち上げを目途に、戦略的中型探査計画1号機として準備が進められつつある火星衛星探査計画MMXは、近傍観測によって表面組成、表層環境や内部構造を調べるとともに、フォボスに着陸して表面物質を採取して地球に持ち帰り、(1) 衛星の起源と歴史 (捕獲説なら太陽系初期進化・生命前駆物質の情報、円盤説なら火星材料物質と集積・変成過程) と (2) 火星環境を支配する天体衝突史・大気散逸史の制約を目的とする。回収試料の酸素同位体比などを火星隕石や将来得られる火星SR物質と比較することで、衛星起源論争に決着がつけられる。また、火星起源物質の抽出やその同位体・年代分析についても、その場探査では実現できず、回収試料の分析が必須である。衛星は常に同一面を火星に向けているため、対火星表裏の比較や軌道方向に対する前後の比較ができるサンプリングが有効である。氷起源物質のD/H比測定から火星環境進化の初期値が決められる可能性もある。同時に軌道からの火星大気の観測 (日変化や大気の運動・物質輸送の理解) も組み合わせる。本探査は、火星衛星を通じて、初期太陽系での物質の分布・移動から、原始惑星誕生過程、ハビタブルな表層環境変動までの長期間の前生命環境進化を実証的に明らかにできる。

研究領域内での位置づけと世界の類似ミッションとの比較：

本探査計画は、火星探査と小惑星探査をつなぐ位置にあり、火星着陸ミッションと強く連携した火星周回探査という側面と、はやぶさシリーズを継承・発展させるSRミッションとして、より始原的で太陽加熱の影響の少ない (捕獲説) もしくは複雑な成因 (円盤説) の小天体からのSRに挑戦する側面がある。そのため双方のコミュニティからの研究者の参加が実現しており、さらに比較衛星形成論として、地球一月系の起源と進化を探求する月科学/地球科学コミュニティとの連携も進展しつつある。

ロシア・欧州共同でのPhootprint計画がExoMars後継のSR探査候補として、NASA Discoveryミッション候補としてPADME計画、PANDRA計画、MERLIN計画がフライバイ探査 (MERLINは着陸を含む) として、それぞれ検討されていたが、いずれも実現のめどは立っていない。

サイエンス成果が与えるインパクト:

フォボスは国際的に見れば探査計画が複数あり探査対象としての注目度が高い。一方でダイモスはフライバイ観測も少なく未知な点が多い。そのためMMXには、国外からも高い関心が寄せられ、CNES、NASAがそれぞれ近赤外分光撮像装置と中性子ガンマ線分光計を開発・供給することが確約され、また軌道設計・着陸運用の検討や既存データの解析が国際協力の下で進められつつある。ダイモスについても近傍観測に限定されるものの飛躍的なデータ量の増加が期待され、全体として2つの衛星の比較学を進め、衛星の成因と火星圏環境進化の両目的に対してモデル制約力を高めることに貢献できる。また、火星衛星は将来の有人探査においても前哨基地や通信中継などの観点から注目されており、そうした計画に対しても貴重な科学情報をもたらすことになる。

主要キー技術とその戦略の中での位置づけと開発状況:

MMX 計画においては、SR 技術については、はやぶさシリーズの優位性を継承できる一方、フォボスが比較的大きな重力を持つことから、自律航法を取り入れた軟着陸を行うとともに、マニピュレータとコアラーを組み合わせた試料採取法が検討されている。衛星近傍での長期滞在には擬周回軌道の利用、往還航行については短時間での加速に優れミッション期間を短縮できる化学推進を採用したシステム検討が進められている。衛星史・火星史の読み出しのため、サンプル量を 10g レベルに増量し多地点からの試料採取を狙う。そのために帰還カプセルの大型化、試料混合の抑制が必要となる。観測装置には、表面地質、表面組成、周衛星環境の解明を主目的に、望遠カメラ(TL)、多色広角カメラ(WAM)、近赤外分光イメージャ(MacrOmega)、ガンマ線中性子スペクトロメータ(MEGANE)、ダスト分析器(CMDM)、質量分析装置(MSA)、レーザー高度計(LIDAR)がノミナル機器として選定され、それぞれ設計開発が開始されている。MacrOmega と MEGANE についてはそれぞれ仏 CNES、米 NASA が提供し、それぞれの開発に日本側のメンバーも加わっている。一連の機器による観測は、着陸点選定、試料産状の決定、そして衛星近傍軌道からの連続撮像から火星大気循環の解明にも用いられる。

準備・検討体制:

宇宙研におけるミッション定義審査をクリアし、近くプリプロジェクトに移行する見込みである。探査機システム、軌道ダイナミクス、SR技術に関しては宇宙研を中心に検討・基礎開発が進められ、科学面については北大、東北大、東大、東工大、名大、神大、国立天文台、立教大、千葉工大、早大など大学研究者らからなるサイエンスボードが検討をリードしている。搭載観測機器の検討・開発は、宇宙研の支援のもと、大学研究者を中心に進められている。

[S-3] 候補ミッション名 : SMILES-2

ミッションカテゴリ : 公募型小型衛星計画

[2018/4/3 追記]

公募型小型の提案募集に応募して、現在理学委員会で審査を受けている。

目的:

国際宇宙ステーションに搭載されたJEM/SMILES (JEM: Japanese Experiment Module; SMILES: Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder)により世界で始めて4K冷却による超高感度サブミリ波大気観測が宇宙実証された。その成果を発展させ、中層大気(成層圏・中間圏)から超高層大気(熱圏・電離圏)の温度場・風速場と大気微量成分の高感度観測を5年間おこなうことを目標としたSMILESの発展型衛星観測計画SMILES-2を提案する。

研究領域内での位置づけと世界の類似ミッションとの比較:

SMILES-2 は、JEM/SMILES で実証された高い精度で大気微量成分の鉛直分布を得ることができるとに加え、新たに導入する温度・風速測定バンドを追加することで、中層大気から下部熱圏領域の大気微量成分と温度場、風速場を同時に高精度で観測する。これらのデータは、従来、別々の研究領域とされてきた中層大気と超高層大気との結合を解明するのに重要な観測となるだけでなく、大気大循環モデルのさらなる精度向上や将来予測の信頼度向上に寄与できる。衛星による中間圏・下部熱圏の風速場、温度場観測としては米国の UARS 衛星と TIMED 衛星があり、2018 年からは ICON 衛星が観測開始予定であるが、いずれも観測高度範囲は狭く、SMILES-2 のように成層圏から熱圏下部まで広い高度域を連続的かつ高精度に測定するものではなく、大気の上方向の結合過程の解明に十分な測定ではなかった。

サイエンス成果が与えるインパクト:

SMILES-2 ミッションから得られるデータによって、以下の 4 つの課題に関するサイエンス成果を達成する。

1. 潮汐に代表される日周変動の構造とその及ぼす力学・化学・電磁気学的影響の解明
2. 中層大気で卓越する惑星規模の大気波動(成層圏突然昇温現象、太陽非同期潮汐など)による下層から超高層大気への影響の解明
3. 粒子降り込みや磁気嵐などのイベント的な現象による変動の理解
4. 背景場(時間・空間平均(帯状平均))の熱構造とそれを作り出す微量成分分布の定量的な把握とその気候影響の理解

SMILES-2 の観測によって、データの空白域ともいえる上部中間圏から下部熱圏を含めたグローバルな地球大気情報をおかたない高い精度で得ることができる。中層大気から超高層大気まで

の領域を一気に通して観測することにより、地球大気変動の最も重要な要素の一つである日周変動成分(潮汐)の鉛直構造を含めた動態把握がはじめて可能となる。また高精度な大気微量成分分布の観測から、気候変動の理解にとって重要なオゾン層変動に影響を与える化学過程を定量的に特定できる。さらに、大気圏と宇宙空間の遷移領域である超高層大気における温度場・風速場の観測から、地球全大気における電磁気的エネルギーの役割を明らかにすることができる。これらによって、気候研究のための化学モデルによる将来予測の信頼性向上や、宇宙天気のためのモデルのさらなる精度向上に寄与できる。

主要キー技術とその戦略の中での位置づけと開発状況:

4K機械式冷凍機と超伝導技術を用いたサブミリ波帯リム放射サウンダが主要キー技術である。JEM/SMILESの観測によってその測定精度の圧倒的な高さは実証されており、日本の科学コミュニティの特徴となる基盤技術として位置付けられている。JEM/SMILESで用いられたサブミリ波帯に加え、下部熱圏の酸素原子測定のために2THz帯の測定が実施される。

準備・検討体制:

科学検討: 塩谷(京大), 坂崎(京大), 藤原(北大), 水野(名大), 長濱(名大), 鈴木(ISAS), 眞子(ISAS), 秋吉(環境研), 落合(NICT), 斉藤(京大), Liu(九大), 藤原(成蹊大), 陣(NICT), 三好(九大), 大山(名大), 大塚(名大), 佐川(京産大), 富川(極地研)
周波数帯選択・データ処理検討: 鈴木(ISAS), 眞子(ISAS), P. Baron(NICT)
センサ検討: 鶴澤(NICT), 落合(NICT), 入交(NICT), 尾関(東邦大), 前澤(大阪府大)
プラズマ密度・ドリフト計測器検討: 阿部(ISAS)
補助センサ GPS 掩蔽検討: 鈴木(ISAS), JAXA 研開本部誘導グループ(予定)
衛星システム検討: 落合(NICT), 西堀(ISAS), 鶴澤(NICT)

準備状況－技術的準備状況, 検討のための外部資金獲得状況等:

2015年1月より SMILES-2 ワーキンググループとして準備を進めている。ISASの戦略的開発研究経費を獲得し、アンテナ基礎技術の検討, システム検討をおこなっている。NICTにおいて, FFT分光器・相関分光器, サブミリ波帯技術, THz帯ミキサの地上研究, 搭載用超軽量走査鏡の開発を行うなど, 関連技術の多くが既に研究実施済みである。

[S-4] 候補ミッション名 : PhoENiX (Physics of Energetic and Non-thermal plasmas in the X region)

ミッションカテゴリ : 公募型小型衛星計画 (他コミュニティとの合同ミッション)

目的:

本ミッションは、磁気リコネクションとそれに伴う粒子加速過程を明らかにすることを目的とする。磁気リコネクションは、プラズマ中の磁力線のつなぎ変わりにより磁場に蓄積されていたエネルギーが解放される現象として、地球・惑星磁気圏におけるサブストーム現象にとどまらず、太陽フレア、恒星フレア、ガンマ線バーストなどの宇宙におけるプラズマ現象に普遍的に関わっていると考えられている。これらの現象では、磁気リコネクションで解放されたエネルギーにより、プラズマ中の荷電粒子が相対論的エネルギーまで加速されることが知られているが、その物理過程の描像は明確に解っているわけではない。

本ミッションでは、粒子加速を伴うリコネクションが頻繁に発生し、リコネクションに関連する領域を広い視野で俯瞰する観測を実現できる可能性の最も高い「太陽」を観測対象とする。高エネルギープラズマから放たれた光子一つ一つの持つエネルギーを位置情報、時間情報とともに計測し、X-point周辺領域とループ上空領域における磁気リコネクションの全体像を定量的かつ統計的に解析することで、太陽フレアにおける磁気リコネクションとそれに伴う粒子加速過程を明らかにすることを目指す。太陽フレアから得られるであろう新たな知見は、「太陽物理学」ととどまらない普遍性を持った、より広範な「宇宙プラズマ物理学」へ応用可能なものとして、太陽物理学、地球惑星磁気圏プラズマ物理学、高エネルギー天文学、実験室プラズマ物理学、等の分野横断的に、実現に向けた検討・準備を進めている。

研究領域内での位置づけと世界の類似ミッションとの比較:

地球・惑星磁気圏分野では、多衛星による“その場”編隊観測によって、磁気圏尾部における磁気リコネクションの電子スケールから流体スケールに至るまでのスケール間結合の様相を実証的に解明することを目的とした日本・カナダのSCOPEと欧州のCross Scaleの共同ミッションが検討されていた。しかし、そのミッション規模の大きさと幅広い国際協力を必要とすることから、実現の見通しがたたずに、検討は凍結されている。2015年に打ち上げられた米国のMMS衛星は、電子スケールに迫る高時間分解と近距離に配置された4機の衛星編隊によって、磁気リコネクションのエンジン部である電子拡散領域の物理を“その場”観測して大きな成果をあげつつある。しかし、MMSは4機の編隊観測を電子スケールの物理にフォーカスしているため、広い空間領域におよぶリコネクション関連現象のすべてを追うことができない。

本ミッションは、世界ではじめて磁気リコネクションを広い領域で空間・時間分解にて幅広いエネルギーでプラズマのエネルギースペクトルを観測することができるミッションとして、世界的に類を見ない新しい研究計画である。

サイエンス成果が与えるインパクト:

地球・惑星磁気圏を観測対象としていないものの、これまで培ってきた太陽物理分野と地球・惑星磁気圏プラズマ分野とのリコネクションに関する議論の蓄積を活かすことで、協力して磁気リコネクションの時空間発展の理解に繋げるとともに、地球磁気圏におけるリコネクションの(太陽と比較した)現象の特異性を明確にすることができる。その成果は、地球・惑星磁気圏物理学にとっても大きなインパクトがあり、分野横断ミッションとして本ミッションの実現に参加することは願ってもないチャンスである。

分野横断的なミッションとして、リコネクションに注目する各研究分野に対するインパクトも期待できる。太陽で得られた知見に対しスケール則を適用することができれば、高エネルギー天体現象における磁気リコネクションの寄与など、様々なスケールにおける宇宙プラズマの普遍的な理解に向けて大きく前進することとなる。

主要キー技術とその戦略の中での位置づけと開発状況:

主要装置は、軟X線・2次元集光撮像分光装置および硬X線・2次元集光撮像分光装置である。どちらも太陽物理学・高エネルギー天文学分野にて研究開発が進められており、FOXSIロケット実験などで実績がある、あるいはロケット実験が予定されている。

軟X線・2次元集光撮像分光装置は、磁気リコネクションに密接に関連していると考えられている衝撃波やプラズモイドの検出、さらに粒子加速に関連するコンテキスト現象の検出を目的とした装置であり、約0.5keV~約10keVの軟X線に感度を持ち、数百万度から数千万度のプラズマや非熱的成分が作るベキ型エネルギースペクトルの一部を観測する。

硬X線・2次元集光撮像分光装置は、磁気リコネクションによって加速された電子の検出を目的とした、高ダイナミックレンジの観測装置であり、約5keV~約30keVの硬X線に感度を持ち、1千万度を超える超高温プラズマや非熱的成分が作るベキ型エネルギースペクトルを観測する。

準備・検討体制:

国立天文台の成影典之氏をリーダーとして、分野横断的に60名以上が公募型小型衛星計画に対する応募を目指してワーキンググループ活動を実施している。(SGEPSSからは10名以上がサイエンス検討を中心にワーキンググループメンバーとして参加している。)

準備状況—技術的準備状況、検討のための外部資金獲得状況等:

2018年1月末までの公募型小型衛星3・4号機の公募への応募を行った。

[T-2] 候補ミッション名 : GEO-X

ミッションカテゴリ : 小規模計画 (他コミュニティとの合同ミッション)

目的:

世界初のX線を用いた地球磁気圏の昼側境界面(カスプ、シース)の撮像を目指す。日本のX線天文衛星「すざく」らによって、地球磁気圏に捕捉された太陽風イオンが地球の超高層大気である外圏から電子を奪って電荷交換X線を発生することが分かってきた。しかし、磁気圏内からの狭視野観測のため、放射の空間分布とその太陽風応答は未だ明らかではない。観測およびシミュレーションからは、電荷交換X線は太陽風密度が高いカスプやシースで強く発光することが示唆されており、X線を用いた磁気圏観測は全く新しい手段として、地球を含む磁化惑星や系外惑星の環境の理解に新展開をもたらす可能性がある。そこで我々は (1) 月付近の軌道から超軽量X線撮像分光装置を超小型衛星に搭載し、(2) 約0.1 Re の解像度、(3) 10 min-1 hr の時間分解能、(4) 視野角 約5° で、世界初の磁気圏線撮像分光観測を狙う。

研究領域内での位置づけと世界の類似ミッションとの比較:

地球磁気圏撮像はオーロラ、リングカレント、プラズマ圏について可視光、FUV、EUV、ENA を用いた観測が行われてきたが、太陽風が磁気圏と衝突する現場である昼側磁気圏境界面については、ENA による先駆的研究はあるものの、磁気圏変動を捉える本格撮像はまだである。本計画はX線という新手段でこれを世界に先駆けて開拓する。現在、ESAと中国が共同で極軌道からのX線・UVを用いた磁気圏撮像計画SMILE (2020年代前半目標)を推進しているが、GEO-X は SMILE と比較して、可視光コンタミに強い新型半導体検出器を使うため昼地球に近いカスプ構造の観測が可能である上、望遠鏡の角度応答に優れ、カスプシースの空間分離に理想的な月付近からの観測が可能という重要な点から磁気圏X線撮像に最適である。これを可能にするのが独自の超小型X線撮像分光装置と、機動力に優れた超小型衛星および推進系の技術である。こうした利点から ESA、NASA から既に GEO-X への参加協力の申し出を受けており、さらに SMILE の ESA PI からは Deep Space Gate (月付近の国際有人宇宙ステーション)のESA 科学利用アイデア公募に GEO-X の搭載装置を共同提案したいという申し出を受けて提案も行った。NASA の将来衛星計画である超小型衛星群 MagCon と Joint Mission の可能性も議論しているなど、海外からの注目度も高い。超小型ゆえ迅速に実現が可能であり、世界初の観測実現を目指す。SMILEとの共同観測も考えている。

サイエンス成果が与えるインパクト:

(1) 世界で初めて地球磁気圏X線撮像を実証し、(2) 太陽風変動に伴う昼側磁気圏境界層の時間変化すなわち太陽風-磁気圏相互作用の変化を初めて動画として明らかにすることを目指す。さらに撮像分光によって、(3) 太陽風重イオンの化学組成をスペクトルから特定し、(4)イオン種毎の磁気圏流入の機構に制限を付けると共に、(5) X線空間分布から地球外圏の空間的な広が

りを調べ、(6) X線天文観測の前景放射や軟X線背景放射の成因に迫る。これにより磁気圏・太陽物理・天文の幅広い分野に新展開をもたらす。

主要キー技術とその戦略の中での位置づけと開発状況:

(1) 独自の世界最軽量X線望遠鏡と最先端半導体撮像分光素子を組み合わせた世界的にもユニークな超小型X線撮像分光装置 (約10 kg、10 W、10×10×30-40 cm)を、(2) 日本が東大 Procyonで世界をリードしてきた<50 kg 級超小型衛星に搭載し、(3) H2A or H3 相乗りから月付近の軌道に超小型衛星を投入するため、北大が開発する新たな推進系(ハイブリッドキックモーター)を新たに採用する。これら3つの技術は将来の太陽系探査やX線天文観測に発展可能なキー技術であり、日本が世界をリードする理工学の研究者がタッグを組んで開発し、GEO-X で実証する。

準備・検討体制:

惑星科学・天文学・宇宙工学の分野横断的チームである。

全体リード: 首都大 江副 祐一郎

科学検討: 名大 三好 由純、東大 笠原 慧、理研 木村 智樹、JAXA 宇宙研 長谷川 洋、山崎 敦、千葉大 松本 洋介

観測装置: 首都大 江副 祐一郎、JAXA 宇宙研 石川 久美、三田 信、大阪大 中嶋 大、林田 清

衛星バス: 東京大 船瀬 龍、中須賀 真一、JAXA 宇宙研 岩田 隆浩、明星電気

推進系: 北大 永田 晴紀、東大 小泉 宏之

アプライザ: JAXA 宇宙研 満田 和久、藤本 正樹、川勝 康弘、神戸大 上野 宗孝、首都大 大橋 隆哉、

その他: 大学院生 約 10 名が装置検討等に協力

準備状況ー技術的準備状況、検討のための外部資金獲得状況等:

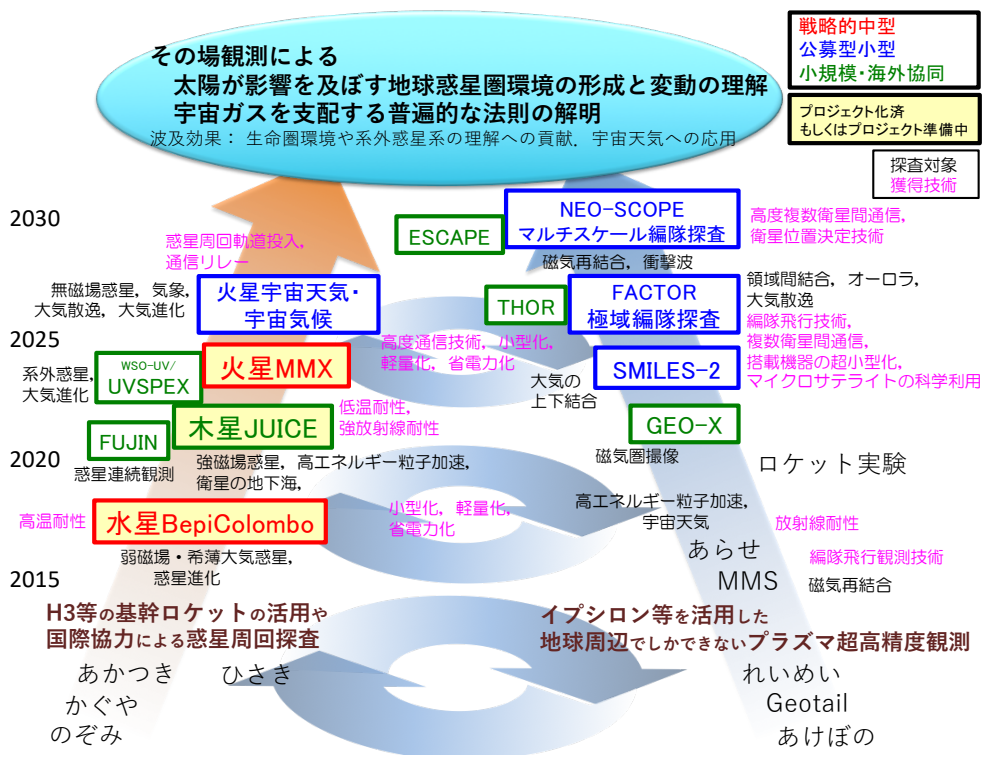
GEO-X で用いる超小型 X 線撮像分光装置は独自の世界最軽量 X 線望遠鏡と可視光・放射線耐性が高い最先端半導体分光素子からなるオリジナルのものである。望遠鏡は超小型 X 線天文衛星 ORBIS(首都大、2020 年頃目標)にも向けて首都大、JAXA 宇宙研が中心となり開発しており、基本的にインハウスで製作する。角度分解能に課題があるもの、改善点は明らかとなっており、要求を満たせる見込みである。検出器は日本とドイツが共同で衛星搭載 X 線 CCD の経験を生かしてピクセル毎に読み出し可能な DepFET を開発する。Bepicolombo 衛星に同型が搭載予定であり、技術成熟度は高い。超小型衛星については Procyon で世界初の超小型衛星による探査を成功させた東大およびメーカーと協力して検討を開始している。月付近への軌道投入に必要な推進系は、北大が独自に開発中のハイブリッドキックモーターを採用予定である。

外部資金については、これまでに科研費 若手 A、B、基盤 B、財団、JAXA 宇宙研 基礎開発研究費などを受領し、装置と衛星バスの検討を進めてきた。より大型の研究費にも応募しており、さらにワーキンググループ化して JAXA 宇宙研からの予算も獲得して、衛星を実現する

(3) 分野のロードマップ

2章で記述した検討中のミッションについて、それぞれの準備期間（薄緑）と運用期間（濃緑）を記した表を以下に、また次ページに科学戦略の目標をまとめたものを示す。

＜太陽地球惑星圏の研究領域が主導するミッション＞																
公募型小型																
FY	2016	2018	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
選定		M2		M3		M4		M5		M6		M7		M8		M9
打ち上げ						M2				M3		M4		M5		M6
＜電離圏・惑星圏探査＞																
[S-1] FACTORS (地球圏探査)			WG提案	WG活動	提案	所内準備チーム	プリプロジェクト	プロジェクト				打ち上げ運用				
＜惑星探査＞																
[S-2] 火星探査計画			RG検討	WG提案	WG活動・提案	所内準備チーム	プリプロジェクト	プロジェクト				打ち上げ運用				
小規模計画																
FY	2016	2018	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
打ち上げ																
＜探査＞																
[T-1] FLJIN	製作				打ち上げ準備	製作	打ち上げ準備									
＜海外共同ミッション＞																
[D-1] WSO-UV/UVSPEX		WG提案	WG活動	プロジェクト								打ち上げ運用				
＜海外共同ミッション＞																
[D-2] THOR		WG提案	WG活動・提案	プロジェクト								打ち上げ運用				
＜海外共同ミッション＞																
[D-3] ESCAPE					WG提案	提案	プロジェクト									打ち上げ運用
運用中・プロジェクト化済み																
FY	2016	2018	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Geotail	運用中															
あらせ		打ち上げ運用														
あかつき	運用中															
ひさき	運用中															
BeqColombo	プロジェクト			打ち上げ運用									到着・運用			
＜他コミュニティとの合同ミッション＞																
戦略的中型																
FY	2016	2018	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
選定				L2						L3				L4		
打ち上げ										L2					L3	
[L-1] MMX				所内準備チーム	プリプロジェクト	プロジェクト						打ち上げ運用				
公募型小型																
FY	2016	2018	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
選定		M2		M3		M4		M5		M6		M7		M8		M9
打ち上げ						M2				M3		M4		M5		M6
[S-3] SMILES-2		WG提案	WG活動	提案	所内準備チーム	プリプロジェクト	プロジェクト					打ち上げ運用				
[S-4] Phoenix				WG提案・提案	所内準備チーム	プリプロジェクト	プロジェクト					打ち上げ運用				
小規模計画																
FY	2016	2018	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
打ち上げ																
[T-2] GEO-X					WG提案	プロジェクト				打ち上げ運用						
運用中・プロジェクト化済み																
FY	2016	2018	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
打ち上げ																
JURE (国際的海外共同ミッション)	所内プリプロジェクト	所内プリプロジェクト								打ち上げ運用						到着・運用



小改訂執筆者（五十音順）

- | | |
|-------------|-------------------|
| 江副 祐一郎（首都大） | 田口 真（立教大） |
| 亀田 真吾（立教大） | 中村 正人（宇宙研） |
| 寺田 直樹（東北大） | 能勢 正仁（京大） |
| 齋藤 昭則（京大） | 平原 聖文（名大） |
| 齋藤 義文（宇宙研） | 三好 由純（名大） |
| 坂野井 健（東北大） | 山内 正敏（IRF スウェーデン） |
| 篠原 育（宇宙研） | 吉川 一朗（東大） |
| 関 華奈子（東大） | |