『月惑星探査の来たる10年』検討・第一段階報告

大谷 栄治[1]，倉本 圭[2]，今村 剛[3]，寺田 直樹[1]，渡部 重十[2]，荒川 政彦[4]，伊藤 孝士[5]，圦本 尚義[2]，渡部 潤一[5]，木村 淳[2]，高橋 幸弘[2]，中島 健介[6]，中本 泰史[7]，三好 由純[8]，小林 憲正[9]，山岸 明彦[10]，並木 則行[11]，小林 直樹[3]，出村 裕英[12]，大槻 圭史[4]

（**要旨**）「月惑星探査の来たる10年」検討では第一段階で5つのパネルの各分野に於ける第一級の科学について議論した．そのとりまとめを報告する．地球型惑星固体探査パネルでは，月惑星内部構造の解明，年代学・物質科学の展開による月惑星進化の解明，固体部分と結合した表層環境の変動性の解明，が挙げられた．地球型惑星大気・磁気圏探査パネルは複数学会に跨がる学際性を考慮して，提案内容に学会間で齟齬が生じないように現在も摺り合わせを進めている．本稿では主たる対象天体を火星にしぼって第一級の科学を論じる．小天体パネルでは始原的・より未分化な天体への段階的な探査と，発見段階から理解段階へ進むための同一小天体の再探査が提案された．木星型惑星・氷衛星・系外惑星パネルは広範な科学テーマの中から，木星の大気と磁気圏探査，氷衛星でのハビタブル環境の探査，系外惑星でも生命存在可能環境と生命兆候の発見について具体的な議論を行った．アストロバイオロジーパネルでは現実的な近未来の目標として火星生命探査を，長期的な目標として氷衛星・小天体生命探査を目指した観測装置開発が検討された．これらのまとめを元に「月惑星探査の来たる10年」検討は2011年7月より第二段階に移行し，ミッション提案・観測機器提案の応募を受け付けた．

1. はじめに

「月惑星探査の来たる10年」の概要について昨年，本誌記事にて紹介したが[1]，その後第一段階のとりまとめが終了したので本稿にて報告する．詳細は後述の各パネルリーダーによる報告を参照して頂くとして，はじめにとりまとめに至る経緯と第二段階以降の見通しについて説明しておきたい．

第一段階での最初の大きなイベントとして，2010年9月10日にCPS（神戸大学理学研究科 惑星科学研究センター）の後援により公開討論会を行った．神戸大学のメイン会場からTV会議システムを利用して複数会場（北海道大学，会津大学，東京工業大学，JAXA相模原キャンパス，他）との多地点会議を行い，各パネルのとりまとめ方針は勿論，「月惑星探査の来たる10年」のあり方についても活発な議論が行われた．しかしながら，予定していた半日では到底議論を尽くすことができなかったため，パネル毎の分科会を開催することとなった．

アストロバイオロジーパネルは11月25日に千葉工業大学に於いて，地球型惑星固体パネルは12月7日に東京大学地震研究所に於いて，小天体パネルは12月10日に国立天文台三鷹キャンパスに於いて，木星型

1. 東北大学
2. 北海道大学
3. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
4. 神戸大学
5. 国立天文台
6. 九州大学
7. 東京工業大学
8. 名古屋大学
9. 横浜国立大学
10. 東京薬科大学
11. 千葉工業大学
12. 会津大学
nori.namiki@perc.it-chiba.ac.jp

惑星・氷衛星・系外惑星パネルは 2011年1月22日に東京大学地震研究所に於いて，それぞれ開催された．後述の各パネル報告はこれらの分科会での議論に基づいている．なお，この分科会に至る過程で，また分科会中での議論において二つの大きな方針変更が行われた．

第一の大きな変更は，地球型惑星大気・磁気圏パネルは地球電磁気・地球惑星圏学会(SGEPSS)将来計画との整合性を重視することを決め，惑星科学会のパネルとして独自に議論する前にSGEPSSとの緊密な連携を図るとしたことである．そのキックオフとして高橋幸弘惑星科学会会員を含むSGEPSS有志との協議から惑星科学会とSGEPSSのトップ会合が提案され，2010年12月25日に惑星科学会会長，将来計画委員長，事務局とSGEPSS会長，次期会長と有志が宇宙研と京都大学に集まり両学会の連携方針を確認した．この連携は将来的には連合宇宙セクションを通して他学会へも協力関係を広げることを視野に入れている．また，この途中で地球型惑星大気・磁気圏パネルのパネルリーダーをはしもとじょーじ会員から今村剛会員に交代した．

第二の大きな変更は，提案について「いわゆる『総花的』にはせず，優先順位をつける」[1]ことをやめて，順位付けを行わないと変えたことである．これは「科学に順位付けはできない」という学会・コミュニティの多数意見に基づいている．従って，後述の各パネルとりまとめでは，優先順位をつけずに，複数の提案がパネルリーダーによって整理された上で，併記されている．なお，この方針変更は第二段階にも引き継がれている．

各パネルのとりまとめは2011年5月25日の地球惑星関連連合大会「来たる10年の月惑星探査に向けた構想と戦略」セッションにおいて報告された．講演資料と各とりまとめ報告文書は惑星科学会サーバにアップロードされ（https://www.wakusei.jp/~decade_sec/wiki/open/），会員・非会員に関わらず閲覧できるようにされている．各パネルとりまとめに対する最終コメントを6月末まで受け付けたが，事務局に送られた意見は無かった．よって，後述のとりまとめ報告はアップロード済みの報告文書に基づいている．

2011年夏より「月惑星探査の来たる10年」検討は第二段階へと移行した．第一段階では，あえて科学のみの議論に的を絞ったが，第二段階からはミッション提案と観測機器提案を募集した．第二段階提案書の雛形は2011年7月1日から上記のURLで公開され，11月末の〆切まで受け付けた．第二段階での検討のために提案書では，科学目標や期待される成果，関連分野に与えるインパクト等のサイエンス面を強調するとともに，計画遂行のための体制(人的，予算的)やスケジュールについても書ける範囲で記載することが求められた．第二段階の方針は，提案書に「順位」をつけるのではなく，提案書の内容改善に繋がるコメントを与え，関連分野における潜在的「興味」「能力」を発掘することである．2011年10月の惑星科学会，11月の宇宙科学研究所・太陽系科学シンポジウムでは第二段階の検討について説明し，ミッション提案書，観測機器提案書の募集を行っていることを周知した．

第二段階で統廃合され，ブラッシュアップされたミッション提案は，第三段階へ引き継がれる．第三段階ではミッション経験者を含む委員により，技術力や開発体制，要求予算といった観点からミッション提案の評価を行い，ミッション実現に向けて適切なアドバイスが与えられるような仕組みを作っていく方針である．本検討作業が完了するまでまだまだ紆余曲折があろうが，様々な議論を通して惑星科学コミュニティ自らが成長することが強く求められている．今後も「月惑星探査の来たる10年」検討への参加・協力をお願いする．(事務局: 並木，小林，出村，大槻)

2. 地球型惑星固体探査パネル

地球型惑星固体探査に関する第一級の科学について，20件を超える公募提案ならびに討論会における議論を踏まえて検討を行った結果を報告する．本パネル名に示す地球型惑星は広い意味で用いており，月や他の惑星の衛星を包含することはもちろん，太陽系小天体も視野に入る．同様に「固体探査」には，大気進化や生命活動など惑星表層環境の形成と進化に関連するテーマも内包されていることに留意されたい．今回は対象に応じて幾つかのパネルに分業して第一級の科学の検討作業が行なわれたが，それらは互いに排他的なものではなく，今後，横断的な科学検討を行うことも重要である．また，今回の公募提案に含まれないが基本的に重要な課題については，パネルとして重要性を指

摘した.

惑星科学における地球型固体惑星の最大の重要性は，これらが太陽系において我々の暮らす地球にもっとも性質の似た天体であり，その科学的理解が地球の起源と進化の理解に直接的につながることにある．言い換えれば，各惑星の構造，そこに生起する諸現象，ならびに誕生から現在までの歴史を詳らかにし，それらに基づいて惑星の形成と進化の過程を解明すること，また，地球や他の天体がそれぞれ個性を持った天体へと分岐した条件を明らかにすることが重要である．さらに，月などの初期に地質活動を終えた天体は，太陽系全体の歴史の良好な記録媒体としても位置付けられ，その解読は，惑星進化に影響するさまざまな外的諸要因がどのような変遷や進化を経てきたのかを解明するための貴重な手掛かりとなる.

その一方，地球科学が多様な分野からなることから分かるとおり，地球型固体惑星の科学にも様々な切り口があり，実際に本パネルに寄せられた公募提案もその対象天体と内容は多岐にわたる．本パネルでは，どのような科学テーマが最も重要と考えられるのか，その波及性ならびに独自性の観点から検討し，その整理抽出を試みた.

その結果，今後約10年の地球型惑星固体探査の第一級の科学としてここに提案するものは，1.月惑星内部構造の解明，2.年代学・物質科学の展開による月惑星進化の解明，3.固体部分と結合した表層環境の変動性の解明の3項目である．それぞれの項目の内容について以下に具体的に述べる.

2.1 月惑星内部構造の解明

内部構造は，それぞれの天体の構成物質や分化状態を直接的に表す．したがってその決定は，各天体の起源と進化を解明する上でもっとも基礎的な情報となるが，これまでもっとも充実した内部構造探査の行われている月についても，基本的な量である地殻厚やコア半径についてさえ極めて大きな不定性があり，きちんと求まっていない状態にある．さらに月以外の天体については，全球重力場や章動・秤動の計測から平均密度や慣性能率が推定されているのみである.

我が国は中止にはなったが Lunar-A 計画による月内部探査の知見技術の蓄積があり，地震波計測を中心とした内部構造探査技術の開発で世界の先頭に立っている．同時にこれを支える理論研究の展開により，広帯域データの取得によって月内部構造を段階的に解像し，月の起源と進化の理解を進める道筋が明らかにされている．地震波計測は固体天体内部をもっとも高い分解能で解像できる手段であり，3次元的不均質性，破壊(発震)機構，流動特性(減衰・レオロジー・固相対流)，水の存在度など惑星内部の多様な特性についても明らかにすることが期待できる．そのためには地震波トモグラフィ，震源機構研究など地球における地震学的研究方法と成果の積極的活用が強く求められる.

これと並行して，大気をもつ惑星では大気励起自由振動が存在し，仮に地震活動がなくとも自由振動計測によって地震波速度構造および弾性波減衰率の決定が可能なことも理論的に示されており，これは火星内部を探る我が国発の科学として期待できる．ここから地殻厚やコア半径・相状態，マントルの非弾性などが明らかになれば，火星の構成物質・熱的状態・揮発性物質分布・火成活動の総フラックスなどが制約され，表層環境の進化の解明にもつながる.

内部構造の決定には，地震計測に加えて重力場，地形，自転，電磁感応，地殻熱流量についてのデータが有用である．それと同時に，地殻やマントルを代表する参照物質を見出し，その組成を求めることも重要である.

金星や水星，Galileo衛星，小天体等もむろん重要な対象であるが，過酷な熱環境など，内部構造を直接的に決定する上での技術的困難を乗り越えるための有望なアイデアが今のところない．しかし，特に金星については地球の双子星とも呼ばれ，地球との比較対象として，特に液体の水の有無に代表される惑星表面条件の違いが内部構造にどう影響しているのかを知る意味で重要であることに留意しておきたい．さらに 4つの惑星に加えセレスやベスタなど大型の小惑星について内部構造を明らかにすることにより，相互の比較だけでなく，内部太陽系における固体物質の組成分布，特に鉄の酸化還元度と揮発性物質存在度について情報が得られ，それらは惑星材料物質の多様化をもたらした過程を解明するための手掛かりとなる.

2.2 年代学・物質科学の展開による月惑星進化の解明

火星と月はその地表に多数の衝突クレータを保存しており，地球ではその大部分が失われた惑星誕生直後

の初期の地質記録を今なお豊富に蓄えている天体である．その解読は各惑星のみならず，大気海洋の形成や地殻の分化，ひいては生命の起源など地球の初期進化過程の理解につながる．

これらの天体の進化の解明を主眼とする表層探査は各国によってこれまでにも活発に展開されてきた．その結果，表面の相対地質年代分布が明らかにされ，小天体衝突頻度，地殻の分化と火山活動史，火星においてはさらに気候の変遷について大まかな描像が得られるに至っている．しかしながらこれらの描像は，リモートセンシングによる全球マッピングデータに強く依拠しており，以下に述べる大きな不定性が潜んでいる．これらの不定性をなくし初期進化の描像をより具体化することが，今後の重要な科学目標と考えられる．

不定性の第一は，地質年代の決定精度である．固体天体の地質年代の推定は，クレータ年代学に依拠している．これは月面の各領域におけるクレータ密度と基盤岩の結晶化年代間の関係に基づいているが，データ取得点が粗く不定性が大きい．これは原始地球に降り注いだ小天体のフラックスにも大きな不定性があることを意味する．さらに火星など他の天体になると，月で得た関係から外挿しているに過ぎず，同じクレータ密度の地域でも研究者によって十数億年も年代の見積もりが異なる．

近年，海王星以遠天体の軌道要素の統計分布から，初期太陽系において木星およびそれ以遠の惑星は，惑星同士と残存微惑星集団との重力相互作用によって，それぞれの軌道半径を大幅に変えたと推定されている．この「惑星大移動」に伴い，外部太陽系だけでなく地球型惑星領域へも多数の小天体が散乱されたはずであり，これが月や火星に残る高密度クレータ地域を形成したと考えられる．地質年代の決定精度を高め，小天体のフラックスの進化を解読することで，惑星大移動のタイミングと，それによる固体惑星への小天体フラックスの変遷について明らかにすることができる．

不定性の第二は，表層物質の組成である．現状の周回探査や着陸機による分析では，地表物質の組成を大まかには決定できるが，詳細に求めるまでに至っていない．特に周回探査では空間分解能にも限界がある．物質組成の詳細な決定からは，その物質の生成環境と変質の歴史について多くの情報を引き出すことできる．実際に月や火星，一部の小惑星についてはそれぞれの天体に由来すると考えられる隕石が見いだされおり，それらの分析から種々の情報が得られている．しかしこれらの分析から導かれる推論にも限界がある．それは，もともとこれらの物質が各天体上のどの地点にあったのか不明であり，層序や地質構造と関連づけた解釈ができないためである．火星など大気をもつ天体については，大気の同位体組成を精密に決めることも残された重要課題である．特に希ガス同位体組成，D/H比，大気主要元素の同位体組成は，固体リザーバーとの交換および大気散逸の規模とタイミングを制約するうえで極めて基礎的なデータである．

これらを具体的に推進する手段として，サンプルリターンやその場分析などが提案されているが，手段と科学の両面からさらなる具体化の検討を行うことが重要である．探査の技術的困難さゆえに，今回の応募提案には金星や水星に関するものはなかったが，これらの天体についても上記の観点で研究を行うことは，疑いなく第一級の科学課題である．

2.3 固体惑星と結合した表層環境の変動性の解明

地球をはじめ大気を有する固体天体には気候システムが存在し，固体惑星(ここでは惑星の地表および内部を固体惑星と呼ぶ)と物質的・力学的に相互作用している．その特徴的な時定数は，その惑星の歴史にまたがるものから，日々変動ないしは突発的な気候現象にいたるまで多岐にわたる．

時定数の短い相互作用は，それを積分した効果として表層環境と固体惑星に長期的な変動をもたらす惑星進化の素過程と位置付けることができ，現象の発見解明にとどまらない重要性を持つ．しかし，探査データに立脚した定量的な解明は現時点ではほとんどなされていない状態にある．これを解明する対象天体として最初に考えられるのは火星である．火星を対象とする利点は，極冠の消長など，明らかに大気と地表間で物質交換が起こっていることに加え，内部構造解明のための観測手段が，火星気候システムと固体火星の力学的・物質科学的相互作用を定量的にモニタリングする手段にもなることである．また火星の場合は，大気が比較的薄く軌道船からの撮像などリモート観測により大気下層から上層までカバーする気象学的データの取得が可能である．これらの探査と共同することによっ

て，大気科学と惑星内部物理学の境界領域の開拓が期待できる．

地球に近いサイズを持つ金星は，現在も地質学的に活動的である可能性があり，その気候システムと固体惑星の相互作用の解明には，詳細観測の技術的困難性を除けば，火星以上に科学的重要性があるといえる．活火山や噴気活動の探索，風化地形や風化物質のマッピングなど，大気探査と相補的に進めることのできるテーマを考察することが重要である．

惑星史を通じた長期的な変動過程の解明においては，固体惑星との揮発性物質の交換過程の制約，表層環境史の復元，大気形成過程と大気散逸過程の解明が必要となる．それにはすでに述べた惑星大気組成の決定に加えて，地表に固定されている揮発性物質のリザーバーサイズならびにその組成の推定，地質学・岩石学による表層環境史の制約，火成岩の分析による脱ガス気体成分の推定，初期の惑星上での衝突過程の物理化学プロセスの解明と小天体フラックスの制約，さらに惑星超高層大気のダイナミクスの解明を並行して進めることが重要である．

前項にも関連するが，これらの解明において大気を持たない固体天体表面を覆うレゴリスの物質科学的研究も重要な意味を持つ．レゴリスの形成年代・変質過程・打ち込まれた高エネルギー粒子等を調べることにより，隕石重爆撃，太陽風組成，太陽活動などの履歴について記録を引き出すことができる．

（大谷栄二，倉本圭）

3. 地球型惑星大気・磁気圏探査パネル

近未来の地球型惑星大気・磁気圏探査において重要となるであろう第一級の科学については，2010年9月10日に神戸大学にて開催された「月惑星探査来たる10年」公開討論会や，日本地球惑星科学連合2010年度大会及び2011年度大会の「来たる10年の月惑星探査に向けた構想と戦略」セッションにおける発表・議論を通して検討を進めてきた．しかしその一方で，地球型惑星大気や磁気圏分野では，日本惑星科学会に所属する会員だけでなく，日本気象学会や地球電磁気・地球惑星圏学会（SGEPSS）に所属する多くの会員が過去および現在進行中のミッションに携わってきており，また，将来の探査計画についても「来たる10年」の活動と並行して別途検討を進めつつある．このように，複数学会に跨がる分野の学際的な性質を鑑みて，地球型惑星大気・磁気圏探査パネルでは，別途検討を進めつつある内容と擦り合わせを行い，提案内容に学会間で齟齬が生じないように，後日取り纏め結果を公開する計画である．以下では，既に探査計画検討ワーキンググループを立ち上げて検討が進められている探査計画に限定して，地球型惑星大気・磁気圏探査の第一級の科学を述べる．

地球型惑星の大気・磁気圏の研究の多くが，大気・プラズマ環境はどのように変動し，進化してきたのか，惑星ごとの多様な環境はどのように形成されるのかという問題意識に根ざしている．言うまでもなく大気圏は地球では生命圏であり，ここの組成や温度の決定プロセスはハビタブルゾーンの定義に関わる関心事である．考慮すべき物理過程は，固体惑星からの脱ガス，大気および大気-地殻間の化学，大気力学，放射輸送，大気散逸，太陽風との相互作用，太陽活動の変遷など多岐にわたる．よって問題解明のための探査対象は多分野にまたがっており，本来は大気・磁気圏パネルに閉じる話ではない．

この分野の研究には大きく分けて次の2とおりのアプローチがある．

(1) 惑星ごとに異なる条件下にある大気現象を調べて互いに比較することによって，幅広い条件に適用可能な汎用的な大気物理学を構築し，大気組成や太陽光度などに依存して大気構造がどのように決まるのかを明らかにする．ここには気象観測や大気-地殻化学の調査などが含まれる．

(2) 大気や地殻に残された環境変遷の痕跡を調べる，あるいは今も変遷を引き起こしつつある物理過程を調べてその知見を過去に外挿することによって，変遷の道筋を制約する．ここには揮発性物質の同位体比の計測，電離圏・磁気圏のプラズマ過程も含む大気散逸過程の調査，地層の解読などが含まれる．

以下ではこれらのアプローチのうち，とくに大気や磁気圏そのものを探査対象とする構想について述べる．当面の主たる対象天体は火星である．

3.1 地球型惑星の気象

金星の大気大循環のメカニズムを探るべく，金星の気象観測を主目的とする探査機「あかつき」が2010年

5月に打ち上げられた.「あかつき」のサイエンスは本来，この「来たる10年」の枠組みには入らない．しかし2010年12月7日に行われた金星周回軌道オペレーションは失敗し，2015年以降に改めて周回軌道投入を行うことを目指して「あかつき」は惑星間航行を続けることになった.「あかつき」の今後とリカバリーの方針次第では「10年」の構想も影響を受ける可能性がある．しかし現時点では不確定要素が大きいため，ここでは立ち入らないことにする.

惑星気象探査のもう一つのターゲットは火星である．温暖化の末に海を失った金星と寒冷化の末に凍りついた火星を続けて調査し比較することにより，地球型惑星の気象の統一的な理解に近づくことができる．火星気象研究の問題意識としては次のようなものが挙げられる.

(1) ダストや水(氷)の大局的な分布が現在見られるような姿をとる必然性は何なのか
(2) 数万年周期の気候変動を繰り返す火星において現在はどれほど代表的な状態なのか
(3) 浮遊ダストが大気構造を支配するのは表面に液体が乏しい岩石惑星の一般的な特徴なのか
(4) 鉱物エアロソルの粒径分布や空間分布は一般にどのように決まるのか

このうち (1)は物質輸送の支配物理を調べることにより，(2)は気象観測の知見をもとに気候モデルをより広い条件に適応させることにより，(3)はダスト巻き上げの気象場への感度を明らかにすることにより，(4)は地球と火星のダストの比較により，ブレイクスルーが見込まれる．とくにダストの挙動を理解することは火星の気候形成の解明のために優先度が高い．このような研究を可能にするオービターミッションとして，高度の高い赤道周回軌道上から高空間分解能かつ連続的な分光撮像を行い，エアロゾル・微量ガス・気温場のグローバル分布を得ることを考える．観測装置は「あかつき」の経験を生かしつつも，ダストを高感度でとらえる偏光計測や，ダスト雲の中の温度や微量ガスを計測できるサブミリ波サウンダなど，火星に最適化した新たな手段が必要である．こうして，従来のミッションや計画中の海外ミッションではとらえられない，数百～数千キロ(メソ～総観規模)の波動や渦による物質輸送の素過程を調べる.

オービターによる観測と同時にランダーで地表付近の気象を直接観測することも重要である．このことにより大規模な場がミクロなダスト巻き上げ過程とどう関連しているのかがわかる．気温や気圧といった基本的な気象情報に加え，音波風速計による高時間分解能サンプリングで対流や乱流をとらえることや，電磁気学的手法によりローカルな鉛直電場やダストデビルの広域の分布をモニターすることを検討している．火星大気の直接観測は，将来にわたって様々な惑星の大気の直接探査に道を拓くための，重要なマイルストーンでもある.

3.2 地球型惑星磁気圏と大気散逸・大気進化科学

これまでの日本の磁気圏物理学の進展には，1989年打ち上げの「あけぼの」衛星や1992年打ち上げのGeotail衛星による地球磁気圏観測が大きく貢献した．これらの衛星観測は，世界に誇る数々の科学的成果を挙げたのみならず，磁気圏における精密なその場観測が，プラズマ物理学に新しい展開をもたらすことを示した．特にGeotailの成果から提示されたスケール間結合という新しい視点は，地球磁気圏編隊飛行探査計画SCOPEへと発展し，より一般的な宇宙プラズマダイナミクスの本質的理解の構築へと展開して行く．また，小型科学衛星計画ERGによる地球放射線帯での相対論的粒子生成過程の解明も重要な課題である．今後の磁気圏の探査計画は，地球磁気圏における精密なその場観測を基礎としつつも，固有磁場の有無などの各惑星の特性に応じた探査を実施し，以下の地球・惑星磁気圏探査の三大目標

・太陽活動に支配される太陽・惑星圏環境の解明
・宇宙ガスを支配する普遍的法則の解明
・人類の宇宙進出を支える知識基盤の構築

を達成することを目標とする．2014年打ち上げ予定の日欧共同水星探査計画BepiColomboのMMO探査機は，弱い磁場と希薄な大気という特異なパラメータ空間を持つ水星磁気圏の探査を実施し，2013年打ち上げ予定の小型科学衛星1号機Sprint-A/EXCEEDは，極端紫外分光撮像による水星，金星，火星からの大気散逸の遠隔観測，および，木星，土星磁気圏におけるエネルギー輸送プロセスの遠隔観測を実施する．そしてこれらの先鋭的な科学成果をさらに発展すべく，撮像観測とその場観測を連携させて「全体」と「詳細特性」

を同時に捉える火星電磁圏探査および木星磁気圏探査へと展開していく．

2017年以降の惑星探査計画を議論する「来たる10年」の枠組みにおいて，地球型惑星磁気圏探査の主目標天体は火星である．火星電磁圏探査においては，日本初の火星探査機「のぞみ」が果たせなかった大気散逸観測を実施し，現在も喪失し続けている火星大気の進化を明らかにすることを目指す．ミッションの目標は，過去の火星の温暖湿潤な環境を保っていたであろう温室効果ガス(特にCO_2)や水が宇宙空間にどれだけ失われたのかを明らかにし，非磁化惑星のハビタブルゾーンの理解に寄与することである．この目標を達成する為に，(1)散逸する大気の全成分を分離して，二酸化炭素と水の各総散逸率を明らかにする，(2)大気散逸過程ごとの太陽風・太陽放射変動に対する応答を明らかにする，(3)大気散逸の全体像と詳細特性を同時に捉えることによって，特に不確定性の大きな低エネルギー粒子の散逸メカニズムを明らかにすることを目指す．(1)の実現には，高い質量分解能をもつ粒子観測装置による観測が必要となり，(2)には太陽風・太陽EUV放射のモニター観測および太陽活動極大期を含む時期の観測が必要となる．(3)の実現には，撮像観測とその場観測を連携させた「全体」と「詳細特性」の同時観測が有効となる．宇宙空間にどの元素がどれだけ流失したのか，そしてその帰結として現在の大気中の元素存在比や同位体比にどのような影響を与えたのかを推定するには，散逸メカニズムを明らかにすることが極めて重要である．熱的なジーンズ流出過程や，光化学反応による散逸過程，偏極電場による散逸過程に加えて，非磁化惑星に特有のイオンピックアップ過程，スパッタリング過程，太陽風-電離圏粘性相互作用過程などの各種大気・プラズマ散逸過程とその太陽風・太陽放射変動に対する応答を明らかにすることで，惑星大気の超長期的変遷(大気進化)への寄与を明らかにすることが初めて可能となる．火星の大気散逸探査で得られた知見は，超高層物理学やプラズマ物理学の進展に貢献するとともに，他の非磁化惑星の大気進化や多様性の理解，ハビタブル惑星の成立条件の理解などにも寄与する．冒頭で述べたように，惑星大気の進化の理解は，大気・磁気圏パネルに閉じる話では無い．惑星大気の進化は，宇宙空間への大気散逸だけでなく，固体惑星からの脱ガス，大気-極冠-地殻システムでの物質交換，炭酸塩形成などの様々な要因によって決定される．また，ランダーやサンプルリターンミッションによる同位体比測定は，大気進化モデルに大きな制約を与える．従って，惑星の大気進化を真に明らかにする為には，磁気圏分野，大気分野，固体分野が密に連携したミッションを展開していく必要があると言える．

（今村剛，寺田直樹，渡部重十）

4. 小天体探査パネル

小天体パネルは荒川，伊藤，圦本，渡部の四名から構成され，各々が属する関係業界(衝突関係業界，小天体力学関連業界，物質分析関連業界，小天体観測関連業界，等々)の関係者から全体計画(月惑星探査の来る十年)についての意見聴取を行った．その上で，事務局を経由して小天体探査に関する12通の提案書を受け取った（他パネルに提出された提案であっても該当すると判断されたものも含む)．小天体パネル構成員および事務局担当者との打ち合わせは電子メールおよび直接会合(平成 22年 9月 1日，国立天文台三鷹)で行われ，そこで平成 22年 9月 10日の公開討論会(神戸大学)に向けて中間的な意見集約が行われ，発表用資料が作成された．この公開討論会に於ける議論の後，平成 22年 12月 10日に小天体パネル分科会が開催され(国立天文台三鷹)，そこで各提案書の主提案者より探査提案の趣旨説明が行われた．以下の報告はこのような一連の議論を経て作成されたものである．

小天体パネルでは事務局宛に提出された提案書からトップサイエンスを構成するに当たり，提案書の内容を二つの科学目標的な軸に沿って分類した．軸のひとつは小天体を構成する物質の始原度である．始原度という用語の定義には曖昧な部分もあるが，ここでは以下の状況を念頭に置いている．

・始原度が低い天体は，天体形成後，熱変成や水質変成をうけた結果，揮発性分が失われシリケイト成分を多く含有する

・始原度が高い天体は変成・変質が少なく，揮発性分である有機物や氷を多く含有する

小天体は大型惑星に比べれば一般的に始原度が高いが，その中でも相対的に始原度の低い天体としてはE型小惑星やS型小惑星が挙げられ，逆に相対的に始

原度の高い天体としては D 型小惑星や彗星核が挙げられる．提案書分類のためのもう一つの科学目標的な軸は天体の構造，すなわち天体のサイズもしくは分化している天体か未分化天体であるか，という区分けである．分化している小天体への探査と未分化な小天体への探査ではその科学目標も自ずと異なるはずなので，この分類軸の導入も意味を持つ．

以上では提案書の分類として小天体パネル側が準備する二種類の科学目標的な軸について述べたが，提出された提案書はその探査手法によっても三区分に分けられることが分かった．(a)サンプルリターンやその場分析といった手法によるもの，(b)衝突現象の実現など物理探査的な手法によるもの，(c)リモートセンシングの手法によるもの，である．こうした手法による三区分の各々に応じて上記した二種類の科学目標的軸によるグラフを作り，各提案書の提案する探査計画がそれらの軸上でどのような位置付けになるのかを検討した(平成 22年 12月 10日の小天体パネルに於けるパネルリーダーからの発表用資料を参照のこと)．しかる後に探査手法による区分け（a）（b）（c）に関する分類図を重ね合わせ，各々の提案書が提案する探査対象もしくは科学目標がどのような分布を持つのかを考察した．ここで重要なことは，異なる提案者から提案された異なる提案書が同一の科学目標分布を持っているとすれば，そこで検討されている科学目標は多くの研究業界人にとって共通に重要なものであり，故に惑星科学業界全体への波及効果も高いはずであるという事柄である．

このようにして提出された提案書の分類と科学目標分布を分類した結果，複数の提案に於いて，小天体の中でも特に始原的・未分化な天体への探査(可能であればサンプル採取)が必要であるという主張が共通であることが目に付いた．一般に，研究対象天体が始原的・未分化であればあるほどその研究結果を通して太陽系の起源に近付けることは言うまでも無い．従って，そのような始原的天体の探査からもたらされる成果は太陽系の起源を議論する惑星探査以外の研究手段，例えば実験的・観測的・理論的・数値的手法などに対して大きな影響を持つと思われる．このような背景より，本稿で小天体パネルが報告する「トップサイエンス」目標のひとつとして小天体の中でも特に始原的・未分化な天体への探査の方向性を挙げたい．なお平成 22年 12月 10日の小天体パネル分科会では，上記した科学目標的な分類二軸(始原度と天体構造)の他に，惑星科学関連諸分野への波及効果という評価軸も存在するはずであり，それについても考慮すべしという指摘があった．先にも述べたように小天体の中でも始原的・未分化な天体への探査は太陽系の起源に最も近付けるという意味で惑星科学関連の諸分野に対して非常に大きな波及効果を持つはずで，その意味で当該の指摘に対しては既に対応できているものと考える．

より始原的かつ未分化な天体への探査という意味ですぐに思い付くのは彗星核を調査する計画であろうが，本稿では一例として特異な小惑星(3200) Phaethon への探査を取り上げる．これは探査提案書のひとつとして既に提出されているものである．Phaethon は Apollo型の近地球小惑星であり，彗星活動は明確には確認されていないがその軌道は小惑星としては特異であり，離心率と軌道傾斜角がとても大きい．Phaethon の軌道要素はふたご座流星群のそれと酷似しており，同流星群の母天体であることが推定されている．更にはその力学的および光学的特性から Phaethon の分裂破片ではないかと思われる天体も既に確認・観測されており，Phaethon は近過去の分裂・破壊の痕跡を未だに保持している可能性がある（その分裂・破壊がふたご座流星群の発生原因であるとも想像される)．Phaethon のスペクトル型は青い B 型だが，表面の一部には B 型よりも赤い C 型のスペクトルを示す部分も存在する．また，ふたご座流星群では顕著なナトリウム枯渇が観測されており，これは母天体である Phaethon の化学的性質を反映しているとも考えられる．このように Phaethon は他の小天体には見られない様々な特徴を持ち，以下の三つの観点で興味深く，その探査は関連諸分野への波及効果が高い．(1)太陽系最初期の物質分化，特に溶融の影響，(2)彗星から小惑星への遷移状態にある天体の状態(これは始原的隕石から分化した隕石への遷移状態を知ることにも通じる)，(3)分化過程に伴う揮発性元素(例えばナトリウム)の挙動．Phaethon のような特異な天体に対して探査機を送り込めば，上記のような複数の科学目標の同時達成が期待できる．これは他の天体では不可能で，Phaethon という特異な天体だからこそ実現できるものであり，Phaethon 探査の科学的な効率の高さを示すものと言えよう．なお Phaethon は軌道傾斜

角が約 22度と大きく，探査機を近付けることが工学技術的に難しいという問題がある（打ち上げロケットの能力等の制限）．そのためにサンプルリターンの実現は困難かもしれないが，仮に片道での探査計画となりランデブーあるいはフライバイのみの実行となっても，Phaethon が持つ多様な側面は多くの科学的知見をもたらしてくれるだろう．また，Phaethon への探査機投入が工学技術的に難しいという事実は逆に，探査の立案・実行が技術的にも新たな挑戦を生み，理学的関心のみならず工学的な観点でも当該分野に対して大きな波及効果を持つ計画になり得る．このように（3200）Phaethon の探査は様々な面で大きな意味を持つ．

さて小天体パネル内で議論され，本稿で報告する「トップサイエンス」の今ひとつの方向性を以下に述べる．それは，同一天体を複数回訪れる「再訪」的探査が大きな意義を持つと言うことである．どの天体についても探査機が一度目に訪れれば，そこでは幾つもの新発見があろう．けれども当然ながら，こうした新発見からは新たな謎と疑問が幾つも発生する．そのような謎と疑問を解決し，当該天体に関する更に深い理解に至るには，同一天体への複数回の探査実行が必要となる．この理由のために大型惑星や月といった大きな天体への探査は何度も繰り返し行わるのが通例である．だがこれまで，小天体への探査は各天体につき一度ずつしか実行されていない．これは主に小天体への探査が新発見をもたらす事を極めて重視しているからと思われる．だが，単なる発見段階から更に深い理解段階へ進むという道筋は探査対象が大型の天体であろうと小天体であろうと変わるものではない．すなわち，新発見された物事の科学的な価値が普遍性を持つのであれば，同一天体を再訪することには大きな意義があるはずである．また，過去に一度訪れている天体であれば二度目以降の探査では事前情報が豊富に手に入っているはずだから，サンプルリターンなどは遙かに実行し易くなるであろう．そうした意味で本パネルでは同一小天体への再探査の意義を重視し，それを提唱する探査計画が提案されれば是非とも実現を推奨したい．一例として過日のはやぶさ計画の対象であった小惑星（25143）Itokawa への再探査が提案されているので，ここで取り上げる．宇宙衝突実験とは，地上での室内衝突実験で得られた科学的知見を拡張し，衝突破壊現象とクレーター形成のスケーリング則，サイズと非均質性，レゴリス集積への重力効果などについて一層深い知見を得ることを目的とする．これらはいずれも地上での室内実験ではその知見獲得に制約のあるものを宇宙空間で実現し，その制約を破ろうとするものである．宇宙空間に存在する天然の天体で衝突実験を行おうとすれば，探査機による情報が過去の探査により既にもたらされており，私達がその「地図」を手に入れているItokawa が宇宙衝突実験場として適切である．Itokawa を宇宙衝突実験場として活用することで，微小なラブル・パイル天体を徹底的に深く理解する大きな助けになるはずである．このことは微惑星の物理モデルを従来以上に具体化し（表層と内部構造，宇宙風化，微小重力下でのダイナミクス，等），なおかつItokawa のような小天体の衝突母天体の衝突進化過程を解明する上で本質的に重要な情報をもたらすと考えられる（母天体の熱史と衝突史，地球型惑星への集積過程の応用，等）．ただし，Itokawa が宇宙衝突実験の『最適な』プラットフォームであるかどうかはもう少し定量的に検討する必要があるかもしれない．

改めてまとめると，本稿では小天体パネルが報告するトップサイエンスの方向性として以下の二つを述べた．

1. 太陽系起源に近付くためのより始原的・より未分化な天体への段階的な探査
2. 発見段階から理解段階へ進むための同一小天体の再探査とそのための最適天体の検討

上記の1.については，代表的なものとして特異小惑星（3200）Phaethonへの探査（サンプルリターンまたは片道のランデブーもしくはフライバイ）が提案されているので，その重要性について述べた．上記の 2.については，はやぶさ計画の対象であった（25143）Itokawa を再探査することによる宇宙衝突実験の実現可能性についての提案が行われているので，その意義について述べた．

（荒川政彦，伊藤孝士，圦本尚義，渡部潤一）

5. 木星型惑星・氷衛星・系外惑星パネル

5.1 はじめに

木星型惑星・氷衛星・系外惑星探査において最も重

要になるであろう第一級の科学について，事務局へ提案のあった10件の公募提案とパネル分科会での議論を経て検討を行った結果を報告する．本パネルが包含する探査対象天体は，「木星系とそれより遠い惑星および衛星すべて」と言えるほどに広範かつ多様である．一方で，当該分野の研究者人口が少ないことや対象天体が遠いことから10年という期間において実施可能な探査の回数が大きく制約されるため，本分科会は複数の領域を一つに集約した形をとっている．しかし実質的なサイエンスのバリエーションは4分科会分に相当することから，これらをひとつのストーリーとしてまとめ単一の探査計画として扱うことには無理がある．したがって第一段階のとりまとめにおいては対象領域を4つに区分し，それぞれの中で重要なサイエンスを抽出し議論することとした．

また，木星型惑星電磁圏の探査計画は主として地球電磁気・地球惑星圏学会(SGEPSS)に活動の中心を持つ研究者によって科学検討が進められており，現在までに国際協同木星系探査計画EJSM(Europa Jupiter System Mission)を見据えた探査提案が行われている．従って本パネル電磁圏探査領域では，EJSMとして検討されている探査およびサイエンスに限定してとりまとめを行った．

5.2 木星型惑星(惑星・大気)のトップサイエンス

「来る10年」においては，直近にJUNO(2016-2021年)によるマイクロ波放射計・重力場に目的を絞った探査が予定され，2020年代にはEJSMとしてESAがJGO(Jupiter Ganymede Orbiter)，NASAがJEO(Jupiter Europa Orbiter)，日本がJMO(Jupiter Magnetospheric Orbiter)を計画している．EJSMの探査は，宇宙機の木星周回軌道投入は2027年ころであるが打ち上げは2020年代の始めを想定しているため，既に具体的な設計段階に入っている．この様な状況を踏まえると，「来る10年」における探査のサイエンスとして(本節でとりあげる惑星・大気探査のみならず，電磁圏や氷衛星探査においても同様に)，EJSMの大枠から外れた議論を行うことは余り現実的でない．しかし，EJSMでの探査として現実化することはリソースの制約上困難と思われるが，サイエンスとして重要性の大きいテーマがあることも事実である．そこで本稿では，まず木星(正確には系内巨大ガス惑星)探査の，惑星科学全体における意義を確認した後，2020年代の探査計画の枠内での実現可能性を意識したトップサイエンスを議論し，最後に，より遠い将来に向けた提言を行う．

5.2.1 惑星科学における「木星」探査の意義

惑星科学における木星(土星も同様)探査の意義は，大きく分けて３つある．(A)過去の探査が木星の全体像を解明するには不十分であることから，比較惑星学的見地から，木星自体についての知識を増やさねばならない．(B)我々の太陽系全体の形成史を制約するための不可欠な情報を木星から得ることである．Galileoプローブが果たせなかった木星のバルク組成がそのような情報の例である．(C)系外の巨大ガス惑星の構造・進化などの様相を限られた観測から推定し，ひいては全宇宙の惑星系を理解するためにも，我々の太陽系の木星の知識は応用できる．

以下にあげるサイエンステーマは全て上の3つと多少とも関わるが，特に深く関係する項目を表題の直後のカッコ内に記す．

5.2.2 2020年代の木星探査におけるトップサイエンス

高時空間分解能・多波長観測による，雲層の構造・力学の解明[意義A，C]：「Galileo」ではアンテナ展開不良のためデータ転送量が制約され，大気運動の高い時間空間解像度での観測は極めて限られた領域以外は断念された．2020年代の探査では，時空間分解能・領域・観測波長の全てでより充実した探査を行い，各種の渦・波動の力学，雲構造の決まり方，惑星全体の放射収支との関係を解明すべきである．

積乱雲と雷の観測により，大気の鉛直運動を解明する[意義A，B，C]：木星内部には重力収縮による熱源が存在するが，この熱の鉛直輸送の相当部分を担うのが積乱雲である．積乱雲は東西風ジェットなどの大規模運動と相互作用し，温度・物質の平均鉛直分布も制約していることが推測されている．しかし，これまでの探査では，「根っこ」がどの深度にあるか(大気深部組成と関わる)の情報は不十分であり，また，積乱雲の分布は包括的に決定されているとは言えない．雷放電が有力な情報源となるが，これまでの観測では個々の放電が分離されておらず，観測数も限られている．超高速イメージャーによる観測を行うべきである．

高緯度の観測[意義A，B]：過去の探査では，初期のPioneerによるものを除いて南北極を含む高緯度の

観測は非常に欠けている．惑星内部対流の構造を制約する熱フラックスの緯度分布，磁気圏との相互作用，惑星自転効果の効き方の相違に起因する大気運動の特異性，高緯度に特徴的なヘイズ層など，定量的把握と理解を待つテーマが多数存在するので，あらゆる機会をとらえて観測の努力をすべきである．JUNOは極軌道を周回するが観測装置は限定されており，EJSMの二つの探査機は軌道傾角が小さい．従ってJMOが最も期待される．

5.2.3 2020年代の探査を想定しないトップサイエンス

大気プローブ探査ふたたび［意義 A，B，C］：Galileoプローブは局所的に乾燥した領域に突入したため，その観測をグローバルな代表値として受け取ることは出来ず，「再訪」には大きな意義がある．代表性を高めるには，観測項目を限定（たとえば水蒸気量のみ）して多数のプローブを投入することが有利である．一方，イメージング，雲粒子の組成と形状の観測，より深部への突入など，Galileoプローブが試みなかった観測も有意義である．ただし，通信の困難，木星大気に突入する際のヒートシールドの再生産など，多くの技術的問題がある．また，土星・天王星・海王星にもプローブを投入し，全巨大惑星大気の相互比較を行うことも必要である．

自由振動の観測［意義 A，B，C］：木星の内部構造は，これまで，重力場・半径・表面熱流量などの「積分的」な情報を制約条件として推定されてきた．しかし，惑星内部を伝播する「地震波」，あるいはその全球版である「自由振動」が観測できれば，内部の物質分布・運動構造について飛躍的に多くの情報が得られることは，地球の地震学・陽震学・星震学の経験の教えるところである．自由振動については，これまで，理論的検討と予備的な地上観測の試みがあるが，まだポジティブな結果は得られていない．しかし，積雲などの「震源」が存在することは確実であり，巨大な成果の可能性を念頭に置くならば，専用にデザインされた探査も含めて追求すべきである．

系外惑星観測との交流［意義B，C］：系内惑星探査の成果が系外惑星の理解に役立つだけでなく，その逆もあり得る．たとえば，形成して間もない系外巨大ガス惑星の高温な大気には水蒸気が確認されており，これは惑星のバルク組成と直結する可能性があるが，この情報は太陽系内の歳を経て冷却した巨大ガス惑星からは得られない．この様な双方向性を意識して系外惑星研究とより密接に連携すべきである．

5.2.4 探査以外の活動の推進

数値モデリングの推進：木星が極めて巨大であること，そして，当面数十年の探査では，その極めて表層についてしか直接的情報が得られないことを考えると，大気・内部の流体運動の力学も含めた数値モデリングが，探査の成果を「しゃぶりつくす」ためには不可欠である．さらに数値モデリングは，時空の制約を超えて，系外惑星・形成初期のガス惑星の様相を考察するためにも有力であり，推進しなければならない．

技術開発：多数のプローブの投入の実現には，マイクロマシンなど，最新の技術の導入が必要かもしれない．また，ニュートリノを用いた木星内部の直接探査の可能性など，新しい観測の枠組みも追及していかねばならない．

5.3 木星型惑星(電磁圏)のトップサイエンス

木星は，木星本体の巨大磁場と高速回転によって特徴づけられる磁気圏を持つ．また，固有磁場を持つ衛星ガニメデ，火山性ガスを噴出する衛星イオなど，衛星と木星電磁圏とでの電磁気的な結合も，地球磁気圏では見られない特徴である．木星磁気圏はこれまでPioneer 10・11，Voyager 1・2，Ulysses，Galileo，Cassini，New Horizons による探査が行われた．また，地上や地球軌道からの電波観測（オーロラ関連電波，放射線帯からの電波），光学（イオトーラス，イオ起源中性ガス，オーロラ），X線観測（降り込み電子，イオンからの制動放射，放射線帯電子からの放射）なども行われている．特に赤道面において木星磁気圏のサーベイ観測を行ったGalileoは，木星磁気圏の基本的な構造を明らかにするとともに，非熱的な粒子加速過程が木星磁気圏の広い領域で起きていることを明らかにした．また，ハッブル宇宙望遠鏡による紫外線観測からは，木星オーロラの多様性と，活発な時間変動の様子が明らかになっている．

次の木星電磁圏探査として，木星極域-内部放射線帯の探査を行うJUNO（2011年打ち上げ），3機の衛星から構成される木星総合探査計画EJSM（2020年代）があげられる．EJSMは，NASA，ESA，JAXAの共同探査計画であり，我が国は磁気圏オービター（JMO）で参加する予定である．JMOの主科学目的は，(1)回

転駆動型磁気圏の物理，(2)粒子加速過程の物理，(3)木星と衛星の電磁気バイナリ結合過程，の解明にある．以下，これらの科学目的(1) ～ (3)について，特に重要なサイエンスを概説する．

5.3.1 回転駆動型磁気圏の物理

木星本体の回転運動は，木星磁気圏のプラズマダイナミクスを大きく決定づけており，電離圏と磁気圏の強い結合によって，惑星の持つ角運動量が磁気圏に輸送されている．この木星磁気圏の回転のダイナミクスを直接探査によって理解することは，木星磁気圏の理解のみならず，パルサー型磁気圏の物理を理解することにもつながるため，きわめて重要である．回転駆動型磁気圏にかかわる具体的な研究課題として，木星本体から磁気圏への角運動量の輸送メカニズムの理解，共回転からの遅れによる沿磁力線電流の発生とオーロラオーバルの関係の理解，磁気圏に対して太陽風が及ぼす影響と回転運動が及ぼす影響の定量的な評価などがあげられる． また，回転駆動型磁気圏の特徴として，磁気圏・電離圏の対流システムが地球型のそれとは大きく異なることがあげられる．地球と木星の対流システムの違いは，磁気圏プラズマの輸送に違いに加え，オーロラの地方時出現特性などの違いにも影響を与えているため，木星磁気圏-電離圏での詳細な観測が回転駆動型の磁気圏を理解していく上で重要である．なお，電離圏と磁気圏の結合過程はフィードバックシステムであるため，電離圏の物理パラメータと磁気圏の物理パラメータ，およびその結合過程の理解が必須となる．

5.3.2 粒子加速過程の物理

木星磁気圏には，ほぼ全領域においてMeV帯の高エネルギーの粒子が存在しており，さらに内部放射線帯においては数十MeVの電子と数百MeVのイオンも存在することが知られている．このような高エネルギー電子を作り出すメカニズムとして，古典的な断熱輸送理論に加え，近年地球磁気圏で注目を集めているプラズマ波動を介した加速メカニズムの可能性も指摘されている．また，地球磁気圏では観測されていない現象として，極域における周期的なMeV電子のバースト現象や，惑星間空間への大量のMeV粒子の放出なども観測され，地球磁気圏では発現していない木星磁気圏固有の加速メカニズムが働いていることも示唆されている．

これらのバリエーションに富んだ加速過程を理解するために，磁気圏の各領域において粒子，電磁場，プラズマ波動の詳細な観測から加速素過程を調べるとともに，各加速過程が磁気圏ダイナミクスに及ぼす影響を評価するために，どのようなプラズマ環境下において，どの加速過程が効果的に発動するかを明らかにする必要がある．この直接観測で得られる知見は，宇宙における非熱的粒子加速をより定量的に理解していくことに大きく貢献することが期待される．

5.3.3 木星と衛星の電磁気バイナリ結合過程

ガリレオ衛星のフットプリントにスポット的なオーロラが光っていることからもわかるように，木星本体と木星の衛星の多くは沿磁力線を通して電磁気的に結合している．たとえば，沿磁力線電流によるイオ-木星電離圏結合，ガニメデ衛星磁気圏と木星磁力線とのリコネクションなどの結合過程は，今後の探査で詳細が明らかにされるべき重要なテーマである．

これらの結合過程の理解は，木星磁気圏-衛星系のダイナミクスの理解につながるだけでなく，遠方の天体で起きている結合過程の理解にも資するものである．たとえば，イオ衛星と木星電離圏との結合は，系外惑星系の主星とホットジュピターの結合にもなぞらえられる．また，ガニメデ衛星磁気圏と木星磁気圏との相互作用は，ミニ太陽風-磁気圏相互作用とも言うべきものである．したがって，直接観測によってこれらの結合過程の詳細を明らかにすることは，遠方天体において普遍的に起きている結合過程の理解につながるものである．

5.4 氷衛星のトップサイエンス

氷衛星の探査例は現在までにVoyagerやGalileo, Cassini-Huygens探査機など数例のフライバイ(およびHuygensプローブのTitan大気への突入)観測に留まるが，それでも衝突クレータのサイズ個数分布や表面地形から示唆される活動度には，氷衛星の間で幅広い多様性が見られる．また一部の衛星における内部海の存在可能性や複雑有機物の検出など，地球外生命の存在を想起させる観測結果が次々ともたらされている．以上を鑑み，今後約10年の氷衛星探査の第一級の科学として「地球外ハビタブル環境の調査」を提案し，そこへ至るための具体的な課題として，1 生命の兆候を捉える，2 内部構造の理解，3 起源と進化史の把握

の３項目を掲げる．それぞれの項目の内容について以下に具体的に述べる．

5.4.1 生命の兆候を捉える

土星系衛星Titanが持つ大気において，その一成分として様々な有機物が存在することや，固体の複雑有機物からなるエアロゾルが存在することが知られている．また同じ土星系衛星Enceladusでは，南極断層地域から噴出する物質中に何らかの有機物が含まれていることが分かっている．この他にも土星衛星のIapetus，Hyperion，Phoebeや木星系衛星Ganymede，Callistoでも有機物の存在が報告されているが，いずれの天体で発見された有機物もその分子構造は未確定である．これを特定することは地球外有機物の起源とその地球外環境における進化についての知見を大きく向上させ，さらには地球生命の起源を理解することにも重要な寄与を果たす．

中でもTitanでは，有機物の存在のみならずメタンを中心とした物質循環の存在が示唆されているが，その様式は明らかではない．Cassiniに続く長期のモニタリングを行うことで季節変動を含めた安定性や進化を理解するとともに，光化学反応によって失われるメタンを供給し続ける源を特定することで，地球とは異なる物質によって支配されたハビタブル環境の理解，ひいては原始地球環境に関する知見の獲得が期待できる．

また土星系衛星Phoebeや海王星系衛星Tritonなどの逆行衛星はその起源が周惑星円盤と異なり，過去にカイパーベルト天体やケンタウルス族だったものが後に重力捕獲されたものと考えられている．これらはいわゆる太陽系のロゼッタストーンとして太陽系形成初期の情報を保持している可能性があり，始源的有機物探索の観点から重要な調査対象であることにも触れておきたい．

5.4.2 内部構造の理解

従来の探査によって，木星系ではIo以外のGalileo３衛星，土星系ではEnceladusやTitanにおいて内部海の存在が示唆されているが，これらはいずれも電磁気的観測や表面地形の解釈からもたらされた“可能性”に過ぎない．内部海の存在はハビタブル環境そのものであり，来たる10年ではこの存否を確認することが最重要課題である．これは来たる10年以降の探査での掘削・サンプルリターンの前駆調査の点でも必須であるだけでなく，氷地殻の構造決定という点でも重要な意味を持つ．その情報は氷衛星が示す多様な地質活動（熱・物質輸送様式）の理解に繋がるだけでなく，氷という揮発性（低融点）物質主体のテクトニクス様式をケイ酸塩鉱物でのそれと対比することによって他の固体惑星の地質活動や地球のプレートテクトニクスを再考察することにも繋がる．

内部海や氷テクトニクスの存在と多様性には母惑星との潮汐相互作用が本質的に重要な寄与を果たすと定性的には理解されている．将来探査によって潮汐変形量の測定が行われれば内部発熱や応力場に関する理論モデルに定量的な制約を与えることができ，内部海の有無だけでなく衛星の軌道進化の理解にも大きな前進をもたらすことが期待できる．

また内部海以外の構造，特に金属核の存否やサイズ・組成の解明も重要である．木星系衛星Ganymedeは大規模な固有磁場を持つ太陽系唯一の衛星であり，かつ慣性能率の小ささからも明瞭に分化した金属核を持つことが示唆されている．しかしそのサイズや組成には大きな不定性が含まれるだけでなく，金属核の形成時期も不明である．また金属核の存否が不明なEuropaや内部全体の分化の程度が小さいとされるCallistoやTitanとの分化史の違いにも理論的な説明を与えることが重要な課題となる．しかし氷衛星では地震波計測を用いた内部構造探査に大きな技術的困難があり現実的でないため，重力場，地形，電磁感応，表面熱流量についてのデータとそれを制約条件とした理論モデルの構築が必要である．

5.4.3 起源と進化史の把握

“現在の”地球外ハビタブル環境を調査するだけでなくその起源や進化の理解も重要だが，そこで大きな障害となっているのが地質年代の推定に含まれる大きな不定性である．氷衛星のみならず固体天体の地質年代はクレータ年代学に依拠しているが，地球の月で用いられるクレータ年代学が氷衛星にも適用できることは自明でない上，絶対年代を計測するためのサンプルも我々はまだ手にしていない．前者については氷衛星への衝突天体が小惑星帯起源か彗星起源か，そして両者の時間的遷移に関する理解や後期重爆撃期との関係を明らかにし，現状のクレータ年代学が持つ十数億年オーダーの不確定性を狭める必要がある．後者に関しては，氷衛星サンプルを入手できた際にそこへ含まれ

る放射性同位体から生成年代を推定し，地形年代史の把握を通して内部海の存在時期や分化史の解明に繋げることが可能となるだろう．

高い精度で決定された地質年代は，氷衛星においては例えば内部海の存在時期や金属核形成時期の解明に関わる極めて基礎的な情報である．表面に見られる多様な断層地形は，潮汐力に伴う変形や内部での体積変化などによる応力発生が原因と考えられており，それらの定量的評価や時間的変遷には当然ながら内部構造の進化と強い依存関係がある．地質年代の推定精度を向上させるにあたっては当然ながら衛星表面を均一かつ高解像度でマッピングすることが必須であり，多様な形態を伴う氷衛星地形の層序に明確な時間軸を付けることが上記の問題解決に対して本質的に重要である．

またサンプルリターンに伴っては，窒素や酸素同位体組成を測定し彗星や隕石，宇宙塵などの太陽系固体物質が持つ同位体分布や地球内外の有機物の同位体組成との比較を通して，原始太陽系円盤における物質輸送と物質進化について新たな知見が与えられるものと期待できる．

5.4.4 探査以外の活動の推進

氷衛星探査の実施は来たる10年の時限では困難かもしれないが，さらなる将来を見据えた機器開発はまさに来たる10年での重要課題となる．その意味においては，例えば内部海の潜水調査に関わる技術や，探査機の軌道決定精度やデータ通信に関わる地上通信環境の整備なども考慮すべきである．また月や火星等の地球型惑星固体分野の研究者とも積極的に連携しながら，アストロバイオロジーや衛星形成論を専門とする研究者を含めた氷衛星研究コミュニティの拡大が強く望まれる．

5.5 系外惑星のトップサイエンス

今後20年ほどの期間を見通したとき，系外惑星に関連してトップサイエンスと見なせるテーマは次のようなものであろう． 1. 生命存在可能環境を持つ惑星の発見と，その特徴や多様性の理解． 2. 系外惑星における生命の兆候の発見 ．3. 太陽系内氷惑星の探査 ．以下では，上記の1と2は地上や地球周辺の宇宙空間にある観測装置によって実施される天文学的観測によって推進されるもの，3は探査機による惑星探査，をそれぞれ想定している．

5.5.1 生命存在可能環境を持つ惑星の発見と，その特徴や多様性の理解

「宇宙に生命がいるか」という問いは，人類が持つ最も大きな疑問の一つであろう．この問いに対しては，観測が難しいことから長く解答不能の状態が続いてきた．しかし，観測技術をもう少し進歩させることができれば，人類史上初めて科学的・実証的な答えを得られる可能性がある．

「生命がいる惑星」は,「生命がいそうな惑星」=「生命存在可能環境を持つ惑星」の部分集合である．したがって研究の戦略としては，まずは「生命がいそうな惑星」を多数見つけることが必要である．「生命がいそうな惑星」を多数見つける作業と，それらを詳細に調べて生命(の兆候)を発見する作業は，別のものであるかもしれない．

地球の環境を考えると，表面に海と陸，大気を持つ惑星上に生命がいる可能性が高いと予想される（ただし，他の可能性を排除するものではない）．そのような惑星を見つけ出し，その大気スペクトルや反射光の観測により，表層状態を詳しく明らかにすることが必要である．

一方,「生命がいそうな惑星」が多数見つかると，それらの特徴や多様性などが見えてくるであろう．そうした特徴やこれら惑星の起源について理解することも，科学としては重要である．

「生命がいそうな惑星」も地球と同様，複数の惑星を含む惑星系の中に存在している可能性がある．宇宙における生命を理解するには，そうした惑星系の性質の理解も重要な課題である．そのために，多様な惑星系の詳細観測や，個々の惑星の詳細観測(生命存在可能環境の有無によらず)が必要である．

5.5.2 太陽系外惑星における生命の兆候の発見

系外惑星において，生命そのものを直接観測することは難しいであろう．したがって，生命の兆候を探し出すことが必要となる．どのような兆候を観測すればよいかをよく検討するとともに，それらの検出に挑戦する．

また,「生命の兆候を示す惑星」は，1つを見つければ終わりではなく，できるだけ多く見つけることも重要である.「生命を持つ惑星」が多数見つかったとすれば，そうした惑星の特徴や多様性が見えてくると

ともに，宇宙において生命が生じる一般的条件の理解につながっていくであろう．

5.5.3 太陽系内氷惑星の探査 -宇宙における惑星を理解するための基礎として-

これまでに見つかっている系外惑星の内部構造・組成は大まかに「岩石惑星」「ガス惑星」「氷惑星」の3種類に分類され，太陽系内の惑星もそのように分けられる．

ところが，太陽系惑星で比較的よく探査されているのは，「岩石惑星」と「ガス惑星」のみである．太陽系内の氷惑星には天王星と海王星の2つがあるが，これらに対する惑星探査はVoyager 2号による1回のフライバイのみである．もちろん，これによってある程度の情報は得られているが，他の太陽系惑星と比較して情報が格段に少ないことは否めない．

宇宙における惑星を一般的に理解するためには，氷惑星の理解は欠かせないはずである．しかし，太陽系内の対応天体である天王星・海王星の探査は十分ではない．したがって，これら太陽系内氷惑星に対し（他の惑星と類似の観測でもよいから同程度以上の質と量の）探査を実施すれば，宇宙における惑星の理解も大きく進展することが期待される．

（木村淳，高橋幸弘，中島健介，中本泰史，三好由純）

6. アストロバイオロジーパネルまとめ

本パネルでは「火星生命探査」と「氷衛星・小天体生命探査」をトップサイエンスとして提案する．

6.1 火星生命探査

【特に重要と考える理由】

先ず，本パネルは以下の理由で，「火星生命探査」を特に重要と考え提案する．1.生命探査は地球惑星科学における究極の目標の一つであること．2.本提案は地球科学全般への寄与が大きいこと．3.火星では地球型生命をモデルとして観測計画を立てることが出来ること．4. VikingはもとよりMSLおよびExoMarsの分析機器よりも数桁感度の高い探査方法を既に準備していること．5.極地砂漠や高地砂漠での微生物密度が10^4細胞／グラム土壌であるのに対し，10細胞／グラム土壌の感度を実現できること．6.従って，かりに生命が検出されない場合に，生命はほとんどいないという結論が出せること．7.今後，国内外で準備中の探査計画から探査地域の絞り込みが十分可能と推察されること．8.火星表面での生命探査の可能性を具体的に示した世界初の提案であること．

【背景】

近年の探査により，火星表層には，かつて大量の液体の水が存在していたこと，温暖湿潤な気候がある程度長期間保たれていたこと，そして火星は強い磁場を保持していたことが明らかにされた．これらを端的にまとめると，生命が生まれた頃の地球と極めて類似した環境を火星が持ち合わせていたという事に他ならない．従って，生命が30～40億年前に火星表面で誕生したとしても何ら不思議では無い．こうした立場で考えると，両惑星の熱的進化過程の差から，表面における生命体は異なる進化過程を経たという描像が得られる．つまり火星生命は，その発生の有無だけでなく，その後の進化という意味で，科学的に極めて重要な意味を保持している．

ただし現実的には，これを科学的に議論できるのは，表面付近に存続し続けることに成功した生命に限られる．地下においては，熱や液体の水が長期間にわたり存続しえたことに間違いなく，そのため生命体は長期間にわたり進化し続けることができたと考えられるが，これを包括的に探査することは技術的に極めて困難となるからである．この点に関して個別提案では，地表面における生命体について探査対象としている．すなわち，この個別提案は火星生命探査が「現在の技術においても十分に検証可能である」ということであることを世界で初めて具体的に提案したものであることを強調しておきたい．

【個別提案との関連】

火星におけるメタンの発見と，地球におけるメタン酸化鉄還元細菌の発見 [2] から，火星生命探査（略称JAMP）提案者達は火星表面において現在もまだメタン酸化鉄還元細菌（化学合成微生物の一種）が生存しうるのではないかと推定するに至った．火星の様々な環境は生命が十分に生存可能な環境である．また，紫外線は様々な物質によって吸収されるので，薄い火星土壌に覆われるだけで，火星表面も十分生育可能な環境となる．従って，メタン（一般に還元型物質）と酸化鉄（一般に酸化型物質）の両者がある場所であれば，数センチメートル程度の深さでも微生物は生存している可

能性がある．

JAMPでは生命探査の方法として，蛍光色素をもちいた蛍光顕微鏡観察を自動的に行う．細胞の特徴を検出するいくつかの色素を組み合わせて用いることから，「細胞」を検出する．さらに，そのアミノ酸分析を行う．地球の生物は 20種類の L型アミノ酸からなるタンパク質を持っている．火星の「細胞」らしき粒子が地球と同じアミノ酸かどうかを調べる事により，「細胞」の由来を知ることができる．これらの探査手法は，「細胞」だけでなく，化学進化における重要な要素（複雑高分子有機物，PAH等）も検出可能である．また，こうした探査計画では超小型のマイクロチップによる観測装置（μTAS）の開発が重要となる．こうした探査手法は，火星のみならず氷衛星，小天体でも利用可能である．JAMP提案は MELOS提案の一部として検討が進んでいる．

【将来探査提案との関連】

Viking生命探査が代謝の検出を目指したのに対し，その後欧米の火星探査計画は，水の存在に焦点が移っていたが，MSL, ExoMarsでは生体関連分子の探査に比重が移っている．JAMP計画では今後，生命の生存・維持に最も適した環境条件，地域についての議論が必要である．観測地域は，現生生物を探すならばメタン噴出地域（あるいは地熱地帯）が，過去の生命痕跡を探す場合には過去の地熱地帯が最有力対象となる．メタンは今後地上観測が，さらに 2016年には Trace Gas Orbiterの観測も予定されているので，地域の特定が進むと期待される．過去の地熱地帯は画像から噴気孔跡を探す等の方法が想定される．その他に，蛇紋石や粘土鉱物，あるいは還元型の（2価の）鉄（ブルーサイト）の探査も重要である．こうした意味で，生命の生存環境としての環境探査の重要性も指摘する．

6.2 氷衛星・小天体生命探査

【特に重要と考える理由】

アストロバイオロジーの目標は，われわれがどこから来たか，われわれは何者か，われわれはどこに行くのか，という人類の究極的な謎へのアプローチであり，これは現在の惑星探査の目標と重なる．太陽系において，Voyager・Galileo・Cassini探査等により木星の衛星のEuropa，土星の衛星のTitan・Enceladusに生命を育み得る環境が存在することが示唆されたことにより，これらの天体は太陽系アストロバイオロジー探査の重要なターゲットとなった．また，生命の起源を考える上で，(1)始原的有機物の生成，(2)惑星（衛星）環境での有機物の進化，(3)生命の誕生，というステップが考えられるが，原始地球環境が残されていない現在，有機物の生成と変成が継続的に起こっているTitanは，(2)の化石としても重要である．現在，欧米を中心に木星系探査（EJSM），土星系探査（TSSM）の議論がされているが，日本独自の視点で，ターゲットとするサイトや分子種，検出論が提案可能と考えられる．

【背景】

Europa：Voyager 1 号，2 号による探査により，Europa表面を覆う氷に縞が観測され，氷の下に液体の海が存在することが示唆された．探査機Galileoの探査により，さらに表層の詳細な解析が行われ，海の存在の可能性は強まった．液体の水が存在すること，氷を溶かすエネルギーが海底に存在することは，生命の存在を強く示唆する．ただし，海水の無機的成分（硫酸マグネシウム等）の存在が示唆されたが，有機物に関する情報は，まだほとんどない．

Titan：地上観測およびVoyagerによる探査により，Titanが約 1.5気圧の濃厚な大気を持ち，その主成分が窒素とメタン（数%）であること，それらの反応により生じた多様な有機物が気相に存在すること，さらに固体の複雑有機物からなるエアロゾルが存在することが示唆された．Cassini探査により，着陸プローブHuygensがTitanに着陸し，より詳細な分析を行った．この探査のおり，Titan表面に水の氷や，液体エタンを含む湖が検出され，さらに地下のアンモニア水の存在も示唆された．これらから，Titanに地球型と異なる生物圏の存在の可能性が議論されるようになった．

Enceladus：Cassini探査の折に，Enceladusを覆う水の氷の割れ目から，水・エタンを含む物質の噴出が観察され，Europa同様，氷の下の海の存在が示された．水・有機物・エネルギーの存在は，Enceladusにおける生物の生存可能性を示唆するものである．

その他：Voyager探査などにより，木星・土星系の他の衛星や海王星の衛星のTritonなどもアストロバイオロジー的に興味深いことがわかってきた．Phoebeや，Iapetusも始原有機物の観点から重要と考えられる．

【探査の提案】

新規な探査として，氷衛星・小天体生命探査を提案する．これは，最初に述べたような生命の普遍性を問う探査であり，非地球型生命まで視野を広げて考える必要がある．始原的有機物がさらに生命に近づく「進化」の過程を検出したいわけであるから，膜，情報分子(例，DNA, RNA)，触媒分子などの存在がターゲットになり，また，生存・維持には水とエネルギーが必要である．これらをターゲットとした場合，現段階ではTitan・Enceladusを含む土星系が最も科学的成果を上げられる可能性が高いと考えられる．

探査法としては，高分子を直接検出することは困難なので，加水分解を可能にする観測機器開発が重要であり，特定分子に特化したマイクロチップ開発も有力である．また，火星探査用に開発している蛍光顕微鏡・加水分解装置ならば生命と前駆物質，両方の検出が可能であるが，極低温下での作動の問題をクリアする必要がある．

氷衛星探査は 10 ～ 15年では達成不可能かも知れないが，将来を見据えた観測装置開発は来る 10年での重要課題であり，海外との共同ミッションを念頭に，国内では機器開発に重点をおくという方針も考慮に入れて良い．今後，惑星形成論研究者など，様々な専門の研究者を含む，コミュニティの拡大が必要で強く望まれる．

なお，始原有機物の探査として，Phoebeからのサンプルリターン等も提案されている．また，小天体パネルには，対象として，有機物を多く含む天体を対象に含めることを強く要望する．

(小林憲正，山岸明彦)

参考文献

[1] 並木則行ほか, 2010, 遊星人 19, 221.

[2] Beal, E. J. et al., 2009, Science 325, 184.