

日本惑星科学会「月惑星探査の来たる 10 年」：木星型惑星・氷衛星・系外惑星パネル  
第 1 段階検討まとめ

高橋幸弘<sup>1</sup> 中島健介<sup>2</sup> 中本泰史<sup>3</sup> 木村淳<sup>1,4</sup> 三好由純<sup>5</sup>

<sup>1</sup>北海道大学 <sup>2</sup>九州大学 <sup>3</sup>東京工業大学 <sup>4</sup>惑星科学研究センター <sup>5</sup>名古屋大学太陽地球  
環境研究所

## 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。

## 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。

## 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。ガリレオ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。

## 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]

「ガリレオ」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、初期のパイオニア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。

## 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]

ガリレオ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、ガリレオ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けば、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。

### 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。

### 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、Pluto-Kuiper-Express 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。

### 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の違いに加え、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。

### 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。

### 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氣的に結合している。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。

## 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有無の可能性や複雑有機物の検出など、地球外生命の有無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。

### 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。

## 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 Galileo 3 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氣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を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。

### 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。

### 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. 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。

### 5.1. 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」が多数見つかり、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。

### 5.2. 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。

### 5.3. 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良好に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。