

# みんなでふたたび木星へ，そして氷衛星へ その1 ～人類として為すべき木星圏総合探査JUICE～

木村 淳<sup>1</sup>，佐々木 晶<sup>2</sup>，藤本 正樹<sup>3</sup>

(要旨) 日本が木星系探査に参加する。2012年5月に欧州宇宙機関(ESA)の大型惑星探査プログラムとして選定され2022年の打ち上げを目指す木星氷衛星探査機JUICE(ジュース: JUpiter ICy moons Explorer)は、日本チームもその開発に参加する国際協同計画として始動した。太陽系最大の衛星ガニメデの周回探査とエウロパ、カリストのフライバイ探査を行って氷の表面に広がるテクトニクスの全容や内部海の存否を明らかにし、さらに木星大気や磁気圏プラズマ環境などの調査を通して、木星と衛星、それらの相互作用の様相をつまびらかにする。日本のコミュニティにとって数年前まではただの夢だった木星探査へついに手が届くようになった経緯を記し、これからのあゆみを連載していく。

## 1. 地球外生命圏に思いを馳せて

北イタリアのトスカーナ大公国、斜塔で有名な街ピサで生まれたガリレオ・ガリレイは、1610年に自作の望遠鏡を使って木星の4衛星を発見。大公国君主一族の名を取り「メディチ家の星(Medicean stars)」と名付けられ、後にガリレオ衛星と呼ばれることになるそれらの衛星は、地動説に有利な証拠のひとつとして天動説を大きくぐらつかせ、人類の宇宙観に大転換をもたらすきっかけとなった。それから約360年後、人類が送り込んだ探査機パイオニアは初めて木星圏に到達してガリレオ衛星の撮影に成功し、その実績を礎とした探査機ボイジャーは衛星の多様な地質活動を露わにした。そして1989年、無人探査機に名を載せたガリレオは1995年から約8年間にわたり木星系を調査し、衛星エウロパなどの内部に液体水の海が存在する可能性を提示し、ガニメデで衛星唯一の固有磁場を発見するなどの成果を挙げ、氷に閉ざされた静かな世界という従来の描像を覆し独特の生態系の存在をも予感させた。そうして探査機が木星を訪れるようになった頃、

地球では深海熱水孔が各地で発見され、地球生命の発現地に関する認識は一変した。また太陽系外では1995年のベガス座51番星における惑星発見を皮切りに多様かつ多数の系外惑星が観測に捉えられ、従来の太陽系と地球の理解に根ざしていた生命居住可能性(ハビタビリティ)の認識は、今や大きな見直しが迫られている。しかし我々ははまだ、地球外生命の存在はおろか居住可能性をまともに議論できるような環境すら確認できていない。かつて天動説をひっくり返した木星系は、宇宙生物学(アストロバイオロジー)をキーワードに今ふたたび人類の認識を大きく変えうる可能性を秘めている。地球生態系の理解と地球外生命の想像、そしてさらなる系外惑星の発見を踏まえつつ将来の宇宙生物学の発展を展望し、全世界をあげて実施すべき探査として、JUICEは立ち上がった。

## 2. いまだベール厚き木星系

太陽系の全容や起源を明らかにする上で、木星系がその大きな鍵を握っていることは言うまでもないだろう。木星は、太陽を除く太陽系天体の中で他を圧倒する大きな質量と角運動量を持つ点で太陽系を代表する存在であるだけでなく、近年進歩のめざましい系外惑

1. 東京工業大学地球生命研究所

2. 大阪大学

3. 宇宙航空研究開発機構

junkim@elsi.jp

星の観測では、木星のような巨大ガス惑星が宇宙において普遍的な形態であることも分かってきた。すなわち木星系を理解することは、より普遍的な惑星形成過程とその進化の解明という惑星科学の究極的な目標へと繋がる重要なマイルストーンと言える。また木星には、惑星サイズとも言える大きな衛星らが従い、それぞれが多彩な表層活動や内部状態を持っていることから、古くから「ミニ太陽系」と喩えられてきたことも周知の通りである。その中の衛星エウロパやガニメデ、カリストは表面をH<sub>2</sub>O主体の水で覆われ、内部ではその水が全球的に融解した「内部海」として存在している可能性が示唆されており、アストロバイオロジーの観点でも最重要サイトであろう。また、木星が持つ強大な磁気圏のダイナミクスを把握し、太陽系惑星最強の粒子加速器の物理を理解することは、普遍的な宇宙プラズマ物理学の構築にも重要な貢献をもたらす。

このように、木星系理解の重要性は長きにわたり研究者間で共有されてはきたが、現状は理解する以前にその全容把握すら全くおぼつかない。1970～80年代にパイオニアおよびボイジャーが木星のフライバイ調査を行い、1990年代後半から2001年にかけてはガリレオ探査機が木星周回軌道に入って観測を行った。しかしガリレオ探査機は高利得アンテナの展開失敗やデータレコーダの故障によってデータ通信量に大きな制約を受け、取得した科学データ量が限定されるという重大な障害があった。また衛星の調査においては、フライバイ観測という制約から全面観測がなされていない上に空間分解能も不十分であることに加え、潮汐や火山活動など連続的な時間変化が重要となるデータも取得できていない。また磁気圏やプラズマ物理の面では、低エネルギー粒子の観測が欠落しているとともに高エネルギー粒子のデータも時間分解能が悪く、加速機構の解明やダイナミクスの理解を困難にしている。さらに木星本体、特に大気についてもそのダイナミクスの理解に重要な連続撮像データは特定地域の限定的な期間にとどまるほか、木星バルク組成の理解に重要な情報となる水蒸気検出を目指した大気プローブは非常に乾燥した領域に突入したため、木星大気の水蒸気量は今もって謎のままである。現在はJUICEに先んじて、NASAの木星探査機JUNOが木星へ向かっており、2016年に木星へ到着し極周回軌道で木星の大気組成、重力場、内部磁気圏を調べる。大気の科学につ

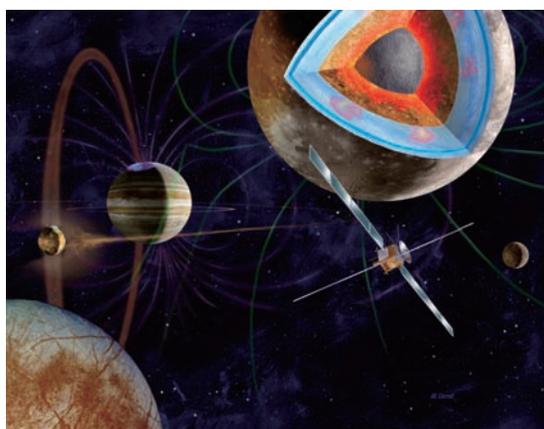


図1：木星系に到着し調査を行うJUICE((C)ESA).

いては、JUNOが大気組成を調査しJUICEが大気の大ダイナミクスを把握する、という役割分担があり、また磁気圏の理解においては、JUICEは撮像観測による全体像の把握と「その場」観測による局所精密情報を組み合わせた「スケール間結合」という、従来の探査にはない視点でプラズマ現象を根源的に理解する。JUNOの遠木点はカリスト軌道よりも外側になるため、ガリレオ衛星はほとんど観測しない。

### 3. LAPLACEからEJSM, そしてJUICEへ

冒頭で「日本のコミュニティにとって木星探査はただの夢だった」と書いた。我が国には「すいせい」によるハレー彗星探査から、月周回衛星「かぐや」や小惑星探査機「はやぶさ」に至る成功体験がある。火星探査機「のぞみ」も最終的には失敗ではあったが、火星領域へ到達しデータを取得する点においては経験をj得ている。しかし木星以遠となると、原子力電池を事実上使えず太陽光が微弱な中での電力確保や、巨大惑星周囲での放射線対策、はるか彼方との遠隔通信など、多くの課題が立ちはだかる。そしてこれらは欧州にとっても同様であった。日本として海外(とりわけ米国)の探査をただ指をくわえて見ていたわけではなく、1970年代には東北大のグループから木星を目指す提案が出されていたほか、2003年には宇宙科学研究所の工学グループが太陽電力セイルミッションとしての木星探査を提案するなど、具体的なアクションは取られてきた。しかしどうしても大型計画となってしまう、

また技術的成熟度という点からも時期尚早という感が否めずこれらの提案のミッション化は実現しなかったが、最近の太陽電池技術の向上などを受けて、2006年に日欧共同での木星探査ミッションLAPLACE(ラプラス)の検討がついにはじまった。これは決して突然湧いてきた話ではなく、2015年打ち上げ予定の木星探査機BepiColombo検討での協力関係の中で培われた日本のコミュニティに対する高い信頼に裏打ちされた流れであった。LAPLACEでは三つの探査機(JPO=Jupiter Planetary Orbiter, JMO=Jupiter Magnetospheric Orbiter, JEO=Jupiter Europa Orbiter)を準備し、編隊にて木星圏の総合探査を目指すこととなった。日本はこのうちJMOを製作し、ヨーロッパが打ち上げるJPOやJEOとの相乗りで運ばれることになっていた。こうした枠組みでLAPLACEは欧州宇宙機関(ESA)の次世代宇宙探査計画「コズミックビジョン 2015-2025」(2015年~2025年の打ち上げを目指す大型計画について2007年から募集がはじまった)へ申請され、日本でも2007年に宇宙科学研究所に国際共同木星圏総合探査計画ワーキンググループが作られてミッション検討が始まった。

翌年にはアメリカ(NASA)も加わり、LAPLACEは欧日米の協同体制からなるEJSM(Europa Jupiter System Mission)という枠組みへ発展する。アメリカがJEO、ヨーロッパはJGO(Jupiter Ganymede Orbiter)、そして日本がJMOをそれぞれに製作・打ち上げし、現地でランデブーするという壮大な計画である。この経緯において、日本のJMOは打ち上げ重量の問題からJGOとの相乗りではなく日本独自に打ち上げることになり、太陽電力セイルを使った木星到達探査機(母船)にJMOを含む複数の小型木星周回機を搭載

し、木星フライバイ時に小型機を木星周回軌道へ投入しつつ母船はトロヤ群小惑星を目指すというプランを2020年の打ち上げを目指して検討し始めた。ところがその後、アメリカが脱退してしまう。2011年3月に発表されたアメリカの将来惑星探査10ヶ年計画(Decadal Survey)での将来計画の優先付けにおいて、JEOが次期大型探査計画の最上位にならなかったことやその後の予算縮小のために、JEOは事実上の計画中止となってしまった。

木星圏探査は再び欧州主導へと戻り、LAPLACEでの衛星調査はガニメデ周回観測だけだった計画にエウロパとカリストのフライバイ観測を加えるなどのアップグレードが図られ、ミッションは「JUICE」と名前を変えた。その後JUICEは2012年5月にESAコズミックビジョンのLクラスミッション(大型探査計画)として採択され、2022年の打ち上げを目指して計画が始動した。同じく最終選考に残ったNGO(New Gravitational wave Observatory)とATHENA(Advanced Telescope for High-Energy Astrophysics)を抑えての選定であった。

日本もこれに並行して、JMOを中心とする独自の探査機開発と太陽電力セイルを融合した形での検討を継続してきたが、セイルは重量がかさみ衛星重量が少なくなってしまう木星磁気圏観測のサイエンス要求を満たせないことや、2011年3月、アメリカが次期10ヶ年計画を発表した月惑星科学会議(LPSC)のまさに最中に起こった東日本大震災に伴う予算縮小などの影響を受け、日本単独で2022年の打ち上げを目指し木星系探査機を開発するという大型の貢献案は現実的でないと判断され、中止となった。しかしLAPLACEの提案準備段階から続いてきた日本の貢献をはじめ共同

表1: 搭載する科学観測機器。

観測装置	
JANUS(Jovis, Amorur ac Natorum Undique Scrutator)	可視分光撮像カメラ
MAJIS(Moons And Jupiter Imaging Spectrometer)	可視・近赤外撮像分光計
UVS(UV Imaging Spectrograph)	紫外撮像分光計
SWI(Submillimetre Wave Instrument)	サブミリ波観測器
GALA(GAnymede Laser Altimeter)	レーザ高度計
RIME(Radar for Icy Moons Exploration)	レーダーサウンダ
J-MAG(Magnetometer for JUICE)	磁力計
PEP(Particle Environment Package)	プラズマ環境観測パッケージ
RPWI(Radio and Plasma Wave Investigations)	電波・プラズマ波動観測器
3GM(Gravity and Geophysics of Jupiter and Galilean Moons)	重力観測器
PRIDE(Planetary Radio Interferometer and Doppler Experiment)	惑星間電波干渉・ドップラー実験

研究の深化や学会開催などの多様な協同体制が、欧州側から寄せられる大きな信頼の礎となり、日本の複数の研究者に対してJUICE開発への協力提案が出された。

ESAは2012年6月に、JUICEへ搭載する観測機器の公募(AO, Announcement of Opportunity)を開始。審査を経て2013年3月には11の科学観測機器が選定され、うち4機器の開発と2機器の科学検討という形で日本チームが正式にJUICEへと参加することとなった(表1)。かつては日本の惑星科学コミュニティにとっての「夢」に過ぎなかった木星圏探査が、ついに自らの手で実現可能なところまできたのである。現在、日本側ではJUICEをJAXAのプロジェクトとするべくまずは2014年のプリ・プロジェクト化を目指した準備を行っている。

#### 4. JUICEであたたび木星、そして氷衛星へ

JUICEは衛星エウロパ、カリストのフライバイ観測とガニメデの周回観測、木星本体や磁気圏プラズマ環境計測などを行う。大まかなミッションスケジュールを表2に示す。2022年6月に打ち上げを予定しているJUICEは、地球や金星の重力で加速しながら7年あまりの時間をかけて木星へ向かう。木星周回軌道へ入った後、減速し軌道半径を次第に小さくしながら2回のエウロパのフライバイと3回のカリストフライバイを行う。その後はカリストの重力アシストによって軌道傾斜角を最大29度まで上げ、9か月間に9回のカリストフライバイをしながら木星本体および磁気圏の高

緯度観測を行う。2032年9月にはガニメデの極周回軌道に乗り、全球観測へと入る。周回軌道投入直後の5ヶ月間は近ガニメデ点高度200 km、遠点高度10,000 kmの長楕円軌道に乗り、その後は高度5,000 kmの円軌道、そしてさらに高度を下げ、高度500 kmでの周回観測を約3か月、最終的には高度200 kmでの観測を約1か月間行う。

JUICEが木星圏で目指す理解は、巨大ガス惑星圏における生命居住可能領域(ハビタブルゾーン)の発現についてであり、それに向けた巨大ガス惑星の代表格である木星(系)の理解、および、生命居住可能領域の候補としての氷衛星の理解、をターゲットとしている。具体的な調査対象は大きく3つ挙げられる。衛星、木星大気、そして木星磁気圏である。

第一に衛星調査の意義は、原始木星円盤中で形成されたと考えられるガリレオ衛星の全容を把握し、木星本体とのシステムの起源を解明することが、普遍的な惑星系形成過程の解明という惑星科学の最大目標のひとつに繋がるという点である。活発なシリケート火山を持つ衛星イオのように地球以上に地質学的に活発なものから、カリストのようにほとんど活動の痕跡を示さないものまで、ガリレオ衛星は極めて幅の広い個性を持っている。これらの個性がどのように形作られたのかについて、地球との共通点と各衛星に特有の現象とを区別しながら原因を探っていく過程こそが惑星科学の本質であり、太陽系全体の天体、さらには系外惑星の多様性にも考察の礎を与えるだろう。ガリレオ衛星はその幅の広い個性において、このような問題設定の格好のサンプルと言えるのである。

表2: ミッションスケジュール。

2022年6月	打ち上げ 地球-金星-地球-地球重力アシスト	
2030年1月	木星周回軌道投入 木星ツアー	-エウロパフライバイ2回 -カリストフライバイ3回 高軌道傾斜角フェイズ -カリストフライバイ9回
2032年9月	ガニメデ周回軌道投入	ガニメデツアー 高高度楕円軌道周回フェイズ(1か月) 高高度(5000 km)円軌道周回フェイズ(3か月) 高高度楕円軌道周回フェイズ(1か月) 中高度(500 km)円軌道周回フェイズ(3か月) 低高度(200 km)円軌道周回フェイズ(1か月)
2033年6月	ノミナルミッション終了	

JUICEのメインターゲットである衛星ガニメデは、衛星の中で太陽系最大のサイズ(半径2631 km)を有し、衛星で唯一の固有磁場と磁気圏を持ち [1]、表面には衝突クレータで飽和した極めて古い地質ユニットと大規模な正断層が群がるユニットとが共存し [2]、内部海の存在可能性が示唆されている [3]水衛星である。その周囲には木星磁気圏と表面氷の相互作用で生じた酸素を主成分とする希薄大気が存在しオーロラを輝かせている [4]。太陽系の中でこれほど多様な現象・活動性を持つ固体天体は他になく、それが地球半径の4割ほどのサイズ、かつ約半分が氷から成る揮発性天体で作り出されている点は非常に興味深い。またフライバイ観測を行うエウロパでは、内部海 [5]や限局的な内部湖 [6]の存在が予想されており、深部の岩石核と水の反応によって生成したと思われる塩が表面の亀裂周辺で確認されている [7]。内部海の組成を見通す窓としてこのような地形を調査し、物質の化学組成を厳密に特定しかつその地形依存性を把握することが、“水衛星アストロバイオロジー”の重要な次なる一歩となる。同じくフライバイ観測を行うカリストでも、エウロパやガニメデと同様に内部海の存在可能性がある [8]。地質活動の痕跡は皆無に近く極めて古い表面を持つが、クレータ底での二酸化炭素の存在 [9]に代表されるように、カリストはガス惑星形成末期の化石としての状態を保持していると考えられ、その表面の分光観測は木星系が形成時に経た温度環境への示唆、ひいては惑星形成論へひとつの制約を与える可能性がある。

第二に木星大気観測の重要性は、その物理的・化学的諸過程を把握しダイナミクスを認識すること、ならびに、大気組成とその鉛直構造の把握を通して木星深部も含めたバルク組成の理解に繋げることにある。JUICEでは軌道傾斜角を上げることで可能となる木星高緯度観測によって、木星の対流圏上部から熱圏に至る高度範囲を全緯度帯にわたって観察し、包括的かつ長期間・高時空間解像度の風速・温度・雲・化学成分の挙動に関するデータベースが得られる(例えば [10])。一方で対流圏下部に深についての直接的情報は得られないが、探査機JUNOによって得られる木星深部に関する知見を補完することで、木星バルク組成の解明に寄与できると見込んでいる。

第三の木星磁気圏観測は、磁気圏のその場観測から普遍的宇宙プラズマ物理の理解への発展にその意義の

重要性が集約される。木星は自身が強力な固有磁場を持ちながら高速で回転し、その中で荷電粒子が加速される太陽系最強の粒子加速器となっている。またその磁気圏内部に衛星を抱えており、それら(特に毎秒1トンの火山ガスを放出する衛星イオ)がプラズマ源や擾乱源となることで興味深いプラズマ現象が展開している。そしてその現象が木星の極域オーロラとして写し出されている。オーロラは、極域上空にあると考えられる粒子加速域で加速された電子が木星大気へ降り込むことによって光る(メインオーロラやメインオーヴァルと呼ばれる)が、その加速域は剛体回転する木星双極子磁場たる内部磁気圏と、太陽風の影響が無視できない外部磁気圏との接続領域にあたり、その接続過程やイオを源とするプラズマガスの外部への輸送過程、さらに磁力線の引き延ばしや自転からの遅延といったオーロラ電流系の駆動メカニズムは理解されておらず、JUICEの精査によってその描像が明らかとなる。また、加速場を支えている低エネルギー粒子や電磁場の様子を捉えたデータも現状では不足していることは、先に言及した通りである。さらに衛星との相互作用という観点では、イオのプラズマ源としての寄与のみならず、公転運動に伴う磁力線の変形によって木星に生じるフットプリントオーロラの発生(エウロパに対しても同様の現象が起きている) [11]や、木星磁気圏に内包されているガニメデ固有磁場の挙動、さらにはエウロパ、ガニメデ、カリストの氷の表面が直接プラズマガスと相互作用し表面からイオンが供給される過程なども、重要な観測ターゲットである。とりわけ留意すべきは、こうした衛星周辺環境の理解が、生命居住可能系における宇宙放射線環境の把握という意味づけを持つ点である。

以上、JUICEが目指すサイエンスについて駆け足で触れたが、次回以降のレポートでは、日本チームがその開発に参加している観測機器を中心に、個々の観測が持つサイエンスや開発状況をはじめ、関連する研究の最前線について順次より詳細に紹介していきたい。また、JUICEの科学的成果をより高めるために学会セッションや研究会などを企画し、皆さんからの様々な提案やアイデアを取り入れる場を持つので、是非とも多くの方々から積極的な関わりをいただければと思っている。少し前まで「木星探査はただの夢」だった日本の惑星科学の土壌は「かぐや」や「はやぶさ」の

成功などによって一気に耕され，数々の重要な科学的知見を得る花を咲かせた．そしていま国際協力によって現実となった木星探査で地球外生命圏へのアプローチという大きな実りを得るために，緊張感と使命感を持って臨まねばならない．20年後，その果実を搾りつくし味わうために．

## 5. 謝 辞

本連載を提案していただいた谷川享行編集員とはしもとじょーじ編集委員長に感謝する．

## 参考文献

- [1] Kivelson, M. G. et al., 1996, *Science* 384, 537.
- [2] Pappalardo, R. T. et al., 2004, in *Jupiter*, 363.
- [3] Kivelson, M. G. et al., 2002, *Icarus* 157, 507.
- [4] McGrath, M. A. et al., 2013, *J. Geophys. Res.: Space Physics* 118, 1.
- [5] Kivelson, M. G. et al., 2000, *Science* 289, 1340.
- [6] Schmidt, B.E. et al., 2011, *Nature* 479, doi:10.1038/nature10608.
- [7] McCord, T. B. et al., 1999, *J. Geophys. Res.* 104, 11827.
- [8] Khurana, K. K. et al., 1998, *Nature* 395, 777.
- [9] Hibbits, C. A. et al., 2002, *J. Geophys. Res.* 107, 5084.
- [10] 宇野健 ほか, 2011, *遊星人* 21, 22.
- [11] 埜千尋 ほか, 2011, *遊星人* 21, 29.