

みんなでふたたび木星へ、そして氷衛星へ その6 ～木星系氷衛星探査機JUICE, 打ち上げ成功～

関根 康人¹, 齋藤 義文², 藤本 正樹², JUICE-Japanチーム

(要旨) 木星系氷衛星探査計画JUICEとは、欧州宇宙機関(ESA)による初のLクラスミッションであり、日本もジュニアパートナーとして参加する。搭載された10の観測機器のうち4つの開発に日本も携わり、コミュニティとして初めて太陽系外惑星探査に乗り出す。去る2023年4月14日、JUICE探査機がアリアン5ロケットで打ち上がり、現在まで順調に航行・運用を続けている。本稿では、これに至るまでの道のりを中心に、2030年代に盛り上がりを見せるであろう外惑星大型探査における日本の活路を含めて記す。

1. はじめに

2023年4月14日、フランス領ギアナの射場から、JUICE探査機を搭載したアリアン5ロケットが打ち上がった(図1)。ロケットはたちまち熱帯特有の低く垂れこめた雲に吸い込まれたが、その雲の切れ間から、時折まっすぐに飛んでいくロケットの炎が見え隠れした。

JUICEには日本からも200名近い科学者が参加しており、日本の惑星科学のコミュニティとして、巨大ガス惑星と氷衛星の科学に船出する。JUICE探査機には、日本が国際共同で開発に関わった4つの観測装置(電波・プラズマ波動観測器(RPWI)、プラズマ環境観測パッケージ(PEP)、レーダー高度計(GALA)、サブミリ波分光計(SWI))も、他の6つの装置に加えて搭載されている[1]。

科学者がコミュニティとして計画に参加する意義は、次世代を育成することにある。コミュニティとして参加すれば、当然ながら次世代が生まれる。新しい学問領域も、日本の強みも、そのコミュニティのなかに生まれうる。JUICE探査機が木星系に着くのは

8年後の2031年。2034年には木星の衛星ガニメデの周回機となり、探査が終了する予定は12年後の2035年である。JUICEのような外側太陽系の大型探査では、次世代を意識しなければならない。

打ち上げ後の時間だけでない。この探査計画がヨーロッパで提案され、日本が関わるようになったのは今から20年近くも前のことである。

以下、JUICE打ち上げにあたり、どのようにしてJUICE探査が生まれ、日本がこれに関わってきたのかといった話を続けたい。さらには、今後の太陽系大型探査における日本の立ち位置についても思うままに述べていきたい。

2. EJSM—ラプラス計画

ご存知の方も多いと思うが、JUICEの原型になったのは、2005年前後に構想されていた「エウロパ木星系探査計画(EJSM: Europa Jupiter System Mission)—ラプラス(Laplace)計画」である[2](図2)。

EJSMに始まりJUICEに続く、この木星系探査への日本の関わりの源流は、2006年4月に日本側にヨーロッパから一通の連絡があったことに行きつく。EJSMの欧州側代表者と会ってみたいかという連絡で、会ってみると日本もEJSMに加わらないかという

1. 東京工業大学 地球生命研究所

2. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
sekine@elsi.j



図1: 打ち上げ2日前, フランス領ギアナの発射台に設置されたアリアン5ロケット. 内部にはJUICE探査機が搭載されている. (画像提供: 齋藤義文)

話であった.

日本は当時, 本格的な太陽系探査の緒に就いたばかりであった. はやぶさ初号機によるイトカワ探査でもトラブルに見舞われ, 実績という意味では欧米に対して遥かに見劣りした.

現在もそうであるが, 日本の立場から見れば, ESAやNASAは圧倒的な巨人であり, いわば坂の上の雲である. そのような巨人に対して, 対等の立場の協力関係を作るというのは力関係からありうることはなかった.

実は, EJSMに際し日本にも声がかかった仕掛けは, 日欧は水星探査計画「ベピコロンボ」でよい関係を作っていたことにある. 90年代から始まった「ベピコロンボ」の協力関係の中で, 日本の科学面での実力を信頼してもらっていたという伏線があり, 日本が期待できるパートナーという印象を残せたことがEJSMにつながった.

かくして, EJSMのなかでも「ベピコロンボ」と同様に, 日本が木星磁気圏観測衛星を作るという方向

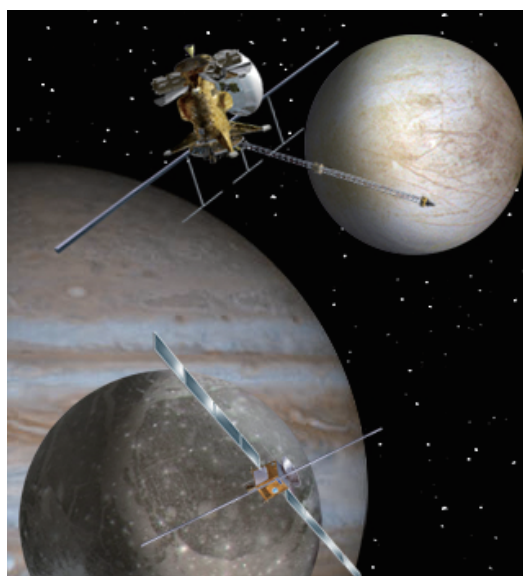


図2: 2000年代に議論されたエウロパ木星系探査計画(EJSM). (画像提供: NASA)

で話が進み出した. 実現すれば, NASAがエウロパを, ESAがガニメデをそれぞれ精査し, JAXAが木星磁気圏全体を探査するという, 3機衛星体制での同時観測という夢の計画となっていた[3]. 今から17年前のことである.

しかし, EJSMに突如として終わりが訪れた.

2010年, NASAは予算不足のためEJSMから手を引いてしまったのである. アメリカという国民性なのか, ソフトマナー中心の社会のためなのか, アメリカでは資金があれば猛烈な勢いで物事が進むが, それがなくなれば嘘のように人がいなくなる.

一方, ESAは梯子を外された. 計画を白紙に戻すこともありえた. しかし, 結局, 木星衛星ガニメデの探査の意義価値に立ち戻り, 単独の木星系水衛星探査計画JUICEとして再出発したのである. 単独のJUICEとなったことで, エウロパのフライバイ探査も, 積極的にJUICEに含めることができた. 軌道計画を練り直すなかで, 虎の子ともいえるエウロパへの2回の近接観測を入れ込み, 最新鋭の観測機器でエウロパの生命可能性を調べることも可能となった.

このような状況においても, ヨーロッパが木星系探査を諦めなかったのは, 欧州の国民性もあるに相違ない. ヨーロッパの石造りの城塞や大聖堂は世代

を超えて構築される。時が経ち、その実用的な役割を全うした後も、それらは都市の象徴となり、子供たちに無言で語りかける詩となる。ヨーロッパは堅牢なものを、世代を超えてでも作っていくことが、もはや文化のレベルにまで濃厚に沁みついているといっている。大げさに言えば、欧州にはサグラダ・ファミリアを作ろうとする国民性があり、そういった文化を持つ人たちがする探査がJUICEだともいえる。

さて、日本はどうしたか。当初のように日本独自の木星磁気圏探査機を続けられなくなった。しかし、搭載しようとしていたプラズマ観測装置や質量分析計を、JUICE探査機本体に搭載させるべく関係者が働きかけた。月探査衛星「かぐや」や「はやぶさ」でのレーザー高度計と、地球観測で実績をあげつつあったサブミリ波分光計もこれに加わった。

3. JUICEとエウロパ・クリッパー

新たに船出したJUICEも、順風満帆というわけにはいかなかった。

ATHENA宇宙望遠鏡など強力な大型計画と競争しつつ、これに勝ち抜きESAで予算を獲得したのは2012年である。ESAで初のLクラス(大型クラス)の探査として選定された。

ここ数年は、新型コロナが計画に大きく影を落とした。各観測機器は日本を含めた複数の国のあいだでの共同開発で作られたため、科学者の往来が制限されることは計画の遂行にとって死活問題であった。

それでも、ようやく探査機は完成し、2023年4月フランス領ギアナから打ち上げられたのは、機器開発に関わった全ての関係者の努力のお陰である。太陽光パネルの展開なども乗り越え、現在探査機は順調に航行を続けている。

一方、2010年にEJSMの撤退を決めたアメリカだったが、2013年になって突如としてエウロパ探査の予算が復活した。これは、2012年に正式にJUICEがESAに選定されたことと無縁でなからう。以下は邪推だが、NASAとしては、JUICEにエウロパ探査の第一成果を持っていかれたくなかったのかもしれない。フロンティア開拓で形成した国家らしいといえ、いかにもそれらしい。

NASAはこの新しい予算で作る探査機に、エウロ

パ・クリッパーと名付けた[4]。アメリカらしく、巨費が付いたことで探査機の開発が恐ろしい勢いで進んだ。エウロパ・クリッパーの打ち上げ予定は来年2024年であるが、強力なロケットのおかげでJUICEを追い抜き、木星系到着はJUICEより1年以上早く、エウロパの観測も先に行う。結局、EJSMは形を変えたものの、当初の想定に近いNASAによるエウロパ探査とESAによるガニメデ探査をほぼ同時期に行うというものに落ち着いた。

爆発力でフロンティアを切り開くアメリカと、重厚で堅実な大事業をなすヨーロッパ。どちらも2000人規模の科学者が参加する。

そこに日本の200名近い科学者も参加する。日本の科学コミュニティにとって、JUICEとは何なのか。外側太陽系探査における、日本ならではの活路はどこにあるのか。

4. JUICE-Japanのサイエンス

ESAが主導するJUICE全体の科学目標は、「巨大ガス惑星周りの生命生存可能性(ハビタビリティ)の調査と特徴づけ」とされ、そのための木星系水衛星の総合探査を行う[5]。最大の目標は、木星系最大の衛星であるガニメデの地下海の特徴づけにある。ガニメデの周回機となり、内部構造や表面物質を明らかにしていく(図3)。その中で日本として、この中でどのような独自のサイエンスと強みを発揮できるだろうか。

まずは、惑星形成論があるだろう。

周知のように、日本は林忠一郎以来、惑星形成論において世界をリードしてきた冠たる実績がある。今から20年前の惑星形成論の大問題の1つは、木星や土星をいかに早く作るかということであった[6]。地球の数倍程度の質量の原始惑星が、円盤ガスの散逸より前に形成しなければ、巨大ガス惑星はできないのである。円盤ガスは原始太陽の形成から1000万年かそれ以内で散逸することを考えると、特に土星を現在の位置に作るのには難しいとされた。

一方、最近では、この風潮が一見、真逆のようになっている。木星は原始太陽の形成の後、極めて短時間でできたのではないかもしれないとされ始めているのである。隕石中に見られる太陽系初期の同位体二分



図3: JUICE探査機が精査する木星衛星ガニメデ。古く暗い領域と新しく明るい領域に二分されている。(画像提供:NASA)

性を説明するためには、木星が原始太陽形成後100万年という短時間で誕生し、太陽系の内側と外側の物質交換を遮断する必要があるらしい[7]。また、木星や土星が形成した後に起きたであろう大移動を考えれば、木星や土星も現在の位置で形成する必要もない。

いったい、木星や土星は、太陽系のどこでどのようにできたのであろうか。惑星形成理論は、急速な原始木星の成長を助ける機構としてペブル集積理論を提案した[8]。しかし、これはあくまで理論に過ぎない。実証レベルまで、理解を高めるには観測が必要となる。例えば、ペブル集積で木星が形成した場合、ガリレオ衛星にその痕跡が残らないだろうか[9]。ペブルで衛星ができた場合、集積熱は衛星表面のみにしか与えられず、内部は未分化のまま形成するのではないか。その後、放射性熱源で内部がじわじわ暖められた場合、ガニメデやカリストはどのような内部構造を呈するであろうか。惑星形成論が生まれ、「はやぶさ2」が成功した今の日本だからこそ、地球にとって「水の送り手」と形容される木星を、太陽系全域を含む新しい視点で探査できよう。

別の日本の強みは、氷衛星の内部の海、その化学や生物学にもある。

日本ではいち早く惑星科学と地球化学が協力・融

合し、土星氷衛星エンセラダスの地下海の化学や水環境を明らかにしてきた[10]。この後、アメリカの複数研究グループが地下海洋の化学を始めたが、熱力学平衡を仮定した理論に留まっている。日本は、理論だけでなく、室内実験や地球の熱水噴出孔探査を含めた実証を両輪としている点、世界にも類がない。ヨーロッパでは、氷衛星の海の化学に関する研究グループはまだ生まれておらず、JUICEによる氷衛星表面物質から、地下海の化学や生命に迫るという点に関しては、日本が主導できるだろう。

最後の強みとして、木星系磁気圏のサイエンスも挙げられよう。

木星は極めてダイナミックな惑星であり、大気のみならず、強力な磁場も高速で回転している。この強力な磁場が、太陽風を始めとする木星周辺のプラズマを加速する。加速されたプラズマは、木星大気に降り注いでオーロラとなるだけでなく、エウロパなど氷衛星の表面にも降り注いで化学反応—特に生命にとって極めて重要な酸化剤の生成—を誘発する。さらに、木星氷衛星ガニメデは、固有磁場を持っている。小さな固有磁場をもつガニメデと巨大な木星磁気圏との相互作用など、宇宙プラズマ物理にとって未開拓で豊かなフロンティアが広がっている。

ガニメデのような小さな衛星の磁気圏と木星の巨大磁気圏の探査に加えて、「ベピコロポ」による水星磁気圏、「あらせ」など地球磁気圏の理解を繋ぐことで、惑星磁気圏と恒星プラズマとの相互作用について、個別論を超えた、統一的な視点を獲得できよう。言わずもがな、このような視点は、今後さらなる隆盛期を迎えるだろう系外惑星の科学、特に惑星大気や地表環境の理論に実証のスパイスを加え、日本独自の強みにもつながるに違いない。

5. おわりに

EJSMの後、日本からJUICEに参加すべきという話が立ち上がった当初、周辺からの声は批判が大きかった。日本のロケットで打ち上げるものこそが本物だとの意見が大半であった。しかし今では、海外大型計画に参加すべし、チャンスをつかみ日本主導の計画で成果を出すべしとなっている。あるミッションが打ち上げまで17年かかるのは長すぎるのかもし

れない。しかし、このようなコミュニティの醸成を考えれば意味のある17年だったと言えるかもしれない。事実、この17年がなければ、「はやぶさ2」の視点から木星を眺めることはできなかった。

蛇足を承知で、日本が打ち上げる探査について述べれば、2000年代以降、日本は欧米を坂の上の雲としてそれを目指すのではなく、別途、独自路線を切り開こうとしてきた。周知のように、「はやぶさ」シリーズやMMXのようなサンプルリターン探査がそれである。

確かに、日本という島国では、地震、火山、台風が、世界のどこよりも頻発する。結果、人々はかりそめの土地に、かりそめの木造建造物を建て生きるしかなかった。急な山間に棚田を造り、滝のような川に井堰を造り、小さくとも精巧に、自然と共存し、自然にチャレンジしてきた民族の末裔が我々である。

サンプルリターン探査で如何なく発揮された日本固有の精巧さやチャレンジ性は、今後の日本が打ち上げる探査はもとより、日本単独ではできない外側太陽系探査においても受け継がれなければならないだろう。

例えば、機器提供のみのJUICEの次、海外の外側太陽系探査に日本が小型機を提供できたらどうであろう。日本に強みのあるサイエンスが背後にあることが前提であるが、欧米の大型親機に対して、日本の精巧な小型機がチャレンジ性を請け負い、氷火山や氷の断層や地震、巨大ガス惑星の嵐のなか、あるいは地下海から吹き上げるブルームに迫ることができまいか。

JUICEの打ち上げには、そんなことを夢見させてしまうような高々とした何かがあった気がする。

参考文献

- [1] JUICE-Japan公式ホームページ<https://juice.stp.isas.jaxa.jp/>
- [2] Blanc, M. et al., 2009, *Experimental Astronomy* 23, 849.
- [3] Sasaki, S. et al., 2010, *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan* 8, No. ists27, Tk_35.
- [4] Howell, S. and Pappalardo, R. T., 2020, *Nature Comms.* 11, 1311.
- [5] Grasset, O. et al., 2013, *Planet. Space Sci.* 78, 1.
- [6] 生駒大洋ほか, 2000, *遊星人* 9, 135.
- [7] Kruijer, T. S. et al., 2019, *Nature Astron.* 4, 32.
- [8] Alibert, Y. et al., 2018, *Nature Astron.* 2, 873.
- [9] Shibaike, Y. et al., 2019, *ApJ* 885, 79.
- [10] Hsu, H.-W. et al., 2015, *Nature* 519, 207.