

なぜ、宇宙研は Ariel に参加せねばならないのか

Ariel-Japan 代表 生駒大洋 (国立天文台)

Ariel 所内チーム長 塩谷圭吾 (宇宙科学研究所)

NASA-Kepler 等の系外惑星サーベイによって数千個もの惑星が太陽系外に発見され、惑星系が銀河系内に普遍的に存在することが実証された。それだけでなく、直径・質量・軌道周期といった惑星の物理的特性に関する多様性が明らかとなり、惑星系の成り立ちに関する我々の理解に大きな影響を与えた。系外惑星科学の次のマイルストーンは、そうした物理的特性に加えて化学的・物質科学的特性に関する情報を観測的に収集し、惑星および惑星系の多様性の実態をより正しく把握することである。

2020 年 11 月、系外惑星赤外分光観測衛星計画 Ariel¹が欧州宇宙機関(ESA)の M4(M class 4 号機)ミッションとして選定された(図 1)。その打ち上げは 2029 年に予定されている。Ariel は、赤外分光観測によって数多くの系外惑星を調査し、主に大気に関する多様性を明らかにすることを目的としている。このたび、宇宙研は Ariel に参加することを決めた。ヨーロッパの十数カ国から成るミッションに、選定後であるにも関わらず、なぜ日本が参加するチャンスを得たのか。また、なぜ日本は参加せねばならないのか。以下では、その経緯と必要性、発展性について述べる。

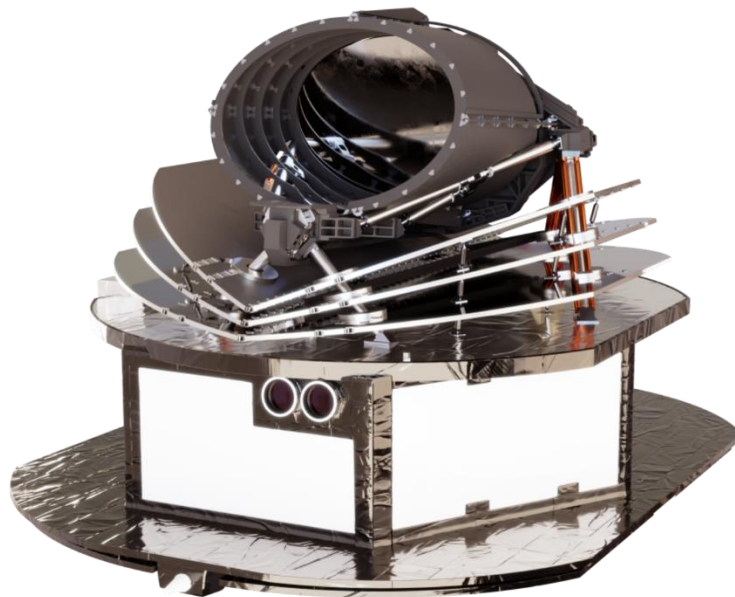


図 1. Ariel 衛星 (https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Ariel_factsheet より)

1. Ariel とは

Ariel は、世界初の系外惑星専用の赤外分光トランジット観測衛星計画である。口 1 m 級(1.1 m×0.7 m)の望遠鏡を搭載し、約 1.1 μ m から 7.8 μ m の赤外波長域で 10–100 ppm の観測精度を実現する。Ariel の

¹ Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey

特長の一つはカバーする波長域の広さにある。近赤外域または中間赤外域の限られた波長域でしか分光観測を行えない Hubble や Spitzer とは対照的に、Ariel の波長域では多くの気体分子 (H₂O, CH₄, CO など) を同時に検出することができる。主鏡口径では JWST には敵わないものの、Ariel の最大の特長は系外惑星観測に専門化したミッションである点だ。汎用望遠鏡である JWST では系外惑星観測に使われる時間は限られる。一方、Ariel では、その専用性を活かして、約 1000 個もの系外惑星に対して大気特性を調査する。多様な系外惑星の特徴および形成/進化過程を明らかにするには、多数の惑星に対する系統的な調査によって法則性を見つけ出し、それを理解することが必要である。専用観測衛星である Ariel がその威力を発揮すると期待される。

2. Ariel への参入の経緯

2.1. サイエンスに関して

日本は、惑星および惑星大気形成/進化に関する先駆的な理論研究によって、1980 年代から世界を牽引してきた。太陽系天体と少数の系外惑星しか知らなかった 2000 年代初頭までは理論が観測に先行していたため、日本はリーダーシップを維持できた。しかし、Kepler 等によって膨大な数の系外惑星が発見され、惑星系の大きな多様性が明らかになり、観測に基づく検証性・実証性が強く求められるようになってきた。その頃から、いかに豊富な観測データをいち早く手に入れることができるかがリーダーシップの鍵となり、そうしたデータを取得できない日本は系外惑星分野で遅れをとってしまったと言わざるを得ない。

それに対して危機感を強く抱き、2013 年頃から我々は惑星形成理論と系外惑星観測 (特に大気観測) を結びつけるような理論研究を、東京大学地球惑星科学専攻の大学院生を育成しながら、展開してきた。大学院生に研究テーマを与えるだけ与えておいて、観測データが手に入らない状況を変えないのは指導教員としてあまりにも無責任なので、関連する国際会議でのプレゼンや来日研究者との会談など様々なチャンスを利用して研究のアピールに努めた。そんな中、ELSI に 1 ヶ月ほど滞在していた Giovanna Tinetti 氏と再会し、グループの研究活動の話をつらつら聞いてもらう機会を得た。もともと、塩谷と生駒は Tinetti 氏と顔見知りであったが、特に生駒が研究の方向性を大きく変えたことは知らず、それを伝える絶好の機会となった。結果として、ESA 加盟国外であるにもかかわらず、生駒は Ariel ミッション・コンソーシアムのサイエンスチーム・コーディネーターとして招聘され、選定前から Ariel ミッションの理学検討に貢献してきた。また、卒業生たちも、ヨーロッパの研究機関でポスドクとして雇用され、Ariel の理学検討に直接携わってきた。

さらに、ミッション選定に向けた理学検討貢献を通して、日本全体としての理論研究のレベルの高さが Ariel ミッション・コンソーシアム (以下、AMC) 内で再認識された。さらに、すばる望遠鏡や MuSCAT²を用いた地上望遠鏡観測による研究活動も評価を受けた。そして、AMC からの提案により、日本の赤外線光学素子の開発実績、特に欧州木星氷衛星探査ミッション (JUICE) 搭載ガニメデレーザ高度計 (GALA) で蓄積したノウハウをもとに、光学素子の提供 (後述) を条件に、Co-PI 国として AMC 内のヨーロッパ諸国と同等のデータアクセス権を持つ形での日本の参加が認められることとなった。2020 年代に日本が独自にこの規模のミッションを行うことはできず、Ariel への参加は日本の系外惑星科学分野の遅れを取り戻し、当該分野でリー

² Ariel-Japan メンバーの成田憲保・福井暁彦らが構築したトランジット多色撮像装置

ダーシップを取り戻す絶好のチャンスである。

2.2. 装置開発・プロジェクト推進に関して

いっぽう、系外惑星の赤外大気分光のための開発・プロジェクト推進という面においては、かつて我々はその科学的重要性を見据え、系外惑星の直接観測に特化した世界初の宇宙機用コロナグラフ装置の開発を進めていた。その提案および開発開始は、地上望遠鏡によって系外惑星(巨大ガス惑星)の初の直接観測が成功するより前であった。コロナグラフは特殊なマスクを使って系外惑星の直接観測を行うためのものである。ただし我々の装置は、もとより搭載するマスク交換機構を活用することで「マスク無し」の観測モードを実装し、それが系外惑星のトランジット観測にも絶好の装置となるよう設計してあった。系外惑星の分光観測において、コロナグラフ法とトランジット法は、それぞれ主星に対して比較的遠い惑星と近い惑星の観測を得意とするので両輪である。二兎を追うことについては批判的意見もあったが、我々は将来の宇宙望遠鏡によるトランジット観測の重要性も確信していたので、「両輪」の実現を目指して粘り強く計画を推進した。

これらを背景に、2008年頃には、Giovanna Tinetti氏(Ariel ミッションコンソーシアム PI)らと、このような日本主導の計画で系外惑星の赤外分光をやろうと議論をして盛り上がった。その後、Tinettiは欧州でArielの前身であるECHOというプロジェクトを提案・推進した。ECHOはESAのM3(M class 3号機)には選ばれなかったが、M4にてArielとして成就した。いっぽう我々の赤外線宇宙望遠鏡計画は中止となった。そして、我々はArielに参加する機会を得て、欧州関係者と検討を重ねた。Tinettiらから宇宙研國中所長に宛てられたレターには、日本からハードウェア開発の寄与があれば日本はCo-PI国として参加できる旨、明記されていた。

Arielは約1000個もの系外惑星を対象に赤外分光サーベイを行い、系外惑星の研究史に残るミッションになると我々は考えている。いっぽう日本はNASAのJWSTに、組織的には参加していない。そのため、もしArielに参加しなければ、日本は系外惑星の赤外分光という重要な研究領域で脱落してしまうだろう。逆にArielに参加して重要な寄与をすることができれば、日本はこの研究領域で科学的成果を得ることができ、次世代の人材が育ち、日本のプレゼンスを示すこともできるだろう。また、Arielの欧州側の中核は、かつて宇宙望遠鏡による系外惑星の赤外線分光を目指した日本にとって旧知の研究者達でもある。このような背景のもと、我々はArielにぜひ参加したいと考えるに至った。

3. ハードウェア貢献

Arielの赤外線分光観測は、フランスが開発を主導する分光器Ariel Infra Red Spectrometer(AIRS)を用いて行われる。日本のハードウェア貢献は、AIRSのフッ化カルシウム(CaF_2)製光学素子に適用可能な広帯域赤外反射防止コーティングを開発し、 CaF_2 光学素子を製造した上、開発したコーティングを施してAIRSに引き渡すことである(図2)。

これらの課題は、コーティングの開発が挑戦性を含んでいることと、 CaF_2 が脆性材料であることから、当初、欧州では引き受ける国がなかった。いっぽう、我々は系外惑星赤外分光ワーキンググループとして宇宙研より頂いた戦略的開発研究費を活用して、コーティングの開発に成功した。また同予算を利用して、 CaF_2 製光

学素子本体の製造実現性も示すことができた。Ariel における CaF_2 光学素子の製造とコーティングのメーカー体制は、結果的に JUICE/GALA のバンドパスフィルターと同じになった(ただし使用する材料は異なる)。

日本が投入できるリソースには限りがある状況において、新規性を含む開発を成功させることによって、予算的には小規模ながら Airel および AIRS に寄与し、日本が Co-PI 国になる条件を満たすことができたのは幸いであった。その背景に、赤外線天文衛星のための宇宙用光学系の開発や JUICE/GALA を通じての開発の実績、および欧州との国際協力の実績があったことも幸いであった。それらの経緯があつてこそ、「日本ならやってくれるかも」という欧州からの期待や、成功するかどうか不明の案件に対して複数の企業殿に取り組んで頂いたことに繋がったと感じている。

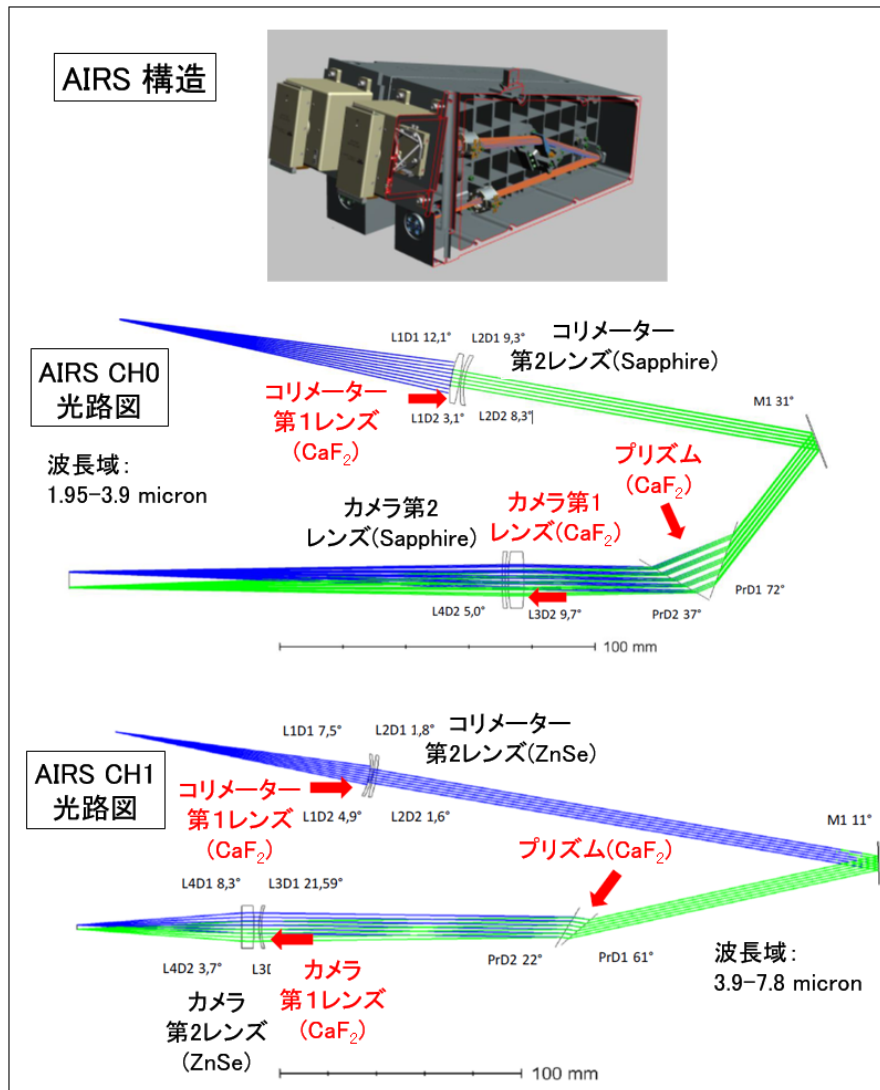


図 2. Ariel の主力科学観測機器である赤外線分光器 AIRS。赤色矢印は日本が関与する光学素子。

4. 日本の優位性

Ariel の観測データから直接得られる情報は、系外惑星大気の現在の状態である。それだけでも有用な情報であることは言うまでもないが、大気だけでなく内部の状態やプロセスを、現在の状態だけでなく形成史や進化史を読み取ることができれば、Ariel の科学成果は何倍にも大きくなる。前述のように、日本が太陽系形

成理論(いわゆる京都モデル)で1980年代から当該分野をリードしてきたことはよく知られている。しかし、それだけでなく、大気形成に関しても先駆的な理論が日本人研究者によって提唱されている。宇宙物理学的な視点で(星形成のように)原始惑星系円盤ガスの重力的獲得過程として考えられた1次大気形成論(Hayashi, 1979)と、地球物理学的な視点で(火山噴火をヒントに)内部からの脱ガス過程として考えられた2次大気形成論(Matsui & Abe, 1986)は、どちらも日本発の大気形成理論である。また、これらの大気形成モデルは、地球型惑星のコア形成等の内部分化プロセスの理解と密接に関連し、日本では大気と内部の共進化の研究が古くから続けてられてきた。そして、我々の近年の理論研究は、1980-90年代に発展した日本独自の理論研究を礎とし、それらを一般化・現代化したものといえる。

21世紀に入り、系外惑星の発見数の爆発的な増加にともない、ヨーロッパでも惑星形成・進化の研究者が増加した。しかし、急速に広がる太陽系外の世界を解釈することに注力するあまり、アドホックなモデルが乱立しており、必ずしも惑星系に対する理解が進んでいるとはいえない。一方、惑星形成・進化に関する理論研究をヘリテージとして持つ日本では、コミュニティ全体として基礎力・総合力が培われている。豊富な観測データから直接は「見えない」情報を抽出し、より深い理解へと到達できるのが日本人研究者の優位性であるといえるだろう。

5. 発展性

上述のように、多様な系外惑星が数多く発見され、観測に基づく検証性・実証性が強く求められるようになってきた頃から、いかに豊富な観測データを早く手に入れることができるかがリーダーシップの鍵となった。そして、そうしたデータを取得できない日本は系外惑星分野で遅れをとってしまった。結果的に、現時点では、日本国内において系外惑星の赤外分光観測データを享受しサイエンスを展開する研究者は少なく、本チームおよびその周辺の研究者に限定される。しかし、Ariel ミッションに参加し、データアクセス権を得て豊富な赤外分光観測データが手に入るようになることで、日本の当該コミュニティが活性化し、研究者人口も増大すると予想される。このように、Ariel ミッションへの参加は本チームのメリットに留まるものではない。

日本では2020年代、系外惑星の検出を目的としたRomanやExo-JASMINEが実行段階にあり、系外惑星の紫外線分光観測を目的としたLAPYUTAが検討段階にある。これらに赤外分光観測ミッションであるArielを加えることで、系外惑星に関する多様なサイエンスが国内でも可能になる。そして、日本発の赤外線天文衛星計画が中止となったことや、JWSTに参画できなかったことによる遅れを取り戻し、日本の系外惑星科学を現代化することができるだろう。2020年代に成果を挙げることで、2030年代の大型宇宙望遠鏡計画や超大型地上望遠鏡計画への参画およびリーダーシップを取り戻すことにつながる。

6. 参加形態について: なぜ宇宙研として参加するのか

もし筆者らがArielに参加することだけを考えるなら、研究者単位で欧州の関係者と共同研究をすれば事足りるだろう。しかし、多くの若手・院生を含む日本の研究コミュニティがまとまったメンバーシップを得て、欧州メンバーと完全に同等のデータアクセスや観測提案の権利を獲得してArielに参入するためには、個人単位の参加では不十分である。また、欧州関係者からは、研究者単位の参加に留まらず宇宙機関として正式

に参加することがはっきりと望まれている(どうも、そうしないと国際的な宇宙機関界限では、一人前の参加国と認知されないようである)。

宇宙望遠鏡による系外惑星科学の探究は Ariel 以降も世界的に続く、宇宙科学における重要課題のひとつであると考えられる。そしてそれは、国際的なコミュニティにおいて、ある程度は顔見知りの常連メンバーからなる母集団によって推進されて行くことになる。そこで日本の宇宙機関のプレゼンスを高めておくことは、次の次の国際協力ミッションを創出する際に、日本が主要な関与ができるよう意図的に地盤を作り出しておくという狙いにおいて、大いに有意義であると思う。

以上のことから、Ariel に対して(個人参加に留まらず)宇宙研として正式に参加することには、大きな意義があると考えられる。

7. 結論

以上の 1～5 節中に繰り返し記述されたように、日本は Ariel に参加しなければ、系外惑星の赤外線分光という重要課題、さらには宇宙望遠鏡による系外惑星の探究という世界の流れから大きく遅れをとってしまうだろう。いっぽう日本には、Ariel に参加すれば、この分野にて重要な寄与ができる優位性・発展性がある。また、6 節に記述したように、個人単位ではなく日本の宇宙機関が正式に参加することに大きな意義がある。以上のことから、我々は、ぜひ宇宙研として正式に Ariel に参加するべきであり、しなければならないと考え、そしてそれを実現するに至った。