

# 系外惑星「遠い世界の物語」その17 ～系外惑星大気赤外線分光サーベイ衛星Ariel～

塩谷 圭吾<sup>1</sup>

(要旨) 系外惑星大気赤外線分光サーベイ衛星Ariel<sup>1</sup>は、2029年の打ち上げを目指して欧州宇宙機関(ESA)の主導で開発が進められている宇宙望遠鏡衛星である。Arielの主目的は、約1,000個もの系外惑星を赤外線波長域で分光観測し、大気の化学組成などを明らかにすることである。Arielには日本もCo-PI国(共同主催国)として参画する。本稿では系外惑星科学の専門家ではない読者も想定し、Arielの全体概略を示し、また日本の参画について記載する。宇宙望遠鏡による系外惑星ミッションのロードマップとの関係についても記す。

## 1. はじめに

系外惑星大気赤外線分光サーベイ衛星Arielは、欧州宇宙機関(ESA)のCosmic Vision計画におけるMクラス4号機に選定され、開発が進められている宇宙望遠鏡衛星である(図1)[1-3]。Arielは約1,000個もの存在が既知の系外惑星を対象とし、赤外線波長域で分光観測を行い、大気の化学組成などを調査することを主目的としている。赤外線波長域で観測する理由は、系外惑星大気の特徴がこの波長域でのスペクトルに現れるためである(例えばH<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, HCN, H<sub>2</sub>S, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, PH<sub>3</sub>等の分子の検出・定量)。これほどの大規模サンプルで宇宙における系外惑星大気の特徴を統計的に明らかにできるのはArielのみである。

Arielが搭載する望遠鏡の開口サイズは1.1 m × 0.73 m(楕円形)、観測波長域は0.5–7.8 μmである。このような広帯域で一つの観測対象を同時に観測できることも、Arielの強みである。Arielは2029年に仏領ギアナ宇宙センターより、Comet Interceptor(彗星探査機)と相乗りでAriane 6ロ

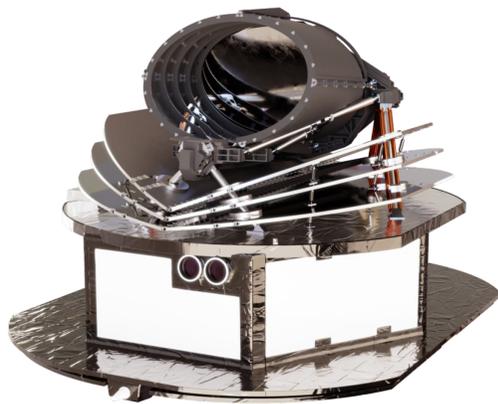


図1: Ariel外観の想像図(Image Credit: Airbus. Airbus will lead the European industrial consortium building the Ariel's spacecraft).

ケットによって打ち上げられる予定である。打ち上げの後、Arielは太陽・地球第2ラグランジュ点(L2)軌道に導入され科学観測を行う。予定されているノミナル運用期間は4年で、その後に可能であれば2年の延長運用を行うことが検討されている。日本はESA加盟国でないにも関わらず、欧州各国と同等の権利

1.宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所  
enya.keigo@jaxa.jp

<sup>1</sup>Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey

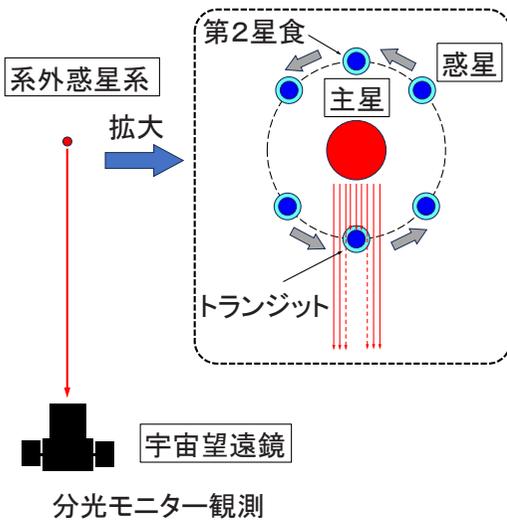


図2: 系外惑星のトランジット分光(および2次星食を利用した観測)の模式図。この方式では、系外惑星が主星の前を通過(トランジット)する際に、惑星大気を透過した主星光のスペクトルを観測して惑星大気の詳細を明らかにする。別の表現をすると、主星を光源として系外惑星大気の透過率(の波長依存性)を測定する宇宙規模の実験である。この方式の観測では主星と惑星を解像・分離して観測することは志向しない。

を持つCo-PI国として正式にArielに参画する。

本稿では系外惑星科学の専門家ではない読者も想定し、まずArielの全体概略を示す。次に日本の参画および参画に至った経緯等について記載する。また、世界の宇宙望遠鏡による系外惑星ミッションのロードマップとArielの関係についても記す。

## 2. 科学観測

### 2.1 トランジット分光

Arielで系外惑星の大気分光を行う方式は「トランジット分光」である。その原理を図2に示す。この方式では、系外惑星が主星の前を通過(トランジット)する際に、惑星大気を透過した主星光のスペクトルを観測して惑星大気の詳細を明らかにする。別の表現をすると、主星を光源として系外惑星大気の透過率(の波長依存性)を測定する宇宙規模の実験である。この方式で分光観測を行うためには、観測者から見てトランジットが起きるような軌道面を持つ系外惑星系を観測対象にする必要がある。図2に示したように、トランジットを起こす系外惑星は2次星食も起こ

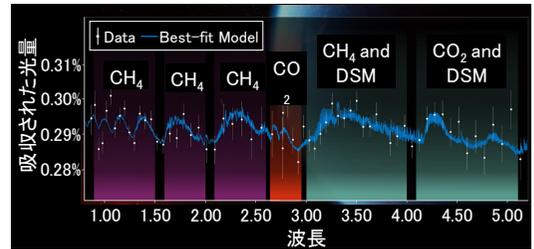


図3: トランジット分光による観測結果の例(NASAによる図を改変)[4]。観測はJWSTによるもので、観測対象は系外惑星K2-18 bである。系外惑星大気中に二酸化炭素や、有機物であるメタン、DSM(硫化ジメチル)などの分子が存在することが見てとれる。

す。Arielでは2次星食を利用した惑星光の測定も可能である。この様な方式の観測においては、主星と惑星を解像・分離して観測することは志向しない(他の方式・ミッションとの比較については6節を参照)。

ただし、一般に惑星は主星にくらべて圧倒的に小さく、惑星大気層の厚さは惑星のサイズより更に小さい(いわば薄皮1枚)。したがって、主星光に比べて系外惑星大気の情報を含んだ光量は極めて微弱となる。そのためトランジット分光(あるいは2次星食を利用した観測)では、高精度・高感度の測定を行うため、トランジット(あるいは2次星食)の最中とその前後の観測データの差分をとる。その際に、望遠鏡を含む観測システムには極限的な安定性が求められる。

トランジット分光による系外惑星大気観測結果の例を図3に示す。この結果はアメリカ航空宇宙局(NASA)のJWST<sup>2</sup>によるもので、観測対象は系外惑星K2-18 bである[4]。系外惑星大気中に有機物であるメタンや硫化ジメチル、二酸化炭素などの分子が存在することが見てとれる。

### 2.2 サーベイ戦略

Arielでは限りある観測時間で科学目標を達成し成果を最大化するため、サーベイを4つのティアに分けて遂行する(表1)[1]。まずティア1では約1,000個の系外惑星を対象とし、低分散分光でサーベイする。その結果を受けて観測対象天体の数を絞り、以降のティアでより詳細な観測を行う。

<sup>2</sup>James Webb Space Telescope

表1: Arielにおけるサーベイのティア。

ティア番号	ティア名称	観測内容	データ公開時期
Tier 1	Reconnaissance survey	約 1000 天体 低分散分光観測 SNR <sup>a</sup> ~7 スクリーニング	即時公開
Tier 2	Deep survey	より高い分散での分光観測	6 か月後
Tier 3	Benchmark planets	高い SNR での分光観測	6 か月後
Tier 4	Phase-curve & bespoke observations	光度曲線・特注観測	12 か月後

a: 信号雑音比率

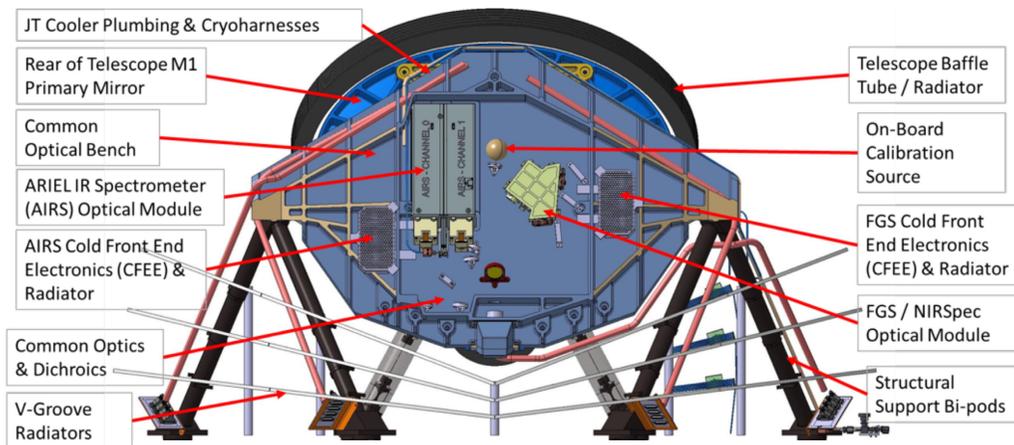
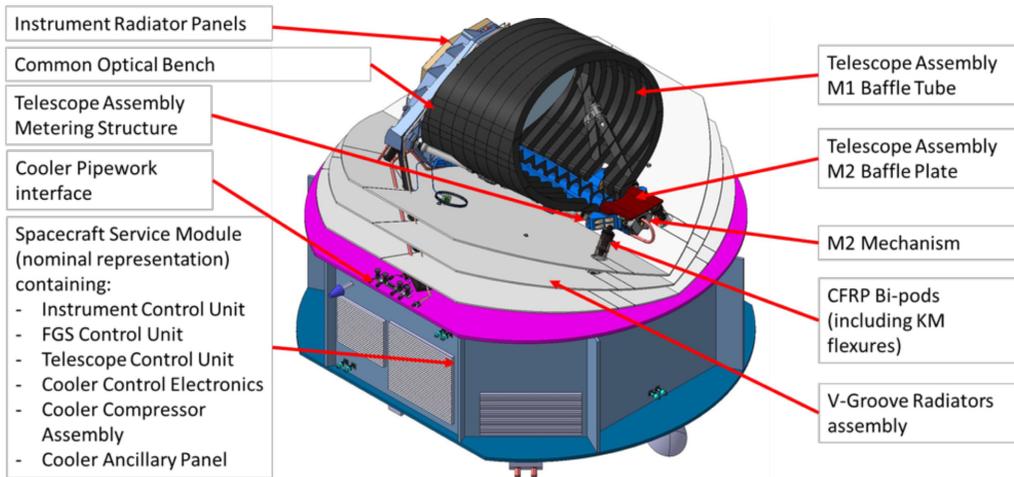


図4: ベイロードの構造の概略(Ariel Definition Study Report (Red Book)[1]).

表2: Ariel搭載観測装置の機能.

観測装置	波長域	観測モード	波長分解能
VISPhot <sup>a</sup>	0.50-0.60 $\mu\text{m}$	測光	N.A.
FGS1 <sup>b</sup>	0.60-0.80 $\mu\text{m}$	測光	N.A.
FGS2 <sup>c</sup>	0.80-1.10 $\mu\text{m}$	測光	N.A.
NIRSpec <sup>d</sup>	1.10-1.95 $\mu\text{m}$	分光	$\geq 15$
AIRS <sup>e</sup>	1.95-7.8 $\mu\text{m}$	分光	$\geq 100$ (波長 $\leq 3.9 \mu\text{m}$ ) $\geq 15$ (波長 $\geq 3.9 \mu\text{m}$ )

a: Visible Photometer. b: Fine Guidance System 1. c: Fine Guidance System 2.

d: Near-IR Spectrometer. e: Ariel IR Spectrometer.

### 2.3 その他の科学観測

Arielでは主目的である系外惑星の赤外線分光サーベイのほかに、様々な補完的な科学(Complementary Science: CS)のための観測を行う予定である。CSにはArielの観測時間の5-10%が当てられる。CSの科学的課題の候補としてこれまでに挙がっているものには、トランジット系外惑星の検出、太陽系小天体、褐色矮星などがある。日本の研究者グループも、ArielのCSを利用する太陽系小天体の観測に向けて検討を進めている。

## 3. 衛星・装置概要

### 3.1 衛星全体

そもそもArielにおいて宇宙望遠鏡衛星を必要とする理由は、地上望遠鏡では実現できない高安定性・広波長域の観測を実現するためである。Ariel衛星の構造を図4に示す[1]。Ariel衛星は大きく分けると、衛星としての機能を担うサービスモジュール(SVM)と、科学観測のためのペイロードモジュール(PLM)から成る。SVMとPVMの間には、V-Grooveと呼ばれる多重の断熱シールドが設けられている。衛星の規模を表す指標のひとつである質量は、Arielの場合、消耗材込みで約1,300 kg、消耗材を除くと約1,000 kgである。

### 3.2 望遠鏡

PLMの中核には望遠鏡がある。望遠鏡の光学系は軸外シカセグレン式、開口は1.1 m  $\times$  0.73 mの楕円形であり、鏡の材料はアルミニウム合金(6061

T651)である。望遠鏡は赤外線観測における熱雑音を抑制するため低温(55 K)にて運用される。望遠鏡の結像性能は約3  $\mu\text{m}$ 以上の波長域における回折限界(開口サイズで決まる理論上の上限値)相当である<sup>3</sup>。

### 3.3 観測装置

望遠鏡が集光した光を受ける「観測装置」を表2に示す[1]。これら複数の観測装置によって、Arielで観測する広い波長域にわたって必要な機能を実現する。Arielで行う系外惑星特化型の観測の効率を最大化するため、これらの観測装置群はひとつの観測対象を同時に観測できるよう構成されている。そのため望遠鏡が集光した光は、複数のダイクロイックミラーを用いて波長帯ごとに各観測装置に分配される。観測装置のうちVISPhot, FGS1, FGS2は測光を行うのみで分光機能は持たない。他方、NIRSpecとAIRSは分光機能を持つ。

特にAIRSはArielの主力観測装置とも言える分光器であり、1.95-7.8  $\mu\text{m}$ の波長域をカバーするためCH0とCH1の2つのチャンネルを内蔵している[5]。いずれのチャンネルにおいても、分光はフッ化カルシウム(CaF<sub>2</sub>)製のプリズムによって行う。AIRSの波長分解能は波長3.9  $\mu\text{m}$ 以下で100以上、波長3.9  $\mu\text{m}$ 以上で30以上である。AIRSの開発はフランスが主導しており、後述するように日本もこの分光器の開発に参画している。

<sup>3</sup>このことは約3  $\mu\text{m}$ 以下の波長域では回折限界を達成できないことを意味するが、Ariel望遠鏡は十分な安定性によって、主星・惑星の解像・分離を志向しないトランジット分光法にて目標を達成できるよう設計されており、問題にならない。

### 3.4 軌道および打ち上げ・運用

Arielは2029年に仏領ギアナのクールーにあるギアナ宇宙センターより、Ariane 6 ロケットによって打ち上げられる予定である。その打ち上げはComet Interceptor(彗星探査機)と相乗りとなる見込みである。打ち上げられたArielは太陽・地球L2軌道に導入され、機器類の様々なチェックを遂行した後、科学観測を行う。予定されているノミナル運用期間は4年で、その後可能であれば2年の延長運用を行うことが検討されている。一般に、太陽・地球L2軌道に導入された衛星は、太陽と地球を常に同じ方向に見込むことになるため、地上望遠鏡や低軌道上の衛星に比べて非常に高い熱的安定性を得ることができる。そのため、この軌道は極限的な安定性が求められるAirelにとって至適である。

## 4. 国際協力における日本の役割

### 4.1 国際プロジェクトとしてのAriel

ArielはESAが主導し、欧州のESA加盟国のほか日本、アメリカ合衆国、カナダが参画する国際プロジェクトである(図5)。Arielを構成する重要な組織のうち、国際的な参画に関係が深いものは以下の2つである。

#### 1 Ariel Mission Consortium (AMC)

AMCはペイロードの機器開発を行う(図5)。AMCではまた、メンバーによるサイエンス活動も行う(検討や提案、様々なワーキンググループについて参加や設立・主導等)。日本はこのAMCのCo-PI国となっている(Co-PI: 生駒大洋(国立天文台))。Co-PI国となるためには、(個別研究者単位ではなく)研究機関による協定等のもと、ハードウェア開発に貢献することが必須である。Co-PI国となることで、当該国のAMCメンバーは欧州各国と完全に同等の、公開前データへのアクセス権やAMCでサイエンス活動に参加する権利等を得る。AMCでは年に2回の全体ミーティングが開催されており、その参加者の数は通常200名程度である。

#### 2 Ariel Science Team (AST)

ASTはArielの科学的な運営に関するハイレベ

ルな決定を行う。ASTは宇宙機関による協定やレター等に基づいてノミネートされた、限られたメンバーから成る。2025年1月現在、そのためのレター締結に向けた各種の折衝が、宇宙科学研究所(宇宙研)・ESA間で進行中である。レター締結は現時点では完了してはいないものの特に懸念は無く、日本から生駒大洋(国立天文台)がASTの恒久的参加者となる見通しである。

### 4.2 宇宙研の役割

Arielへの参画のため、宇宙研にAriel所内事業チーム<sup>4</sup>が正式に設置されている。Arielへの参画を宇宙機関内に正式に位置付けることで、宇宙政策レベルの文書にもArielが明記されることになり、またその様にして初めて、AMCやASTへの参画に必要な協定の締結等が可能となる。宇宙研はこれらの事務的な活動を、ESAに対応する宇宙機関として担う。宇宙研Ariel所内事業チームはまた、国内の研究者と連携してAriel-Japanチームを構成し活動する。

### 4.3 Ariel-Japanの活動内容

Ariel-Japanを構成するのは、宇宙研・国立天文台および大学等の国内研究機関に所属する、主に若手から中堅の実効性のある研究者17名である(2025年1月現在)。宇宙研Ariel所内事業にて明記された、Airel-Japanの活動内容の3本柱は以下である。

#### 1 サイエンス活動

前述のように日本は既にAMCにてCo-PI国と認められており、AMCにて様々な科学検討や観測計画の議論等に参加している。AMC内では、日本人研究者が提案・主導するサイエンスワーキンググループであるLow-gravity planets(生駒大洋がリード)やClouds/Haze(川島由依・大野和正がリード)も誕生している。

#### 2 ハードウェア開発

ハードウェア開発に寄与することは、Co-PI国と

<sup>4</sup>宇宙研の正式な事務的用語。比較的予算規模が小さく、JAXAの階層でなく宇宙研で管轄する場合に該当する。内務だけを行うという意味ではなく、活動内容は他の「プロジェクト」と同様である。

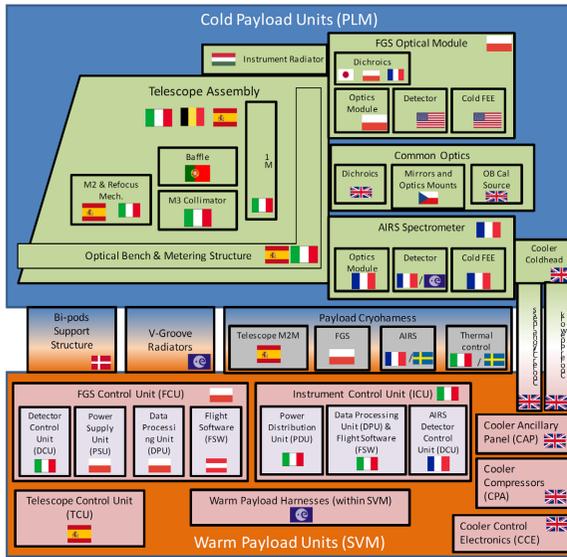


図5: ペイロード開発における国際分担(Ariel Definition Study Report (Red Book)[1]).

して参画するための必須条件であった。日本のハードウェア開発貢献を簡略化して述べると、Arielの主力科学観測機器であるAIRSに搭載するため、 $\text{CaF}_2$ 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、 $\text{CaF}_2$ 光学素子を製造した上、開発したコーティングを施すことであると言える。2025年1月現在、フライトモデルの $\text{CaF}_2$ 製光学素子の制作が進行中である。

### 3 地上観測

成田憲保が主導するトランジット観測用多色同時撮像装置MuSCATシリーズ等の観測装置を用いて、Arielの観測候補となる新たなトランジット惑星の発見や、既存の観測候補惑星のトランジット予報時刻や質量推定の精度向上など、Arielを支援する観測を多数遂行している<sup>5</sup> [6, 7].

## 5. 日本の参画の経緯・そこに至った背景

Arielへの日本の参画に関する、これまでの公式

な位置づけの経緯を5.1節に示す。また、それより以前の、そもそもArielにぜひ参画したいと考えるに至った背景を5.2節および5.3節に記載する。

### 5.1 経緯

Arielへの日本の参加に関する、これまでの公式な位置づけの経緯を以下に示す。

- 2019年11月: Co-PI国としての日本の参加の打診
- 2020年3月: AMC から宇宙研所長宛にサポートレターを受領
- 2021年2月: 宇宙物理学委員会ワーキンググループ「系外惑星赤外分光」設置(代表:生駒大洋)
- 2022年3月: AMCにて日本をCo-PI国として暫定承認
- 2023年8月: 宇宙研にてAriel所内事業チームの設立を承認(ワーキンググループは発展的に終了)
- 2023年10月: AMCにて日本を正式にCo-PI国として承認
- 2024~2025年: ASTへの参加に向けた国際協定の作成が進行中

### 5.2 背景: サイエンスに関して

本節は宇宙研オンラインに記した文章『なぜ、宇宙研はArielに参加せねばならないのか』(生駒大洋, 塩谷圭吾)の引用である[2].

日本は、惑星および惑星大気の形成/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

<sup>5</sup>このほかの地上観測によるArielへの新規参加も歓迎である。

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やっと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MuSCAT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、当該分野でリーダーシップを取り戻す絶好のチャンスである。

### 5.3 背景: 開発・プロジェクト推進に関して

本節は宇宙研オンラインに記した文章『なぜ、宇宙研はArielに参加せねばならないのか』(生駒大洋, 塩谷圭吾)の引用である[2]。

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1,000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。

## 6. 系外惑星科学ミッションの中でのArielの特徴・位置づけ

### 6.1 JWSTとの比較

2021年に打ち上げられたJWSTは、Arielより大きな受光面積(口径6.5 m)を持ち、すでに系外惑星のトランジット分光を行い成果を出している(図3)[4]。後発のArielのJWSTに対する優位性は、第一に、系外惑星のトランジット分光に占有できることである(JWSTは多目的望遠鏡であるため、系外惑星のトランジット分光に使える観測時間は限られる)。その結果、ArielはJWSTでは不可能な約1,000個もの多様な系外惑星の観測を行い、宇宙における惑星の全体像の理解に寄与する。また、広帯域(0.5-7.8  $\mu\text{m}$ )を同時に観測できることもArielの特長である。一般に、帯域が限られた観測においては、観測帯域以外では望遠鏡が集めた貴重な光を捨てていることに相当する。そのため広帯域を同時観測でカバーできれば、それだけ高効率となる。さらに、系外惑星のトランジットはタイミングが限られた現象であり、系外惑星の大気の状態は時間変動し得る。このような対象の科学観測において、広帯域の同時観測能力は特に有効である。

### 6.2 系外惑星科学ミッションのロードマップにおけるAriel

#### (1) 世界の系外惑星科学ミッション

M. MayorとD. Quelozは1995年に地上望遠鏡を使った視線速度法による系外惑星(巨大ガス惑星)の発見を報告した[8]。これを皮切りに、しばらく同様の手法が系外惑星の発見をリードする状況が続いた。

その後、系外惑星科学に特化された宇宙望遠鏡衛星が打ち上げられるようになる。表3は、系外惑星観測に特化された、あるいは系外惑星観測に特化された観測装置等を搭載する、ある程度以上の規模の主要な宇宙望遠鏡をまとめたものである。これらのミッションは、それぞれ機能・性能や果たす役割が異

なっている。表3からも読み取れるように、これらのミッションの科学目標の流れは、系外惑星の検出から特徴把握へ、また物理的特徴(直径・質量・軌道周期等)の把握から化学的特徴(大気組成分子等)、さらには生物学的特徴のへ進む方向性にある。また、同様の観測手法のミッションの中では、大よそ先駆的な小規模ものから発展的な大規模のものへ、あるいは完全性を補うものへ進む流れにある。

世界の宇宙機関が完全に申し合わせている訳ではないにも関わらず、このような流れに収まる理由はいくつかある。まず、その時々科学的知見(世界共通)のもので、次のステップとして必要・有効かつ実現性のあるミッションは何かを識別するからである。また、後発で他所と顕著にバッティングする計画は基本的に回避される。さらに、昨今とくに大規模化するミッションでは、国際協力を前提として推進される場合が多くなっている。結果として、(局所的には競合しつつも)大局的にはひとつのロードマップとして整合性のある形に落ち着く。

#### (2) Arielの位置づけ

Arielは、それ以前の系外惑星検出ミッションの成果を受け、赤外トランジット分光により大気の特徴把握を行う。集光力のJWSTと観測天体数のArielにより、赤外トランジット分光はひと区切りを迎える。その先には、トランジットを利用する観測では困難な、太陽型星を主星とする地球型系外惑星、いわゆる「第2の地球」の直接観測が大目標となる。そのためには、極限的な性能で主星と惑星を解像・分離して観測するコロナグラフおよびそれに見合う極限的な精度・安定度を持つ宇宙望遠鏡システムの開発が鍵となる。

#### (3) 日本の参画

さらに表3から読み取れる特徴として、PLATO<sup>6</sup>までの全てのミッションにおいて日本の参画が無い一方、Nancy Grace Roman 宇宙望遠鏡以降は全てのミッションに参画していることが挙げられる(参画準備中を含む)。特に日本のミッションであるJASMINE<sup>7</sup>では、位置天文学的観測の空き時

<sup>6</sup>PLANetary Transits and Oscillations of stars

表3: 系外惑星観測に特化された(あるいは特化された観測装置等を搭載する)主要な宇宙望遠鏡.

ミッション (宇宙機関等)	打ち上げ年 <sup>a</sup>	科学目標・主な系外惑星の観測方式等	望遠鏡 口径	観測波長域	日本の参画 <sup>b</sup>
COROT (CNES, ESA)	2006	トランジット系外惑星の検出等 <sup>c</sup> (広視野 撮像測光)	0.27 m	0.4-0.7	なし
Kepler (NASA)	2009	トランジット系外惑星の検出等 <sup>c</sup> (広視野 撮像測光)	0.95 m	0.43-0.89	なし
TESS (NASA)	2018	トランジット系外惑星の検出等 <sup>c</sup> (広視野 撮像測光)	0.105 m × 4個	0.6-1.0	なし
CHEOPS (ESA, SSO)	2019	既知系外惑星のサイズ決定等(トランジ ット測光)	0.32 m	0.4-1.1	なし
JWST (NASA)	2021	既知系外惑星のトランジット大気分光, 簡易的コロナグラフ(波面補償なし)によ る直接観測等	6.5 m	0.6-28.5	なし
PLATO (ESA)	(2026)	トランジット系外惑星の検出等 <sup>c</sup> (広視野 撮像測光)	0.12 m × 26個	0.5-1.0	なし
Nancy Grace Roman 宇宙望遠 鏡 (NASA)	(2027)	試験的 direct 観測(波面補償+コロナグラ フ), 重力マイクロレンズ法による検出	2.4 m	0.6-2.3	有り
Ariel (ESA)	(2029)	既知系外惑星の大気組成等(トランジッ ト分光)	1.1 m × 0.73 m <sup>d</sup>	0.5-7.8	有り
JASMINE (JAXA)	(2031)	トランジット系外惑星検出等 <sup>c</sup> (個別撮像 測光)	0.36 m	1.0-1.6	有り
LAPYUTA (JAXA)	(2033)	既知系外惑星の高層大気(UV トランジッ ト分光)	0.6 m	0.11-0.19	有り
WSO-UV (ROSCOSMOS)	(不定性大)	既知系外惑星の高層大気(UV トランジッ ト分光)	1.7 m	0.115-0.32	有り
HWO (NASA)	(2040年代)	地球型惑星の直接観測(コロナグラフに よる撮像・分光, 生命痕跡の探索等), 既知系外惑星の高層大気(UV トランジッ ト分光)	6 m 級	0.1-2.5	有り (準備中)

a: 括弧付は打ち上げ予定. b: 「なし」は国として, 宇宙機関としては参画なし, の意. 個人単位の参加やユーザーとしての利用等は有り得る. c: 検出だけでなく物理特性(直径・質量・軌道周期等)の情報も得られる. d: 楕円形の長径と短径.

間を流用した系外惑星観測が河原創らによって提案され, 推進されている(exo-JASMINE)[9]. また, 亀田真吾らによる, ロシアのWSO-UV<sup>8</sup>搭載に向けて紫外線分光器UVSPEX<sup>9</sup>を開発し, 系外惑星の上層大気の観測を目指す計画がある[10]. さらに, そのコンセプトを日本のミッションであるLAPYUTA<sup>10</sup>やHWO<sup>11</sup>にも適用することが検討されている[11].

#### (4) 宇宙科学ミッションにおける系外惑星の重要性

現代の宇宙科学において系外惑星が重要視されていることは, 本節に記載した情報だけからからでも読み取れる. 表3に挙げたPLATOとArielは, それぞれESAのCosmic Vision 計画のMクラス

3号機, 4号機である. 天文学分野だけでなく太陽系探査や基礎物理学のミッションも対象となる中から, 系外惑星科学に特化したミッションが2期連続で選ばれている. 他方, NASAではNancy Grace Roman宇宙望遠鏡とHWOも, JWSTに続く宇宙物理学分野の旗艦ミッションとして, 他の候補を押さえて選ばれている. また, M. MayorとD. Quelozは, 本節冒頭に述べた発見によって2019年にノーベ

<sup>7</sup>Japan Astrometry Satellite Mission for INfrared Exploration

<sup>8</sup>World Space Observatory - Ultraviolet

<sup>9</sup>Ultraviolet Spectrograph for Exoplanet

<sup>10</sup>Life-environmentology, Astronomy, and Planetary Ultraviolet Telescope Assembly

<sup>11</sup>Habitable Worlds Observatory

ル物理学賞を受賞した。これらの事実は系外惑星科学が現在の宇宙科学で重要視されており、今後ますます重要になっていくことを示唆していると考えられる。

## 7. おわりに

本稿の終わりに所感を述べる。

欧州でAriel計画が採択され、日本も参画する現状に至るまでには、日欧の双方に、かつて提案・推進した系外惑星の赤外大気分光に関するプロジェクトが不採択となった経緯があった(5節参照)。宇宙科学ミッションの提案・推進には多大な時間と労力がかかる。そのためミッション提案の採否は当事者にとって極めて重大であるが、それすら一つのピースとして長期的に粘り強く再挑戦することが、本来、一つのミッションの実現に必要なものかもしれない。

さらに系外惑星科学に深く関わる複数のミッションを俯瞰すると、Arielの前にはKepler, TESS, JWST等が打ち上げられ、PLATO, Nancy Grace Roman宇宙望遠鏡, JASMINE, LAPYUTA等の開発(あるいは検討)が進行中であり、その先にはHWOが計画されている(6.2節参照)。これらのミッションは、それぞれ機能・性能や果たす役割が異なる。系外惑星科学に向けた宇宙機ミッションのロードマップにおいては、一つのミッションもまた一つのピースである。

SPICA<sup>12</sup>を失い、JWSTに参加していない日本にとって、Arielに参画できたことは幸いであった。開発貢献を果たしてAMCにCo-PI国として正式に参画することで、日本はデータアクセス権や科学提案等の活動をする権利において、欧州各国と同等となった。さらにASTの恒久的参加者となることは、いわばArielのハンドルを握る国の一つになることである。系外惑星科学という重要課題に向けた宇宙機ミッションにおいて、日本がますます重要な役割を担い、画期的な成果を生み出すことを心から願う。

## 謝辞

このような形で解説記事を出版することを(著者自身には躊躇もあったのですが)、快く薦めていただいた生駒大洋氏に深く感謝いたします。本稿の執筆についてご招待いただいた、遊星人の成田憲保氏および関係各位に感謝いたします。Arielへの日本の参画に関して、ここに至るまでに関与された全ての方々に感謝いたします：フランスのAIRS分光器チームとはハードウェア開発で、ESA関係各位とは協定やレター等について協業しています。Ariel-Japanチームには17名の研究者が所属し活動されています。宇宙研では日常的にPO室、科学推進部、調達部、秘書さん他にお世話になっており、また要所で審査会、研究系主幹、および執行部の方々にお世話になってきました。日本担当のハードウェア開発では夏目光学株式会社、Materion(米国)、フジトク株式会社にお力添え頂いています。最後に、日本のArielへの参画等に関して、Arielの提案以前より日本と交流のあったGiovanna Tinetti氏に深く感謝いたします。

本稿中の人名に対する敬称は省略させて頂きました(ただし引用部分と本節は除く)。

## 参考文献

- [1] Tinetti, G. et al., 2020, (閲覧日: 2025年1月24日), ESA, <https://sci.esa.int/web/ariel/-/ariel-definition-study-report-red-book>
- [2] 生駒大洋, 塩谷圭吾, 2023, (閲覧日: 2025年1月24日), [https://www.isas.jaxa.jp/missions/documents/files/doc\\_22.pdf](https://www.isas.jaxa.jp/missions/documents/files/doc_22.pdf)
- [3] 塩谷圭吾, 2023, ISASニュース, No.512, 5.
- [4] NASA press release, 2023, (閲覧日: 2025年1月24日), <https://www.nasa.gov/universe/webb-discovers-methane-carbon-dioxide-in-atmosphere-of-k2-18-b/>
- [5] Martignac, J. et al., 2024, Proc. SPIE 13092, 130921D.
- [6] Narita, N. et al., 2015, JATIS 1(4), 045001.
- [7] Narita, N. et al., 2019, JATIS 5(1), 015001.
- [8] Mayor, M. and Queloz, D., 1995, Nature 378,

<sup>12</sup>Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics

355.

- [9] Kawata, D. et al., 2024, PASJ 76, 386.
- [10] Kameda, S. et al., 2020, Proc. SPIE 11444, 114440L.
- [11] Tsuchiya, F. et al., 2024, Proc. SPIE 13093, 130930I.