

JASMINE：赤外線位置・測光天文観測衛星

郷田直輝

〈国立天文台 JASMINE プロジェクト 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: naoteru.gouda@nao.ac.jp



JASMINEは天文観測衛星計画であり、星の距離と運動を測定することにより、天の川銀河形成の鍵を握る中心核構造を明らかにすること、および将来の生命探査に有望な恒星に対して時間軸天文観測により、生命居住可能領域に存在し、かつ大気観測が可能な地球型惑星の有無を明らかにすることを科学目標とする。光学望遠鏡（主鏡口径36 cm級）と現在開発中の国産宇宙用赤外線カメラを用いて、中心核領域方向に対して近赤外線帯で位置天文観測を行う。さらに、JASMINEの測光能力を活かし、トランジット惑星が検出されている複数の中期M型星に対し時系列測光観測を行い、地球型惑星の有無を明確にする。JASMINEの概要、科学的意義、観測ミッションの概要、経緯と今後などに関して説明する。

1. JASMINE計画の科学目的と目標

JASMINE（ジャスミン：Japan Astrometry/photometry Satellite Mission for INfrared Exploration）は、我々の住む天の川銀河（以下、銀河系）の形成と進化を探究するとともに、生命居住可能領域に存在する地球に似た系外惑星の探究を目的として、近赤外線（1.0-1.6 μm ）で観測を行う天文観測衛星計画である。これらの探究によって、「人類はなぜ宇宙にいるのか」「我々は宇宙で孤独なのか」という我々の存在自体を問う、人類が抱く最も根源的な疑問の解明に貢献する。なお、JASMINEはJAXA宇宙科学研究所（以下、宇宙研）の公募型小型計画3号機に選定されている。以上のような科学目的をブレークダウンした科学目標として主に次の2つを掲げている。

科学目標1：星の距離と運動を測定（位置天文観測）することにより、天の川銀河形成の鍵を握る中心核構造（銀河系中心核領域にある力学的構造）を明らかにする（図1）。

科学目標2：時間軸天文観測（トランジット

法）により、将来の生命探査に有望な恒星に対して、生命居住可能領域に存在し、大気観測を行うことのできる地球型惑星の有無を明らかにする（図2）。

科学目標1の達成を目指し、JASMINEは歪み

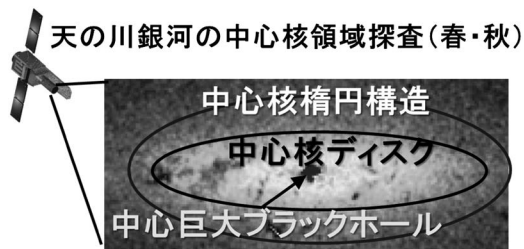


図1 JASMINEが赤外線位置天文観測する天の川銀河（銀河系）の中心核領域の模式図。中心核領域は星がひときわ密集している、銀河系中心の周囲の領域である。この領域には、銀河系中心からの半径が200 pc程度と考えられる中心核ディスクがあり、さらにその周辺にも広がっていると想定される力学的に異なった構造（ここでは、“中心核楕円構造”と呼ぶ）が存在することも示唆されている。図中の中心核領域の星の分布図はNishiyama et al. [1]からの抜粋。

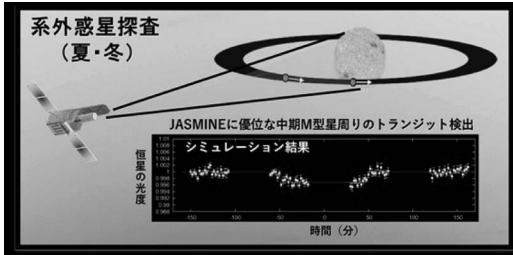


図2 JASMINEによる系外惑星探査の模式図。赤外線位置天文観測での高い測光能力を活かし、太陽より小さく低温の恒星(中期M型星)周りの生命居住可能領域にある地球型惑星の探査をトランジット観測によって行う。図中のシミュレーション結果は、平野照幸氏(自然科学研究機構アストロバイオロジーセンター)によるもの。

や変形の時間変動を抑えた高安定な光学望遠鏡(主鏡口径36 cm程度)と現在開発中の国産宇宙用赤外線カメラを搭載する。銀河系中心核領域の方向の約2.5平方度に対して、観測運用期間の3年間のうち観測に適している春期と秋期に近赤外線帯で星を撮像する。観測された天球面上での星の位置とその時間変動の測定データを地上で解析することで、12万個程度の星の年周視差、固有運動等を高精度で導出し、データカタログを作成する。なお、12万個のうち、実際に中心核領域に属すると見込まれる星は7万個程度、手前の円盤構造に属すると見込まれる星は5万個程度である。測定精度は星の明るさや色などに依存しているが、年周視差精度は25-125 μ 秒角、固有運動精度は25-125 μ 秒角/年を目標としている。広い科学的活用の推進や成果の透明性を念頭に、このデータカタログを世界の研究者へ同時公開する。最終カタログの公開までに、段階的に中間データの公開も予定している。

中心核領域を観測できない夏期と冬期は、科学目標2を達成するために、恒星の前面を通過(トランジット)する惑星が検出されている20個程度の中期M型星に対し測光観測を行う。JASMINEの高い測光能力を活かし、0.3%より高い測光精度

で必要な観測期間にわたって時系列測光観測を行い、地上でデータ解析を行う。この系外惑星探査に関するデータも公開する。

2. 科学的意義1：位置天文観測による銀河系中心核領域探査

本章では科学目標1に関する科学的意義を記述するが、まず2.1節で位置天文観測に関する背景、2.2節で歴史などについて述べ、2.3節でJASMINEの科学的意義を記述する。

2.1 位置天文学

一般に恒星は、天球面上では地球の公転に伴う見かけの年周楕円運動(楕円運動の長半径が年周視差に対応)と固有運動に伴う直線運動との組み合わせでらせん運動を描く。位置天文観測とは、天球面上での星の位置とその時刻変動を測定し、らせん運動を求めることにより年周視差や固有運動などの位置天文情報を導出するものである[2]。年周視差から星までの距離が、固有運動と距離から(星の視線方向に垂直な方向の)接線速度がわかる。

星の距離と速度は、天文学、宇宙物理学の様々な研究にとって重要な基本情報である。例えば、星の3次元的空间分布と(視線速度情報を加味した)3次元速度分布を合わせた位相空間分布の情報により、銀河系内のいくつかの構造要素(バルジ、ディスクやハローなど)の力学構造が解明できる。さらに、現在の力学構造は、過去の力学的情報を反映している可能性もあり、その構造の起源や進化モデルに対しても制限を加えることが可能となる。これは銀河系内の恒星系は、無衝突自己重力多体系とみなされ、系の緩和時間が十分に長く、外系からの力学的擾乱がなければ初期状態の情報をほとんど保存しているからである[3]。さらには、星の位相空間分布は、ダークマターを含むすべての物質の重力によって決まるため、逆に位相分布関数の観測情報から背後にある重力場を推定すると、重力場を生じるダークマターの分布

や軌道など“見えないもの”の情報も推定できる。

また、単独の恒星と異なり、連星系や惑星をもつ恒星、重力レンズ効果を受けた星の天球面上での軌跡は、らせん運動からずれる。このらせん運動からのずれを解析することにより、連星系や系外惑星系であれば軌道要素等が評価でき、連星系で暗くて観測できない伴星の正体や系外惑星の正体が分かる。また重力レンズ天体効果からもレンズ天体の正体といった“見えないもの”の物理的特徴を導出できる。

このように、位置天文観測は、天球面上の星の動きに含まれる天文学、宇宙物理学にとって重要な様々な情報を提供することができ、その情報を手にいれることが宇宙の様々な謎の解明にもつながる。しかし、星は銀河系内といえども非常に遠方にあるため、年周視差も固有運動も値は非常に小さい。例えば、太陽に一番近い恒星でも年周視差は0.7秒角程度であり、銀河系中心の距離となると年周視差は125 μ 秒角程度と極めて小さい。そこで、非常に小さい年周視差や固有運動等を測定するため、観測装置や観測手法、データ解析に施すべき工夫を探究し、実際に観測を行うのが位置天文学とよばれる研究分野であるといえる(第4.2節参照)。

2.2 スペース位置天文観測へ

位置天文学は天文学の分野の中で最も古い分野の1つであり、その歴史は古代エジプトや古代ギリシアにまでさかのぼる。固有運動は、ハリー彗星で有名なハリーにより、1718年に初めて測定された。年周視差は高い精度が必要ゆえになかなか測定がなされなかったが、ベッセル関数で有名なベッセルにより、1838年に白鳥座61番星の年周視差が初めて検出された。この世界初の年周視差検出は、星が有限の距離にあることを示す確定的証拠であるとともに、地球が公転運動していること、つまり、地動説の直接的証拠になったという大きな科学的意義もあった。

その後、地上での位置天文観測は、ある地点で

の時刻決定や船・飛行機の位置決定等のための星表作成の目的もあり、世界各地で活発に行われた。日本でも子午儀、子午環(図3)による観測が国際協力を含め精力的に行われ、世界に伍する実績を築いてきた[4, 5]。しかし、可視赤外線による地上での位置天文観測は精度の限界を迎えていた。つまり、地上では大気の流れ現象により、星像の中心位置決定に大きな測定誤差がはいってしまう。また、地球重力の影響による装置の変動なども誤差要因となり、20世紀後半でもおよそ30ミリ秒角程度の精度留まりであった。そこで、ESA(ヨーロッパ宇宙機関)は、これらの誤差要因の影響を受けない宇宙軌道上からの位置天文観測を行った。これが、世界で初めての位置天文観測衛星となったヒッパルコス衛星である(1989-1993年の観測運用)。地上での観測精度より1桁以上も精度が向上し、天文学の“革命”とまで言う研究者もいた。まさにヒッパルコス衛星は、スペース位置天文観測時代の幕開けであった。その後、米国、ドイツでいくつかのスペース位置天文観測計画があったが、残念ながらキャンセルとなった。一方、ESAは、ヒッパルコス衛星の後継として大型可視光位置天文観測衛星Gaiaの打ち上げ(2013年12月)を成功させ、星の観測個数と精度が桁違いに向上し、着実に科学運用を継続している。当初2019年までの運用予定であったが、多くの画期的な成果が出されてきているの



図3 国立天文台(三鷹)に1982年に建設された自動光電子午環@国立天文台。

で、さらなる運用延長が認められている。最終カタログが公開されるのは2028年以降ではあるが、それまでに中間リリースが既に段階的に行われ、多くの画期的な科学的成果が創出されており [6]、それらは本特集の他の記事なども参照いただきたい。

このようにスペース位置天文観測は、まさに大革命時代を迎えてきた。しかし、Gaiaのような可視光観測では、厚い塵に遮蔽されている銀河系の中心核領域や銀河円盤内部は、高い精度で観測できる星の個数がかかなり少ない。そこで、JASMINEでは塵による遮蔽の影響を受けにくい近赤外線を用いて観測を行う。実際、Gaiaの観測データをみるとJASMINEの観測領域である中心核領域ではJASMINEが目指す最高精度で測定できる星はほとんどなく、JASMINEの優位性の高さが分かる。赤外線による位置天文観測の重要性・必要性は世界的にも認識され、JASMINEは国際天文学連合・位置天文組織委員会 (IAU Commission A1) から公式に推薦を受けている。さらには、ヨーロッパを中心とした国際協力で、Gaiaの後継機として近赤外線による全天位置天文観測を行うGaiaNIR計画が、2045年頃以降の打上げを目指して検討中である。日本からの貢献も求められているが、JASMINEが世界初の赤外線位置天文専用の観測衛星として成功、成果をあげることで、GaiaNIR計画の推進へとつながることを切に望んでいる。

2.3 銀河系中心核領域探査

JASMINEが観測する銀河系中心核領域は、銀河系のバルジ構造や棒状構造と銀河系中心との物理的関係をつなぐ重要な領域であり、領域内の力学的構造 (中心核構造) としては、様々な年齢をもつ星が、年代に応じて異なった空間構造と系統的な運動分布をもって今も存在していると考えられる。ゆえにJASMINEでは近赤外線を用いることで、世界で初めて中心核領域の星の高精度な距離と運動を測定し、そうして得られた観測情報を

基に中心核構造の起源と進化の解明 (「銀河系中心考古学」) を目指す。

科学目標1をより詳細化した具体的な科学目標として、次の3つを掲げている。(1) 銀河系中心核ディスクの形成時期の解明、(2) 中心巨大ブラックホールの成長や中心領域での活動に関わる可能性がある内部バー (内部の小スケールの棒状構造) の存在の有無、(3) 銀河系誕生時の面影を残しているかもしれない中心核領域の中心核楕円構造とその起源の解明、である。中心核構造の解明は銀河系の大スケールの棒状構造の形成進化の解明にも必須である。例えば、太陽系が誕生した場所や銀河系内で移動してきた軌跡の解明にとって棒状構造の形成時期は重要な物理情報のひとつであるが、それは、JASMINEで解明が期待される中心核ディスクの形成時期によって明らかになる [7]。

上記の主目標以外に、銀河系中心核領域に存在する諸天体の探求とその物理的特徴の解明に関して、次のような多岐にわたる科学的成果も期待できる：(1) 隠れた星団の同定：銀河系中心核領域の星や星団の起源の解明、(2) 位置天文学的手法による系外惑星探査、(3) 位置天文学的重力レンズ効果によるブラックホールの検出：重力波観測で見つかった、太陽質量の30倍程度のブラックホールや中間質量ブラックホールの解明、(4) X線連星系の探究、(5) ダストや磁場構造の3次元的分布、(6) 恒星物理学、などである。

以上のように、銀河系中心核領域の研究は多様な観点から重要であり、世界的にもユニークな赤外線での高精度位置天文観測による銀河系中心考古学の探究には大きな科学的意義がある。

3. 科学的意義2：トランジット観測による系外惑星探査

本章では科学目標2である系外惑星探査についてその背景や科学的意義を述べることにする。太陽系外惑星における生命探査は、我々は宇宙で孤

独なのか、という問いに答えるための科学的探査である。生命探査の基本戦略は、第一ステップとして、海洋が存在することのできる生命居住領域の理論的推定に基づき、推定域内やその付近にある惑星を発見することである。発見後、第二ステップとして大型望遠鏡などで惑星の表面の環境や大気を分光観測で詳細に観測し、生命の痕跡となる分子等の検出を試みることを行う。なお、銀河系には1,000億個を超える恒星が存在するのに対し、現在見つかっている太陽系外惑星の数は高々数千個程度であり、地球型惑星、さらに生命居住可能領域に存在する惑星となってもっと少ない。そのため、現在は、第一ステップの対象となる惑星をひとつでも多く発見することが、生命探査にとって重要なフェーズである。また生命居住領域から外れた惑星の発見も惑星系の平均的な姿を明らかにし、太陽系の普遍性の是非を明らかにするという重要な意義がある。

ここで、惑星探査の際に留意すべきことは、発見した惑星が詳細な分光観測ができる惑星であるかどうかという点である。もし、惑星が恒星の前面を通過するという「トランジット惑星」であれば、分光観測が可能となる。なぜならばトランジット惑星であれば、惑星が恒星面を通過するときに惑星の大気により恒星光が吸収されるため、これを大型望遠鏡などで分光すれば大気の情報が見られるからである。つまり、「トランジット惑星」を探査し発見することが大変重要となる。

また、銀河系には様々な大きさ・温度の恒星が存在するが、これらの性質によって最適なトランジット観測による探査手段が異なる。例えば、太陽のような大きさの恒星の周りの海洋を持つ惑星は、地球と太陽との位置関係にあり公転周期は1年程度であるため、一天体あたり1年程度の時間スケールで観測を行わないといけない。一方、太陽より小さい恒星は太陽より低温のため、生命居住可能領域は恒星にもっと近い領域となり、その領域での惑星の公転周期は1年より短い。そのた

め、比較的短い時間スケールでの探査が最適な戦略となる。また、太陽のような大きさの恒星は主に可視光で光っているが、太陽より小さい低温の恒星は主に近赤外光で光っているため、可視光より近赤外線での観測が適している。

JASMINEでは前述したように、太陽より小さい低温の「中期M型星」とよばれる恒星の周りのトランジット惑星を生命存在可能領域まで探査することを科学目標としている。中期M型星は太陽の20%程度の半径、温度は3千度程度の恒星である。現在TESS衛星が、中期M型星の周りで生命居住可能領域よりかなり恒星に近い、熱い領域にある惑星を多数発見しつつある。このような恒星近くの生命居住可能領域より内側にある惑星は、1ヵ月未満の短周期で何度もトランジットをするためシグナルは強くなる。一方で、生命居住可能領域にある惑星は、1ヵ月程度の観測では何度もトランジットしないためシグナルが弱くなる。しかし、JASMINEはTESS衛星より20倍の集光能力を有する。これはJASMINEが、可視光観測のTESSとは違って低温で赤い星の観測に有利な近赤外観測であること、さらにJASMINEの主鏡口径は36 cm程度で、口径が10.5 cmのTESSより大きいという利点があるためである。そのためJASMINEは、TESS衛星が見逃したシグナルを捉えることができる。つまり高い集光能力を活かしつつ、一恒星あたり数週間から一ヵ月程度の連続観測をすることで、生命居住可能領域に地球型惑星があった場合の検出が、JASMINEで可能となる。

なお、「トランジット惑星」は、惑星が前面を通過するごとに惑星が恒星面を隠す面積比だけ恒星の明るさの減光を起こす。太陽型星周りの生命居住可能領域にある地球型惑星だと減光率は0.01%程度となるが、中期M型星は太陽の2割程度の半径であるため、0.2-0.3%程度の減光となる。JASMINEはトランジット観測の専用衛星ではないが、この程度の減光ならば精度的に十分に捉え

られる。また地上での観測と異なり、天候に左右されず継続的に観測できる点や地球大気によるノイズがない点も優れている。さらにJASMINEの集光力で探査できる距離は、15-25 pc（パーセク）程度の範囲であるが、この範囲の中期M型星はNASAのJWSTにとって最適な明るさとなっていて、詳細な分光観測のベストターゲットとなりうる点もJASMINEの意義として特筆に値する。

以上のように、中期M型星を生命居住領域にある惑星の公転周期まで連続で安定して探査できるミッションはJASMINEの他にはない。JASMINEによる中期M型星の良質な探査は、他に類をみない地球型惑星サーベイとなる科学的意義をもつ。また、中期M型星のトランジット観測以外にも、測光の時系列データを活かして、(1)褐色矮星の光度変動観測、(2)星団等の若い恒星の測光観測とトランジット惑星探査などの科学的成果も期待されている。

4. 観測ミッションの概要

4.1 衛星システムと観測概要

JASMINEの衛星システムは、大きく分けてミッション部とよばれる観測を担う観測装置の部分と衛星バス部に分かれる(図4)。バス部は、衛星通信、電力、姿勢制御、推進、熱制御とい

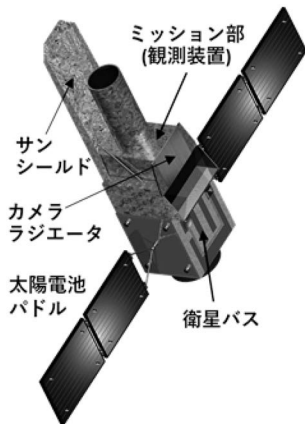


図4 JASMINEの衛星システムの概略図。詳しくは本文を参照@国立天文台。

た機能をもつ衛星の基本的な機能を担う部分である。また、サンシールドによって太陽光と熱の観測装置への混入を防いでいる。JASMINEの観測装置は、主鏡口径36 cm程度、焦点距離4.4 m程度の3枚非球面鏡によるコルシユ系光学系(図5)で、視野面積は、0.52度×0.52度である。赤外線検出器としては、国立天文台が中心となって地上での天文観測用に開発した高性能な検出器(In-GaAs) [8]を宇宙用化し搭載することを考え、開発を進めている。衛星の総重量は600 kg程度、高度550 km以上の太陽同期軌道にイプシロンSロケットを用いて打上げられる予定である。運用期間の3年間のうち、春・秋は銀河系中心核領域の方向(中心核方向)の位置天文観測を行い、中心核方向の観測に適さない夏・冬はトランジット観測による系外惑星探査を行う(図6)。

銀河系中心核領域に関しては、次のような観測領域を候補としている。

- (i) 銀経(L)の範囲が $-1.4^\circ < L < 0.7^\circ$ 、かつ銀緯(b)の範囲が、 $-0.6^\circ < b < 0.6^\circ$ の長方形領域(図7)、または、
- (ii) 銀経の範囲が $-0.7^\circ < L < 1.4^\circ$ 、かつ銀緯の範囲が、 $-0.6^\circ < b < 0.6^\circ$ の長方形領域。

視野サイズ以上の観測領域をサーベイするためには、視野サイズの画像をパノラマ写真の要領で貼り合わせを行う。つまり、一視野を撮像後、視

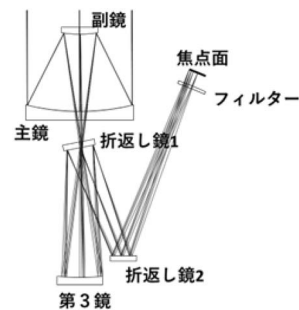


図5 JASMINEの光学系の模式図。3枚の非球面鏡と2枚の折返し平面鏡から成るコルシユ系光学系である。

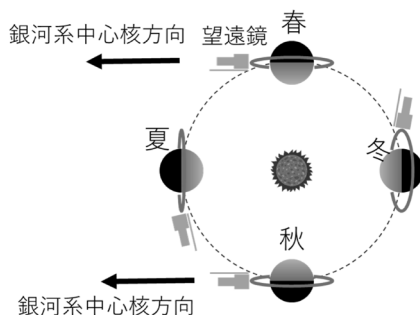


図6 JASMINE衛星の軌道。高度550 km以上の太陽同期軌道を周回しながら（1周回は100分間程度）、春・秋は銀河系中心核方向の観測，夏・冬は中期M型星に対してトランジット観測を行う。

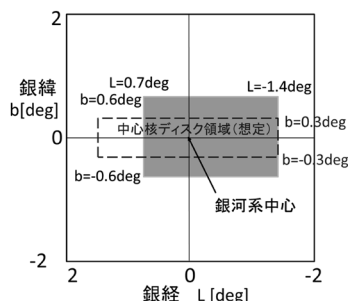


図7 JASMINEの銀河系中心核領域に関する位置天文観測領域（候補 (i)）。ただし、銀経0度の線に対して候補 (i)とは対称な領域（候補 (i)を左右反転した領域）を選択する可能性がある（候補 (ii)）。なお、図中での破線の長方形は、中心核ディスクの想定範囲を表す。

野が半分程度重なるように観測方向をずらして、次の視野を撮像する。2つの画像の半分程度の視野に写る共通の星を使って、重ね合わせがうまくいくように、画像の歪みを補正し、観測領域を広げていく方式である（フレーム連結方式）[9, 10].

4.2 鍵となる技術要素

最高精度が25 μ 秒角という目標精度を達成するためには、データ解析手法の工夫と時間的に安定な観測装置の開発が鍵となる[9, 10]. 25 μ 秒角は100 km離れた地点（東京からだど富士山頂程度）に立っている人の髪の毛1本の太さの約1/5以下

を見込む角度に相当する。位置天文での年周視差と固有運動の測定は、空間分解能があまりよくない比較的小さな口径の鏡でも、天球面上での星像中心位置とその動きが精度よく評価できればいいため、データ解析の工夫次第で精度を達成できる。同じ星を焦点面の異なった場所で何度も繰り返し観測するという多数回撮像プロセスが、精度向上の本質となる。なぜならば、同じ画像を多数回撮像することにより、誤差のランダム成分（統計誤差）は減少していく。次に系統誤差成分は、JASMINEが要求する精度レベルでは測定や制御は技術的に厳しい場合が多く、ほとんどの場合、誤差の“推定”を行うことで対処しなければいけない。誤差の推定を適切に行い、推定値からの誤差の残差を無相関（ランダム）になるようにできれば、あとは多数回撮像により誤差の残差はランダムであるため目標精度まで減少させていくことができる。

誤差を推定する方法は、観測対象である天球面上の星々の位置を“ものさし”として使う（観測データによる自己校正）。つまり星の相対位置関係は、ごく短時間では動かない。正確にいうと目標精度より十分に小さな動きしかない。また、長時間スケールでは、星が単独星と見なせる場合は、きれいならせん運動をすることが分かっている。この制限を用いて、多数回撮像における星像中心の変動成分のうちの系統誤差成分を統計解析手法によって判断しながら推定を行う。ここで画像歪みの補正を行うための補正として、また年周視差・固有運動と座標の絶対値の決定のために、GaiaとJASMINEの両方で観測できている星で、Gaiaによって高精度な位置天文測定されている星の情報を用いる。しかしながら、誤差の推定を行うために使う星の観測データの情報は有限であるため、推定する誤差の関数が複雑な場合は推定できない。そこで推定すべき誤差の関数形がなるべく単純になるように、観測装置の熱変動安定性への要求がなされる。特に、安定な望遠鏡構造

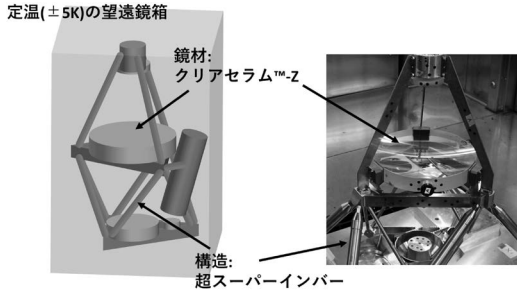


図8 JASMINEの望遠鏡。左図は模式図、右図は熱構造の技術実証モデル@国立天文台。

や観測装置部分の温度を安定にするための熱制御が鍵となる。また、地球や太陽等からの迷光や望遠鏡の指向擾乱の抑制も、系統誤差やランダム誤差を減らすために重要である。

例えば、望遠鏡構造の熱変動に対する安定性を達成するために望遠鏡の素材、温度安定などを工夫する。チーム内の案では、鏡は低膨張率のクリアセラムを用いるとともに、同程度の低膨張率($0 \pm 5 \times 10^{-8}/K$)を達成した超スーパーインバーを支柱に用いる(我々が企業と開発した; 図8)。これにより、望遠鏡構造全体をほぼ同程度の低膨張率素材で望遠鏡を構成することができ、低熱膨張かつアサーマルな構造が期待できる。望遠鏡の温度安定に関しては、望遠鏡ボックス部にヒーターとセンサーを取り付け、望遠鏡温度を遠火で安定化する方式をとる案を考えた。望遠鏡を6枚の望遠鏡パネルで形成した直方体の望遠鏡ボックス内に設置する。そして、望遠鏡パネルをヒーターで制御して温度コントロールし、運用温度の安定性を維持する。ちなみに、JASMINEの観測波長では望遠鏡自身が赤外線検出器への擾乱源にならないこと、またなるべく試験等で取り扱いやすい温度であること等の条件により、運用温度は摂氏5度とする。なお、熱制御として、サンシールド板を設置し、太陽光と地球アルベドの直射を防止する。一方、検出器は暗電流を低減するため、検出器の温度を173 K以下にすることが要求される。そのため、ペルチェ素子を用いて冷却す

る。ペルチェ素子高温部はヒートパイプを介して外面の検出器ラジエータに熱接続し、常温の望遠鏡構造とは極力熱絶縁する工夫を行う。

さらに星像をぼやかすランダム誤差の原因のひとつとなる望遠鏡の指向擾乱に対しては、撮像の10秒間程度に300ミリ秒角程度以下の指向安定度を要求している。そのために、衛星姿勢を制御するリアクションホイールなどの装置からの振動の固有振動をはずすような構造設計を行うなどの工夫を行っている。また迷光防止対策としては、望遠鏡先端に迷光防止用フードを付けるとともに内面での迷光の反射を極力抑えるために反射率が低い素材を用いることとしている。

以上の衛星システム仕様はチーム内の案であり、現在は複数の衛星メーカー候補と共同で仕様の概念検討を進めているところである。

5. 経緯と今後

第2章で記述したようにヒッパルコス衛星でスペース位置天文観測の時代を迎え、日本では、1997年度に行われた国立天文台第三者評価委員会から、「ヒッパルコスの成果もあり、今後は銀河スケールでの位置天文を進めるのが肝要で、そのためにスペース位置天文観測計画の実現の可能性を真剣に検討すべきである」との検討推進勧告を国立天文台が受けた。この勧告を受けて、国立天文台ではスペースからの位置天文観測を推進する教授を公募し、筆者が1999年に着任することになった。着任後、国内でのスペース位置天文観測計画の検討を開始しJASMINE計画に至ることとなった。検討開始当初は、まだ景気もよく、怖い物知らずで、JASMINEも主鏡口径が2 mといった大型の衛星の検討から始まった。その大型のJASMINE計画の技術検証を兼ねて、2003年に東大工学部の中須賀真一先生の研究室と検討・開発がスタートしたのが、超小型衛星によるNano-JASMINE(ナノ・ジャスミン)計画である[10]。超小型ながらヒッパルコス衛星の精度と

同等の精度を目指し、Gaiaが測定できない明るい星による科学成果を目標とした。2010年には衛星の打上げ実機が完成しながらも国際情勢の影響を受けるなど打上げ機会に恵まれず、残念ながら打上げが実現できなかった。

一方、Nano-JASMINEの検討と併行して、JASMINEチームは、前述したような大きなJASMINE衛星の検討も行った。しかし、「なるべく早期の実現を目指すならば知恵を絞り、比較的小型な衛星でおもしろいサイエンスができることを考える必要がある」とのアドバイスを諸方面から頂いた。また、宇宙研でイプシロンロケットによって打上げられる小型科学衛星シリーズのプログラムが立ち上がり、小型衛星での実現という道が拓けてきた。検討が進むにつれ、科学的に興味ある重要なターゲットに絞れば、小型衛星で高精度測定が実現可能であることがわかってきた。むしろ、小型衛星の方が構造安定などの技術的な面でメリットがある場合もある。

このようにして、JASMINEは公募型小型計画として検討が進められるようになり、国内外の研究者コミュニティ（国際天文学連合・位置天文学組織委員会（IAU Commission A1）や国内の光学赤外線天文連絡会等）からのご支援を受け、宇宙研での国際審査を含むいくつかの審査を通過し、2019年に公募型小型計画3号機に選定された。2022年度はミッション定義段階であり、宇宙研でのプリプロジェクト候補という位置づけで概念検討フェーズにある。2023年度以降に宇宙研でのミッション定義審査を受け、その後も段階的にいくつかの審査を受けつつ衛星開発を進めていく。2022年12月に内閣府が改定した宇宙基本計画工程表では、2028年が打上げ目標となっている。そして位置天文の最終カタログは、約3年間の科学運用とその後もさらに2年間程度必要なデータ解析を経て、世界の研究者コミュニティに公開予定である。また中間段階のデータカタログをなるべく迅速に随時公開していくことも予定している。

6. 開発体制と国際協力

実施する中心機関は、宇宙研と国立天文台である。さらに国内外の大学等の教育・研究機関からの研究者の協力によりチーム体制が取られている。特に河田大介氏（UCL）を代表とした研究者有志からなるJASMINEコンソーシアムも立ち上がり、科学的成果の拡大検討・データ解析手法の確立と解析システムの開発・データのサイエンス実証・アウトリーチ活動などのワーキンググループを構成してもらっている。データ解析システムの開発に関しては、若い方達を中心に十数名のグループで精力的な活動が行われており、ハイデルベルグ大学等との国際協力も進んでいる。特に、ハイデルベルグ大学では既存のスタッフに加え、JASMINEのデータ解析システム開発専任の2名を現地ドイツで雇用して開発を行っている。さらに、ESAや米国による地上通信局支援（科学データの受信）の検討が開始している。

7. おわりに

JASMINEは、検討開始当時は位置天文観測も衛星プロジェクトも知らない数名程度でスタートしたが、徐々にメンバーが増え、関心をもって支援をしてくださる方達も増えてきた。また途中からは、系外惑星分野から多くの皆さんに参加いただけるようになった。当初は気づいていなかったが、中期M型星周りの生命居住可能領域にある地球型惑星の探査でもJASMINEが力を発揮できることがわかり、主な科学目標に加わった。JASMINEの科学的意義がさらに高まるとともに、系外惑星分野の方達にサイエンス検討のみならずデータ解析システムの開発にも加わっていただくことができ、検討が大いに進んできた。海外ではNano-JASMINE計画がご縁で、Gaiaのデータ解析チームとの密接な関係ができ [10]、JASMINE計画に関しても大いにサポートをいただいている。このようにJASMINEは多くの皆様に支えられ進みだし、実

現・成功を目指している。今後もさらに多くの皆様に参加・協力して下さることを切に望んでいる。特に前述したJASMINEコンソーシアムへの参加をお願いしたい。またJASMINEは今後、データ解析システムの開発や実際のデータ解析、さらに宇宙用の観測装置の本格的開発を行う。この現場に特に若手研究者が参加して下さることにより経験を積み、実績をあげていかれると、将来の天文観測プロジェクトへ技術などが継承され、日本の天文観測分野にとっても大変有益と考えている。JASMINEへのご参加・協力を請うて筆を置くこととするが、JASMINEチームの皆様をはじめ、サポートをして下さっている多くの皆様にご場を借りて深く感謝する。最後に、本原稿に関して有益な助言をいただいた鹿野良平氏・矢野太平氏（国立天文台）と系外惑星関連の情報を提供いただいた河原 創氏（宇宙研）に感謝する次第である。

参考文献

- [1] Nishiyama, S., et al., 2013, *ApJ*, 769, L28
- [2] 郷田直輝, 2017, シリーズ現代の天文学1 人類の住む宇宙, 岡村定矩 ほか 編 (日本評論社), 2.4節
- [3] 郷田直輝, 2011, *プラズマ・核融合学会誌*, 87, 441
- [4] 宮本昌典, 2008, 日本の天文学の百年, 日本天文学会百年史編纂委員会 編 (恒星社厚生閣), II部9章
- [5] 別冊日経サイエンス245 (天文遺産), 2021, 日経サイエンス社
- [6] <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/peer-reviewed-journals> (2023.1.26)
- [7] Baba, J., & Kawata, D., 2020, *MNRAS*, 492, 4500
- [8] <https://kaken.nii.ac.jp/ja/file/KAKENHI-PROJECT-17H01117/17H01117seika.pdf> (2023.1.26)
- [9] 郷田直輝, 2017, *計測と制御*, 56, 421
- [10] 郷田直輝, 2018, *天文月報*, 111, 452

JASMINE: Japan Astrometry/photometry Satellite Mission for Infrared Exploration

Naoteru GOUDA

JASMINE Project Office, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Ohsawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: JASMINE is an astronomical satellite mission whose scientific object is to clarify the nuclear structure that holds the key to the formation of the Milky Way Galaxy by measuring the distance and motion of stars. Another scientific goal is to verify the presence or absence of terrestrial planets that exist in the habitable zone by performing transit method. JASMINE's scientific goals and objectives, scientific significance, overview of observation missions, history and future, etc. will be explained.