

2030年代の光赤外スペース将来計画に向けた検討報告

光学赤外線天文連絡会(以下、光赤天連)のサブワーキンググループとして、2020年代後半に予定される30m口径地上望遠鏡TMTの観測開始、2.5m口径赤外線衛星SPICAの打ち上げに続く、日本の光学赤外線天文学分野の基幹ミッションをどのように設定し、具体化を進めていくかの検討を行った。そのために、基幹ミッションとして想定しうる機能について出来るだけ広く可能性をリストアップし、それらを取捨選択し具体化するために必要となる道筋について検討を行った。

科学的に新しい地平を切り開くために必要となる具体的なミッションの可能性として、1-5 μm の波長域で初代の銀河の探査を行う衛星、近赤外線でのアストロメトリ衛星、高空間分解能の観測を実現する光赤外干渉計衛星、極低温冷却技術と惑星探査技術を生かした中間赤外線の惑星間望遠鏡、近赤外線で広視野分光探査を行う衛星が将来の基幹ミッションの候補として上げられる(それぞれの概要は Appendix A. 参照)。今後はこれらのアイデアについて、科学的な目標を明確に設定し、実現可能性について、光赤天連としてさらに検討を進める機会を設ける必要がある。衛星望遠鏡の大型化が進み、光学赤外線分野で国際的に基幹となるミッションを日本だけで行うことは現実的ではなくなりつつあり、日本発の提案であっても、SPICAのようにその提案を起点として国際大型ミッションとして発展させる必要もあると考える。

国際大型ミッションへの参加も一つの現実的な柱となりうる。現在NASAを中心に2020年decadal surveyに向けて4つの次世代大型ミッションの検討が進められており、そのうちの3つLUVOIR、HabEx、OSTが光赤外分野のミッションである(それぞれの概要は Appendix B. 参照)。すばる望遠鏡やTMTで見つかる暗い天体の追求観測との親和性が高く地球型系外惑星の観測能力も高いLUVOIR、地球型系外惑星探査において飛躍的な進展をもたらすHabEx、Herschelの感度を1000倍改善しSPICAで得られた知見を宇宙史全体に拡張することが出来るOST、とそれぞれが2020年代に進む光赤外分野の大型計画で得られる知見をさらに深化させるものである。現在進められているこれらの検討への日本からの参加を通じて、光赤天連としても進むべき方向性について科学的な議論を進めるべきである。また科学的検討への参加だけではなく、望遠鏡や観測装置など個別の要素技術についても中期的な基礎開発を通じて貢献できる項目がないかを探索する必要がある。

上の基幹ミッションを実現する上で鍵となる基盤技術を確立するために、公募型小型衛星計画、ロケット実験、宇宙ステーションを利用した実験を通じて、スペースからの観測の技術と経験を蓄積することは引き続き重要である。特に、上記の計画を 2030 年代後半に実現するために、どのような実証が必要となるか、という観点から具体的な計画を検討しなくてはならない。長期のタイムスケールでは新しいミッション提案の検討はありうるが、5-10 年のタイムスケールでは具体的にミッション提案がすでに行われるなど検討が進む EXZIT、HiZ-GUNDAM、small-JASMINE について、将来の大型計画の実現に向けた要素開発という観点から光赤天連として精査を行い、各検討グループに閉じない、より大きな枠組みで推進することを検討するべきである。また衛星開発と成果の回収の経験の蓄積の観点から nano-JASMINE についても早期の打ち上げを期待するとともに、地上中小口径望遠鏡でのフォローアップ観測を含む光赤外コミュニティの連携で科学的成果の最大化を図ることを期待する。また衛星の技術開発、科学的研究の観点からも他分野との連携を図ることは必須であり、他分野で展開されている検討状況についても Appendix C. に掲載する。

上記の状況を踏まえ、光赤天連として進める項目として以下を提案する。

1. 2030 から 2040 年代の光赤外線天文学の展開のためのスペース将来計画について、具体的な議論を進める母体となる WG を継続するべきである。その WG において日本のコミュニティからの科学的要請に基づく独自の提案について検討を進め、具体的かつ現実的なロードマップの作成を進める必要がある。またその開始点として光赤天連シンポといった場で幅広くさまざまな可能性について議論する機会を早急に設定するべきである。
2. 国際的に検討が進められている基幹ミッションへの部分参加について、光赤外線天文学コミュニティとしてどのような方向を取るのかの検討を進めるべきである。上記 WG を中心として、具体的に現在の公募型小型から戦略的中型に及ぶ規模のプロジェクトを想定した時に、どのような参加の形態がありうるのかを検討するべきである。またその基盤となる科学的な研究をどのように戦略的に展開するかについても検討を進めるべきである。
3. 今後の基幹ミッションを想定した上で、基盤となる要素技術について、どのように地上での開発を進め、さらにさまざまな機会を活用して宇宙での実証を進めていくかについて、ロードマップを作成するべきである。具体的には、
 - (ア) EXZIT など太陽系内航行に力点を置いて進められる宇宙工学（ソーラーセイル、イオンエンジン）の衛星の機会などを捉え、光赤外線望遠鏡の打ち上げ、および検出器の技術実証を進める機会を確保し、科学的観測を進めることを検討すること。
 - (イ) 大型望遠鏡の低コスト化に向けた新素材による軽量鏡の開発などの要素技術について、既にミッション提案が進む HiZ-GUNDAM や small-JASMINE の中に組み

込んで技術実証を進める可能性について検討すること。

(ウ) 光赤外干渉計の実現可能性と技術開発の要点について検討を進め、重力波衛星計画との連携のもとに、編隊飛行に要求される仕様を洗い出し、その技術確立に向けたロードマップを描くこと。

(エ) 国の枠組みで進められる月面開発計画や国際宇宙ステーションのプラットフォームなどの機会を捉えた科学的計画についても検討を進めること。

4. 理学分野のミッション提案を実現するために、技術的な発展としての新規ミッション提案だけではなく、科学的要求に基づいた夢のあるミッション提案を具体化するための枠組みを設定してもらいたい。具体的にはリサーチグループをコアとして大規模なワークショップを開催する機会を設けられるようにリサーチグループの活動資金を拡大する、ミッションの具体化のために必要な技術的なサポートを JAXA から得られるようにする、ということであり、科学的要求に基づく仕様に対して、衛星の専門的な見地から実現可能性検討を進められる枠組みを設定することが必要であるとする。

(宇宙研 20 年委員会への答申事項)

以上。

光赤天連 20 年後までのスペースミッションを考えるワーキンググループ

秋山 正幸 (座長)、岩田 生、左近 樹、津村 耕司、松尾 太郎、松田 有一

● Appendix A: 日本の光赤外コミュニティを主導として可能性を検討する計画

1. 近赤外線広視野冷却望遠鏡

WISH で行われた技術的検討を活かしつつ、WFIRST および LUVIOR ではカバーされない $2\mu\text{m}$ より長波長帯の広視野高感度観測を実現し、初代銀河の探査および未知の天体の発見を目指す。

2. スペースアストロメトリ

近赤外線高精度アストロメトリの実現に向けて、nano-JASMINE や small-JASMINE の検討で蓄積された日本の独自技術を活かし、日本主導の中型 JASMINE 計画を実現する。また、欧州主導の GAIA NIR ミッションとの連携・参加も視野に国際協力を進める。

3. 惑星間望遠鏡

口径 1m クラスの望遠鏡を 3AU 以遠あるいは黄道面から脱出する場所で実現することで、黄道光の光子ノイズを大幅に減少させ、中間赤外線の波長帯で 10m 級望遠鏡と同程度の感度で広視野を実現する。深宇宙技術開発を進める工学ミッションとの連携を行う。

4. 超長基線干渉計

VLBI の長基線と ALMA の撮像の両者の良いところを兼ね備えた高解像度撮像干渉計を実現し、AGN や原始惑星系円盤などのコンパクトな天体に対して分光撮像を行う。flying formation に要求する位置精度を cm オーダーまで緩和させることで実現可能性を大幅に向上させる。

5. 遠赤外線光子計数型干渉計

強度干渉計を基本として、光子がバンチングしていることを利用し、光を直接干渉させずに各望遠鏡で強度と位相を取得することによって、超長基線干渉計を可能にする。バンチングを精度よく計測する技術的な制約があり、遠赤外線の帯域で実現する。

6. 中分散近赤外分光望遠鏡

WFIRST の近赤外線広視野サーベイで発見が予想される未知の天体を近赤外線の高感度かつ中分散分光でフォローアップし、天体の詳細を明らかにする。すばる望遠鏡の PFS と同様に、多天体分光モードで観測の高効率化を図る。

- Appendix B : NASA の将来大型計画への参画として検討する計画

米国の 2020 年 Decadal Survey にむけて NASA が検討を進めている 4 つの大型ミッション (LUVOIR、HabEx、OST、LYNX) には、3 つの光赤外線ミッションコンセプト (LUVOIR、HabEx、OST) が含まれる。各ミッションに対して科学技術定義チーム (Science and Technology Definition Team : 以下 STDT) 活動が始まり、2016 年 4 月より JAXA が窓口となり日本側から各ミッションに 1 名ずつのオブザーバーが任命され、2019 年に最終レポートを提出するまでの検討活動を任務として、STDT 活動に参加している。Large UV Optical Infrared Surveyor (LUVOIR) は 2030 年代中旬の打ち上げを目指し超大型汎用宇宙望遠鏡 (Architecture A; 主鏡直径 15.1m, Architecture B; 主鏡直径 9.2m) で、Hubble 宇宙望遠鏡のヘリテージを継ぎ、紫外から近赤外の波長域をカバーするミッションとして検討されている。Origins Space Telescope (OST) は、2030 年代中旬の打ち上げを目指し、Herchel の感度を 1000 倍凌駕し、新宇宙探査で confusion を克服し原始惑星系円盤を分解する角度分解能と分光能力を有する遠赤外線宇宙望遠鏡のミッション (Concept 1; 主鏡直径 9.3m, Concept 2; JWST と同程度の集光面積) として検討が進められている。Habitable Exoplanet Imaging Mission (HabEx) は地球型系外惑星を直接撮像し大気組成を調べることを主目的とし、コロナグラフと Starshade を搭載したミッションとして検討が進められている。尚、OST については、SOFIA 等の開発ヘリテージを持つ NASA Ames とともに、特に SPICA のプリプロジェクトフェーズでの開発ヘリテージを活かしつつ、8 研究機関 2 企業より合計 20 名の国内検討チームメンバーを構成し、主要装置のうちの一つである Mid-Infrared Imager, Spectrometer, Coronagraph (MISC) の検討を JAXA がリードしている。LUVOIR および HabEx については、サイエンス検討を中心に国内研究者が積極的に STDT 活動に参加している。

- Appendix C : 光赤外分野の計画と協調しうる他分野の計画

1. 深宇宙探査技術実証

人類の活動領域を拡大し、英知を高める宇宙科学に寄与することを目的とした、宇宙技術実証プログラムが日本学術会議の策定するマスタープラン 2014、2017 の重点大型研究として採択されている。本プログラムにおいて重点的に開発が進められる 4 つの技術項目は、1. 重力天体への接近、2. 重力天体での長期滞在、3. 外惑星領域往復、4. 地下試料採取である。これらの技術項目を実証すべく、2020 年代中盤の JAXA の戦略的中型ミッションとしての実現を目指している。このミッションでは、約 10 年かけて木星のトロヤ群小惑星に到着し、着陸機により小惑星の試料を採取し、地球にサンプルを持ち帰ることが検討され

ている。さらに、口径 10cm 望遠鏡の赤外線望遠鏡の搭載が検討されており、惑星クルージングを利用した科学観測は、惑星間望遠鏡の先駆けになることが期待される。このような工学の技術実証プログラムと連携した科学ミッションは新たな実現のパスであり、今後、惑星間望遠鏡に限らず、様々な科学ミッションにおいて検討していくことが重要である。

2. 重力波スペース干渉計(B-Decigo, Decigo 計画)

2016年に地上干渉計 Advanced LIGO による重力波の初検出が報告され、重力波天文学が幕を開けた。さらに、最近の LISA pathfinder の成功により、2034年に打ち上げが予定されているスペース重力波干渉計 LISA 計画の実現に大きく近づいた。日本では、LISA 計画の 0.1-100mHz と地上干渉計の 10-数 kHz の間の周波数に感度を有する、B-Decigo と Decigo 計画が検討されている。B-Decigo 計画は、2020年代中盤の JAXA の戦略的中型ミッションとして実現を目指して検討されており、Decigo 計画の pathfinder にあたる。B-Decigo 計画は、コンパクト連星の合体の数ヶ月前から数分前に発生する重力波に感度を有するため、合体直前の連星系に対して光赤外望遠鏡をはじめとする電磁波観測が可能になる。

B-Decigo 計画は、光赤外天文学との科学的な結びつきだけでなく、技術的な連携も期待される。本計画は、3機の衛星を打ち上げて、基線長 100km に対してその相対位置を数 nm レベルで制御する。したがって、B-Decigo 計画で開発されたフライトフォーメーションの技術は、将来の光赤外宇宙干渉計に対して有効であると考えられる。

3. アストロバイオロジー分野（地球周回軌道、太陽系内、系外）

アストロバイオロジーは、近年の太陽系内および系外の探査の進展に伴い、急速に発展している分野である。太陽系内では、氷衛星のエンセラダスやエウロパからの水柱の検出によって内部海が存在が明らかにされた。特に、カッシーニ衛星によるエンセラダスのその場観測で熱水活動が示唆され、初期地球の生命誕生の環境に類似していることが分かってきた。2020年代後半から 30年代前半にかけて、欧州および日本では JUICE、米国主導の Europa Clipper 計画によるエウロパの精力的な探査が行われる予定である。これらの計画は、科学的には太陽系外の地球型惑星や衛星の探査と協調的に発展することが予想され、また技術的には深宇宙探査計画の一部として、惑星間望遠鏡の実現を加速させるだろう。

太陽系内の惑星探査に加えて、日本が主導するたんぼぼ実験では、ISS で高度 400km 上空に浮遊する有機物や微生物を破壊せずに捕獲する装置を搭載し、有機物や微生物の双方向の伝搬（パンスヘルミア説）の検証を行っている。このような宇宙曝露実験は、微粒子の採取だけに留まらず、星間ダストや系外惑星への応用が期待される。

アストロバイオロジーの研究遂行には、天文観測によって得られる系外惑星環境の探査と、生命誕生に至るプロセスの実験的理解を深化させるアプローチの融合が、鍵となる。近年の実宇宙環境への実験天文学の進出と惑星／衛星探査ミッションの進展は、この融合

を加速化させ、系外惑星観測やアストロバイオロジーを主要な研究テーマとする将来メガミッションを駆動するサイエンスコミュニティへの人材輩出に直接的な寄与を生み出す。

4. 電波天文学分野

電波天文学の2030年代の将来計画は、その候補が挙げられている段階にある。LiteBirdを除いて、基本は地上の望遠鏡計画である。これらの望遠鏡計画は、既存の望遠鏡の機能を拡張する方向と新しく建設する方向に大別される。前者の候補として、ALMA 2030、New Generation VLA、VLBIが挙げられ、後者ではSKAや新規の大型単一鏡がある。ALMA 2030やNew Generation VLAは、既存のALMAやVLAを高感度化・広帯域化・高空間分解能化・広視野化にアップグレードすることが検討されている。また、VLBIでは、mm-submm波帯における地球規模での望遠鏡の結合による高空間分解能化、cm波帯で高感度化およびイメージング性能の改善を目指す。

他方、SKAは、最大基線60-150kmを有し、低周波数帯域(50-350MHz)干渉計を南アフリカ、中周波数帯域(350MHz-14GHz)干渉計をオーストラリアに新たに建設することが決定している。現在、その前駆体として、ASKAPやMeerKATの観測が進められている。新規の大型単一望遠鏡は、ALMAでカバーされない高周波数領域での観測を目指す。そのため、水蒸気による大気の吸収が低い南極での建設が検討されている。

このように、電波の様々な周波数帯において、すばる望遠鏡やTMTなどの光赤外線望遠鏡と同程度の空間分解能を実現することで、光赤外線天文学と結びつきの強い波長帯として今後も協動的に発展することが期待される。

5. 高エネルギー分野

X線天文学分野ではひとみ衛星のリカバリーミッションとしてXARM計画が2021年の打ち上げを目指して開発が進められている。高いエネルギー分解能を誇るX線カロリメータによる分光観測により、高温プラズマ内部の速度構造の解明やX線輝線比による精密診断など高エネルギー現象に対して新たな観測手段をもたらすことが期待されている。2030年代に向けてはESAのL2として2028年の打ち上げが予定されているATHENA衛星の計画への参加が進められている。ATHENA衛星は多素子カロリメータと高空間分解能を組み合わせることで、X線での面分光観測を実現し、XARMが開拓する高分散分光観測に空間情報を加える。さらに広視野検出器を搭載し、大集光面積を生かして、宇宙初期に存在する超大質量ブラックホールの検出も目指している。これらの観測は光赤外での銀河団銀河や活動銀河中心核の観測とも親和性が高く、SPICAの赤外線観測との連携だけでなく、その先の将来計画でも科学的連携が重要となる。