

LiteBIRD — 熱いビッグバン以前の宇宙を探索する宇宙マイクロ波背景放射偏光観測衛星

① 計画の概要

本計画の主目的は、インフレーション宇宙理論を検証することである。LIGO 実験により重力波が観測された（2016 年 2 月）。今後、新たな「観測手段」として、重力波を活用することは日本の基礎科学にとって極めて戦略性、緊急性が高い。LiteBIRD 計画は、特に LIGO や KAGRA では検出できない超長波長の原始重力波の発見を目指す。インフレーションの検証は現代宇宙論の最重要課題である。原始重力波は、宇宙マイクロ波背景放射（CMB）の偏光度分布に、渦状のパターンを刻印する。その検出は、量子重力理論の試験をも可能とする。LiteBIRD を世界に先駆けて打ち上げるため、JAXA 宇宙科学研、東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構（Kavli IPMU）、高エネルギー加速器研究機構（KEK）素粒子原子核研究所を中心に実行体制を構築中である。2024-5 年度の打ち上げを目指して 2016 年 8 月より概念設計（宇宙科学研フェーズ A スタディ）を開始した。

② 目的と実施内容

宇宙はどのように始まったのだろうか？どのような法則が宇宙を創り、進化させたのだろうか？これらの問いは人類に課せられた最大の知的挑戦である。研究の最先端は、いまや「熱いビッグバン以前」を科学の目で捉えようとしている。ビッグバン以前を記述する仮説で最も有力な提案がインフレーション宇宙理論であり、それは原始重力波の存在を予言する。本計画の主目的は、原始重力波を観測し、代表的インフレーション宇宙理論を検証することである。原始重力波は CMB の偏光度分布に渦状のパターン（原始 B モードと呼ばれる）を刻印する。これを検出するのが最も感度の高い原始重力波発見法である。原始 B モード発見のために本計画では直径 80cm 程度の小型反射望遠鏡、超低温冷却系、高密度超伝導検出器を搭載した科学衛星 LiteBIRD を開発し、CMB の偏光度を全天にわたり精密観測する。本計画は、宇宙論研究の中心としての Kavli IPMU、衛星開発・試験・打ち上げの中心としての JAXA、地上における CMB 観測実績を有する KEK の三機関をはじめ、国立天文台、カリフォルニア大学など、国内外の研究者のネットワークを構築して推進する。

③ 学術的な意義

本計画は代表的インフレーションモデルの検証を目的とし、宇宙論、素粒子論、天文学にわたる大きな成果が期待される。

- 1) 宇宙論：インフレーション宇宙理論が予言する原始重力波の痕跡をとらえれば、最も直接的な検証となり、科学史上最大の発見の一つとなると言われている。原始重力波が検出されれば、インフラトン（インフレーションを起こす新粒子）のポテンシャルエネルギーが決定される。検出されない場合は代表的モデルが棄却されるため、宇宙論に深刻な打撃を与える。予期せぬ発見があれば、宇宙に始まりがあるというパラダイムそのものが変更を迫られる可能性すらある。
- 2) 素粒子論：インフレーションの背後にある量子重力理論は、原始重力波の強度の異なる予言値を与える。原始重力波の検出は、究極理論候補の選別を可能とする現在唯一の手段であり、重力理論と量子論の統一という素粒子物理最大の目標に対して大きな意義を持つ。
- 3) 天文学：銀河系・銀河系ハロー・局所銀河群磁場の構造及び起源の解明、星間ダスト組成分布及び整列機構の解明、宇宙再電離史の詳細決定と再電離機構の解明、Galactic Haze emission の起源の解明、超高精度ミリ波サブミリ波偏光全天探査によるセレンディピタスな発見などが期待される。

④ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

我が国には本格的な CMB 偏光観測プロジェクトが存在しなかったが、KEK のグループは現在 CMB 偏光の地上観測で世界最高レベルの観測結果を出すところまで成長した。KEK が主導して進める POLARBEAR-2 等の地上観測プロジェクトや、気球実験も進行中である。また米国では第 4 世代 CMB 偏光観測実験として、更に大規模な計画（CMB-S4）が検討されている。しかし、大気の影響による限界や全天観測の困難さのため、究極の観測には CMB 偏光に特化した人工衛星が必須となる。現在、米国では PIXIE という計画があり、欧州では Planck の成果を得て新しい衛星の提案が予定されているが、LiteBIRD が世界に先駆けるチャンスは十分にある。

⑤ 実施機関と実施体制

機関名と役割

Kavli IPMU：データ解析パイプラインの構築、データ解析、キャリブレーション、光学系の設計・開発

JAXA/ISAS：プロジェクトマネジメント、システム設計、ミッション系設計・製作・試験、衛星バス部設計・製作、衛星組立・試験、打ち上げ、運用

KEK/総研大：地上観測での技術実証、ミッション部設計・開発・試験

岡山大・スタンフォード大：系統誤差の推定・放射線毒性の試験

名古屋大・横国大・マックスプランク天体物理学研究所：前景放射除去

国立天文台・カリフォルニア大・大阪府大・埼玉大・筑波大・甲南大：光学系、検出器の開発

核融合研・関西学院大・東大理・大阪大・情報通信研究機構・東工大・東北大・理化研・APC パリ・カーディフ大・パリ ILP・コロラド大・マギル大・米国国立標準技術研究所：実現性検討、ミッション部設計・開発・試験への参加

備考：衛星計画の実施機関は JAXA であり、プロジェクトマネージャーは ISAS に置く。一方、観測装置は、プリンシパルイン

ベスティゲータ（JAXA 外の人が選定されることもある）の下、大学共同利用や国際協力の枠組みによって開発される。なお、ISAS では、LiteBIRD の科学目標が宇宙からの天文学、宇宙物理学の最重要課題の一つと認識しており、将来進めるべきミッションの一つとして、技術ロードマップ等に記載している。

⑥ 所要経費

国内経費内訳

ミッション部（観測装置）開発費：約100億円

衛星開発費：約125億円

ロケット：約50億円（H3ロケットを想定）

打ち上げ・運用：約25億円

合計約300億円

備考：

- 1) JAXA 戦略的中型科学ミッションの総予算は300億円程度と想定されている。
- 2) 上記国内経費に加えて、ミッション部開発費の一部は、NASA-MOを通して申請・審査中
- 3) バス部の新規開発要素の可能性も含め、概念設計時に、より精度の高い予算見積もりを実施する。

⑦ 年次計画

2016-7年度：計画審査を経て概念設計を行う。この段階で宇宙科学研プリプロジェクトとなる。実現性の高い観測装置のシステム要求決定と、ベースラインとなる設計を行う。

2018年度：システム要求審査を経て計画の決定を行う。システム仕様書（案）を用意し、開発・製造企業の選定を行う。JAXA プリプロジェクトとなる。

2019年度：システム定義審査、プロジェクト移行審査、経営審査を経てプロジェクトとなる。基本設計を行う。

2020-1年度：基本設計審査を経て詳細設計を行う。

2022-3年度：詳細設計審査を経て、プロトフライトモデルとしてのコンポーネント、サブシステム、システム機器の製作、インテグレーション、試験を行う。

2024-5年度：開発完了試験を経て打ち上げ、初期運用、観測機器調整、性能確認を行い、本格的観測を開始する。

2026-8年度：L2地点において観測機器の較正を行い、観測を行う。

2029-32年度：較正を完了しデータの正当性のチェックを進めていく。原始重力波の探索に関する最終結果を発表する。データの公開を行い、広く天文・宇宙・素粒子研究への応用に供する。

⑧ 社会的価値

熱いビッグバンからわずか38万年後の宇宙をCMBによって見るだけで、すでに驚嘆すべき事だが、LiteBIRDは、CMBの偏光観測により、ビッグバン（熱い火の玉宇宙）以前の信号を検出することを目指す。これは国民に大きな夢を与える。原始重力波の存在を発見すれば、人類にとってその知的価値は計り知れないものであり、そのような知的価値を日本主導で供給できれば、国民に大きな自信と誇りをもたらす。以上の理由から、科学技術立国を目指す日本の重要なプロジェクトとして、広く国民の理解を得る事ができる。

⑨ 本計画に関する連絡先

羽澄 昌史（東京大学・国際高等研究所・カブリ数物連携宇宙研究機構 高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所）

【物理学】 LiteBIRD(ライトバード)－熱いビッグバン以前の宇宙を探索する宇宙マイクロ波背景放射偏光観測衛星

計画期間	2016-2032(2019プロジェクト化、2025打ち上げ、2032最終結果発表)
実施機関等	宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構、高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所を中心とした国際・学際グループ
所要経費(億円)	JAXAの総予算額300億円程度(戦略的中型宇宙科学ミッション)
人類にとって根源的な問いに答える ◆ 宇宙誕生の瞬間とは？ ◆ 宇宙・時空を創るルールブック(究極理論)とは？	
「宇宙のインフレーション仮説」(佐藤勝彦日本学術振興会学術システム研究センター長等が提案)は、熱いビッグバン以前の宇宙に関する最有力仮説。原始重力波の存在を予言。	
原始重力波は宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の偏光マップに「指紋」の様な痕跡(Bモードと呼ばれる)を残す。	
LiteBIRDはスペースからの観測でのみ可能な「指紋」の全天精査を行い、インフレーション仮説を徹底検証する。	
地上観測で「指紋」の証拠が得られた場合、全天精査に向けた国際競争と緊急度はさらに高まる。	

- スピンレート: 0.1~0.3rpm
- 40~400GHzの間で15バンド観測
- 角度分解能: 約30分角@100GHz

LiteBIRD(ライトバード)
インフレーション仮説の
徹底検証

宇宙マイクロ波背景放射

インフレーション

次世代赤外線天文衛星 SPICA

① 計画の概要

次世代赤外線天文衛星 SPICA (Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics、図 1) は、宇宙が重元素と星間塵により多様で豊かな世界になり、生命が存在可能な惑星世界がもたらされた過程を解明することを目的とする。

この目的を達成するため、SPICA では、日本が開発してきた宇宙用冷却技術によって、大口径の望遠鏡 (口径 2.5 m) 及び焦点面観測装置全体を極低温 (8 K 以下) に冷却する。それにより、中間赤外線・遠赤外線波長域において観測装置由来の雑音が大幅に低減し、きわめて高感度、高解像度の観測を実現する。SPICA 計画は、2006 年打上げの赤外線天文衛星「あかり」の成功に代表される、日本のスペース赤外線天文学の成果と実績を踏まえて立案された。宇宙用極低温冷凍機、軽量望遠鏡、及び太陽-地球系の第 2 ラグランジュ点を周回する軌道を採用する等、高い独創性をもつ。特に、日本が開発し、利用・発展させてきた宇宙用冷却システム技術の活用が、最重要技術要素となっている。

SPICA 計画全体は、日欧協力を軸とする国際共同ミッションである。日本においては、長年にわたる天文学コミュニティでの議論・技術開発を経て、JAXA および大学連合が中心となって概念検討および技術開発を進めている。欧州では、ESA 長期計画 Cosmic Vision M-class の枠組みの中で進められる予定である。遠赤外線観測装置は、ESA とは独立のコンソーシアムが開発する。2027/28 年の打上げを目指しており、運用期間は最低で 3 年、目標は 5 年である。

② 目的と実施内容

ビッグバンから始まった宇宙の歴史の中で、いつ、どのようにして銀河や星が形成され、また、様々な元素が作られて、最終的に生命が存在することが可能になったのか？この根源的な問いに答えるために、SPICA は以下の 2 大科学目的を設定している。

1. 銀河進化を通しての重元素と星間塵による宇宙の豊穡化過程の解明

宇宙史において、どのように星々が銀河内で形成され、その結果、いかにして重元素と星間塵 (ダスト) に満ちた現在の宇宙に至ったのかを明らかにする。

2. 生命存在可能な世界に至る惑星系形成メカニズムの解明

惑星系がどのような条件で、どのようなメカニズムで形成されたかを理解するため、原始惑星系円盤がいかにして太陽系のような惑星系へと進化し、惑星を形成するに至ったのかを明らかにする。

上記の目的を達成するために、大口径望遠鏡 (口径 2.5 m) を搭載した赤外線天文衛星を打上げる。特に、望遠鏡と焦点面観測装置全体が極低温 (8 K 以下) に冷却されることにより、中間・遠赤外線領域において、観測装置由来の雑音を大幅に低減し、従来と比べてきわめて高感度、高解像度の観測が可能になる。衛星の軌道として、観測機器冷却に有利な太陽-地球系の第 2 ラグランジュ点周りのハロー軌道を選択した。打上げは JAXA の新基幹ロケット H3 を想定している。

③ 学術的な意義

SPICA の第 1 の意義は、銀河が活発に生成された 70 億年から 120 億年前の時代における「銀河進化の歴史」を解き明かすことである。この時代は、銀河の活動の重要部分が塵に隠され、可視光線等では見えないため、透過性の高い赤外線による高感度観測が本質的に必要である。SPICA は、宇宙のエネルギー生成のピークにあたるこの時期において、「銀河のエネルギー生成の源」が何であるか (星か、巨大ブラックホールか) を初めて明瞭に示す。SPICA の第 2 の意義は、太陽系を含む惑星系が生まれてきた環境を解明することである。惑星系の形成研究においては、「固体と気体の両者の進化」を調べるのが重要であり、それを可能とするのが SPICA の高感度赤外線観測である。これらにより、宇宙が重元素と星間塵により多様で豊かな世界になり、生命が存在可能な惑星世界がもたらされた過程の解明を目指す。

SPICA は、この目的のためにこれまでにない高感度の赤外線分光観測を実現する。これは今後 SPICA よりも短波長 (近赤外線) で大きな役割を果たす地上望遠鏡 TMT (Thirty-Meter Telescope) や NASA 主導の JWST (James Webb Space Telescope) と、より長波長 (サブミリ波) で優れた観測を推進する ALMA の両者の間の波長ギャップを埋めるものであり、SPICA により他計画の価値もさらに高まることが期待される。また、SPICA は天文学のみならず、極限状態での化学反応として、宇宙空間での水、氷の存在形態の解明を通じて生命の起源など多くの科学分野における「人類の知の発展」に大きく貢献することが期待される。

さらに SPICA は「宇宙における革新的な冷却技術」を実証することにより、「宇宙科学の戦略的技術」を提供し、今後の日本の宇宙科学全体の発展に「技術的」にも重要な貢献を果たす。

④ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

SPICA が実現する 2020 年代後半までには様々な大型装置を中心とした天文学の発展が期待されるが、その中で、SPICA は、観測波長帯、感度、そして観測対象についてユニークな計画である。可視光から波長 20 μm の波長帯では、JWST (NASA、2018 年打上げ予定) による革新的な成果が期待され、また波長 300 μm より長い波長帯では、稼働中の ALMA 望遠鏡による冷たいガ

ス、ダストの研究が大いに進展するだろう。これら JWST と ALMA との間の広大な波長のギャップに相当する中間赤外線、遠赤外線波長帯には、ダスト放射のピーク、芳香族炭化水素など有機物質の強い輝線バンド、電離領域・光解離領域の物理状態を反映する様々な元素・イオンの微細構造輝線など、豊かな観測プローブが存在する。この波長帯での研究を大きく進展させる高感度装置としては、国際的にも SPICA が唯一のものであり、JWST、ALMA をはじめ、WFIRST (NASA)、TMT 等超大型地上可視赤外線望遠鏡計画、大型 X 線望遠鏡 Athena (ESA)、長波長地上電波干渉計 SKA 等 2020 年代の計画と相補的・相乗的な成果が期待される。

⑤ 実施機関と実施体制

SPICA は、日本、ヨーロッパ各国、カナダ、アメリカなどが共同で開発を行う国際共同ミッションである。現在は、日本側では「JAXA として戦略的に実施する中型計画」としての実施を、ヨーロッパでは ESA Cosmic Vision M5 (中型ミッション 5 号機) としての実施を目指して、開発・検討を進めている。

○国内の主たる実施機関とその役割

- ・国内とりまとめ、冷却システム、打上げ運用：JAXA (代表機関)、大阪大学、国立天文台、東京大学、名古屋大学、東北大学、関西学院大学、京都大学等
- ・中間赤外線観測装置の開発：名古屋大学 (代表機関)、JAXA、大阪大学、東京大学、東北大学、京都大学等
- ・データセンター：JAXA、国立天文台

○国外の主たる実施機関とその役割

- ・衛星とりまとめ、衛星バス部、望遠鏡：欧州宇宙機構 (ESA)
- ・遠赤外線観測装置の開発：SPICA 遠赤外線観測装置コンソーシアム (14 カ国、代表機関：オランダ Space Research Organization of Netherlands)

⑥ 所要経費

日本負担分については、JAXA として戦略的に実施する中型計画に位置付けられる予算規模 (300 億円程度を想定) を目標に精査中であり、以下の経費を含む予定である：(1) ペイロードモジュール (冷却系を含む、望遠鏡を除く)、(2) 中間赤外線観測装置、(3) 打上げ (H3 ロケット)、(4) 観測運用。

ESA 負担分については、ESA Cosmic Vision M-class (550M ユーロ) 規模で精査中であり、以下の経費を含む予定である：(1) 衛星とりまとめ、(2) 衛星バス部、(3) 望遠鏡、(4) 衛星運用。

遠赤外線観測装置のコストは、担当コンソーシアムが 180M ユーロ規模で精査中である。

⑦ 年次計画

2016 年：	ESA Cosmic Vision 応募
2016-18 年：	概念設計
2018 年：	日欧でのミッション承認
2019-20 年：	基本設計
2020-22 年：	詳細設計
2023-27 年：	製作・試験
2027/28 年：	打上げ
2028-30 年：	観測運用 (2032 年まで運用延長を目指す)



図 1: 軌道上の SPICA (想像図)

⑧ 社会的価値

SPICA の実現によって、138 億年の歴史における「温かい」宇宙の姿、すなわち「銀河の進化と共に地球などの惑星や我々の体を作る物質がどのように作られてきたのか」についての知見が国民にもたらされると期待される。具体的には、まず、これまでの人類の知見を宇宙初期に向かって大きく遡り、有機物質やケイ酸塩を検出し、地球などの惑星や我々の体を作る物質の起源の糸口を探る。次にこれまでは濃い塵の雲に阻まれ観測困難であった銀河全般について、透過性の高い赤外線観測の特徴を活かし、「銀河の形成初期にどのように星やブラックホールが形成されたのか」の全貌の解明を目指す。さらに SPICA は他の恒星の周囲にある惑星系円盤の赤外線観測から「惑星誕生の母胎となる環境および太陽系の進化の道筋」を明らかにする。

さらに SPICA の実現は、技術的にも重要な意味をもつ。日本チームにとっての最重要技術課題は、無冷媒かつ長寿命の極低温冷却技術・超高感度赤外線観測技術の実現である。本技術は、SPICA のみならず、将来の宇宙科学ミッション (LiteBIRD、Athena など) にも活かすことができる共通技術であり、日本の宇宙科学の戦略的技術としての発展が期待される。

⑨ 本計画に関する連絡先

常田 佐久 (宇宙航空研究開発機構 (JAXA) ・宇宙科学研究所)

太陽地球系結合過程の研究基盤形成

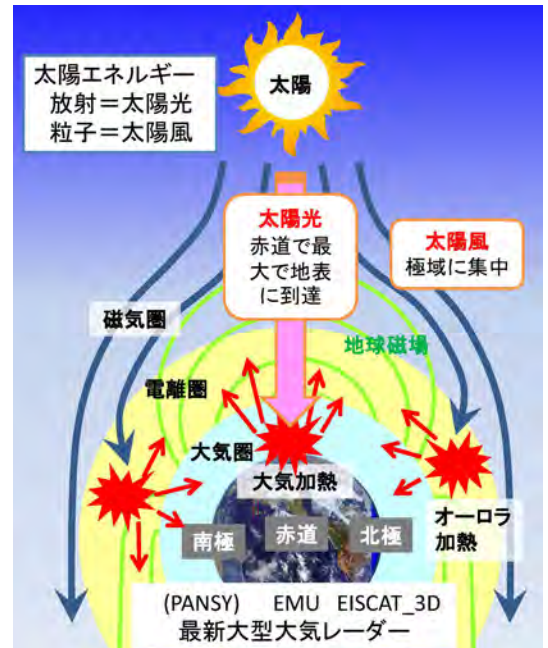
① 計画の概要

太陽から地球へのエネルギーとプラズマの流れ、太陽活動に対する地球大気圏・電離圏・磁気圏の応答過程を知り、太陽地球系の結合過程を統一したシステムとして定量的理解を深める(右図)。太陽から放射エネルギーと太陽風(高エネルギー粒子の流れ)が地球に与えられる。前者は赤道域で最大となり、後者の電磁エネルギーは磁力線を通じて極域に集中する。赤道と極域の2つの特異点に大型大気レーダーを建設するとともに、全球に広域地上観測網を整備し、衛星観測・モデル研究と連携しつつ研究を推進する。

(1) 赤道ファウンテン：赤道域で大気擾乱が最大であるインドネシアに赤道 MU レーダーを設置して総合観測拠点とし、地表付近の対流圏、中層大気、電離圏(超高層大気)に至る高度領域に共通するエネルギー・物質の噴流・循環過程(赤道ファウンテン)を解明する。

(2) 極域エネルギー流入過程：スカンジナビア半島北部に EISCAT_3D レーダーを6ヶ国の共同で建設する。太陽風エネルギー流入により激しく変動する極域の電離圏・磁気圏を高解像度で3次元観測し、電離圏・中層大気へのエネルギー流入と応答過程を解明する。

(3) グローバル結合過程：中層大気・電離圏の広域地上観測網を赤道から極域に展開する。大学間連携プロジェクト「超高層大気長期変動の全球地上ネットワーク観測・研究(IUGONET)」による大量・多様な観測データの統合メタデータベース・解析システムを活用して総合的な解析を推進する。



② 目的と実施内容

【目的】本研究の目的は、太陽放射エネルギーと太陽風プラズマが地球に流入する過程、ならびにそれに対する地球大気圏・電離圏・磁気圏の応答過程の解明である。

【背景】日本は世界で唯一、中緯度(MU レーダー)、南極昭和基地(PANSY)、低緯度(赤道大気レーダー)全てに大型レーダーを有する。北極でも、欧州以外から初めて EISCAT 科学協会に加盟し研究・運営に参画してきた。本計画の2つの大型レーダーは、フェーズド・アレイ・アンテナを技術基盤とする。1984年完成のMU レーダーを源流とし、電子・通信分野の卓越したイノベーションとして2015年にIEEEマイルストーンの栄誉を受けた。日本は広域観測にも強く、磁気経度210度と磁気赤道沿いの地磁気観測網を有し南米やアフリカにも展開中である。超高層大気の微弱夜間大気光の観測網をアジア、カナダ、ノルウェーに有する。観測データの共有を強化するIUGONETも推進している。

【実施内容】太陽光と太陽風は、それぞれ赤道域と極域で最大となる。この2つの特異点に大型大気レーダーを設置して拠点観測する。赤道域でも変動が最大のインドネシア・西スマトラ州に、京都大学生存圏研究所(RISH)が赤道MU(EMU: Equatorial MU Radar)レーダーを設置する。国立極地研究所(NIPR)と名古屋大学宇宙地球環境研究所(ISEE)が連携し、国際協力によりスカンジナビア北部にEISCAT_3D(European Incoherent Scatter 3 Dimensional)レーダーを建設する。同時にISEE、九州大学国際宇宙天気科学・教育センター(ICSWSE)を中心に、赤道から極域までをつなぐ広域地上観測網を構築する。衛星観測や数値モデル等との連携によって、エネルギーと物質のグローバルな流れを総合解析する。

③ 学術的な意義

太陽地球結合系におけるエネルギー再配分と物質輸送に関する個別の領域研究を融合し、定量的な総合解明を目指す。

(1) 太陽からの放射エネルギーは赤道域の地表を暖め、活発な積雲対流を生み大気波動を発生する。大気波動のエネルギーと運動量は姿を変えつつ電離圏まで運ばれ、地球周辺環境を変動させる。赤道域の地表から放出される大気物質は、対流圏を循環しつつ積雲や巻雲の生成・発達に寄与し、対流圏界面を通過して噴出され中高緯度まで広く輸送される。赤道MUレーダーを中心とする複合観測によって、大気の全高度域に現れるエネルギー・物質フローが解明される。

(2) 極域には太陽起源の高エネルギー粒子や電磁エネルギーが直接流入する。EISCAT_3Dレーダーによる高解像観測により、オーロラ微細構造やプラズマ-中性大気相互作用等の素過程を観測でき、磁気圏最大のエネルギー解放現象であるサブストームをはじめとする重要過程が解明される。

(3) 赤道から極域までをカバーする大気圏・電離圏の子午面観測網、磁気圏でのエネルギー・物質の経度方向の循環過程の極域観測網に加え、各種の衛星観測、データベース及び数値モデル等を組み合わせることで、大気圏・電離圏・磁気圏のグローバルなエネルギーと物質の流れが明らかとなる。

【波及効果】太陽地球系結合過程は他惑星にも適用しうるため、天文学で注目される系外惑星の大気進化や生命存在の可能性の理解に役立つ。地球大気の下結合により地表付近の環境変動が超高層大気に敏感に現れるため、本計画の観測が環境モニ

タとなり得る。2つの大型レーダーはフェーズドアレイを用いたイメージング観測に特徴を有し、電波リモートセンシング技術や超高速信号処理技術の点で電子情報通信工学への貢献が期待できる。広域地上観測を含む大量・多様なデータ収集や総合解析システムの開発は数値モデルの発展にも大きく貢献する。

④ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

本計画は1980年代の大型レーダーによる大気圏・電離圏の研究を源流とし、継続的取組みを経て提案に至った。多くの国際協同研究計画が推進された(ICSU傘下のSCOSTEP:太陽地球系科学委員会による太陽地球結合過程の研究計画(CAWSES:2004-2013とVarSITI:2014-2018)、国連傘下の宇宙天気研究(ISWI:2010-))。この中で我が国は中心的役割を果たしており、最近ではCAWSES-IIとVarSITIの国際共同議長を本研究のメンバーが務めた。特に、我が国は地上レーダー観測で大きく国際貢献してきた。本計画により我が国のMUレーダー・PANSYを含む国際レーダー観測網が完成する。IUGONETにより参加機関の連携は更に緊密になった。赤道MUレーダーはLAPANと共に建設準備を進めている。EISCAT_3DはEUの大型研究設備ロードマップ(ESFRI)に採択済で、北欧3国は日本他の出資を前提とした予算化を進めている。日本学術会議SCSOSTEP小委員会は赤道MUレーダー、EISCAT_3D、広域地上観測網を国際的に提案している。

⑤ 実施機関と実施体制

- (1) 赤道ファウンテン：京大大学生存圏研究所(RISH)・インドネシア航空宇宙庁(LAPAN)
- (2) 極域エネルギー流入過程：国立極地研究所(NIPR)・名古屋大学宇宙地球環境研究所(ISEE)・EISCAT科学協会
- (3) グローバル結合過程：ISEE・九州大学国際宇宙天気科学・教育センター(ICSWSE)・IUGONET運営協議会[RISH・京都大学理学研究科附属地磁気世界資料解析センター・京都大学理学研究科附属天文台・NIPR・ISEE・東北大学理学研究科・ICSWSE]関連事業 ERG衛星、SOLAR-C衛星、PANSYなど

整備される観測装置はいずれも共同利用のもとで開放的に運用する計画である。大学共同利用機関であるNIPRと共同利用・共同研究拠点であるRISHとISEEが参画しており、共同利用体制は完備している。

⑥ 所要経費 総額120億円(10年計画)うち設備費70億円、運営費50億円

- (1) 赤道MUレーダー：設備費35億円、運営費20億円
- (2) EISCAT_3Dレーダー：設備費25億円、運営費10億円(日本は全体の建設予算の約15%を分担する)
- (3) 広域地上観測網：設備費10億円、運営費20億円(運営費にはIUGONETコンソーシアムの運営等を含む)

⑦ 年次計画

赤道MUレーダー(EMU)と広域地上観測網は、予算化から2年間程度で装置類の設置を完了できる見込みである。完成後は機器調整・予備観測を経て4年度目に広域地上観測網と連携した重点観測を実施する。EISCAT_3Dレーダーは中核施設を初年度後半に建設開始し、約3年間で完成させる(全体は5年度目に完成)。2017年度を開始時点とした年次計画は以下のとおりである。
2017年度： EMU建設開始。EISCAT_3Dコア(送受)システムの建設開始(2020年まで)。広域地上観測網の整備を開始。IUGONETをベースとしたデータベース構築体制の整備。

2018年度： EMU完成、予備観測を開始。EISCAT_3D受信システムの建設開始(2021年まで)。観測データベース構築と地上観測・衛星観測・モデリングの統合解析ツールの開発。アジア・アフリカ域及び極域の広域地上観測網の整備。国際研究集会。

2019年度： EMU本格観測を開始(共同利用の開始)。広域地上観測網による大気圏・電離圏・磁気圏観測の継続。

2020年度： 赤道域を中心とする強化観測。EISCAT_3Dコア(送受信)システムが完成、予備観測を開始。国際研究集会。

2021年度： EISCAT_3Dが本格運用を開始する。国際研究集会(赤道域の強化観測取りまとめ)。

2022年度～： 全球の強化観測を実施。観測データの総合解析を継続。国際研究集会(全球の強化観測取りまとめ)。

2025～26年度： 研究の取りまとめと次期計画の検討。国際研究集会(次期計画の検討)。

⑧ 社会的価値

本計画は学術的に重要な広範な波及効果が望める上に、以下の諸点において社会的価値も高い。

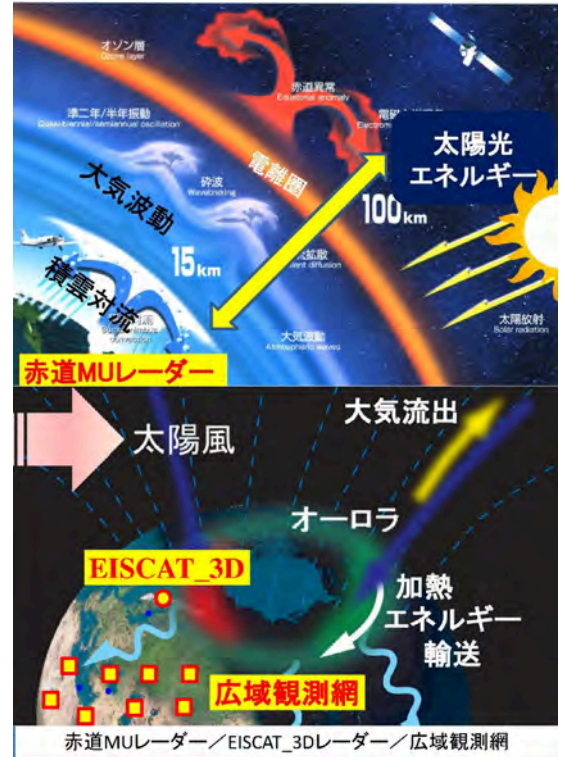
【災害防止】大型大気レーダー等を用いた大気や宇宙プラズマの研究は、極端気象の予報改善、ならびに宇宙天気の基礎過程の理解に貢献すると期待され、風水害の未然予防、衛星システムの安全運用や衛星測位精度の向上等に寄与する。

【産業振興】電波技術、信号処理技術、データ解析技術を産学連携で新開発することは産業振興につながる。

【国際貢献】高度人材育成によってアジア・アフリカにおける日本のプレゼンスが向上し、我が国の外交上の利益に貢献する。

【宇宙地球環境変化の理解】太陽エネルギーを起源とする地球環境の生成・維持および長期・短期の変動機構の解明は、人類共通の根源的な興味であり、人々の知的好奇心を刺激する。

⑨ 本計画に関する連絡先 山本 衛(京都大学・生存圏研究所)



アカデミック・ビッグデータ活用研究拠点の形成

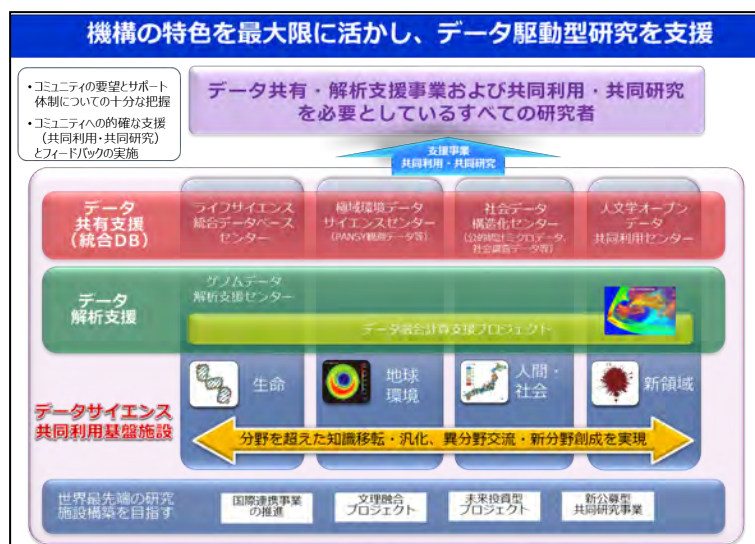
① 計画の概要

観測・計測技術の進展と情報通信技術の飛躍的発展によって、多くの研究現場で大量・大規模データが出現し、それまでの理論・実験・計算に加えて、データ駆動型という新しい研究アプローチが確立しつつある。本研究計画は、情報・システム研究機構の強みと特色を最大限活かしつつ4研究所が協力して、データサイエンス共同利用基盤施設（以下、基盤施設と呼ぶ）を設置する。基盤施設において、大学・研究機関が世界最先端のデータサイエンスを実施するために必要な支援事業を推進することであらゆる学術研究分野へのデータサイエンスの浸透を実現し、我が国の大学全体の研究力を飛躍的に強化することを目的とする。基盤施設では、研究データの公開・共有を支援するデータ共有支援事業と大規模データからの科学的発見や知識獲得のための高度データ解析を支援するデータ解析支援事業の2種類の支援事業を推進する。データ共有支援のために4つの支援センターを設置し、それぞれが、生命科学分野、極域環境分野、社会科学（公的統計マイクロデータ等）分野、人文学分野の各領域での統合的データベース化と共有の支援を行う。また、データ解析支援に関しては、ゲノムデータ解析支援センターを設置して、高度な大規模ゲノム解析支援を実施する。また、統計数理研究所のデータ同化研究開発センターにおいては、広範な分野のデータ同化などのデータ融合計算支援を実施する。

本研究計画において、プロジェクト型研究ではなく、データ共有、データ解析の支援を俯瞰的・領域横断的に実施することによって、データ共有技術やデータ解析技術の汎用化・高度化や水平展開を可能とし、さらに異分野間の知識移転のハブとしての役割を果たすことができる。また、支援事業推進にあたっては、機構本部に設置する戦略企画本部において、IR、研究動向調査、大学研究者の希望調査等を実施し、研究者の要望が高い支援事業を推進する。

② 目的と実施内容

観測・計測技術と情報通信技術の飛躍的発展により多くの研究現場で大量・大規模データが出現し、それまでの理論・実験・計算に加えて、データサイエンスとオープンサイエンスという大きな可能性を秘めた研究スタイルが出現しつつある。ただし、現実には、多くの研究分野において大量・大規模なデータが生産・収集されながら、データの共有に関しても大規模データの活用についても十分に進展していない状況である。本研究計画では、このような状況を打開するために、基盤施設を設置してデータ共有及びデータ解析の支援事業を推進し、あらゆる学術研究分野へのデータサイエンスの浸透を実現し、我が国の大学全体の研究力を飛躍的に強化することを目的とする。



基盤施設には5つの支援センターを設置する。生命科学分野では、全国のDBのRDF(Resource Description Framework)による統合化を引き続き推進するとともに国際標準化を目指した活動を行い、さらにセマンティクスを重視した統合化を行う。極域環境分野では、現在のPANSY観測データ公開に加え、年次計画に沿って超高層大気、生物多様性、気象・大気・海氷、測地等のDB化および公開を推進する。社会科学分野では、公的統計マイクロデータの公開事業を推進するとともに、社会調査データのDB化および公開を実施する。人文学等に関しては、資料のデジタル化を推進する。

データ解析支援に関しては、高度なゲノムデータ解析および広範な領域におけるデータ同化計算の支援事業を展開する。さらに基盤施設では、国際連携事業、文理融合研究プロジェクト、より高度な解析技術やデータ共有技術の開発を目指す未来投資型の研究プロジェクトなどの戦略プログラムを推進し、データサイエンスに関する世界最先端の研究施設構築を目指す。

さらに、上記の研究開発現場でデータサイエンス研究推進に不可欠なT型・Π型研究者およびキュレーター等の人材育成を推進する。

③ 学術的な意義

本研究計画では、既に実績がある生命科学分野を端緒として、俯瞰的な視野の下で極域環境分野、社会調査・公的統計分野、人文学分野へデータ共有化支援事業を拡大していく。また、今後は共有化された大規模データの有効活用が科学的発見や社会のイノベーションの鍵となるので、データ共有支援と同時に、共有可能となった大規模統合データベースからの発見・予測・シミュレーション・知識獲得を実現するための、データ解析支援事業も推進する。これによって、各領域のデータ共有と高度解析を実現するととどまらず、研究領域を超えたビッグデータ活用を可能とするものである。

本研究計画において、データ共有と高度データ解析の支援事業を、分野を跨ぎ俯瞰的に推進することによって、分野を超えた知識移転や汎化による技術的高度化が実現できるだけでなく、異分野交流や新分野創成の契機ともなることが期待される。

このように、多分野が連携しつつ大学研究者の研究・教育を支援することは今後の学術の発展に大きなインパクトを与えることが期待でき、極めて大きな学術的意義がある。

④ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

米国では2012年3月にオバマ大統領が発表したビッグデータ・イニシアティブに基づき、政府系研究機関を通じたビッグデータの研究開発が本格的に行われている。その一環として、全米4地域にNSF BD Hubが設けられ、各Hubの下にSpokeを設置してエネルギー、金融、環境、農業、健康、医薬等の研究開発を分担して推進している。また、民間財団も連携して3大学（UW, UCB, NYU）におけるデータサイエンスを支援している。欧州では、Horizon2020の一環としてビッグデータ関連事業を支援している。このような動きを受けて欧米では、平成25年以降データサイエンスの研究組織および教育プログラムの立ち上げが急速に進んでいる（平成28年2月現在の調査では、研究組織25、教育プログラム505）。

我が国では、ようやく平成28年度から次世代の人工知能技術の研究開発の一環としてAIP（人工知能/IoT/ビッグデータ/サイバーセキュリティの統合プラットフォーム）が設立された段階であり、ビッグデータ活用に関して我が国の学術研究を支援し推進するための十分な仕組みは未だ構築できていない。

⑤ 実施機関と実施体制

機構に平成28年に新設する基盤施設において本事業を推進する（中期計画に記載）。基盤施設にはデータ共有支援事業およびデータ解析支援事業のために、5つの支援センター（ライフサイエンス統合データベースセンター、極域環境データサイエンスセンター、社会データ構造化センター、人文学オープンデータ共同利用センター、ゲノムデータ解析支援センター）を設置し、また、統計数理研究所データ同化研究開発センターをはじめとする機構内研究所と連携して事業を推進する。さらに、IR、国際研究動向調査、大学等の要望調査に基づき機構の戦略企画本部が策定する共同利用戦略に沿って施設の運営を行うとともに、国際交流事業、戦略的研究プログラム、公募型共同利用を実施する。

⑥ 所要経費

総経費76億円（平成28年度：7億円、平成29～33年度：毎年度13.8億円）

平成28年度

データ共有支援 2.9億円、データ解析支援 0.7億円、戦略プログラムほか 3.4億円 合計 7.0億円

平成29～33年度（各年度）

データ共有支援 7.0億円、データ解析支援 2.4億円、戦略プログラムほか 4.4億円 合計 13.8億円

⑦ 年次計画

平成28年度：

- ・基盤施設を新設し、ライフサイエンス統合データベースセンター、社会データ構造化センター、ゲノムデータ解析支援センターを設置することにより、基盤施設のデータ共有、データ解析支援事業を順次開始。
- ・戦略プログラムの制度設計を行い、事業を開始するとともに、データサイエンスの公募型共同研究の制度設計を行う。

平成29年度：

- ・極域環境データサイエンスセンターおよび人文学オープンデータ共同利用センターを設置し、支援事業を開始。
- ・前年度までに開始した支援事業および戦略プログラムの内容を充実させつつ、引き続き実施（平成30年度以降も同様）。
- ・データサイエンスの共同研究の公募を開始するとともに、文理融合プロジェクトを本格的に開始。

平成30年度：

- ・未来投資型プログラムをセンター化するため、準備室を立ち上げ検討。また、国際戦略アドバイザーからの戦略提示や国際ワークショップの結果等を反映して、海外ネットワークの強化充実と新たな構築を図る。

平成31～33年度：

- 31) 戦略企画本部において平成28～30年度までの中間評価を行い、評価結果に基づき支援事業、共同利用体制の改善を実施。
- 32) データサイエンス共同利用の世界拠点として、海外研究機関との連携による国際共同研究の公募と事業推進を行なう。
- 33) 他機構等とも連携し、データサイエンス分野において、学術基礎研究から戦略基礎研究、イノベーションを目指した応用研究までの総合研究体制構築を検討する。

⑧ 社会的価値

ビッグデータの出現によって、医療や販売における個別化対応、社会インフラのスマート化、防災、データ集約型産業などにおいてデータの有効活用は急務となっている。また、ビッグデータを活用した地球環境や社会システムの客観的な現状理解や予測・シミュレーションは、科学的根拠に基づく政策決定にも必須である。

このような社会イノベーションを実現していくためには、データのもつ価値を最大限引き出すために、データの共有化を実現し、さらに大規模データから有益な情報や知識を獲得することが必要である。欧米においてはビッグデータ活用のための研究組織や教育体制の整備がこの数年急速に進展しており、我が国においても直ちに対応することが必要である。このような動きはあらゆる分野に関連するため、個別領域毎での対応では不十分であり、本研究計画のような、俯瞰的・横断的な取組が極めて有効かつ重要であり、本計画には大きな社会的価値がある。

⑨ 本計画に関する連絡先

北川 源四郎（大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構）

アト秒レーザー科学研究施設

① 計画の概要

近年の超短パルスレーザー技術の進歩は目覚ましく、100 アト秒を切る時間幅を持つ超短パルスの発生が可能となった。このような非常に短い時間分解能を持つ究極のプロープによって、物質中の電子の動きまで捉えることが可能となりつつあり、化学と生物学、物理学、医学との学際領域の研究分野において、アト秒パルスは将来必須の道具になると考えられる。しかし、現状のアト秒パルスの応用研究は高度に専門化された光源研究者によって行われており、専門外の利用研究者にアト秒光源を広く提供できる施設は存在していない。このような現状を鑑み、本申請ではアト秒レーザー光の共同利用を目的としたアト秒レーザー科学研究施設の設置を提案する。

アト秒レーザー科学研究施設では、様々な利用用途に対応した4種類のアト秒レーザービームラインを整備する。各ビームラインでは、軟 X 線領域のアト秒レーザー光と同時に、テラヘルツ光から極端紫外光まで幅広い波長範囲の高輝度短パルス光を供給し、アト秒時間分解能での時間分解分光を可能とする。また、軟 X 線やレーザープラズマ量子ビームによる顕微鏡やイメージング装置を整備する。さらに、既存の加速器技術とレーザープラズマ加速技術、アト秒レーザー技術を融合して、次世代アト秒光源技術の開発を行う。また、本施設は東京大学に設置され、全国の協力研究者によって構成される運営委員会（施設整備委員会・利用推進委員会・解析支援委員会）によって運営される。

② 目的と実施内容

【目的】アト秒パルスを国内外の広い研究分野の研究者が共同利用することのできるアト秒レーザー科学研究施設を整備する。物質・生命科学、電子工学、創薬・医療などの各先端分野の第一線研究者に、最先端のアト秒レーザー光をいち早く提供することによって、物質中や界面での電子運動によって誘起される様々な素過程や物性を「電子の動き」をもとに解明し、広い分野における学術の発展とイノベーション創出を目指す。

【具体的実施内容】アト秒レーザー科学研究施設においては、アト秒ビームラインを設置するための基幹レーザー施設と実験施設を建設する。アト秒ビームラインとして、汎用ビームライン・高繰り返しビームライン・高輝度ビームライン・次世代ビームラインの4本を整備する。それぞれのビームラインには、軟 X 線分光装置、軟 X 線顕微鏡装置、光電子分光装置など先端計測器の整備を行い、幅広い分野の研究者が円滑に利用研究を行える環境を提供する。さらに、大規模計算機施設との協力体制を確立することによって、理論計算やシミュレーション計算による研究支援や大容量実験データに対する解析支援を行う。各年次には、アト秒科学分野である物質科学、生命科学分野の国内外の研究者による研究会を開催し、施設利用を通じた分野横断的な研究者交流による研究分野の融合を促し、新たな学際的研究領域の創成を目指す。

③ 学術的な意義

本計画で展開するアト秒科学は物質内や界面での電子運動を実時間で観測・制御する研究分野であり、全ての物質変換の根源を解明する学問である。関連する研究分野は、物質・生命科学、電子工学、創薬・医療と多岐に渡り、最先端のアト秒レーザー光源が各先端分野の第一線研究者にいち早く提供されることが望まれている。期待される学術的な意義を以下に挙げる。

【化学反応追跡・制御・イメージング】分子に対するアト秒時間分解計測から分子内の電子波束発展や多電子系における電子間の相互作用のメカニズムが解明される。高度に制御された電子波束によって誘起される化学反応をアト秒時間分解分子イメージング法で実時間追跡することによって、究極の化学反応追跡・制御技術が確立される。

【物質材料開発・超高速エレクトロニクス技術開発】分子性固体における電子雲の非局在化過程や界面における電子移動の初期過程が解明される。これらの時間領域の知見をもとに、有機デバイスや高機能触媒、太陽電池などを開発する際の新たな設計指針が得られる。また、金属ナノ構造体中の協奏的な電子運動によって誘起されるプラズモン増強電場の時間発展が明らかになり、ナノサイズの超高速電子デバイスが実現される。さらに、アト秒精度の光波合成技術確立することによって、ペタヘルツオーダーの整形電場による超高速エレクトロニクス技術の発展が期待される。

【生物学・創薬・医療への応用】軟 X 線領域のアト秒パルスを顕微鏡法や回折法の光源として用いることによって、生体イメージングを、“高い空間分解能”で、かつ、“テーブルトップ装置”を用いて行うことが可能となる。さらに、高強度超短パルスレーザーによる量子放出過程を利用したテーブルトップの電子・イオン加速器、パルス X 線源が開発され、時間分解分光装置や時間分解イメージング装置として広く創薬・医療分野の研究開発に提供される。

④ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

世界初のアト秒パルス発生（2001 年）から 15 年が経過し、アト秒パルスをを用いた利用研究が進み、アト秒パルスをを用いた分子内の電子の運動の追跡・制御・イメージングによる物質・生命科学の新展開が期待されている。このアト秒パルスの利用研究において必須となるアト秒パルスの高強度化においては、理研のグループが常に世界を主導してきた。また、2012 年に東大、理研、原研が共同で世界最高強度の極端紫外パルス光を発生したように、アト秒レーザー技術と加速器技術との融合領域においても日本が世界をリードしている。一方、これまでは小規模な共同研究としてアト秒パルスをを用いた応用研究が行われてきたため、より広い学術分野への応用が待ち望まれていた。本計画では、世界最高水準のアト秒レーザー光を多くの利用研究者

のために安定的に供給する光源施設を提案する。この施設が中核となり、国際的な規模でアト秒レーザー科学が発展すると期待される。

⑤ 実施機関と実施体制

本施設は東京大学フotonサイエンス研究機構と東京大学光量子科学研究センターとの部局間連携のもとで東京大学に設置される。さらに、大学間研究協力プログラム「先端光量子アライアンス」によるサポートのもとで、全国の協力研究者によって構成される運営委員会（施設整備委員会・利用推進委員会・解析支援委員会）によって、本施設の運営が行われる。それぞれの委員会の役割と実施機関は以下の通りである。

【設備整備委員会】設備整備委員会は、4本のアト秒ビームラインを整備するとともに、整備したビームラインの維持管理を担当する。さらに、次世代高輝度アト秒光源の開発を行う。

【利用推進委員会】利用推進委員会は、円滑な共同利用制度を策定するとともに、様々な専門分野の利用者からのニーズに応じた光源設備についての提言を行う。さらに、アト秒レーザー実験のための基盤装置の整備を担当する。

【解析支援委員会】解析支援委員会は、主に理論的な研究支援を行う。実験成果を迅速に解析し、新たな理論的解釈や理論モデルを提言する事によって、アト秒科学分野における実験研究と理論研究の協調的な発展を目指す。

⑥ 所要経費

所要経費のうち、物品費については、中核施設整備費と計測装置整備費の2つに分けられる。さらに、施設を運営するための人件費や維持管理費が必要である。

【中核施設整備費（74 億円）】中核施設を整備するための費用として、74 億円を計上する。整備する装置群とその内訳は、基幹レーザー施設+建屋（15 億円）、冷却水循環装置（2 億円）、アト秒パルス発生用設備（3 億円×4）、高輝度アト秒パルス発生用設備（5 億円）、高速電子発生装置（3 億円）、電子加速装置（12 億円）、電子加速用電源装置（10 億円）、挿入光源装置（15 億円）である。

【計測装置整備費（14 億円）】計測装置を整備するための費用として、14 億円を計上する。整備する装置群とその内訳は、建屋（3 億円）、軟X線光電子分光装置（4 億円）、軟X線顕微鏡装置（4 億円）、軟X線分光装置（3 億円）である。

【人件費・維持管理費（8 億円）】施設を運営するための人件費や維持管理費として、8 億円を計上する。内訳は、人件費〔5 名×10 年〕（4 億円）、維持管理費（4 億円）である。

以上の総額として、96 億円を所要経費として要求する。

⑦ 年次計画

本計画では図1に示すロードマップに従い、以下の4つの期間に分けて、計画を推進する。

【1～2年次】基幹レーザー施設と実験施設の整備を行う。具体的には、本施設の基幹レーザー施設、ならびに実験施設等を収容する建屋の建設、基幹レーザーである超高強度フェムト秒レーザーシステム導入、ならびにアト秒パルス発生用設備の整備を行う。発生したアト秒パルス診断を行う計測機器として光電子・光イオン同時画像観測装置の導入を行う。

【3～4年次】先に整備したアト秒ビームライン、計測機器の共同利用開始と、アト秒計測機器・イメージング装置、ならびにデータ解析部門の整備を行う。具体的には、アト秒ビームラインの共同利用の開始、高輝度アト秒ビームラインとレーザー加速電子ビームラインの開発を行う。また、アト秒電子ダイナミクス計測のためのパルス電子線回折装置とアト秒時間スケールの超高速構造変化追跡のためのパルス電子線イメージング装置の開発、ならびに共同利用を開始する。また、データ解析部門の整備を行い、アト秒時間スケールで変化する電子構造の解析手法を開発する。

【5～6年次】先に開発したレーザー加速電子ビームラインの共同利用開始、ならびにアト秒分子ダイナミクス計測器の整備を行う。具体的には、軟X線領域のアト秒パルス光電子分光装置、レーザー加速電子ビームラインからの放射光発生を行い、幅広いユーザーに対して光源、ならびに計測装置群を提供する。

【7～10年次】レーザーと加速器とが融合したビームラインの建設、およびユーザーへの共同利用を行う。具体的には、アト秒軟X線パルスを加速電子とともに挿入光源に導入してコヒーレント軟X線パルス発生開発を行い、軟X線自由電子レーザービームラインとして、高強度パルスを必要とするユーザーへ提供する。

その他、各年次には、アト秒科学分野である物質科学、生命科学分野の国内外の研究者が参加する研究会を開催する。

⑧ 社会的価値

現代の科学・技術は、物質中や界面での電子運動によって誘起される様々な素過程・反応性・物性を利用して発展しており、電子の動きを直接捉えることが出来るアト秒レーザーによる実験が実現されれば、人類の物質観・自然観を格段に広げるものと期待される。特に、アト秒レーザー科学分野は、物理・化学・生物・医学の分野を包含した学際領域であり、光触媒や太陽電池などの光機能材料の物性研究と新しい材料開発や、医療診断技術を含む生体観察技術の開発への応用を積極的に行うことによって、物質科学や生命科学における知のフロンティアの開拓だけでなく、アト秒レーザー科学分野から生まれる日本発の新しい医療工学技術や計測装置開発に資すると考えられる。

⑨ 本計画に関する連絡先

山内 薫（東京大学・大学院理学系研究科）



図1. 本計画のロードマップ