

大型低温重力波望遠鏡計画

① 計画の概要

重力波はブラックホールや中性子星等の高密度星が激しく運動する際に放出される時空のさざ波である。本計画では重力波の直接観測と、アジア地域の観測拠点として欧米の観測拠点と国際的観測ネットワークを構成し、重力波を観測手段とした重力波天文学の創成を目指す。

具体的計画としては一辺 3km の超高感度レーザー干渉計を建設し、重力波を観測する。目標とする重力波信号源は連星中性子星の合体、連星ブラックホールの合体、超新星爆発などである。このうち連星中性子星の合体に対して 7 億光年先のイベントまで観測可能な感度の実現を目指す。この感度を実現することで年間数例以上の重力波信号の観測が期待される。そのために、世界で初めて装置全体を地面振動の小さい地下設置とし、また熱雑音を低減するために極低温に冷却した鏡を用いる。

なお、2010 年に本計画の実施が認められたことから、本計画の愛称の公募を行い、KAGRA と命名された。



大型低温重力波望遠鏡KAGRAのイメージ図

② 目的と実施内容

KAGRA は重力波の直接観測と、重力波によるさまざまな天体・宇宙の現象を観測する重力波天文学と称すべき分野の創成を目指している。米国の advanced LIGO が 2015 年 9 月に連星ブラックホール合体からの重力波をとらえたと報告している現在、KAGRA は本来の目的のための速やかな目標感度達成と同時に、現在の advanced LIGO では 10% 程度でしかない測定精度を大幅に向上させた検出器の完成を目指さなければならない。そのため、環境起因や装置起因のノイズを落として感度への影響をなくすとともに、データへの系統誤差の混入を注意深く排除するように装置の構成や調整を行う必要がある。

2016 年初頭、建設期の終盤にかかるため、KAGRA の建設・維持・運転にあたる組織とは別に、KAGRA による科学成果を追求する組織 KSC (KAGRA Scientific Congress) を新たに立ち上げ、KAGRA のサイエンスに関わる決定を行うこととした。

③ 学術的な意義

本計画により重力波観測がなされれば、強重力場における一般相対性理論の検証が高い精度で行われることになる。また連星中性子星合体直前の重力波を解析することにより中性子星内部の物理状態の理解が飛躍的に進むことになる。それとともに宇宙の観測手段として、ブラックホール生成の瞬間など、これまで人類の見るができなかった様々な天体・宇宙の現象を観測できるようになり、重力波天文学と称すべき分野が創成される。そして、重力波の観測が電磁波による観測やニュートリノ・宇宙線による観測と相補的に統合されることで、この宇宙のより深い理解を得ることが可能となる。

④ 実施機関と実施体制

東京大学宇宙線研究所がホスト機関となり、自然科学研究機構国立天文台、高エネルギー加速器研究機構との 3 研究機関の密接な協力のもとで装置を建設中である。特に国立天文台は、光学関係や防振関係を分担し、高エネルギー加速器研究機構は、真空関係と低温関係を分担している。宇宙線研究所はホスト機関として取りまとめを行うと共に、地下施設の建設や電子回路、また装置全体の設計のとりまとめに責任を持つ体制で進めている。上記 3 機関を含め全体では国内外から 70 機関、総勢約 230 人の共同研究によって計画を遂行している。

⑤ 所要経費

装置建設費総額約 164 億円である。内訳は概算で、空洞掘削関係 37 億円、真空装置 57 億円、低温装置 28 億円、実験室（クリーン環境）整備 13 億円、防振装置 4 億円、光学系一式 6 億円、その他 19 億円である。毎年の運営費は約 4.5 億円を見込んでいる。

⑥ 進捗状況

本計画は 2010 年度から建設を開始、2016 年 3 月の段階で第一回目の試験運転を実行した。

予算措置とその主な内容は以下のとおりである。

2010 年度-2013 年度、最先端研究基盤事業費 98 億円

真空ダクト（全長 6km）、クライオスタット（4 基）、鏡冷却用の冷凍機ユニット（16 台）、高性能防振装置（一式）、等の製作および保管。

2011 年度-2012 年度、施設整備補助金（概算要求、空洞掘削工事費） 37 億円

新跡津坑口からのアプローチ（600m）、KAGRA 本トンネル（3km, 2 本）、本トンネル中央部と端部の実験室空間などを NATM 工法により掘削した。ズリ、排水の処理を行った。

2013 年度-2014 年度、施設整備補助金（概算要求、地下実験室高度化） 7.5 億円

神岡町茂住に計算機制御やデータ収集を主として行う研究棟を建設するとともに、KAGRA 坑内の電気・設備工事や坑外整備を行った。

2012 年度-2016 年度、施設整備費補助金（概算要求、レーザー干渉計高度化）21.5 億円

トンネル内施設の整備、断熱真空設備製作（ダクト型シールドおよび冷凍機）、低温鏡懸架装置製作、サファイア鏡製作、光学系製作、機器の搬入と設置

2014 年度-2018 年度、科研費特別推進研究「極低温干渉計で挑む重力波の初観測」5 億円

低温鏡懸架システムの開発、冷却効率向上研究、新手法による干渉計の迅速安定動作の開発、標準量子限界突破の研究

⑦ 社会的価値

本計画は「時空の波動」や「ブラックホール生成を直接捕らえる」などがテーマであり、純粋基礎科学のおもしろさを知ってもらうことができると考えられる。そのため様々なアウトリーチ活動を行っている。例えば本プロジェクトのホームページは一般の人々に興味を持ってもらえるようにすることを念頭に作成されている：<http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/>

また、一般講演会なども多数行っているが、特に 2015 年は一般相対論が発表されて 100 年目にあたり、いくつもの一般向け講演会が開催され、多くの市民から賞賛を頂いた。

本計画は最先端の技術が多数用いられており、これらの最先端技術に国内の企業が関わることで、経済的・産業的価値を生む。また低温関連技術などで特許も生まれており知的価値を創造している。

⑧ 本計画に関する連絡先

梶田 隆章（東京大学・宇宙線研究所）

高圧地球惑星科学コンソーシアム：地球惑星深部科学の学際的研究推進のための基盤形成

① 計画の概要

高圧地球惑星科学分野における代表的研究拠点である、愛媛大学・東北大学・東京大学・東京工業大学を中核とした、超高圧と量子ビーム（放射光・中性子線など）を利用した共同研究・人材育成のためのコンソーシアムを形成する。コンソーシアム主導で、(1) SPring-8 の高度化に対応した新しい地球惑星科学ビームライン（以下 BL）の建設、(2) 既存の放射光施設（SPring-8, KEK）・X線自由電子レーザー施設（SACLA）・中性子実験施設（J-PARC）における地球惑星科学関連 BL の高度化、(3) 中核拠点における超大型高圧合成装置の建設、などを進める。

これらの大型設備・施設の建設や高度化のみならず、各施設に博士研究員・高度技術員を配置しその維持管理と運用、実験技術の開発や研究支援とコンソーシアムの運用支援を行い、設備の有効利用とともに技術・人材交流や新たな学際的・国際的共同研究を促進する一方で、コンソーシアム内の連携による先端研究を担う人材育成を担う。また、愛媛大学 GRC で開発された世界最硬ナノ多結晶ダイヤモンドを活用した新しい実験技術の開発をすすめるとともに、これを生かした地球深部掘削科学や高圧物性物理学など他分野との連携・国際連携も促進する。

コンソーシアムによる大型実験装置や設備の設置とその活用により、特に (1) 地球深部の化学組成と始源物質、(2) 高圧下での変形・破壊現象と深発地震の原因、(3) マントルと核のダイナミクスと進化、(4) 地球表層と深部の物質循環、(5) 太陽系惑星及び系外惑星内部の物質と進化、などに焦点をあてた先端研究を推進する。またコンソーシアムを基盤に、地球惑星科学の他分野はもとより、材料科学・物性物理学・無機化学・分析化学・生命科学分野等との学際的研究の展開も目指す。

② 目的と実施内容

大型量子ビーム施設において、特別推進研究等の個別の科研費あるいは、新学術領域研究などの全国規模の科研費等の予算により設置された大型超高圧装置や各種測定システムを、継続的に維持・管理及び高度化を行うとともに、新たな光源に対応した地球惑星科学分野の新放射光 BL の建設を行う。また独自の世界最硬物質ナノ多結晶ダイヤモンドの大型化と量産体制を整え、新たな超高圧実験や地球深部掘削技術等への応用を可能にするための 10000-20000 トン級の超大型高圧合成装置を建造する。これらの設備は比較的中規模の予算で実現可能ではあるが、個別の研究グループでは対応が困難であるとともに、量子ビーム関連施設全体からの予算措置も難しい。従来は中核拠点を中心とした個別のグループのいずれか、あるいはコミュニティーとしての大型科研費の獲得により研究を継続し国際的にもリードする成果をあげてきたが、このような状況ではいつ研究が中断される状況に至っても不思議ではない。本研究ではこのような状況を抜本的に改善し、中核拠点を中心にコンソーシアムを組織し、その中でこれらの中型設備の建設や高度化・維持管理を行うとともに、共用設備の有効利用、研究グループ間の技術的・人的交流の促進、若手研究者の育成、国際的連携活動を推進することを目指す。

③ 学術的な意義

本コンソーシアムの活動は、大型設備の設置や維持管理面のみならず、関連分野の人材・技術交流の促進を通じ、これまでの「家内工業的」研究スタイルから、技術の標準化や更なる高度化、また学際的研究の推進など、質的に新たな段階の全国を横断した組織的研究への移行を可能にする。一方で、中核的拠点の特徴に応じた設備の集中化を通じ、設備の有効利用やそれぞれの拠点の特徴ある発展においても大きな効果が期待される。量子ビームに関しては、放射光施設では今後更に高強度・より微細なナノビームの利用が可能になり、パルス中性子源の強度も大きく向上すると見込まれる。本計画によりこれらを有効利用することにより、従来の結晶構造決定や物性測定に基づく「静的」な高圧地球科学から、地球深部のダイナミックな挙動や生命圏を含む進化過程などの「動的」な研究への転換を図る。

具体的には深発地震の原因解明や、マントル深部と外核・内核のダイナミクス及びこれらの相互作用、また地球深部における水や二酸化炭素をはじめとした軽元素及びその化合物の地球全体での大循環、マントル・核の分化と始源物質の特定及び進化過程、などの解明に向けた組織的研究が大きく前進すると期待される。また、地球以外の諸惑星内部の構造・組成とダイナミクスの研究を通じた太陽系全体の進化過程の定量的理解や、近年多く発見されている太陽系外惑星・スーパーアースの内部物質やダイナミクスの研究を通じ、惑星系の進化や生命の起源解明にも資する新たな研究の展開が期待される。一方で、ナノ多結晶ダイヤモンドの成功にみられるように、超高圧を手段とした新規超硬材料や光学材料の合成、新たな高温超伝導物質の探査など、材料科学や物性物理分野等への多大な波及効果と学際的研究の進展も見込まれる。

④ 実施機関と実施体制

4 つの中核的研究機関を中心に、当面国内約 25 の機関を組織したコンソーシアムをつくり、共同して量子ビーム施設における新規 BL の建設や既存 BL の高度化・維持管理にあたりとともに、共同研究を推進する。事務局を愛媛大に置き、1) 次世代 BL・大型設備設置、2) BL 高度化・維持管理、3) 技術開発・共同研究に関する部会を設置する。また、地球惑星科学の他分野の研究者や、高圧物質科学などの研究者にも参加してもらい、人材育成・国際連携活動も含めた幅広い組織へと発展させる。

コンソーシアムの中核的研究機関と役割分担は以下の通りである。

[東北大学（理学研究科地学専攻）]：新地球惑星科学 BL の建設と高度化、統合的地球惑星科学の展開、及び BGI との国際共同大学院を設置による人材育成活動。

[東京大学(理学系研究科附属地球惑星化学実験施設・地球惑星科学専攻)] : J-PARC 高圧中性子地球科学 BL の高度化、地球化学分野との連携、木星型惑星内部の物質構造と進化の解明。

[東工大(地球生命研究所: ELSI、理工学研究科地球惑星科学専攻)] : SPring-8・KEK における高圧地球科学 BL の高度化、地球と生命の起源の解明・系外惑星の物質科学。

[愛媛大(地球深部ダイナミクス研究センター: GRC)] : 全体の統括・事務局。超大型高圧合成装置の建設と維持管理、新地球惑星科学 BL の建設、SACLA の高圧科学 BL の高度化、共同利用支援、地球惑星内部のダイナミクスと進化・超高压を利用した新規物質の探索。

⑤ 所要経費

SPring-8 において地球惑星科学 BL を新規に建設する一方で、既存の BL における高圧装置及び測定系の高度化を行う。また、中核 4 拠点を中心に、大型分析装置等の設置を行うとともに、愛媛大において大型ナノ多結晶ダイヤモンド合成用の超大型高圧合成装置を設置する。これらの設備に加えて、維持管理、共用消耗品、高度技術員等の人件費、コンソーシアム会議や関連旅費など、総経費として 10 年間で 68.7 億円を予定している。

- ・地球惑星科学放射光新 BL 建設 : 22 億円
- ・中核拠点整備 (共同利用に供する大型分析装置及び微細加工装置) : 12 億円
- ・超大型高圧合成装置建設 (ナノ多結晶ダイヤモンド合成用の超大型高圧合成装置) : 4.5 億円
- ・中性子地球惑星科学 BL 高度化 (超高压装置及び測定系の高度化) : 5 億円
- ・放射光・X-FEL 実験施設既存 BL 高度化 : 5 億円
- ・人件費 (高度技術員・博士研究員の採用による、技術開発・実験指導等) : 12 億円
- ・維持・管理費 (光熱費、修理費他) : 4 億円
- ・消耗品 (共用超硬合金アンビル他) : 3 億円
- ・旅費・会議費 (コンソーシアム会議、インターンシップ・海外派遣等) : 1.2 億円

⑥ 進捗状況

日本高圧学会における過去 4 年間にわたる夜間集會などにおいて、計画についての検討がなされるとともに、この間採択された GRC の共同利用・共同研究拠点、及び新学術領域研究において、共同研究体制の確立や幅広い研究分野の研究者の組織化がおこなわれている。このようなこれまでの準備と成果を踏まえて、本計画においては研究期間を 10 年間で設定し、開始直後にコンソーシアム組織の立ち上げと規則制定を行うとともに、3 年以内に地球惑星科学関連放射光 BL の建設及び超大型高圧合成装置等を導入する。更に中核拠点や関連量子ビーム BL の高度化を行い、コンソーシアムの共同研究及び個別グループの研究により、概要に述べた地球惑星深部の進化過程やダイナミックな挙動に焦点を当てた先端的研究を行う。

⑦ 社会的価値

本計画は、先端量子ビーム科学と超高压科学を組み合わせた、世界をリードする地球惑星科学の展開を目指しており、地球や惑星深部など未知の世界の探索と、これらの起源や進化・未来などに関する知的好奇心に応えながら、新しい知の創造を図ることを最大の目的としている。一方で、地震発生メカニズムや、環境・資源問題といった安全安心に関連した、また超高压を利用した環境に優しい新物質開発など、グリーンテクノロジーに関連した社会的に関心の高い問題に関しても、基礎科学を背景とした貢献が期待される。高温高压は新物質を生み出す重要な手段であるが、10 万気圧を超える領域での大容量合成実験は地球科学者の独擅場であった。ナノ多結晶ダイヤモンドはすでに製品化され、2012 年日本 10 大新製品賞に選ばれるなど、本計画に関連した一つの成功例といえる。本計画による物質科学研究者等との共同研究により、更に新たな超硬物質や高温超伝導物質等の開発も期待される。このように本計画は、世界をリードする先端基礎科学の更なる発展とともに、大きな経済的・産業的価値を生み出す可能性を秘めている。

⑧ 本計画に関する連絡先

入船 徹男 (愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター)

高圧地球惑星科学コンソーシアム(CHEPS)



ロードマップと執行体制



“サイエンス指向型” マススペクトロメーターの R&D で拓く宇宙・地球・生命科学

① 計画の概要

本研究計画は、イオン光学系を独自にデザインできる大阪大学理学研究科が「核」となり、サンプル前処理やイオン化法に詳しい日本地球化学会や日本質量分析学会との連携のもと、世界に類を見ない“サイエンス指向型”の質量分析装置をデザインし、宇宙・地球・生命科学の最先端を切り拓くものである。

本計画のサイエンスターゲットは、はやぶさが採取する小惑星微粒子、火山や土壌で発生するガス、河川や海水析など多岐にわたるが、特に、[1]高感度・高空間分解能を追求することで拓く先太陽系史の解読と、[2]小型化を追求することで拓くオンサイト・リアルタイム地球惑星科学を2大課題に掲げ、次世代の地球惑星科学の学問領域を創生する。またこうした挑戦的な計測技術開発は、[3]生体高分子・生体金属などの超高速・網羅的解析（オミクス）や、[4]医療現場での疾病病態診断といった生命科学分野への実用展開が可能となり、「生命現象の基盤メカニズムの解析とその臨床研究への発展」に直接的に資するものとなる。

② 目的と実施内容

質量分析の開発要素である性能には、(i)空間分解能、(ii)検出感度、(iii)質量分解能、(iv)小型化などがあげられる。本計画では、(i)を追求した磁場型の二重収束の CQH を採用したポストイオン化 SIMS (阪大理学)、(ii)を追求した Mattauch-Herzog 型磁場を採用した全元素同時分析 LA-ICP-MS (東大地殻化学) と、SIMS と加速器質量分析計を組み合わせた MEGA-SIMS (高知コアセンター) を開発する。一般に(iii)の質量分解能は装置の大型化を伴うが、阪大が開発した多重周回時間飛行型質量分析計(MULTUM)は、イオンを「8の字」に周回させることで、小型でもあるにもかかわらず高い分解能を有する(例えば、地球惑星科学分野で高い質量分解能と称される市販装置が $M/\Delta M \sim 5000$ なのに対し、MULTUM では約 30 万を達成)。そこで、この MULTUM イオン光学系を採用した小型質量分析計を全国 10 拠点到に配備する。研究目的・用途に特化した最先端イオン光学系は阪大が設計し、地球化学的な専門性が高い地球惑星試料の採取、精製、イオン化の手法は、既に高い実績のある各研究機関で個別に開発する。本研究で得られた固体・液体・気体試料のサンプル前処理やイオン化手法については阪大理学研究科が取りまとめ情報公開し、「扇の要」となる質量分析科学のコミュニティ全体の基盤向上を寄与する。

③ 学術的な意義

本計画の分析対象は多岐にわたるが、計画全体として以下の二つの学問領域を新たに創生する。

[1] 高感度・高空間分解能磁場型で拓く先太陽系史の解読

地球惑星科学は通常、太陽系形成後 46 億年の事象を扱う学問分野であり、宇宙開闢から太陽系の形成までの宇宙史の前半 3 分の 2 は研究対象とされてこなかった。一方、隕石を $1 \mu\text{m}$ 以下の空間分解能で観察すると、同位体異常という形で太陽系形成前の情報が保持されている。分析精度を大幅に向上させることで、太陽系の誕生と進化を、銀河化学進化の一部と捉えるパラダイムシフトが期待できる。

[2] 小型 MULTUM 拓くオンサイト・リアルタイム地球惑星科学

我が国は、地震、火山など動的地球の研究に恵まれた環境である。本計画で火山ガス、地下水などの地球化学的データをオンサイト・リアルタイムでモニタリングし、地震観測網(K-NET)と連携することで、動的地球の統括的な理解を深化させるとともに、世界を先導する次世代学術基盤の形成が可能である。

さらにここで得られた技術は、[3]生体高分子などの網羅的解析や、[4]医療現場での疾病病態診断などの生命科学分野への応用展開が可能であり、「生命現象のメカニズム解明」や「生命の発生と進化に関する基礎的知見の獲得」に繋がり、広義のアストロバイオロジーの推進にも貢献できる。

④ 実施機関と実施体制

空間分解能、および感度を追求する大型の磁場型質量分析計 R&G 拠点として 3 拠点、小型化を追求した飛行時間型質量分析計 R&G 拠点として 10 拠点を設置する。イオン光学系は阪大でデザインし、分析試料の化学特性に左右されるサンプル処理部やイオン化部などは地球化学会、質量分析学会に属する研究機関で開発を行う。完成した新型装置は全国共同利用設備として質量分析のアナリティカル・テクニカルな知見を共有し、さらに地球惑星科学分野、材料科学、ライフサイエンス、環境科学、農学などの様々な複合研究分野の発展に寄与する。

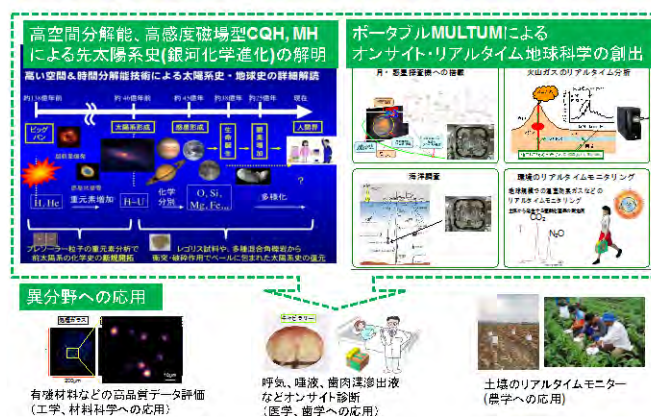
<大型磁場型質量分析計 R&G 拠点>

大阪大学：研究総括拠点(Post-Ionization SIMS)

東京大学：大型磁場型質量分析計(全元素同時分析 LA-ICP-MS)

海洋研究開発機構・高知コア研究所：大型磁場型質量分析計(MEGA-SIMS)

新しい地球惑星科学の新領域の創生。他分野への波及効果



<小型飛行時間型質量分析計 R&G 拠点>

東京大学：火山ガス MULTUM	JAXA：探査機搭載 TULTUM	筑波大：堆積岩 MULTUM	JAMSTEC：潜水艇 MULTUM
名古屋大学：生物地球化学 MULTUM	東北大学病院：薬学用 MULTUM	大阪市環境研究所：河川水 MULTUM	
大阪大学：医学歯学用 MULTUM	北海道大：土壌学 MULTUM	京都大：農芸化学用 MULTUM	

⑤ 所要経費

ポストイオン化 CQH 型質量分析装置の開発（阪大）	10 億円
完全多元素・多同位体同時質量分析計の開発（東大）	10 億円
高感度 MEGA-SIMS の開発（高知コア研究所）	10 億円
FIB-MULTUM 型質量分析装置の開発（阪大）	5 億円
投影型有機物質量分析計の開発（阪大）	2 億円
惑星探査用小型質量分析計の開発（JAXA）	2 億円
潜水艇用小型質量分析計の開発（JAMSTEC）	2 億円
人為影響ジオミクス用装置開発（鳥取環境科学大学）	2 億円
生体地球化学用装置開発（名古屋大学）	3 億円
生物圏環境ジオミクスの開発（京大、北大）	4 億円
医療診断用小型質量分析計の開発（東北大病院、阪大）	4 億円
加速器質量分析装置の開発（東大・総合研究博物館）	4 億円
環境モニタリング用小型質量分析計の開発（東大、筑波）	4 億円
装置附帯設備（各機関）	2 億円
新規建物（阪大）	5 億円
新規准教授ポスト2名、研究員6名（阪大、東大、JAMSTEC10年）	5 億円
合計	74 億円

⑥ 進捗状況

ポストイオン化 CQH 型質量分析装置の開発では、フェムト秒レーザーによるポストイオン化する手法に取り組み、最近、2 次イオン強度の増倍率を 10000 倍に向上させる事に成功した。目下、 $\phi 1 \mu\text{m}$ のビームサイズにおいて 100ppm の濃度の U-Pb の同位体シグナルの検出に成功している。有機物の分子量情報と位置情報を保持したまま質量分離する投影型イメージング；MULTUM-IMG の開発では、紫外波長に対してイオン化効率の高い有機物に関しては、一度の測定で $1 \mu\text{m}$ の空間分解能で $500 \mu\text{m}$ 平方の有機物のイメージングに成功している（レーザーのビーム径やステージのステップ数が空間分解能を決定する市販の装置では $10 \mu\text{m}$ 程度）。三つ目の柱は、小型かつ可搬型の多重周回飛行時間型質量分析計（MULTUM）の開発で、すでに培養土壌からの脱ガス分析、歯周病患者の唾液の分析など実験室レベルでは実績がある。現在は、JAXA のトロヤ群探査用小型質量分析計の開発に着手しており、小惑星表面からサンプリングした試料をその現場で分析する”オンサイト化”を目指している。これらを早い段階で軌道に乗せる必要がある。

一方、大型磁場型の質量分析計である完全多元素・多同位体同時質量分析計や、SIMS と加速器質量分析計を組み合わせた MEGA-SIMS は、大型の磁場マグネットを製作するのに費用がかかるため、開発の目処は立っていない。しかしながら、完全多元素・多同位体同時質量分析計で採用する「Mattauch-Herzog 型」イオン光学系は、JAXA との共同研究で月探査用のものを既に試作し性能評価をしており、技術的には実現可能な状態となっている。こうした技術開発は明確な学術的要請を反映したものであるが、実用化の先には極めて広い社会的・工学的応用研究が期待でき、産官学を融合した研究開発のモデルケースとなる。

⑦ 社会的価値

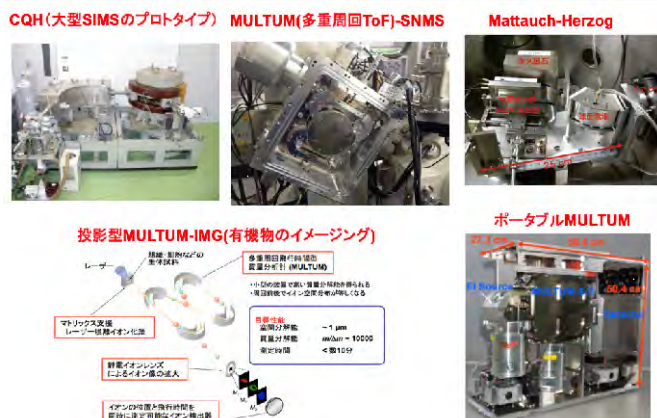
「我々はどこから来て、どこへ行くのか」という問いは、国民の誰もが一度は抱く人間の根源的な命題である。例えば、人類の究極のルーツは地球の材料物質である始原的隕石、更に遡れば元素合成の痕跡を残すプレソーラーグレインの同位体比に見いだす事ができる。一方、地球の将来像は、46 億年の地球の歴史や火星の表層環境の進化の理解の延長線上に見い出せる。本計画の革新的な技術開発に基づく宇宙・地球・生命の歴史の詳細な解釈は、基礎理学（自然科学）を発展させるだけでなく、得られた知見（宇宙観、自然観）を老若男女が普く享受する事ができる点でも大変意義がある。

また装置の小型化の追求は廉価化にもつながる。高性能の質量分析計を、歯科医用 X 線 CT や簡易放射線検出器のように普及させることができれば、呼吸や唾液や血清のオンサイト診断や、個々の店舗における品質検査など、高品位の安全安心データを国民が広く享受できる新しい社会基盤が実現する。特に小型 MULTUM は、近い将来、医療現場や環境モニタリングなどの社会生活の身近なところで広く用いられる可能性があり、また惑星探査のような多くの国民の期待を背負った国際的なミッションで活躍することが期待される。

⑧ 本計画に関する連絡先

寺田 健太郎（大阪大学大学院理学研究科）

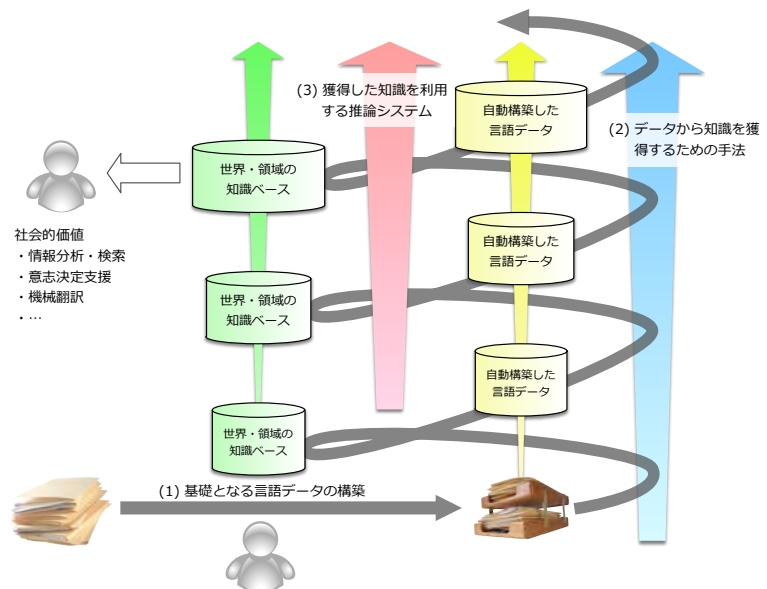
阪大が推進するイオン光学系（CQH, MULTUM, MH）



「行間が読めて説明ができる」自然言語処理を実現するための知識と推論システムの構築

① 計画の概要

本研究は、これまでに研究されてきたテキストから自然言語処理用知識を抽出する手法を洗練・拡張し、人工知能研究の本質的な課題である知識構築のボトルネックを打破し、人間と同じようにテキストの行間を読むことができ、また、理解の過程を内省的に説明できるシステムを実現するための知識を構築することを目指している。そのために(1) 基礎となる言語データの構築、(2) データから知識を獲得するための手法、(3) 獲得した知識を利用する推論システムの三つの柱を立て、これらを有機的に関連させながら三つのステップを繰り返すことにより知識を自己増殖させるサイクルを確立する。この目的を達成するために、国内において自然言語処理の研究をおこなっている組織が連携し、オールジャパンの体制で研究を推進する。専任の



研究員を 20 名程度雇用し、都内にオフィスをレンタルして研究所を設け、研究員を一箇所に集めて研究をおこなう。専任の研究員に加え、主要な研究組織からは研究者が非常勤の形で研究所に出勤する組織形態を取り、国際的にも日本の存在感を誇示できる研究体制で望む。人間の知的活動の根元である言語をコンピュータで深く理解できるようになれば他の学術研究分野にもその研究方法を変えるインパクトを及ぼす。たとえば、テキストの解釈が不可欠である人文社会系の研究分野においては、対象テキストの内容まで立ち入った定量的な解析が可能となる。また、学術分野のみならず一般社会へのインパクトも期待できる。現在では誰でも手軽に利用できる機械翻訳の精度をより高める可能性がある。さらに、教育分野では生徒の意図を正確に把握すると同時に、生徒の答えのどこが間違っているのかを説明することで、より高い学習効果を期待できる。

② 目的と実施内容

本研究計画は、人間が言葉を理解する時にどのような知識をどのように利用しているかを解明し、コンピュータ上にその知識およびその知識を利用する推論システムを構築することによって、人間のようにテキストの「行間を読み」、理解の過程を「説明できる」自然言語処理技術の確立を目指す。そのために、(1) 基礎となる言語データの構築、(2) データから知識を獲得するための手法、(3) 獲得した知識を利用する推論システム、の三つの研究課題を設定し、各課題に取り組む研究グループが一同に会して有機的に連携できる共同研究拠点を形成する。Web データに代表される大規模なテキストデータから自然言語処理に有用な知識を抽出する研究はこの 15 年間で大きな成果を上げてきたが、未だにテキストの表層的な情報を解析するに留まっている。コンピュータでテキストの行間を読むために、まず行間から読み取れる情報を明示的にテキストに付与し、これまでよりさらに豊かな情報を付与した言語データを整備し、集積する必要がある (研究課題(1))。そして、この 15 年間の知識獲得の研究成果を活用し、構築した言語データからテキストのより深い理解を可能にする知識の獲得手法を確立する (研究課題(2))。テキストを深く理解し、行間を読むためには様々な推論が必要となる。獲得した知識を利用して推論するシステムを構築することにより (研究課題(3))、テキストの表層に書かれていない情報を理解することが初めて可能になる。これによって(1)の人手の作業を自動化でき、(1)、(2)、(3)を繰り返すことによって知識の自己増殖サイクルを実現する。

③ 学術的な意義

Web の発展により利用可能になった大規模テキストデータから知識を抽出し、利用する研究がこの 15 年間に盛んにおこなわれ、一定の成果をあげている。たとえば IBM の Watson はクイズ番組で人間を打ち負かすまでになっている。しかしながら、「もの」に関する what, when, where の問題には回答できても、why や how に対する回答は難しい。これは最近急速に発展し、いくつかの分野で目覚ましい成果を上げている深層学習でも依然として難しい問題である。方法を説明したり、理由を説明したり、さらには自らの推論過程を内省的に説明するためには因果関係、前提関係、包含関係、時間関係など、様々なイベント間の関係、つまり「こと」を扱う必要がある。このためには、特定の状況でどのようなイベントがどのような関係で起るかを記述したスクリプト的な知識が必要となるが、過去の人工知能研究ではこれを人手で記述しようとして破綻した。これを実現するためには、スクリプト的な知識を静的に用意するのではなく、従来の抽出手法を洗練・拡張してテキストからスクリプトの部品となる基礎的な関係を抽出し、基礎的な関係を推論システムで効率よく利用することにより、スクリプトと同じ効果を実現するアプローチが考えられる。そのためにはどのような状況でどのような知識を使うのか、つまり、知識の文脈化をおこなう必要が生じる

が、これは新しい知識情報処理の枠組を創設する挑戦的な課題である。人間の知的活動の根元である言語をコンピュータによって深く理解できるようになれば他の学問分野にもその研究方法を変えるインパクトを及ぼす。たとえば、テキストの解釈が不可欠である人文社会系の研究分野においては、対象テキストの内容まで立ち入った定量的な解析が可能となる。また、how や why の問題にも答えられ、なぜそうなるのか説明できるようになれば、教育分野への貢献も可能となる。

④ 実施機関と実施体制

国内において自然言語処理の研究をおこなっている組織が連携し、オールジャパンの体制で研究を推進する。専任の研究員を20名程度雇用し、都内にオフィスをレンタルして研究所を設け、研究員を一箇所に集めて研究をおこなう。専任の研究員に加え、以下の主要な組織からは研究者が非常勤の形で研究所に出勤する組織形態をとる。各組織が主に担う研究課題の番号を括弧内に示す。

- ・国立国語研究所 (1)
- ・情報学研究所 (1, 2)
- ・情報通信研究機構 (2, 3)
- ・統計数理研究所 (2)
- ・東北大学 (2, 3)
- ・東京工業大学 (1, 2)
- ・奈良先端科学技術大学院大学 (2, 3)
- ・京都大学 (1, 2)

⑤ 所要経費

オフィス (300 平米 レンタル) : 5000 万×10 年

計算基盤 (レンタル) : 1 億×10 年

研究員 (20 名) : 2 億×10 年

支援員 (4 名) : 2000 万×10 年

備品, 消耗品, 旅費, 会議費 : 8000 万×10 年

総経費 : 4.5 億×10 年=45 億

⑥ 進捗状況

10 年間を前期 (3 年), 中期 (4 年), 後期 (3 年) の三期に分けて以下の項目について研究を推進する。

前期 (3 年)

- 対象ドメインの選定
- アノテーションスキーマの設計とアノテーション
- 語彙知識のスキーマの設計と語彙知識の (半) 自動構築
- データ・レポジトリの整備

中期 (4 年)

- アノテーションされたテキストの拡充
- 語彙知識の拡充
- 利用すべき文脈を付与した知識の獲得とそれを利用する推論機構の構築

後期 (3 年)

- 行間が読めて説明できる言語解析技術の構築と知識獲得への利用
- 構築した知識, 推論システムのツール化と一般公開
- 応用への展開 (e. g. テキスト翻訳, 情報分析, 教育支援, 対話システム)
- 他分野の研究者との共同研究

⑦ 社会的価値

インターネットの普及により Google や Yahoo に代表される情報検索は日常化し、誰もが使う状況になっている。現在の検索システムは基本的にはキーワードのマッチングによって検索をおこなっているために、複雑な意図をキーワードの羅列で表現することには限界がある。「行間を読めて説明ができる」自然言語処理によって検索システムのユーザの意図を的確に理解し、必要な情報をその理由も含めて提示する検索システムの構築が可能になる。また、インターネットを通しておこるグローバル化社会において避けられないのが言葉の壁である。現在の機械翻訳システムは一文単位の翻訳しかできないが、「行間が読め」ればテキスト全体を通して翻訳する可能性がでてくる。本研究計画の成果によって翻訳システムの性能を飛躍的に向上させることができる。さらに、教育分野では「行間を読んで」生徒の意図を正確に把握すると同時に、生徒の答えのどこが間違っているのかを「説明する」ことが可能となり、より高い学習効果を期待できる。

⑧ 本計画に関する連絡先

徳永 健伸 (一般社団法人 言語処理学会)

「スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク」拠点の整備

① 計画の概要

「スピントロニクス」は、エレクトロニクスや情報処理に「スピン」の自由度を積極的に用いた材料、デバイス、システムの研究開発を行う分野である。近年の磁気記録技術の飛躍的な向上に重要な役割を果たしてきた巨大磁気抵抗効果(GMR)の発見に対し、2007年にノーベル物理学賞が授与されたことからわかるように、スピントロニクス分野は学術および応用技術の両面で急速な発展を遂げている。トンネル磁気抵抗効果(TMR)を利用した不揮発性磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)の開発とその高機能化は、この分野における現在および近未来の最重要課題であり、新材料開発と高集積化により不揮発性固体メモリ/ストレージのさらなる発展と実用化を目指した研究を行う。さらに、これまで情報処理、特に論理演算においては、電荷(電流)を用いたエレクトロニクスデバイス素子の開発が主流であったが、今後はスピンおよびスピン流を用いた低消費電力新機能デバイスの開発を進める。特に、不揮発性記憶素子と演算素子の機能を兼ね備えたスピントランジスタの開発、再構成可能な論理回路、低消費電力のノーマリオフコンピュータ、右脳型の柔軟な情報処理技術の開発、およびそれらを可能にするスピントロニクス材料の開発を目指す。また、スピン(電子スピン、核スピン)、電荷、光を融合させた量子情報技術に関する研究を進める。これらの研究開発は、(1)材料科学および物理学、(2)ストレージ、(3)メモリおよびロジック、(4)量子情報 の4つの分野に大別されるが、各分野間の連携を密にとりつつ、スピントロニクス学術研究基盤の構築を進めてゆく。日本国内にはこの分野で世界をリードする研究グループや研究機関が数多く存在するので、研究グループ間および研究機関の間のネットワークを構築し、緊密な交流や共同研究を促進してさらなる研究の展開とイノベーションを目指す。

② 目的と実施内容

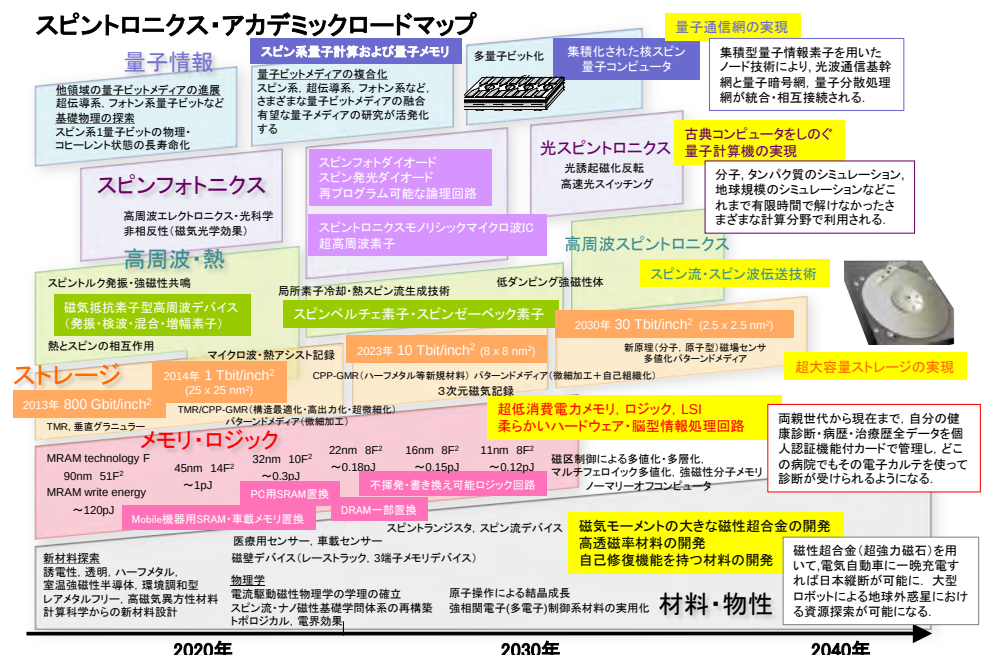
スピントロニクス研究開発に関する本提案が第22期日本学術会議学術・大規模研究計画に関するマスタープラン「重点大型研究計画」および文部科学省「学術研究の大型プロジェクトロードマップ2014」採択されたことを受け、平成28年度に4拠点大学（東京大学、東北大学、大阪大学、慶應大学）に「スピントロニクス学術連携研究教育センター」を設置する。これにより、全国の有力研究機関を結ぶ All Japan 体制のネットワーク型研究拠点を形成して世界をリードする。スピントロニクス研究は、異分野横断型の新科学技術の創造であり、階層の異なる個々の組織における研究を結ぶネットワーク型研究拠点の形成と共同研究が必要である。東京大学にはマテリアル創製、東北大学にはデバイス創製、大阪大学にはマテリアル・デバイスデザイン、慶應大学には量子スピントロニクス創製の大型設備を導入・整備し、全国の研究者が利用して共同研究を促進し、日本のスピントロニクス研究開発を格段に発展させる。

具体的には、(1)次世代メモリ、ストレージ、(2)新しい情報処理、特に論理演算デバイス、(3)電子スピン、核スピン、電荷、光を融合させた量子センサ（古典的検出限界の突破）および量子情報処理技術、(4)これらを支える材料科学、物理学、情報科学、システムの基盤的研究を行う。これらの研究は、物理学、化学、材料科学（金属、半導体、酸化物、有機物、強相関係数などを含む）、デバイス工学、電子工学、磁気工学、量子センシング・量子情報技術にかかわる量子物理学、量子工学を必要とするが、分野間の連携を密にとりつつ、スピントロニクス学術研究基盤の構築を進める。

日本国内にはこの分野で世界をリードする研究グループや研究機関が数多く存在するので、研究グループ間および研究機関の間のネットワークを構築し、緊密な交流や共同研究を促進してさらなる研究の展開とイノベーションを目指す。

③ 学術的な意義

電子は「電荷」とともに自転の角運動量に相当する「スピン」を持っている。「電荷」の蓄積や流れを制御することによって、トランジスタや集積回路をはじめとするさまざまなデバイスが生み出され、20 世紀後半以降、エレクトロニクスや情報・通信技術の大発展をもたらした。一方、「スピン」は磁性の源であり、磁石は古くから使われてきたが、磁性と電子の伝導がかかわる巨大磁気抵抗効果など新しい物理現象の発見を契機に応用技術も発展し、20 世紀末頃から「スピントロニクス (Spintronics)」といわれる新しい分野が形成された。ここで



は固体中の「スピン」の生成、蓄積、流れ（スピンの流れは「スピン流」とよばれる）を理解し制御することが中心的課題の1つである。「スピントロニクス」の研究は、物性物理学、材料科学、化学、電子工学、磁気工学、情報工学およびそれらを横断する諸領域において、今では世界的に大きな潮流となっている。これらの研究は、学術的に新しく価値があるのみならず、ポストシリコン・デバイスも含め、電子・情報通信産業のイノベーションをもたらすことが強く期待されている。研究が進展することにより、添付のアカデミック・ロードマップに示されているように、材料物性、ストレージ、メモリ、ロジック、高周波・熱、スピンフォトンクス、および量子情報分野における様々な革新的技術の創出が期待される。また、近年は、スピンと電気（電流・電圧）の関わりのみならず、スピンと磁化、スピンと光（電磁波）、スピンと熱などが関わる新しい物理現象の発見が相次いでいることもあり、学術とその応用において新しい展開をもたらしつつある。よって、数ある研究分野の中でも最も活気ある分野であるといえる。

④ 実施機関と実施体制

「スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク」形成の中心拠点として、「スピントロニクス連携研究教育センター」を東京大学（本部）、東北大学、大阪大学、慶應大学に設置する。スピントロニクス研究を行っている主要大学および主要研究機関は下記のとおりであり、これらの研究機関が連携ネットワークに参加する。

- ・主要大学：（北から）北海道大学、東北大学、筑波大学、東京大学、早稲田大学、東京工業大学、慶應大学、名古屋大学、京都大学、大阪大学、広島大学、九州大学など
- ・国立研究機関、独立行政法人：産業技術総合研究所、物質・材料研究機構、理化学研究所など。
- ・民間企業：応用物理学会スピントロニクス研究会参加企業、NTT、東芝、日立、パナソニック、ソニー、NEC、TDK など

⑤ 所要経費

総額 150 億円（8 年間で想定）

（内訳）

スピントロニクス連携研究教育センターの設立と運営 26 億円

4 大学拠点における大型設備（マテリアル、デバイス・素子、量子スピントロニクスおよびデザイン） 64 億円

特任教員、研究員の雇用費 27 億円 設備備品費、消耗品費 24 億円

国際会議、スクール、研究会などの開催費、招聘旅費 6 億円 広報、成果報告、出版費 3 億円

⑥ 進捗状況

現在、東北大学電気通信研究所組織連携型共同プロジェクト研究（平成 26～29 年度）で予算を得て、慶應大学、東北大学、大阪大学、東京大学を中心に連携型共同プロジェクト研究を継続中である。スピントロニクス分野の現状を俯瞰し将来展望を議論するため、毎年研究会の開催している。2001 年には応用物理学会スピントロニクス研究会を設立し、最新の成果を交換し議論する場を提供し、次世代のエレクトロニクスの発展に貢献するための活動を行い、現在に至っている。これらの活動が評価され、応用物理学会では 2008 年春の講演会から「スピントロニクス・ナノマグネティクス」と題する大分類が発足し、最も活気ある分野の 1 つとして発表や議論が行われている。

（1）初年度～2 年度目

- ・スピントロニクス連携研究教育センターを 4 拠点大学（東京大学、東北大学、大阪大学、慶應大学）に設立する。センターでは研究用試料の作製や評価分析など、共同研究のコアとしての役割を果たす。運営には、企業ほか他の研究機関の研究者も積極的にに関わり、シーズの創成とともに産業界からのニーズの視点をも重視する。
- ・主要研究機関を結ぶ連携ネットワークを強化する。また、海外の主要研究機関とも連携し、国際的なネットワークをつくる。
- ・研究面では、上記のセンターとネットワークを生かし、材料物性、ストレージ、メモリ、ロジック、高周波・熱、スピンフォトンクス、量子情報の各分野における研究と人材育成を進める。

（2）3 年度目～7 年度目

スピントロニクス連携研究教育センターとその連携ネットワークを強化し、アカデミックロードマップの目標に沿って、材料物性、ストレージ、メモリ、ロジック、高周波・熱、スピンフォトンクス、量子情報の各分野における学術基盤を確立し、応用に近い分野から産業応用に展開する。学生および若手研究者向けのスクールを毎年開催し、人材育成と教育を行う。2 年に 1 回程度、国際会議を開催し、成果の発信と国際交流に努める。

（3）8 年度目～10 年度目

引き続きスピントロニクス連携ネットワークを生かした研究と人材育成を進める。成果が挙げた研究から企業への技術移転を積極的に進める。成果をまとめ、主催する国際会議で発表するとともに、オンラインおよび書籍にて出版する。

⑦ 社会的価値

本分野において、我が国の科学者・工学者、特に応用物理学分野の研究者の貢献は極めて大きいものがある。スピントロニクス分野がさらに発展すれば、添付のアカデミック・ロードマップで実現が期待されているスピンおよびスピン流を用いた低消費電力新機能デバイス、不揮発性記憶素子と演算素子の機能を兼ね備えたスピントランジスタの開発、再構成可能な論理回路、低消費電力のノーマリオフコンピュータ、右脳型の柔軟な情報処理技術の開発が進み、革新的な技術、新しい産業の創造、環境にやさしい社会基盤の構築をもたらすことができる。

⑧ 本計画に関する連絡先

田中 雅明（東京大学大学院工学系研究科 スピントロニクス連携研究教育センター長 電気系工学専攻 教授）

再使用観測ロケット計画

① 計画の概要

従来の観測ロケットは打ち上げ後、機体・ペイロード（観測機器等）をそのまま海上に落下させ投棄しているが（使い捨てロケット）、本計画の再使用観測ロケットは、高度100 km以上に100 kg以上のペイロードを打ち上げ、発射点に帰還する特徴を有している。再使用観測ロケットを開発することで、観測ロケット利用コストを大幅に下げ、実験観測機器をはじめとしたペイロード持ち帰りと高頻度運用による革新的な実験機会を研究者に提供することが可能となる。また、本計画を通じて、宇宙輸送コストを飛躍的に削減する将来の宇宙往還システムの実現に必要な基礎技術の開発・実証の機会が得られ、さらに開発した再使用観測ロケットを「実運用」することでこれらの技術を洗練することが可能となる。すなわち本計画では、研究者への低コストかつ質的に異なる革新的な観測ロケット実験機会の提供と、将来の宇宙往還システムに必要な基礎技術の獲得の、両方を目標とする。

開発する機体は、最短で1日2回の打ち上げが可能で（ターンアラウンドタイム24時間以内）、現有の使い捨て観測ロケットS-310の1/10の運用コスト、100回の再使用が可能なシステムを目指す。ターンアラウンドタイムを最小化し、現有の射場設備を最大限利用するために、垂直に発射し垂直に着陸するシステムとする。推力4トン級の液体水素／液体酸素エンジンを4基搭載し、エンジンが1基故障したとしても安全に発射点に帰還することができるシステムとする。機体規模は、全備重量11トン、乾燥重量3.8トン、全長13.5m、機体直径3m、ペイロード空間約0.5立方メートル程度を想定している。

低コストかつ短期間での開発・運用をめざし、既存の地上設備を極力利用することで、機体開発に資金を重点配分する計画である。



② 目的と実施内容

再使用観測ロケットは諸外国を見ても実現されておらず、従来のロケットと比較しても技術的リスクが高いものである。そのため、平成27年度までに機体システムの概念設計と再使用観測ロケットに特有かつリスクが高く、従来のロケットにはない新規の技術（(1)帰還飛行(2)故障許容・ヘルスマネジメント(3)着陸脚(4)極低温推進剤タンク断熱材の多数回使用(5)推進剤挙動(6)推進剤供給(7)飛行中のエンジン予冷方式(8)エンジンの繰り返し運用）に関する技術実証に取り組み、課題の解決と実際の飛行に伴う技術課題の抽出を進めてきた。

平成28年度から3年程度で高度10km程度まで飛行する再使用ロケット実験機を構築し、飛行実験を行うことで実際の飛行に伴う技術課題（(1)ポンプ式エンジンの推力制御による垂直着陸(2)効率的な再使用運用(3)帰還飛行における空力制御と燃料マネージメントなど）を解決する。

再使用ロケット実験機により飛行に伴う技術課題を解決し機体開発の目途が立ったのちに機体システム開発フェーズとして再使用観測ロケットの運用システム開発（基本設計、詳細設計、製造、試験）を開始する。本フェーズは4年間の実施を見込んでおり、以下の実験の実施と実験に必要な設備整備を予定している。

- (1) 能代ロケット実験場におけるステージ燃焼試験
- (2) 内之浦宇宙空間観測所における低高度離着陸実験
- (3) 内之浦宇宙空間観測所における低高度飛行実験
- (4) 内之浦宇宙空間観測所における高高度離着陸実験

機体システム開発フェーズにて運用システム開発完了後、定常運用フェーズとして実際のペイロードを搭載した実運用を行う。同一機体で年間10回程度、10年間で合計100回程度の運用を想定している。

また研究者コミュニティへのアプローチを通して再使用観測ロケット利用者の拡大を図り、めざましい成果創出に向けてより強固な体制を整える。

③ 学術的な意義

再使用観測ロケットを運用することにより、同じ打ち上げ費用で10倍程度の実験機会、すなわち従来の観測ロケットにより得られていた研究成果が10倍程度見込めることになる。これに加えて、ペイロード回収や飛行中の姿勢・軌道制御等による革新的かつ質的に異なる実験環境が提供されることにより、質的に異なる科学成果が期待できる。

例えば、地球大気・環境計測の分野では、再使用観測ロケットにより1)ロケット軌道・姿勢の自由度向上、2)亜音速飛行・準静止状態の実現、3)観測機器の回収と繰り返し飛行が可能であることから、大気微量成分・エアロゾル・微粒子の観測（組成、温度測定）、大気および粒子の継続的サンプリング、地球規模の大気のエネルギー収支や運動の理解とモデル化の研究・利用分野で特に発展が予想される。さらに、再使用観測ロケットによって高頻度かつ世界の多地点で地球大気環境の時間的空間的ト

レンドを精度良く測定する事が可能になれば、個別の大気現象相互の関係やメカニズム理解の飛躍的向上および地球環境変動研究等に役立つ地球環境モニターとして画期的な成果をもたらすことが期待される。また、無重量環境利用分野においても、再使用観測ロケットによって実現する継続した高頻度の実験機会と 180 秒間の良質な微小重力実験機会の提供により、従来のロケット実験や ISS 利用に比べ飛躍的な研究の活性化と成果創出をもたらすことが期待される。

また、革新的な再使用観測ロケット開発を通じて、将来の宇宙輸送コストを飛躍的に削減する宇宙往還システムの実現に必要な、繰返し飛行運用や故障許容システム、寿命管理設計や信頼性設計技術、軽量の構造・材料および推進システム等の基礎技術の工学研究成果が期待できる。さらに、先端的研究を通じた新規技術の導入により、若手研究者の教育の場としても重要な役割を果たし、若手研究者の育成に貢献することも期待される。

④ 実施機関と実施体制

独立行政法人宇宙航空研究開発機構（以下 JAXA）が中心となって実施する。JAXA 宇宙科学研究所に再使用観測ロケットプロジェクトを組織し機体システム全体取りまとめを実施する。また、JAXA 角田宇宙センターにてロケットエンジンの開発を実施し、その他 JAXA 関係部署にて機体開発のための要素研究を実施する等、JAXA 内にて組織横断的に開発体制を組織する。大学との連携も密に図り、現時点でも東京大学にて燃料挙動の解析、九州工業大学にて飛行制御の高度化、新潟大学にてヘルスマニタリングセンサの開発を実施するなどしており、今後も更なる展開を図りつつ全国の大学と連携のもと実施する予定でいる。ロケットの製造はロケット製造経験のある製造メーカと連携して開発を進める。

尚、同時並行で JAXA 宇宙科学研究所が主体となって全国の大学で組織する宇宙環境利用科学委員会ワーキンググループとの連携を図り、その中で組織する、物質科学、基礎科学、技術開発、生命科学の各小委員会と密接な連携を取りつつ開発を進めていく。

⑤ 所要経費

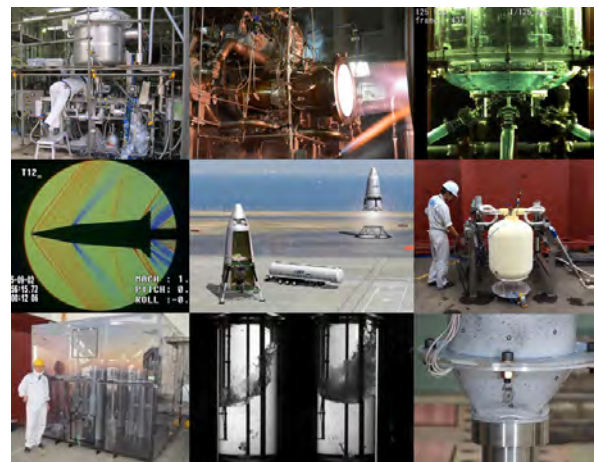
再使用観測ロケット計画の実現にかかわる費用として以下 3 つの項目が挙げられる。現時点で総経費 100 億円を見込んでいる。

（内訳）

- (1) 再使用観測ロケット機体システム開発・製造・試験費：40 億円
- (2) 地上試験設備、射場設備整備費：25 億円
- (3) 再使用観測ロケットエンジン開発・製造・試験費：35 億円

⑥ 進捗状況

現在、本計画は JAXA 宇宙科学研究所において、宇宙科学研究所内資金にて技術開発の開発準備を進めている段階にある。宇宙科学研究所内にて、再使用観測ロケット技術実証プロジェクトを組織し、平成 22 年度から平成 27 年度までに、概念設計と再使用観測ロケットに特有かつリスクが高く新規の技術に関して技術実証活動を行ってきた。現在、地上での機体システム技術実証を通して実証すべき技術課題の実証が完了しつつある。エンジンについては技術実証エンジンの開発を行い、着火回数 142 回に上る燃焼試験を実施。エンジンの再使用化に向けて寿命管理が可能なエンジンの開発に成功している。このエンジンを利用して低高度に飛翔可能な再使用ロケット実験機を構築し、飛翔に伴う技術課題の実証実験を行って、高高度に飛翔する再使用観測ロケット機体開発の準備を整える計画である。



⑦ 社会的価値

再使用観測ロケットの実用化・実利用により、将来の宇宙輸送システム実現すなわち、一般国民が宇宙に対しより身近になることを体現することができ、将来の宇宙輸送システム開発に対する国民の理解が一層深まる。我が国が世界に先駆けて再使用観測ロケットを実用化し、実利用において、そのメリットが実証できれば、他国に対して技術的に優位となり、産業的経済的効果を得ることができると考えられる。また、再使用観測ロケットの実現により高頻度に資材を宇宙へ輸送する手段の確立へ向けて一歩近づくことになり、現在深刻さを増すエネルギー問題の解決策の一つとして期待され、宇宙基本計画にも謳われている宇宙太陽光発電衛星の実現に向けて、大きく前進することが期待される。さらに、繰返し運用を重ねることで実績を積み上げ、同時に安全性評価を進めば本ロケットの有人化、更には米国ではすでに実現しつつある宇宙旅行の日本での実現も現実味を帯びてくることで経済的・産業的な活性化も期待される。

⑧ 本計画に関する連絡先

小川 博之（国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所）

国際宇宙ステーションにおける宇宙生命科学研究計画

① 計画の概要

本研究計画は、最先端生命科学研究に対応した研究設備を国際宇宙ステーション「きぼう」実験棟に設置し、宇宙生命科学研究の飛躍的發展を図ることを目的とする。国際宇宙ステーションの完成によって、既に生命科学の多くの分野で画期的な研究成果が生まれている。また、その運用が2024年まで延長されることになった。しかし、搭載されている設備は設計当初からほとんど更新されておらず、最近の生命科学技術の進歩を有機的に取り入れる体制ではない。そこで、研究者コミュニティからの要望が特に強い以下の5種の研究設備を新規開発、設置し、最先端水準の生命科学研究をより広い研究分野で強力に推進する：1) 細胞内動態リアルタイム解析システム、2) 植物栽培制御・解析システム、3) 哺乳動物飼育制御・解析システム、4) 生物試料回収・解析統合システム、5) 船外実験プラットフォーム（暴露部）利用実験施設。本研究計画の実施により、宇宙環境における生命現象の普遍性が理解され、人類をはじめとした地球生命の多様性と生命活動の根幹が明らかになるとともに、人類の健康といのちを守るために必要不可欠な多くの科学的成果が得られ、広範な波及効果をもたらすことが期待される。本研究計画は、多くの国や国際機関が参加した国際共同研究の一環であり、我が国の大学、研究機関や関連学会が結集し、宇宙機関である宇宙航空研究開発機構が実施主体となって推進する。また、2015年に策定された宇宙基本計画の内容にも合致している。今までに、5種の研究設備それぞれについて設計、開発が進められ、一部については「きぼう」実験棟に設置されている。引き続き、設備の開発と予算確保に努め、本研究計画全体の進展をめざす。

② 目的と実施内容

本研究計画は、最先端生命科学研究に対応した研究設備を国際宇宙ステーション「きぼう」実験棟に設置し、宇宙生命科学研究の飛躍的發展を図ることを目的とする。国際宇宙ステーションの完成によって宇宙科学研究を安定的、組織的に実施できる時代が到来し、過去数年間の「きぼう」運用により、既に生命科学の多くの分野で数々の画期的な研究成果が生まれている。また、2015年12月には国際宇宙ステーションの運用を2024年まで延長することが関連宇宙機関間で合意された。今後、最先端水準の生命科学研究をより広い研究分野で強力に推進するためには、開発から既に20数年が経過し老朽化した現在の「きぼう」の設備を最先端技術に対応させるための更新、拡充が必要である。そこで、研究者コミュニティからの要望が特に強い以下の研究設備を新規開発、設置するとともに、制約の多い宇宙実験において、変質しやすい生物試料から正確なデータを得るための安定した打上げ回収運用システムを確立し、宇宙生命科学研究を強力に推進する。

- 1) 細胞内動態リアルタイム解析システム
- 2) 植物栽培制御・解析システム
- 3) 哺乳動物飼育制御・解析システム
- 4) 生物試料回収・解析統合システム
- 5) 船外実験プラットフォーム（暴露部）利用実験施設

③ 学術的な意義

最近の生命科学の急速な進展に伴い、生命の基本原理やメカニズムの解明が進みつつある。しかし、得られた知見の大部分は地球環境下に限定されている。例えば、重力について見ると、現在までに得られた情報のほとんどは、1gという重力環境の制約の下でのみ適用可能な、「1g生命科学」を構成するものである。生命現象の普遍性を明らかにし、その本質に迫るためには、地球環境を超越した宇宙での研究が必要不可欠である。この目的のために国際宇宙ステーションが建設されたが、搭載設備は設計当初からほとんど更新されておらず、最近の生命科学技術の進歩を有機的に取り入れる体制ではない。本研究計画の実施によって、以下の多くの成果が期待できる。

- 1) 生命の起源や進化の本質的なしくみが解明できる。
- 2) 重力や放射線などの宇宙環境に対する生命の応答、適応機構が解明できる。
- 3) 地球環境への生命の応答、適応機構が解明できる。
- 4) 生命の基本原理解明のためのブレークスルーがもたらされる。
- 5) 生命の宇宙環境での長期生存に必要な科学的知識、技術が得られる。
- 6) 地球環境の急激な変化への適切な対処に必要な科学的知識、技術が得られる。

これらの成果により「人類をはじめとした地球生命の多様性と生命活動の根幹が明らかになる」とともに、「人類の健康といのちを守る」ために必要不可欠な多くの科学的成果をもたらすことが期待される。

④ 実施機関と実施体制

- ・宇宙航空研究開発機構（JAXA）：

本研究計画の実施主体であり、研究設備の設計、開発、製作、試験、「きぼう」実験棟への運搬、設置、運用を担当する。

- ・理化学研究所：

研究設備（特に、細胞内動態リアルタイム解析システム）の開発、試験、並びにそれらを利用した研究の推進を担う。

- ・北海道大学、東北大学、筑波大学、東京大学、東京医科歯科大学、東京薬科大学、群馬大学、千葉大学、お茶の水大学、

横浜国立大学、金沢大学、富山大学、信州大学、岐阜大学、名古屋大学、名古屋女子大学、藤田保健衛生大学、京都大学、京都工芸繊維大学、大阪大学、大阪市立大学、大阪府立大学、奈良県立医科大学、岡山大学、広島大学、徳島大学、九州大学、鹿児島大学、放射線医学総合研究所、産業技術総合研究所など：

研究設備の開発、試験、並びにそれらを利用した研究の推進を行う。

⑤ 所要経費

総予算 180 億円

- ・ 5 種の研究設備開発費：計 70 億円
 1. 細胞内動態リアルタイム解析システム 10 億円
 2. 植物栽培制御・解析システム 15 億円
 3. 哺乳動物飼育制御・解析システム 10 億円
 4. 生物試料回収・解析統合システム 10 億円
 5. 船外実験プラットフォーム利用実験施設 25 億円
- ・ 「きぼう」への運搬、設置費：30 億円
- ・ 設置後の運用経費：1 年当たり 10 億円、8 年間で 80 億円

⑥ 進捗状況

まず、宇宙航空研究開発機構・宇宙環境利用科学委員会のワーキンググループ及び研究チーム活動費のサポートを受け、5 種の研究設備それぞれの設計・開発を行った（宇宙で要求される要素と基本性能の確認、技術的な可能性の検討、宇宙環境でのフィジビリティの検証、他宇宙機関から情報収集、概念設計、基本設計等）。一方、宇宙航空研究開発機構では、本研究計画と平行して、生命科学分野の「きぼう」利用シナリオが作成され、その実施に必要な新規実験設備・装置の開発が議論されていた。そこで、宇宙航空研究開発機構の装置開発に、本研究計画の内容を最大限反映できるように働きかけた。その結果、細胞内動態リアルタイム解析システムに関しては、「きぼう」実験棟に既設の蛍光顕微鏡に共焦点ユニットを付加する形で、必要な機能の一部が満たされるようになった。また、哺乳動物飼育制御・解析システムの基本要素であるマウス飼育装置が新規開発され、「きぼう」実験棟に設置された。生物試料回収・解析統合システムについても、試料保管回収容器の新規開発がなされた。ただし、以上の装置開発は、本研究計画でとりまとめた装置要求水準の一部を満たすに過ぎず、植物栽培制御・解析システム及び船外実験プラットフォーム利用実験施設に関しては、具体的な進展が見られなかった。引き続き、宇宙実験国際公募、小規模プロジェクト公募、「きぼう」利用フィジビリティスタディを含む、宇宙航空研究開発機構内予算の獲得をめざすとともに、外部予算獲得のための様々な可能な方策を探っている。

今後の年次計画は以下の通りである。

- ・ 平成 28～30 年度 5 種の研究設備の開発、製作、適合性試験、安全性試験
- ・ 平成 28～31 年度 5 種の研究設備の「きぼう」への運搬、設置、運用開始
- ・ 平成 29～36 年度 5 種の研究設備の本格運用とそれを利用した研究の推進

⑦ 社会的価値

本研究計画の実施によって、社会に対して以下の多くの波及効果をもたらすことが期待できる。それによって得られる知的財産権や経済的・産業的価値に関しても、大きな可能性を持っている。

- 1) 人類の宇宙への進出を可能にする科学的知識、技術が得られる。
- 2) 地球の急激な環境変化への適切な対処による環境保全を通して、人類の長期生存が可能になる。
- 3) 関連分野の発展に寄与するとともに、国産技術の振興を通して我が国の成長戦略に貢献できる。
- 4) 社会福祉の向上や地球の未来を担う次世代の教育、育成に貢献できる。
- 5) 国際共同プロジェクトとして国際社会に貢献するとともに、世界をリードする研究を維持・発展できる。

⑧ 本計画に関する連絡先

保尊 隆享（一般社団法人 日本宇宙生物科学会）

