

## 2023年度 融合研究戦略課題 目次詳細

10 件

\*所属・職名は2024年3月現在

\*Affiliation and Department displayed are current as of March 2024.

研究代表者 Principal Investigator	所属機関・部局* Affiliation and Department	職名* Job title	研究課題名 Project Title	頁 Page	備考 Remarks
MENDEZ Carlos	名古屋大学大学院 国際開発研究科	准教授	持続可能な開発のモニタリングのための衛星データと社会経済データの統合	352	
門脇誠二	名古屋大学博物館	教授	元寇金属器の地球化学分析・年代測定:「コレクション考古学」の展開に向けて	354	
富田英生	名古屋大学大学院工学研究科	准教授	レーザー分光による放射性炭素同位体分析の定量性評価に関する研究	356	
村岡裕由	岐阜大学 流域圏科学研究センター	教授	アジアグリーンベルトにおける環境-社会共生化の実現に向けたフューチャー・アース研究ニーズの分析・課題の抽出	357	
渡邊智彦	名古屋大学大学院 理学研究科	教授	核融合理論と磁気圏プラズマの高性能計算 モデリングの融合研究	359	
市原大輔	名古屋大学大学院工学研究科	助教	宇宙開発に伴う大気汚染評価	361	
端場純子	名古屋大学附属図書館	係長	デジタルアーカイブの活用可能性と求められる機能について	363	
砂田茂	名古屋大学大学院工学研究科	教授	観測業務におけるヘリコプタ利用の可能性 検討	365	
渡邊 誠一郎	名古屋大学大学院環境学研究科	教授	太陽系年代学の進展と放射線環境変動研究との融合	367	
杵淵紀世志	名古屋大学大学院工学研究科	准教授	プラズマ推進機を利用した宇宙プラズマシミュレータの検討	369	

持続可能な開発のモニタリングのための衛星データと社会経済データの統合  
Integrating satellite data with socioeconomic data for monitoring sustainable development

MENDEZ Carlos, 名古屋大学 大学院国際開発研究科

### 研究目的

この研究プロジェクトの目的は、データに乏しい国々における持続可能な開発の取り組みを監視・評価するために、衛星データと社会経済データを統合する学際的な枠組みを調査・開発することです。リモートセンシングデータと社会経済指標のギャップを埋めることで、環境変化と経済発展の間の複雑な相互作用の理解を深めることを目的としています。

### 研究方法（使用した共同利用装置・施設等を含む）

2023年12月14日と15日、名古屋大学国際開発大学院（GSID）と宇宙地球環境研究所（ISEE）は共同で、「AI時代の持続可能な開発のモニタリング」をテーマにした研究ワークショップを開催しました。このワークショップの特別講演者には、日本宇宙航空研究開発機構（JAXA）、経済産業研究所、一橋大学のトップリサーチャーが参加しました。イベントには卒業生向けのトレーニングセッションや現在の研究プロジェクトに関するディスカッションセッションも含まれていました。

### 研究結果、果考察、まとめ

最近の衛星地球観測（EO）データを扱ったイベントは、この技術が社会経済問題に取り組む上で持つ計り知れない可能性を探る説得力のあるプラットフォームを提供しました。このワークショップは、学際的な研究コラボレーションを促進する上で極めて重要な第一歩となりました。宇宙地球環境研究、開発研究、地域研究、経済学、データサイエンス、ジオインフォマティクスなど、多様な分野の専門家が集結しました。

宇宙航空研究開発機構（JAXA）はこのイベントで中心的役割を果たし、アジア太平洋地域全体における EO を活用した開発イニシアチブを紹介しました。JAXA の発表は、衛星データがセクターを超えて情報に基づいた意思決定を促進し、より持続可能で公平な未来への進歩を後押しする方法を強調しました。

このイベントはさらに、衛星 EO データが経済研究に革新をもたらす変革的な方法を紹介しました。専門家たちは、リモートセンシングデータと夜間光分析が、経済活動のパターンについて前例のない洞察を提供することを示しました。研究者は、光の強度の変化を追跡することで、経済発展、都市化、そして地域格差さえも理解することができます。この革新的なデータソースは、経済学者に複雑な経済ダイナミクスを分析するためのユニークな視点を与えます。

研究者がこれらの強力なデータセットを活用するためのスキルを向上させることは重要な焦点でした。降雨の衛星全球観測データ（GSMap）の取り扱いと、夜間光データの処理・分析のための Python 活用に関する実践的なトレーニングセッションが行われました。これらのセッションは、研究者が自分のプロジェクトで衛星 EO データを独立して活用するためのスキルを身に付けるために不可欠でした。

さらなる学術セッションでは、衛星 EO データの多角的な応用事例が紹介されました。議論は、持続可能な開発目標（SDGs）の達成のための海洋モニタリングから、Google Earth Engine を使用した地域時系列データの生成まで多岐にわたりました。研究者たちは、衛星ベースの車両流動データを使って局地経済活動を評価する方法や、ビッグデータ、調査、機械学習を統合して多次元の貧困をマッピングする方法など、洞察力に富んだ事例研究を発表しました。

イベントの集大成となったのは、学際的な研究の促進に関する刺激的なパネルディスカッションでした。専門家たちは、衛星 EO データの真の力は、さまざまな分野の研究者の間の架け橋になる能力にあるこ

とを強調しました。経済学者、環境科学者、データサイエンティスト、開発実務者間の連携は、これらの豊富なデータソースの可能性を最大限に引き出すために不可欠です。

結論として、このイベントは衛星 EO データが計り知れない応用を持つ変革的なツールであることを明らかにしました。衛星 EO データは、複雑な社会経済問題に取り組んだり、SDGs の進捗状況を監視したり、これまでアクセスできなかった経済パターンを明らかにしたりするために活用することができます。衛星データへのアクセスが改善し、分析ツールがより使いやすくなるにつれて、今後ますます画期的な研究とデータドリブンな開発ソリューションが生まれることが期待されます。

## 成果発表

- Mendez Carlos, Exploring economic activity from outer space: How to use Python to process and analyze satellite nighttime lights, GSID-ISEE workshop 2023: Monitoring sustainable development in the era of AI, Graduate School of International Development, Nagoya University, 2023-12-15.
- Mendez Carlos, Mapping multidimensional poverty in Cambodia: Integrating big data, socioeconomic surveys, and machine learning, GSID-ISEE workshop 2023: Monitoring sustainable development in the era of AI, Graduate School of International Development, Nagoya University, 2023-12-15.
- Takahashi Nobuhiro, Global satellite mapping of precipitation (GSMap): Principles and data handling, GSID-ISEE workshop 2023: Monitoring sustainable development in the era of AI, Graduate School of International Development, Nagoya University, 2023-12-15.

## ワークショップの記録

URL: <https://lu.ma/gsid-isee2023>

The screenshot shows the event registration page for the Research workshop: Monitoring sustainable development in the era of AI. The page includes the following sections:

- Registration:** Shows "No Upcoming Sessions".
- About Event:** Overview of the workshop.
- Location:** Graduate School of International Development, Japan, T464-0814 Aichi, Nagoya, Chikusa Ward, Furukō, 國際開発研究科 Conference Room 1 (8th Floor).
- Hosts:** Carlos Mendez.
- Schedule:** Details the workshop sessions, including Keynote presentations, Training sessions (Dec. 15th, 9:00-12:00), Academic/project sessions (Dec. 15th, 13:30-17:15), and Social gathering and networking.
- Training sessions (Dec. 15th, 9:00-12:00):** Includes sessions by TAKAHASHI Nobuhiro, Professor, Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University; MENDEZ Carlos, Associate Professor, Graduate School of International Development, Nagoya University; and KEOLA Souknanh, Economic Geography Studies Group, Development Studies Center Deputy Director, Institute of Developing Economies.
- Academic/project sessions (Dec. 15th, 13:30-17:15):** Includes sessions by NAKAJIMA Kentaro, Professor, Institute of Innovation Research, Hitotsubashi University; and MENDEZ Carlos, Associate Professor, Nagoya University.

元寇金属器の地球化学分析・年代測定：「コンクリーション考古学」の展開に向けて  
Geochemical analysis and radiocarbon dating of metal weapons from Mongol invasions  
to Japan: Towards the establishment of "concretion archaeology"

門脇誠二、名古屋大学・博物館

### 研究目的

本申請課題は、考古遺物を内包するコンクリーションを分析対象として、その形成プロセス、及び内包する遺物保存メカニズムの解明を目指す。石器や金属器などの考古遺物がコンクリーションに内包される現象は以前から知られていたものの、考古学者からは単に「埋没後の二次的形成物」と済まされることが多く、詳しい研究はこれまで限られていた。しかし、化石コンクリーション形成に関する近年の研究をふまえると、こうした考古遺物は、コンクリーションの形成プロセスに関する理解を深める貴重な研究素材であることが分かってきた。例えば、コンクリーションに覆われた遺物の年代が歴史記録などから明らかな場合、コンクリーションの形成速度を正確に見積もる情報源となる。

また逆に、考古遺物のコンクリーション化過程が詳しく解明されれば、内包されている遺物の年代が未知の場合はコンクリーションの放射性炭素年代を測定することでその年代を推定できる。すなわち、鉄器中の炭素含有量は低く、埋没中に外から混入する汚染炭素の影響を大きく受けるため、鉄器の鉄部分から得られる放射性炭素年代は信頼性に欠ける場合が多いが、コンクリーションの炭酸部分の炭素は当時の海水の溶存無機炭素あるいは木材の炭素が主な起源と考えられるため、コンクリーション部分の年代を測定することにより、内包された鉄器遺物の年代を正確に決定できる可能性がある。

より広い観点からは、遺物の埋没環境（遺跡の形成過程）に関して新たな情報を開拓することが可能となり、人類史の考古学的研究にユニークな貢献をすると考えられる。遺物や遺構がコンクリーションによって良好に保存されている場合があり、そのメカニズムが解明されれば、遺物や遺構の保存科学への応用も期待される。

### 研究方法

上記の目的の下、具体的な研究対象として鎌倉時代の元寇の際に海底に沈んだ金属器を覆うコンクリーションを用い、その形成過程を解明するための分析を開始した。元寇は日本史でも有名な蒙古襲来の出来事で、1274年（文永の役）と1281年（弘安の役）という2回の年代が歴史記録から分かっている。1281年（弘安の役）に元の船団が沈んだ鷹島海底遺跡（長崎県）は、水中の国史跡として日本初の指定を受けたことで有名である。本遺跡の海底に沈んだ様々な遺物のうち、金属器の表面が炭酸塩コンクリーションで覆われていることがこれまで知られている。そのCT撮像によると、コンクリーションで覆われた内部は金属が腐食し、金属器の形のみが「鋳型」のように残されていることが分かっているが、その形成過程については明らかになっていない（文化庁文化財第二課 2022, p. 167）。

本研究の基礎となるコンクリーション形成過程に関する研究は、共同研究者の吉田英一教授（博物館）が世界をリードする成果を達成しており、その研究プロジェクトに南雅代教授（宇宙地球環境研究所）も参画してきた。その研究で実施されてきた分析技術を本課題においても用いる。具体的には、金属器を覆うコンクリーションの形成プロセスを明らかにするために、コンクリーションの年代測定や化学組成測定、元素マッピング、鉱物同定、顕微鏡観察などを行う。放射性炭素年代は名古屋大学宇宙地球環境研究所のタンデトロン加速器質量分析装置で行い、元素マッピングや鉱物同定、顕微鏡観察は名古屋

大学博物館に設置されている機器（XGT, SEM, XRD）を使用した。

## 進捗状況

コンクリーション化を応用した史跡・文化遺産等劣化抑制・修復技術開発研究を吉田教授と南教授が開始し、考古学を専門とする門脇誠二（博物館）が文化財への適用という点に関して参画している。また日本の文化財への適用という点において、奈良文化財研究所で保存科学を専門とする脇谷草一郎博士と柳田明進博士も共同研究者として加わっている。

2023年11月17～18日、研究メンバー5名（門脇、吉田、南、脇谷、柳田）が松浦市立埋蔵文化財センターを訪問し、金属器コンクリーションなどの遺物を観察すると共に、松浦市教育委員会文化財課の担当者と面会し、研究方針や分析資料の取り扱い等に関する打合せを行った。その結果、松浦市と名古屋大学博物館のあいだで協定を締結した（2023年12月4日）。この協定は、文化財関連標本の相互活用などの連携協力をすることにより、教育研究・文化財保護・社会貢献を拡充することを目的とするものである。

この枠組みの下で、元寇船の鉄釘の周囲に形成されたコンクリーションを分析試料として提供いただくことができた（図1）。この遺物は以前に釘の金属学的分析に用いられたものであり、2つに切断された状態である（大澤 2005）。鉄釘自体は腐食によってほぼ失われ、試料断面にみられる3つの方形の空洞になっており、その周囲にコンクリーションが形成されている。その表面付近には貝殻も取り込まれている。今年度は、この試料の写真撮影を行うと共に、断面のX線顕微鏡観察（元素マッピング）、および断面の数か所からサンプリングを行い、X線回折による鉱物同定、そして炭素の安定同位体分析を行った。その結果について、2024年2月19日に研究メンバー5名が名古屋大学博物館に集まって議論を行い、現在も解析・考察を実施中である。

## 今後の予定

コンクリーション形成過程の解明のためには、その埋没環境に関する情報が重要であるため、今後は鷹島海底遺跡の発掘調査に参加し、鉄器コンクリーションの出土状況の確認と堆積物のサンプリングを行う予定である。特に、コンクリーション形成における微生物の関りを検討するため、その専門家との海底からの試料採取も含めた共同研究を計画している。

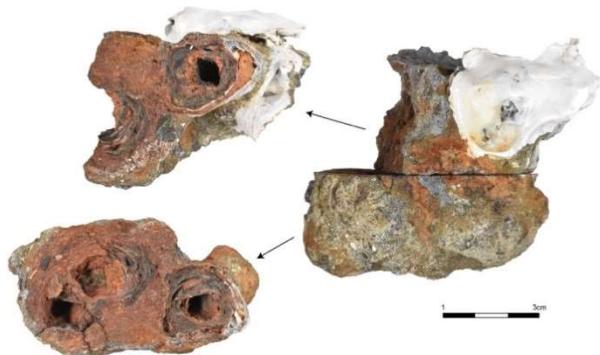


図1 鷹島海底遺跡出土の鉄器コンクリーション  
(試料No. 1357)。鉄釘は腐食によってほぼ失われ、断面に見える複数の方形の空洞になっている。その周囲にコンクリーションが形成されている。

## 引用文献

- 大澤正己（2005）「鷹島海底遺跡出土釘の金属学的調査（速報）」『鷹島海底遺跡XI』33～46頁、長崎県鷹島町教育委員会。
- 文化庁文化財第二課（2022）『水中遺跡ハンドブック』、文化庁文化財第二課。

レーザー分光による放射性炭素同位体分析の定量性評価に関する研究  
Study on quantitative evaluation of radiocarbon analysis based on laser spectroscopy

富田英生、名古屋大学・大学院工学研究科総合エネルギー工学専攻

【本研究の背景と目的】

放射性炭素 ( $^{14}\text{C}$ ) は生体を構成する元素の同位体の中で唯一、長半減期の放射性核種であるため、生体や環境トレーサーとして活用されている。 $^{14}\text{C}$ の天然同位体存在比の僅かな変動を解析して気候変動や過去の太陽活動を明らかにする研究がなされているが、およそ一定であるため、現代に育成された植物を用いて作られたバイオマス資源と太古の植物由来の化石燃料（を元に作られた資源）では、 $^{14}\text{C}$ 同位体比が異なる。このため、 $^{14}\text{C}$ 同位体比により有機資源のバイオベース度を評価することができる。また、 $^{14}\text{C}$ は薬物動態評価や農薬挙動の評価などにも応用されている。これらの分析には加速器質量分析（AMS）が用いられてきたが、その分析コストが普及を妨げる要因の一つとなっている。本課題代表者らは、超高感度レーザー吸収分光(CRDS)に基づく新しい $^{14}\text{C}$ 分析法 ( $^{14}\text{C-CRDS}$ )を開発している。本手法が確立されれば、年代測定ほどのアバンダンス感度が必要ない試料の分析に適用でき、 $^{14}\text{C}$ を用いた応用の普及を促すブレークスルーになりえる。そこで、本研究では、AMSとの比較により、 $^{14}\text{C-CRDS}$ の定量性を評価することを目的とした。

【実施項目】

1. 燃焼CO<sub>2</sub>の導入法の検討

$^{14}\text{C-CRDS}$ の燃焼部・分離部の後段に、燃焼CO<sub>2</sub>封入系を接続した。封入したCO<sub>2</sub>ガスは、AMS前処理用グラファイト化装置および $^{14}\text{C-CRDS}$ 装置に導入することができるため、同一条件のCO<sub>2</sub>試料を各装置で測定し、比較すること可能となった

2.  $^{14}\text{C-CRDS}$ 分析による定量分析の問題点抽出

工学研究科所有の $^{14}\text{C-CRDS}$ 装置を用いて、試料をフロー測定する際の問題点を検討した。分析手順は以下の通りである。まずCRDSチャンバー内にN<sub>2</sub>を流してセル内を洗浄した後、N<sub>2</sub>側バルブを閉じ、チャンバー内を減圧した。その後、封入管側バルブを開放することで、差圧によって試料ガスをチャンバー内へ導入した。導入時の圧力を圧力制御器で制御することで、測定時のセル内圧力を一定を維持できることが確認された。一方、圧力一定の条件でも $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 同位体比の測定結果には1%程度のばらつきが見られた。このことから、測定ガスの温度制御を行う必要あると示唆された。

3.  $^{14}\text{C-CRDS}$ とAMSの相互比較に向けた検証用試料の検討

$^{14}\text{C-CRDS}$ 分析法の特性を評価するための試料（ワーキングスタンダードおよびブランク試料）を検討するために、D-グルコースおよびL-グルコース試料をAMSにて測定した。これらを燃焼させたCO<sub>2</sub>ガスは1で示した封入系で保持し、グラファイト化とAMS測定は年代測定研究部により実施された。AMSによる測定の結果、 $^{14}\text{C-free}$ と想定していたL-グルコース（化学合成品）にも、 $^{14}\text{C}$ が混入していることが判明した。このため、新たなブランク試料の検討が必要であることが明らかとなった。

【今後の課題】

$^{14}\text{C-CRDS}$ 分析による定量分析の定量性を確保するために、測定ガスの温度を一定に維持し、分析性能の再評価を実施することが求められる。また、AMSによる検証用試料中の $^{14}\text{C}$ 測定結果と $^{14}\text{C-CRDS}$ の測定値を比較し、本手法の定量性と適用範囲を明らかにする予定である。

【成果発表】

柘植 紘汰、富田 英生ら、多重置換同位体分子計測のための中赤外キャビティリングダウン分光システムの開発、第21回同位体科学研究会、芝浦工業大学、2024年3月8日

アジアグリーンベルトにおける環境—社会共生体化の実現に向けたフューチャー・アース研究ニーズの分析・課題の抽出

Visioning workshop on Future Earth research challenges for environmental and societal sustainability in the Asian Green Belt

村岡裕由、東海国立大学機構岐阜大学・流域圏科学研究所センター

【目的】

本課題では、気候変動が顕在化している「人新世」の日本を含むアジアグリーンベルトにおいて、森林・河川流域からなる自然環境と人間の社会・産業・経済的活動の相互作用系としての「流域圏」の持続可能性を支える姿を『環境と社会の共生体（自然環境と人間社会の相利的関係）』として仮定し、科学と社会（行政、企業、市民など）による共創を支える学術的課題を検証することにより、地球システム科学、生態学、応用生態工学、水文学、環境経済学、エネルギー工学などから構成される『総合知』の姿を創出することを目的とした。

【方法】

ワークショップ（対面2回、リモート1回）を開催し、社会の具体的環境課題、及び研究課題の洗い出しと相互関係性の分析を行った。特に「流域の水資源管理」、「森林の炭素吸収源対策」、「流域環境の変化による社会的リスクと機会」を主要なテーマとし、同時に、「人間の介入（利活用、管理）の在り方」を考慮した。第1回ワークショップは2023年12月8日に名古屋大学にて開催し、翌日12月9日には名古屋大学フューチャー・アース研究センター公開シンポジウムに参加し、関連性の高い課題について議論した。第1回ワークショップの結果の分析と第2回ワークショップ（2024年2月27日、名古屋大学）の設計のためにリモート会議を2024年1月9日に開催した。第2回ワークショップでの議論を総括し、岐阜大学流域圏科学研究所センターシンポジウム（2024年3月26日、岐阜大学）において発表した。

【結果】

本課題では岐阜大学と名古屋大学において「環境」をキーワードとした研究者の小グループによるワークショップを実施し、自然環境と人類社会に注目した研究テーマの洗い出し、研究推進における学術的課題、研究成果を社会と共有して社会の環境課題を解決する際の障壁（ギャップ）の洗い出しを行った。特にこれらの検討においては、2023年7月に公開された東海国立大学機構カーボンニュートラルビジョン「地球温暖化時代の課題解決に向けて」において論じられている下記の研究課題を軸に据えた。

地球温暖化時代に持続可能な社会を構築するための研究は、自然環境、社会、経済に関わるあらゆる分野での研究とその社会実装が必要とされます。東海国立大学機構では、カーボンニュートラルの推進と気候変動への適応に資する研究を展開します。

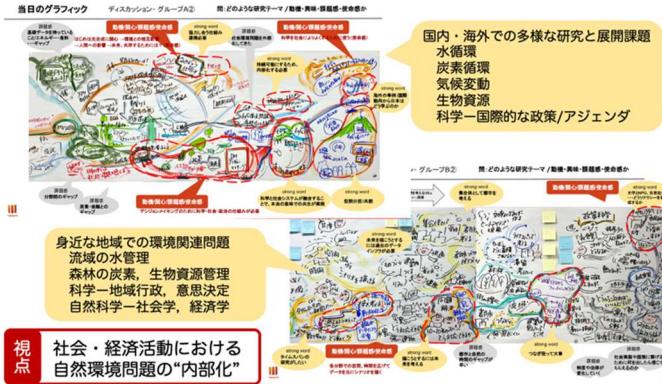
- カーボンニュートラルが達成された脱炭素社会のビジョンと社会シナリオの提示
  - 緩和と適応を両立した社会ビジョンとシナリオ、ロードマップの作成
  - 持続可能な産業・エネルギー利活用構造
  - 地域が有する緩和・適応のポテンシャルの評価
  - 地球温暖化時代の行動様式・ライフスタイル
  - カーボンニュートラル関連施策の社会的受容、経済活動への反映
- 地球温暖化の緩和への貢献
  - 脱炭素化・再生可能エネルギー関連技術の社会実装
  - 長期の地球観測に基づく自然生態系機能の診断と予測
  - 自然生態系の炭素吸収源の保全と多機能性の順応的管理
  - カーボンニュートラル政策の社会実装（意識改革、行動変容）
- 気候変動への適応への貢献
  - 気候変動影響の分析と地域への情報提供
  - 農林水産業の適応策
  - 自然を活かした防災減災
  - 水資源、生物資源の保全と管理
  - 過去から現在に至る環境と社会の変動分析に基づいた将来設計

第1回ワークショップでは、 “環境” , “社会” をキーワードとした研究テーマを、動機・興味・課題間・使命感などの観点とともに共有し、研究テーマ間の時空間的・テーマ的関連性をマッピングした。さらに、これらのマッピングを通じて、個々の課題間のギャップを特定した。すなわち、自然と都市を対象とした研究の時空間スケールの相違、気候変動や生態系、生物資源に関する科学と政策の間の距離、大学と社会の関係性などが挙げられた。これらの議論を通じた最大の発見は、地球温暖化の時代に持続可能な社会を構築するためには、社会・経済活動における自然環境問題の “内部化” を図る必要性を見出した点である。

第2回ワークショップでは、「流域圏」をフィールドとして、上流・中流・下流とそれらの連続した系における諸研究課題やステークホルダーとの関係性をマッピングする試みを実施した。さらに、研究分野またはテーマ間のギャップ、あるいは科学と社会のギャップを乗り越えるために必要とされる学術、コミュニケーション等のアプローチについても分析を行った。これらの議論を通じて、地球温暖化時代の持続可能な社会の構築には、アカデミアと地域が連携した研究を実施することにより将来の「流域圏」像をデザイン（共創）することが必要であると考えられた。また、そのためには、科学一社会の協働と意思決定を支援する文理融合型の新たな学術の醸成が必要であり、地域のネイチャー・ポジティブを実現する協働プラットフォームの創生が必要とされることが議論された。

### 第1回ワークショップ (2023年12月8日)

- “環境”, “社会”をキーワードとした研究テーマを、動機・興味・課題感・使命感などの観点とともに共有し、研究テーマ間の時空間的・テーマ的な関連性をマッピングする試み。
- 研究課題や社会における環境問題をマッピングすることを通じて、個々の課題間の“ギャップ”を特定した。（例）時空間スケール、自然環境と都市、科学と政策、大学と社会



視点

社会・経済活動における  
自然環境問題の“内部化”

### 第2回ワークショップ (2024年2月27日)

- 「流域圏」をフィールドとして、上流・中流・下流とそれらの連続した系における諸研究課題やステークホルダーとの関係性をマッピングする試みを実施
- 流域圏とは・・・異なる機能を持つ多様なシステムが時空間的に連続して分布しながら相互に作用する複合的でダイナミックなシステム



目標

研究の方法論、ステークホルダー連携、社会システム、  
さまざまなギャップ（実施、実装、科学一社会の協働）、科学に基づいた意思決定、行動変容

本研究課題で得られた結論は以下のとおりである。

- ① 地球温暖化と社会変化のもとで自然環境、自然資本、社会・経済活動がモザイク状に混在する「流域圏」の持続可能性に資する総合知の創出には、curiosity-drivenな研究と、解決すべき具体的な課題から想起されるバックキャスト型研究の結合が重要
- ② 学術分野や研究対象（自然、都市、社会）によって「将来」が指す時間スケールが異なり、社会の課題や目標設定に応じたデザインが必要
- ③ 将来の環境と社会の在り方の検討には、データマイニングを通じて過去から学ぶことが有効
- ④ 環境に関する多様な学問を自然と共生した持続可能な社会に役立てるには、市民社会や行政、産業が必要とするデータ・知見の在り方をアカデミアが理解するとともに、社会・経済活動による自然環境の内部化が不可欠
- ⑤ 科学と社会を繋ぐ人材（ファシリテーター）の育成が重要

今後はこれらの分析結果に基づいた具体的な研究計画の創出、地域社会との連携アプローチの模索、研究プロジェクトの企画立案に取り組む。

核融合理論と磁気圏プラズマの高性能計算モデリングの融合研究  
Interdisciplinary Research on Nuclear Fusion Theory and HPC Modeling of  
Magnetospheric Plasma

渡邊智彦 名古屋大学・大学院理学研究科

### 【研究目的】

磁場閉じ込め核融合では、数テスラを超える強力な磁場で1億度におよぶ高温プラズマ（電離したガス）を閉じ込めてることで、核融合反応を連鎖的に発生させることを目指している。この系は、磁場強度やプラズマ温度に数桁の違いはあるが、地球や木星などの磁化惑星周辺におけるプラズマ環境と類似しており、また太陽や他の天体にも同様に強く磁化したプラズマが存在する。磁気核融合研究では、強い非平衡状態にあるプラズマが引き起こす多様な不安定性を回避し安定な閉じ込め状態を実現するために、精緻なプラズマ理論が構築されてきた。特に低周波数領域においては、磁場による非等方性を適切に取り入れた簡約化磁気流体方程式とそれを用いた安定性解析理論や非線形シミュレーションが発達してきた。また、超高温プラズマにおいては、粒子運動論効果や二流体効果が顕著となることから、ジャイロ運動論と呼ばれる理論が、近年、長足の進歩を遂げてきた。本研究では、磁気核融合研究で培われた理論に基づき、かつ、高性能計算科学の手法を援用して、地球磁気圏プラズマの数値シミュレーション研究を進展させ、核融合、宇宙プラズマ、計算科学の融合的研究の推進を目指している。

### 【研究方法】

課題実施初年度である令和5年度においては、(1) 簡約化磁気流体方程式を用いた磁気圏-電離圏結合の非局所シミュレーション、および、(2) ジャイロ運動論の方程式にもとづくオーロラ発達と電子加速の統合シミュレーション、という二つの課題を設定した。いずれも、磁気核融合研究で培われた理論解析手法を用いており、磁場垂直方向には波長が短く磁場平行方向には長い波長を持つ磁気流体的振動を扱う。そのうち、(1)は緯度・経度方向の非局所性を取り入れることのできる流体シミュレーションによって、磁気圏・電離圏のグローバルな構造がオーロラの成長・発達へ及ぼす影響を調べることができる。(2)では、プラズマの運動論と呼ばれる理論を用いて、オーロラ成長にともなう電子加速を自己無撞着に再現することを目指した課題である。本課題の支援を受けて、名古屋大学情報基盤センターにあるスーパーコンピュータ「不老」を用いて、(1)の非線形シミュレーションと(2)のテスト計算を行った。より大規模な計算資源を必要とする(2)の非線形シミュレーションには、スーパーコンピュータ「富岳」を利用した。

本融合研究課題に関連して、地球磁気圏研究を専門とする宇宙地球環境研究所の三好教授と家田助教、ならびに課題参加メンバー間で2023年12月に研究打ち合わせを行った。そこでは、数値シミュレーション結果と衛星・地上観測との比較に向けたアプローチについて議論し、また、今後の理論・数値モデル拡張の方向性について検討を行った。

また、本課題からの支援をもとに、磁気圏-電離圏結合研究において国際的に著名な研究者であるR. Lysak教授（ミネソタ大学）とC. C. Chaston博士（カリフォルニア大学）を2024年3月に訪問し、本課題で得られた結果を含む最新の研究成果について議論を行った。Lysak教授からは、木星磁気圏への応用に関して提案をいただき、また、Chaston博士からは、MMS衛星をはじめとした観測結果との比較などにおいて協力いただけることとなった。

### 【研究成果】

- (1) 簡約化磁気流体方程式を用いた磁気圏-電離圏結合の非局所シミュレーションについて、従来より開発を進めてきたシミュレーションコードを用いて、線形近似の下でオーロラ構造発達の解析を行った。初期に与えた波束状の密度擾乱が、背景対流電場の方向へと電離層上を伝播しつつ、増幅され

る過程を解析した。個々の擾乱は低緯度側へと伝播しながら成長と飽和・減衰を行うが、波束全体としてはフィードバック不安定性と呼ばれる物理機構を介して増幅され、緯度によって異なる磁力線長をもつ磁気圏プラズマ中であっても、局所的な分散関係を満たしつつ低緯度側へと伝播しながらオーロラ構造が発達していく様子が明らかになった。ここまででの成果を論文としてまとめ、国際学術雑誌に投稿した。

引き続き、非線形性を考慮した磁気圏-電離圏結合の非局所流体シミュレーションを行った。非局所モデルにおいても、不安定性を介して発達した擾乱が十分大きな振幅まで成長すると、それに伴う磁場垂直方向の速度変動から2次的な不安定性が成長することが確かめられた。図1に異なる時刻での電離層密度擾乱分布を示す。時刻  $390 R_I/V_A$  では、縞状のオーロラ構造中に渦が発生し、密度の増大領域が反時計回りに回転する様子がわかる。ここで、 $R_I$  は地球中心から電離層までの距離を、 $V_A$  は磁気流体波の伝播速度をそれぞれ表す。時間の経過とともにさらに擾乱が発達すると、その渦はより細かな渦を生成し、乱流状態へと遷移することが明らかになった（図1右）。この乱流状態において、経度方向の波数スペクトルを見ると磁気流体乱流に特徴的な幕乗則を満たしていることが確かめられた。

この成果を踏まえ、本課題について2024年度名古屋大学HPC計算科学連携研究プロジェクトにHPC人材育成枠で応募し採択いただくことができた（代表者・榎剛志）。

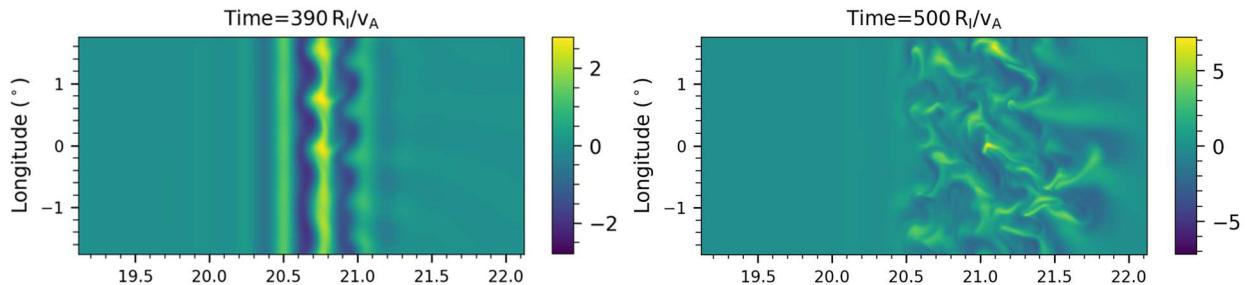


図1：磁気圏-電離圏結合の非局所シミュレーションで得られた電離層密度擾乱分布

- (2) ジャイロ運動論的方程式にもとづくオーロラ発達と電子加速の統合シミュレーションモデルを開発し、2023年度下期よりスーパーコンピュータ「富岳」を用いた解析を開始し、その初期結果を得た。ここでは直線磁場形状を仮定し、局所的な磁気圏-電離圏結合系を考えている。流体モデルの場合と同様に、磁気流体波を介して磁場に沿った電流が運ばれ、電離層上のプラズマ密度が変化する。背景電場が十分大きな値となると、上述のフィードバック不安定性が発達し、オーロラ構造に対応する擾乱が成長する。ここでは、磁気圏プラズマの記述にジャイロ運動論を用いることで、オーロラ発達とともに、磁気流体波による電子加速を自己無撞着に取り扱うことが可能となった。このシミュレーションにより、オーロラ発達をもたらす不安定性の非線形飽和過程において、正味の電子加速が生じることが確かめられた。この成果により、オーロラ発達と電子加速を同時に説明することができるとなり、人工衛星で観測されているアルヴェン・オーロラの成因に首尾一貫した理解を初めて与えることができた。

### 【成果発表】

上述の研究成果について以下の国際学会にて発表を行なった。他に国内学会・研究会にて、12件の発表を行った。あわせて学術論文1編を投稿中である。

1. T.-H. Watanabe, T. Sakaki, K. Fujita, and S. Maeyama, “Simulation of auroral turbulence driven in feedback M-I coupling system”, 7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (Port Messe Nagoya, Nagoya, Nov. 12-17, 2023) (Invited talk).
2. K. Fujita and T.-H. Watanabe, “A nonlinear gyrokinetic model of the magnetosphere-ionosphere coupling system”, 7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (Port Messe Nagoya, Nagoya, Nov. 12-17, 2023) (Contributed poster presentation).

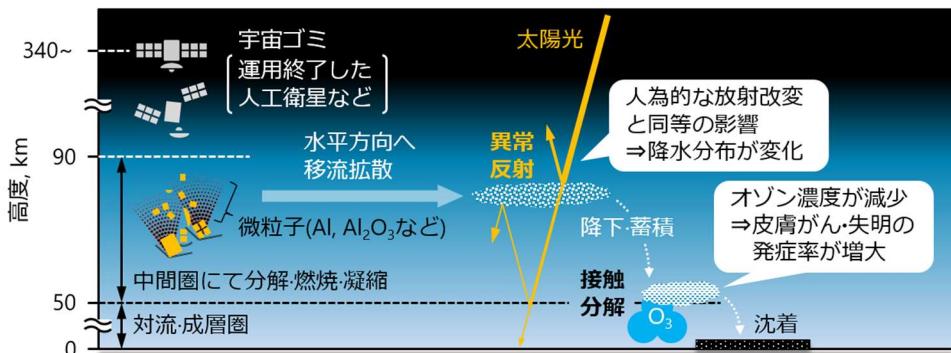
宇宙開発に伴う大気汚染評価  
Investigation of Air Pollution Associated with Space Developments

市原大輔、名古屋大学・大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻

### 【作成要領】

#### 研究の目的

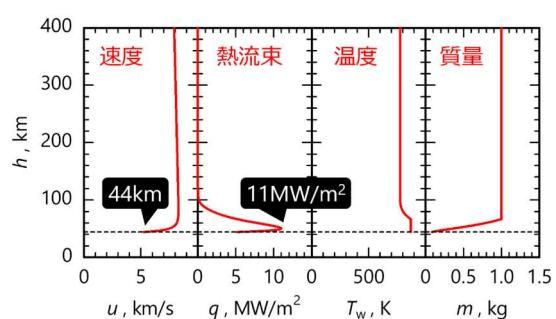
低軌道衛星からの太陽反射光が天文観測の妨げになることをめぐる最近の議論は、宇宙システムを構築する上で持続可能性を考慮する必要性を強く示唆している。特に数万機の低軌道衛星からなるメガコンステレーション計画では使用済み衛星の大気圏再突入過程においてアルミ(Al)やアルミナ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )を主成分とする大量の微粒子が年間 2000 トン以上発生する。これは自然起源宇宙塵の年間飛来量 5000 トン (J. Rojas et al, *Earth Planet Sc. Lett.* **560**, 116794 (2021))に対して 40%に相当し、高高度大気(中間・成層圏)が汚染される可能性が高い(A. C. Boley et al., *Sci. Rep.* **11**, 10642 (2021))。発生した微粒子は浮遊・降下しながら移流拡散し太陽光の異常反射やオゾン( $\text{O}_3$ )層との相互作用を通じて地球大気の化学・力学・放射特性に不可逆的な変化を引き起こす(下図参照)。これは気候工学における人為的な放射改変と同等の影響をもたらし将来世代の気候危機が高まる懸念が大きい(M. N. Ross et al., *Sci. AM.* Feb (2021))。したがって、宇宙産業の持続可能性を高めるべく環境負荷を考慮した適切な国際規制を制定するためには、宇宙ゴミの最終処分時に排出される微粒子及び地球大気への影響に係る基礎データの取得と環境影響評価とが必要である。宇宙ゴミの大気圏再突入手法に関する研究は国内外にてこれまで精力的に実施されてきたが、本研究では再突入による宇宙ゴミの焼却処分そのものが地球大気に及ぼす影響の解明に取り組む。



研究概要図

#### 研究成果の概要

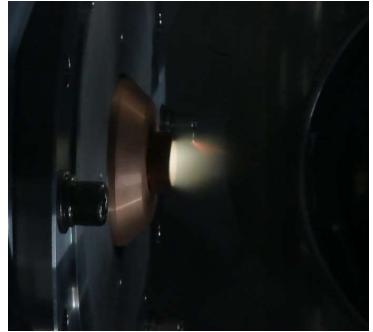
今年度はスケールモデル実験に必要な大気圏再突入時の空力加熱環境を模擬可能な小型高エンタルピー風洞の製作に注力した。高エンタルピー風洞の最重要設計要点として供試体への熱流束が挙げられる。風洞の仕様を決定すべく運動量・エネルギー保存則に基づいて、1U サイズ( $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 10\text{cm}$ )の超小型衛星(質量 1kg)が高度 400km から垂直落下する状況を想定した数値計算を実施した。大気データには全地球標準大気モデルの 1 つである NRLMSISE-00 を用いた。各高度における再突入体の速度、熱流束、表面温度、質量の変化を右図に示す。高度 100km 付近までは大気密度が低いことから空気抵抗に伴う減速及び空力加熱による物体表面の温度上昇は見られず、むしろ重力加速を受け物体の落下速度は向上する。しかしながら高度 100km 未満では大気抵抗による空力加熱が徐々に始まり高度 50km 付近にて熱流束は最大  $11\text{MW/m}^2$  に達した。これに伴って表面温度が物体の昇華温度を上回り、物体の質量が減少し始める。最終的には高度 44km において燃え尽きるものと予測された。本数値計算結果に基づき、高エンタルピー風洞における



高度 400km から自由落下する小型衛星の速度、熱流束、温度、質量履歴

る目標熱流束を  $10\text{MW}/\text{m}^2$  と定めた。

続いて、上記熱流束の達成に必要なプラズマ源を設計し作動試験を行った。圧縮性流体におけるチョーク条件を考慮し、スロート径 3.0mm、ノズル出口径 20mm、半頂角 15 度、設計 Mach 数 5.7 の銅製ラバーノズルも作成した。圧縮空気を作動ガスとすることから電極の酸化が想定される。そこで、市販のプラズマ切断機にも採用されるハフニウム製陰極を用いた。上記再突入計算に基づくと、再突入環境における空力加熱は高度 40-100km にて生じる。この時の大気圧は 30mPa-300Pa と 4 枝にわたって変化する。実験時の雰囲気圧を模擬すべく、直径 1m、長さ 3m の真空チャンバー端部に前述のプラズマ源を設置し本研究にて新規に購入したドライポンプで減圧しつつ、コンプレッサーから圧縮空気を最大 50 slm 供給した。市販のプラズマ切断機用電源 A-70(株式会社ダイヘン製)を用い、放電電流は 15A に設定した。作動試験としてまずは大気圧下にて生成した高速プラズマ気流の写真を右図に示す。窒素特有の黄色く発光する大気圧プラズマがノズル出口から約 20mm にわたって発生していることが確認できる。圧縮空気の供給量を 20-50slm の範囲で変化させると放電電圧は 120-160V にわたって変化した。これにより作成したプラズマ源にて作動ガス流量、即ち物体への熱流束と雰囲気圧とを変化させつつ再突入に伴う空力加熱を部分的に模擬できる高エンタルピー風洞を試作することができた。今後は本風洞にて再突入体を模したアルミ球を実際に加熱し、アブレーションに伴って発生した金属微粒子を捕集・解析する予定である。



試作したプラズマ源の作動試験

デジタルアーカイブの活用可能性と求められる機能について  
Potential utilization of digital archives and required functions

端場純子 名古屋大学附属図書館

## 1. 背景と目的

附属図書館では、東海国立大学機構デジタルユニバーシティ構想基本計画並びに名古屋大学学術データ基盤整備基本計画における取組の一つとして、機構の構成員が収集・作成した画像や動画のデータセットを共有・公開し、研究者や一般市民の利活用に供するためのデジタルアーカイブプラットフォームの構築を進めており、2024年度に公開予定である。収載するコンテンツは、古文書など紙資料をデジタル化したものや、標本画像、種々の写真や動画など、あらゆる分野のデータが対象となる。それらのコンテンツを元の研究領域に捉われず幅広く利用してもらうことで新たな研究が生まれされることを期待している。

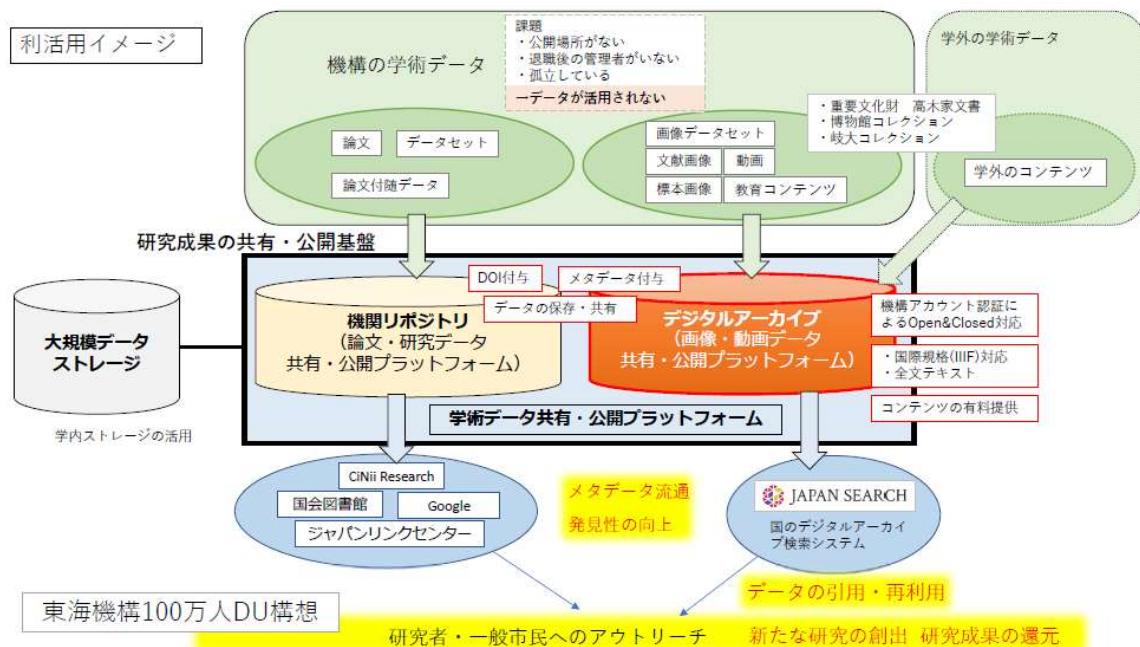


図1 機構デジタルアーカイブプラットフォーム概要図

デジタルアーカイブは特に古典籍の利活用が進んでおり、宇宙地球環境分野では国立極地研究所が国文学研究資料館の古典籍資料を用いて行ったオーロラに関する研究<sup>1</sup>がある。本学は江戸時代の旗本・西高木家の旧蔵文書群である高木家文書を所蔵しており、豊富な治水関係資料に加え、日記等の家政関係文書も多数保有していることから、これら資料の活用を検討するため意見交換会を開催した。

<sup>1</sup> <https://www.nipr.ac.jp/info2023/20230427.html>

## 2. 実施概要

「高木家文書の利活用に関する意見交換会」

日時：2024年2月21日（水）10:00-12:00

場所：中央図書館5階大会議室

参加者：石川寛准教授（人文学研究科 / 附属図書館研究開発室兼任室員），三好由純教授，菊地亮太特任准教授（宇宙地球環境研究所），端場純子，眞野博和，佐藤久美子，鬼塚昌枝，大野尚子，小嶋悦子（附属図書館）

内容：

- 1) 趣旨説明（端場）
- 2) デジタルアーカイブプラットフォームの説明（眞野）
- 3) 高木家文書の概要説明（石川准教授）
- 4) 意見交換

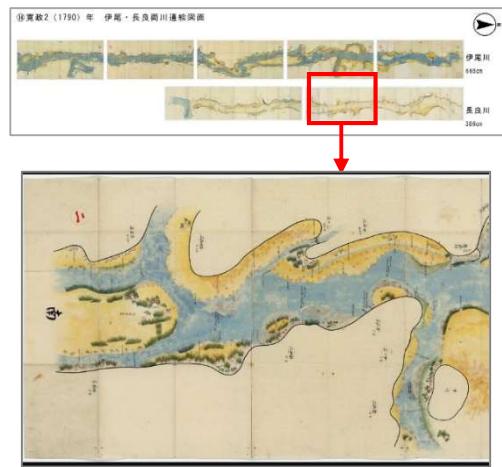


図2 高木家文書 名古屋大学附属図書館蔵

## 3. 意見交換会まとめ

高木家文書は江戸期の旗本高木家の文書群である。江戸初期から明治期まで（17～19世紀頃）の古文書、古記録、絵図類から成り、近世文書では国内屈指の文書群となっている。旗本地行制、木曾三川流域における治水などの特色ある内容を含んでおり、古文書としての研究だけでなく、名古屋市博物館の災害の展示会や減災研究など異分野でも活用されている。18世紀半ばから20世紀にいたる日記の中に自然現象などの記述も含まれており、古記録を使った過去の気象に関する研究や、過去の歴史情報を復元していくという研究もあり得る。

意見交換では次のような意見があった。

- ・紙の原料や状態など、デジタル化で失われる物理的な情報がある。それらの取り込みが課題となる。
- ・絵図に書かれた情報をデータベース化するために、位置座標があるとよい。
- ・日記の記述から気象情報を読み取る場合、くずし字の解読が必要になる。
- ・利活用のためには、機械可読であることや、データの品質管理が重要になる。また、適切なメタデータ項目を用いる必要がある。
- ・メタデータは機械学習による自動付与も考えられる。
- ・具体的な研究プロジェクトがあると認知してもらいやすい。
- ・古文書が読めない研究者にも使いやすい加工されたデータが必要である。

古記録を使った気象研究は他にも事例があり、ユースケースを紹介するワークショップを企画してはどうかという意見もあった。名古屋大学は2024年4月に「デジタル人文社会科学研究推進センター」を設立し、デジタルデータの積極的な公開や相互利活用を促進することをミッションの一つに掲げている。附属図書館は全学の支援組織として今後も分野を超えた融合研究に資する活動をしていきたい。

観測業務におけるヘリコプタ利用の可能性検討  
Investigation of possibility of usage of a helicopter for monitoring  
砂田茂、名古屋大学・工学研究科航空宇宙工学専攻

### 研究目的

本申請研究には2つの大きな目的がある。1つ目は、貴組織の活動にヘリコプタを利用した観測を取り込むきっかけを作ることである。この目的には、以下の3つの背景がある。①貴組織では固定翼機での観測が盛んであると思われるが、固定翼機よりもヘリコプタの方が適した観測が存在する。②一般にヘリコプタのチャータ代は固定翼機のチャータ代に比べ廉価であり、固定翼機でもヘリコプタでも選択可能な場合、ヘリコプタの選択可能性を持っていることは試験実施頻度増大につながる。③貴組織においてヘリコプタでの大気観測の実績が生まれると、富山大学といったヘリコプタを利用し様々な大気観測を行っている機関との共同研究に広がる可能性がある。

2つ目は本課題申請者のグループが提案した重心移動による低振動化法[1]、[2]をラジコンヘリコプタで実証することである。この成果は、広くヘリコプタの利用拡大に貢献できる。もちろん、貴組織における今後の様々な観測業務において、固定翼機だけでなくヘリコプタ利用を選択する可能性拡大（第1番目の目的）に貢献する。

### 研究方法

田屋エンジニアリング㈱に、4枚ブレードロータラジコンヘリコプタの製作を依頼した。製作完了後、まず、振動に大きく影響するブレードの特性を評価した。次に製作機体を用いて田屋エンジニアリング㈱と共に、2024年3月24日、一宮ヘリフライヤーズ飛行場で飛行試験を行った。飛行試験の条件は以下の通りである。

#### 重心位置を変更するための重りの位置

- (ケース 1) シャフトの真下
- (ケース 2) 左後方  $45^\circ$  、シャフトからの距離= $0.2R$  ( $R$ : ロータ半径) の位置
- (ケース 3) 左後方  $45^\circ$  、シャフトからの距離= $0.4R$  の位置
- (ケース 4) 右後方  $45^\circ$  、シャフトからの距離= $0.2R$  の位置

提案手法を用い、他の機体諸元について行った解析における  $4/\text{rev}$  振動（ロータ回転周波数の4倍の周波数での振動）の大きさの順番は、(ケース 4) > (ケース 1) > (ケース 2) > (ケース 3) であった。

#### 取得データ

データ取得装置は2階建てであるが、1階部分の防振の無いIMUによって、加速度3成分、角速度3成分、姿勢角3成分、位置3成分、時間、ロータ回転数を取得した。

#### 飛行

- ・定常前進飛行：10秒程度
- ・定常時機速：140km/h程度

### 研究結果



図1 製作したラジコンヘリコプタ  
(田屋エンジニアリング㈱製)

## ブレードの特性

表1 ブレード諸元

翼型	NACA0012
ブレード長 $l (m)$	0.7(m)
ブレード質量 $M (kg)$	0.217(kg)
単位長さ当たり質量 $m (kg/m)$	0.311(kg/m)
ルートカットオフ $e (m)$	0.086(m)
コード長 $c (m)$	0.06(m)
スキンの厚み $t (mm)$	0.8(mm)
平面形	翼端、翼根部を除き矩形

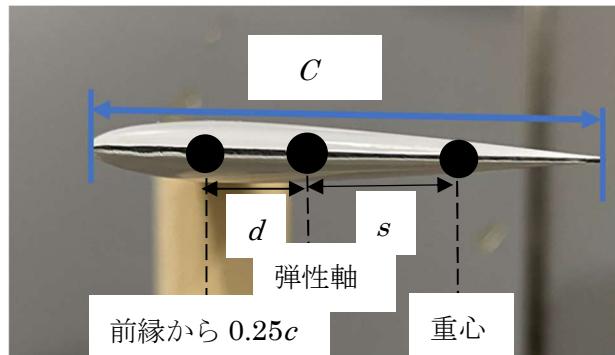


図2 ブレード断面

(左の図の各点の位置は実際の位置を示していない)

$$d = 0.05m(0.08c), \quad s = 0.025m(0.04c)$$

$$EI = 28.3 N \cdot m^2$$

$$GJ = 2.91 N \cdot m^2$$

## 飛行試験

一方に前進する際、前進速度が減小、増加しており、定常前進飛行と見なせるなる時間が極めて短かった。前進速度が最小である時刻付近の飛行を定常前進飛行とみなし、その時間領域での機体  $z$  方向の加速度をFFT処理した。その結果、①ロータ回転周波数の2倍強の周波数で大きな振幅の振動が見られた。原因は分析できていないが、電気的なノイズである可能性が高い。分析を継続する。②4/rev振動は、(ケース4) > (ケース1) > (ケース3) > (ケース2) の順に大きかった。提案手法で予想された順番と(ケース2)と(ケース3)が逆であったが、提案手法による予想と飛行試験における順番がおおむね一致した。

## 考察

重心位置が異なる4つのケースでの4/rev振動の大きさの順について、飛行試験と提案手法との間で差が見られた。この差の原因として、提案手法による振動評価において製作機の諸元が用いられていないこと、飛行試験において十分に長い時間の定常飛行が実現できなかつたことが挙げられる。これらの問題を取り除けば、重心位置の異なる4ケースでの4/rev振動の大小関係は提案手法と飛行試験とで一致する可能性が高いと思われる。

## まとめ

ラジコン機を用いた飛行試験によって、理論解析の成果を基に提案した「重心移動による低振動化」の有効性を確認することができた。今後、実機での飛行試験で同提案手法の有効性を確認する。また、実機において大きく重心移動することは困難であるので、重心移動の代替えとして「シャフトの傾斜や補助翼の利用」[3]を検討する。

## 参考文献

- [1] Yoshizaki, Y., Sunada, S. "Analysis of Rotorcraft Vibration Reduction Using a Center-of-Gravity Offset". Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci. Vol.66, No.1, pp.1–9, 2023.
- [2] 吉崎 裕治、砂田 茂、"回転翼機の振動低減を目的とする重心オフセットが安定性に与える影響について"、日本航空宇宙学会論文集、Vol.71、No.3、pp.105–111、2023.
- [3] 吉崎 裕治、砂田 茂、"回転翼機における振動低減のための重心移動の代替案についての一考察"、日本航空宇宙学会論文集、Vol.71、No.4、pp.174–180、2023.

太陽系年代学の進展と放射線環境変動研究との融合  
Advances in Solar System Chronology and Integration with Studies of the Radiation  
Environmental Changes

(代表者) 渡邊 誠一郎、東海国立大学機構名古屋大学・大学院環境学研究科

【研究メンバー】 渡邊の他、加藤 丈典（宇宙地球環境研究所）、城野信一（環境学研究科）、橋口未奈子（環境学研究科）

【研究目的】 太陽系年代学と太陽系放射線環境の変動研究を融合させ、太陽系進化を理解することを大目的とする。はやぶさ2が持ち帰った小惑星試料の分析から、太陽系年代学には、いくつか検討すべき課題があることがわかった。太陽系の初期同位体比の空間分布、母天体の水質变成年代の相互矛盾、事後の年代擾乱の可能性、銀河宇宙線生成核種の深度依存性などである。これらの課題は同位体計測の高精度化によって顕在化してきた側面があり、太陽系進化の各種年代をより精密に決定していくためにはその解明が求められる。よって、これらの問題を解決するための新たな年代測定法、年代較正法、年代をリセットする過程などを検討することを今年度の目的とした。さらに、宇宙線生成核種を使った宇宙線照射年代の精確な理解についても検討することで、太陽系における放射線環境の変動などについても検討することを来年度の目標とし、その準備も今年度に進めた。

【研究方法】 今年度は11月21日、12月27日、3月8日に3回の研究会を開催し、既存の太陽系の年代測定法を整理・比較し、その問題点や誤差を再検討するとともに新たな年代測定法の適用の可能性や宇宙試料での放射線環境変動の検出を議論した。一方で、探査帰還試料や隕石などの各種年代データの吟味し、初生値の時空間的変動の可能性や、事後プロセスによる年代の不完全なりセットの兆候（購入ソフトウェアを利用）等を調べ、消滅核種の娘核種による相対年代と鉛-鉛法による精密絶対年代との較正法について再検討することは来年度に継続することとした。また、初期同位体比を仮定できない元素や単核種元素について、地質学で用いられてきた化学年代測定法の応用を検討した。日本惑星科学会やJAXA宇宙科学研究所（ISAS）での会合、*Lunar and Planetary Science Conference*などの場を通じて、情報収集や意見聴取を行った。さらにISAS次期戦略的中型探査候補「次世代小天体サンプルリターン」の検討にも参画し、年代学の側面から彗星物質の試料の科学的価値や採取法について議論した。

【研究結果】 「はやぶさ2」が持ち帰った試料から得られた小惑星リュウグウの同位体情報と年代学、宇宙線照射環境について整理した。リュウグウ粒子中の炭酸塩鉱物から得られた $^{53}\text{Mn}$ - $^{53}\text{Cr}$ 年代は、母天体中の水質变成が進行した時期の年代を示すはずだが、複数得られている二次イオン質量分析法（SIMS）で得られた年代には相互に誤差範囲を超える差異があり、炭酸塩の標準試料の違いによる可能性が指摘されている（Yokoyama et al. 2022; E. Nakamura et al. 2022; McCain et al. 2023）。最近、誘導結合プラズマ質量分析法（ICP-MS）による $^{53}\text{Mn}$ - $^{53}\text{Cr}$ 年代が測定され、太陽系最初期のCaとAlに富む包有物（CAI）の形成後3.8–7.0 Myrとの値が得られている（Yokoyama et al. 2023）。SIMSによる炭素質コンドライトの水質变成年代は多く報告されているので標準物質の選択の問題は更なる検討を要する。

始原的隕石の同位体比が、従来の非炭素質隕石（NC）と炭素質隕石（CC）の二分性に加えて、CIコンドライトを第三成分とする三分性を示すことが、CIコンドライトに酷似するリュウグウ試料の同位体分析によって確立された（例えば、Hopp et al. 2022）。また、炭酸塩を豊富に含む等からリュウグウ母天体はCO<sub>2</sub>スノーラインより外側で形成された可能性が高い（T. Nakamura et al. 2022）。リュウグウや隕石の同位体情報を整合的に説明するため、同位体比の異なる複数の《成分》を組み込んだ惑星形成統一シミュレーションの重要性が認識され、渡邊は科研費（基盤B）の申請を行った（採択の内示があった）。次頁の図には太陽系形成の時空間図にこの惑星形成統一シミュレーションが扱う範囲（天体とプロセス）を楕円で囲んでいる。特にダスト落下<sup>1</sup>の時間スケールとCAIとコンドリュール<sup>2</sup>の年代差の不整

<sup>1</sup> 原始惑星系円盤のガスとダストは公転速度差があるため、ガス抵抗を受け角運動量を失ったダストが螺旋を描き太陽方向へ落下する。直径 1 mm の緻密粉体粒子が 1 au 落下する時間は~1 Myr である。

<sup>2</sup> 始原隕石中の熔融固化した球粒。 $^{26}\text{Al}$ が $\beta^+$ 崩壊した $^{26}\text{Mg}$ の過剰量の比較から CAI より数 Myr 遅れての形成が示唆され、その間、>1 mm 大の CAI がいかに太陽に落ちずに円盤に保持されていたかが未解決。

合問題やダスト落下に打ち勝って微惑星が形成できる範囲を明らかにすることなどを目指したい。

上記の不整合問題解決の1つのアイディアは、惑星形成時の微惑星衝突の副産物としてコンドリュールが生成されたとするモデルである。この場合、まずCAIが太陽系最初期にできて、第一世代の微惑星に保持され、その後の惑星成長期にコンドリュールが生成され、それが第二世代の微惑星にCAIとともに取り込まれたとすれば、CAIとコンドリュールの生成年代差を説明できる可能性がある。

隕石有機物の直接的な年代測定は困難であり、現状では周囲の変質鉱物（含水珪酸塩や炭酸塩）からの推定などの間接的な方法しかない。今すぐとも将来的に実現の可能性のある隕石有機物の年代測定法を検討していく。また、隕石の有機物構成元素（H, C, N, O, Sなど）の同位体比から読み出せる先太陽系時代および太陽系形成時の情報を整理していく。

隕石の鉱物粒子に対してX線マイクロアナライザ(EPMA)を用いてU, Th, Pbの量を正確に測定することでその年代を決めるCHIME法が適用できないか検討を進める。地球物質のように $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ の初生比を仮定できないため、宇宙物質ではTh  $\gg$  Uである鉱物を見つける必要があるなど制約が厳しい。

放射線環境変動研究においては、自転進化に伴う太陽活動の超長期変動(1 Gyrスケール)によって銀河宇宙線フラックス変化を宇宙試料から検出できないか、軌道傾斜角の違う太陽系小天体の表層物質から太陽風変動の3次元構造を制約できないかなどの可能性を探究する。

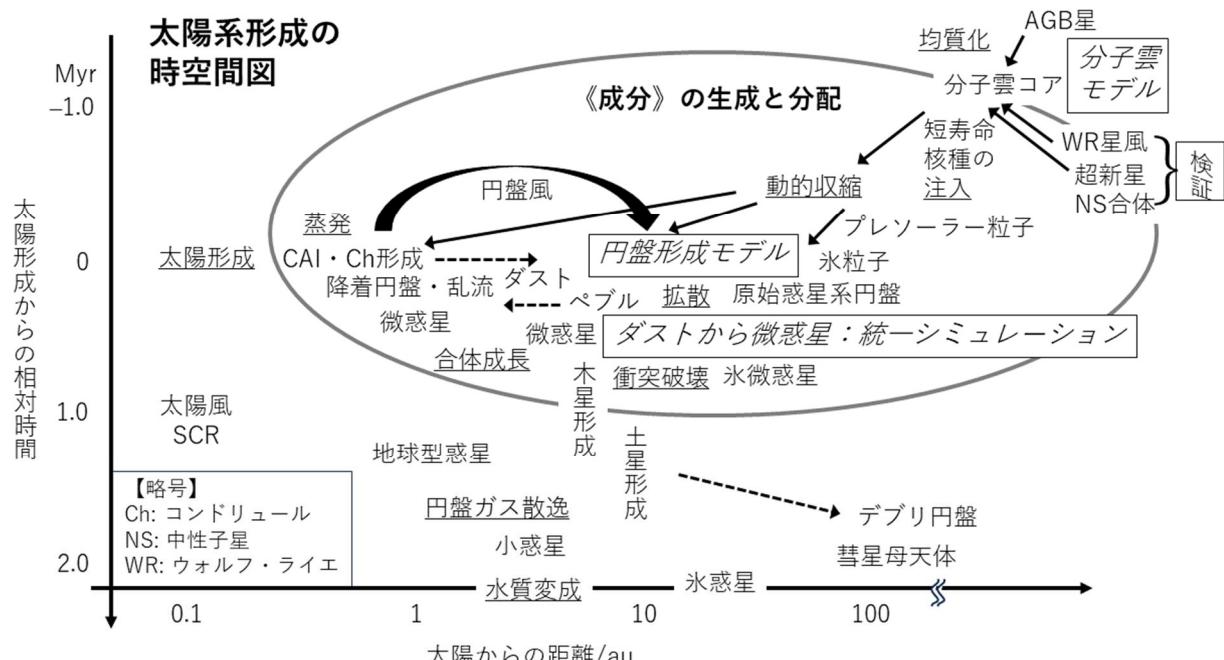
【2024年度に向けて】来年度は、現メンバーに加えて、今年度の研究会で講演いただいた環境学研究科の日高洋教授と齊藤天晴博士（来年度PD）および宇宙地球環境研究所の三好由純教授と岩井一正准教授に加わっていただき、太陽系年代学と放射線環境変動研究の融合をさらに進めていく予定である。

【引用文献】（渡邊誠一郎は以下のすべての論文の共著者である）

- Hopp, T. et al. 2022, *Science Adv.* **8**, add8141
- McCain, K. A., et al. 2023, *Nature Astron.* **7**, 309–317
- Nakamura, E., et al. 2022, *Proc. Japan Acad. Ser. B* **98**, 227–282
- Nakamura, T., et al. 2022, *Science* **379**, abn8671
- Yokoyama, T., et al. 2022, *Science* **379**, abn7850
- Yokoyama, T., et al. 2023, *Science Adv.* **9**, adi7048

### 【成果発表】

渡邊誠一郎、はやぶさ2から見えてきた太陽系形成過程の制約、日本惑星科学会秋季講演会、広島市、2023.10.11



プラズマ推進機を利用した宇宙プラズマシミュレータの検討  
Preliminary Study of Space Plasma Simulator Using a Plasma Thruster

名古屋大学工学研究科 杵淵紀世志

## 1. 研究目的

地球環境、天文物理等における仮説やモデル検証、基礎物理過程の模擬・観察などへの貢献を目指し、宇宙用プラズマ推進機を利用した宇宙プラズマシミュレータ構築の可能性を探る。本研究では、推進機下流におけるプラズマデータを取得し、その特性を議論する。

## 2. 研究方法

本研究では図1に示すプラズマ推進機を用いる。陽極・陰極間の放電に対し、周囲に設置したコイルにより磁場を印加可能な推進機である。コイルは水冷が一般的なところ、極低温の液体窒素での冷却により、磁束密度0.5T程度までの強磁場を印加可能であり、広範囲の印加磁場にてプラズマのデータが取得可能という特徴を有す。図2に実験のセットアップを示す。実験は真空チャンバ内で行った。プラズマ計測はラングミュアプローブを用い、推進機中心軸上下流200~400mmの範囲において電子温度 $T_e$ 、プラズマ密度 $N_e$ を計測した。実験条件を表1に示す。推進機の作動ガスとしてはアルゴンを用いた。

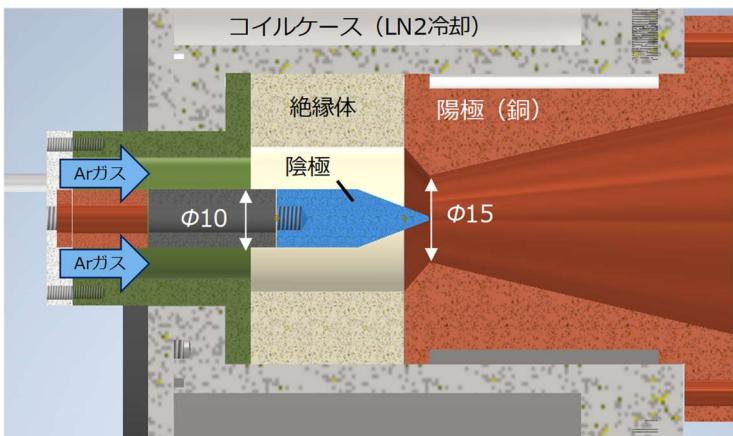


図1 使用したプラズマ推進機の構成

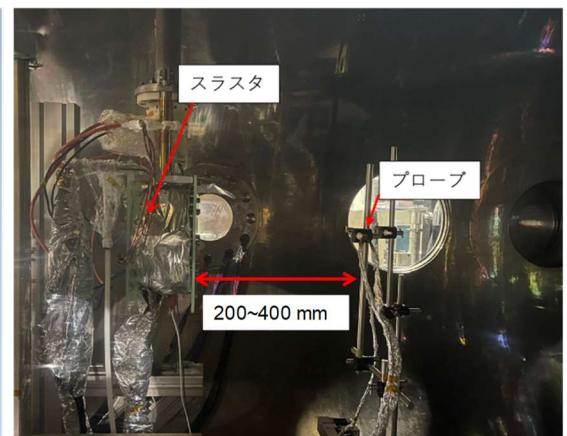


図2 実験のセットアップ

表1 実験条件

推進機内磁場 $B$	59, 118, 235, 353, 470 mT
放電電流	20, 30, 40 A
アルゴン流量	500, 700, 900 sccm
推進機からの距離	200, 300, 400 mm

## 3. 研究結果

図3に作動中の推進機を示す。磁力線に沿ったアルゴンプラズマの発光が確認できる。図4に推進機内部の磁束密度 $B$ に対するプローブ計測部における電子温度、プラズマ密度の変化を示す。プローブ設置位置は推進機下流300mmである。磁場を59から470mTまで広範に変化させることにより、 $T_e=0.5\sim2.5\text{eV}$ ,  $N_e=10^{18}\sim10^{20}\text{m}^{-3}$ の範囲のアルゴンプラズマを生成できることを確認した。強磁場下では電子が磁力線に拘束されることにより電子・中性粒子間の電離衝突が促進され、効率的にプラズマが生成されたものと考えられる。磁束密度が上昇するとプラズマ生成の促進に伴い電子温度は低下している。一方、アルゴン流量、放電電流に対する電子温度、プラズマ密度の変化は磁束密度の変化に比べ小さかった。

図5に推進機からの距離に対する電子温度、プラズマ密度の変化を示す。推進機の作動条件は印加磁場118mT、アルゴン流量900sccm、放電電流30Aである。プラズマ密度の変化は大きくはないが、電子温度は推進機からの距離200mmにおいて6eVと300, 400mmに対し大幅に高い値を示した。



図3 作動中の推進機

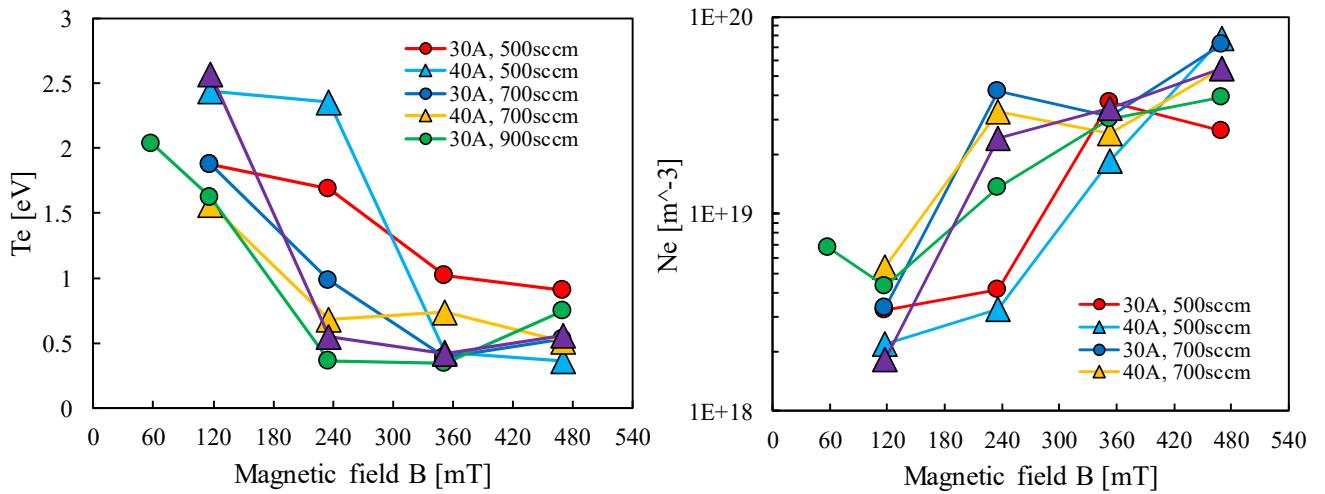


図4 推進機磁束密度に対する電子温度, プラズマ密度 (推進機下流300mm)

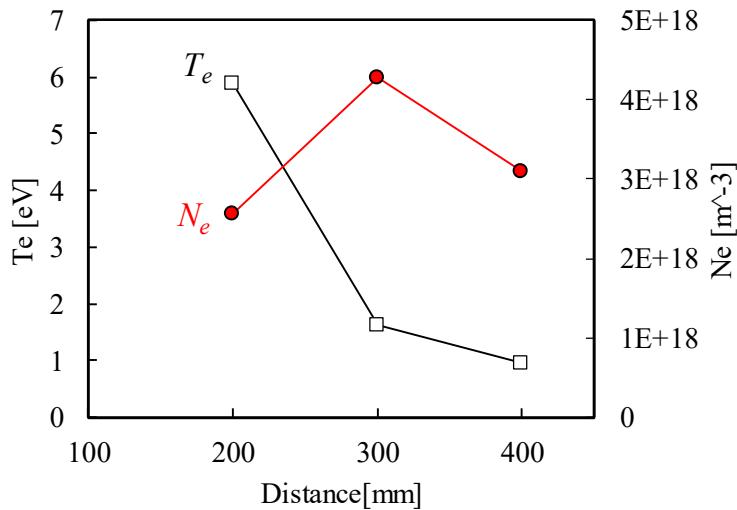


図5 推進機からの距離に対する電子温度, プラズマ密度の変化 (118mT, 900sccm, 30A)

#### 4. まとめ

プラズマ推進機の宇宙プラズマシミュレータとしての利用可能性調査のため、ラングミュアプローブによる推進機外部のプラズマ計測を実施した。今回使用した推進機特有の広い印加磁場範囲によって、 $T_e=0.5\sim6\text{eV}$ ,  $N_e=10^{18}\sim10^{20}\text{m}^{-3}$ 程度のアルゴンプラズマが得られることを確認した。アルゴンプラズマの流速は数km/s程度と推定される。推進機からの距離によりプラズマの状態が大きく変化する可能性が示唆された。今後、推進機周囲のプラズマ分布の追加計測や、作動ガス種の変更の影響調査が望まれる。