

2023年度共同利用研究報告書

2024年02月06日

所属・職名 芝浦工業大学 工学部電気工学科・准教授

川嶋 嶺

		整理番号	2023a022	
1.研究計画題目	希薄プラズマ解析の産業応用に向けた数理モデルと数値計算手法の深化			
2.新規・継続	新規			
3.種別	一般研究			
4.種目	短期共同研究			
5.開催方法	ハイブリッド開催			
6.研究代表者	氏名	川嶋 嶺		
	所属 部局名	芝浦工業大学 工学部電気工学科	職名	准教授
7.研究実施期間	2023年10月31日(火曜日)～2023年11月02日(木曜日)			
8.キーワード	プラズマプロセス、イオンエンジン、プラズマシミュレーション、異方性拡散問題、Mixed Finite Volume Method、離散ガラーキン法			
9.参加者人数	33人			

10.本研究で得られた成果の概要

本共同研究は半導体製造装置に代表される産業用プラズマ源や宇宙推進用イオンエンジンなどに現れる希薄プラズマ流の解析技術に焦点を当てたものである。プラズマ装置開発、数理科学研究、数値シミュレーションのスキーム研究、商用コードを含むプラズマシミュレーション開発を行う研究者らによる研究コミュニティを形成することで、数理科学から装置開発までの“縦”の分野融合を目指した。2日間にわたる研究会では7名による講演が行われ、海外研究機関に在籍する研究者を除いては、講演者はすべて現地対面での講演を行った。研究会では磁化されたプラズマの流れに現れる異方性拡散問題の数値計算上の問題について意見交換が行われた。この中で異方性拡散問題に対し、構造保存型数値解法という考え方が有用である可能性が示唆された。本短期共同研究における議論によって、異方性拡散方程式に対する構造保存型数値解法という新展開がもたらされた。数理科学、プラズマシミュレーション、そして装置開発という縦の連携を今後も活発なものとするべく、共同研究活動を継続していきたい。

九州大学マス・フォア・インダストリ研究所

2023 年度 短期共同研究 成果報告書

研究題目 : 希薄プラズマ解析の産業応用に向けた数理モデルと数値計算手法の深化

研究代表者: 芝浦工業大学 川嶋 嶺

1. 採択から会合まで準備段階で行ったこと

短期共同研究における研究会を開催する上で、どのような研究者・技術者に声をかけて招待すべきか、という検討を行った。この検討においては九州大学マス・フォア・インダストリ研究所の田上准教授を始め、数名の研究者の方にご助力頂いた。希薄プラズマ流の産業応用として半導体製造装置に代表される産業用プラズマ源やイオンエンジンに代表される宇宙推進用プラズマ源を想定しており、これらの装置開発に携わった経験を持つ民間企業の技術者を招くこととした。このほか、数理科学研究、数値シミュレーションのスキーム研究、商用コードを含むプラズマシミュレーション開発の研究を行う研究者を招き、数理科学から装置開発までの“縦”の分野融合を目指す研究集会とすることとした。講演依頼を行った研究者・技術者の方々にはすべてご快諾頂き、さらに海外研究機関に在籍する研究者を除いては、現地対面での講演をして頂けることとなった。研究会の開催にあたっては、分野融合を目指した研究コミュニティの形成を継続して活性化させたい狙いがあったため、対面参加により人的交流を行えたことは有り難い点であった。

2. 短期共同研究以前の研究の状況

希薄プラズマ流れは半導体製造における表面プロセスや人工衛星用イオンエンジンなどで現れる。これらのプラズマ装置では磁場を用いて流れの制御を行うが、強く磁化されたプラズマの流れは硬直性の高い異方性拡散問題となり、数値的振動を抑えた計算が困難であることが知られていた。数理科学分野ではこの問題に対する研究が古くから行われており、例えば 2 階微分からなる異方性拡散方程式を、1 階の双曲型方程式系に等価変換して計算するアプローチ（以下双曲型スキーム）や離散ガラーキン（DG）法の適用などが研究されてきた。しかしながらこれらの手法は、テストケースでは優位性が示されているものの、プラズマの実用的な解析に応用する上での知見が限られているため、実用解析で利用された例は非常に限られていた。

異方性拡散問題に対する双曲型スキームは研究代表者らによって提案されたものであるが、最近ではこのスキームをホールスラストと呼ばれる宇宙機用イオンエンジンのシミュレーションに適用する試みが行われている。ホールスラストでは数値的振動を抑えた計算手法によって、プラズマ中に発生する微小擾乱の解析を行うことが求められている。応募者らは双曲型スキームを発展させた手法によって、微小擾乱を捉えたプラズマ流れシミュレーションに成功した。しかしながら、現状では双曲型スキームにおける前処理のチューニングや、高次精度スキーム

などの適用可能範囲は十分に検証されておらず、シミュレーションコードの商用化や、装置開発へ向けた実用化を図る上では課題が残っていた。

3. 研究会における発表者と発表内容

短期共同研究の研究集会は 2023 年 10 月 31 日、11 月 1 日の 2 日間にわたって行われ、7 名による講演が行われた。オンライン聴講を含めた登録者は 33 名に上り、内訳として大学から 25 名、独立行政法人 1 名、民間企業 6 名、海外研究機関 1 名であった。研究会は主として産業界からシミュレーション研究者への要請と、シミュレーション研究者から実用解析へと向けた提案とをすりあわせ、課題を共有して認識する場とする狙いであった。

講演会 1 日目は宇宙推進及び産業用プラズマ源におけるプラズマ解析と数理に関する講演が行われた。川嶋（芝浦工業大学）から研究会の主旨と注意事項に関する説明が行われた。引き続き川嶋からホールスラストと呼ばれる宇宙推進用プラズマ源におけるプラズマ流の特性と、磁化された電子流れの偏微分方程式の特徴、及び異方性拡散問題について紹介された。異方性拡散問題に対し、2 階微分方程式からなる拡散方程式を、1 階の双曲型方程式系に等価変換して計算する双曲型スキームについて説明され、さらに現状の課題について議論が行われた。肥田（九州大学）の講演では、粒子モデルを用いたホールスラストのプラズマ揺動現象の解析について報告され、プラズマ揺動現象が磁化された電子の流れに及ぼす影響について紹介された。濃野（宇宙科学研究所）の講演では、人工衛星「はやぶさ 2」などで用いられたイオンエンジンにおける、宇宙機—プラズマ間の相互干渉に関するプラズマ解析の報告が行われた。特に、磁化された電子流れ解析の難しさとその解決方法について議論された。1 日目最後の講演は袖子田（株式会社 IHI）によるもので、宇宙プラズマ推進機ホールスラスト、電子源、そして半導体製造用イオン注入装置の研究開発に関する紹介が行われた。IHI は国産初のホールスラストを宇宙へ打ち上げようとしているが、その開発における話題や数値シミュレーションが貢献しうる点などを議論することができた。

講演会 1 日目の夜には博多市内で少人数での懇親会が行われ、民間企業における数理科学や数値解析技術の応用や、共同研究の可能性について情報交換が行われた。

講演会 2 日目はプラズマ源の数値シミュレーションに応用しうる、他分野での研究を中心に議論が行われた。Chamarthi（カリフォルニア工科大学）は圧縮性流体 CFD の高精度スキームの開発を行っており、CFD における最近の話題や数値解析技術に関して紹介された。田上（九州大学）からは電磁場解析におけるハイパワーコンピューティングとその数理に関する話題が提供された。2 日目最後の講演は池田（アテナシス）によるもので、アテナシス社にて提供する Quantemol 製品や商用コード



図 1 研究会 2 日目の様子。九州大学伊都キャンパス IMI コンファレンスルームにて開催。

(QVT) を利用した Neutral Loop Discharge Plasma の解析例、そして最近の半導体製造業界の動向などが紹介された。特に研究会 2 日目では、プラズマシミュレーション技術の更なる発展や商用化を目指す上で有意義な議論を行うことができた。

4. 研究会後の議論や展開

研究会における意見交換を通じ、異方性拡散問題の数値シミュレーションにおいて、構造保存型数値解法という考え方が有用である可能性が示唆された。異方性拡散問題は安定的な計算が困難であるという点の他に、拡散問題が本来満たすべき性質である離散最大値原理を満たさない数値解が得られる点も問題となっていた。これらの問題について、異方性拡散方程式の数理を、構造保存型数値解法の考え方から捉え直すことで、統一的に解決するアプローチを見いだすことができる可能性がある。

研究代表者らが解析を進める宇宙機用イオンエンジンのプラズマ擾乱解析では、異方性拡散方程式の計算において離散最大値原理が満たされることの重要性が改めて認識された。プラズマ擾乱の解析において、離散最大値原理を満たしていない数値スキームによってプラズマの擾乱が不必要に増幅または発生している懸念がある。異方性拡散方程式に対する構造保存型数値解法という新展開へ向けて、研究代表者を中心に研究調査が開始された。

また本短期共同研究における交流をきっかけとして、プラズマ装置開発及び数理科学研究における研究コミュニティを形成することができた。2023 年 12 月に株式会社 IHI の横浜事業所の見学会を実施し、宇宙機用ホールスラストの実験設備などの見学を行うことができた。また 2024 年 3 月には東京大学においてプラズマの数理に関する実施予定である。数理科学、プラズマシミュレーション、そして装置開発という縦の分野連携を今後も活発なものとするべく、共同研究活動を継続していきたい。

希薄プラズマ解析の産業応用に向けた数理モデルと数値計算手法の深化

Mathematical Model and Numerical Schemes for Industrial Applications of Rarefied Plasma Analysis

10月31日 (火)

10:00-11:00

講演者：川嶋 嶺 (芝浦工業大学 工学部)

講演タイトル：プラズマ源における磁化された電子の偏微分方程式と解法

11:00-12:00

講演者：肥田 愛蘭 (九州大学 総合理工学研究院)

講演タイトル：数値シミュレーションを用いたホールスラストのプラズマ揺動解析

13:30-14:30

講演者：濃野 歩 (東京大学, 宇宙科学研究所)

講演タイトル：宇宙機-プラズマ間相互作用評価に向けた Hybrid-PIC 計算

14:30-15:30

講演者：袖子田 竜也 (株式会社 IHI)

講演タイトル：宇宙推進及び産業用プラズマ源の開発

15:30-17:00

宇宙推進分野におけるプラズマ解析技術に関する議論

11月1日 (水)

10:00-11:00

講演者：Sainadh Chamathi (California Institute of Technology)

講演タイトル：Gradient-Based Reconstruction Approach for Compressible Flows

11:00-12:00

講演者：田上 大助 (九州大学 マス・フォア・インダストリ研究所)

講演タイトル：TBD

13:30-14:30

講演者：池田 圭 (アテナシス)

講演タイトル：商用コードを用いたプラズマシミュレーション

【非公開セッション】

14:30-15:30

講演者：宮下 大

講演タイトル：製造業におけるプラズマシミュレーションとその数理

15:30-17:00

産業分野におけるプラズマ解析技術に関する議論

11月2日（木）

【非公開セッション】

10:00-17:00

希薄プラズマ解析流れの支配方程式と数理に関する共同研究

※研究実施期間：2023年10月30日(月)～11月3日(金)

※公開日：2023年10月2日(月)～11月10日(金)

【開催方法】

開催は

②対面とオンラインのハイブリッド（関係者のみ現地参加可能、一般参加者はオンライン参加）

とする。講演者のうち、川嶋・肥田・濃野・袖子田・田上・池田・宮下は現地での講演、Chamarthi はオンライン講演の予定。

また【非公開セッション】となっているものを除き、Zoomによる閲覧を可とする。

H P 掲載用英文

Speaker: Rei Kawashima (Shibaura Institute of Technology)

Title: PDEs and Numerical Methods for Magnetized Electrons in Plasma Sources

Speaker: Aika Koeda (Kyushu University)

Title: Numerical Simulation of Plasma Perturbations in Hall Thruster

Speaker: Ayumu Nono (The University of Tokyo, ISAS/JAXA)

Title: Hybrid-PIC Simulation for Spacecraft-Plasma Interactions

Speaker: Sainadh Chamarthi (California Institute of Technology)

Title: Gradient-Based Reconstruction Approach for Compressible Flows

Speaker: Tatsuya Sodekoda (IHI Corporation)

Title: Development of Space Propulsion and Industrial Plasma Sources

Speaker: Kei Ikeda (Athenasys)

Title: Plasma Simulation with Commercial Software

Speaker: Masaru Miyashita

Title: Plasma Simulation in Manufacturing Industry and Its Mathematics

Speaker: Daisuke Tagami (Kyushu University)

Title: TBD