

京都大学教育研究振興財団助成事業  
成果報告書

2024年 9月 6日

公益財団法人京都大学教育研究振興財団

会長 藤 洋作 様

所属部局・研究科 大学院工学研究科

職名・学年 講師

氏 名 成田 絵美

助成の種類	令和6年度 ・ 国際研究集会発表助成			
研究集会名	(和文)第5回データ駆動型プラズマ科学に関する国際会議 (英文)The 5th International Conference on Data-Driven Plasma Science (ICDDPS-5)			
発表形式	<input checked="" type="checkbox"/> 招待 ・ <input type="checkbox"/> 口頭 ・ <input type="checkbox"/> ポスター ・ <input type="checkbox"/> その他( )			
発表題目	(和文)ニューラルネットワークを利用した乱流輸送モデルの構築と核融合プラズマの統合シミュレーションへの適用 (英文)Development of a neural-network-based turbulent transport model and its application to integrated simulations of fusion plasmas			
開催場所	アメリカ・カリフォルニア州・バークレー・カリフォルニア大学バークレー校			
渡航期間	2024年 8月 12日 ~ 2024年 8月 18日			
成果の概要	タイトルは「成果の概要／報告者名」として、A4版2000字程度・和文で作成し、添付して下さい。「成果の概要」以外に添付する資料 <input checked="" type="checkbox"/> 無 <input type="checkbox"/> 有( )			
会計報告	交付を受けた助成金額	350,000円		
	使用した助成金額	350,000円		
	返納すべき助成金額	0円		
	助成金の使途内訳 (差し支えなければ要した経費 総額をご記入ください)	費目	金額(円)	
		航空運賃	348,480円	
		宿泊費	160,162円	
		滞在費(日当)	33,400円	
		学会参加費	12,239円(850ドル)	
その他		3,820円(国内移動)		
	以上に助成金を充当			
当財団の助成について	当該国際会議における意義を認め、支援していただいたことに感謝しております。近年は円安の影響で国際会議に出席する機会を制限する状況です。新型コロナウイルス蔓延が収束し、国際会議のほとんどは現地開催のみとなり、ハイブリッド開催は減少しています。当該国際会議も現地開催のみでしたが、参加させていただくことができ、発表後の質疑の時間だけでなく、休憩時間にも海外の研究者と議論することができました。帰国後もメールにて情報交換をしております。このような機会は国際共同研究件数の増加に不可欠だと考えていますので、採用件数を増やしていただくと京都大学のさらなる発展に繋がると考えています。この助成金は他の予算と合わせて使用でき、非常に助かりましたので、採用件数の増加に伴い1件あたりの助成金を多少減額しても良いのではないかと考えています。			

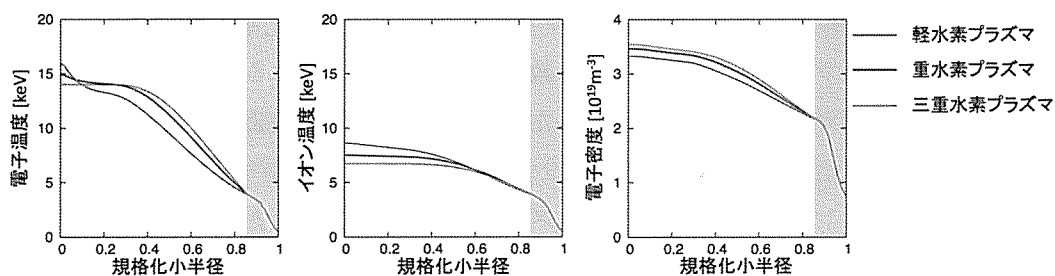
## 成果の概要／成田絵美

被助成者は2024年8月12-16日の日程で米国、カリフォルニア大学バークレー校で開催された第5回データ駆動プラズマ科学国際会議（ICDDPS-5）に参加した。本国際会議は核融合プラズマやプラズマプロセスなどの分野においてデータ駆動型の研究を行なっている研究者に加え、情報科学や機械学習の専門家が集まり、各研究領域における機械学習の適用方法や最新のデータ解析及び機械学習の手法を紹介し、情報交換や今後のデータ駆動科学の発展について議論する会議である。日本・米国・欧州各国などから参加者が集まり、50件の口頭発表（プレナリー講演と招待講演を含む）と47件のポスター発表が行われた。口頭・ポスター発表ともに活発な議論が行われた。

被助成者は”Development of a neural-network-based turbulent transport model and its application to integrated simulations of fusion plasmas”という題目で、核融合プラズマの性能を評価する数値シミュレーションでの利用に適した乱流輸送モデルの開発について招待講演を行なった。核融合プラズマ中では電場と磁場の揺らぎに起因する乱流が生じており、乱流によってプラズマの外へと粒子や熱が運び出される。このような現象を乱流輸送と呼び、乱流輸送によって運び出される粒子や熱の量である流束を予測する数値モデルを乱流輸送モデルと呼ぶ。乱流輸送によってプラズマの密度や温度が下がり、核融合出力が低下するため、乱流輸送モデルは核融合プラズマの性能評価を高精度に行うための鍵となる。流束を正確に予測するためには物理現象を忠実に再現する第一原理計算が求められるが、その計算コストは高く、ある程度簡約化された乱流輸送モデル（簡約化乱流輸送モデル）を使用した場合でも核融合プラズマの性能評価に数時間から数日を要する。現状の核融合研究分野は、核融合プラズマを効率よく運転するためのシナリオを実験装置を使いながら開発したり、核融合発電を実証するための装置を設計したりしている段階にある。このような研究において数値シミュレーションによるプラズマの性能評価が実施されるが、先述のような計算時間は繰り返しの試行に向いておらず、物理現象に対する忠実度の低い乱流輸送モデルが選択されることが多かった。そこで、忠実度が比較的高い簡約化乱流輸送モデルの振る舞いを高速に模擬する機械学習モデルの開発がこの10年で国内外で進んだ。ここでは機械学習モデルとしてニューラルネットワークモデルが用いられている。現状ではプラズマの性能評価を行う際に用いられる乱流輸送モデルとしての地位を確立したと言える。被助成者もニューラルネットワークモデルを利用した乱流輸送モデルの開発を進めているが、機械学習を行うための教師データとして、簡約化乱流輸送モデルではなく、簡約化される前の第一原理計算を用いているため、高速化だけでなく核融合プラズマの性能評価の精度を向上させることができる。本招待講演では、そのような乱流輸送モデルの開発方法を示し、さらに、現在仏国で建設中の国際核融合実験炉ITERを想定したプラズマの性能評価を紹介した。

被助成者が開発した乱流輸送モデルは、電場と磁場の揺らぎの成長率とその波長の逆数

(波数)を第一原理計算を真似てニューラルネットワークモデルにより高速に算出する。この特徴を活かすことにより水素同位体効果と呼ばれる現象をプラズマの性能評価に反映させることに成功した。これまで核融合プラズマの実験の多くが軽水素もしくは重水素を用いて行われてきた。しかし、核融合反応は重水素と三重水素の混合プラズマにおいて効率よく起こることが分かっている。そのため、水素同位体の質量の違いによる流束の変化を知ることが核融合反応の発生をより精度良く予測することに繋がる。複数の実験装置において質量が大きくなるほど流束が抑制され、高温・高密度のプラズマが得られ、性能が上昇することが示されている。このような現象を水素同位体効果と呼び、第一原理計算による物理現象の解明が進められてきた。第一原理計算によりその要因が示されたものの、その結果をプラズマの性能評価に反映させることは難しかった。被助成者の乱流輸送モデルはこれを可能とした。図ではプラズマの電子温度、イオン温度、電子密度の空間分布を予測した結果である。ここでは軽水素、重水素、三重水素の3ケースのプラズマを仮定しており、ITERの初期プラズマを想定したものとなっている。電子温度と電子密度は質量が大きくなるほど上昇するが、これは質量が大きくなるほど抑制された流束を乱流輸送モデルが算出しているためである。ITERの初期実験では電子を加熱する装置が用いられることが予定されており、温度は電子の方がイオンよりも高い値となる。イオンは電子との衝突による熱緩和によって加熱されるが、熱緩和の量は質量に反比例するため、イオン温度は質量が小さいほど上昇する。プラズマ全体の性能は高温の電子に依存しており、質量と共に性能が上昇するという実験と同様の傾向を再現できている。



図：軽水素、重水素、三重水素のプラズマを仮定した場合の規格化小半径方向の電子温度、イオン温度、電子密度の分布の予測結果。装置はITERを想定している。影を付けた規格化小半径が0.85よりも大きい領域では、3ケースが同じ値を持つように固定している。

上述の招待講演の後には、第一原理計算を教師データとしたニューラルネットワークモデルの開発に関する議論を他国の研究者と行った。また、図中で影を付けた領域は上述の乱流輸送モデルの適用対象外であったが、当該領域に対するモデルの開発を被助成者は始動させており、この新規モデルの開発についても他国の研究者と意見を交換することができた。帰国後もメールにて情報交換を継続しており、今後の研究の進展に資する成果も得られた。