

令和 5 年 5 月 30 日現在

機関番号：82502

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14450

研究課題名（和文）第一原理乱流計算と機械学習モデリングによる核融合プラズマの分布形成過程の研究

研究課題名（英文）Study of profile formation processes of fusion plasmas by first-principle turbulence calculations and machine learning modeling

研究代表者

成田 絵美 (Narita, Emi)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・那珂研究所 先進プラズマ研究部・主任研究員

研究者番号：50757804

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,000,000円

研究成果の概要（和文）：乱流輸送モデルDeKANISの機能を拡張し、多粒子種・多輸送経路に対応できるようにしたほか、乱流飽和モデルの改良及び水素同位体効果の導入を実施した。DeKANISは機械学習モデルを利用し、第一原理計算の結果で訓練することで、複数の輸送過程を区別しながら乱流流束を高速に予測する。実施した拡張により、ITERにおける支配的な輸送過程の予測が実現した。また、実験で観測された水素同位体効果に関連する分布形成の特徴の再現に成功した。DeKANISの改良に加えて、第一原理計算から得られる速度分布関数の時間発展を画像として可視化し、画像を解析することで乱流輸送研究の効率化に資する機械学習モデルを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核融合プラズマの性能予測に用いられる統合シミュレーションでは、プラズマの密度や温度を左右する乱流輸送の予測精度が鍵となると同時に、実用性の観点から計算の高速化も求められている。DeKANISは機械学習を利用することで高速な密度・温度予測を可能にし、かつ、第一原理計算に基づき支配的な輸送過程を示すことができる。本研究課題におけるDeKANISの改良により、将来装置における輸送過程の予測や実験観測の再現が可能になった。また、画像解析によって乱流輸送研究を効率化する全く新しい手法を提案した。

研究成果の概要（英文）：The turbulent transport model DeKANIS has been modified to improve its ability. The current DeKANIS predicts multi-species multi-channel transport fluxes, uses an improved turbulent saturation model, and includes a hydrogen isotope effect. Since DeKANIS utilizes a machine learning model, which has been trained on first principle calculation results, it can compute turbulent fluxes quickly, distinguishing several transport processes. Improvement in DeKANIS enables us to predict dominant transport processes in ITER and to reproduce tendencies for profile formation related to experimentally observed hydrogen isotope effects. In addition to improvement in DeKANIS, another machine learning model has been developed, which analyzes images showing the time evolution of the distribution function given by first principle calculations and can improve the efficiency of turbulent transport research.

研究分野：核融合プラズマ

キーワード：核融合 乱流輸送 ネットワークモデル 準線形乱流輸送モデル 帯状流 ジャイロ運動論コード 機械学習 ニューラルネットワーク シミュレーション

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

核融合出力はプラズマの密度と温度に決定づけられるため、密度と温度の正確な予測は核融合炉の実現に向けた中心課題である。密度と温度を支配する乱流輸送は、プラズマ中の微視的な揺動に起因しており、乱流輸送によってプラズマの外に運び出される粒子と熱の量を表す粒子束と熱流束は、ジャイロ運動論コードによる第一原理計算で最も正確に予測できる。しかし、第一原理計算には 10^3 以上の並列計算を行った場合でも数日を要する。密度や温度は統合型輸送コード内で輸送計算を $10^3 \sim 10^6$ 回繰り返すことで得られるため、第一原理計算を用いることは現実的ではない。そこで、流体モデルなどの第一原理を簡約化したものや、解析式を用いた更に簡単なモデルが統合型輸送コードに導入されており、第一原理に基づく定量的な輸送計算は統合型輸送コードに反映され難かった。

2014 年頃から輸送計算の加速のために機械学習の導入が進んでいたが、その多くは既に簡約化されたモデルを機械学習で再現するものであった。研究代表者は実験データを用いることで第一原理計算の結果を機械学習する手法を開発し[1]、第一原理計算を高速に再現する輸送モデル DeKANIS を構築した[2]。DeKANIS は第一原理計算から明らかになる複数の輸送過程の寄与を区別できるという特徴があり、統合型輸送コードに組み込むことで、各輸送過程と分布形成の関係を示した実績があった[2]。しかしながら、研究開始当初のモデルは電子の粒子輸送のみが予測の対象であった。

複数の実験装置から、「密度・温度の分布形成の硬直性」や「粒子種毎の密度分布形成の相違」が示唆されており、研究開始当初以前は輸送モデルで予測した粒子束や熱流束を実験と比較することでこれらの解明を試みていた。DeKANIS の機能を拡張し、第一原理に基づく粒子束や熱流束と矛盾なく分布予測を行うことで、これらの学術的「問い」を解決できるという考えのもと本研究課題は開始された。

2. 研究の目的

第一原理計算による実験解析から、電子及びイオンの密度・温度の分布形成機構を決める複数の輸送過程に起因する粒子束・熱流束を評価し、その結果を機械学習で再現するモデルを構築する。統合型輸送コードとの結合で、第一原理計算を反映した密度と温度の分布計算を可能にし、学術的「問い」である密度・温度の分布形状の硬直性と粒子種毎の密度分布形成の相違の課題に取り組む。

3. 研究の方法

電子の粒子輸送のみを扱っていた研究開始当初の DeKANIS の機能を拡張し、多粒子種・多輸送経路に対応できるようにする。また、機械学習の教師データが及ぶプラズマ変数領域の拡張と、乱流飽和モデルの変更を実施し、汎用性を高める。得られた DeKANIS を統合型輸送コードに組み込み、学術的「問い」に取り組む。

4. 研究成果

研究計画に記載していた内容を遂行して得られた成果(下記(1)-(3))に加えて、第一原理計算から得られる画像の解析によって乱流輸送研究を高効率化する手法の開発から得られた成果(下記(4))を示す。

(1) 多粒子種・多輸送経路への拡張

DeKANIS は機械学習モデルの一種であるニューラルネットワーク(NN)モデルを利用し、ジャイロ運動論コードによる JT-60U プラズマの粒子輸送解析に基づき、粒子束を高速に予測するモデルとして開発された[2]。本成果では粒子・熱流束を同時に予測できるように拡張し、密度及び電子・イオンの温度の予測を実現した。

DeKANIS では電子の乱流粒子束を次のように表現する： $\mathbf{q}_e = D (R/L_{ne} + C_T R/L_{Te} + C_P)$ 。ここでは準線形理論を仮定しており、 D は規格化された粒子拡散係数、 R/L_n と R/L_T は規格化された密度と温度の勾配値である。この粒子束は対角項(拡散)と非対角項(非拡散)から構成されており、 C_T と C_P は非拡散過程による流束の向きと大きさを表す係数である。粒子束と矛盾なく熱流束を予測するため、次のように電子の熱流束を表現する： $Q_e = \mathbf{q}_e (C_N R/L_{ne} + R/L_{Te} + C_{HP})$ 。ここで、 C_N は規格化された熱拡散係数である。 C_N と C_{HP} は粒子束と同様に非拡散過程の寄与を表す。非対角項の係数($C_{T,P,N,HP}$)と粒子・熱拡散係数(D と \mathbf{q}_e)を求めることで、対角・非対角項をそれぞれ予測し、各輸送過程の寄与を明らかにしながら密度・温度分布を予測することができる。ただし、 \mathbf{q}_e と Q_e は輸送行列の対称性(Onsager 対称)を満たすため、 $\mathbf{q}_e = D (C_T + 3/2)/C_N$ が成り立つ。電子の粒子・熱流束に加え、イオンの熱流束を次のように表現する： $Q_i = (\mathbf{q}_{eff,i}/\mathbf{q}_{eff,e})_{eff,e} (R/L_{ni}) (n_i/n_e) (T_i/T_e)$ 。ここで、 \mathbf{q}_{eff} は熱流束を対角項のみで表したときの熱拡散係数であり、 $\mathbf{q}_{eff,i}/\mathbf{q}_{eff,e}$ を準線形理論に基づいて求めることで、 Q_e と矛盾なく Q_i が算出される。

上述した 3 つの流束を求めるため、非対角項の係数($C_{T,P,N,HP}$)と粒子拡散係数(D)、熱拡散係数

の比 ($\kappa_{eff,i}/\kappa_{eff,e}$) を高速に出力するニューラルネットワーク (NN) モデルを構築した。ここでは出力に熱拡散係数 (κ_e) を含めておらず、 κ_e と Q_e が満たすべき輸送行列の対称性を崩さないように κ_e を決定している。NN モデルの入力は密度や温度の勾配値など、乱流輸送を特徴付ける 12 の物理量である。NN モデルは教師あり学習によって訓練され、ここで使用する訓練データは、核融合実験装置 JT-60U のプラズマ変数に対してジャイロ運動論コードを用いた第一原理計算の結果から構築した。

電子の粒子束のみを予測していた時点から、NN モデルに主に 3 つの変更を加えることで、電子密度及び電子・イオン温度の予測ができるようになった。1 つ目は訓練データの拡張であり、データ点数を 2 千点程度から 7 千点程度まで増加させた。2 つ目は NN モデルのハイパーパラメータの最適化である。以前は多くの試行を手作業で繰り返し、訓練データを再現するハイパーパラメータの組み合わせを探していたが、ベイズ最適化によって調整するようになった。3 つ目は出力層の活性化関数の変更である。以前は線形関数を用いていたが、Softsign と呼ばれる関数を採用することで、出力される値に上・下限値を設けた。線形関数の場合、訓練データが少ない領域まで再現するように NN モデルが構築されるため、非物理的な外挿をする可能性がある。そこで、訓練データの平均値から $\pm 3\sigma$ の範囲で出力を収めるようにした。以上の変更を加えた NN モデルを持つ DeKANIS を統合型輸送コード TOPICS に導入し、図 1 に示すように、概ね計測誤差の範囲内で電子密度及び電子・イオン温度の小半径方向分布の予測を安定して行うことができたようになった [3]。

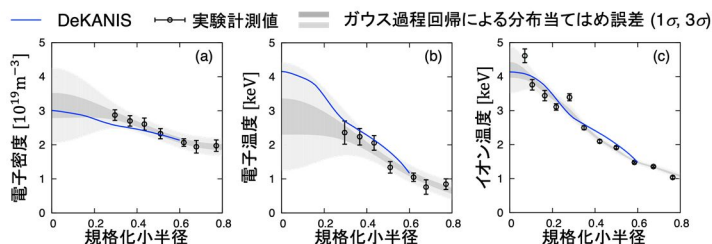


図 1: DeKANIS で予測した JT-60U の (a) 電子密度、(b) 電子温度、(c) イオン温度の半径方向分布。NN モデルの学習に用いていない JT-60U のプラズマを対象としている。

(2) 乱流飽和モデルの変更

(1) で示した DeKANIS は粒子拡散係数 (D) を NN モデルで予測していた。粒子拡散係数の訓練データの基である JT-60U のプラズマは、訓練データと異なる放電であっても、訓練データに含まれる放電と同程度の誤差で粒子拡散係数を予測できたが、異なる装置である JET のプラズマに対しては予測誤差が増加した。この NN モデルの構築方法では、未知の変数領域における予測精度を保証できないことが原因であると考えられる。そこで、粒子拡散係数を NN モデルの出力から外し、支配的な不安定性の波数と線形成長率を出力するように変更した。波数及び線形成長率の訓練データはジャイロ運動論コードを用いて準備した。NN モデルから得られた波数と線形成長率を、混合長理論に基づく乱流飽和モデル [1] に代入することで粒子拡散係数 (D) を算出する。粒子拡散係数は乱流揺動の大きさに比例しているため、この乱流飽和モデルは、乱流揺動の飽和水準は乱流とそれを抑制する帯状流の相互作用によって決まるという考えのもと構築されたものである。より一般的な理論を取り入れることで、JET のプラズマに対する予測誤差を抑えることができた [3]。

しかしながら、ここで採用した乱流飽和モデルには課題が残っている。このモデルは、JT-60U の実験データを用いて半経験的に求めた粒子拡散係数を再現するように定数部分を回帰により求めることで得られている。図 2(a) に示すように、この乱流飽和モデルは回帰に用いたデータに対してもばらつきが大きく、回帰に用いていない JET の実験データから評価した粒子拡散係数 (テストデータ) を過小評価していた。この乱流飽和モデルは乱流を抑制する帯状流の効果を無衝突仮定のもとで理論的に導出される残留帯状流レベルで表現していた。これが原因であると考え、衝突による帯状流の乱流抑制効果の低下を考慮するよう変更した。新しいモデルによって、回帰に用いたデータに対する平均二乗対数誤差を低減し、テストデータの過小評価の傾向を解消することに成功した (図 2(b)) [4]。ただし、テストデータに対する平均二乗対数誤差は増

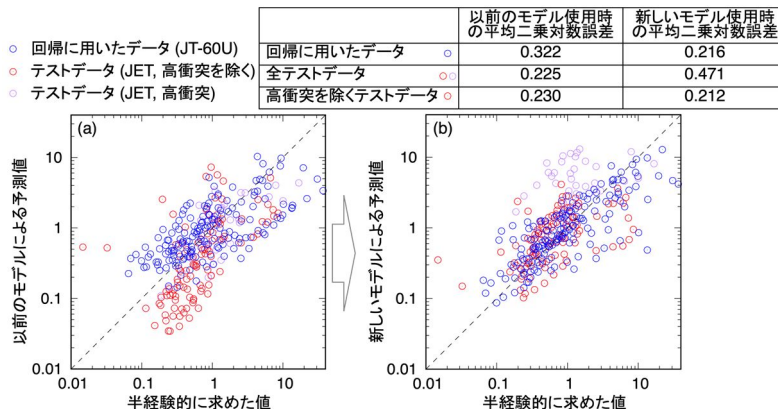


図 2: 粒子拡散係数の半経験的に求めた値と (a) 以前及び (b) 新しい乱流飽和モデルによる予測値の比較。

加している。過大評価しすぎているデータが誤差増加の原因であり、これらは回帰に用いたデータがほとんど及んでいない高い衝突周波数を持つことが分かった。したがって、帯状流の乱流抑制効果を高い衝突周波数のために過小評価した結果、高い粒子拡散係数を算出したと言える。高い衝突周波数のデータを除くと、平均二乗対数誤差は以前のモデルと同程度に抑えられる。なお、ITER では低い衝突周波数が予測されているため、粒子拡散係数の過大評価の傾向は生じないと考えられる。

(3) ITER 初期プラズマを想定したプラズマ中心・周辺部の統合シミュレーション

これまでの DeKANIS が持つ NN モデルの訓練データは、JT-60U におけるプラズマの変数をもとに構築されていたため、変数が及ぶ領域が狭かった。そこで、(2)でテストデータとした JET のプラズマの変数を用いて訓練データの拡張を行った。特に領域が拡張された変数は電子とイオンの温度比 T_e/T_i である。これまで用いていた JT-60U のプラズマは $T_e/T_i < 1$ のデータが多くを占めていたが、 $T_e/T_i > 1$ となるプラズマを含む JET のデータセットを加えることで拡張された。 T_e/T_i によって非対角項の係数が変化することが知られているため、様々な加熱条件に対して各輸送過程の寄与を正確に予測できるようになったと言える。また、これまでは規格化小半径 r/a が 0.65 よりも内側の領域の変数のみを扱っていたが、最大の r/a を 0.85 まで延ばした。これらの拡張により、データ点数は 1.6 万点程度まで増加した。

$T_e/T_i > 1$ をカバーできるようになったことで、電子サイクロトロンによる電子加熱が想定されている ITER の初期プラズマの予測計算に DeKANIS を適用することが可能になった。また、 $r/a = 0.85$ まで流束を予測できるため、周辺部との統合シミュレーションにも利用できる。改良した DeKANIS を統合モデル GOTRESS+ に導入し、ITER 初期プラズマの電子・イオン温度の予測を行った(図 3(a))。この統合シミュレーションにおいて、DeKANIS は $r/a < 0.85$ の熱流束の予測を担っている。 $r/a < 0.25$ の領域では熱流束を外挿で与えているため、その外側の領域に着目すると、先行研究において乱流輸送モデル TGLF で得られた結果と近い温度となることを確認できた。TGLF は様々な実験装置において広く検証されてきたモデルであるため、ここで得られた結果は妥当であると考えられる。図 3(b)に示すように、DeKANIS を温度分布予測に用いると、熱流束の内訳を知ることができる。熱流束は対角項 (Q_{\parallel}) と二つの非対角項 (Q_{\perp} と Q_{HP}) に分けられており、非対角項はジャイロ運動論コードにより検証できる。二つ目の非対角項は過大評価されているものの、他の二項と比べると小さい値であることから、今回予測した ITER 初期プラズマでは、密度勾配に起因する拡散過程と温度勾配に起因する一つ目の非拡散過程が支配的であり、これらの過程は同程度の乱流流束を生成していると言える[4]。

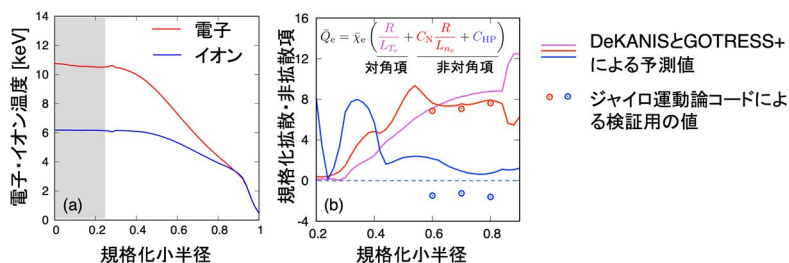


図 3: 統合シミュレーションによる ITER 初期プラズマの(a)電子・イオン温度と(b)規格化拡散・非拡散項の規格化小半径方向分布の予測。(b)では、ジャイロ運動論コードにより結果の妥当性が検証されている。

(4) 同位体効果の導入

これまでの DeKANIS は重水素プラズマのみに対応していたため、ITER の初期実験段階では軽水素プラズマが計画されているものの、(3)で示した ITER 初期プラズマのシミュレーションは重水素プラズマを仮定した予測となっていた。一方、国内外の実験装置において、水素同位体の質量が大きいほど温度や密度が上昇することが報告されているため、このような水素同位体効果を再現できるよう DeKANIS を改良した。

水素同位体効果に関する理論研究では、衝突による乱流の減衰効果は質量の増加に伴い強まることが指摘されている。この衝突の影響は第一原理に基づくジャイロ運動論コードから得られる準線形拡散係数の波数スペクトル形状に現れる。(2)で示した乱流飽和モデルでは、これまで単一波数の準線形拡散係数を考慮していたために波数スペクトル形状の変化を捉えられなかった。そこで、準線形拡散係数の波数方向の積分値を、NN モデルで出力している支配的な不安定性の波数と線形成長率で表現するモデルを考案し、衝突による乱流の減衰効果の質量依存を再現できるようにした。さらに、NN モデルの訓練データはこれまで重水素プラズマを仮定したジャイロ運動論コードの計算結果のみから構築されていたが、軽水素プラズマを仮定した計算結果を加え、NN モデルの入力としてイオンの質量数を追加することで、重水素及び軽水素に対応できるようにした。

改良した DeKANIS を統合型輸送コード TOPICS に導入し、ITER の初期プラズマの条件下で重水素及び軽水素のプラズマを想定した温度・密度の予測を行なった(図 4(a), (b))。ここではプラズマ周辺部を固定しており、磁気軸周辺は外挿により流束を求めている。電子の温度・密度は重

水素の方が高く、重水素の方でより乱流が抑えられる効果が現れている。これは実験観測と同様の傾向である。イオン温度は軽水素の方が僅かに高い。これは衝突による電子・イオン間の熱緩和量は軽水素の方が大きいためであると考えられる。

ITER 初期プラズマと異なり、イオン加熱が主体となる JT-60U のプラズマを想定して同様の分布計算を行ったところ、電子・イオン温度は重水素の方が高く、分布の変化が見られる一方で、電子密度はほぼ変化しなかった。このような温度と密度の硬直性の違いは、本研究課題で「問い」としていた実験観測結果と一致している。

(5) 速度分布関数の時間発展の可視化と画像解析

第一原理に基づくジャイロ運動論コードは、核融合プラズマにおける乱流流束の定量予測や不安定性の同定に不可欠である。5次元空間で速度分布関数の時間発展を解くジャイロ運動論コードを用いたシミュレーションは、スーパーコンピュータによる長時間計算を必要とする（一ケースにつき数日以上）。図 5(a)に示すように、静電揺動の大きさは、初期値から大きく増加する段階（成長段階）を経て飽和するが、飽和時の静電揺動が乱流流束の評価に用いられるため、成長段階の計算結果は通常利用されない。また、成長終了時刻は初期値として与える揺動の大きさによって変化する。したがって、効率的な研究の遂行には成長段階が短くなる初期条件が望ましいが、成長終了時刻を計算前もしくは計算の初期段階で得られる情報から推定する方法はなかった。本成果では飽和段階に着目し、ポロイダル・小半径方向波数の2次元空間における速度分布関数の強度パターンとして飽和過程を可視化し、その画像の特徴を捉える機械学習モデルを構築した。このモデルにより成長終了時刻を推定できる。

機械学習モデルは、図 5(a)において基準とした初期揺動の大きさを利用したときのシミュレーションから得られる速度分布関数の強度パターン（図 5(b)）を学習しており、その特徴から強度パターンが生成されたシミュレーション時刻を算出する。初期揺動の大きさを変えた2ケースでの時刻5における強度パターン（図 5(c), (d)）を機械学習モデルの入力として用いると、基準のケースに置き換えたときのシミュレーション時刻が予測される。基準のケースの成長終了時刻は既知であるため、この予測結果から飽和までの達成度を評価でき、成長終了時刻が推定される。計算の初期段階である時刻5までのシミュレーションは6-10時間で終了するため、研究を行うにあたり現実的な時間での成長終了時刻の推定に成功している[5]。例えば、初期揺動の大きさが異なる複数ケースを同時に実行し、成長段階が短いケースのみを初期段階において選択することで、計算コストを削減し、高効率に研究を遂行することができる。

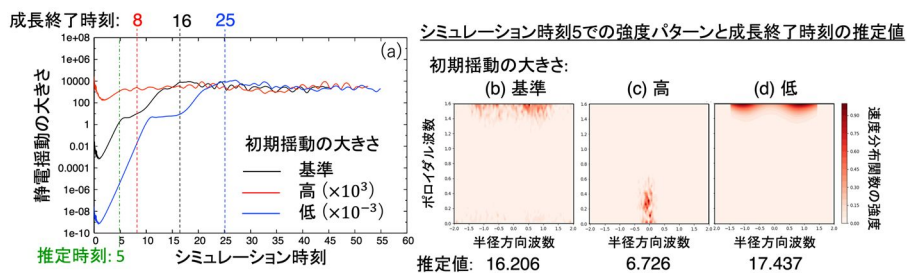


図 5: (a)ジャイロ運動論コードを用いた第一原理乱流輸送計算から得られる静電揺動の大きさの時間発展。(b)-(d)シミュレーション時刻5での波数空間における速度分布関数の強度パターンと成長終了時刻の推定値。

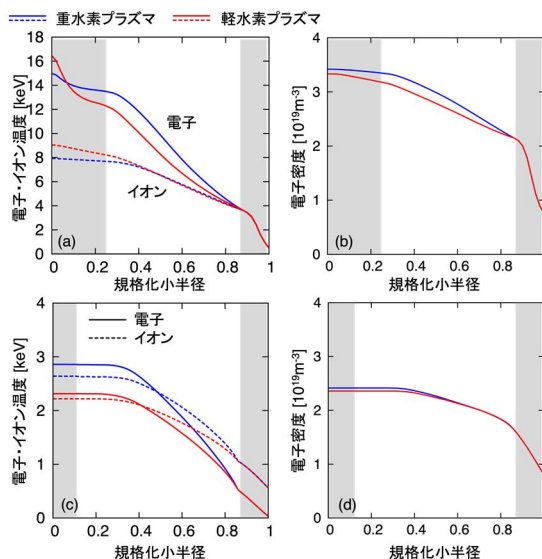


図 4: (a), (b)ITER の初期プラズマ及び (c), (d)JT-60U プラズマの条件下で重水素及び軽水素のプラズマを想定した(a), (c)温度・(b), (d)密度の規格化小半径方向分布の予測。

<引用文献>

- [1] E. Narita, et al., Plasma Phys. Control. Fusion, 60, 025027 (2018).
- [2] E. Narita, et al., Nucl. Fusion, 59, 106018 (2019).
- [3] E. Narita, et al., Nucl. Fusion, 61, 116041 (2021).
- [4] E. Narita, et al., Contrib. Plasma Phys., e202200152 (2023).
- [5] E. Narita, et al., Nucl. Fusion, 62, 086037 (2022).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 M. Honda, E. Narita, S. Maeyama, T.-H. Watanabe	4. 巻 2023
2. 論文標題 Multimodal convolutional neural networks for predicting evolution of gyrokinetic simulations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Contributions to Plasma Physics	6. 最初と最後の頁 e202200137
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/ctpp.202200137	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 E. Narita, M. Honda, M. Nakata, N. Hayashi, T. Nakayama, M. Yoshida	4. 巻 2023
2. 論文標題 Modification of a machine learning-based semi-empirical turbulent transport model for its versatility	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Contributions to Plasma Physics	6. 最初と最後の頁 e202200152
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/ctpp.202200152	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 E. Narita, M. Honda, S. Maeyama, T.-H. Watanabe	4. 巻 62
2. 論文標題 Toward efficient runs of nonlinear gyrokinetic simulations assisted by a convolutional neural network model recognizing wavenumber-space images	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 86037
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1741-4326/ac70e8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Narita E., Honda M., Nakata M., Yoshida M., Hayashi N.	4. 巻 61
2. 論文標題 Quasilinear turbulent particle and heat transport modelling with a neural-network-based approach founded on gyrokinetic calculations and experimental data	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 116041
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1741-4326/ac25be	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Urano H, Narita E	4. 巻 63
2. 論文標題 Review of hydrogen isotope effects on H-mode confinement in JT-60U	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 84003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/ac048c	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 E. Narita, M. Honda, S. Maeyama and T.-H. Watanabe
2. 発表標題 Machine-learning assistance with nonlinear gyrokinetic simulations by recognizing wavenumber-space images
3. 学会等名 27th International Conference on Numerical Simulation of Plasmas (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 成田絵美、本多充、仲田資季、吉田麻衣子、林伸彦、中山智成
2. 発表標題 機械学習を利用した半経験乱流輸送モデルの拡張と汎用性の検証
3. 学会等名 第39回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 成田絵美、本多充、前山伸也、渡邊智彦
2. 発表標題 乱流熱流束の時間発展を予測するマルチモーダルニューラルネットワークモデルの開発
3. 学会等名 第2回成果創出加速プログラム研究交流会「富岳百景」
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 成田給美
2. 発表標題 磁場閉じ込め核融合プラズマのデータ駆動型研究の進展
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 成田給美、本多充、仲田資季、中山智成、林伸彦
2. 発表標題 水素同位体効果を考慮した準線形乱流輸送モデリングと温度・密度分布予測
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Narita Emi, Honda Mitsuru
2. 発表標題 Machine-learning-based modeling for acquiring insights into turbulent transport in fusion plasmas
3. 学会等名 3rd International Conference on Data Driven Plasma Science（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Narita Emi, Honda Mitsuru, Nakata Motoki, Yoshida Maiko, Hayashi Nobuhiko
2. 発表標題 Quasilinear Turbulent Particle and Heat Transport Modeling with Development of Unique Saturation Rules for Insights into Profile Formation Mechanisms
3. 学会等名 28th IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2020)（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Narita Emi, Honda Mitsuru, Nakata Motoki, Yoshida Maiko, Hayashi Nobuhiko
2. 発表標題 Neural-network-based turbulent transport modeling with development of saturation rules based on gyrokinetic analysis of JT-60U plasmas
3. 学会等名 Asia-Pacific Transport Working Group Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 成田 絵美、本多 充
2. 発表標題 機械学習による核融合プラズマの輸送モデリング
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第38回年会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Narita Emi, Honda Mitsuru, Maeyama Shinya, Watanabe Tomo-Hiko
2. 発表標題 Improvements in efficiency of gyrokinetic simulation runs with convolutional neural network models analyzing nonlinear saturation processes
3. 学会等名 Fourth IAEA Technical Meeting on Fusion Data Processing, Validation and Analysis (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 成田 絵美、本多 充、仲田 資季、林 伸彦
2. 発表標題 機械学習を利用した半経験的乱流輸送モデルの汎用性改善に向けた拡張
3. 学会等名 第77回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Narita Emi, Honda Mitsuru, Nakata Motoki, Yoshida Maiko, Hayashi Nobuhiko, Nakayama Tomonari
2. 発表標題 Modification of a turbulence saturation model applied in DeKANIS
3. 学会等名 28th ITPA Transport and Confinement Topical Group Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 成田 絵美、本多 充、仲田 資季、吉田 麻衣子、林 伸彦
2. 発表標題 乱流飽和則の開発によるニューラルネットワーク輸送モデリング
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 成田 絵美、本多 充、前山 伸也、渡邊 智彦
2. 発表標題 乱流揺動の非線形飽和過程の可視化と特徴抽出
3. 学会等名 第37回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 成田 絵美、本多 充、仲田 資季、吉田 麻衣子、林 伸彦
2. 発表標題 粒子・熱流束の実験値を考慮した準線形乱流輸送モデリング
3. 学会等名 第76回 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------