

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 人間・環境学 )	氏名	HU KUNQI
論文題目	Improving efficiency and quality on modeling 3D plasma shape in FFHR by introducing Neural Networks (ニューラルネットワークを用いるFFHRにおける三次元プラズマ形状のモデリングの効率と質の向上)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、核融合炉の設計支援を目的として、主に核融合炉内のプラズマ領域の可視化方法、そのためのデータの取得方法および核融合炉の構造物とプラズマの干渉チェックの方法を提案し、実験を行い、評価した結果をまとめたものである。</p> <p>本論文の第一章では、まず核融合反応と核融合炉のモデルについて概括し、本研究で扱う磁場閉じ込め方式でヘリカルコイルを用いるモデルであるFFHRについて述べている。磁場閉じ込め式の反応炉においては、磁場に閉じ込められたプラズマ状態の原子核が磁力線にそって運動し、原子核同士の衝突によって核融合反応が引き起こされ、エネルギーが取り出される。つづいて本章ではFFHRの内部構造の概要を説明している。とくに、プラズマ内での核融合反応で得られるエネルギーの回収に使われる構造物(ブランケット)と核融合反応の副産物として生成される不純物(ヘリウム原子核)の排出に使われる構造物(ダイバータ)を取り上げ、それらの構造物の適切な配置が効率的で安定的な反応炉の実現に重要であり、構造物とプラズマとの干渉チェックが必要であることを述べている。その後、本章では、プラズマ状態の粒子が磁力線に沿って運動することから、炉内のプラズマの形状が磁力線の分布から導かれると説明している。また磁力線の特徴によって、プラズマの領域が、全体の中心の核融合反応が発生する閉じ込め領域、その外側の不純物がダイバータまで運ばれていく領域(エルゴディック層)、さらにその外側の領域に分かれることを説明し、炉内のプラズマ領域を把握するために、それら三つの領域の間の境界をそれぞれ三次元空間内の曲面で表現することが求められると説明している。</p> <p>本論文の第二章では、本研究で最初に取り組んだ、プラズマ形状のモデル化手法について説明している。すでに説明したようにプラズマの形状は磁力線群から導かれる。しかし磁力線群は互いに複雑に絡み合うような構造をしていることから、提案手法では磁力線群を直接利用する代わりに、磁力線群に基づいて、反応炉内の空間において、ある種のスカラー場を導出して、その等値面としてプラズマ形状を表現している。このときプラズマ内の粒子は磁力線に沿って螺旋運動することから、スカラー場を導出する際には磁力線のみを用いるのではなく、その螺旋運動の広がりを表すラーモア半径を磁場の情報から計算して併用する。反応炉内の空間の各格子点でのスカラー値は、磁力線とその周囲に並ぶラーモア半径で定まる線群を用いて、それらと格子点との最小距離によって定める。本研究では、実験として、シミュレーションから得られた多数の磁力線から、経験的に知られている条件によってエルゴディック層の磁力線群を抽出し、それらについてスカラー場を導出</p>			

し、値を手動で設定して、マーチングキューブ法により等値面を生成している。その結果、生成された曲面は干渉チェックに利用は可能であるものの、磁力線の分布の偏りとスカラー値の選び方から、プラズマ形状を十分に捉えられていないと述べている。

本論文の第三章では、第二章の手法の問題を解消するために、磁力線からスカラー場を直接導出する代わりに、三次元空間の点でのスカラー値を予測する深層ニューラルネットワーク (DNN) を構築して、予測されたスカラー場に基づいて、第二章と同様の方法でプラズマ形状を生成する方法を提案している。DNNの学習には磁力線データを用いる。磁力線群をその特徴によって、閉じ込め領域、エルゴディック層、それら以外に属するものに分類し、これら三つのクラスの磁力線上のサンプルとなる点について、それぞれにクラスを表すラベル(2, 1, 0)をスカラー値として付す。ラベル0の点については、エルゴディック層の形状をできるだけ正確に再現するために、手動でアノテーションして追加している。提案手法では、このようにして得られた点を訓練データとして、DNNを学習した後、反応炉内の各格子点についてDNNでスカラー値を予測し、さらにラーモア半径の影響を考慮して、スカラー値を適宜更新して、スカラー場を得る。本研究では学習したDNNを用いた実験を行って、第二章の方法よりも高品質でスムーズな形状が得られたものの、エルゴディック層の端(ダイバータレッグ)の再現が不十分であったと述べている。

本論文の第四章では、そもそも磁力線のデータ、とくにダイバータレッグに向かう磁力線のデータが不十分である場合にはプラズマ形状をうまく捉えられないという問題を解消するため、磁場データからダイバータレッグに向かう磁力線を効率的にサンプリングする手法を提案している。その手法では、先行研究に基づいて、必要となる磁力線を抽出するための「出発点」が存在する範囲を推定するようになっている。また本研究では、核融合炉の仕様変更された場合にも出発点の存在範囲を低コストで同定するために、磁場データからそのような範囲を予測するためにVGG11を利用したネットワークモデルを提案して、そのモデルを用いた実験で有効性を評価している。

本論文の第五章では、プラズマと核融合炉の干渉の様子を可視化してチェックするための手法を二通り提案している。第一の方法では第三章の手法を利用して、反応炉内の点でのプラズマの存在確率を計算し、その値に応じて、炉の構造体の表面での干渉の強さを示すようにする。第二の方法では構造体とプラズマのボリュームデータを重ね合わせることで干渉チェックが可能となるようにしている。本論文では、可視化の結果を示して、評価を行っている。

最後に本論文の第六章では、第二章から第五章の成果を概括している。また最後に本研究におけるプラズマの三次元形状モデルの構築に深層学習を用いたことの新規性、また核融合の研究分野で深層学習の応用が広がっていること、それが核融合の実現につながることの期待感を述べている。

( 続紙 2 )

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、核融合炉を実現するための設計支援を目的として、シミュレーションで得られる磁場に基づいて、核融合炉内に分布するプラズマ領域を可視化する方法、可視化の品質を高めるためのデータの取得方法および核融合炉の構造物とプラズマの干渉チェックの方法などを提案し、実験を行い、評価した結果をまとめたものである。

核融合炉の実現方法としてはいくつかのモデルが提案されている。本研究では、それらのうち磁場閉じ込め方式でヘリカルコイルを用いるFFHRと呼ばれるモデルを解析の対象としている。FFHRでは、磁場に閉じ込めたプラズマ状態の重水素と三重水素の原子核を高速で衝突させることで核融合反応が引き起こされ、エネルギーが生み出される。このとき副産物として作られるヘリウム原子核は「ダイバータ」という構造物を通して炉外に排出される。反応炉において、効率的にエネルギーを回収し、不純物となるヘリウム原子核を炉外に排出させるには、反応炉内の構造物とプラズマの位置関係が適切となるように設計を行う必要がある。反応炉内でプラズマは磁場に閉じ込められ、炉の容器には接しないようにされる。プラズマの中心領域では核融合反応が発生し、その外側には核融合反応で作られるヘリウム原子核がダイバータまで運ばれていく領域がある。その領域を「エルゴディック層」と呼ぶ。核融合炉の設計においては、このエルゴディック層の領域を把握することがとくに重要となる。プラズマ状態の粒子は磁力線に沿って螺旋運動する。そこで本研究では、数値シミュレーションの結果の磁場から抽出される磁力線に基づいて、プラズマ領域、その中でもとくにエルゴディック層全体をちょうど覆うような三次元空間内の曲面を導き出すことを中心的な課題としている。

以上のような背景のもと、本研究では、プラズマの三次元形状を可視化する方法を二つ提案し、プラズマ形状の特徴的な構造を捉えるために必要な磁力線を抽出するための方法、またそのような磁力線を異なるスペックの核融合炉でも自動的に実行するための方法を提案している。さらに導出されたプラズマ形状と反応炉の構造物の干渉チェックの方法を提案している。

本研究で提案するプラズマ形状の第一の可視化手法では、与えられた磁力線群からスカラー場を導出して、その等値面としてプラズマ形状を表現する。磁力線群は互いに複雑に絡み合うような構造になっている。またプラズマ内の粒子は磁力線に沿って螺旋運動する。提案手法では、そのような場からプラズマをちょうど覆うような曲面を直接構成する代わりに、反応炉内の各格子点について、プラズマの存在する領域までの距離を、磁力線およびその周囲の粒子の螺旋運動のラーモア半径を用いて評価して、その距離によって当該の格子点の値を定めて得られるスカラー場を利用する。プラズマの形状は、そのように構成されたスカラー場において適当な値を選んで、その値についての等値面をマーチングキューブ法で導出する。実験として、本研究では、シミュレーションから得られた多数の磁力線から、経験的に知られている条件によってエルゴディック層の磁力線群を

抽出し、提案手法により、プラズマ形状を構成している。結果としては、磁力線の偏りや等値面の選び方から、必ずしも十分な精度は得られなかったものの、プラズマ形状と反応炉の構造体の干渉を、ある程度は評価できることがわかった。

本研究で提案するプラズマ形状の第二の可視化手法では、反応炉内の空間での磁力線の分布の偏りに影響を受けないようにするため、三次元空間の点でのスカラー値を予測する深層ニューラルネットワーク (DNN) を構築して、スカラー場を予測した結果から第一の可視化手法と同様に等値面を構成する。スカラー場は第一の方法とは異なり、磁力線が属する領域のラベルに基づいて構成する。具体的には磁力線群をその特徴によって、閉じ込め領域、エルゴディック層、それら以外に属するものに分類し、それぞれにクラスを表すラベルとして2, 1, 0を割り当てて、それらの値を用いる。ラベル0については、エルゴディック層の形状をできるだけ正確に再現するために、点を手動でアノテーションして追加している。DNNは磁力線上の点でのラベルを用いて訓練する。学習後は、反応炉内の各格子点についてDNNでスカラー値を予測し、さらにラーモア半径の影響を考慮して、スカラー値を適宜更新して、スカラー場を得る。本研究の実験では、エルゴディック層について、訓練データを供給する磁力線の不足から、層の端(ダイバータレッグ)の再現が不十分となったものの、第一の可視化手法と比較して高品質でスムーズな形状が得られている。

本研究では、二つの可視化手法の開発過程で行った実験から、ダイバータレッグに向かう磁力線のデータが不十分である場合にはプラズマ形状をうまく捉えられないという問題があるとして、先行研究に基づいて、ダイバータレッグに向かう磁力線を磁場データから効率的にサンプリングする手法を提案している。また本研究では、核融合炉の仕様が変更された場合にも低コストで効率的にダイバータレッグに向かう磁力線データを得るために、VGG11を利用したモデルを提案して、実験を行い、その有効性を評価している。

さらに本研究では、プラズマと核融合炉の干渉の様子を視覚的に表現するための二つの手法を提案している。最初の方法では、第二の可視化手法で導出したスカラー場を利用して得られる、反応炉内の点でのプラズマの存在確率の値によって、反応炉の構造体の表面での干渉の強さを示す。二番目の手法では、反応炉の構造体とプラズマのボリュームデータとを重ね合わせて干渉を可視化している。また本論文では、干渉を可視化した結果の評価を示している。

以上を総括して、本論文は博士(人間・環境学)の学位論文として価値あるものと認める。また令和6年1月29日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。なお本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公表可能日： 令和 年 月 日以降