

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23561005

研究課題名(和文)境界形状の要素分解によるヘリカル閉じ込め配位の性能評価と改善研究

研究課題名(英文)Evaluation and improvement of confinement properties of stellarator configurations based on the Fourier modes of boundary shape

研究代表者

岡村 昇一 (Okamura, Shoichi)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・特任教授

研究者番号：60115540

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：ヘリカル磁場による核融合研究において、閉じ込め性能を決定する磁場の三次元構造を、境界形状のフーリエモードを数学的に解析することにより改善することに成功した。閉じ込め磁場の特性が、基本的な低次のフーリエモードで決定されることを見だし、基本モードの新しい組み合わせを工夫することにより、高いプラズマ圧力を持つ平衡配位において、高温プラズマの閉じ込め特性を改善した。またその磁場配位を実現するための磁場コイル形状を設計し、工学的に建設が容易なコイル形状による核融合閉じ込め装置の可能性を見いだした。

研究成果の概要(英文)：For the fusion research with the stellarator devices, a new concept of the three-dimensional magnetic configuration was developed for the improved confinement based on the mathematical analysis of the Fourier modes of the boundary shape of plasmas. It was found that the basic characteristics of the magnetic configurations are determined by the fundamental low-mode Fourier elements. By arranging a new combination of the Fourier elements, a new magnetic configuration was invented which has a good confinement properties for the high-beta equilibria. For such a new configuration, the magnetic coil was designed for realizing the fusion reactor with simple helical coil windings which is beneficial for reducing the construction costs.

研究分野：核融合科学

キーワード：ヘリカル磁場配位 磁場配位最適化 最外殻形状 フーリエモード

1. 研究開始当初の背景

(1) 核融合研究は、国際協力による国際熱核融合実験炉(ITER)の建設がフランスで開始され、正味の熱出力を実証する段階に入った。装置の大型化に伴う研究費の増大のため、核融合実験炉としては世界で一つの装置を国際協力で建設する決定となったが、今後核融合発電を実用化する過程においては、当然のことながらそれぞれの国において研究を継続して行くことが必要である。また閉じ込め方式という観点においてもITER本体はトカマク型が採用されたが、熱出力を実証した後のさらなる改良段階においては、より安定で信頼性の高い閉じ込め方式を探求して行く努力を継続して行くことが必要となる。ヘリカル型トラス閉じ込め方式は、トカマク型のようにプラズマ電流駆動を必要としないために、安定で効率的な定常運転装置としての将来性を持っており、ITER以後の核融合研究にとって重要な研究課題の一つであると言える。

(2) 核融合科学研究所では、大型ヘリカル装置(LHD)を用いた実験研究により、ヘリカル型閉じ込め方式の優れた閉じ込め特性を実証してきている。特に核融合炉の経済性にとって重要な高いプラズマベータ値の達成と、トカマク型では実現不可能な高いプラズマ密度での安定な運転の実証は、経済的核融合炉の実現に至る研究開発過程において、トカマク型に勝るヘリカル方式による核融合炉設計の可能性を示すものである。現在LHD実験の実績に基づいて、ヘリカル型閉じ込め方式による核融合炉の概念設計が進行中であり、いくつかの設計モデルが論文として発表されている。これらの論文においては、炉設計において重要なブランケットのスペースや、全体の建設コストなどを中心とした議論が展開されているが、炉心の磁場配位としては旧来のLHD実験のプラズマ閉じ込め配位をそのままスケールアップしたものを採用している。

(3) 新しいヘリカル閉じ込め概念という意味では、ここ20年ほどの間に、先進ヘリカル磁場配位と称される多くの新しいヘリカル型閉じ込め装置の提案がなされた。これらの新しい磁場配位は、二本の螺旋型コイルを基本としたヘリオトロン・タイプの磁場配位とは異なったもので、磁場コイルとしてはモジュラータイプ(複雑な振れ形状を持った一群のトロイダルコイル)が用いられる。磁場配位設計の手順はヘリオトロン型などで用いられてきたものとは違い、まずトラス磁場配位の表面の断面形状を与えて、それを境界条件とする偏微分方程式に基づく三次元の平衡配位計算を数値的に行い、その結果からトラス全体の閉じ込め特性や安定性を評価する。良い特性を持つ配位が見つかった段階で、その配位を実現する磁場コイル形状の設計を行う、というステップを取る。その結果としての磁場コイルは、一般的にはモジュ

ラータイプとなっている。

2. 研究の目的

(1) 現在のLHD実験を取り巻く研究状況としては、新しい設計手法に基づく先進ヘリカル磁場配位の議論が世界的に盛んに行われている一方、その新しい設計手法をLHDタイプの磁場配位改善のためにはいまだ活用していないという結果となっている。本研究計画では、世界的にも圧倒的な実験成果を生み出しているLHD装置に対して、その実験面での研究実績に基づいた上で、さらに一歩進めた研究計画が可能となるような新しい磁場閉じ込め配位を探し出すことを目指す。そのための手法としては、上述した炉設計で行われている磁場コイル形状を少しずつ変化させるという古典的な方法ではなく、先進ヘリカル配位設計に用いられている新しい設計手法を中心にして研究を進める。一方、二つの手法による結果も適宜比較しながら研究を進める。

(2) LHD磁場配位についてこれまでの議論における問題点は、現実の実験における磁場配位制御の手段が、LHD装置の各種磁場コイルの電流比を変えることに対応するという実情から、磁場配位の表現として電流値に関係するパラメータのみで議論してきたことである。それに対して、これまでの先進ヘリカル研究の成果からは、トラス配位の境界形状をフーリエ分解した際に得られる各フーリエモードが、閉じ込め特性の重要な要素と関連していることがわかっている。LHD磁場配位制御の中で閉じ込め特性を一番大きく左右するものとして、前述したような真空容器内でのプラズマ位置の内側シフト、外側シフトによる磁場配位制御があるが、これらの配位の性質を幾何学的な内側、外側という言葉で表現するのではなく、境界形状のフーリエモードという物理に直結する言葉で整理することから始める。このような表現法は、トカマク実験における磁場配位制御の表現で用いられている、境界形状を楕円度、三角度によって表現する手法と共通のものである。ヘリカル方式の磁場制御の議論の中に、トカマクで成功してきた手法を新しく取り入れるという観点からも、これまででない結果を得ることが期待できる。

3. 研究の方法

(1) まず、現在LHD実験で用いられている磁場配位に関して、フーリエモードによる表現法に基づいて、それぞれの配位の閉じ込め特性と境界形状要素との関連付けを整理する。真空磁場配位について整理した後に、有限ベータ配位についても解析を進める。このことによって閉じ込め特性のそれぞれの要素と、境界形状のフーリエモードとの一般的な関係が明確になる。この物理的関係は、実際にはLHDの磁場配位という、三次元の広い自由度を持ったヘリカル系磁場配位の中では非

常に限定された部分集合の中での関係であり、上述の先進ヘリカル研究における理解とは異なるものとなるかもしれない。次にこの理解に基づいて、磁場配位空間の拡張と改善配位探求に進む。この段階で、計算された磁場配位を実現するための磁場コイルはLHD装置のものとは異なるものとなり、新しい装置設計の領域に入ることになる。

(2) 本研究計画では、四年間の計画の中で磁場配位空間の拡張を行うことによって、新しい閉じ込め特性の可能性を持つ配位の設計までを行うこととし、コイル設計は予備的な考察に留める。研究目的としては、LHD装置の磁場配位と先進ヘリカル研究で議論される磁場配位をつなぐ中間の配位空間について、具体的な理解を確立することを優先する。共通の物理要素の議論によって、これまでどちらかと言うと別々のヘリカル研究の流れとして研究が進められてきた二つの研究領域を統合することによる閉じ込め配位の改善研究が最終的な目的であり、そのことは核融合炉につながるヘリカル型閉じ込め研究を一段高い理解のレベルに上げることになる。

4. 研究成果

(1) 核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)の磁場配位を例にとり、実験で採用しているいくつかの代表的な配位の最外殻形状をフーリエ分解し、それぞれの磁場配位の持つ閉じ込め特性が最外殻形状のフーリエ係数のどの要素と結びついているかについて解析した。代表的な配位としては、磁気軸位置が 3.6, 3.75, 3.9 m の配位を選び、閉じ込め特性として、捕捉粒子のドリフト軌道の性質とMHD安定性をもたらす磁気井戸の深さについて検討した。実験で用いられる配位を表現する100以上のフーリエ係数の中から、係数の絶対値の大きなものを残すことにより、それぞれの配位の特性を与えているフーリエ係数を導き出した。その結果から、配位の特性の違いを決定付けているフーリエ係数は、トロイダル・モード数 $n=1$ 、ポロイダル・モード数 $m=0$ の成分であり、物理的には立体磁気軸配位を形成するために必要となる、ヘリカル軸構造のモードであることが明らかになった。このことは、平面磁気軸構造として知られているヘリオトロン型磁場配位においても、立体磁気軸配位の構造が重要な要素であることを示している。

(2) さらに解析を進めた結果、 $n=1, m=2$ のフーリエ係数も、LHDの磁場閉じ込め特性の違いを与える重要な要素であることがわかった。すなわち、LHD装置の特長的な三種の磁場配位(内寄せ配位、標準配位、外寄せ配位)は、 $n=1, m=0$ による、ヘリカル軸構造を示すモードと、 $n=1, m=2$ による、トロイダル角に対して回転する三角度断面形状を示すモードとの、二つの基本モードによって特長付けられている。これらのモードの符号は内寄せ

配位、外寄せ配位に対して正負が逆転するが、その正負の組み合わせがLHD装置の磁場配位の特長となっている。図1にLHD装置の三種の磁場配位に対する、フーリエ係数の基本モードの値を示す。

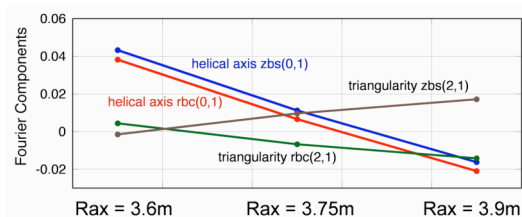


図1 LHD配位の低次フーリエ・モード

(3) これらの符号関係を他の先進的ヘリカル配位と比較すると、その違いが明瞭となる。すなわち、先進的配位とされているヘリカル型実験装置の磁場配位は、これら二つの基本モードの符号はLHD装置とは逆の関係となっている。LHD装置の磁場配位に対して、ヘリカル捕捉粒子のドリフト軌道の最適化に対して有効なモードを $n=1, m=0$ のヘリカル軸構造のモード、また磁気井戸によるMHD安定性に寄与するモードを、 $n=1, m=2$ の三角度断面形状のモードと仮定し、モードの振幅を変えながら磁場配位の特性を調べることにより、それぞれのモードの効果を詳細に調べた。この研究の延長線上にある成果として、 $n=1, m=0$ のモードと $n=1, m=2$ のモードとを、LHD装置とは逆の符号関係になるように組み合わせることにより、新しい磁場配位の候補を見つけることができた。この磁場配位の優れた特長の一つとして、高ベータ平衡配位において、Shafranovシフトが小さくなることが見いだされた。図2にLHD磁場の真空磁場配位と平均ベータ値2%の平衡配位、図3に新しい磁場配位の真空配位と平均ベータ値2%の平衡配位を示す。新しい配位では磁気軸の移動量が少なくなっていることがわかる。

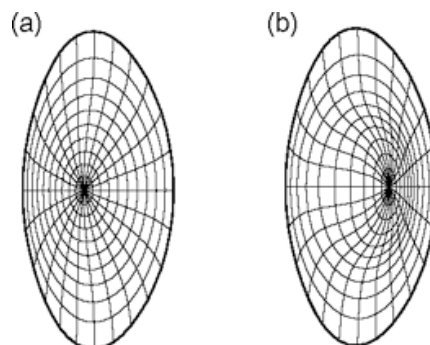


図2 LHD配位の(a)真空配位と(b)高ベータ配位

(4) 高ベータ平衡配位においてShafranovシフトが小さいということは、高温・高密度プラズマに対して良いプラズマの閉じ込め特性を保てるということを意味する。LHD実験

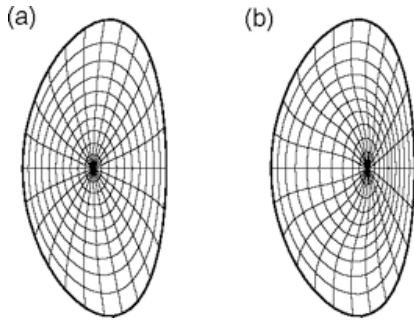


図3 新配位の(a)真空配位と(b)高ベータ配位

では内寄せ配位において優れたプラズマ閉じ込め特性を実現し、また平均ベータ値 5% の平衡を安定に達成することができたが、高ベータ配位において閉じ込め特性が劣化するという問題を抱えている。その大きな原因は大きな Sharfanov シフトであり、本研究において見いだされた新しい磁場配位は、その問題点に対する解決策を与える。ヘリカル型閉じ込め装置の閉じ込め特性は、新古典輸送と乱流輸送が合わさった効果で決定されるが、将来の核融合炉での輸送過程では新古典輸送が基本的である。その指標としては、実効的リップルの値の評価が一般的である。図4には、実効的リップルの値をLHD実験の三種の磁場配位と新しい磁場配位に対して、横軸に平均ベータ値を用いて示してある。LHDの磁場配位では、ベータ値の上昇に伴って実効的リップルが増大して閉じ込め特性が劣化しているのに対して、新しい配位ではその劣化が抑えられていることがわかる。

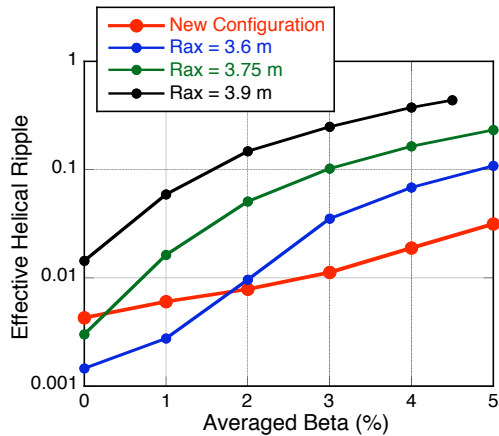


図4 平均ベータ値に対する実効リップル

(5) LHD装置の磁場配位の分析から得られた物理的理解を、世界のヘリカル装置の多様な磁場配位に対して適用し、ヘリカル配位の総合的な理解を目指した。まずLHD装置の磁場配位の分析に用いた、最外殻形状の二重Fourier分解に用いた係数を数学的に集約することによって、さらに磁場配位の物理的閉じ込め特性に直結した形状因子を用いることとした。数学的には複素数空間でのFourier分解を行うことと灯火であるが、装

置の特徴を表すための係数がおよそ半分の数を足ることになる。その結果、LHD装置の磁場配位の特徴を、たった三つの係数でほぼ表現することが可能となった。この表現方式を他のヘリカル装置の磁場配位に適用すると、例えば非常に複雑な構造を持つとされているドイツのWendelstein 7-X装置の場合でも、9個の係数でその構造的長を表現することができる。

(6) 多くの異なるヘリカル形式のトーラス閉じ込め装置において、どの場合においても閉じ込め特性を基本的に決定する幾何学的な要素はヘリカル軸構造のモードである。この係数のみを変化させて、いくつかの代表的なヘリカル装置の閉じ込め性能を比較した。この係数の符号の正負は、ヘリカル軸構造の回転のフェイズと楕円断面の回転のフェイズとの間の差を示しているが、どの装置においてもこのフェイズ差が正の値の時に、新古典輸送特性が改善されることがわかった。それに対してどのフェイズ差において磁気井戸が形成されるかは、装置による差が現れる。LHD装置では磁気井戸の形成は、新古典輸送特性改善とは逆の符号において実現されており、この結果がMHD特性と輸送特性との両立を阻む結果となっている。LHD装置では、このような特性の一致を目指した配位改善が今後の課題となる。図5にLHD装置の実効的リップルとヘリカル軸の回転フェイズの関係を示す。また図6にLHD装置の磁気井戸とヘリカル軸の回転フェイズの関係を示す。

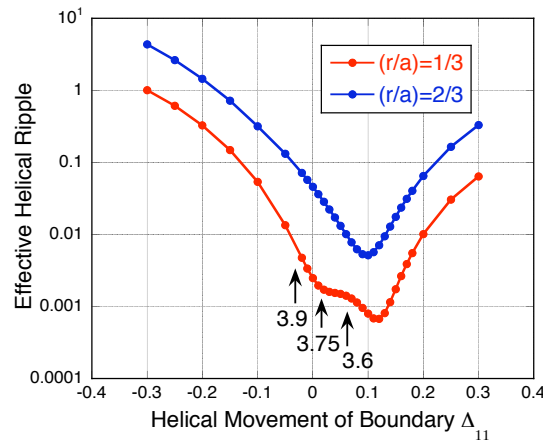


図5 LHD装置の実効リップルとヘリカル軸の回転フェイズとの関係

(7) 研究計画の最終段階では、これまで検討を進めてきた、プラズマの圧力が高い平衡配位においてすぐれた閉じ込め特性を持つ新しい磁場配位を、実際の磁場閉じ込め実験装置としてどのように実現するかという課題に取り組んだ。高温プラズマの磁場閉じ込め装置の設計では、磁場コイルの形状から生成される磁場分布を計算し、そこでのプラズマの閉じ込め特性を計算するという古典的な方法に対して、磁場の三次元分布を数学モデ

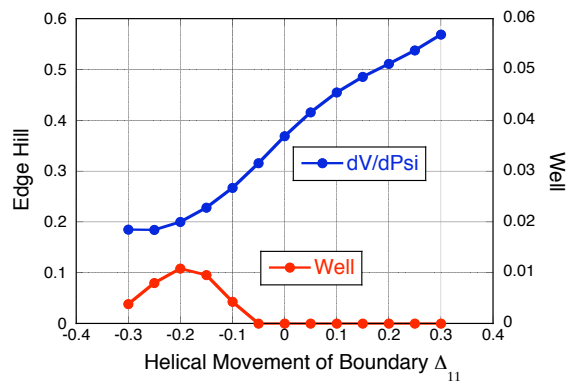


図6 LHD装置の磁気井戸深さとヘリカル軸の回転フェイズとの関係

ルによって表現し、最後にその三次元磁場分布を与える磁場コイル形状を計算する、という方法論がある。核融合科学研究所のLHD装置は、前者の方法によって設計された装置であるが、ここ20年程のヘリカル系磁場閉じ込め研究では、後者の方法論による装置設計が主流となっている。本研究課題では、新しい磁場配位の設計においては、最外殻形状のフーリエモードを基礎とした設計法を用いており、磁場コイルの設計は後者の方法論によることになる。

(8) プラズマ閉じ込め特性を最適化した結果の磁場配位を与えて、それを実現する磁場コイルを設計する際には、何種類かの異なる形状を持った変形したトロイダル・コイルを並べた構造が多く用いられている。ヘリカル装置設計においてはモジュラー・コイル型装置と呼ばれるものである。本研究課題では、まずこの一般的な磁場コイルの設計法を用いて、新しい磁場配位を実現するためのモジュラー・コイルを設計した。一方、本研究課題で見いだした新しい磁場配位は、LHDの磁場配位を基にして改良したものであるので、LHD装置と同様の連続ヘリカル・コイル形状の磁場コイル設計の可能性も考えられる。ヘリカル・コイル形状に与える新しい設計パラメータとして、コイルの巻き枠形状を円形から楕円形とすることにより、本研究課題で得られた優れた閉じ込め特性を持つ磁場配位を、実際の実験装置として実現するための磁場コイル設計に成功した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- (1) S. Okamura, "Comprehensive analysis on the role of helical movement of the magnetic axis in stellarators", Plasma and Fusion Research, 査読有、9巻、2014、3402031
- (2) S. Okamura, "Configuration optimization of a planar-axis stellarator with a reduced Shafranov shift", Plasma and

Fusion Research, 査読有、8巻、2013、2402029

- (3) S. Okamura, "Configuration optimization with planar-axis stellarator minimum number of Fourier modes of boundary shape", Plasma Physics and Controlled Fusion, 査読有、55巻、2013、32002
- (4) S. Okamura and Y. Suzuki, "Comparative study of magnetic field configurations of LHD and CHS based on the boundary shape analysis", Plasma and Fusion Research, 査読有、6巻、2011、2403028

[学会発表] (計6件)

- (1) 岡村昇一, "Improved magnetic configuration of LHD and its magnetic coil design", Plasma Conference 2014, Nov. 19, 2014, 朱鷺メッセ(新潟県・新潟市)
- (2) S. Okamura, "Magnetic coil design for the improved configuration of LHD", 41th Conference on Plasma Physics, June 26, 2014, Berlin (Germany)
- (3) S. Okamura, "Optimization of helical movement of magnetic axis in LHD-type planar-axis stellarator", 40th Conference on Plasma Physics, July 2, 2013, Espoo (Finland)
- (4) 岡村昇一, 「小さなシャフラノフシフトを持つヘリカル配位」、プラズマ・核融合学会第29回年会、2012年11月30日、クローバープラザ(福岡県春日市)
- (5) S. Okamura, "Optimization of the LHD-type planar-axis stellarator configuration using a small number of Fourier modes", 39th Conference on Plasma Physics, July 3, 2012, Stockholm (Sweden)
- (6) S. Okamura, "Effects of triangularities in LHD-type planar-axis stellarators", 38th Conference on Plasma Physics, June 30, 2011, Strasbourg (France)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡村 昇一 (OKAMURA, Shoichi)
核融合科学研究所・特任教授
研究者番号：60115540

(2) 研究分担者

鈴木 康浩 (SUZUKI, Yasuhiro)
核融合科学研究所・准教授
研究者番号：20395758