

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 28 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656597

研究課題名(和文)改良型超高速MRIを用いたMHDプラズマ流の速度分布計測システム

研究課題名(英文)Velocity mapping system of MHD plasma using modified echo-planar imaging

研究代表者

沖中 憲之(OKINAKA, Noriyuki)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20250483

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：MHDプラズマ流を時・空間的に精度良く計測することは、電磁流体力学の基本のみならず、MHD装置の開発や性能評価に重要である。しかし、従来の計測法ではプラズマの速度場を正確に測定できない。また、磁気共鳴映像法(MRI)は、流れの可視化手法の一種であるが、速度場の直接計測も可能な流体計測法でもある。著者は現状で最も高速なMRIであるEPI(Echo Planar Imaging)法を改良し、超高速測定を可能とした改良型EPI法を提案している。本研究では、改良型EPI法を用いたMHDプラズマ流の速度分布の測定について、数値的シミュレーションによって検討し、同手法の有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：Accurate temporal-spatial measurement of an MHD plasma flow is important in not only the basis of magnetohydrodynamics but also the research and development of the MHD device. However, the velocity field of plasma cannot be measured accurately by conventional measurement method. Magnetic resonance imaging (MRI) is a kind of the visualization technique of a flow, moreover it is a fluid measurement method that can measure the velocity field directly. The author improves the Echo Planar Imaging (EPI) method that is most high-speed MRI now, and is proposing modified EPI method that enables the ultrafast measurement. In the present study, the measurement of the velocity distribution in the MHD plasma flow that used modified EPI method was examined by a numeric simulation, and the effectiveness of this technique was confirmed.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・エネルギー学

キーワード：エネルギー全般 計測工学 MRI MHDプラズマ 高温ガス

### 1. 研究開始当初の背景

MHD プラズマ流を時・空間的に精度良く計測することは、電磁流体力学の基本のみならず、MHD 装置の開発や性能評価に重要である。MHD プラズマの速度場の計測法として、 $V \times B$  起電場を利用するプローブ法、レーザ散乱法が用いられてきた。しかし、プローブ法は構造的・技術的に簡単な方法であるが、プローブ自身が流れに擾乱を与える。また、レーザ散乱法は現在最も信頼性の高い方法だが、散乱体を添加するため、高温の MHD プラズマでは熱的・化学的な相互作用を避けられず、速度場に少なからず変化を与える。このように、従来の計測法ではプラズマの速度場を正確に測定できない。

一方、磁気共鳴映像法 (MRI) は、流れの可視化手法の一種であるが、速度場の直接計測も可能な流体計測法でもある。MRI は、対象に全く擾乱を与えない、多数点 (~数千点) における速度の同時計測が可能、従来の計測法では測定不可能な任意の断面での測定が可能、等の利点を持つ。さらに、MHD 発電装置に適用する場合、静磁場が予め存在している、という利点も追加されるため、MHD プラズマ流の速度分布測定において極めて有用である。そこで、著者は現状で実現可能で最も高速な MRI である、EPI (Echo Planar Imaging) 法を用いて MHD プラズマ流の速度分布測定を行い、MHD プラズマに対して EPI 法適用の可能性を示した。しかし、EPI 法といえども平均速度 ~ 1,000m/s、速度変動 ~ 数 10m/s の MHD プラズマの計測に対して十分に高速であるとは言い難かった。それゆえ、著者は EPI 法の傾斜磁場印加パルス系列を改良し、超高速測定を可能とした改良型 EPI 法を提案している。

EPI 法に代表される高速 MRI による速度分布測定は、国内では巨勢等、海外では Mosher 等 (米国) によって報告されているが、プラズマ分野での高速 MRI の適用例は著者の報告のみである。また、従来の EPI 法では、測定対象の平均流速が 1 m/s、速度変動が 0.2m/s 以下に限られているが、著者の提案する改良型 EPI 法は、平均流速が約 800m/s、速度変動が 50m/s の対象の測定を可能としている。

### 2. 研究の目的

本研究では、EPI 法の傾斜磁場印加パルス系列の改良による高速化、最大エントロピー手法による高精度化を行った改良型 EPI 法を用いた MHD プラズマ流の速度分布の測定について、数値的シミュレーションによって検討する。

### 3. 研究の方法

(1) 改良型 EPI 法用印加パルス系列の決定 (印加パルス系列の改良による測定の高速度化)

大型計算機を使用し、現有の改良型 EPI 法

用印加傾斜磁場解析プログラムを実行して、試作する MHD プラズマ流速分布測定システムに最適な、高速測定用傾斜磁場 (設備備品として申請した傾斜磁場用コイルに印加する電流の時間変化: 印加パルス系列) を決定する。

(2) 最大エントロピー法によるデータ解析の高精度化

実際に測定データとして得られる磁気共鳴信号 (MR 信号) から速度分布を再構成する現有の MR 信号 - 速度分布データ変換プログラムを、最大エントロピー手法の概念を付加した高精度データ変換プログラムに変更する。

(3) MHD プラズマ流シミュレーションプログラムの開発

大型計算機を使用し、現有の MHD プラズマ流解析プログラムを改良し、上記(1)の印加傾斜磁場の影響をも含んだ、MHD プラズマ流の速度場の挙動がシミュレーションできるプログラムを開発する。

(4) MHD プラズマ流の速度分布情報 - MR 信号の変換プログラムの開発

上記(3)のシミュレーションプログラムで得られる既知の MHD プラズマの速度分布 (速度ファントムデータ) から改良型 EPI 法を用いて測定されるであろう MR 信号を求める速度分布データ - MR 信号の変換プログラムを開発する。

(5) MHD プラズマ流の速度・温度分布同時計測システムの試作

現有の MHD プラズマ発生装置、EPI 法による流速分布測定システムに対して、上記(1)の高速測定用傾斜磁場と上記(2)で開発した高精度データ変換プログラムを内蔵した計算機を付加して、改良型 EPI 法を用いた MHD プラズマ流の速度分布計測システムを試作する。

(6) MHD プラズマ流の速度分布計測システムの評価・改良

設備備品として申請したシグナルアナライザを使用して前記(4)の変換プログラムによって得られる MR 信号を模擬した信号を発生させ、試作した速度分布同時計測システムで実際にその信号を検波し、速度分布の再構成を行う。その結果と速度のファントムデータを比較・検討し、測定精度、計測システムにおける誤差要因とその大きさについて評価する。また、レーザ散乱法等他の計測法での速度場の検証が容易な中性流体を用いた流れの速度分布測定を試作計測システムで行い、それぞれの測定で得られた結果の比較評価を行う。結果を前記(4)の変換プログラムに反映させ、実際の計測における改善点を検討、改善内容を試作した計測システムにフィー

ドバックする。

(7) MHD プラズマ流の速度分布測定実験

実際に MHD プラズマ流の速度分布測定を行い、前記(3)のシミュレーションプログラムと比較・検討する。また、実際の計測における改善点を検討、改善内容を試作した計測システムにフィードバックする。

(8) 総合的評価

上記(6),(7)を十分に行い、改良型 EPI 法を用いた MHD プラズマ流の速度分布計測システムに関する総合的な評価・検討を行う。

4. 研究成果

EPI 法の傾斜磁場印加パルス系列の改良による高速化、最大エントロピー手法による高精度化を行った改良型 EPI 法を用いた MHD プラズマ流の速度分布の測定について、

(1) 改良型 EPI 法用印加パルス系列の決定

試作 MHD プラズマ流速分布測定システムに最適な、高速測定用傾斜磁場（傾斜磁場用コイルに印加する電流の時間変化：印加パルス系列）を決定した。

(2) 最大エントロピー法によるデータ解析の高精度化

測定データとして得られる磁気共鳴信号（MR 信号）から速度分布を再構成する MR 信号 - 速度分布データ変換プログラムに、最大エントロピー手法の概念を付加し、高精度化した。

(3) MHD プラズマ流シミュレーションプログラムの開発

上記(1)の印加傾斜磁場の影響をも含んだ、MHD プラズマ流のシミュレーションプログラムを開発した。

(4) MHD プラズマ流の速度分布情報 - MR 信号の変換プログラムの開発

上記(3)のシミュレーションプログラムで得られる MHD プラズマの速度分布（速度ファントムデータ）から改良型 EPI 法を用いて測定される MR 信号を求める速度分布データ - MR 信号の変換プログラムを開発した。

(5) MHD プラズマ流の速度・温度分布同時計測システムの試作

MHD プラズマ発生装置、EPI 法による流速分布測定システムに対して、上記(1)の高速測定用傾斜磁場と上記(2)で開発した高精度データ変換プログラムを内蔵した計算機を付加して、改良型 EPI 法を用いた MHD プラズマ流の速度分布計測システムを試作した。

(6) MHD プラズマ流の速度分布計測システムの評価・改良

シグナルアナライザを使用して前記(4)の変換プログラムによって得られる MR 信号を模擬した信号を発生させ、試作システムで信号を検波し、速度分布の再構成を行った。結果と速度のファントムデータを比較・検討し、測定精度、計測システムにおける誤差要因とその大きさについて評価した。

(7) MHD プラズマ流の速度分布測定実験

MHD プラズマ流の速度分布測定を行い、前記(3)のシミュレーションプログラムと比較・検討し、計測における改善点を検討、改善内容を試作した計測システムにフィードバックした。

以上より、改良型 EPI 法が MHD プラズマ流の速度分布測定に有効であると判断した。

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 16 件)

(1) Heat Release Performance of Direct-Contact Heat Exchanger with Erythritol as Phase Change Material

T. Nomura, M. Tsubota, T. Oya, N. Okinaka, T. Akiyama

Applied Thermal Engineering, 61(2013) pp. 28-35.

査読有

(2) Performance Analysis of Heat Storage of Direct-Contact Heat Exchanger with Phase-Change Material

T. Nomura, M. Tsubota, A. Sagara, N. Okinaka, T. Akiyama

Applied Thermal Engineering, 58(2013) pp. 108-113.

査読有

(3) Heat Storage in Direct-Contact Heat Exchanger with Phase Change Material

T. Nomura, M. Tsubota, T. Oya, N. Okinaka, T. Akiyama

Applied Thermal Engineering, 50(2013) pp. 26-34.

査読有

(4) Thermal Conductivity Enhancement of Erythritol as PCM by Using Graphite and Nickel Particles

T. Oya, T. Nomura, M. Tsubota, N. Okinaka, T. Akiyama

Applied Thermal Engineering, 61(2013) pp. 825-828

査読有

(5) Phase Change Composite Based on Porous

Nickel and Erythritol  
T. Oya, T. Nomura, N. Okinaka, T. Akiyama  
Applied Thermal Engineering, 40(2012) pp.  
373-377  
査読有

〔学会発表〕(計 13 件)

(1) Improvement in Thermal Stability of Phase  
Change Material by Impregnation into  
Mesoporous Material  
A. Sagara, T. Nomura, N. Okinaka, T. Akiyama  
Symposium on green energy and technology  
Malaysia IIUM 2013.12.12

(2) メソ多孔質体への含浸処理による潜熱蓄  
熱材の熱安定性改善  
相良昭人, 能村貴宏, 沖中憲之, 秋山友宏  
第 50 回日本伝熱シンポジウム  
ウェスティンホテル仙台 2013.5.29

(3) 高温潜熱蓄熱に関して  
沖中憲之  
第 2 回潜熱工学シンポジウム 招聘講演  
神戸大学統合研究拠点 コンベンションホー  
ル 2012.12.10

(4) 低温鉄鋼廃熱回収用直接接触式潜熱蓄熱  
装置の設計  
能村貴宏, 坪田雅功, 沖中憲之, 秋山友宏  
日本鉄鋼協会 第 164 回秋季講演大会  
愛媛大学城北キャンパス 2012.9.18

(5) ニッケル多孔体, グラファイトによる潜  
熱蓄熱材料の高熱伝導化  
大矢哲平, 能村貴宏, 沖中憲之, 秋山友宏  
日本金属学会 第 149 回秋期講演大会  
沖縄コンベンションセンター 2011.11.07

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等  
無し

6. 研究組織

(1)研究代表者  
沖中 憲之 (OKINAKA Noriyuki)  
北海道大学・工学研究院・准教授  
研究者番号：20250483

(2)研究分担者  
無し

(3)連携研究者  
無し