

Title	液体金属MHD発電機内乱流の再層流化現象と渦電流による壁面ジェット流の解明
Sub Title	Study on the relaminarization of turbulent flows and the wall jet flows produced by eddy currents in a liquid metal MHD electrical power generator
Author	小林, 宏充(Kobayashi, Hiromichi) 杉本, 憲彦(Sugimoto, Norihiko)
Publisher	
Publication year	2014
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2013. )
JaLC DOI	
Abstract	<p>流れ方向に有限長さの磁石が作り出す磁束密度の流れ方向変化により、発電領域の上流と下流では渦電流が発生する。その渦電流によるローレンツ力により磁場と垂直な平面内で速度分布はM字形に歪められ、側壁ジェット流を形成する。ラージエディシミュレーション(LES)により、低磁束密度では流れ方向に伸長した発電機内の乱流構造は抑制され、さらに磁場を増加させ発電領域でレイノルズせん断応力がゼロになるまで乱流が抑制される条件では、乱流構造は磁場の方向に揃い、カルマン渦のように繰り返し下流へ流される。さらに磁場を増加させると側壁ジェットの局所摩擦レイノルズ数が増加し、側壁ジェット流が乱流遷移することが分かった。</p> <p>We numerically assess the influence of non-uniform magnetic flux density on turbulent duct flows in a liquid metal magnetohydrodynamic (MHD) electrical power generator. As increasing the magnetic flux density (or Hartmann number), the M-shaped velocity profile produced by eddy currents develops in the plane perpendicular to the magnetic field; the maximum velocity in the sidewall layer of the M-shaped profile increases to keep the flow rate. Under the condition of a relaminarized flow, the turbulence structures align along the magnetic field and flow repeatedly like the Karman vortex sheet. At a higher Hartmann number, the wall-shear stress in the sidewall layer increases and the sidewall jets transit to turbulence.</p>
Notes	<p>研究種目：基盤研究(C) 研究期間：2011～2013 課題番号：23560209 研究分野：工学 科研費の分科・細目：機械工学・流体工学</p>
Genre	Research Paper
URL	<a href="https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_23560209seika">https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_23560209seika</a>

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 24 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560209

研究課題名(和文)液体金属MHD発電機内乱流の再層流化現象と渦電流による壁面ジェット流の解明

研究課題名(英文) Study on the relaminarization of turbulent flows and the wall jet flows produced by eddy currents in a liquid metal MHD electrical power generator

研究代表者

小林 宏充 (KOBAYASHI, Hiromichi)

慶應義塾大学・法学部・教授

研究者番号：60317336

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：流れ方向に有限長さの磁石が作り出す磁束密度の流れ方向変化により、発電領域の上流と下流では渦電流が発生する。その渦電流によるローレンツ力により磁場と垂直な平面内で速度分布はM字形に歪められ、側壁ジェット流を形成する。ラージエディシミュレーション(LES)により、低磁束密度では流れ方向に伸長した発電機内の乱流構造は抑制され、さらに磁場を増加させ発電領域でレイノルズせん断応力がゼロになるまで乱流が抑制される条件では、乱流構造は磁場の方向に揃い、カルマン渦のように繰り返し下流へ流される。さらに磁場を増加させると側壁ジェットの局所摩擦レイノルズ数が増加し、側壁ジェット流が乱流遷移することが分かった。

研究成果の概要(英文)：We numerically assess the influence of non-uniform magnetic flux density on turbulent duct flows in a liquid metal magnetohydrodynamic (MHD) electrical power generator. As increasing the magnetic flux density (or Hartmann number), the M-shaped velocity profile produced by eddy currents develops in the plane perpendicular to the magnetic field; the maximum velocity in the sidewall layer of the M-shaped profile increases to keep the flow rate. Under the condition of a relaminarized flow, the turbulence structures align along the magnetic field and flow repeatedly like the Karman vortex sheet. At a higher Hartmann number, the wall-shear stress in the sidewall layer increases and the sidewall jets transit to turbulence.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：数値流体力学 乱流 電磁流体 LES 渦電流 壁面ジェット流

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 製鉄・鋳造・原子力・MHD発電分野では、磁場によって液体金属流れを制御する。その効果的な制御のためには、MHD乱流特有の速度分布や乱流強度分布の解明が不可欠であるが、液体金属流れは不透明で計測が困難であるため、詳細に解明できていない。本研究で対象とする液体金属MHD発電機は、矩形ダクト内に液体金属を流して磁場を印加し、発生した起電力を壁面に配した電極から外へ電力として取り出すだけの簡単なシステムである。そのため、流体の運動エネルギーを簡単に直接電気に変換することが可能である。現在、中国では、海上に浮かべたブイの上下運動で矩形ダクト内の液体金属を往復運動させ、その海の波浪エネルギーを液体金属MHD発電機から直接電気エネルギーとして取り出す実験を準備中である。最適な発電機形状を設計するためには、MHD乱流特有の流れ場を数値計算によって解明することが急務である。

(2) 実際の実験装置では磁石の大きさは有限であり、流れ方向に非一様な磁場下特有の乱流現象および再層流化現象を評価する必要がある。前述の過去の実験では非一様な磁場の流れ方向への勾配に起因して渦電流が発生し、M字形の速度分布をもつ壁面ジェット流が観測されており、壁面摩擦係数の極大・極小の挙動を強調すると予測される。また、MHD発電の実験機や商用機では誘導磁場の変動は無視できないと予測される。以上のように、液体金属MHD発電機の性能を左右するのは、乱流状態の液体金属の流れであり、その制御あるいは発電特性を理解するには、MHD乱流特有の流れ場の解明は不可欠である。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、液体金属電磁流体力学(MHD)発電機において重要となる、流れ方向に非一様に印加された磁場による乱流の再層流化現象とその磁場が作り出す渦電流による壁面ジェット流をラージエディシミュレーション(LES)を用いて解明し、発電性能ならびに壁面摩擦係数への影響を明らかにすることである。

(2) 海の波浪エネルギーを本発電機で直接電気に変換すれば、日本の新たな自然エネルギー利用の道が開ける。この点を考慮した作動流体の違いによる発電性能への影響や波の周波数による発電性能への影響なども調べる。

## 3. 研究の方法

(1) 報告者の開発した電磁流体へも適用できる局所サブグリッドスケール(SGS)モデルを用いたLESにより、低レイノルズ数・低磁気レイノルズ数において、液体金属

MHD発電機内の乱流現象を解明する。グラフィックス用の演算装置であるGPUや複数プロセッサを用いた大規模を行う。

(2) 正方断面を有するMHD発電機において、磁束密度の大きさや負荷抵抗値(負荷率)の違いによる発電性能や乱流状態の違いを調べる。

(3) 作動流体である液体金属の種類を変え、また有限の値を持つ電極の影響も含めた発電性能への影響を調べる。また、波によって液体金属を往復運動させる発電装置を想定して、発電性能の周波数特性を調べる。

## 4. 研究成果

(1) 磁場は発電を行う電極間には一様に印加されるが、流れ方向に有限長さの磁石によって生成されるので、その発電領域の前後では磁場の流れ方向変化により渦電流が発生する。その渦電流によるローレンツ力は流れに垂直に働くので、流れは磁場に垂直な平面内でM字形の速度分布にゆがめられ、側壁ジェット流を形成する。その側壁ジェットの最大速度は、磁束密度に比例するハルトマン数の0.5乗に比例して増加し、壁面からジェットの最大速度までの距離である側壁ジェットの厚さはハルトマン層の0.5乗分の1で薄くなることが分かった。

(2) 磁束密度を増加させると流れ方向に伸長した発電機内の乱流構造は抑制され、このときの断面内にできる渦状の2次流れは磁場に垂直な壁面側の構造が抑制・消失することが分かった。さらに磁場を増加させ発電領域でレイノルズせん断応力がゼロになるまで乱流が抑制される条件では、乱流構造は磁場の方向に揃い、カルマン渦のように繰り返して下流へ流され、渦状の2次流れは断面内で消失することが分かった。さらに磁場を増加させると側壁ジェットの局所摩擦レイノルズ数が増加し、側壁ジェット流が乱流遷移することが分かった。実験で未解明だった乱流強度の増加の原因が判明し、その平均速度分布は実験結果と良く一致した。このときの断面内の2次流れは側壁側の渦状構造が抑制されて磁場に垂直な壁面側に現れることが分かった。一方で、細かな乱流構造は側壁側に存在し、その乱流構造は再び流れ方向に伸長されることが分かった。

(3) 負荷率はオープン電界に対する得られた電界で定義され、負荷抵抗値を増加させると1に近づき、減少させると0に近づく無次元量である。負荷率を増加させた場合、磁束密度を増加させた場合と同様に、電流は外へ取り出すことが困難になり、流路内で渦電流の増加として寄与する。その結果、M字形分布が強調されることがわかった。なお、ローレンツ力に対する磁束密度(ハルトマン数)

と負荷率の寄与は、前者が2乗であるのに対して、後者は1乗となるので、その寄与は磁束密度の変化の方がより影響を与えることが分かった。このことは、流れの中の乱流構造抑制現象の結果からも示唆された。

(4) 高負荷率では電流が外へ取り出すことができず損失となることから、最適な負荷率が存在し、本研究では約0.64の時に、最大電気変換効率が得られた。負荷をオープンにした場合と高負荷率での流れ場の結果を比較し、それらに大きな違いが無いことが分かった。よって、理学系でまず検討されるであろう、外へ電流を取り出さないオープン電圧条件における流れ場も、本研究における高負荷率での結果から、その流れ場が理解できると考えられる。

(5) 電磁流体の流れ場(平均流速分布)はレイノルズ数が同じ場合、液体金属の電気伝導度、磁束密度、粘性係数で構成されるインターラクショナルパラメータで決まることが分かった。水銀、低融点合金であるGalinstan、Ualloy、NaKの4種類を比較するとインターラクショナルパラメータが他に比べて約5倍大きなNaKの平均流速分布はM字形となる変形が大きくなることが分かった。一方、同じインターラクショナルパラメータになるように、各作動流体実験における磁束密度を調整した場合でも、発電効率に違いが出るのが分かった。これは、電極の電気伝導度と作動流体の電気伝導度の比によって電流の電極への流れ込みに違いがあり、外部に取り出す電力量に違いが出るのが原因と分かった。発電効率を増加させるためには、電極の電気伝導度に対する作動流体の電気伝導度の比を小さくすることが必要である。

(6) 波力への応用を考えて、波力でピストンを押し、作動流体を動かすシステムを考えた。その際の波力の周波数応答を検討したところ、低周波数では発電機部分とピストン部分で断面積が異なることに起因して発生するシステムの形状損失で決まる効率となるが、高周波数ではピストンの動きが少なく流速が低下するので、形状損失が小さくなり、効率の低下が押さえられるが、低出力となることが分かった。

## 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1件)

Hiromichi Kobayashi, Hiroki Shionoya, Yoshihiro Okuno, Turbulent duct flows in a liquid metal magnetohydrodynamic power generator, Journal of Fluid Mechanics, 査読有, Vol.713, 2012, pp.240-270

DOI:10.1017/jfm.2012.456

〔学会発表〕(計14件)

Liancheng Hu, Hiromichi Kobayashi, Yoshihiro Okuno, Performance of a Liquid Metal MHD Power Generation System for Various External Forces, 12th International Energy Conversion Engineering Conference (IECEC 2014), 2014年07月28日, Cleveland Convention Center, クリーブランド, アメリカ

胡 蓮成, 小林 宏充, 奥野 喜裕, Response Analyses of a Liquid Metal MHD Generator, 電気学会 新エネルギー・環境研究会, 2013年09月26日, まちなかキャンパス長岡, 新潟

Liancheng Hu, Hiromichi Kobayashi, Yoshihiro Okuno, Performance of Liquid Metal MHD Generator for Various Working Fluids, The International Conference on Electrical Engineering (ICEE 2013), 2013年07月16日, Xiamen International Seaside Hotel, アモイ, 中国

Hiromichi Kobayashi, Yoshihiro Okuno, MHD Turbulent Duct Flows in a Liquid-Metal MHD Power Generator, The V International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering (COUPLED 2013), 2013年06月17日, Palau de Congressos d'Eivissa, イビザ, スペイン

Hiromichi Kobayashi, Yoshihiro Okuno, Liquid metal turbulent duct flows in a magnetohydrodynamic power generator, International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences (ICCES'13), 2013年05月25日, Bellevue Hilton Hotel, シアトル, アメリカ

胡 蓮成, 小林 宏充, 奥野 喜裕, 液体金属 MHD 発電機における作動流体の影響, 平成25年電気学会全国大会, 2013年03月20日, 名古屋大学, 愛知県

小林 宏充, 胡 蓮成, 奥野 喜裕, 非一様磁場が印可された MHD ダクト流れにおける乱流現象, 第28回生研 TSFD シンポジウム, 2013年03月08日, 東京大学, 東京都

Hiromichi Kobayashi, Yoshihiro Okuno,

Turbulent transfer and secondary flow patterns in transitional MHD duct flows under the nonuniform magnetic field, 65th Annual Meeting of Division of Fluid Dynamics of The American Physical Society, 2012年11月20日, San Diego Convention Center, アメリカ

Hiromichi Kobayashi, Yoshihiro Okuno, Large eddy simulation of turbulent transfer in MHD duct flows with strong sidewall jets, The 7th International Symposium on Turbulence, heat and mass transfer (THMT2012), 2012年09月27日, University of Palermo, イタリア

小林 宏充, 奥野 喜裕, 液体金属 MHD 発電機における乱流現象と発電特性に関する LES, 日本機械学会 2012年度年次大会, 2012年09月10日, 金沢大学, 石川県

小林 宏充, 奥野 喜裕, 液体金属 MHD 発電機の発電性能と乱流現象に関する数値計算, 電気学会 新エネルギー・環境研究会 2012年09月06日, 東京工業大学, 神奈川県

Hiromichi Kobayashi, Yoshihiro Okuno, MHD turbulent duct flows under the non-uniform magnetic field, The 10th WORLD CONGRESS ON COMPUTATIONAL MECHANICS (WCCM 2012), 2012年07月10日, Hotel Transamerica, ブラジル

Hiromichi Kobayashi, Hiroki Shionoya, Yoshihiro Okuno, Large eddy simulation of turbulent duct flows in a liquid metal MHD generator with non-uniform magnetic field, 7th International Conference on Turbulence Shear Flow Phenomena, 2011年7月29日, Ottawa Convention Centre, オタワ

Hiromichi Kobayashi, Hiroki Shionoya, Yoshihiro Okuno, Influence of non-uniform magnetic flux density on turbulent MHD flows in liquid metal MHD power generator, 42nd AIAA PDL Conference in conjunction with 18th International Conference on MHD Energy Conversion, 2011年6月28日, Sheraton Waikiki and the Hawaii Convention Center, ホノルル

〔その他〕

ホームページ等

慶應義塾大学 著書・発表論文・学会発表一

覧

<http://k-ris.keio.ac.jp/Profiles/72/0007193/profile.html>

自然科学研究教育センター メンバー紹介

<http://www.sci.keio.ac.jp/member/detail.php?eid=00004>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小林 宏充 (KOBAYASHI Hiromichi)

慶應義塾大学・法学部・教授

研究者番号: 60317336

### (3) 連携研究者

杉本 憲彦 (SUGIMOTO Norihiko)

慶應義塾大学・法学部・専任講師

研究者番号: 10402538