

平成22年6月7日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19560159

研究課題名 (和文) 電磁流体乱流のダイナモ効果の実証とモデリング

研究課題名 (英文) Verification and modeling of dynamo effect in magnetohydrodynamic turbulence

研究代表者

半場 藤弘 (HAMBA FUJIHIRO)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：20251473

研究成果の概要 (和文) : 電導性流体には乱流拡散に対抗して大規模な磁場が生成・維持されるダイナモ機構があることが知られている。本研究では電磁流体のチャンネル乱流のラージエディシミュレーションを行いダイナモ効果について考察した。平均磁場や乱流エネルギーなどの統計量を求め、平均磁場が生成されることを示した。さらに乱流起電力の輸送方程式の生成項を調べ、平均磁場の生成の原因がクロスヘリシティ(速度と磁場の相関項)のダイナモ効果であることを示した。

研究成果の概要 (英文) : It is known that dynamo mechanism exists which generates and sustains large-scale magnetic field against the turbulent diffusion. In this research a large eddy simulation of magnetohydrodynamic turbulent channel flow was carried out to investigate the dynamo effect. Statistics such as the mean magnetic field and the turbulent energy were evaluated and it was shown that the mean magnetic field is generated. Moreover, the production terms in the transport equation for the turbulent electromotive force were examined to show that the mean field generation is due to the dynamo effect of the cross-helicity (the correlation between the velocity and the magnetic field).

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：流体物理学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：電磁流体、乱流、乱流モデル、ダイナモ

1. 研究開始当初の背景

(1) 乱流のモデリングと数値シミュレーション

乱流の大きな特徴は、乱流によって実効的

な粘性率が増大し(渦粘性)、平均速度場の拡散や熱・物質の拡散が大きく促進されることである。またエネルギーの観点で見ると、外力によって注入される平均速度場の運動エ

エネルギーが、乱流のエネルギーにカスケードし、やがて粘性によって散逸すると理解できる。このような渦粘性やエネルギーの流れをどうモデル化し評価するかが、乱流を予測し制御するために非常に重要となる。乱流を数値的に予測するために、これまで混合長モデルのような現象論的なモデル、レイノルズ平均モデル(RANS)、ラーゼディーションシミュレーション(LES)、直接数値計算(DNS)が開発されてきた。順に後者になるほど正確であるが、計算可能なレイノルズ数が低くなるので、例えばDNSなど後者による精密な計算のデータを元に、RANSやLESなど前者のモデルを検証し改良することが進められてきた。

(2) 電磁流体乱流の特徴

プラズマ気体や液体金属のような電導性の流体では、レイノルズ数に加えて磁気レイノルズ数が高い場合、速度場だけでなく磁場も乱れた分布を持つ。これらの乱流場によって渦粘性と同様に平均磁場に対する実効的な拡散率も増大し(渦拡散)、磁場エネルギーのカスケードが起こる。そして電磁流体の場合にはダイナモ効果と呼ばれる非電導性流体にはない興味深い現象が知られている。これはある特殊な乱れ場の効果で大規模な平均磁場が駆動され維持されるという機構であり、エネルギーの逆カスケードとして理解できる。例えば、地球磁場は地球内部の核の溶融鉄の乱流ダイナモ効果によって維持されていると考えられている。

このような電磁流体乱流の例は、核融合工学や宇宙地球物理学などの分野で多く見られる。核融合プラズマ閉じ込め装置である逆転磁場ピンチでは、プラズマ中に大きな電流が流れ、速度場や磁場が乱流状態となり、特にアルファダイナモ効果(平均磁場の方向に起電力が生じる効果)で平均磁場分布が維持されていると期待される。また同じくプラズマ装置のトカマクでは、プラズマの回転運動によって熱輸送が押さえられることが近年発見され、この回転運動にもとづくクロスヘリシティダイナモ効果(平均渦度の方向に起電力が生じる効果)が熱輸送の減少と密接に関連していることが推測される。したがってプラズマ閉じ込め時間を延ばすにはアルファダイナモやクロスヘリシティダイナモ効果などのダイナモ現象を理解し制御することが重要となる。また前述の地球磁場や太陽磁場の維持・反転の機構を解明するには、乱流によるダイナモ効果を理解することが重要となる。

(3) 電磁流体乱流のモデリングの現状

電磁流体乱流の数値解析とモデリングの研究は通常非電導性流体に比べてかなり遅れている。電磁流体乱流の数値解析の研究

では、DNSは主に一様等方性乱流が主で、非一様乱流のものは少ない。また、核融合装置のプラズマ研究では、少ないモード数の磁場分布の安定性解析が主で、発達した乱流に基づくものは少ない。宇宙地球物理学では、渦拡散やアルファダイナモ項をアドホックに設定するなど、現象論的なモデル化にとどまる。したがって、流体工学の分野で実証開発されてきた、LESやRANSのモデル化が電磁流体乱流の渦拡散やダイナモ効果に適用されれば、それぞれの分野の磁場や速度場の理解と予測に大きく貢献すると思われる。

われわれはこれまで統計理論を用いて電磁流体乱流のRANSモデルを提案し、それを用いて核融合プラズマや太陽磁場などについて定性的な考察を行った。また、RANSモデルを用いて逆転磁場ピンチや地球磁場の計算を試み、実験や観測値とおよそ一致する結果を得た。しかしそれらのRANSモデルはまだ、DNSやLESを用いて検証されていない。本研究によって、電磁流体のRANSモデルが検証され、さらに改良されれば、単に核融合や地球磁場のための個別のモデルではなく、一般の電磁流体乱流に対する普遍的なモデルを構築できることが期待される。

2. 研究の目的

核融合工学や宇宙地球物理などの分野で見られる電磁流体乱流には、乱流拡散効果に加え、大規模な磁場が生成されるダイナモ効果など興味深い現象が見られる。大規模磁場の発展を理解し予測するため、電磁流体乱流のレイノルズ平均モデルが提案されているが、十分な検証が行われていない。そこで本研究では、電磁流体の非一様乱流の数値計算を行い、ダイナモ効果の実証とモデル化を行う。低レイノルズ数のチャンネル乱流のDNSを行い電磁流体のLESモデルを検証する。また中レイノルズ数のLESを行い、乱流起電力などの統計量を求めダイナモ効果の実証を行い、その効果を適切に表現するモデル方程式の構築をめざす。

3. 研究の方法

(1) 統計理論によるダイナモ効果の考察

乱流による拡散効果に対抗して大規模磁場が維持される機構であるダイナモ効果には、古くから知られているアルファダイナモ、着目しているクロスヘリシティダイナモに加えて、他の機構もありうる。乱流の統計理論を用いて磁場の発展に関係する乱流起電力の解析を行いモデル項を導出して、さまざまなダイナモ機構の可能性について考察する。またそれぞれのダイナモ項に対応する乱流統計量を見だし、その輸送方程式のモデル化を理論的に行う。そしてダイナモ機構を記述する閉じた方程式系の構築をめざす。

(2) 中規模乱流の LES 計算によるダイナモ効果の検証とモデリング

統計理論を用いて電磁流体の LES モデルとして単純なスマゴリンスキー型モデルを導く。その際、磁場が小さくなる極限で、通常非電導性流体の LES モデルへ自然に帰着するという条件に留意する。この LES モデルを用いて、中程度の電磁流体チャンネル乱流の LES を行う。レイノルズ数と磁気レイノルズ数は 600 程度のチャンネル乱流を計算する。可能な範囲で細かい計算格子を用いて、LES モデルの寄与を少なくし、計算精度を上げる。速度場と磁場が統計的に定常になる乱流場を実現し、平均速度、平均磁場、レイノルズ応力、乱流起電力などの統計量を求める。特に乱流起電力とその輸送方程式の各項を評価し、生成項に着目して、アルファダイナモ、クロスヘリシティダイナモが実現しているかを確認する。そして、乱流起電力の代数的なモデル化を試みる。乱流エネルギーや散逸率などをモデル変数としてモデル定数を求め、統計理論の結果と比較検討する。

(3) 小規模乱流の DNS 計算による LES モデルの検証

小規模の電磁流体チャンネル乱流の DNS を行う。摩擦速度とチャンネル半幅に基づくレイノルズ数と磁気レイノルズ数で 180 程度のチャンネル乱流を計算する。磁場に対する適切な初期値と境界条件を与えることにより、速度場と磁場が統計的に定常になる乱流場を実現する。時間平均と面平均を行うことにより、平均速度、平均磁場、乱流エネルギー、磁場エネルギーなどの統計量を求める。DNS と LES で得られた統計量を比較することにより、モデルの妥当性を示す。

4. 研究成果

(1) ダイナモ効果の理論的考察

電磁流体のレイノルズ平均モデルとして不可欠な乱流起電力のモデリングを統計理論を用いて行った。既存の 2 スケール相互作用近似の理論に回転系の扱いや応答関数について改良を加え、より高次まで計算を行った結果、アルファダイナモ項や乱流磁気拡散項の他に、ダイナモ現象の一つであるポンプ効果の項を導出し、その物理的意味を考察した。ポンプ速度が電磁流体残留エネルギーの空間勾配と密接な関連があること、また乱流磁気拡散率が主に運動エネルギーに依存することなどがわかった。回転球殻のモデル計算にポンプ項を適用し、ポンプ効果が平均磁場分布に与える影響を調べた。アルファダイナモ項とは逆の効果を与えることがわかった。

(2) クロスヘリシティ乱流モデルの考察

乱流の統計理論を用いてクロスヘリシティやその散逸率の輸送方程式のモデルを考察した。このモデルを太陽風乱流に適用して電磁流体乱流の振る舞いについて調べた。また分極ドリフトによるダイナモ効果の解釈とクロスヘリシティの保存と供給に着目し、クロスヘリシティによるダイナモ効果について考察した。

(3) 計算プログラムの作成と計算条件・モデル定数の考察

電磁流体乱流の LES モデルとして既存のモデルを元にスマゴリンスキー型のモデルを導いた。また、有限差分法を用いて直方体のチャンネル乱流の計算プログラムを作成した。特に壁面の磁場の境界条件として絶縁体の条件を導入した。比較的粗い計算格子を用いて、小規模な LES 計算を行い、平均磁場や乱流エネルギーの時間発展を求め、ダイナモ効果による磁場の発達と、磁場の抵抗による運動エネルギーの減衰などを調べた。平均磁場の主流方向成分が現れることがわかり、その時間発展を支配する平均電場の収支を調べることによりダイナモ効果として平均渦度に比例するクロスヘリシティ・ダイナモが示唆された。面平均と時間平均により統計量を求め、平均場や乱流エネルギーの空間分布を調べた。LES 計算の結果の信頼性を確かめるため、レイノルズ数や計算領域の長さ、計算格子の幅、モデル定数などの条件を変えて、乱流場の時間発展や空間分布への影響を考察した。

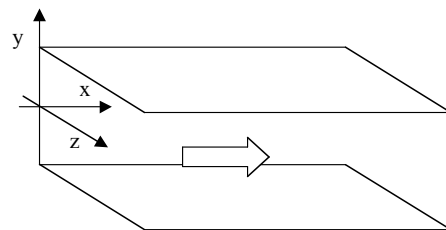


図 1 チャンネル乱流の模式図 (矢印は主流の方向を表す)

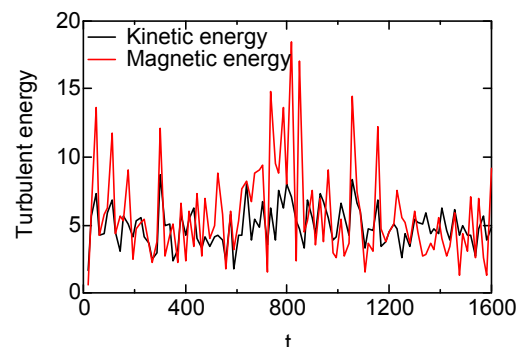


図 2 乱流エネルギーの時間発展 (黒線が運動エネルギー、赤線が磁気エネルギー)

(4) 電磁流体チャンネル乱流の長時間計算による輸送方程式の評価

妥当な計算条件とモデル定数を用いて電磁流体チャンネル乱流の長時間計算を行い、平均場や乱流統計量を求めた。平均場でなく乱流による起電力により主流方向の平均磁場が駆動され維持される電磁流体乱流場を再現した。特に乱流起電力の輸送方程式のつりあいを求め、アルファダイナモによる起電力は小さく、クロスヘリシティと平均渦度の効果により実際に起電力が生成されていることを確認し、クロスヘリシティダイナモの妥当性を示した。また、乱流運動・磁気エネルギーの輸送方程式のつりあいを求め、エネルギー輸送の観点からダイナモ機構を考察した。乱流運動エネルギーから平均磁場へエネルギーが流れてダイナモ作用が起きていることがわかった。

さらに、平均磁場の時間発展の過程において、二つの異なるエネルギー状態があることを見いだした。一つは平均磁場がまだ小さく、乱流運動エネルギーと乱流磁気エネルギーがほぼ等分配の状態であり、もう一つは平均磁場が強くなり、乱流運動エネルギーが乱流磁気エネルギーより卓越して大きい状態である。この二つの状態の機構を乱流エネルギーの輸送方程式を用いて考察し、ローレンツ力によるエネルギー輸送項の重要性を示した。

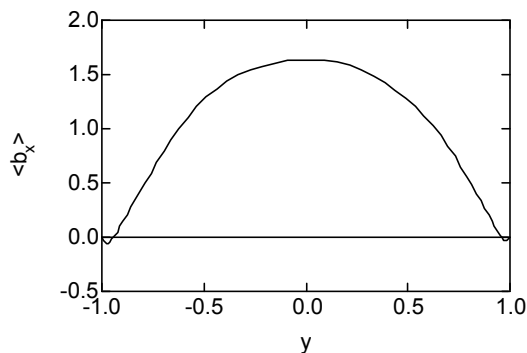


図 3 ダイナモ効果で維持されている平均磁場の空間分布

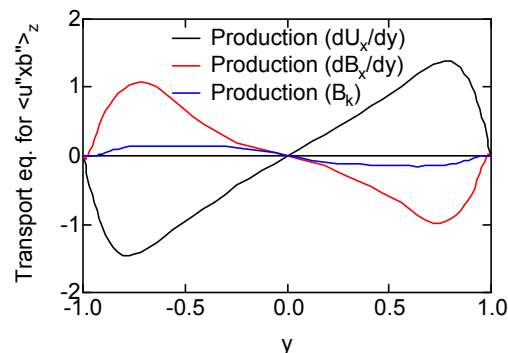


図 4 乱流起電力の輸送方程式に含まれる 3 つの生成項の空間分布 (黒線がクロスヘリ

シティダイナモに対応する生成項、正の勾配が磁場の生成を意味する)

(5) 電磁流体チャンネル乱流の直接数値計算

低レイノルズ数の電磁流体チャンネル乱流の直接数値計算を行い、短時間平均ではあるが乱流統計量を求めた。これまで行った LES 計算と近い平均磁場や乱流エネルギーの分布が得られ、また乱流エネルギーや乱流起電力の輸送方程式のつりあいも定性的に一致し、LES 計算によるダイナモ効果の考察が妥当であることを示した。

(6) 成果の位置づけ・影響と今後の展望

クロスヘリシティダイナモ効果はまず理論的に提案され、核融合プラズマの輸送現象や太陽・宇宙磁場の現象の考察に用いられてきたが、実際にこのダイナモ効果が存在し寄与しているかは実証が十分でなかった。本研究では電磁流体のチャンネル乱流の計算において大規模磁場が実際に維持され、乱流起電力の輸送方程式の中で平均渦度項が最も重要な生成項であることを示した。これはまさにクロスヘリシティダイナモ効果により大規模磁場が生成されていることを示しており、クロスヘリシティダイナモについて重要な根拠を与えたことになる。

太陽・宇宙の多くの磁場現象では天体の回転が伴いまた核融合プラズマ装置でもプラズマの回転が輸送現象に影響を及ぼす。このような回転すなわち平均渦度がある現象においてはクロスヘリシティダイナモが大きな寄与をすることが考えられ、そのダイナモ効果を数値的に実証したことに本研究の意義がある。

今後はさらに数値計算を進め、定性的にダイナモ効果を実証するだけでなく、そのモデル項の係数の評価・検証を行う必要がある。また、初期の磁場配位、磁場の境界条件、系の回転効果などの問題設定を変えて、さまざまな電磁流体乱流を実現することにより、クロスヘリシティ以外のダイナモ効果の実証とモデリングを行うことも重要である。

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 9 件)

- ① F. Hamba, M. Tsuchiya, Cross-helicity dynamo effect in magnetohydrodynamic turbulent channel flow, Physics of Plasmas, 査読有, Vol. 17, 2010, pp. 012301 1-13
- ② N. Yokoi, A turbulence model for magnetohydrodynamic plasmas, Journal of Turbulence, 査読有, Vol. 9, 2008, No. 37, pp. 1-25

東京大学・生産技術研究所・助教
研究者番号：50272513

③ F.Hamba, H.Sato, Turbulent transport coefficients and residual energy in mean-field dynamo theory, Physics of Plasmas, 査読有, Vol.15, 2008, pp.022302 1-12

④ N.Yokoi, F.Hamba, An application of the turbulent magnetohydrodynamic residual-energy equation model to the solar wind, Physics of Plasmas, 査読有, Vol.14, 2007, pp.112904 1-16

〔学会発表〕(計16件)

① 半場藤弘、LESによる電磁流体チャネル乱流のエネルギー輸送の解析、第23回数値流体力学シンポジウム、2009年12月16日、仙台市

② 半場藤弘、電磁流体チャネル乱流の運動エネルギーと磁気エネルギーの分配、日本物理学会2009年秋季大会、2009年9月28日、熊本市

③ N.Yokoi, Modeling the turbulent cross-helicity dissipation rate, Sixth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 2009年6月22日、韓国 ソウル

④ F.Hamba, Dynamo effect in MHD turbulent channel flow, Sixth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 2009年6月22日、韓国 ソウル

⑤ 横井喜充、天体・プラズマ現象のための乱流理論・モデルの試み、日本物理学会第64回年次大会、2009年3月31日、豊島区

⑥ 半場藤弘、電磁流体のチャネル乱流のダイナモ効果、日本物理学会2008年秋季大会、2008年9月20日、盛岡市

⑦ 半場藤弘、MHD乱流のアルファダイナモとポンプ効果、日本物理学会第63回年次大会、2008年3月24日、東大阪市

⑧ N.Yokoi, F.Hamba, A turbulence model for the solar wind: Application of the turbulent magnetohydrodynamic residual-energy equation, Fifth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 2007年8月29日、ドイツ Garching

6. 研究組織

(1) 研究代表者

半場 藤弘 (HAMBА FUJIHIRO)
東京大学・生産技術研究所・教授
研究者番号：20251473

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

横井 喜充 (YOKOI NOBUMITSU)