

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2009

課題番号：20740100

研究課題名(和文)

宇宙における磁気流体乱流の理論的研究

研究課題名(英文)

Theoretical Research on Astrophysical Magneto-Turbulence

研究代表者：

鈴木 建 (SUZUKI, Takeru)

名古屋大学・理学研究科・准教授

研究者番号：80431782

研究成果の概要(和文) 主に数値シミュレーションの手法を用いて、天体周囲に形成される降着円盤での磁気流体乱流による輸送機構を解析した。天体の中でも特に、若い星の周囲に形成される原始惑星系円盤へと適用し、円盤内で励起された磁気乱流が、外側への角運動量輸送だけでなく、円盤上下面からの円盤風の駆動にも主体的な役割を果たす事を初めて指摘した。

研究成果の概要(英文) : By using numerical simulations, we have studied transport phenomena in accretions disks around stars. In particular we focused on protoplanetary disks around young stars and pointed out that MHD turbulence plays an essential role in not only in outward transport of angular momentum but driving disk winds from disk surfaces for the first time.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：磁気流体, 乱流, 波動, プラズマ, 原始惑星系円盤

1. 研究開始当初の背景

宇宙流体はスケールが大きいため、流体力学における粘性項に対する慣性項の比であるレイノルズ数が非常に大きくなる。このため、何らかの流れが宇宙流体中に発生すると、それはやがて(層流ではなく)乱流状態へと移行することが多い。乱流は様々な階層の宇宙流体の至るところに存在していることが知られており、しばしばエネルギーや運動量の輸送に重要な役割を果たしている。

例えば、星間空間には典型的に10km/s程度の速度分散の乱流が存在することが観測的に知られている。これは、温度が数千度程度の暖かい相の音速程度、温度が100K以下の分子雲に代表される冷たい相の音速の10倍程度にも達している。分子雲の力学状態はガス圧よ

りも乱流による有効的な圧力により支配され、分子雲における星、惑星形成過程においては乱流が非常に大きな役割を果たしていると考えられている(例えばBallesteros-Paredes et al. 2006)。宇宙プラズマ流体では一般に粘性項に対する慣性項の比であるレイノルズ数が大きいため、流れが存在すると層流ではなく乱流状態となる。また特に、天体周囲等では重力の影響により密度に勾配が存在する。このため、非等方な背景場における、磁気流体乱流の研究が、天体プラズマでの輸送過程に理解には非常に重要となる。しかしながらこれまで、系統立てた研究はあまり行われておらず、多くの重要課題が未解明のまま残されていた。

また、-これが私が乱流の研究に取り組む直接の動機となった研究課題であるが- 天体から吹き出すウィンドにおいても、乱流は重要な役割を果たしている。赤色巨星や中小質量の主系列星や、形成直後の原始中性子星など、表面对流層を持ち表面が擾乱状態になっている天体が、宇宙には数多く存在している。この表面擾乱が様々なモードの波動を励起するが、この波動は上方へ伝搬するに従い、非線形効果などにより乱流状態へと移行していく (Suzuki & Inutsuka 2005; Suzuki 2007)。実際太陽風では人工衛星による直接観測が行われており、よく発達した磁気乱流状態になっていることが知られている。

この波動、乱流過程は、天体から外層のガスへのエネルギー、運動量輸送に本質的な役割を果たしている。すなわち、天体内部の対流、擾乱の運動エネルギーを、波動、乱流を通じて外部へと受け渡すことにより、外層の吹き出し(ウィンド)を駆動しているのである。さらに、原始惑星系円盤や、高密度天体周囲の降着円盤においても、磁気回転不安定性などに起因して乱流が励起されていると考えられている。特に原始惑星系円盤中の乱流は、力学状態を規定するのみならず、塵の集積過程などを通じて惑星の形成自体をコントロールしているとの指摘もある (Johansen & Hubert 2005)。他にも、恒星内部の対流層の物質混合とエネルギー輸送、超新星爆発後の外層の加熱 (Thompson et al. 2005)、銀河団の加熱機構 (Fujita et al. 2004) など、乱流が鍵となり得る過程が様々な宇宙流体において指摘されている。

宇宙流体中の乱流の大きな特徴は、多くの場合で磁場と流体が相互作用し合う磁気乱流状態になっていることである。磁場は、外部 (例えば、天体外層の場合は中心天体から供給される場合もあれば、乱流中での増幅 (いわゆるダイナモ機構) により生成される場合もある)、また、磁場が存在し、周囲のガスと相互作用するためには、荷電粒子 (の運動; マックスウェル方程式より) の存在が必要不可欠であるが、電子とイオンの供給は、天体風や銀河団などの高温環境下では衝突電離により、星間空間の冷たい相などの低温環境下では宇宙線および輻射による電離により達成されていると考えられている。

以上述べてきたことから分かるように、磁気流体乱流の基本的性質の理解は、宇宙流体の物質/運動量/エネルギー輸送過程の理解に直結するといっても過言ではないであろう。しかしながら現状では、磁気流体乱流の理解は発展途上にある。これまでは、一様な背景場中の非圧縮磁気流体乱流-いわゆるアルフベン乱流-の研究が主に行われてきた。解析的モデルの手法 (例えば Goldreich & Sridhar 1995) や数値シミュレーションによ

る精力的な研究により、乱流渦の磁力線と平行方向と垂直方向の非等方性や、エネルギーカスケードの基本的性質など、いくつかの重要な性質が明らかにされてきている。しかしながら、宇宙流体を記述するのにより現実的な圧縮性流体に関する研究 (例えば Cho & Lazarian 2003) は、系統立てて行なわれていない。そのため、以下に述べるよう多くの重要な事柄が研究されておらず、手付かずのまま残されているという現状である。

2. 研究の目的

宇宙流体の特徴として、重力の影響が強く現れることが挙げられる。結果として、背景場に密度勾配が現れ、より現実的には磁気流体乱流もこのような非一様場中で考える必要がある。このような場合、密度が薄くなる方向に向かう流束成分と、逆向き成分とでカスケードの状況が異なることが予想される。具体的には、密度が薄くなる向きの成分は、密度の減少に見合うよう速度振幅がその分増幅され、非線形効果がより効果的に働くことが推測される。

本研究の目的は、密度勾配が存在する環境下において、圧縮性磁気流体乱流が物質、運動量、エネルギー輸送に果たす役割を理解することである。まず手始めに、降着円盤系の1つである、原始惑星系円盤における、磁気流体乱流による輸送機構を理解する。

3. 研究の方法

乱流は非線形過程である。従って解析的モデル化だけでは取り扱いが困難な場合も多く、適宜数値シミュレーションの手法を用いて、研究を進めていく。

乱流の詳細な構造を解像するため、差動回転円盤の一部を取り出した局所数値実験を行う。特に、磁気乱流不安定性、差動回転による巻き込み、磁気浮力不安定性により励起される磁気乱流がどのように時間進化し、準定常状態に達するかに着目し、数値実験の解析を進めていく。そして、乱流の非等方応力による、角運動量輸送率、及び、鉛直方向へのポインティング流速による物質の持ち上げや円盤風の駆動を定量的に調査する。異なった状況設定の場合の数値実験を複数行い、角運動量輸送率と円盤風駆動率が、磁場形状と磁場強度にどのように依存するかを定量的に明らかにする。

この数値実験結果を実際の天体-第一の応用として本研究では原始惑星系円盤-に適用し、磁気流体乱流が物質やエネルギー輸送、円盤の進化に与える影響を吟味する。局所数値実験では、異なった磁場強度の場合の角運動量輸送率と円盤風駆動率を導出しているので、その結果を大局的な原始惑星系円盤の解析的モデルに適用し、局所数値実験では不可

能である、長い時間スケールの円盤進化を計算する。そして特に、磁気乱流駆動による円盤風が円盤進化に与える影響、そして円盤内で誕生される惑星の形成や進化に与える影響を考察する。

4. 研究成果

局所円盤の数値シミュレーションを行った結果、磁気回転不安定性により励起された磁気流体乱流は、外側への角運動量輸送（と結果として起きる内向きの質量降着）のみならず、円盤上下面からの円盤風を駆動することを発見した。これまで、大局磁場による円盤風駆動については盛んに研究されていたが、磁気流体乱流による円盤風駆動は本研究によりはじめて具体的に指摘したものである。

初期の磁場状態が異なった場合についての数値シミュレーションも行った結果、鉛直方向の磁場強度がある程度以上強くなると、実効的な乱流粘性による角運動量輸送率、円盤風駆動効率共に、磁場強度の正の相関を持つ事が示された。しかし、磁場強度は弱い場合は、角運動量輸送率、円盤風駆動率共に磁場強度に依存性が非常に弱く、これらの値に陰値が存在することを見いだした。

さらにこの結果を若い星周囲の原始惑星系円盤に適用し、円盤風が円盤進化、特に円盤ガスの消失に重要な寄与をする事を指摘した。この機構は本研究で初めて指摘されてものである。本研究で発見された磁気乱流駆動による円盤風では、間欠的な磁力線のつなぎかえに起因して、円盤回転周期の5-10倍で円盤風の質量流束が間欠的に強くなるという特徴がある。このような非定常的性質の兆候を示す原始惑星系円盤が、電波観測で指摘されており、今後のALMAによる超高解像度観測により、より詳細な状況が観測的に明らかになるものと期待される。

この機構では円盤風質量流束は、円盤の回転周波数に正の相関を持つ。一般に原始惑星系円盤をはじめとする降着円盤では、中心星に近い程中心星の重力が強いため、円盤の回転周波数も大きくなる。このため、円盤ガスの散逸は中心星の近くから始まり次第に外側の領域へと移って行く。このため進化の途上の原始惑星系円盤は中心星近傍にガスの穴の空いた状態となる。円盤ガスの観測は難しいが、塵物質を観測からこのような穴の空いた円盤が観測されており、遷移円盤と名付けられている。このような遷移円盤への進化の物理的説明としても、本研究で明らかにした磁気乱流駆動円盤風は合致するものである。

内側からの原始惑星系円盤ガスの散逸は、円盤内での惑星の形成と進化にも、大きな影響を与える。まずはじめに、惑星形成論の主要な説の1つである、コア集積説においては、マイクロメートル以下の塵物質の集積合体に

より、キロメートルサイズの微惑星が形成さら、さらにその微惑星の合体により岩石惑星やガス惑星の中心核が最終的に形成されると考えている。しかし微惑星形成の途上において、岩程度の大きさ(メートルサイズ)の固体物質は非常に早く中心星に落下してしまい、微惑星を形成することができないという問題が指摘されている。この岩石サイズの固体の落下には、円盤ガスの圧力勾配力が外向きである事が本質的であるが、本研究で明らかにしたように円盤ガスが内側から消失すると、ガスの圧力勾配力が非常に小さくなる。結果として、岩石サイズの固体物質の中心星落下が効果的に抑制され、微惑星形成の阻害という困難が解決される可能性がある。

形成後の惑星の進化において、円盤ガスが大きく影響する。特に岩石惑星やガス惑星の核程度の質量(典型的に数倍の地球質量以下)の原始惑星では、ガス円盤との重力相互作用により、惑星の中心星からの距離が大きく変化すると考えられている。原始太陽系円盤の典型的な状況を仮定すると、地球程度の質量の惑星は円盤の存在時間よりも非常に早く中心星方向に移動し、結果として中心星に落ち込んでしまう可能性が高い。しかし、本研究で指摘したように、中心星近傍で円盤ガスが消失していれば、そこでの惑星とガス間の重力相互作用が弱くなり、惑星の移動が抑制される。本研究で得られた原始惑星系円盤の進化の結果に基づき固体惑星の軌道進化を計算すると、内側への移動(落下)が抑制され、中心星に落ち込まずに済む事が判明した。

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3件)

1. Suzuki, Takeru K., Inutsuka, S., "Disk Winds Driven by Magnetorotational Instability and Dispersal of Protoplanetary Disks", *Astrophys. J.*, 691, L49 – L54, 2009
2. Gu, Pin-Gao, Suzuki, Takeru K., "Thermal Response of a Solar-like Atmosphere to an Electron Beam from a Hot Jupiter: A Numerical Experiment", *Astrophys. J.*, 705, 1189 – 1195, 2009
3. Suzuki, Takeru K., Muto, T., Inutsuka, S., "Protoplanetary Disk Winds via Magnetorotational Instability: Formation of an Inner Hole and a Crucial Assist for Planet Formation", *Astrophys. J.*, 718, 1289 – 1304, 2010

〔学会発表〕（計 3 件）

1. 鈴木建、犬塚修一郎、磁気乱流により駆動される円盤風による、原始惑星系円盤の散逸，日本天文学会 2008 年秋季年会
2. 鈴木建、犬塚修一郎、磁気回転不安定性による円盤風駆動，日本天文学会 2009 年春季年会
3. 鈴木 建、武藤恭之、犬塚修一郎、円盤風が原始惑星系円盤進化と惑星形成に与える影響，日本天文学会 2009 年秋季年会

〔図書〕（計 1 件）

シリーズ現代の天文学第 10 巻太陽 桜井隆、小島正宜、小杉健郎、柴田一成 編（第 8 章を執筆）2009 年出版

〔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
<http://www.ta.phys.nagoya-u.ac.jp/stakeru/>

6. 研究組織
(1) 研究代表者
鈴木 建（名古屋大学）

研究者番号：80431782

(2) 研究分担者
()

研究者番号：

(3) 連携研究者
()

研究者番号：