

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 9 月 18 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2010～2014

課題番号：22684006

研究課題名(和文) 高解像度大局数値実験による、降着円盤、天体風における磁気流体乱流過程の研究

研究課題名(英文) Magnetohydrodynamical processes in accretion disks and astrophysical winds by high-resolution global simulations

研究代表者

鈴木 建 (Suzuki, Takeru)

名古屋大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80431782

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,700,000円

研究成果の概要(和文)：以下の2課題の研究に取り組んだ。

(1)降着円盤の大局的高解像度3次元磁気流体シミュレーションを行い、円盤の温度分布が回転周波数分布を通して、磁場増幅に大きな影響を与えることを指摘した。さらに、理想磁気流体近似が成立する場合でも、磁気乱流における磁力線のつなぎ変えにより、質量の流れと磁束の動きが異なるとの成果を得た。

(2)活動的な太陽型星の磁気流体シミュレーションを行ない、波動の反射の非線形減衰に起因する不安定機構により、表面からのエネルギー注入の微妙な変化が、外層の恒星風強度の大きな変化を引き起こすことを明らかにし、太陽風が過去に1000倍近く高強度になり得ることを指摘した。

研究成果の概要(英文)：We have carried out the following two subjects.

(1)By performing high-resolution global 3D magnetohydrodynamical (MHD) simulations for accretion disks, we point out that the temperature structure largely affects the amplification of magnetic field through the distribution of rotation frequency. Even if the ideal MHD approximation is fulfilled, the flow of the mass and the motion of the magnetic flux are different because of turbulent magnetic reconnection.

(2)By MHD simulations for active solar-type stars, we point a global instability associated with the reflection and nonlinear dissipation of Alfvén waves. As a result a small change of the energy injection from the photosphere leads to a large change of the stellar wind, and we propose that the mass flux of the solar wind could be as strong as 1000 times of the present value in the past.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：磁気流体力学 計算物理 乱流 波動 降着円盤 太陽風 恒星風 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、力学状態の規定に重要な役割を果たしている。

例えば、太陽風プラズマはよく発達した磁気乱流状態になっていることが、人工衛星による直接観測により知られている(例えば Bruno & Carbone 2005, *Living Rev. Solar Phys.*, 2, 4)。これは、太陽表面で励起された様々なモードの波動が、上空への伝搬の際に反射や回折などを受け混ざり合い、波動乱流状態となった結果であると考えられている。この機構は、乱流を介した波動の減衰過程である。結果として太陽の表面对流層のエネルギーを上空へと受け渡し、上空大気(コロナ)を加熱し太陽風を駆動する主要機構となっている。太陽の他にも、原始星、赤色巨星(Suzuki 2007; 以下S07 とする)、中小質量の主系列星、原始中性子星等(Suzuki & Nagataki 2005)、表面对流層を持つ天体では、このような波動、乱流過程が天体風駆動に(程度の差はあるが) 寄与していると考えられている。

原始星、新星、低質量X線連星、活動銀河核など、天体周囲の降着円盤においても、乱流は重要な役割を担っている。一般に質量降着の際には、物質は天体周囲を回転しながら落下していく。角運動量を保持したまま落下できなくなるが、何らかの機構で角運動量が外側に輸送されると、天体まで降着することができる。分子粘性等の微視的な粘性値は非常に小さいが、実際の円盤では降着円盤中の乱流が実効的な粘性として働くことにより外側へ角運動量が輸送され、質量降着が実現されていると考えられている。最近では特に、磁気回転不安定性(Balbus & Hawley 1991, *ApJ*, 376, 214) が乱流の起源として有力視され、降着円盤における磁気流体乱流現象が盛んに研究されている。

他にも分子雲中での星形成や銀河団中心部の加熱など、乱流が重要な役割を果たしている天体現象が知られており、(磁気) 乱流現象の理解は様々な天体過程の解明にとって重要な要素である。

大局的な輸送過程における磁気乱流の解析の際の最大の困難は、スケールの違いである。大域的構造の解析には大きな密度差の領域を考慮する必要があるが、乱流の基本構成要素である渦のカスケードなどの解析には、スケール高(密度等の物理量が e 倍変化する長さ) 以下を調査する必要がある。このため、大域的構造と局所的な乱流過程を同時に首尾一貫した方法で行うことは非常に困難であった。

例えば降着円盤における磁気乱流現象の解析には、密度勾配や円盤の曲率を無視した、局所円盤近似に基づくシミュレーションが主に行われていた。一方、大局円盤のモデル化やシミュレーションでは、小スケールの乱流の効果をパラメーター(Shakura & Sunyaev 1972, *A&A*, 24, 337) などの現象論的パラメーターに押し込めて取り扱っていた。しかしながら、局所円盤の取り扱いにより導出される乱流強度などは、大域的効果を考慮すると修正される可能性が高い。同様に後者の乱流パラメーター導入による大局的な取り扱いでは、間欠性などの乱流特有の現象が考慮されていない。加えて申請者らは、鉛直方向の密度勾配を考慮した局所円盤の数値実験により、磁気回転不安定性起源の小スケールの磁気乱流が大局的な円盤風の駆動源となることを指摘した(Suzuki & Inutsuka 2009)。これは小スケール乱流と大局構造が密接に関連していることを示している。

同じく太陽風、恒星風駆動においても、局所的な波動乱流過程に関する研究と、大域的モデル化に基づく研究がこれまで乖離していた感がある。そのような中申請者らは、小スケールの波動の伝搬や減衰を解像する大局的シミュレーションを1次元近似を仮定しながらも行い、太陽・恒星コロナ加熱、太陽風・(漸近赤色巨星を除く) 中小質量恒星風の加速には、天体表面で励起されたアルフベン波による非線形減衰過程が主要な寄与としていることを直接的な方法で示した(Suzuki & Inutsuka 2005; 2006; Suzuki 2007)。しかし1次元近似のため、上記で述べたような乱流過程を考慮できていないという状況であった。

2. 研究の目的

本研究では、乱流を解像する3次元大局シミュレーションを実行し、降着円盤や天体風駆動の質量/運動量/エネルギー輸送過程を直接解析することを第一目的とする。その上で、以下のような様々な天体現象に応用することを、第二の目的とする。

応用の一つめは、惑星形成の現場である原始惑星系円盤などの降着円盤でのエネルギー輸送機構の研究である。地球型惑星や木星型惑星の核の形成機構の主要モデルとして、乱流状態にある円盤内での塵の集積合体が議論されている。これまでの乱流の解析には、主に局所円盤近似が取られてきている(例えば、Johansen et al. 2007, Nature, 448, 1022) が、実際は密度勾配や降着等の大域的効果も重要となることが推測される。本研究では、大域的な円盤高解像度磁気流体シミュレーションコードを実行し、磁気乱流にともなう質量降着と円盤風、そしてさらに(これは研究を開始後にその重要性を認識したが)磁束の流れの関係を明らかにし、惑星形成に与える影響を理解することが、本応用研究の目的である。

応用研究の二つめは、恒星コロナ、恒星風、さらに褐色矮星や巨大ガス惑星の大気と天体風の統一的理解に関する課題である。原始星、中小質量主系列星や赤色巨星などからはX線が観測され、太陽と同じく上空にはコロナが存在し、高温の恒星風が吹き出していると考えられている。これまで太陽の他赤色巨星に関する研究に取り組んだ(Suzuki 2007) が、上記の天体風コードを活動度の高い太陽型星、褐色矮星や巨大ガス惑星など、恒星の範疇を越えた幅広い天体にも応用し、天体外層のエネルギー輸送と天体風の統一的理解を行うことが、本応用研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) 降着円盤でのエネルギー輸送に関する研究

円盤局所計算のために構築したデタルト座標 3次元磁気流体シミュレーションコードを球座標化し、大域的な降着円盤を扱えるように改良する。特に、初期に鉛直方向の磁場を設定した状況で、長時間安定に計算が走るように、境界条件を注意深く設定する。特に円盤の表面(境界)に流れ出し境界を設定し、円盤の内縁(r境界)に降着境界を設定する。その上で、温度分布が異なる設定の計算を複数行う。温度分布の違いは回転周波数分布の違いとなり、磁力線の引き延ばしや磁気回転不安定性による磁場の増幅に大きく影響するため、特にその部分に着目し数値データ解析を行う。

(2) 天体外層と天体風に関する研究

太陽と赤色巨星の外層と恒星風のために構築した磁気流体シミュレーションコードの重力項や磁場強度と形状を変更することにより、活動度の高い太陽型星、褐色矮星、巨大ガス惑星など、表面对流層の影響が外層の加熱や天体風を駆動するおおもとの原因となってい

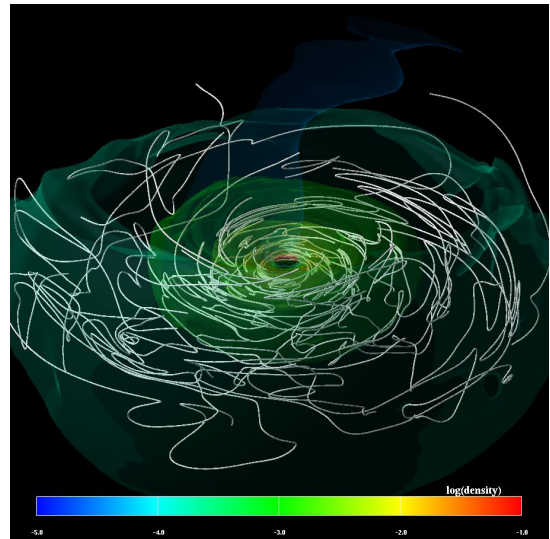
る天体へと応用する。

4. 研究成果

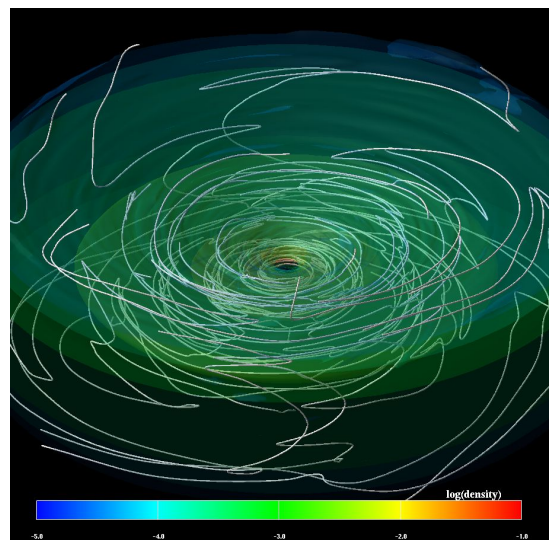
(1) 降着円盤でのエネルギー輸送に関する研究

降着円盤の大域的 3次元磁気流体数値シミュレーションを行い、以下の結果を得た。

(i) 円盤の温度分布がバロトロピック関係(ガス圧が密度のみに依存する)を満たす時には、回転周波数は鉛直方向に一定となり、磁気回転不安定性による乱流的磁場が生成される一方で、バロトロピック関係を満たさない時は鉛直方向に速度差(差動回転)を生じ、鉛直磁場の引き延ばしによる、揃った磁力線構造を持つ磁場生成が効果的になる。さらに後者の場合、大域的流れも生成され、エネルギー輸送に重要な役割を担う。一般にバロトロピック関係を満たさないで、後者の場合に対応し、大域的な磁場や流れが重要になると考えられる。



バロトロピック関係を満たす場合。



バロトロピック関係を満たさない場合。

(ii) 数値データを解析することにより、質量と磁束の大域的な流れを調べた。円盤表面付近での磁場による角運動量輸送により、質量と磁束共に、中心天体への落ち込むことが分かった。一方で円盤赤道面付近では、乱流的振舞の結果、質量と磁束の流れが異なっていることが判明した。本シミュレーションでは理想磁気流体近似(磁場とガスは凍結し一体とし振る舞う)を仮定しているため、この質量流束と磁束の動きの相違は、乱流的磁力線繋ぎ変えが到る所で起きていることを示している。

磁束の流れによる磁場の時間進化は、恒星-惑星系の形成と進化に大きく影響するが、まだその様相を全く分かっていない。本研究の成果は、その状況に一石を投じるものである。

なおこの成果は Suzuki & Inutsuka 2014 に掲載されている。

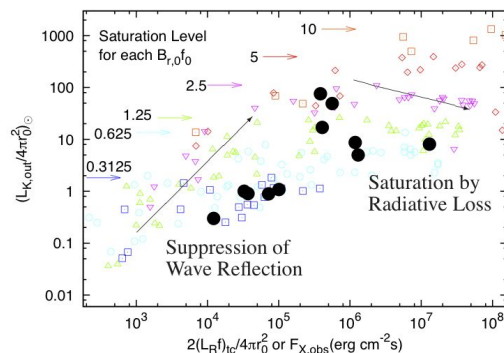
従来の円盤の局所領域のシミュレーションによる研究も、修士課程大学院生の井尾氏を中心により取り組んだ (Io & Suzuki 2014)。比熱比を変更することにより、磁気乱流減衰による加熱の効果を考慮し、シミュレーションを行なった。加熱の効果が弱い場合(比熱比が小さい場合に対応)は、鉛直方向の円盤風が磁場の効果により吹き出す、ポインティング流束駆動型となっている一方で、加熱の効果が強い場合(比熱比が大きい場合)は、乱流磁場の減衰が周囲のガスを加熱し、そのガス圧により円盤風が駆動されることが判明した。前者のポインティング流束駆動型の場合は、円盤風に回転周期の 10 周程度の激しい間欠性が見られるのに対し、後者のガス圧駆動型の場合は、準定常的な時間依存性が弱い円盤風駆動が見られた。この研究では比熱比の調整で加熱の状況をコントロールしているが、実際は放射冷却や熱伝導による輸送により加熱の状況が決まる。すなわち、円盤の環境により加熱の状況がコントロールされ、円盤風の時間依存性を決めていくことが分かった。

本項目(1)では、当初計画していた中で取り組めなかった課題(具体的な原始惑星系円盤への応用)もある。しかし一方で、当初はその重要性を認識していなかった、磁束の時間進化に関する課題に取り組んだ。この観点から、研究機関 4+1 年(繰越含む)で、十分な成果を得たと考えている。

(2)天体外層と天体風に関する研究

この項目に関して研究代表者は、活動的な太陽型星からの恒星外層加熱と恒星風駆動に関する研究を行なった。人工衛星による X 線観測や、ハッブル宇宙望遠鏡による紫外線観測により、年齢の若い太陽型星からは現在の太陽の 1000 倍程度の X 線放射と、100 倍程度の強度(質量流束)の恒星風が流出しているものがあることが分かっている。しかし何故そのような高い活動度が可能なのかは、これまで分かっていたいなかった。

本研究では、研究代表者が構築した太陽風駆動の磁気流体シミュレーションコードに修正を加え、恒星表面(光球)からエネルギー注入を大きなものに変更することにより、活動度の高い太陽型星の大気の加熱と恒星風駆動のシミュレーションを行なった。様々なエネルギー注入値の 150 を越えるケースの数値シミュレーションを行った結果、表面からのエネルギー注入の微小な変化が、上空の恒星風駆動の状況を大きく変えることが分かった。ここには、磁力線を伝搬する横波であるアルフベン波の反射と非線形減衰に起因する大域的な不安定性が影響していることを指摘している。さらに、観測されている現在の太陽風強度の 100 倍以上の、1000 倍以上の強度を持つ太陽型恒星風駆動の可能性も指摘した。



太陽型星の X 線強度(横軸)-恒星風強度(縦軸)図。黒点が観測値で、色が数値シミュレーション結果である。

さらこの項目(2)では、研究室所属の研究員や大学院生により、他の天体への応用研究も進めた。例えば、現在の太陽の多次元高解像度数値シミュレーション (Matsumoto & Suzuki 2012; 2014)、褐色矮星 (Sorahana, Suzuki, & Yamamura 2014)、巨大ガス惑星 (Tanaka, Suzuki & Inutsuka 2014)、強磁場中性子星 (Takamoto, Kisaka, Suzuki, & Terasawa 2014) などである。

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 16 件 但し査読論文のみ; 内筆頭著者論文 5 件)

査読論文の主なものを列記

1. “Atmospheric Escape by Magnetically Driven Wind from Gaseous Planets”, Tanaka, Y. A., Suzuki, T. K., & Inutsuka, S., *Astrophys. J.*, **792**, 18, 9pp (2014)
2. “A signature of chromospheric activity in brown dwarfs revealed by 2.5-5.0 μm AKARI spectra”, Sorahana, S., Suzuki, T. K., & Yamamura, I., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **440**, 3675-3684 (2014)

3. “Connecting the Sun and the solar wind: the self-consistent transition of heating mechanisms”, Matsumoto, T. & Suzuki, T. K., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **440**, 971-986 (2014)
4. “The Evolution of High-temperature Plasma in Magnetar Magnetospheres and its Implications for Giant Flares”, Takamoto, M., Kisaka, S., Suzuki, T. K., & Terasawa, T., Astrophys. J., **787**, 84, 13pp (2014)
5. “Magnetohydrodynamic Simulations of Global Accretion Disks with Vertical Magnetic Fields”, Suzuki, T. K. & Inutsuka, S., Astrphys. J., **784**, 121, 30pp (2014)
6. “Driving Disk Winds and Heating Hot Coronae by MRI Turbulence”, Io, Yuki & Suzuki, T. K., Astrophys. J., **780**, 46, 13pp (2014)
7. “Saturation of Stellar Winds from Young Suns”, Suzuki, T. K., Imada, S., Kataoka, R., Kato, Y., Matsumoto, T., Miyahara, H., & Tsuneta, S. Publ. Astron. Soc. Japan, **65**, 98 (2013)
8. “Connecting the Sun and the Solar Wind: The First 2.5-dimensional Self-consistent MHD Simulation under the Alfvén Wave Scenario”, Matsumoto, T. & Suzuki, T. K., Astrophys. J., **749**, 8, 5pp (2012)

〔学会発表〕(計 25 件以上; その内国際会議招待講演 11 件; 国際会議寄与講演 5 件) 国際会議招待講演のみ列記

1. “Response of Solar Wind on Extreme Solar Activity” in “14th International Astrophysics Conference, Linear and Nonlinear Particle Energization throughout the Heliosphere and Beyond”, Apr. 19-24, 2015, Tampa, Florida, USA
2. “Disk wind driven by MRI turbulence: evolution of gas and dust” in “The Magneto-Rotational Instability Confronts the Observations”, Apr. 13-17, 2015, Ringberg Castle, Tegernsee, Germany
3. “What determines properties of the solar wind?” in “SCOSTEP 13th Quadrennial Solar-Terrestrial Physics Symposium”, Oct. 12-18, 2014, Xi’an, Shanxi, China
4. “Alfvén wave-driven solar wind during very active phases” in “AGU Chapman Conference on Low frequency Waves in Space Plasmas”, Aug.31 - Sep. 5, 2014, Jeju island, South Korea
5. “Disk winds driven by MRI –some aspects and applications–” in “Non-ideal MHD, Stability, and Dissipation in Protoplanetary Disks”, Aug. 4-8, 2014, Copenhagen, Denmark

6. “Accretion Disk Winds by MRI Turbulence” in “Astronom 2014, 9th Annual International Conference on Numerical Modeling of Space Plasma Flows”, Jun. 23-27, 2014, Long Beach, California, USA
7. “Accretion Disk Winds by MRI Turbulence” in “MR2014; US–Japan Workshop on Magnetic Reconnection”, May 20-24, 2014 Tokyo/Nikko, Japan
8. “Saturation of Stellar Winds from Young Suns” in “Huntsville Workshop 2014 –Solar and Stellar Processes from the Chromosphere to the Outer Corona–”, Mar. 23-27, 2014, Orlando, Florida, USA
9. “Waves and turbulences in solar and stellar atmosphere and wind” in “International Toki Conference 22: Cross-Validation of Experiment and Modeling for Fusion and Astrophysical Plasmas”, Nov. 21-24, 2012, Toki, Gifu, Japan
10. “Evolution and saturation of solar wind and properties of wave and turbulence” in “Turbulence Cascade in the Solar Wind: Anisotropy and Dissipation”, Sep. 19-23, 2012, Meudon/Paris, France
11. “Physics and evolution of the stellar winds from low to intermediate stars” in “IAU General Assembly Special Session 10”, Aug. 20-31, 2012, Beijing, China

〔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：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 建 (SUZUKI, Takeru)
名古屋大学 大学院理学研究科・准教授
研究者番号：80431782

(2) 研究分担者

なし ()

研究者番号：

(3) 連携研究者

なし ()

研究者番号：

なお研究機関中、以下の3名を研究員として
雇用した。

1. 岩崎一成 (IWASAKI, Kazunari)
2011年度1年間
現在 同志社大学・助教
2. 高本 亮 (TAKAMOTO, Makoto)
2012年度3ヶ月間
現在 東京大学・学振PD
3. 空華智子 (SORAHAN, Satoko)
2013年度1年間
現在 東京大学・学振PD