

平成30年6月25日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17621

研究課題名(和文) コロナ加熱問題から迫る恒星からの質量損失率予測モデルの構築

研究課題名(英文) Prediction of mass loss rate from stars based on the solar coronal heating mechanisms

研究代表者

松本 琢磨 (Matsumoto, Takuma)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・特任助教

研究者番号：50728326

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：太陽コロナがなぜ100万度にまで加熱されているのだろうか？また太陽風と呼ばれるプラズマ流が太陽から流れ出ているのはなぜなのか？この二つの疑問に答え、さらには太陽以外の恒星からのプラズマ流をも予測するために、太陽大気を模擬する数値実験を行った。実験の結果、計算機上で太陽コロナや太陽風を再現することに成功した。実験結果を解析したところ、衝撃波や乱流によって大気が加熱され、その圧力で太陽風が駆動されていることが判明した。これによって、同様な機構がプラズマ流を駆動しているであろう他の恒星へ応用する際の基礎的な理論を構築することができた。

研究成果の概要(英文)：Why is the solar corona heated up to 100 million K? Why does the solar wind (plasma flows from the Sun) exist? To answer the 2 questions and to predict the plasma flows from the stars, we conducted numerical simulations. Then we succeeded to reproduce both the solar corona and the solar wind in super computers. According to the results, we found that the solar atmosphere is heated by shocks and turbulence and that the resultant pressure gradient force drives the plasma flows. From this study, we could make the building blocks to predict stellar winds where the similar heating mechanisms would exist.

研究分野：太陽物理学

キーワード：太陽コロナ 太陽風 MHD 波動

1. 研究開始当初の背景

太陽大気の最外層であるコロナは約6千度の冷たい光球に対して、100万度超の高温にまで加熱されている。高温コロナからは惑星間空間に向けて太陽風と呼ばれるプラズマ流が吹き出ている。本研究の目的はコロナを加熱し太陽風を駆動する機構に関して、磁気流体力学に基づいた数値実験を行い、既存の加熱・駆動機構の競合関係を評価することであった。最終的には太陽で得られた知見を活かして、他の恒星からの質量損失率を予言するモデルを作ることも視野に入れていた。

高温のコロナからは太陽風が吹き出すはずである。Parker(1958)によりなされたこの予言は、ルナ1およびマリナー2によるその場観測で確認された。その駆動機構は境界条件と定常性に注目すると3つの型に大別できる。Parkerの理論を含む第1の型では、境界条件がコロナに設定され、その結果として質量損失率(M)は与えた境界条件(密度×音速)によって直接決定される。密度や温度の空間構造が容易に分解できる太陽においては有効であるが、他天体のMを予言することは難しい。恒星風によるMを予言するために開発された第2の型では境界条件がコロナより下層である彩層上部に設定され、Mを担うコロナの温度や密度は加熱分布によって決まる(Hammer 1982, Cranmer et al 2007)。加熱分布はパラメタ化し手で与えるか、乱流の現象論的モデルなどを用いて求められる。第2の型で仮定されていた定常性を排したのが第3の型で、不定性を持った現象論モデルを介さずに、波動の動的な散逸機構

である衝撃波加熱(図1a)とそれに伴うMが自然に再現される(Suzuki & Inutsuka 2005)。

第3の型に分類されるモデルの持つ問題は、多次元的な波動散逸機構が考慮されていない点である。1次元モデルでは図1(a)のようにアルフベン波の急峻化による衝撃波加熱のみが実現される。しかし例えば局所的に生じた密度擾乱を波面が通過すると波面にゆらぎが生じる(図2b)。位相混合(Heyvaerts & Priest 1983)と呼ばれるこの種の多次元的な過程が、1次元的な衝撃波形成とどのような競合関係にあるのだろうか。また3次元的な加熱(図1c)はどのような場合に卓越するのだろうか。これらの疑問を解決することが研究開始当初の大まかな目的であった。

2. 研究の目的

(1) 圧縮性 MHD 方程式に基づいて自己結的に高温コロナを生成する試みは多数なされているが、乱流構造が追えるほど高い解像度を持った数値計算は未だなされていない。例えば過去の研究では、コロナの特徴的構造である太さ数千 km のループ構造を 100 点程度でしか分解できていない(Hansteen et al. 2007)。Hansteenらの計算は観測との比較を重視しているため、正確な輻射計算や現実的なループ構造を解いており、計算コストが大きく高解像度化が困難である。そこで私は、輻射輸送やループの幾何形状など、乱流に影響しないと考えられる効果を近似的に取り扱うことで、計算コストが削減し高解像度の計算が可能なのではないかと考えた。高解像度化に伴って、乱流の構造や加熱率がどのように変化するかを調べるのが研究1の目的である。

(2) 太陽の彩層やコロナの加熱機構の一つとして、波動乱流による加熱がある(図1c)。互いに逆向きに伝播するアルフベン波の衝突による非圧縮的な非線形相互作用は、太陽風中のMHD乱流を駆動する機構として広く受け入れられている。最近では太陽風乱流理論を用いてコロナや彩層の加熱を説明しようという試みが始まっているが、観測からは非圧縮乱流では説明できないイオン加熱や、衝撃波を伴う強い圧縮現象が報告されている。これらの観測を受けて、乱流に対する圧縮性の効果が注目を集めている。これらのことから、コロナ加熱問題に対する3次元圧縮MHD乱流の効果を調べるのが研究2の目的である。

3. 研究の方法

(1) 1次元的な衝撃波加熱と2次元的な位相混合乱流のどちらが卓越するかを調べるため、コロナループの高解像度2次元MHDシミュレーションを行った。コロナループはその名の通り円弧状の形状をしているが、ここでは簡単のためその形状を長方形と

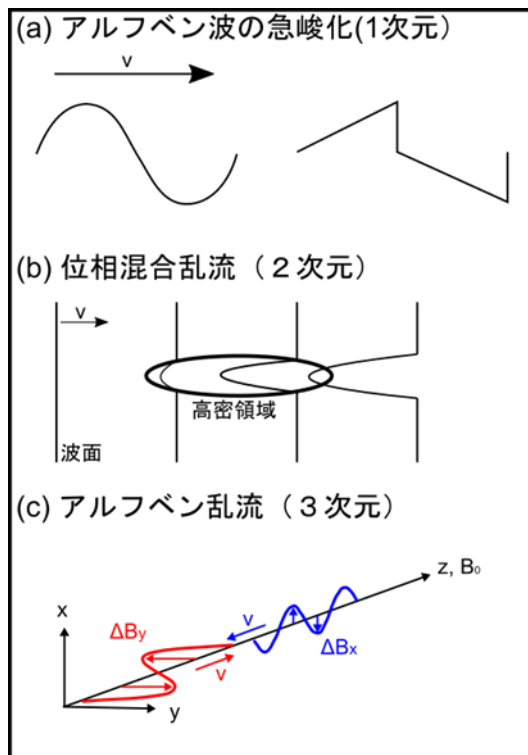


図1 .アルフベン波散逸競合過程

して近似した。円弧であるという情報はループ状の重力加速度を調整することでモデルに取り入れられている。初期には1万Kの等温静水圧平衡大気を置く。そこに下部境界である光球から水平方向の速度擾乱を加えることで系にアルフベン波を駆動する。加える速度擾乱の大きさやスペクトルは観測と類似したものとした。光球からアルフベン波を注入し続け、波動が輸送・散逸される過程で、上層大気がどのように応答するのかを調べた。

(2) アルフベン乱流の効果を調べるため、コロナループの3次元MHDシミュレーションを行った。(1)と同様にループ形状を直方体として近似し、光球から注入したアルフベン波に対する大気応答を調べた。

4. 研究成果

(1) 光球から注入されたアルフベン波上空に伝播するに伴い、様々な変形を受ける。まず磁場形状が急激に開いているため(図2の磁力線参照)アルフベン波の振幅が指数関数的に増大する。その結果、初期には線形波であった波動が非線形効果を顕著に示すようになる。彩層(4Mm以下)では非線形モード変換によってアルフベン波から別の波動モードである磁気音波が作られることになる。磁気音波は容易に衝撃波を形成し彩層を加熱している様子がとらえられた。それとは別に、彩層中で水平方向に高波数を持つ電流構造が発達することが確認できた。空間解像度を上げるにしたがってこの構造はさらに細くなり、乱流的なスペクトルを確認することができた。衝撃波と乱流による加熱の競合関係を調べたのが図2である。彩層では衝撃波と乱流がほぼ同程度加熱率に寄与しているのに対して、コロナ中では主に乱流散逸による加熱で高温なコロナループが維持されていることが分かった。また乱流スペクトルの輸送解析を行うことで、彩層・コロナ中の乱流はアルフベン波と磁気音波の非線形相互作用によっても乱流が駆動され得ることが明らかになった。この結果は従来の非圧縮的過程以外にも乱流を駆動できる相互作用

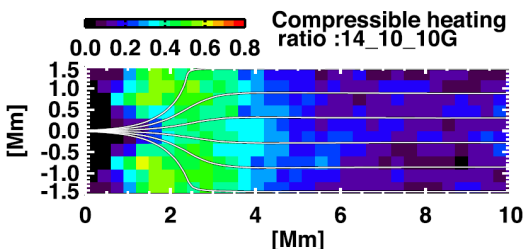


図2. 衝撃波による加熱率の全加熱率に対する割合。白い線は磁力線を表している。左側が光球、右側がコロナ部分に対応している。

が存在し、波動乱流に対する圧縮性の効果が

重要であることを示している。

(2) (1)と同様に光球から注入されたアルフベン波は輸送過程で非線形化する。2次元計算と同様に衝撃波が生成される。また彩層中に局所化された渦構造が間欠的に生成されている様子がとらえられた。解析の結果得られた加熱率も同様に局所的かつ間欠的になっていった。加熱率が上昇するタイミングや場所はちょうど、アルフベン波の衝突に対応しており、3次元なアルフベン乱流が駆動されていることを示唆するものであった。従来のモデルでは波動がこのような局所的・間欠的な現象を起こすことは知られていたが、それが実際にコロナを加熱するということまで実証できた例はなかった。このような局所的・間欠的な加熱はナノフレア仮説と呼ばれるコロナ観測をよく説明するための仮説と整合的である。ナノフレアは波動を伴わない準静的な過程で起こると考えられているが、本研究により波動を介してもナノフレアが生じ、コロナが加熱されることが実証された(図3)。

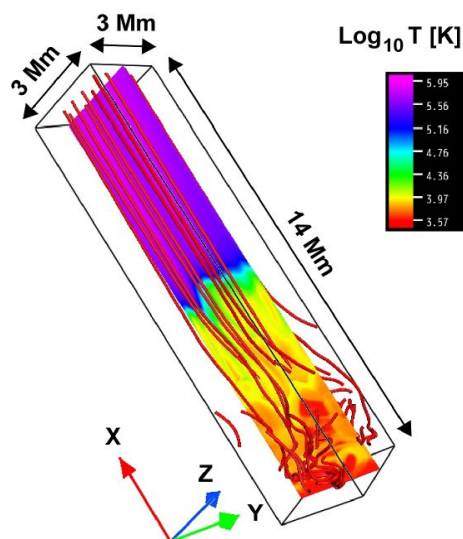


図3. 3次元磁気流体シミュレーションによる太陽大気の再現。色は温度を示しており、上部に100万度近いコロナ・下部には光球がある。赤い線は磁力線を表している。

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2件)

- (1) Takuma Matsumoto, Competition between shock and turbulent heating in coronal loop system, MNRAS, 査読有、v463, 2016, p502-511, DOI: 10.1093/mnras/stw2032

- (2) Takuma Matsumoto, Thermal responses in a coronal loop maintained by wave heating mechanisms, MNRAS, 査読有, v476, 2018, p3328-3335, DOI: 10.1093/mnras/sty490

〔学会発表〕(計7件)

- (1) 松本琢磨、太陽コロナループの加熱機構について、京大数理研 RIMS 研究集会「乱流を介在した流体现象の数理」、京都大学、2015年7月23日、口頭発表
- (2) Takuma Matsumoto, Investigation of wave heating mechanisms in a coronal loop by using 2D MHD simulations, AOGS, Singapore, (2-7)-Aug-2015, oral (invited)
- (3) Takuma Matsumoto, Competition between shock and turbulent heating in the coronal loop, Hinode9, Belfast/UK, (14-18)-Sep-2015, oral (invited)
- (4) 松本琢磨、波動を介在したエネルギー輸送とコロナ加熱・太陽風駆動問題、第30回大気圏シンポジウム、宇宙科学研究所、2016年12月5日、口頭(招待講演)
- (5) 松本琢磨、磁気擾乱による太陽風駆動機構、地球型惑星環境に関する研究集会、立教大学、2016年12月28日、口頭(招待講演)
- (6) 松本琢磨、コロナループの3次元磁気流体シミュレーション、日本天文学会秋季年会、北海道大学、2017年9月13日、口頭発表
- (7) 松本琢磨、太陽風加熱問題について、太陽研究者連絡会シンポジウム、京都大学、2018年2月20日、口頭発表

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 琢磨 (MATSUMOTO TAKUMA)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・統合データサイエンスセンター・特任助教

研究者番号：50728326