(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	坂上 峻仁
論文題目	Nonlinear Alfvén Wave Model for Solar / Stellar Chromosphere, Corona and Wind from the Sun to M Dwarfs (非線形アルヴェン波モデルに基づく太陽・M型主系列星の彩層・コロナ・恒星風構造の体系的理解)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、太陽とM型主系列星 (M型星) の恒星大気・恒星風の構造を、「アルヴェン波モデル」に基づいて体系的に理解することを主題としている。太陽などの比較的小質量な主系列星の外層大気では、数千度の表層 (光球) の上空に数万度の彩層、数百万度のコロナが広がっている。コロナからは大気プラズマが惑星間空間に流出し、超音速流になるまで加速される現象が見られ、太陽風・恒星風と呼ばれている。このような恒星大気・恒星風構造の成り立ちを解明するには、磁場とプラズマの相互作用を記述する磁気流体力学に基づく理論構築が必要である。太陽彩層・コロナの加熱や太陽風の加速を説明する有力なモデルとして、「アルヴェン波モデル」がある。アルヴェン波モデルでは、まず太陽光球の対流運動によって励起されたアルヴェン波が上空に伝播することで磁気エネルギーを外層大気まで輸送する。続いて、アルヴェン波が上空へ伝播する過程で大振幅になり、非線形効果が発現する。この非線形過程において、アルヴェン波の磁気エネルギーが彩層・コロナの熱エネルギーや太陽風の運動エネルギーに変換される。本研究は、このアルヴェン波モデルを太陽およびM型星の彩層・コロナおよび恒星風に適用するものである。</p> <p>M型星は、太陽よりも低温で、主系列星としては最も質量が小さい分類区分の恒星である。外層大気は太陽と同様に磁場優勢であり、彩層・コロナの存在を示す紫外線・X線放射やフレア活動、恒星風が観測されている。このため、M型星の磁気活動が太陽の磁気活動と共通する物理機構によって駆動されているのか否かという科学課題が幅広く研究されている。また関連する科学課題として、M型星の磁気活動が周囲の惑星に与える影響に対する関心も近年高まっている。本研究は、こうした研究動向を踏まえて、(1)アルヴェン波モデルに基づく恒星大気・恒星風理論の汎用性を確かめること、および (2)M型星の惑星間空間を満たす恒星風の物理量を定量評価することに注力している。このような課題に対し、3次元磁気流体シミュレーションに基づいた議論が報告されている (Garraffo et al. 2017; Dong et al. 2018; Alvarado-Gómez et al. 2020)。これらの研究では、M型星の恒星磁場や恒星風の大局的な構造を再現できるとしている一方で、こうした計算手法には次の2つの欠点がある。1つ目は内部境界条件の不定性である。上記研究では恒星の彩層をシミュレーションの内部境界とし、境界条件として彩層からコロナへ透過するアルヴェン波のエネルギーフラックスを仮定している。しかし、この仮定で使用されている太陽観測の経験則には物理的説明がなく、M型星に適用可能であるという根拠もない。もう1つの欠点は、上記研究の3次元シミュレーションが低解像度であることである。そのため、このような計算手法では、恒星風中で伝播するアルヴェン波による大気加熱率およびアルヴェン波が恒星風に作用する力などを現象論モデルによって決めざるを得ず、恒星大気・恒星風の加熱・加速機構を究明するという研究動機と整合性がない。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

そこで本研究では、1次元高解像度のシミュレーションという独自のアプローチにより、太陽・M型星の恒星大気・恒星風構造を再現することを目指した。計算では、光球から彩層、コロナ、惑星間空間までを貫く磁束管の形状を与え、その磁束管に沿うアルヴェン波の伝播を非線形非定常磁気流体方程式に基づいて解いている。下部境界では、太陽・M型星それぞれの表層対流速度に応じて光球からのアルヴェン波のエネルギーフラックスを見積もり、境界条件として設定している。また高解像度の計算により、恒星風中をアルヴェン波が伝播する様子を直接解くことができるため、アルヴェン波と恒星風あるいはアルヴェン波以外の圧縮波との相互作用を、現象論モデルに頼らずに計算に組み込むことができる。一方本研究では、1次元近似によって恒星大気・恒星風の非一様な構造を議論し辛く、アルヴェン波の散逸機構を一部無視している。ただし、こうした欠にも関わらず、同様の1次元シミュレーション結果による太陽大気・太陽風を定量的・定性的に再現できることは示されている(Kudoh & Shibata 1999; Suzuki & Inutsuka 2005)。

以上の研究アプローチに則り、本論文では第2章にて太陽彩層・コロナ・太陽風構造に関するシミュレーションの結果を、第3章にてM型星の彩層・コロナ・恒星風構造に関するシミュレーションの結果を議論している。

本論文第2章で特に注目しているのは、アルヴェン波によって太陽光球からコロナへ輸送されるエネルギーフラックスの大きさが、彩層磁場の強度に依存するか否か、という問題である。彩層磁場の強度はアルヴェン波の反射率を上昇させる効果や、アルヴェン波の非線形性を低下させる効果があるにも関わらず、これまでその重要性は議論されてこなかった。本研究では特に、太陽光球でのアルヴェン波のエネルギーフラックスを大きくすると彩層中でのアルヴェン波の非線形性が大きくなり、非線形性がある閾値を超えると、それより大きなエネルギーフラックスの輸送を実現できなくなるということ、が明らかになった。従来の理解では、太陽光球でのアルヴェン波の振幅を大きくすればコロナへ透過するエネルギーフラックスも単調に増加すると考えられていた。従って本研究の結果は、その関係は、彩層磁場がある程度強く、彩層中のアルヴェン波の非線形性が弱い場合に限られることを示したことになる。

本論文第3章では、上記シミュレーション手法を M 型星の恒星大気・恒星風構造の再現に用い、再現された M 型星の恒星大気・恒星風と太陽大気・太陽風との相違点・類似点を整理、その物理背景を議論している。本研究により、M型星の恒星コロナは太陽コロナに比べて相対的に温度が低く、M型星の恒星風は太陽風に比べて高速だが、質量損失率は遥かに小さいことが分かった。更にこうした傾向が現れる原因として、(1)M型星の恒星半径が太陽よりも小さく、恒星大気が強く成層していること、(2)アルヴェン波が恒星風中で励起する衝撃波が恒星風の加速に大きく寄与していること、が本質的に重要であることも明らかになった。

(続紙 3)

(論文審査の結果の要旨)

以上の通り、本論文の研究アプローチには独自性があり、研究結果の新規性も明瞭である。先行研究の3次元低解像度シミュレーションと本研究の1次元高解像度シミュレーションは互いに相補的であり、後者には特に、微細な空間スケールで起こる非線形アルヴェン波と非定常恒星風との相互作用を考慮しつつ、光球から惑星間空間までの大局的な恒星大気・恒星風構造を再現できるという特長がある。本論文第2、3章でその特長は十分発揮されており、また彩層磁場の恒星大気・恒星風に与える影響や、アルヴェン波が励起する衝撃波の恒星風加速への寄与など、新たな知見についても詳細に議論されている。理論・観測の照合や多次元シミュレーションへの拡張、惑星大気・磁気圏の物理や他の恒星風への応用など、研究の発展性も申し分ない。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和3年1月15日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降