

M 型主系列星の恒星大気・恒星風の数値モデリング

坂上峻仁（京都大学）

利用カテゴリ XC-B

＜研究目的・手法 - 先行研究の問題点と本研究での改善点について＞

本研究の目的はM型星の大気、恒星風の物理量を磁気流体数値シミュレーションで定量的に評価することである。この目的に関し、M型星大気・恒星風モデルの先行研究^[1,2]には2つの問題点がある。1つ目は、波を解像せずに恒星風をシミュレーションしている点である。上述の通り、恒星大気・恒星風を形成する物理機構では磁力線を伝搬するAlfvén波の非線形化が本質的に重要であるが、恒星風の大局的構造を再現しつつ、その中を伝搬する微小な波を空間的に分解することは難しい。特に先行研究の3次元計算は解像度が低く、Alfvén波の空間分解をしていない。それを補正するために、方程式中の物理量を「背景場」と「変動場」に分け、両者の相互作用項に現象論モデルを用いることで対処している。2つ目は境界条件がM型星に適していない点である。恒星大気・恒星風モデルの境界条件は恒星表層から惑星間空間へ流出するエネルギー流束などとして与えられ、太陽とM型星では1桁近く異なるにも関わらず、先行研究では太陽大気・太陽風モデルで使われている境界条件をM型星モデルに流用している。

以上の通り、先行研究の3次元低解像度シミュレーションでは多くの現象論的仮定が施されており、計算結果のモデル依存性を排除できていない。そこで本研究では、1次元高解像度シミュレーションによってAlfvén波の非線形過程を解くことで、現象論モデルに頼らずにM型星の大気・恒星風の形成過程を再現する。また計算の境界条件は、M型星の表層対流理論を参考にしたものを設定する。こうした1次元高解像度計算は太陽大気・太陽風モデルでは行われており^[3,4]、本研究はそれをM型星に適用している。

＜研究結果＞

本研究では、M 型星として最大級の M0 型星から最小級の M8 型星まで5天体を対象として恒星大気・恒星風の数値シミュレーションを実行し、太陽大気・太陽風の計算結果との比較を行った。以下の5点が本研究の結論である。

- (i) 恒星表層で発生させたAlfvén波の伝搬・エネルギー変換により、太陽と質量・半径が大きく異なる M型星でも、太陽同様の高温大気が形成・維持されると同時に、恒星風が駆動されることを確認した。図1 に、恒星風速度の数値計算結果を表す。
- (ii) 先行研究では太陽風やM型星恒星風はAlfvén波伝搬に伴う「磁気圧」で駆動されると仮定していたが、本研究により、太陽風・恒星風を加速しているのはAlfvén波の磁気圧に加え、Alfvén波の非線形効果で励起された衝撃波に伴うガス圧も同程度に重要

であることが分かった。

- (iii) 先行研究ではM型星の恒星風が太陽よりも高密・高速で、系外惑星に対する影響が著しいと結論づけているのに対し、本研究ではM型星の恒星風の密度・速度は太陽風と同程度である。
- (iv) 太陽・恒星風の速度や密度は、下層大気の磁場強度に大きく依存しており、磁場強度が少しでも弱まると恒星風密度が大幅に減少する可能性がある。

本研究と先行研究との比較から、太陽風理論を恒星風理論に拡張する際、「Alfvén波の非線形化によって恒星大気・恒星風が形成される」という定性的な主張は妥当であるが、一方で、恒星風の密度・速度などの定量的な議論には不定性が残ることがわかる。こうした理論モデル同士の不一致については、より高解像度・多次元の数値シミュレーションや、将来的な観測による検証が待たれる。

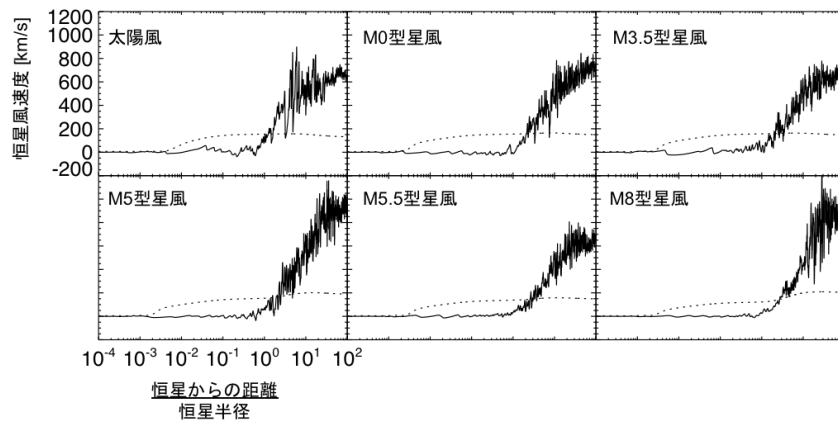


図1 数値計算で得られたM型星の恒星風の速度分布(実線)。点線は音速を表す。恒星風が星から遠ざかるとともに徐々に加速され、超音速になる様子が見て取れる。実線が激しく振動しているのは、Alfvén波が非線形化する結果発生する衝撃波を表している。

参考文献

- [1] Garraffo, C., Drake, J. J., Cohen, O., Alvarado-Gómez, J. D., & Moschou, S. P. 2017, ApJL, 843, L33
- [2] Dong, C., Jin, M., Lingam, M., et al. 2018, Proceedings of the National Academy of Science, 115, 260
- [3] Kudoh, T., & Shibata, K. 1999, ApJ, 514, 493
- [4] Suzuki, T. K., & Inutsuka, S.-i. 2005, ApJL, 632, L49