

3DMHD計算を用いた太陽風による質量損失率の導出

松本琢磨（国立天文台）

利用カテゴリ XC-B+

恒星からの質量損失量は、様々な天体物理学の文脈で基礎的な要素となる重要なパラメタである。例えば、恒星風による質量損失は磁場を介して大きな角運動量損失につながり恒星のダイナモ活動に影響を与える。また、中心星からの強い恒星風が内惑星の磁気圏を変形させることで大きく大気流出を促すことも考えられる。しかしながら、質量損失に関する物理は太陽の場合であっても完全に理解されているとはいえない。本研究では、宇宙で最もありふれた恒星である太陽に焦点を当てて3次元MHD計算を行うことで、質量損失の物理に関して新たな知見を得ることを目標とした。

太陽風の駆動源である高温コロナがなぜ維持されているのかは完全には理解されていない。究極的なエネルギー源は太陽表面の対流の運動エネルギーであることは広く受け入れられている。対流と磁場の相互作用が上空へのポインティングフラックスを生み、それが上空で熱化されることでコロナが維持され太陽風は駆動されている。このように対流と磁場によって維持されている磁気擾乱駆動型の機構は、表面对流層を持つF型より晩期の冷たい恒星から吹く恒星風の駆動機構にも適用できることが期待できる。

磁気擾乱の輸送形態や熱化過程にはいくつかの理論が提唱されているが、Alfvén波の形態で輸送され乱流によって散逸するというシナリオが非常に有力なものになっている。Alfvén波は基本的に非圧縮性波動であり、他のMHD波動である圧縮性波動であるFast/Slow波と違って衝撃波を形成しづらい。そのためコロナに到達する前に熱化しないという点で有利なエネルギー輸送形態とされている。数あるAlfvén波のエネルギー散逸の機構の中で、太陽風中で最も効率的なものと考えられているのがAlfvén波の衝突で駆動されるAlfvén乱流である。光球で励起された外向きAlfvén波は、Alfvén速度の勾配を持つ上空大気を伝播する途中で反射され、内向きのAlfvén波を生じる。外向き・内向きの波動がぶつかることで磁力線に垂直な方向にエネルギーカスケードが起こり、磁気エネルギーが効率的に熱化される。

最先端の標準太陽風・恒星風モデルは、以上のシナリオを踏まえて作られているが以下の二点で不十分である。第一に、標準モデルはAlfvén乱流を現象論的にモデル化している。つまり外向きと内向きの波動の量をパラメタとして、ボックス乱流の計算で得られた結果を参照することで散逸率を求めている。この方式は乱流の直接数値計算と比較して、散逸率を過大評価する傾向にあることが近年指摘されている。そして第二に、標準モデルは圧縮性の効果を無視している。圧縮性のプラズマ中で外向きAlfvén波は圧縮波動と内向きAlfvén波へと崩壊していくことが知られており、これは内向きAlfvén波を増やし乱流の効率を上げるという点で重要である。

以上を踏まえて本研究では圧縮性MHDに基づいた3次元計算を行うことで、標準モデルを改良

することを目指した。計算領域は光球表面から20太陽半径までの領域に、(6400,90,90)グリッドを割り当て行った。光球表面で観測と整合的な速度擾乱を与え、Alfvén波を駆動させ続けることで、それが上空に伝わり熱化しコロナ・太陽風を再現できるかを検証した。その結果、100万度を超える高温コロナと太陽風を持つ準定常状態を再現することに成功した。図は準定常状態に達したと考えられる時間における、温度・太陽風速度・外向きAlfvén波振幅・内向きAlfvén波振幅を表している。得られた質量損失率は $10^{-14} M_{\odot}/\text{yr}$ 程度であり、この結果は3次元MHD計算を用いて太陽質量損失率を定量的に求めることに成功した初めての計算といえる。

