

# 太陽風乱流の未解決問題

## Unsolved problems of solar wind turbulence

庄田宗人<sup>1</sup>

Munehito Shoda<sup>1</sup>

国立天文台太陽観測科学プロジェクト<sup>1</sup>

Solar Science Observatory, National Astronomical Observatory of Japan<sup>1</sup>

### 1 本文

太陽からは恒常的に超音速 ( $\sim 300 - 800 \text{ km s}^{-1}$ ) の放出流が吹き出しており、これを太陽風という。太陽に限らず天体はしばしば放出流を保持しており、太陽風はこうした天体風のベンチマークとしてその形成メカニズムが広く研究されてきた。また太陽風には磁場を介して太陽の角運動量を引き抜く作用があり、これが数億年スケールにわたる太陽自転周期の低下 (スピンドアウン) を引き起こすと考えられている。さらにより実用的な問題として、太陽風 (の特に高速成分) は地球磁気圏・電離圏を乱す要因の一つであり、磁気圏の乱れや電波障害を事前に予測する「宇宙天気予報」においても太陽風の基礎研究が注目されている。

このように太陽風は基礎研究から応用研究にわたる様々な観点から重要なシステムであるが、どの問題に取り組む上でもその加速メカニズムを理解することが必要不可欠である。太陽風の加速が生じる領域 (太陽中心から 3 - 10 太陽半径程度離れた場所) は望遠鏡でも探査機でも観測できない「ブラックボックス」領域となっており、加速メカニズムの同定は難しい。そこで太陽近傍 (加速が生じる前の領域) の望遠鏡観測、および惑星間空間 (加速が完了した後の領域) の探査機観測をベース (制限) に、適切な理論モデルを構築することが求められる。

太陽風は発達したプラズマ乱流に満たされており、磁気流体スケールから電子スケールまで幅広いスケールにわたるエネルギースペクトルの形成が観測されている。この太陽風乱流は単にプラズマの基礎的研究対象として重要なだけでなく、太陽風の加熱・加速機構にも重要と考えられている。(太陽から十分に離れた) 惑星間空間の観測結果を外挿し太陽風加速領域の乱流振幅を見積もると、太陽風加速を引き起こすのに十分なエネルギーを乱流が持つことが期待されるからだ。波動や乱流といった擾乱の持つ運動量・エネルギーで太陽風を加速するモデルを波動・乱流モデルと呼び、太陽風加速を説明する最も有力なモデルとして広く研

究されている。

波動・乱流モデルは長らく数値シミュレーションではなく、半解析的、現象論的アプローチで研究されてきた。これは太陽風加速が生じる空間スケール ( $\sim 10^7 \text{ km}$ ) とそれを引き起こす乱流の空間スケール ( $\sim 10^{3-5} \text{ km}$ ) には大きなスケールギャップがあり、両者を同時に解くような直接数値計算が難しいためだ。2010年代に入ると圧縮性を無視したケースでの直接数値計算による波動・乱流モデルの検証が可能になったが、その計算では太陽風の加熱率が必要値に比べ桁程度小さいことがわかった。加熱率不足が圧縮性を無視したこと由来なのか、モデルそのものに由来するのか確かめるべく、圧縮性まで含めた直接数値計算による検証が求められた。

以上のような背景のもと、私は世界で初めてとなる「圧縮性まで含めた太陽風加速の直接数値計算」を達成した。数値計算の結果、観測される太陽風と整合的な温度、速度を持つ「現実的な太陽風」の再現に成功した (図1)。この結果は圧縮性を無視した計算で生じた「加熱量不足問題」を圧縮性を取り入れることで解決したことを意味する。では何故圧縮性が重要なのだろうか？ 太陽風乱流を駆動するエネルギー源は太陽風中を伝播するアルベーン波であるが、圧縮性の有無で (十分大きな振幅を持つ) アルベーン波のダイナミクスが変わるからだ。太陽風加速領域のような低ベータ領域では (非圧縮波である) アルベーン波と (圧縮波である) スローモードの共鳴的相互作用を介してアルベーン波の暴走的崩壊 (減衰不安定) が引き起こされる。アルベーン波の崩壊はエネルギーカスケード率を劇的に向上させ、加熱量不足問題が解消されたというわけだ。

以上のように太陽風加速研究は着実な進展を見せているが、まだまだ残された問題は多い。例えば加熱量不足問題は圧縮性を考慮することで解決したように見えるが、あくまで磁気流体近似の範囲での話である。太陽風では粒子の平均自由行程が極めて大きいため、

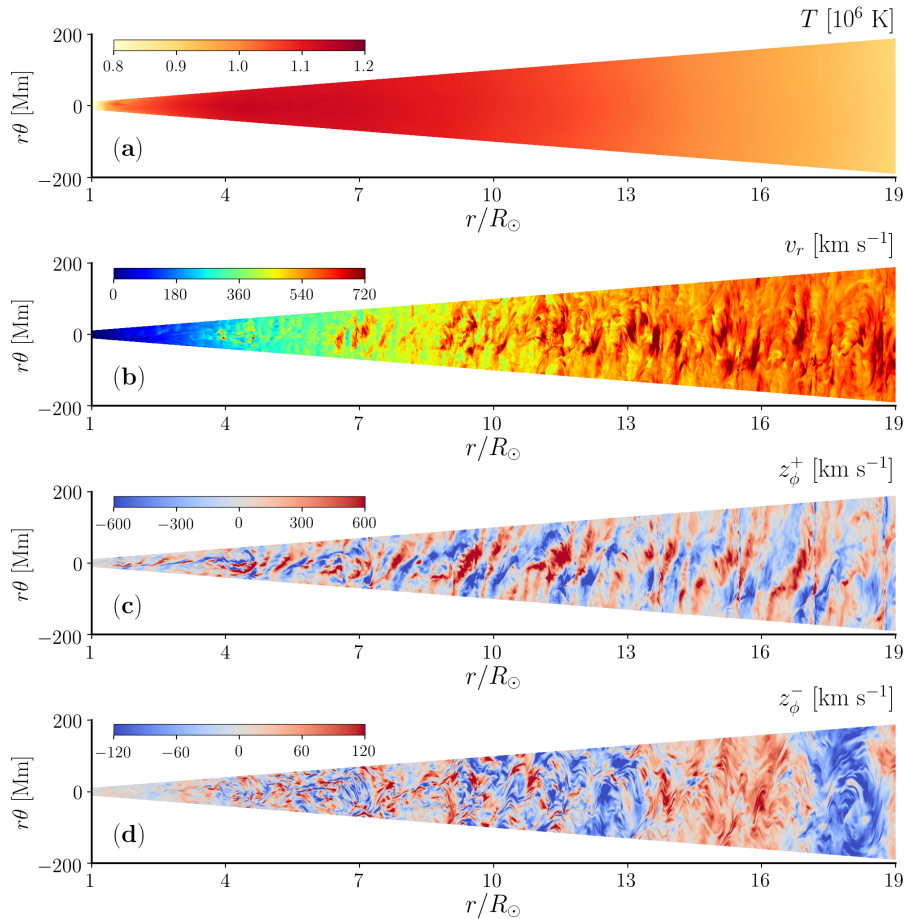


Fig. 1: 太陽風の三次元直接数値計算結果。 $\phi = 0$  平面での断面図を表示している。横軸は太陽中心からの距離、縦軸は水平方向 ( $\theta$  方向) の距離で、図は上から順に温度、 $r$  方向速度、外向き伝播アルベーン波、内向き伝播アルベーン波の分布を表す。乱流擾乱 (下二図) により太陽風が十分な温度まで加熱、加速される様子 (上二図) が再現された。圧縮性まで含めた磁気流体計算としては初の計算結果である。

あらゆる磁気流体シミュレーション結果は運動論効果まで含めて再考する必要があるだろう。特に古くから知られている陽子の選択的加熱を説明するには、磁気流体スケールと運動論スケールを接続するようなモデルが求められる。近年では helicity barrier と呼ばれる新たな物理機構によって高速/低速な太陽風ほど高温/低温の陽子温度を持つことを説明するアイデアが提唱された。helicity barrier 機構も含め、磁気流体スケールの乱流特性が運動論スケールのダイナミクスにどのような影響を及ぼすか、逆に運動論スケールのダイナミクスが磁気流体スケールの乱流特性にどのような影響を及ぼすか、これは今後の最重要課題であろう。

太陽風乱流研究は観測的にも飛躍的な進展を見せている。2018 年には、これまで観測できなかった太陽風加速領域の直接探査を行う NASA の探査機 Parker Solar Probe が打ち上げられた。Parker Solar Probe は金星のフライバイを行いながら徐々に太陽に接近し、2024 年末の最接近を前に既に驚くべきデータを提供し続けている。また 2020 年には ESA 主導の太陽風

探査機 Solar Orbiter が打ち上げられ、Parker Solar Probe とは異なる軌道傾斜角で太陽風を観測することで、太陽風の大局的理解も進むことが期待されている。Parker Solar Probe, Solar Orbiter の登場により太陽風中の波動の非線形発展、乱流の成長について、これまでとは異なる描像が見え始めてきた。例えば、太陽風中の磁場擾乱は Kolmogorov 型の冪乗スペクトルを持つことが長らく知られていたが、太陽に近い領域では Kraichnan 型のスペクトルに近く太陽から離れるにつれスペクトルの冪指数が変化する様子が捉えられた。また太陽風中には局所的に磁場極性を反転させる、S 字状の磁力線構造 (磁気スイッチバック) が普遍的に存在することも明らかになり、その生成メカニズムは近年のホットトピックとして広く研究されている。本講演では以上のような太陽風乱流の未解決問題について、理論、観測の両観点から議論する。