

太陽風 MHD シミュレーションと IPS 観測データの結合により求めた太陽風の三次元構造

The three-dimensional structure of the solar wind determined by combining the MHD simulation and the IPS observation data

林 啓志[1], 小島 正宜[1], 徳丸 宗利[1], 藤木 謙一[1]
Keiji Hayashi[1], Masayoshi Kojima[2], Munetoshi Tokumaru[2], Ken'ichi Fujiki[2]

[1] 名大・STE 研

[1] STELab, Nagoya Univ., [2] STE Lab., Nagoya Univ.

<http://stesun5.stelab.nagoya-u.ac.jp/~khayashi/>

名古屋大学 STE 研の IPS 観測データを用いた太陽風の三次元構造を決定する MHD シミュレーションモデルについて報告する。計算領域を太陽中心から 50 太陽半径から 5.5 AU の超アルフェン流領域にとった。IPS 観測値を太陽風の流線を遡ることで内側の境界球面に投射し速度と密度の境界分布を決め、この境界値分布の下での非線形・時間依存型の MHD 方程式の時間発展を計算した。系が時間弛緩し達する定常状態を静穏時太陽風と見做なすことができ、これを地球近傍と Ulysses 衛星軌道上での計測データと比較したところよい一致が得られた。

数十太陽半径以遠での太陽風の流は超アルフェン流であり、大局的なプラズマと磁場の構造は理想 MHD 方程式に従うと考えていい。また太陽からある程度はなれた領域に関する太陽風シミュレーション計算の際、未解明の部分の多い加熱・加速の機構を考慮する必要が少なくなる。つまり、数十太陽半径の球面上にすでに加熱・加速過程を終えたと考えられる太陽風プラズマの速度分布を境界条件として与えることができるならば、それ以遠の空間に関する太陽風シミュレーションでは比較的簡単な状況のみを考慮すればいい。

20 太陽半径から 1 AU までの高緯度領域を含む惑星間空間の実際の太陽風プラズマ速度と密度は IPS 観測によりその視線積分値が得られている。太陽高緯度領域の太陽風プラズマを測定する手段は、現在では Ulysses 衛星が数年をかけて太陽極周回軌道での測定を行っている以外ではこの IPS 観測のみである。そこで、IPS 観測から得られる観測視線積分値を 3 次元 MHD シミュレーションに取り入れ、IPS 観測データと MHD 方程式双方に矛盾しないような磁場とプラズマの 3 次元の空間構造を求めるモデルを開発した。モデルは 50 太陽半径から 5.5 AU までの空間に関する MHD シミュレーションとこの計算の太陽側(流入側)境界球面の境界値に IPS 観測データを導入する手続きからなる。なお、シミュレーションの対象とした時期は 1995 年から 1998 年までの冬季を除く時期で、これは Ulysses 衛星が太陽圏の北半球を周回した時期にあたる。

MHD シミュレーションコードは 3 次元・非線形・時間依存型の MHD 方程式を差分法により解くもので、議論に用いる数値データはこの計算の結果得られる定常状態のデータである。後述するように本計算では太陽風は全領域で超アルフェン流であるため、定常解を求めるために時間発展を解く必要は必ずしも無いが、擾乱伝播の計算を行うことを考慮し、また実際に要する計算時間が比較的短いことから時間弛緩法を用いている。比熱比は計算の性質を決める重要なパラメータである。これが 1.5 である場合の Parker 解の速度が一定であることから、本 MHD シミュレーションでも比熱比を 1.5 にとり、暗黙の熱伝導を比較的弱いものに設定した。計算領域は太陽を中心とする二つの球面にはさまれた領域とし、内側の境界面は 50 太陽半径にとってある。ここでは太陽風プラズマ流は通常最低でも 200km/s の速さを持ち超アルフェン流であり、境界条件には固定端条件を適用している。外側の境界面は 5.5 AU に設定したが、ここでも太陽風は超アルフェン流であり、時間発展は主に風上差分から決定した。

50 太陽半径でのプラズマと磁場の分布は以下のようにして求めた。速度と密度については IPS 観測で得られる観測視線積分値を観測視線に密度などの物理量の関数であることを仮定した比重で分配したのち、視線上それぞれの点を通る太陽風の流線が 50 太陽半径の球面と交差する点を中心にガウス分布を仮定して内側境界球面に分配する。これを全ての観測データに関して行った後、加重平均を境界面での分布とする。磁場については、ポテンシャル近似により求められた等ポテンシャル球面(2.5 太陽半径)での対応する時期の磁場分布に、磁気中性面方向への若干の磁束の集中を仮定したのち外挿した。これは太陽近傍でのプラズマ加熱により開放磁場領域の磁束がポテンシャル近似(真空近似)の場合より閉塞磁場領域側に押し付けられる効果を考慮したものである。プラズマ温度は地球近傍での衛星観測のデータと照らし合わせて経験的に決めた。

こうして決定した内側境界値のもとで系の時間発展を定常状態になるまで計算し、得られる定常解を用いて上記の方法で境界値を決めて再度計算する。これを数回繰り返し収束した解を静穏時太陽風とした。求められた三次元構造を Ulysses の極周回軌道上での直接計測のデータと比較したところ、1995 年から 1997 年までについては磁場とプラズマの速度や密度、温度の変化について良い相関が得られた。1998 年については物理量の絶対値はほぼ同程度であったが、変化の時期にずれが生じていた。これは、太陽表面活動が活発になった事、太陽表面全体の磁

場構造が複雑になった事、及び、太陽の自転の影響で遠方では磁場の経度成分が大きくなるために磁場がプラズマに与える影響が大きくなった事などが理由として考えられる。地球近傍での直接測定との比較では全般にわたって良い相関を示した。また、計算で求めた太陽風構造内を IPS 観測視線に沿って線積分を行ったところ、もとの IPS 観測値との違いは平均で 20 km/s 程度であった。