

太陽風の加速の仕組みについての一視点

野坂 徹

One of the Viewpoint for the Acceleration Mechanism of the Solar Wind

NOSAKA Tohru

要 旨

磁場とプラズマで構成される太陽風はアルヴェン マッハ数をモニターすることによって高速流へ成長していく過程を追跡できる。太陽風の磁場もプラズマも太陽からエネルギーの配分を受けるとともにエネルギー輸送媒体間の瞬時ににおけるエネルギー移動によって高エネルギープラズマ粒子を作る。これが運動エネルギーの瞬時の増加としてとらえられ、速度の上昇の結果として理解される。

キーワード

太陽風 磁力線再結合 アルヴェン マッハ数

目 次

1. はじめに
2. 太陽風の存在の立証
3. 太陽風の速度とアルヴェン マッハ数

1. はじめに

天文学—最近どことなく古風な印象を持って受け止められる—というより宇宙物理学という用語の方が好まれるように思われる。理由の1つは、天文学の分野の研究に物理学的手法や概念が、天文学の発展の必然的な方向として導入されたことによると考えられる。ここで取り上げる太陽風の加速というタイトルも粒子加速の問題の一例と見なせる。

物理学部門を経てきているので多少見方が偏っているかも知れないが物理学の適用領域の広さを反映して、高エネルギー物理学、原子核物理学、地球物理学、生物物理学、食品物理学と枚挙にいとまがない。天文学という用語が消えることはないとしても宇宙の研究に人々の興味をかきたてることばであってほしい。個人的な夢ではあるが、もし、創ってみたい新たな研究分野があるか、と問われたら「宇宙線天文学」と答えることにしている。

本論文では太陽風の加速との関連に留意しながら、太陽黒点数の増減、磁場強度の変動(図1)、コロナルホールが発達など、いくつかの現象について11年周期の変動特性、太陽活動、コロナルホールとの関係、太陽風高速流の特徴などとの関わりについて検討する。

図1

FTPBrowser Results

Plot omni2_27day data from 19640101 to 20061231

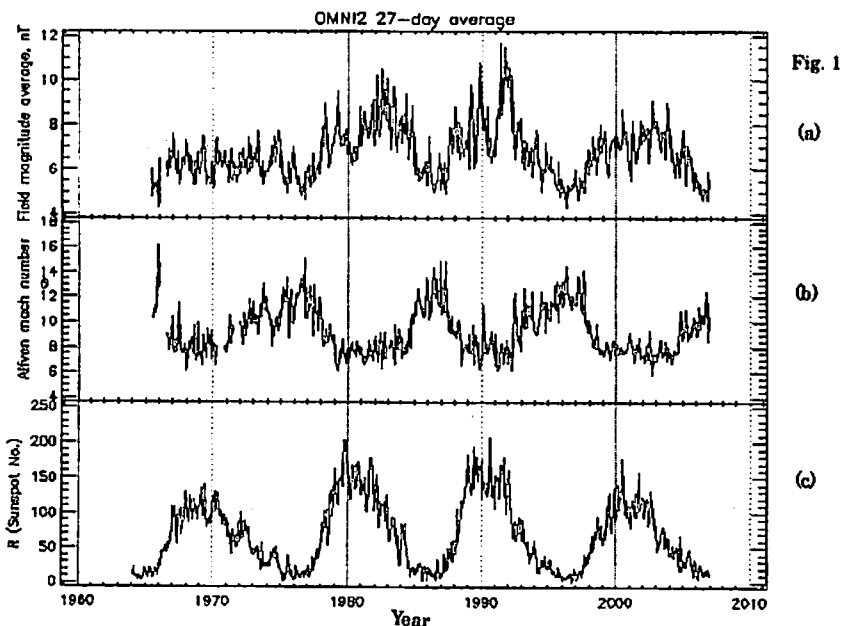


図1：NSSDC のデータおよびその処理プログラムを利用。

磁場の強さ (a)、アルヴェン マッハ数 (b)、太陽黒点数 (c)

2. 太陽風の存在の立証

(1) 太陽風の存在とそれに繋がる状況証拠

宇宙空間での直接観測が始まる以前は、宇宙空間は物質が存在しない真空の世界だと考

えられていたが、彗星の尾の向きと太陽の位置関係から、太陽から何か流れ出ていると考えた人々も存在した。我々人類はその生息環境を正しく認識し自然界で起こるさまざまな現象の原因を、最初は間違っていたとしても、やがて正しく認識できるようになる。特に宇宙、星の世界に対する認識の深まりと変革は、コペルニクス的転回としてよく知られている。

(2) 太陽風を構成する2つのエネルギー輸送媒体

太陽風は太陽大気が流れ出したものであるが最初から高速であったわけではなく、地球の公転軌道付近まで到達する間に何らかの加速メカニズムの作用を受けて高速の流れになると考えられる。高速流の前面に通常の6~7倍の値にまで達するピークがアルヴェンマッハ数に特徴的に現れる傾向がある(図2、図3)。

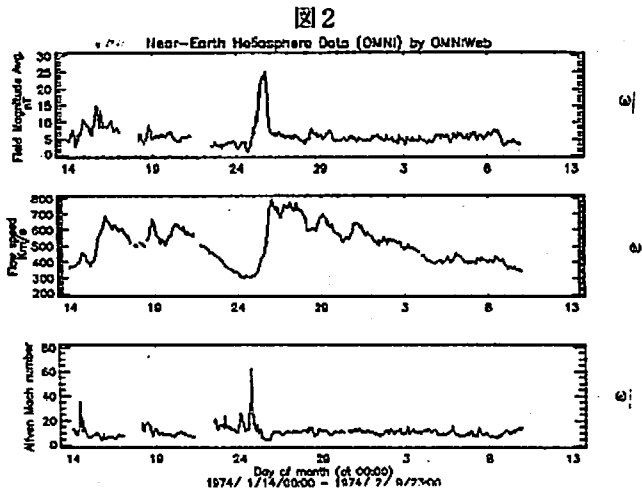


図2：地球近傍での磁場の強さ (a)、太陽風プラズマの速度 (b)、アルヴェン マッハ数 (c) の27日変化。

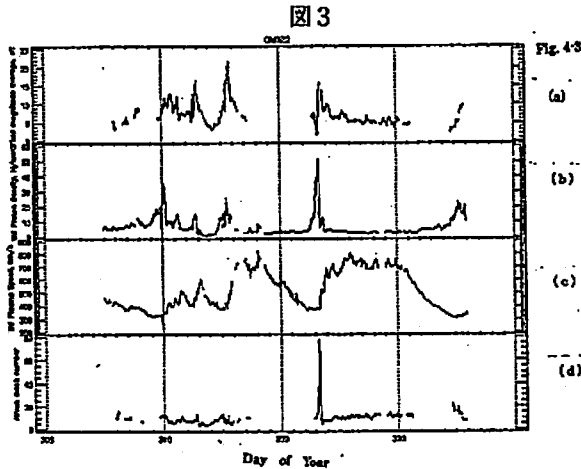


図3：地球近傍での磁場の強さ (a)、太陽風プラズマ粒子(プロトン)の密度 (b)、太陽風プラズマの速度 (c)、アルヴェン マッハ数 (d) の27日変化。

(3) 磁気リコネクション (磁力線再結合)

エネルギー輸送を担う媒体が2つ以上ある場合にエネルギーの媒体間移動に対応する現象がある。磁力線再結合は磁力線のつなぎ変えによって磁場構造が変わった場合と等価な影響を粒子の運動にもたらす。

アルヴェン マッハ数の持つ意味についてエネルギーとのつながりという視点からとらえると、プラズマの運動エネルギーを (E_k)、磁場のエネルギーを (E_m) とすると、アルヴェン マッハ数 (Ma) との間に

$$Ma^2 = E_k / E_m \quad \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

という関係がある。

太陽系のシステムとしての安定性を考える時、系全体の質量や質量分布、エネルギー分布など基本的な物理量に関わってくる。我々の太陽系の場合、系の中心に位置する太陽が系全体の質量、エネルギーの大部分を占めている。エネルギーを生み出すのは太陽内部の原子核反応であるが、このエネルギーはいくつかのプロセスを通じてまわりの空間へ放出される。太陽風もその役割を担っているが、多くの研究者に共通した認識は次のようなものであると思われる。

高温の太陽コロナからエネルギーを供給された太陽大気は、太陽からの引力を振り切って惑星間空間へ漏れ出していく。そこで何らかの仕組みで加速され、太陽から離れていく。離れるにつれて太陽の引力はさらに弱くなりプラズマ状態の太陽大気で満たされた領域 (太陽圏) が形成される。

このようなイメージが一般的に受け入れられてきているものの、例えば高速の太陽風の観測値を理論的に説明できない例もあるようである。そこで、太陽風が加速されるメカニズムを突き止めるためには加速によって作られる痕跡のようなものが存在するのであればそれを見つけることがもっとも確かな方法である。太陽風が加速されたということは、太陽風を構成するプラズマの運動エネルギー (E_k) が増大したことを意味する。太陽風が担うエネルギーは磁場のエネルギー (E_m) とプラズマの運動エネルギー (E_k) の形をとっている、言い換えると太陽風はプラズマと磁場という2つのエネルギー輸送媒体で構成される。この2つのエネルギー量の比が一定ではなく長期的には変動することを図1は示している。しかもそれが太陽活動の11年周期性を持ち、黒点数に対して逆相関関係にある。図1は、磁場の強さ、アルヴェン マッハ数、太陽黒点数について1964年から2006年までの時間変動を比較できるようにしたものであるが、この図からアルヴェン マッハ数が太陽活動に連動して、ほぼ11年周期で変動していることは明らかである。

3. 太陽風の速度とアルヴェン マッハ数

観測例 (図2) は、惑星間空間を吹き抜ける太陽風高速流とその近傍の状態を把握するために、速度が急激に立ち上がる場所で磁場強度、アルヴェン マッハ数に見られるそれぞれの特徴を調べる中でアルヴェン マッハ数に見られるシャープなピークに着目し

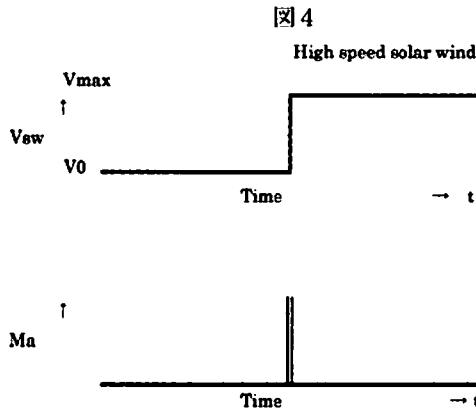
た。観測から得られたこのような特徴をもとに Ma と V_{sw} との関係は帰納的に再現しようとする、次のように書ける。

$$Ma = d V_{sw}/dt + M0 \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

右辺第1項は太陽風の速度変化を表わす。太陽風の加速を求める形にすると

$$d V_{sw}/dt = Ma - M0$$

太陽風高速流の速度のタイムプロファイルの大まかな特徴は（一段の）階段関数で近似できる。これを微分して得られる δ -関数は、アルヴェン マッハ数 に現れるシャープなピークをよく近似している（図4）。



Ma と $M0$ の大小関係によって太陽風の加速度が決まる。

$Ma > M0$	$d V_{sw}/dt > 0$	加速中	高速流の前面
$Ma = M0$	$= 0$	速度一定	前面の加速域に繋がる
$Ma < M0$	< 0	減速中	上記2つの領域の後に繋がる

したがって $M0$ は太陽風の速度を制御する定数ということになる。太陽風高速流はいつでも存在しているわけではなく、特定の時期に出現する。太陽活動の11年周期の中では極大期以降の下降期にあたる時期、また太陽の極域磁場極性が同じパターンの時に出現する傾向がある。

つまり、高速流が生み出される条件に、太陽の極域磁場極性が関係してくるということになる。これは、高速流を作り、成長させるためのエネルギー供給が主として磁気リコネクションのような磁場極性に依存する場合には起こりうることである。