

太陽風擾乱伝播の MHD 解析

鷺見 治 一*

MHD ANALYSIS OF SOLAR AND INTERPLANETARY DYNAMICS

By

Haruichi WASHIMI

A two-dimensional dynamical process is analyzed by the MHD simulation method. The first step for this work is to find quasi-steady global structures of the solar wind. Under the boundary condition of dipole magnetic field configuration with equal-temperature distribution on the base of the solar wind, a solution of the quasi-steady global structure has been obtained. This solution involves a helmet-streamer type plasma configuration and a spiral magnetic field structure. The dynamical processes are computed by putting disturbances onto the base of the solar wind in the above quasi-steady solution. When the temperature at the base of the solar wind is quickly heated up by a solar flare, the velocity at the base increases and the associated disturbances propagate outwardly. Large amounts of mass are ejected and a fast-shock is formed at the front.

1. 序 論

本研究会のテーマである「STE 予報モデル」の研究では、太陽コロナで生じたフレアやコロナ質量放出 (CME) 等の擾乱が惑星間空間中をどのように伝播するかを明らかにすることが必要不可欠なこととなる。この太陽・太陽風擾乱伝播を研究するためにはその前に大きな問題が横たわっている。即ち、擾乱は(準)定常状態を背景として伝播するのであるから、太陽磁気圏構造の(準)定常解がどうなっているかを明らかにすることが重要である。それなくしては擾乱伝播の研究は意味を持たない。

本稿では軸対称系での MHD シミュレーションによる解析結果を報告する。数値解析と比較してシミュレーション解析の長所は、複雑な系・時間的に変動する系の解析が出来るという点の他に、解の安定性が保証されているという点にもある。例えば、磁場の閉じた領域については、Pneuman と Kopp⁽¹⁾の数値解析ではプラズマは完全に閉じ込められている定常な構造が得られている

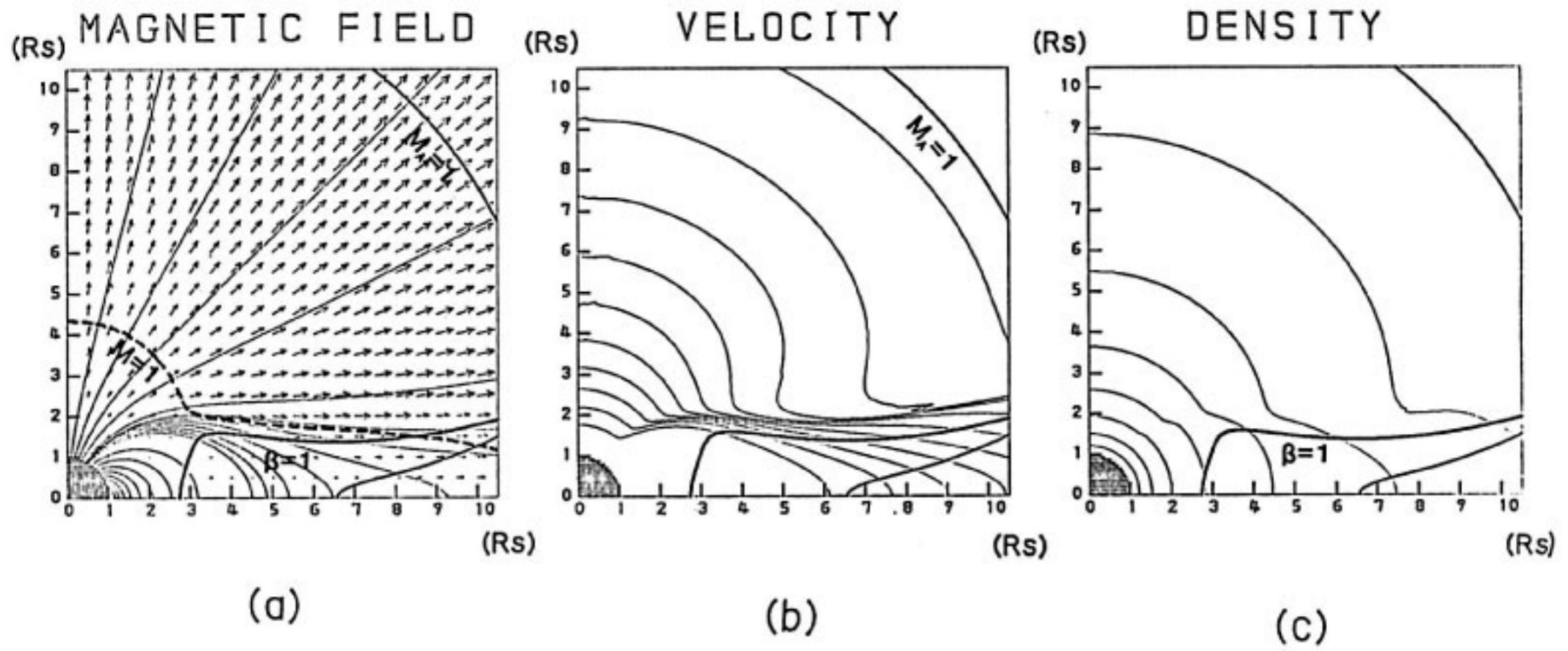
が、 $\beta (=8\pi P/B^2)$ はそこでは1より大となっているので、プラズマ圧の方が大きく、磁場による閉じ込めは完全ではないはずである。シミュレーション解析では実際にプラズマが少しずつ惑星間空間へともれている準定常状態が得られる。このようにシミュレーション法はダイナミックな現象を追う場合だけでなく(準)定常解を得る場合にも効力を発揮する。

第2章に回転のない場合の準定常解について、第3章に太陽の自転の効果を考慮に入れた場合の準定常解について述べ、第4章では擾乱伝播についての結果を述べる。

2. 太陽自転を考慮に入れない場合の太陽風プラズマ構造の解析⁽²⁾

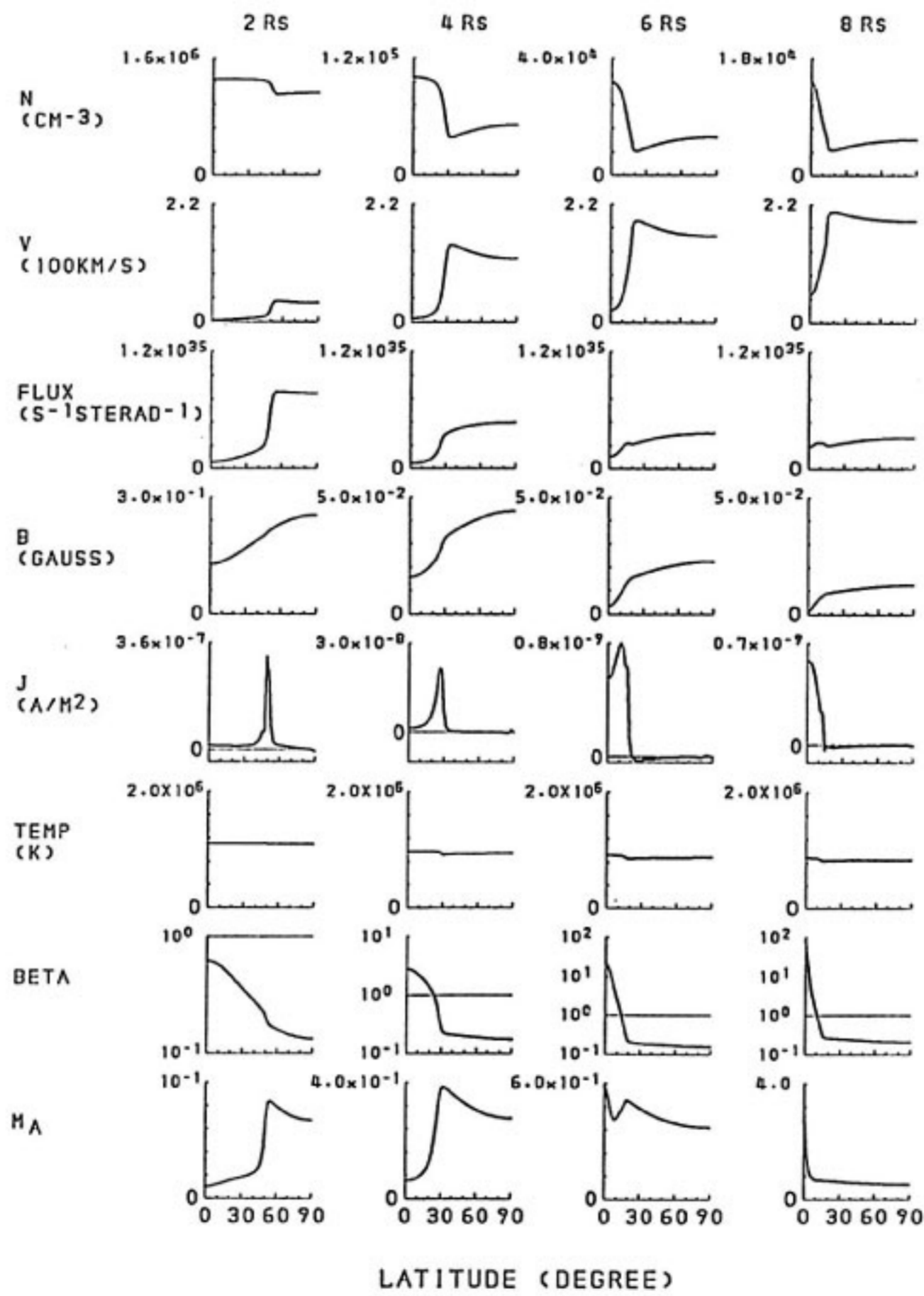
太陽表面で双極子磁場配位を仮定し、磁場は極で2 Gauss (赤道で1 Gauss)、温度は138万度、密度は $10^8/cc$ 、断熱定数は1.05とした場合の解を第1図に示す。図より明らかのように全体のパターンはPneuman と Koppの解とはほぼ同じものが得られている。詳しい構造については第2図に示されている。特に磁場の閉じた領域と開いた領域との境界及び磁気中性面に pressure-driven の電流が生じていることがよく分かる。この電流により

* 名古屋大学空電研究所
The Research Institute of Atmospheric,
Nagoya University



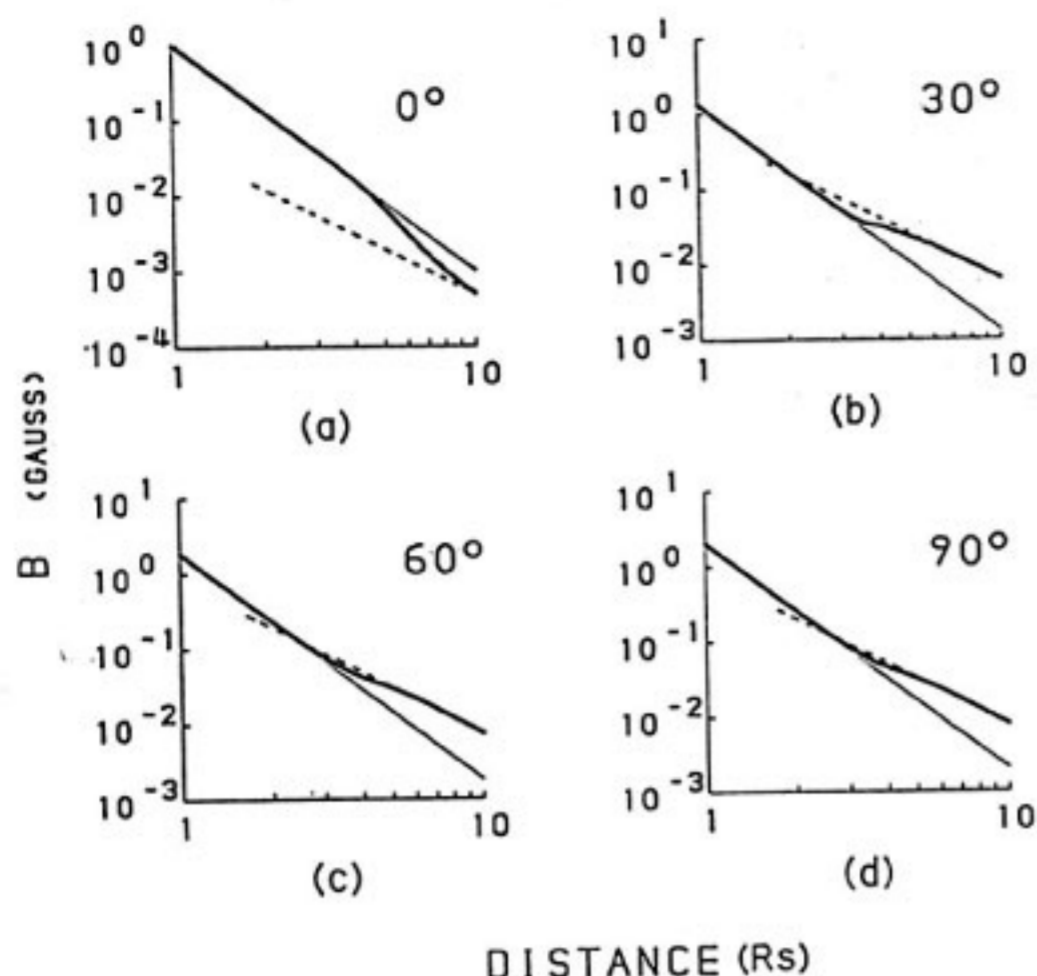
第1図 太陽風グローバルパターン

- (a) 磁力線及び太陽風速度ベクトル (矢印)
- (b) 等速度線
- (c) 等密度線



第2図 太陽風構造

上から密度 N , 速度 V , 質量フラックス, 磁場 B , 電流 J , 温度, β -比及びアルベーンマッハ数の緯度依存性

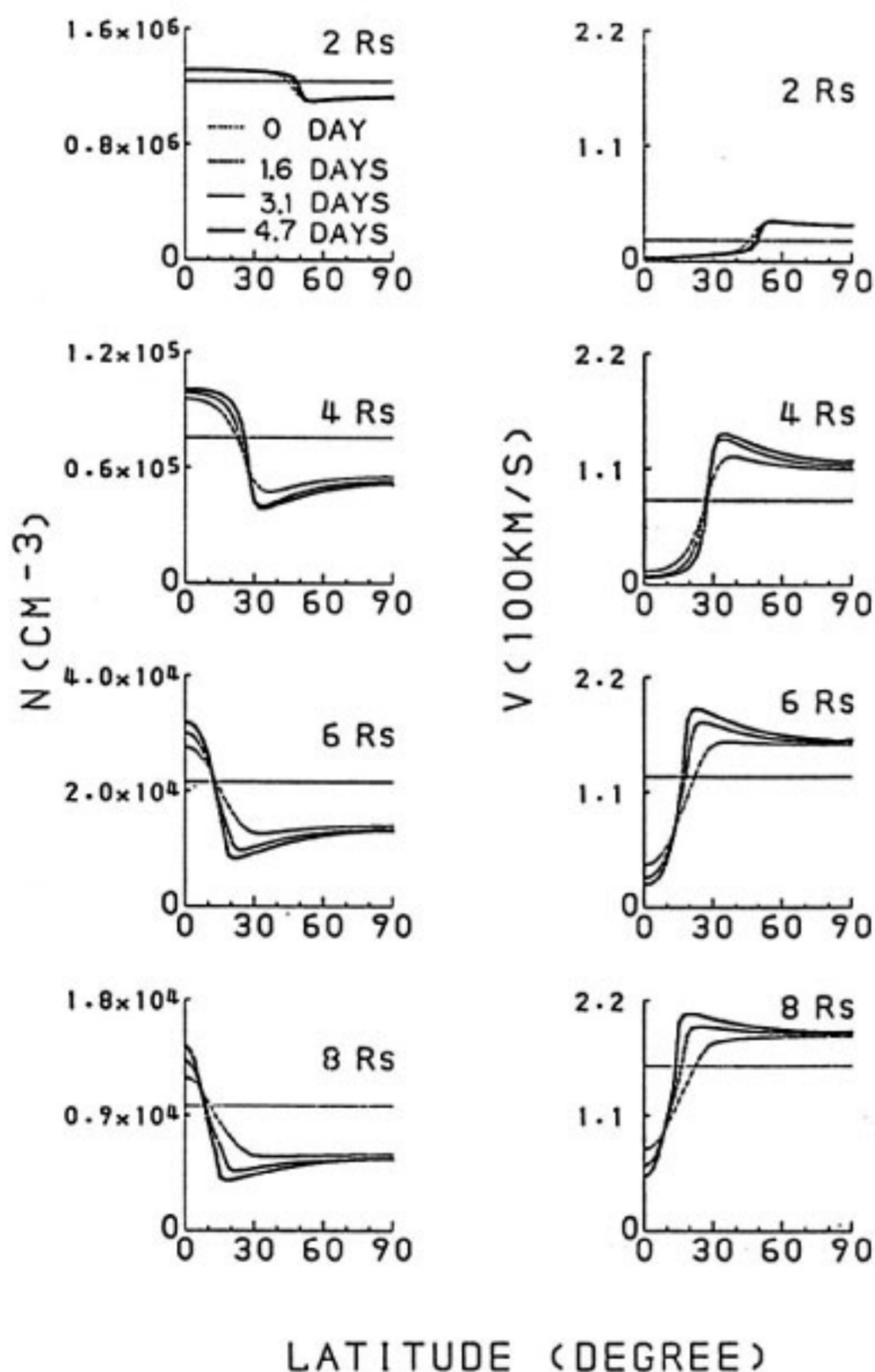


第3図 磁場強度の距離依存性
(a) 緯度 0° (赤道) (b) 30°
(c) 60° (d) 90° (極)

双極子磁場配位が第1及び第2図のように変わったのであるが、磁場強度については第3図のように赤道帯以外では R^{-3} の強度変化から R^{-2} と磁場が強まっている。第1及び第2図より β -比は赤道帯で $R \sim 3R_s$ (R_s は太陽半径) 以遠の領域では1を越えている。このためプラズマは閉じた領域から開いた領域へと少しずつもれている。即ち B と V が完全に平行にならず、このことは $\partial B/\partial t = \text{rot}(V \times B)$ の式より $\partial B/\partial t$ が0でなく、即ち完全な定常とはならないことを意味している。第4図に時間的変化を示す。図より閉じた領域の密度は時間と共に少しずつ濃くなり、又、速度は磁場の閉じた領域と開いた領域の境界においてよりシャープに変化していくことが分かる。この密度上昇により pressure-driven 電流は徐々に強まり、従って $\partial B/\partial t$ は0とはならないわけである。従って Pneuman と Kopp のような定常解にはならない。しかしながらその変化はゆっくり (一時間にして1%以下の変化) 且つ系は安定で準定常状態を構成している。

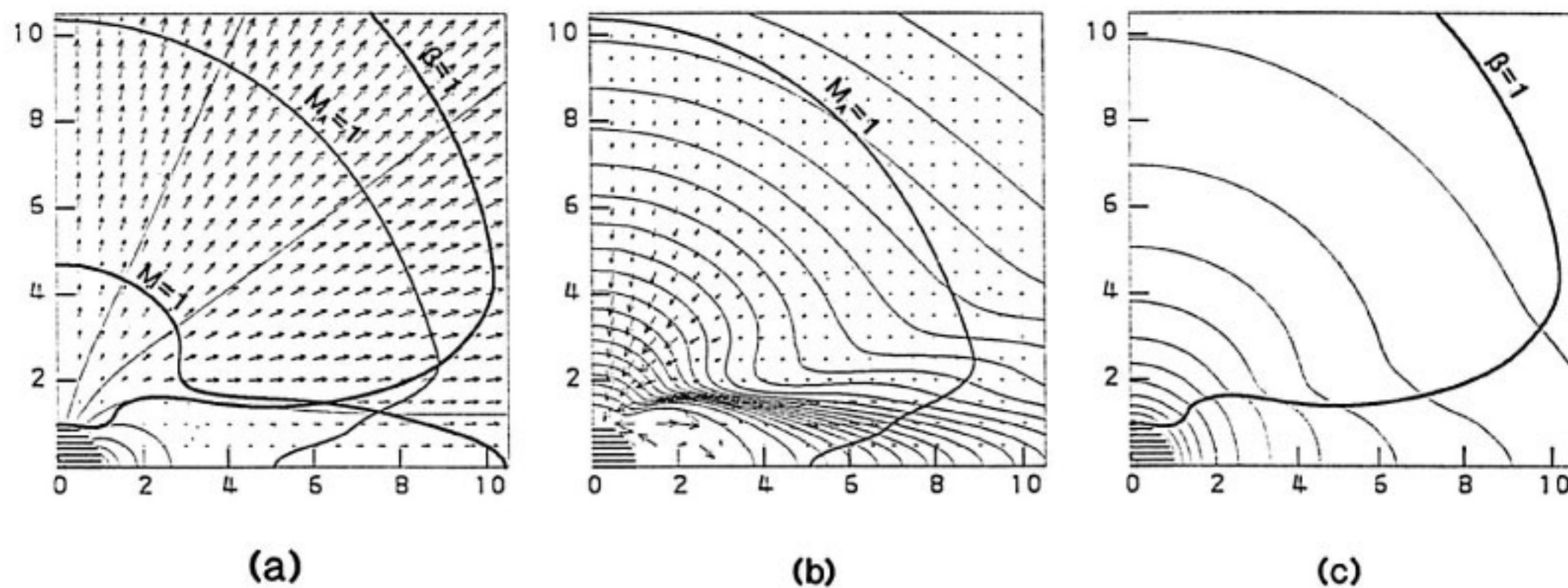
3. 太陽の自転を考慮に入れた太陽風 プラズマ構造の解析

太陽の自転による効果を考慮に入れた磁場構造の研究は、Weber と Davis⁽³⁾ が1次元モデルで行い、アルベーンマッハ数 (MA) が1となる点で全角運動量が定まることを明らかにした。最近、桜井 隆氏⁽⁴⁾ がこれを2次元モデルに拡張し、放射状の磁場配位で具体的な計算結果を示している。我々はまず放射状の磁場配位でシミュレーション解析を行い、定量的な比較はこれからであるが、定性的には桜井氏の解とよく一致する結果を得ることが出来た。この準備を経て、双極子磁場配位のシミュレーション解析を行い、以下の結果を得た。

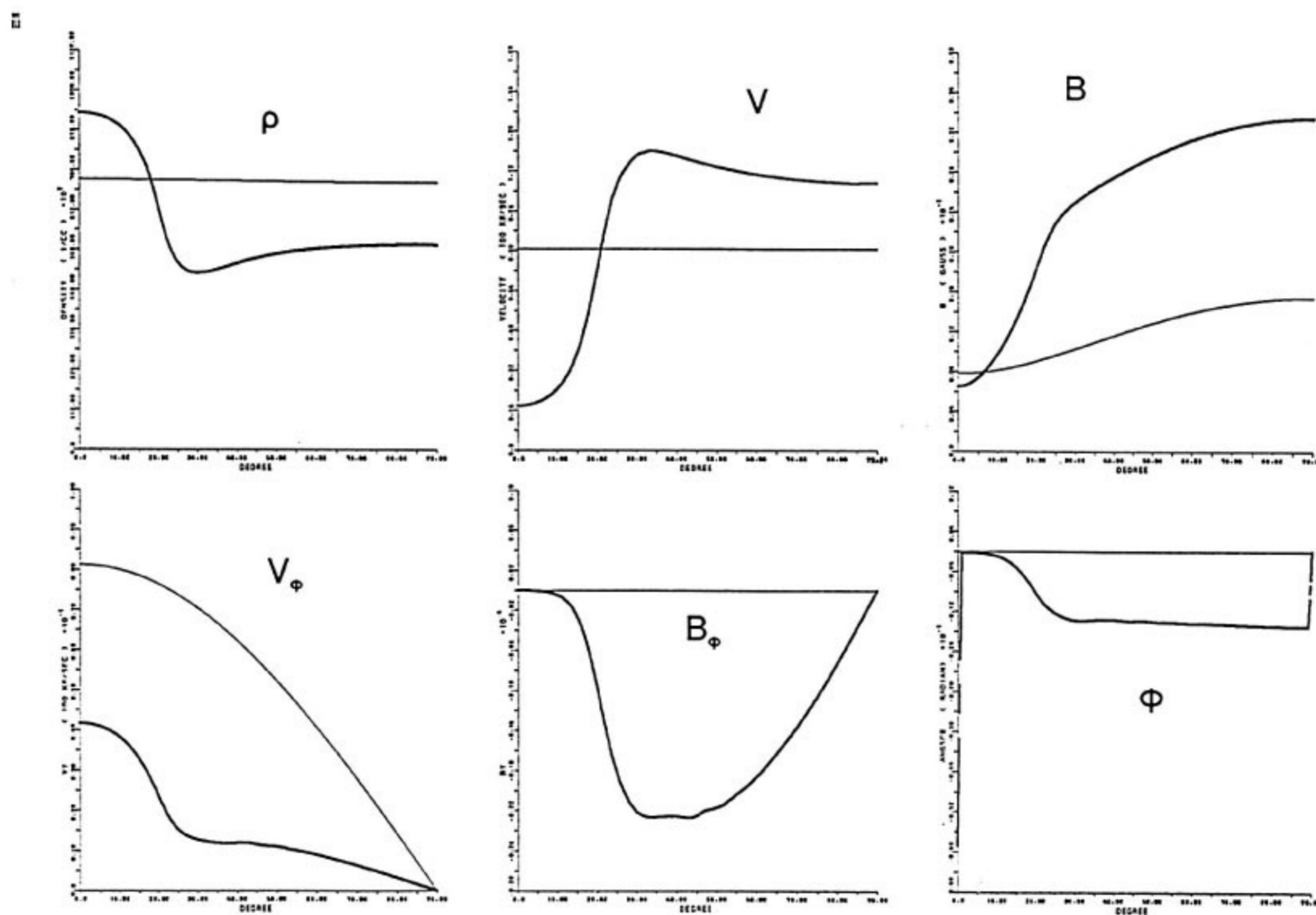


第4図 密度及び速度の時間的変化

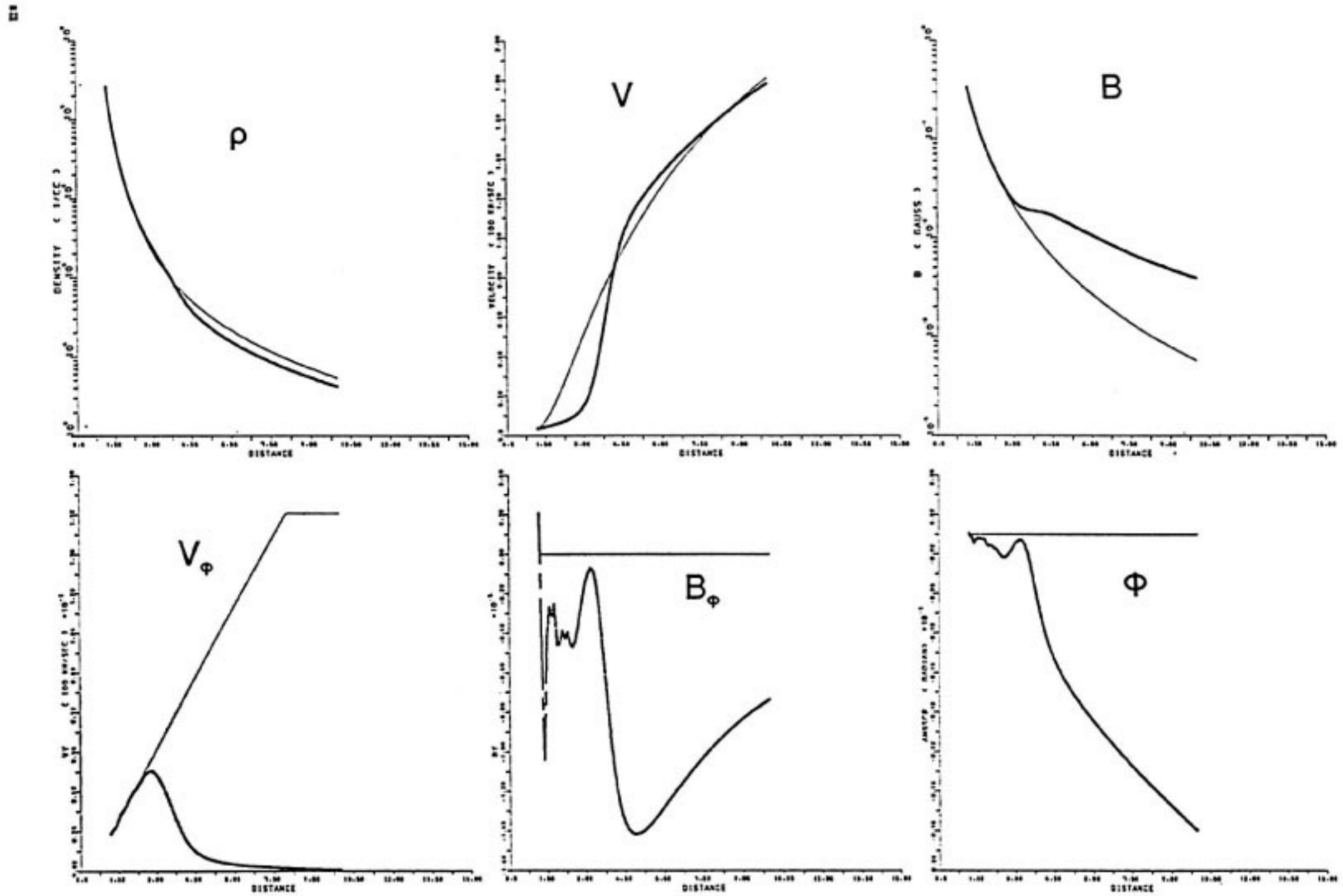
- (1) 第5図に示されるように子午面で切った時の配位は自転のない場合とはほぼ同様である。これは自転速度がゆっくりであることによる。
- (2) 第5図(b)に電流 (矢印) が示されているが、これにより明らかなように、開いた磁場領域では惑星間空間から太陽へと流れ込み、閉じた磁場領域では境界層に沿って太陽から惑星間空間へと流れ出している。この電流は太陽の内部でも惑星間空間でも赤道を横切ることではない。
- (3) 第6図より明らかなように、太陽近傍では、磁場の閉じた領域 (低緯度帯) では太陽風プラズマは太陽と共に完全に共回転し、従って磁場のスパイラル成分 ($B\phi$) は小さい。開いた磁場領域では共回転しなくなるので $B\phi$ が大きい。但し、勿論、極 ($\theta=90^\circ$) に近づくにつれ回転効果は小さくなるので、 $B\phi$ は0と



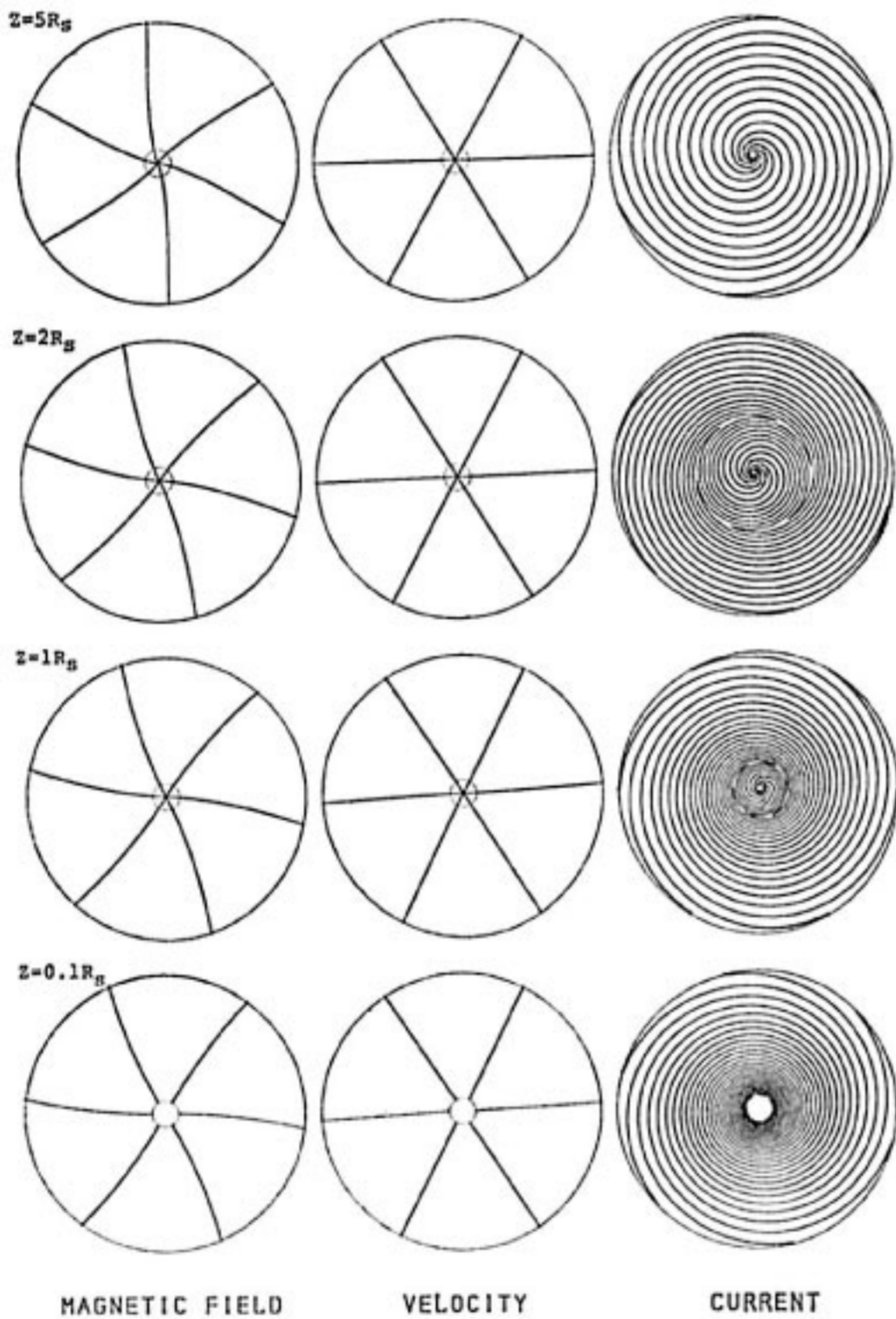
第5図 太陽自転を考慮に入れた場合の太陽風グローバルパターン
 (a) 磁力線及び太陽風速度ベクトル (矢印)
 (b) 等速度線及び電流 (矢印) (c) 等密度線



第6図 太陽風諸量の緯度依存性. 太陽からの距離は6太陽半径. 横軸は緯度. 図中, 細線は計算の初期値として与えた値, 太線は最終値. 上段左は密度, 中央は子午面内での速度 ($\sqrt{V_R^2 + V_Z^2}$), 右は子午面内での磁場強度 ($\sqrt{B_R^2 + B_Z^2}$). 下段左は回転速度, 中央は回転方向の磁場成分, 右は磁場の回転角度



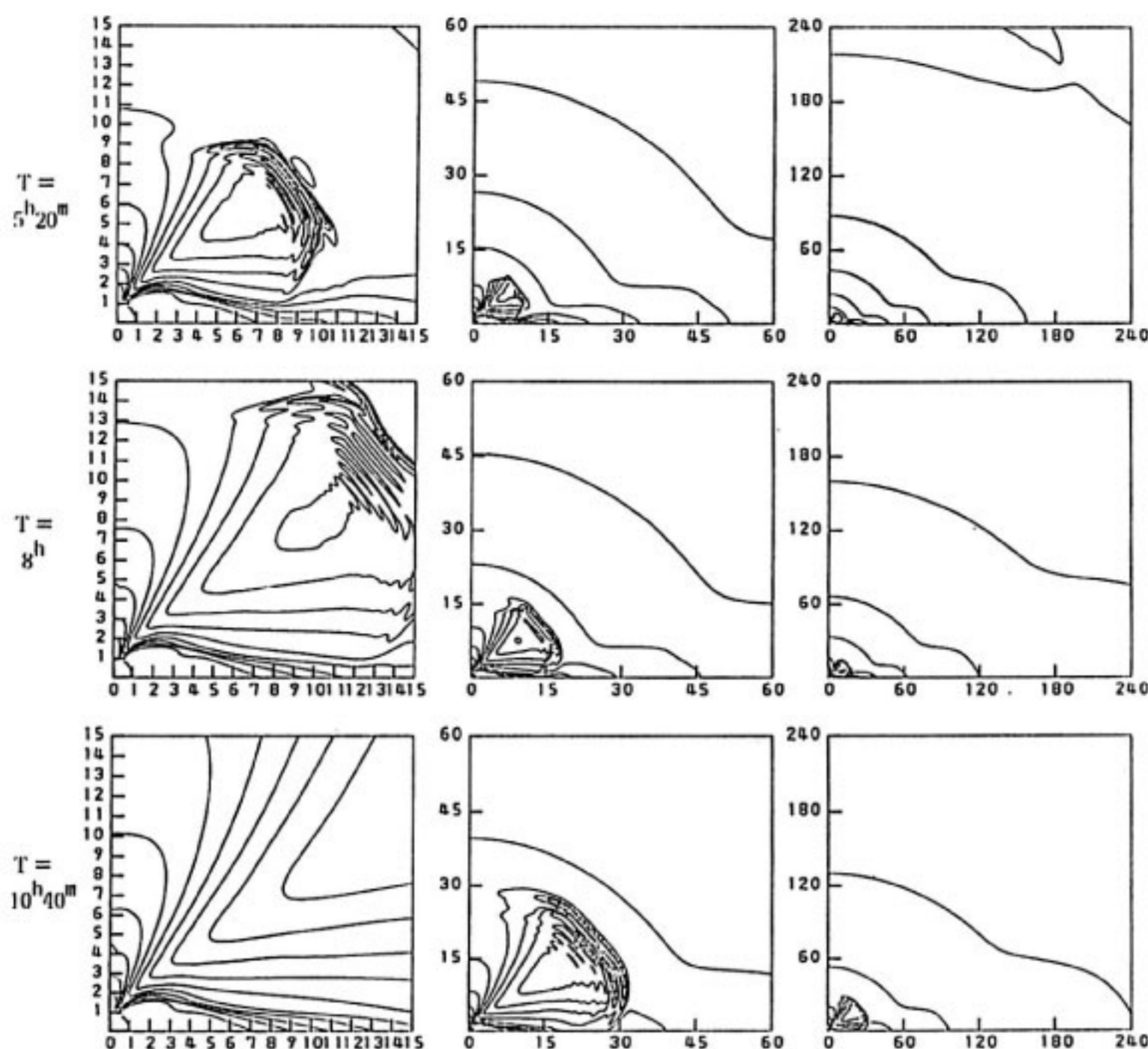
第7図 太陽風諸量の距離依存性 緯度は 20° 横軸は太陽からの距離、それぞれの図は第6図に同じ



第8図 Z = 一定の面上での磁場、速度及び電流。内側の円は半径 $1R_s$ 、外側の円は半径 $10.5R_s$ を示す。それぞれの図で接線方向がベクトルの向きを示す

なる。

- (4) これを、同じ緯度 (30°) での距離依存性を示したのが第7図である。太陽近傍では、閉じた磁場領域中であるので V_ϕ は共回転を示し、従って、そこでは B_ϕ は小さい。開いた磁場領域では B_ϕ が生ずる。又、磁場のスパイラルアームの角度は距離と共に大きくなっていることが示されている。
- (5) 第8図に Z = 一定の面で切った時の磁場、速度、電流の向きが示されている。これより、磁場の巻き方は閉じた磁場領域 ($Z=0.1R_s$) よりも開いた磁場領域の方が大きいことが分かる。又、太陽風流は閉じた磁場領域で太陽近傍では共回転しているのであるが、太陽の自転が近いためにこの図では、はっきりとは現れていない。電流は磁気中性面を作るためのトロイダル成分が、スパイラル磁場を作るポロイダル成分より大きいため、図ではピッチの急な渦巻きとなって表れている。電流の向きは、大変興味深いことに、閉じた領域と開いた領域で逆向きとなっていることが示されている。特に $Z=1R_s$ 及び $Z=2R_s$ の図では開いた領域と閉じた領域との境界で電流の向きが鋭く折れ曲がるということが明瞭に示されている。これは(2)で指摘したように子午面内での電流 (ポロイダル電流) の向きが境界を境にして逆向きとなるが、一方でトロイダル電流は一定の向きであることによる。

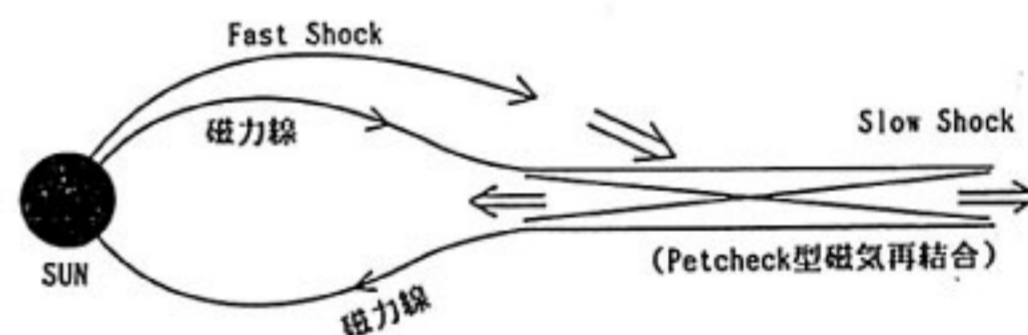


第9図 衝撃波の電搬 スケール左からそれぞれ $15 R_s$, $60 R_s$, $240 R_s$ のシミュレーションボックスで得られた等速度線

4. 太陽風擾乱伝搬の解析

上で得られた準定常解に擾乱を加えた時、生成する衝撃波の惑星間空間への伝搬を調べる。但し、ここでは準定常解としては太陽自転を考慮にいれない場合のものを用いる。この解析のために3つのシミュレーションボックス ($15 R_s \times 15 R_s$), ($60 R_s \times 60 R_s$) 及び ($240 R_s \times 240 R_s$) を用意し伝搬の様子が連続的に追跡できるように工夫された。擾乱としてはコロナ底部の極くせまい領域 (緯度方向の広がり ~ 0.1 rad) において温度が2倍に上昇し、その状態が計算中持続していると仮定する。この擾乱が開いた磁場の領域に含まれる緯度 70° の地点で起きたとした時の衝撃波 (Fast Shock) の伝搬の様子を第9図に示す。衝撃波は smooth に惑星間空間に拡がり、又、低緯度側では開いた磁場と閉じた磁場の境界に沿って磁気中性面をたたくようにして伝搬していていることが判明した。

Helios 衛星等では惑星間空間中に Slow Shock が稀ではあるが明瞭に観測されている。Slow モードは減衰が大きいので大振幅波がそのまま Slow Shock へと発展することは考えにくいし、コロナ基底で発生した擾乱が直接に Slow Shock になって惑星間空間を遠くまで



第10図 Slow Shock の生成モデル

伝わることも考えにくい。我々は第10図のように Fast Shock が磁気中性面を叩くことにより Petcheck 型磁気再結合を引き起こしこれにより Slow Shock が発生すると考えている。

5. まとめ

今まで米国を中心に行われて来た太陽風擾乱伝搬のシミュレーション解析では背景の定常解がきちんと得られないまま計算結果を出している。そのため太陽コロナからの擾乱伝搬は解析出来ず、数10太陽半径の距離の場所で擾乱を仮定し、そこからの擾乱伝搬の解析に過ぎなかった。本研究で、太陽自転の効果を考慮にいれた (準) 定常解を得ることが出来るようになったので、今後は、擾乱伝搬について一歩進んだ議論が出来るようになると期待される。本研究では軸対称を仮定しているが、将来

は3次元解析へと発展させる必要があるであろう。

本研究は科学研究費の援助を得て行われた。計算は名古屋大学プラズマ研究所計算機センターのVP-200及びVP-200Eを用いて行われた。又、計算機コードは荻野竜樹氏のLax-Wendroffコードを利用させていただいた。

参 考 文 献

(1) Pneuman, G. W., and R. A. Kopp, Gas-magnetic field interactions in the solar corona, *Solar Phys.*, 18, 258-270, 1971.

- (2) Washimi, H., Y. Yashino, and T. Ogini, Two-dimensional structure of the solar wind near the sun, *Geophys. Res. Letters*, 14, 487-490, 1987.
- (3) Weber, E. J., and L. Davis, The angular momentum of the solar wind, *Astrophys. J.*, 148, 217-227, 1967.
- (4) Sakurai, T: Magnetic stellar winds, a 2-D generalization of the Weber-Davis model, *Astron. Astrophys.*, 152, 121-129, 1985.

