

太陽風擾乱の特徴的構造

三宅 互*

STRUCTURES OF LARGE-SCALE DISTURBANCES IN THE SOLAR WIND

By

Wataru MIYAKE

Recent topics on the large-scale structure of transient disturbances in the solar wind are reviewed, and the topology of flare-associated disturbances is summarized. The first topic is the spatial extent and geometry of interplanetary shocks. The best average representation of shocks is found to be an expansion which is uniform over an arc of about 100° . The second is the draping of interplanetary magnetic field lines about fast ejecta from the sun. The draping is suggested to cause a strong, southward-directed interplanetary magnetic field, which is often found in the sheath region between the shock and fast ejecta. There is a possibility that the draping also plays an important role in producing the east-west asymmetry of shock strength and the motion of fast ejecta in the interplanetary space. Interplanetary magnetic clouds are briefly summarized as they relate to the region of fast ejecta.

1. はじめに

惑星間空間には太陽面上のフレア活動やコロナ領域の質量放出等に起因する、大規模な太陽風のじょう乱が存在し、周囲の太陽風と相互作用を行いながら、太陽から地球へと伝わってくる。この太陽風じょう乱は、後述するように、その太陽からの放出物の内部又はその周辺に強い南北方向の磁場をもち、太陽風速度の増大を伴うことが多く、そのじょう乱の中に地球が入る時、地球磁気圏中の様々なじょう乱を引き起こす。それ故、この太陽風中のじょう乱の発生とその構造、そして伝搬は、宇宙天気予報の重要な研究対象である。この報告では、最近発表された論文の中から、太陽風じょう乱についての話題を紹介する。

2. 太陽風擾乱の概要

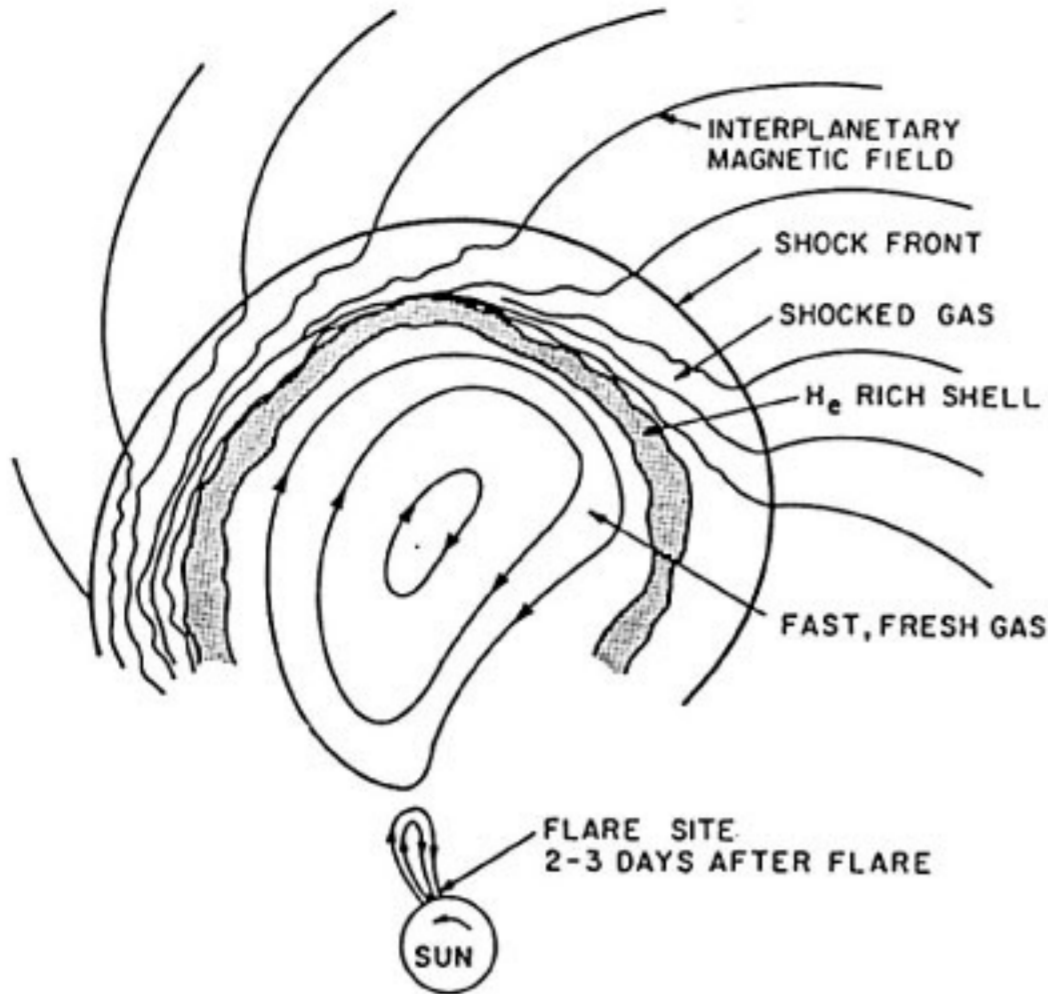
フレアによって引き起こされた太陽風じょう乱の構造について、初期の太陽風観測からは第1図のようなモデルが考えられた⁽¹⁾。じょう乱の前面にはフレアからの高速の放出プラズマにより衝撃波が生じており、放出物を

中心とする球面に近い形をしている。衝撃波の到来は、太陽風速度・密度・プロトン温度・磁場強度の突然の上昇で知ることができる。ここで言う衝撃波とは前進型のもの (forward shock) であり、フレア等の一時的な現象に伴って前進型と後進型の対が観測されることは希である⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。衝撃波の前駆現象として、太陽風中にプラズマ波動や電子温度の増加が観測されることがある⁽⁵⁾。

衝撃波の後方には、太陽からの高速の放出物により圧縮された太陽風プラズマがあり、シース領域とよばれる。その厚さは $0.1 \sim 0.2$ AU 程度であり、この中にはバックグラウンドの太陽風にもとから存在していた磁場の不連続構造 (discontinuity) が掃き集められて、多く見られる。

シース領域の後方には太陽からの放出物の領域があり、この領域に入ったことは He^{++} の増大等、イオン組成の変化で知ることができる⁽⁶⁾⁽⁷⁾。フレア時には通常の太陽風よりも下層の大気が放出されたためと考えられている。その他の特徴としては、プロトン及び電子温度の低下⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾、比較的強い磁場強度⁽¹¹⁾等が見られることがある。しかし、衝撃波は観測されたものの、上記の放出物の領域の特徴が全く見られない場合も半数はある⁽⁸⁾。

* 電波応用部 宇宙環境計測研究室



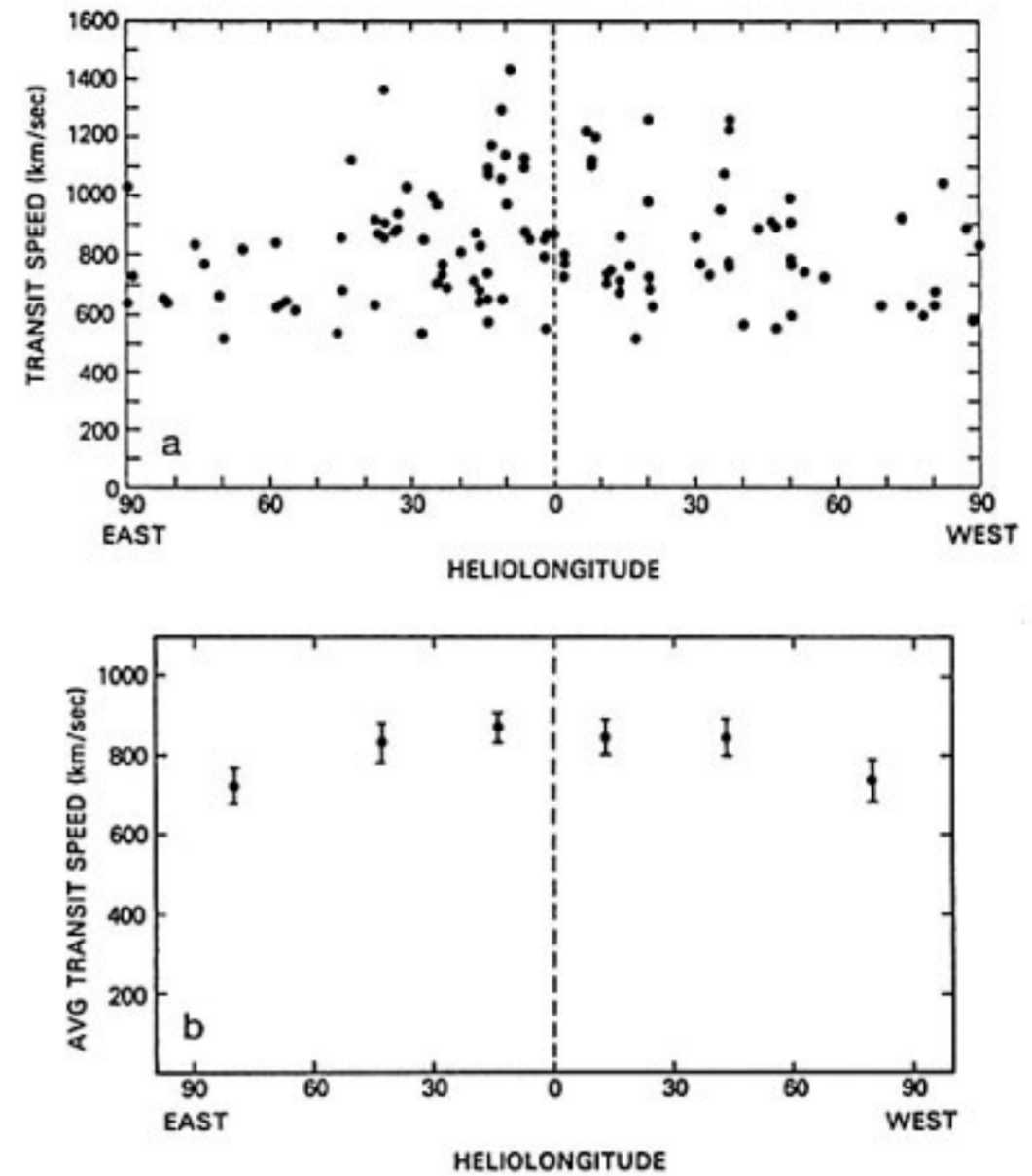
第1図 1970年代の観測をもとに作られた太陽風
じょう乱の概観図⁽¹⁾。

通常の太陽風中の電子の速度分布は、core とよばれる等方的成分と、80 eV 以上のエネルギーの halo とよばれる非等方的成分に分けられる⁽¹²⁾。halo は磁力線に沿って太陽から離れる方向に延びた分布をしており、高温のコロナから磁力線に沿って漏れ出てきた成分と考えられている。しかし衝撃波後方の放出物の領域では磁力線に沿った halo の分布が相方向に等しい、すなわち磁力線をどちらにたどってもコロナに行きつくような分布をしている⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。これは閉じた磁力線が惑星間空間に引き出されている証拠である。ちなみに、この閉じた磁力線の構造が膨張しながら太陽風中を進むため、放出物の領域のプロトンと電子の温度は低いものと解釈されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

第1図では磁力線の太陽に近い側も閉じて完全なループとなっているが、この点については明らかではない。衝撃波に続いてループ状の構造を示唆するような特異な磁場変化をする現象として磁気雲が報告されたが⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾、詳細な解析からは完全なループになっているとは言えない⁽¹⁸⁾。

3. 衝撃波のひろがり

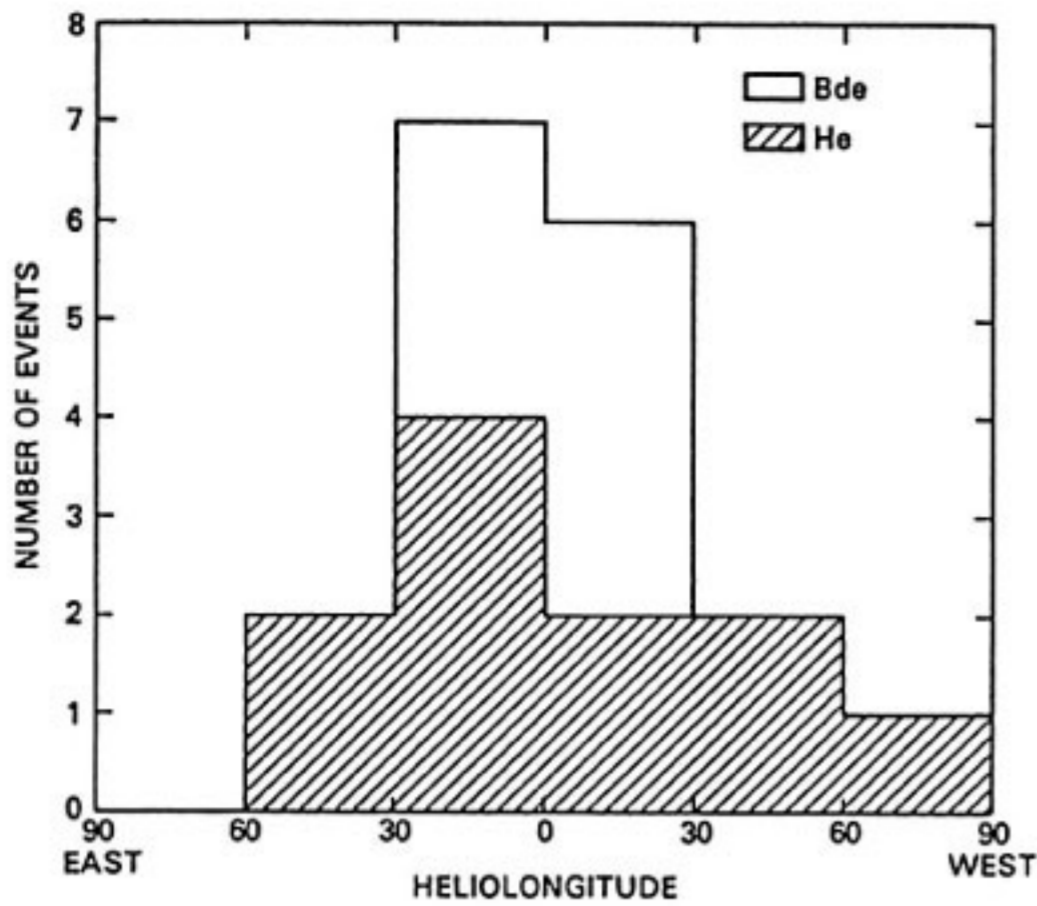
惑星間空間の一過性の衝撃波の大部分はコロナ領域の質量放出 (CMEs) と対応している⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾。これに対し、フレアと対応するのは50%程度とされる。一方、フレアのうちで、軟X線を長時間放出する現象 (LDE) を伴ったものは CMEs や惑星間空間の衝撃波を引き起こす^{(21)~(23)}。又、プロトン現象を伴うフレアは惑星間空間の衝撃波と対応がよい⁽²¹⁾⁽²²⁾。これらの事実をもとに、数



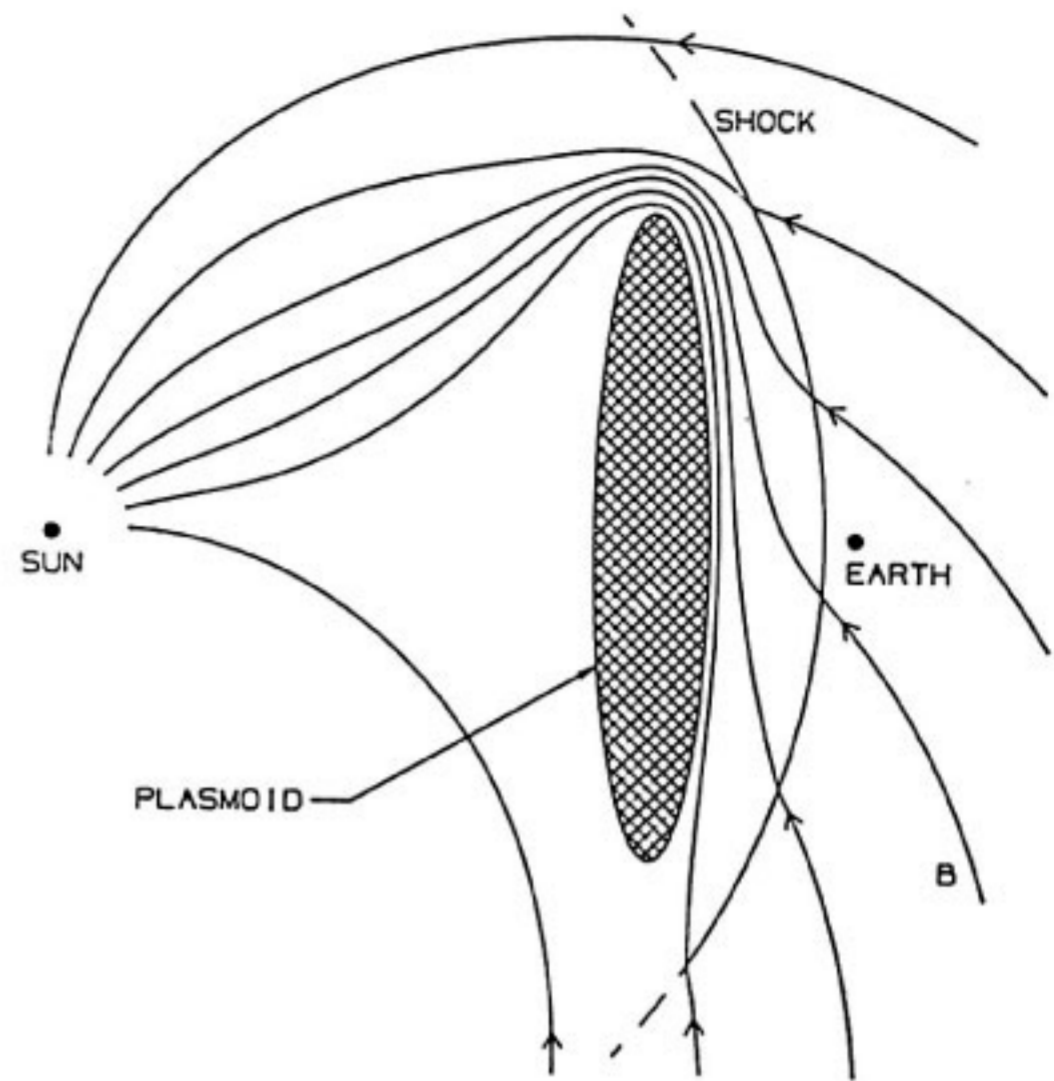
第2図 (a)太陽から地球軌道までの衝撃波の伝搬速度を、フレアの経度について示したものの⁽²⁴⁾。(b)同じく30°の経度巾について平均したものの。

あるフレアのうちから対応するものを同定し、その位置に対してどのように衝撃波がひろがっているかが調べられている⁽²⁴⁾。

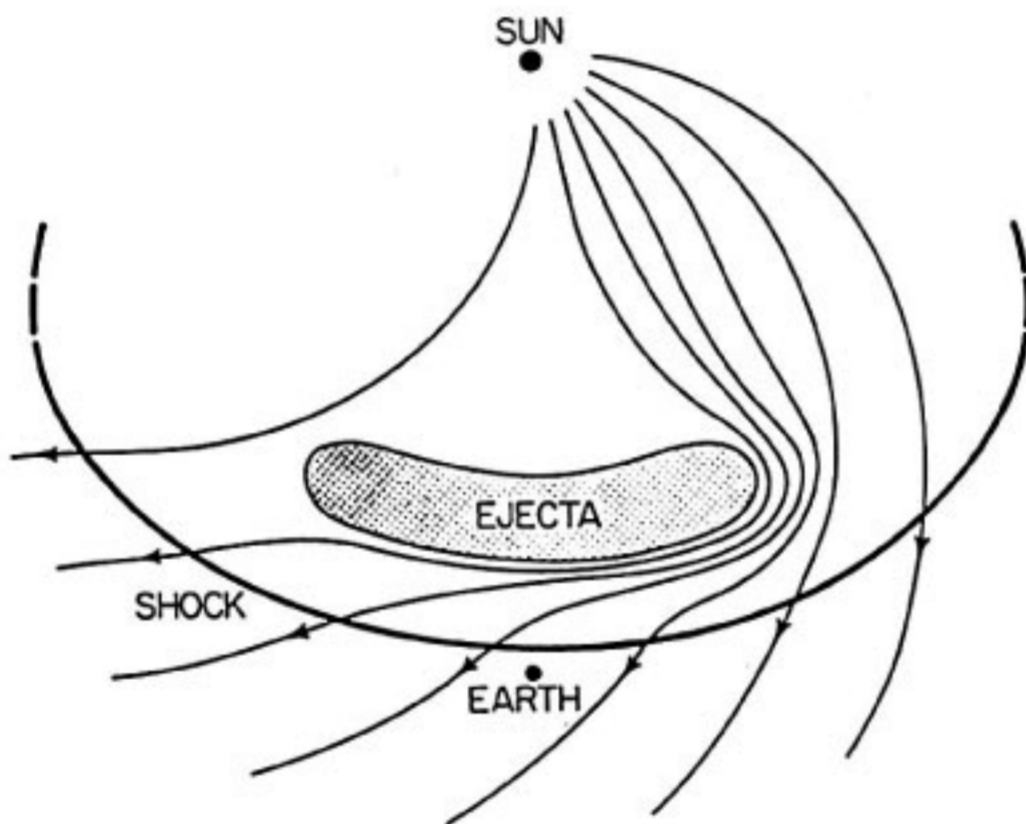
第1図では放出物の領域を中心とする球面となっているが、実際には衝撃波のひろがりはこれよりも大きいようである。その根拠の1つは、前節で述べたように、衝撃波の後に放出物の領域が観測されないことがあり、衝撃波の方が放出物の領域よりも大きくひろがっていると説明がつく⁽⁸⁾。第2図には太陽面上のフレアから1 AUで衝撃波が観測されるまでの間の平均伝搬速度を、フレア的位置に対して示した。フレアが太陽面の縁で生じた時にやや速度の遅い傾向が見られるものの、ほとんど速度の差はなく、衝撃波の形状は第1図よりはむしろ太陽を中心とした球面に近い形をしていることを示唆している。又、第3図には前述した He^{++} の増大と電子の速度分布の特殊性 (Bde) により同定した放出物の領域のひろがりを示したが、衝撃波が太陽を中心として100°程度のひろがりを持っていると考えられるのに対し、放出物の領域はおよそ60°程度のひろがりしかないことがわかる。CMEsの平均的なひろがりもほぼ60°程度であり、緯度方向と経度方向のひろがりが同程度と仮定すれば、放出物の領域はほぼ同じひろがりを持ったまま太陽から伝搬していることになる。第4図には以上の結果から想像される衝撃波と放出物 (EJECTA) のひろがりを



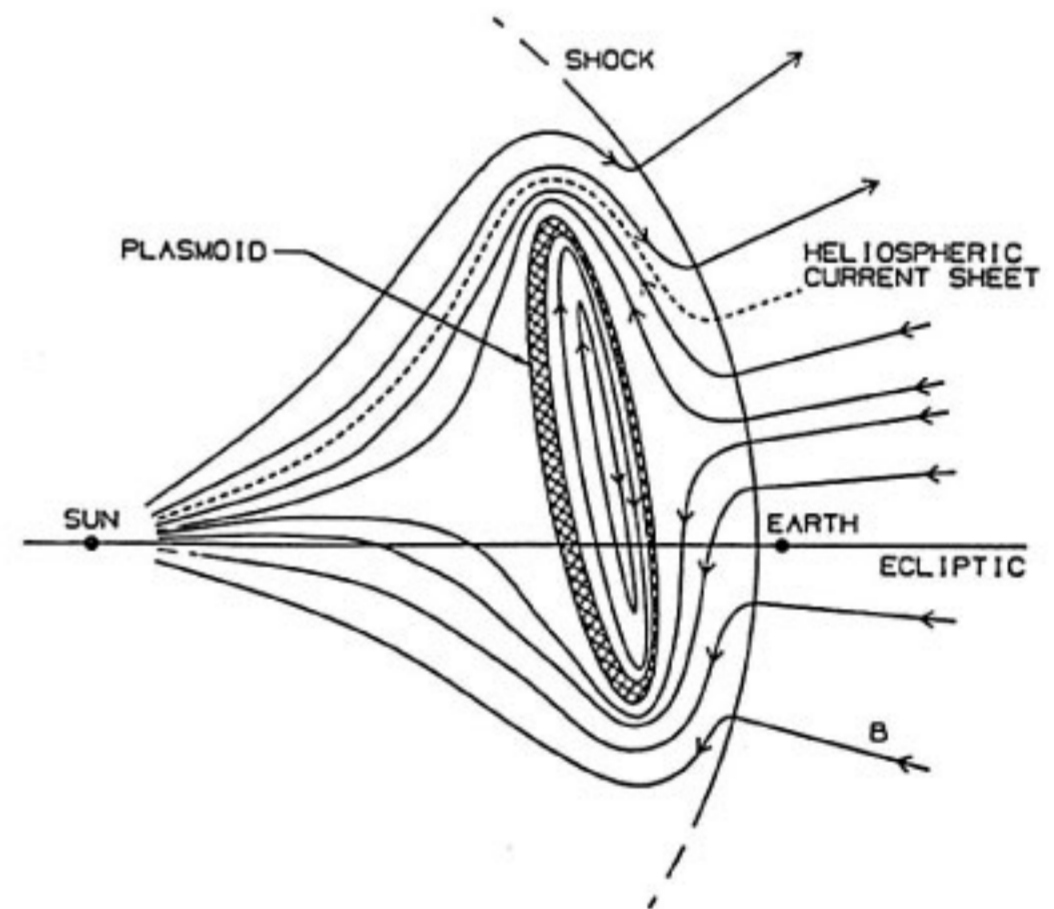
第3図 放出物の領域が電子の速度分布 (Bde) か H_e^{++} の増加 (He) から同定された場合の、源となったフレアの太陽面上の経度分布⁽²⁴⁾。



第5図 赤道面における太陽からの高速の放出物 (PLASMOID) とそのまわりの磁力線の形状の想像図⁽²⁷⁾。



第4図 衝撃波と放出物の惑星間空間におけるひろがりの想像図⁽²⁴⁾。



第6図 子午面における太陽からの放出物とそのまわりの磁力線⁽²⁷⁾。

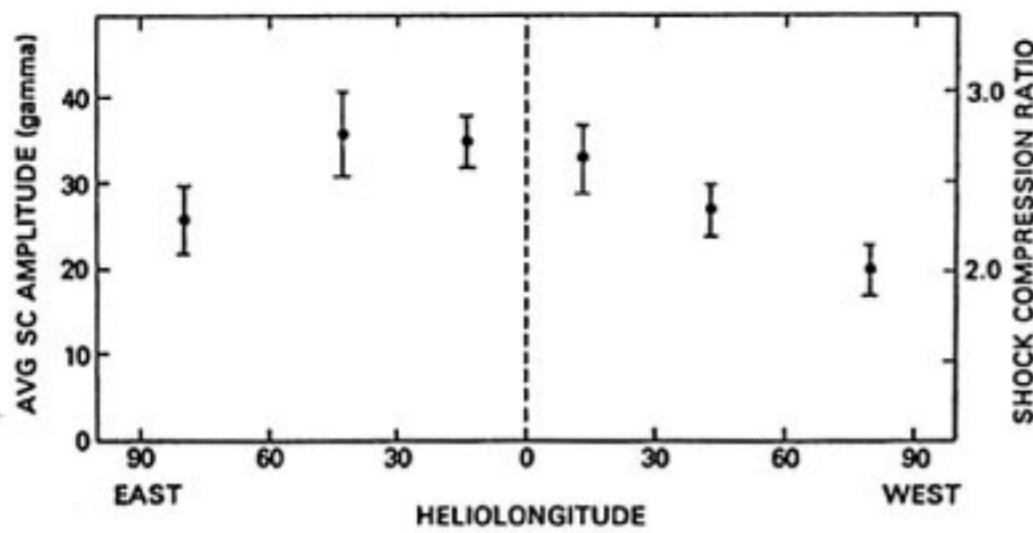
示した。尚、衝撃波の形状が太陽を中心とした球に近いというのはあくまで統計であり、実際はバックグラウンドの太陽風が不均一なため、個々の衝撃波の形状は異なっている可能性はある。

4. シース領域における磁力線の構造

一般に電離気体で覆われた天体に太陽風が吹き付けるとき、太陽風中の磁力線が天体からみつき、そのまわりを覆う draping が生じている (たとえば彗星⁽²⁵⁾、金星⁽²⁶⁾)。同様のことが太陽からの高速の放出物のまわりでも生じている可能性が指摘された⁽²⁷⁾ (第5図)。ここで重要なのは、シース領域は一次元でみれば単に圧縮の領域であるが、二又は三次元ではバックグラウンドの太

陽風の流が変形され、放出物のまわりをよけていく領域でもある点である。

地磁気じょう乱を引き起こす惑星間空間磁場の強い南向き成分は、シース領域と放出物の領域でしばしば観測される⁽²⁸⁾。シース領域の南向き磁場はもともと惑星間空間にあった南向き成分が圧縮されて強められた結果であるとされてきたが、周囲の磁場に南向き成分はなくても、シース領域で強い南向き成分が観測されることがある。太陽からの放出物 (PLASMOID) とその周囲のシース領域の磁力線の draping を子午面内で考えてみる



第7図 衝撃波の強度の平均を、源となったフレアの経度について示したもの⁽²⁴⁾。

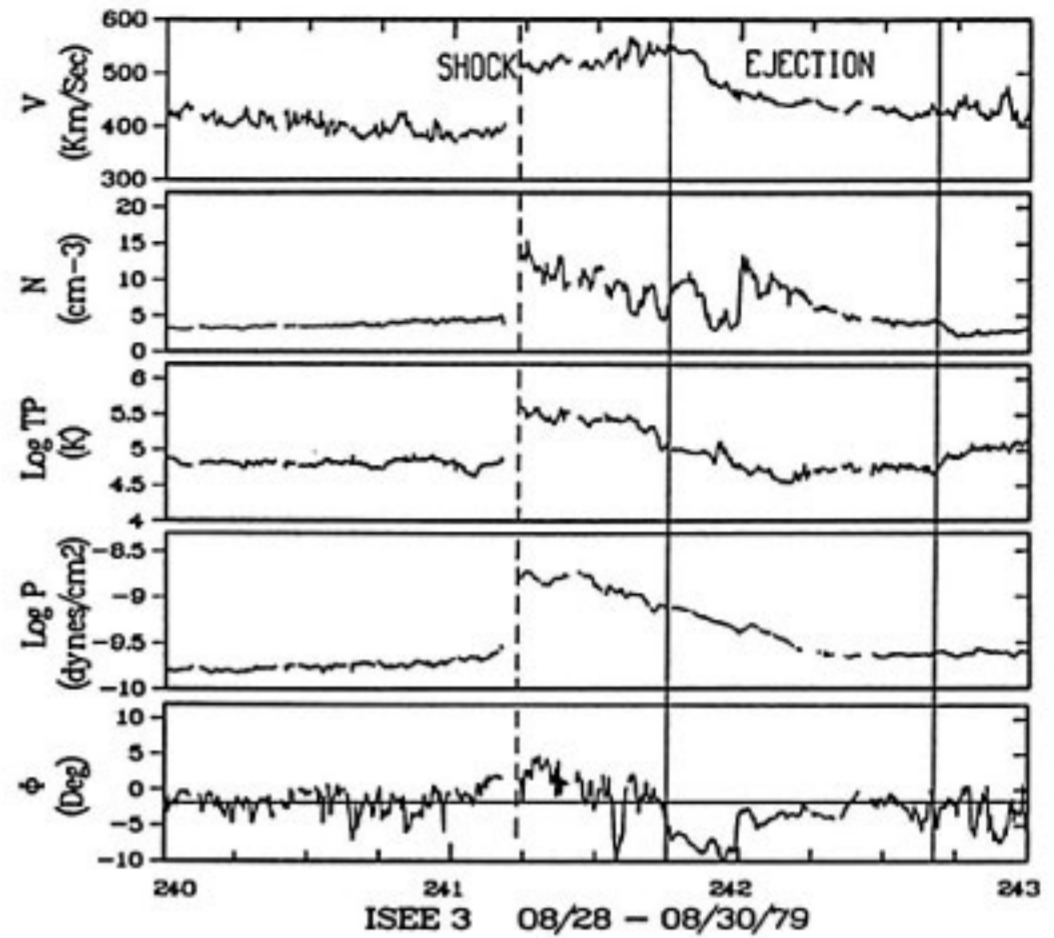
と第6図のようになる。バックグラウンドの太陽風磁場に南北成分はなくともシース領域で draping により南北成分が生じることが想像される。

この draping に関係している可能性のある現象がいくつか報告されている。第7図には衝撃波の強さを太陽面上のフレア的位置に対して示した⁽²⁴⁾。ここでは地上で観測された SC の強度を左側に、又 SC の強度と対応のよい衝撃波の圧縮率（衝撃波の前後の密度比）を経験的な関係式から求めて右側に付している。太陽面上の東側で生じたフレアによってより強い衝撃波が生じる傾向がある。第5図の赤道面上の draping の図を見ると、地球から見て西側の前面で特に磁力線が密になっており、強い圧縮が生じていると考えられる。これは太陽の自転により生じている通常の太陽風中のらせん磁場構造が集積した結果である。

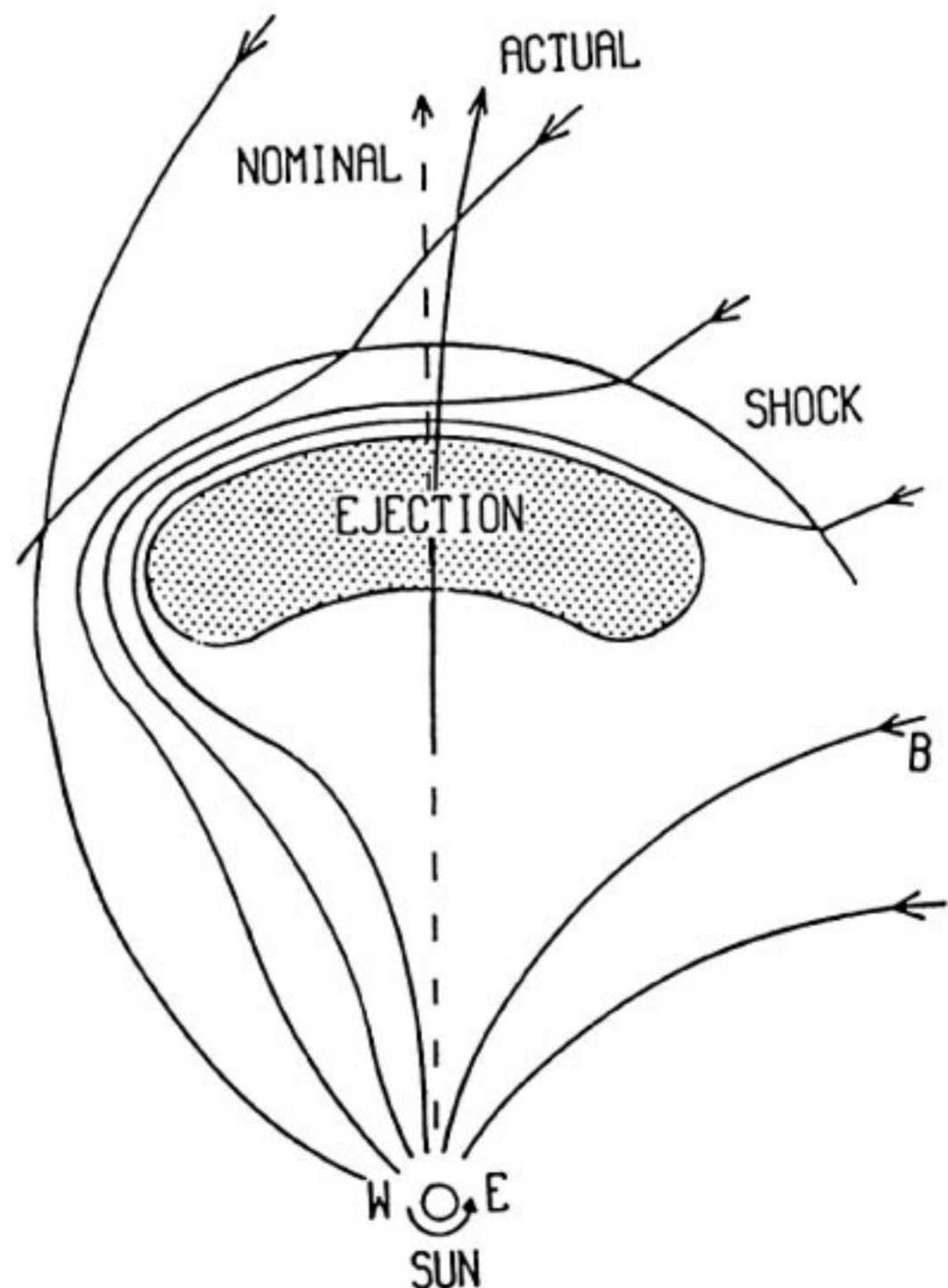
このような圧縮に不均一があると、その圧縮を生じさせた放出物の領域に対する反作用にも東西の非対称が予想される。第8図に示したようにシース領域から放出物の領域 (EJECTION) に入るところで、流れの向き (ϕ) が正から負へ (西から東へ) 変化することが多く見られる⁽²⁹⁾。このような流れの向きの変化は、共回転構造の低速流から高速流に入っていくときによく見られる変化である⁽³⁰⁾⁽³¹⁾。このように流れの向きが放出物の領域で東へ向いていることは、放出物全体がしだいに東にずれていくことを示唆している (第9図)。これは前述したシース領域の西側で特に圧力が高まっていることと対応していると思われる。

5. 太陽風磁気雲

磁気雲は太陽風のなかで周囲に比較して磁場が強く、磁場ベクトルが1つの面内でゆっくりと回転する特徴をもっている⁽¹⁶⁾。一般に磁気雲内部の温度は低く、太陽風中を膨張しながら、太陽から流れてきたものと考えられる。第10図には磁気雲のモデル⁽³⁴⁾を示すが、1AUでおおよそ0.3AU程度の大きさを持ち、地球を通過するの

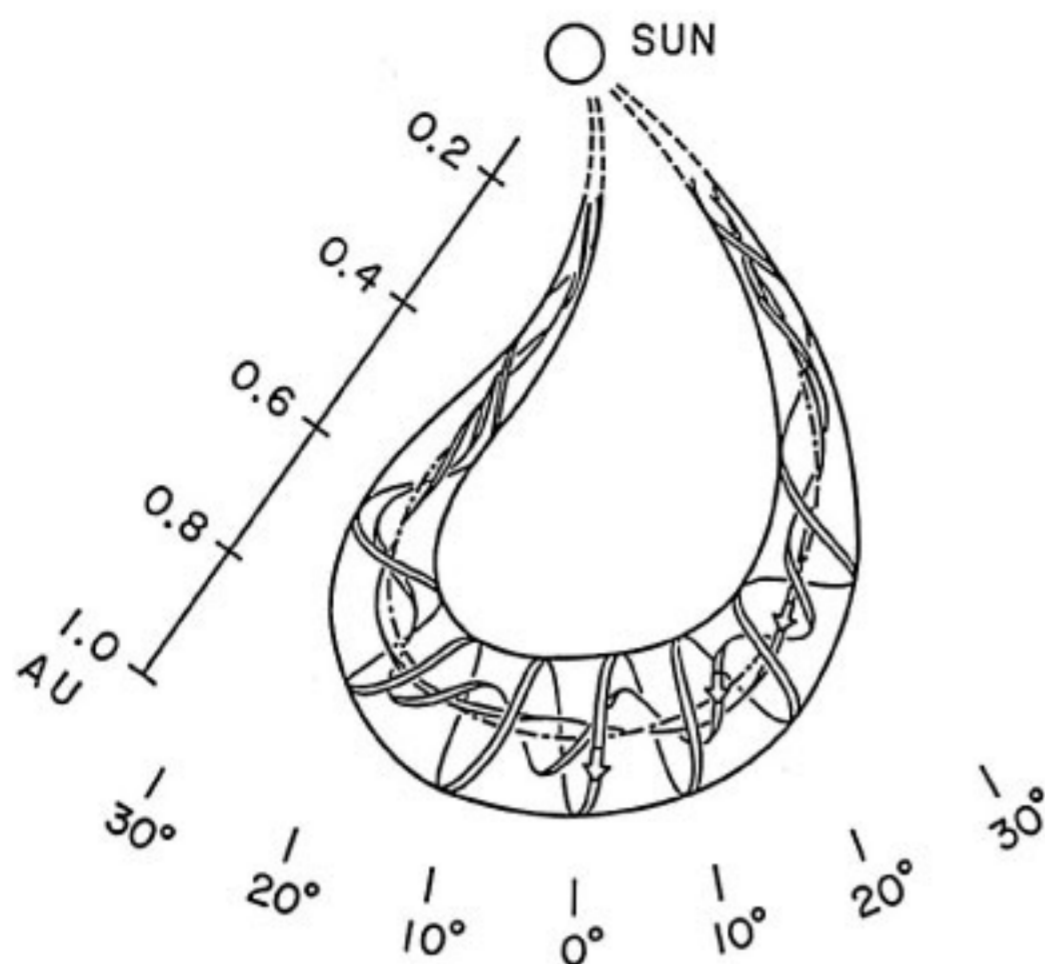


第8図 惑星間空間で計測された太陽風パラメータ⁽²⁹⁾。上のパネルから速度、密度、プロトン温度、圧力、流れその方向の角度を示す。点線で示した時刻に衝撃波が到来し、実線ではさまれた時間帯の間は放出物の領域に入っていた。



第9図 放出物 (EJECTION) が惑星間空間で東にずれていく様子をえがいたもの⁽²⁹⁾。

におよそ1日ほどかかる。その太陽における源としてはフィラメントの消失があげられており⁽¹⁸⁾⁽³³⁾、フィラメ



第10図 太陽風磁気雲の磁場構造のモデル⁽³²⁾

ントの構造がそのまま惑星間空間に引き出されたようである。磁気雲の前に衝撃波が生じている場合も多く、基本的には放出物の領域中における南向き磁場を生じさせる原因として、地磁気じょう乱の源となる⁽³⁴⁾。しかし、磁気雲の判定基準⁽¹⁶⁾からは、前述したシース領域の磁力線の draping や圧縮された磁場構造も含むことが予想され、この節以前の領域の区分けや現象との対応は必ずしも明確ではない⁽³⁵⁾。

6. おわりに

太陽風中の大規模なじょう乱について、最近の話題をひろって紹介した。これらのじょう乱の三次元構造やその成因については今だに不明確な点も多く、今後の課題も多く残っている。すでに予報の立場から、大きな磁気嵐の原因がどのような太陽風中の構造と対応していたかを調べる試みも行なわれている⁽³⁵⁾。その結果からは、単に放出物の領域の特性だけでなく、シース領域の状態が磁気嵐の大きさや継続時間を予測するうえでは特に重要なことが示唆されている。このことから、放出物がどのようにバックグラウンドの太陽風と相互作用を行いながら伝搬するかを理解してゆくことが、太陽近くの現象を観測・解析するのと同様に重要であるといえよう。

参考文献

- (1) D'Uston, C., "Structure and Evolution of Flare-generated Shock Waves", *Space Sci. Rev.*, 32, pp. 99-114, 1982.
- (2) Sonett, C. P., and Colburn, D. S., "The SI⁺-SI⁻ Pair and Interplanetary Forward-Reverse Shock Ensembles", *Planet. Space Sci.*, 13, pp. 675-692, 1965.
- (3) Schwenn, R., "Relationship of Coronal Transients to Interplanetary Shocks: 3-D Aspects", *Space Sci. Rev.*, 44, pp. 139-168, 1986.
- (4) Gosling, J. T., Bame, S. J., Smith, E. J., and Burton, M. E., "Forward-Reverse Shock Pairs Associated with Transient Disturbances in the Solar Wind at 1 AU", *J. Geophys. Res.*, 93, pp. 8741-8747, 1988.
- (5) Gurnett, L. A., Neubauer, F. M., and Schwenn, R., "Plasma Wave Turbulence Associated with an Interplanetary Shock", *J. Geophys. Res.*, 84, pp. 541-552, 1979.
- (6) Hirshberg, J., Alksne, A., Colburn, D. S., Bame, S. J., and Hundhausen, A. J., "Observation of a Solar Flare Induced Interplanetary Shock and Helium-Enriched Driver Gas", *J. Geophys. Res.*, 75, pp. 1-16, 1970.
- (7) Hirshberg, J., Bame, S. J., and Robbins, D. E., "Solar Flares and Solar Wind Helium Enrichments: July 1965-July 1967", *Solar Phys.*, 23, pp. 467-487, 1972.
- (8) Borrni, G., Gosling, J. T., Bame, S. J., and Feldman, W. C., "An Analysis of Shock Wave Disturbances Observed at 1 AU from 1971 through 1978", *J. Geophys. Res.*, 87, pp. 4365-4373, 1982.
- (9) Gosling, J. T., Pizzo, V., and Bame, S. J., "Anomalously Low Proton Temperatures in the Solar Wind Following Interplanetary Shock Waves: Evidence for magnetic bottles?", *J. Geophys. Res.*, 78, pp. 2001-2009, 1973.
- (10) Montgomery, M. C., Asbridge, J. R., Bame, S. J., and Feldman, W. C., "Solar Wind Electron Temperature Depletions Following Some Interplanetary Shock Waves: Evidence for Magnetic Merging?", *J. Geophys. Res.*, 79, pp. 3103-3110, 1974.
- (11) Schatten, K. H., and Schatten, J. E., "Magnetic Field Structure in Flare-Associated Solar Wind Disturbances", *J. Geophys. Res.*, 77, pp. 4858-4863, 1972.
- (12) Feldman, W. C., Asbridge, J. R., Bame, S. J., Montgomery, M. D., and Gary, S. P., "Solar Wind Electrons", *J. Geophys. Res.*, 80, pp. 4181-4196, 1975.

- (13) Bame, S. J., Asbridge, J. R., Feldman, W. C., Gosling, J. T., and Zwickl, R. D., "Bi-directional Streaming of Electrons 80 eV: ISEE Evidence for a Closed-Field Structure within the driver Gas of an Interplanetary Shock", *Geophys. Res. Lett.*, 8, pp. 173-176, 1981.
- (14) Gosling, J. T., Baker, D. N., Bame, S. J., Feldman, W. C., and Zwickl, R. D., "Bidirectional Solar Electron Heat Flux Events" 72, pp. 8519-8535, 1987.
- (15) Burlaga, L., Sitter, E., Mariani, F., and Schwenn, R., "Magnetic Loop Behind an Interplanetary Shock: Voyager, Helios, and IMP 8 Observations", *J. Geophys. Res.*, 86, pp. 6673-6684, 1981.
- (16) Klein, L. W., and Burlaga, L. F., "Interplanetary Magnetic Cloud at 1 AU", *J. Geophys. Res.*, 87, pp. 613-624, 1982.
- (17) Burlaga, L. F., and Behannon, K. W., "Magnetic Clouds: Voyager Observations Between 2 and 4 AU", *Solar Phys.*, 81, pp. 181-192, 1982.
- (18) Marubashi, K., "Structure of the Interplanetary Magnetic Clouds and Their Solar Origins", *Adv. Space Res.*, 6, pp. 335-338, 1986.
- (19) Sheeley, N. R., Howard, R. A., Jr., Koomen, M. J., Michels, D. J., Schlhauser, K. H., and Rosenbauer, H., "Coronal Mass Ejections and Interplanetary Shocks", *J. Geophys. Res.*, 90, pp. 163-175, 1985.
- (20) Cane, H. V., Sheeley, N. R., Jr., and Howard, R. A., "Energetic Interplanetary Shocks, Radio Emission, and Coronal Mass Ejections", *J. Geophys. Res.*, 92, pp. 9869-9874, 1987.
- (21) Sheeley, N. R., Howard, R. A., Jr., Koomen, M. J., and Michels, D. J., "Associations between Coronal Mass Ejections and Soft X-ray Events", *Astrophys. J.*, 272, pp. 349-354, 1983.
- (22) Cane, H. V., and Stone, R. G., "Type II Radio Bursts, Interplanetary Shocks, and Energetic Particle Events", *Astrophys. J.*, 282, pp. 339-344, 1984.
- (23) Cane, H. V., "The Evolution of Interplanetary Shocks", *J. Geophys. Res.* 90, pp. 191-197, 1985.
- (24) Cane, H. V., "The Large-Scale Structure of Flare-Associated Interplanetary Shock", *J. Geophys. Res.*, 93, pp. 1-6, 1988.
- (25) Slavin, J. A., Smith, E. J., Tsurutani, B. T., Siscoe, G. L., Jones, D. E., and Mendis, D. A., "Giacobini-Zinner Magnetotail: ICE Magnetic Field Observations", *Geophys. Res. Lett.*, 13, pp. 283-286, 1986.
- (26) Phillips, J. L., Luhmann, J. R., and Russell, T., "Magnetic Configuration of the Venus Magnetosheath", *J. Geophys. Res.* 91, pp. 7931-7938, 1986.
- (27) Gosling, J. T., and McComas, D. J., "Field Line Draping about Fast Coronal Mass Ejecta: A Source of Strong Out-of-the-ecliptic Interplanetary Magnetic Fields", *Geophys. Res. Lett.*, 14, pp. 355-358, 1987.
- (28) Burlaga, L. F., and King, J. H., "Intense Interplanetary Magnetic Fields Observed by Geocentric Spacecraft during 1963-1975", *J. Geophys. Res.*, 84, pp. 6623-6640, 1979.
- (29) Gosling, J. T., Thomsen, M. F., Bame, S. J., and Zwickl, R. D., "The Eastward Deflection of Fast Coronal Mass Ejecta in Interplanetary Space", *Geophys. Res. Lett.*, 92, pp. 12399-12406, 1987.
- (30) Siscoe, G. L., Goldstein, B., and Lazarus, A. J., "An East-west Asymmetry in the Solar Wind Velocity", *J. Geophys. Res.*, 74, pp. 1759-1762, 1969.
- (31) Gosling, J. T., Asbridge, J. R., Bame, S. J., and Feldman, W. C., "Solar Wind Stream Interfaces", *J. Geophys. Res.*, 83, pp. 1401-1412, 1978.
- (32) Marubashi, K., "The Space Weather Forecast Program", *Space Sci. Rev.*, 1989, in press.
- (33) Wilson, R. M., and Hildner, E., "On the Association of Magnetic Clouds with Disappearing Filaments", *J. Geophys. Res.*, 91, pp. 5867-5872, 1986.
- (34) Zhang, G., and Burlaga, L. F., "Magnetic Clouds, Geomagnetic Disturbances, and Cosmic Ray Decrease", *J. Geophys. Res.*, 93, pp. 2511-2518, 1988.
- (35) Tsurutani, B. T., Gonzalez, W. D., Tang, F., Akasofu, S. I., and Smith, E. J., "Origin of Interplanetary Southward Magnetic Fields Responsible for Major Magnetic Storms near Solar Maximum (1978-1979)", *J. Geophys. Res.*, 93, pp. 8519-8531, 1988.