

2-4 Javaスクリプトによる地磁気嵐の原因となる惑星間空間擾乱の到来時刻予測ツールについて

2-4 A Forecast Tool Using Java Script for Predicting Arrival Time of Interplanetary Disturbances to the Earth

亘 慎一
WATARI Shin-ichi

要旨

簡単なモデルを使って惑星間擾乱の到来時刻予測を行うことができるツールを作成し、その評価を行ったのでその結果について報告する。Javaスクリプトを用いることにより、擾乱の発生時刻及び初速度と背景の太陽風速度を入力してweb上で簡単に予測が行えるようにした。

In this report, we presented a forecast tool to predict arrival time of interplanetary disturbances using a simple model and evaluation of this tool. The tool was written in Java script and arrival time of disturbances was calculated on web. Input parameters of this tool are occurrence time and initial speed of solar source of disturbance and background solar wind speed.

【キーワード】

惑星間空間擾乱, Javaスクリプト, 太陽風, コロナ質量放出
Interplanetary disturbance, Java script, Solar wind, Coronal mass ejection

1 はじめに

イギリスの天文学者キャリントン(R. C. Carrington)が1859年に太陽で発生した白色光フレアを観測してから十数時間後に地球で大きな地磁気嵐が観測されたというのは有名な話である。その後、1960年代後半から1970年代にかけて宇宙からのコロナグラフによる観測でコロナ質量放出(CME: coronal mass ejection)と呼ばれる太陽コロナ中の擾乱が発見され、このCMEがより直接的に地磁気嵐にかかわっていると考えられるようになってきた[1]–[4]。しかしながら、現在でも、太陽で発生した擾乱が地球に到達し地磁気擾乱を起こすという定性的な理解に変わりはない。「宇宙天気予報」をより現実的なものにするためには、この定性的な理解から定量的な予測にシフトしていく必要がある。例えば、

地磁気嵐であれば、「いつ」、「どれくらいの規模」の擾乱が発生し、「どれくらい継続」するのかを精度よく予測することが必要となる。

太陽での擾乱の地球への到来時刻の予測に関しては、観測に基づく経験式を使ったもの、簡単なモデルを使ったもの、シミュレーションを使ったものなど、これまで幾つかの研究がなされてきている。例えば、STOA (shock time of arrival) モデル[5][6]は、惑星間空間衝撃波が超新星爆発のように爆風波的に伝搬すると仮定し、Ⅱ型太陽電波バーストの観測から得られるコロナ中の擾乱の速度を用いて衝撃波の地球への到来時刻を予測するものである。Gopalswamy ら[7]は、SOHO衛星に搭載されたコロナグラフ(LASCO: Large Scale Spectrometric Coronagraph)の観測データから得られるCMEの速度と加速度を用いて伝搬時間を求める経験式

を提案しているが、まだ、予測誤差はかなり大きい。Hakamada、Akasofu、Fry らによって開発された HAF (Hakamada-Akasofu-Fry) モデル [8]–[11] は、キネマティックなモデルを用いて、惑星間空間擾乱の伝搬予測を行うものである。Dryer や Smith ら [12] [13] [14] は、ISPM (interplanetary shock propagation model) と呼ばれる磁気流体 (MHD) シミュレーション・モデルを用い、II 型電波バーストの観測から得られる擾乱の速度と GOES 衛星で観測されるフレアの継続時間、フレアの発生位置などを入力して到来時刻の予測を行い、それを実際の観測と比較し、モデルの評価を行ったりしている。しかしながら、まだ、本格的な数値予報が行われているとはいえない状況である。

本報では、Java スクリプトを用いて、web 上で使える簡単なモデルを用いた擾乱到来時刻の予測ツールを作成し、その予測精度について検討を行った結果について報告する。また、同じモデルを用い 1AU での擾乱の観測時間からその原因となった現象の太陽での発生時刻と初速度を求めるツールも開発したので、それについても報告する。

2 モデルについて

図 1 に示したように擾乱は太陽からある距離 R_1 まで初速度 V_0 を保ち、その後距離のべき乗 α で減速するというモデルを用いた。また、背景の太陽風の速度 V_b は一定であると仮定した。このとき、太陽からの距離 R における擾乱の速度 V は以下のように与えられる。

$$V = V_0 + V_b \quad (R \leq R_1) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$V = V_0 (R_1/R)^\alpha + V_b \quad (R > R_1) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 R_1 と α は、現在のところ直接的に観測することは難しいということもあり、擾乱は 0.3 AU まで初速度を保ち、その後、距離の 0.5 乗に反比例して減速する ($R_1=0.3$, $\alpha=0.5$) と仮定した。これは、SOHO/LASCO の観測によると、惑星間空間で減速を受けるような速度の速い CME は、30 太陽半径の LASCO の視野中ではあまり減速を受けないことが多いということによ

るものである [15]。また、0.3 AU から 1 AU の惑星間空間で観測を行った Helios 衛星の観測によれば、衝撃波の減速は距離に 0.5 乗に反比例するという結果が得られている [16] [17]。

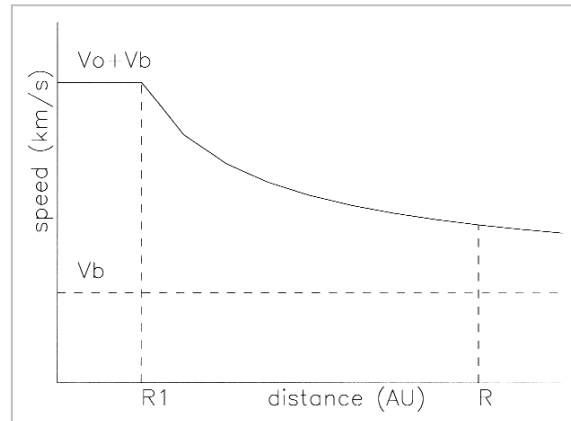


図 1 仮定した擾乱の速度変化

$$V = V_0 + V_b \quad (R \leq 0.3 \text{ AU}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$V = V_0 (R_1/R)^{0.5} + V_b \quad (R > 0.3 \text{ AU}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

太陽から地球までの距離を R_2 とすれば、太陽から地球までの擾乱の伝搬時間 T は、

$$\begin{aligned} T &= \int_{R_0}^{R_1} \frac{dR}{V} + \int_{R_1}^R \frac{dR}{V} \\ &= (R_1 - R_s) / (V_0 + V_b) + (R - R_1) / V_0 + 2V_s (R_1 - \sqrt{(RR_1)}) / V_0^2 \\ &\quad + 2R_1 V_s^2 / V_0^3 \cdot \log((V_0 \sqrt{(R/R_1)} + V_s) / (V_0 + V_s)) \quad \dots\dots (5) \end{aligned}$$

擾乱の原因となった太陽での現象の発生時刻に (5) 式で与えられる伝搬時間を加えることにより、擾乱の地球への到来時刻が計算できる。また、(4) 式より地球近傍での擾乱の速度を予測することができる。逆に、地球近傍での擾乱の速度と背景の太陽風の速度を与えると、(4) 式から擾乱の初速度を計算することができる。この初速度を使って、(5) 式で伝搬時間を求め、地球近傍での擾乱の到来時刻から引いてやると擾乱の原因となった太陽での現象の発生時刻を推定することができる。

図 2 及び図 3 に Java スクリプトを用いて web 上で計算するツールのグラフィカルユーザーインターフェース (GUI) を示す。図 2 のツールでは、

太陽での擾乱の発生時刻及び初速度と背景の太陽風速度を入力することにより、擾乱の1AUへの到来時刻及び擾乱の速度の予測値が出力される。一方、図3のツールでは1AUでの擾乱の観測時刻及び速度と背景の太陽風速度を入力することにより、太陽での擾乱の発生時刻及び初速度の予測値が出力される。

図2 擾乱の到来時刻の予測値を計算するためのGUI

図3 地球で観測された擾乱の太陽での発生時刻を予測するためのGUI

3 実際の現象への適用

3.1 擾乱の到来時刻の推定

地球近傍で顕著な衝撃波が観測された28個のイベントを使ってモデルの検証を行った。表1に1AUでの擾乱到来時刻、太陽での関連現象とその発生時刻、CMEの速度、到来時刻の予測誤差を示す。CMEの速度に関しては、NRLと共同で米国カリフォルニア大学の太陽物理・宇宙天気センターが作成しているSOHO/LASCOで観測されたCMEにリニアフィットして速度を算出したカタログを用いた。CMEの初速度が速いほど予測誤差が小さくなる傾向が見られる。表1から求めた惑星間空間擾乱の平均伝搬時間の分布を図4に示す。平均伝搬時間は 53.8 ± 16.2 時間である。分散は大きいが擾乱はほぼ2日程度で地球に到来することが分かる。

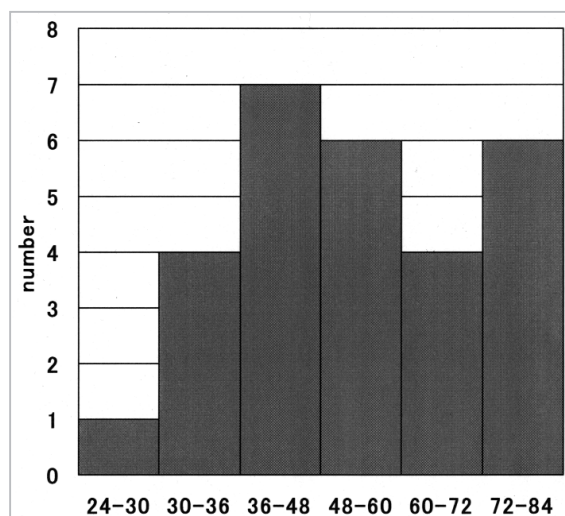


図4 惑星間空間擾乱の平均伝搬速度の分布

図5に到来時刻の予測誤差の分布を示す。予測誤差の平均は、約 0.9 ± 11.9 時間である。分布を見てみると本研究で使用したモデルでは擾乱の到来時刻を遅めに予測する傾向にあることが分かる。図6に地球近傍で観測された擾乱の速度とモデルにより予測された擾乱の速度の散布図を示す。両者は比例関係にあることが分かる。

3.2 惑星間空間擾乱に関係した太陽現象の発生時刻の推定

地球への擾乱の到来時刻、その速度、背景の太陽風速度から式(3)(4)(5)を用いて予測される

表1 地球への擾乱の到来時刻とその関連現象

擾乱の到来時刻 (UT)	タイプ	コメント	原因となった現象の時刻 (UT)	CMEの速度 (km/s)	擾乱の到来予測時刻 (UT)	予測誤差 (hour)
2000/04/06 16:31	SSC	halo CME, DSF, C9.7/2F (N16W66), type II, SEP	2000/04/04 15:11	1188	2000/04/06 16:31	0.0
2000/05/23 14:00		partial halo CME, C7.6/1N (S15W08), type II	2000/05/20 05:26	738	2000/05/22 21:22	-16.6
2000/06/08 09:10	SSC	halo CME, C9.7/2F (N16W66), DSF, type II, SEP	2000/06/06 14:58	1119	2000/06/08 14:29	5.3
2000/07/15 14:38		halo CME, X5.7/3B (N22W07), type II, SEP	2000/07/14 10:03	1674	2000/07/15 19:41	5.1
2000/07/28 06:35	SSC	halo CME, M8.0/2B (N06W08), type II	2000/07/25 02:43	528	2000/07/28 21:16	14.7
2000/08/11 18:45	SSC	halo CME	2000/08/09 16:30	702	2000/08/12 13:19	18.6
2000/09/06 17:01	SI	partial halo CME, DSF (N13W38)	2000/09/04 06:06	849	2000/09/06 21:01	4.0
2000/10/12 22:28	SI	halo CME, C6.7/1F (N01W14)	2000/10/09 22:32	579	2000/10/13 13:11	14.7
2000/10/28 09:52	SSC	halo CME, C4.0, SEP	2000/10/25 08:45	770	2000/10/28 04:47	-5.1
2000/11/10 06:26	SSC	halo CME, M7.4/3F (N10W77), SEP	2000/11/08 22:42	1345	2000/11/10 17:11	10.7
2000/11/29 01:00		halo CME, X1.9/2B (N20W23), type II	2000/11/25 18:33	671	2000/11/28 20:09	-4.8
2001/01/13 01:50	SSC	halo CME	2001/01/10 00:54	832	2001/01/12 17:39	-8.2
2001/01/31 08:04	SSC	partial halo CME, M1.5/1N (S04W59)	2001/01/28 15:40	916	2001/01/31 03:17	-4.8
2001/04/08 11:00	SSC	halo CME, X5.6/SF (S21E31)	2001/04/06 19:10	1270	2001/04/08 14:54	3.9
2001/04/11 13:43	SSC	halo CME, M7.9/2B (S21W04), EIT wave, dimming, type II	2001/04/09 15:20	1192	2001/04/11 12:52	-0.8
2001/04/13 07:34	SSC	halo CME, M2.3/1F (S22W27), type II	2001/04/11 12:56	1103	2001/04/13 11:29	3.9
2001/04/18 00:46	SSC	partial halo CME, X14.4/2B (S20W85), type II, SEP	2001/04/15 13:19	1199	2001/04/17 15:40	-9.1
2001/04/28 05:00	SSC	halo CME, M7.8/2B (N17W31)	2001/04/26 11:26	1006	2001/04/28 15:57	10.9
2001/08/17 11:02	SSC	halo CME, DSF, arcade	2001/08/14 16:01	618	2001/08/17 21:44	10.7
2001/09/25 20:25	SSC	halo CME, X2.6/2B (S16E23), SEP	2001/09/24 09:32	2402	2001/09/25 12:38	-7.8
2001/09/30 19:24	SSC	halo CME, M3.3/2N (N10E18), type II	2001/09/28 08:10	846	2001/09/30 20:29	1.1
2001/10/11 17:00	SI	halo CME, type II	2001/10/09 11:30	973	2001/10/11 18:50	1.8
2001/10/21 04:47	SSC	halo CME, X1.6/2B (N15W19), type II, SEP	2001/10/19 16:13	901	2001/10/22 05:35	24.8
2001/10/28 03:18	SI	halo CME, X1.3/2B (S17W20), EIT wave, dimming, type II	2001/10/25 14:42	1092	2001/10/27 19:29	-7.8
2001/11/06 01:51	SSC	halo CME, X1.0/3B (N06W18), type II, SEP	2001/11/04 16:03	1810	2001/11/06 03:28	1.6
2001/11/24 05:54	SI	halo CME, M9.9/2N (S15W34), dimming, SEP	2001/11/22 22:32	1443	2001/11/24 13:20	7.4
2001/12/29 04:56	SI	partial halo CME, M7.1/1B (N08W54), type II	2001/12/26 04:32	1446	2001/12/27 22:11	-30.8
2001/12/30 19:38	SI	halo CME, X3.4, type II, SEP	2001/12/28 20:02	2069	2001/12/30 02:01	-17.6
(平均誤差)						0.9
(分散)						11.8

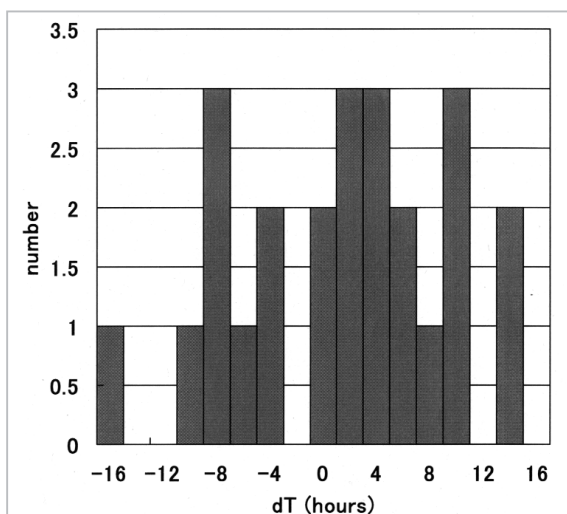


図5 擾乱到来時刻の予測誤差の分布

太陽で関連現象の発生時刻と表1の太陽での関連現象の発生時刻との誤差の分布を示したのが図7である。予測誤差の平均は -7.1 ± 11.1 時間で、関連現象の発生の時刻を早めに予測する傾向にあることが分かる。

図8は、SOHO/LASCOで観測されたCMEの速度と地球近傍(1 AU)での太陽風の観測をもとにモデルによって予測されたCMEの速度との比の経度分布を示したものである。太陽面の中央付近で発生した現象に関しては、予測された速度に対して観測された速度が小さくなっている

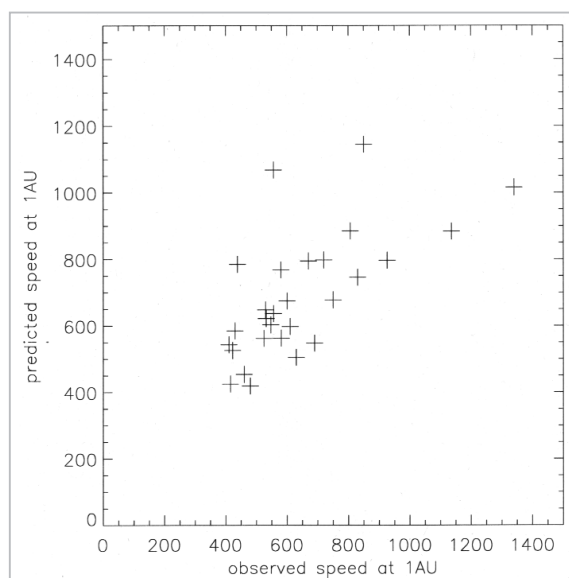


図6 地球近傍で観測された擾乱の速度とモデルにより予測された擾乱の速度

のに対して太陽面の端の方へ行くに従って逆の傾向が見られる。これは、中央付近で発生した現象では、CMEのサイド方向への速度成分が主に観測されている。逆に、リム近くで発生した現象については、CMEの主方向の速度成分が観測されていることによるものであると考えられる。

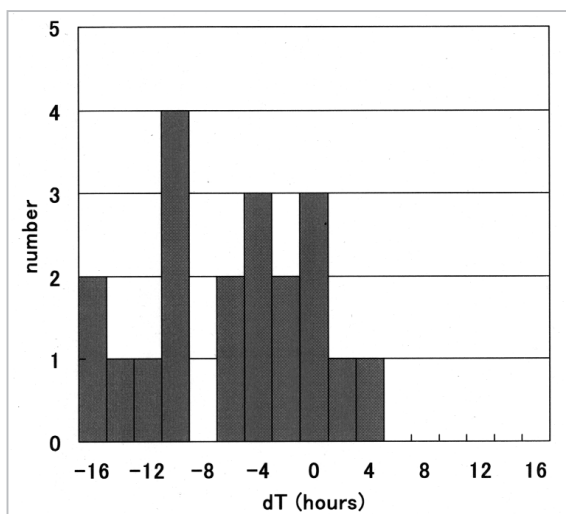


図7 擾乱原因の発生時刻の予測誤差分布

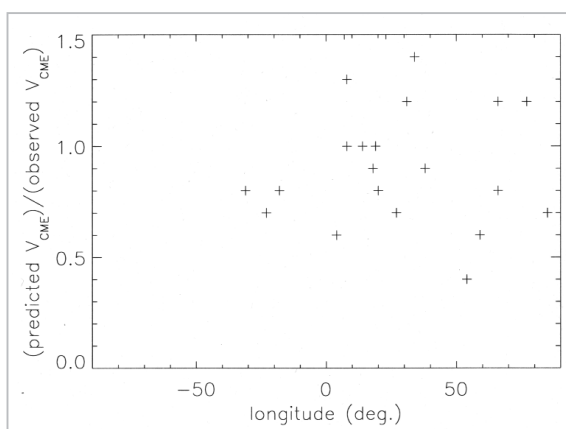


図8 実際に観測されたCMEの速度とモデルにより予測された速度の比の経度分布

3.3 計算に用いたパラメータの検討

擾乱が減速を始める距離 R_1 と減速の仕方を決める α は擾乱ごとに違う値をとる可能性もあるが、観測的にこの二つの値を得ることは難しいということもあり、ここでは固定値とした。しかし、実際に観測されたCMEの速度と地球近傍で観測された擾乱の速度及び背景の太陽風の速度を用いると、式(4)の関係から R_1 を求めることができる。そこで、 R_1 あるいは α のどちらか一方が既知で一定の値をとると仮定すると、 R_1 あるいは α の分布を求めることができる。図9に $\alpha = 0.5$ としたときの R_1 の分布を示す。このとき、 R_1 の平均値は 0.19 ± 0.23 AUとなる。一方、図10に $R_1 = 0.3$ としたときの α の分布を示す。このとき、 α の平均値は 0.7 ± 0.4 となった。分散は大きい、 R_1 は仮定した0.3 AUより小さく、

α は仮定した0.5より大きな値となった。この結果によれば、仮定したより近いところで減速が始まっている可能性がある。実際、St. Cyrら[18]によりSOHO/LASCOの視野内で減速するCMEが報告されている。

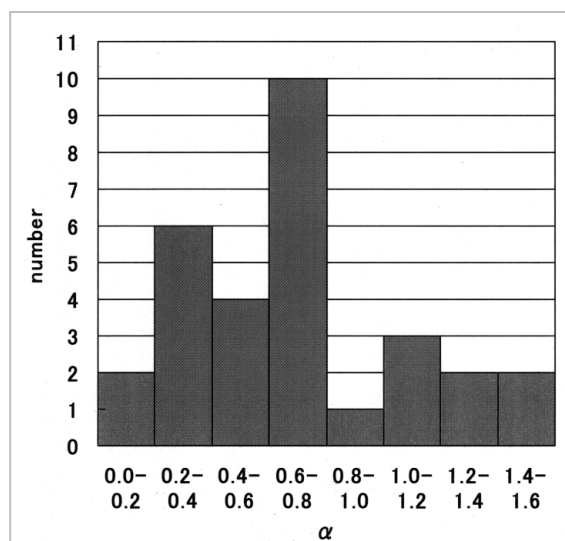


図9 $\alpha = 0.5$ と仮定して求めた R_1 の分布

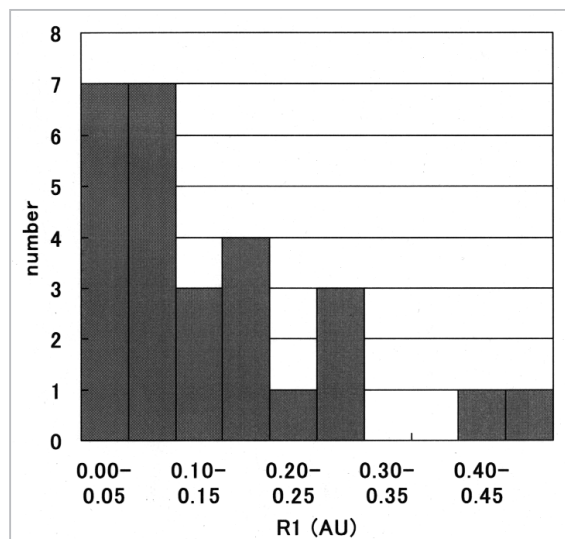


図10 $R_1 = 0.3$ と仮定して求めた α の分布

本研究では、背景の太陽風については速度が一定であると仮定した。太陽半径の10倍の距離以内で太陽風の加速は終了しているという観測結果[19]もあり、速度の速い擾乱については、この仮定による予測誤差は小さいと考えられる。しかし、セクター境界などの遅い太陽風領域を越えて擾乱が到来するような場合には、背景の太陽風との相互作用の影響が誤差の原因になる

と考えられる。観測されるCMEの速度に関しては、**3.2**で示したようにプロジェクションにより経度の効果が出ているようである。擾乱の発生した位置と広がりを用いて、何らかの補正を加える必要があると考えられる。

4 むすび

簡単なモデルを用いたにもかかわらず比較的精度の良い予測を行うことができた。太陽から地球への擾乱の到来時刻を正確に予測できるということは、地球付近での惑星間空間擾乱の観測からその擾乱の原因となった太陽現象の発生時刻を正確に予測できるということを意味しており、太陽—地球結合系物理においてこの種の

試みは重要である。今後、MHDシミュレーションなどの手法を用いることで、擾乱の3次元的な構造や背景の太陽風構造との相互作用を考慮した精度の高い予報がなされるようになると思われる。また、2005年にNASAによって打ち上げが予定されているSTEREO (Solar Terrestrial Relation Observatory) 衛星により、地球方向への擾乱の速度や伝搬が観測できるようになることが期待される[20]。

本研究で使われたSOHO/LASCOのCMEカタログは、NRLと共同で米国カソリック大学の太陽物理・宇宙天気センターで作られ維持されているものである。SOHO衛星は、ESAとNASAの共同プロジェクトである。

参考文献

- 1 J. T. Gosling, "The solar flare myth", J. Geophys. Res., Vol.98, 18937-18949, 1993.
- 2 Crooker, N., Joselyn, J. A., and Feynman, J. (eds.), "Coronal Mass Ejections", Geophys. Monograph, Washington, DC, AGU, 1997.
- 3 D. F. Webb, E. W. Cliver, N. U. Crooker, O. C. St. Cyr, and B. J. Thompson, "The relationship of halo coronal mass ejections, magnetic clouds, and magnetic storms", J. Geophys. Res., Vol.105, 7491-7508, 2000.
- 4 D. F. Webb, N. U. Crooker, S. P. Plunkett, and O. C. St. Cyr, "The solar source of geoeffective structures", in Space weather, Song, P., Singer, H. J., and Siscoe, G. L. (eds.), Geophys. Monograph., p.123-141, Washington, DC, AGU, 2001.
- 5 M. Dryer and D. F. Smart, "Dynamical models of coronal transients and interplanetary disturbances", Adv. Space Res., Vol.4, 291-301, 1984.
- 6 D. F. Smart and M. A. Shea, A simplified model for timing the arrival of solar-flare-initiated shocks, J. Geophys. Res., Vol.90, 183-190, 1985.
- 7 N. Gopalswamy, A. Lara, R. P. Lepping, M. L. Kaiser, D. Berdichevsky, and O. C. St. Cyr, "Interplanetary acceleration of coronal mass ejections", Geophys. Res. Lett., Vol.27, 145-148, 2000.
- 8 K. Hakamada and S. -I. Akasofu, "Simulation of three-dimensional solar wind disturbances and resulting geomagnetic storms", Space Sci. Rev., Vol.31, 3-70, 1982.
- 9 S. -I. Akasofu, K. Hakamada, and C. Fry, "Solar wind disturbances caused by solar flares: Equatorial plane", Planetary and Space Sci., Vol.31, 1435-1458, 1983.
- 10 C. D. Fry, W. Sun, C. S. Deehr, M. Dryer, Z. Smith, S. -I. Akasofu, M. Tokumaru, and M. Kojima, "Improvements to the HAF solar wind model for space weather predictions", J. Geophys. Res., Vol.106, 20985-21001, 2001.
- 11 S. -I. Akasofu, "Predicting geomagnetic storms as a space weather project", in Space weather, Song, P., Singer, H. J., and Siscoe, G. L. (eds.), Geophys. Monograph., p.329-337, Washington, DC, AGU, 2001.
- 12 M. Dryer, "Interplanetary studies: propagation of disturbances between the Sun and magnetosphere", Space Sci. Rev., Vol.67, 363-419, 1994.
- 13 Z. Smith and M. Dryer, "MHD study of temporal and spatial evolution of simulated interplanetary shocks in

the ecliptic plane within 1 AU", Solar Phys., Vol.129, 387-405, 1990.

- 14 Z. Smith, M. Dryer, E. Ort, and W. Murtagh, "Performance of interplanetary shock prediction models: STOA and ISPM", J. Atmosphere and Solar-Terrestrial Physics, Vol.62, 1265-1274, 2000.
- 15 R. Sheeley Jr., J. H. Walters, Y. -M. Wang, and R. A. Howard, "Continuous tracking of coronal outflows: Two kinds of coronal mass ejections", J. Geophys. Res., Vol.104, 24739-24767, 1999.
- 16 P. M. Volkmer and F. M. Neubauer, "Statistical properties of fast magnetoacoustic shock waves in the solar wind between 0.3 AU and 1 AU : Helios-1,2 observations", Annales Geophys., Vol.3, 1-12, 1985.
- 17 S. Watari and T. Detman, "In situ local shock speed and transit shock speed", Ann. Geophysicae, Vol.16, 370-375, 1998.
- 18 O. C. St. Cyr, R. A. Howard, N. R. Sheeley, S. P. Plunkett, D. J. Michels, S. E. Paswaters, M. J. Koomen, G. M. Simnett, B. J. Thompson, J. B. Gurman, R. Schwenn, D. F. Webb, E. Hildner, and P. L. Lamy, "Properties of coronal mass ejections: SOHO LASCO observations from January 1996 to June 1998", J. Geophys. Res., Vol.105, 18169-18185, 2000.
- 19 R. R. Grall, W. A. Coles, M. T. Klingsmith, A. R. Breen, P. J. S. Williams, J. Markanen, and R. Esser, "Rapid acceleration of the polar solar wind", Nature, Vol.379, 429-432, 1996.
- 20 O. C. St Cyr and J. M. Davila, "The STEREO space weather broadcast", in Space weather, Song, P., Singer, H. J., and Siscoe, G. L. (eds.), Geophys. Monograph., p.205-209, Washington, DC, AGU, 2001.



わたり しんいち
亘 慎一

企画部企画室主任研究員 博士（理学）太陽地球結合系物理

