2-3　太陽風と太陽風擾乱の生成

2-3 Solar Wind and Interplanetary Disturbances

亘 慎一
WATARI Shinichi

要旨

はじめに太陽風及び太陽風擾乱についてのこれまでの基礎的な理解について述べる。次に、最近の観測や理論などによる新たな研究成果に関して議論する。最後に、太陽風擾乱を予報するために行われている幾つかの試みについて述べる。

This report describes basic knowledge of solar wind and interplanetary disturbances first. And then it discussed recent results from new observations and theories. At the end it presented research activities to predict interplanetary disturbances for space weather forecast.

[キーワード]
太陽風，太陽風擾乱，コロナガス噴出，コロナホール
Solar wind, Interplanetary disturbance, Coronal mass ejection, Coronal hole

1　はじめに

太陽活動周期22から23にかけて、「ようこう」（1990年～2002年）[1]、SOHO（Solar and Heliospheric Observatory, 1995年～）[2]、TRACE（Transition Region And Corona Explorer, 1998年～）[3]、RHESSI（Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager, 2002年～）[4]、WIND（1994年～）[5]、ACE(Advanced Composition Explorer, 1997年～)[6]、ユリシーズ（Ulysses, 1990年～）[7]などの衛星や探査機によって太陽及び太陽風の観測が連続的に行われ、多くの新しい知見が得られつつある。

ユリシーズは、太陽活動の極小期（1994年－1995年）と極大期（2000年－2001年）の2度にわたって太陽の両極付近の上空を通過し、高緯度における太陽風の直接観測を初めて行った。「ようこう」衛星に搭載された軟X線望遠鏡（SXT: Soft X-ray Telescope）によるほぼ11年間の太陽観測は、太陽外延の大気（コロナ）が太陽活動の極小期ですらダイナミックに活動していることを明らかにした。SOHOに搭載された極端紫外線望遠鏡（EIT: Extreme ultraviolet Imaging Telescope）及びコロナグラフ（LASCO: Large Angle and Spectrometric Coronagraph）によるコロナガス噴出（CME: Coronal Mass Ejection）と呼ばれるコロナ中の擾乱の観測とWIND衛星やACE衛星による太陽風擾乱の直接観測は両者の関連をより明確にした。また、ACE衛星は地球の約150万km上流のL1と呼ばれる太陽と地球の重力が釣り合うラグランジュポイントで連続的な太陽風の観測を行い、ほぼリアルタイムでその観測データを地球へ送信することにより、約1時間前に地球での地磁気擾乱発生を予測することを可能にした。

本報告では、最新の研究成果に基づいて太陽風及び太陽風擾乱について概観する。また、太陽風及び太陽風擾乱の予報に関する試みについて紹介する。

2　太陽風の起原とその性質

2.1　太陽風の加速

太陽から超音速で吹き出すプラズマの流れである太陽風の存在は、パーカーによりその存在が理論的に予測されていた[8]。ドイツの天文学者ビアマン(Bierman)は彗星の観測から間接的にその存在に気づいていたが、旧ソ連や米国の衛星による直接観測で太陽風の存在が確認されたのは1960年代であった。

パーカーの理論は、100万度の太陽コロナ中のプラズマに働く力として圧力勾配による力と重力を考えたときにコロナのプラズマが超音速で吹き出す状態が安定であることを示したものである。球対称で等温の一流体プラズマを仮定すると、定常状態では、

$$nmV\frac{dV}{dr} = -\frac{d(2nkT)}{dr} - \frac{nmGM}{r^2} \quad \cdots\cdots\cdots (1)$$

ここで、Vは速度、mはプラズマ粒子の質量、nはプラズマ密度、Tは温度、kはボルツマン定数、Gは重力定数、Mは太陽の質量、rは太陽中心からの距離である。これに連続の方程式を用いることによって、

$$\frac{1}{2}\left(1-\frac{V_s^2}{V^2}\right)\frac{dV^2}{dr} = \frac{V_s^2}{r} - r_0\frac{V_g^2}{2r^2} \quad \cdots\cdots (2)$$

が得られる。ここで、$V_s^2=2kT/m$(音速)、$V_g^2=2GM/r_0$(太陽の重力からの脱出速度)、r_0はコロナ底部の太陽中心からの距離である。コロナの底部でプラズマの速度Vが音速V_sより小さいとすれば、右辺が負であればプラズマは加速($dV^2/dr>0$)されることになる。コロナの温度を$T=10^6$K、r_0を太陽半径とすると、V_s=130 km/s、V_g=620 km/sなので、$r=r_0$では式(2)の右辺は負となり、プラズマは外側に向かって加速される。$r/r_0=V_g^2/2V_s^2$を満たす臨界点(critical point)で音速となる解を選ぶと、その後も加速が続くことになる。臨界点を超えたところで式(2)の右辺と左辺の$(1-V_s^2/V^2)$が同時に符号を変えてどちらも正となり、音速を超えても加速され続け超音速となる。この太陽風が超音速の流れとなる解を図1に示す。

最近では、Grallら[9]が、太陽風による電波星のシンチレーション(IPS: Inter-Planetary Scintillation)の観測から太陽風の速度や密度揺らぎを求める手法を用いて、太陽風の加速は太陽半径の10倍以内でほぼ終了していることを明らかにした。これは、太陽風の“rapid acceleration”と呼ばれている。また、温度の低いコロナホールからより高速・高温の太陽風が吹き出されており、地球近傍で実際に観測される太陽風の密度は理論によって予測される密度より小さい。これらの観測事実をうまく説明するためにはパーカーの理論だけでは不十分で、太陽近傍での付加的な加速機構を考える必要がある。

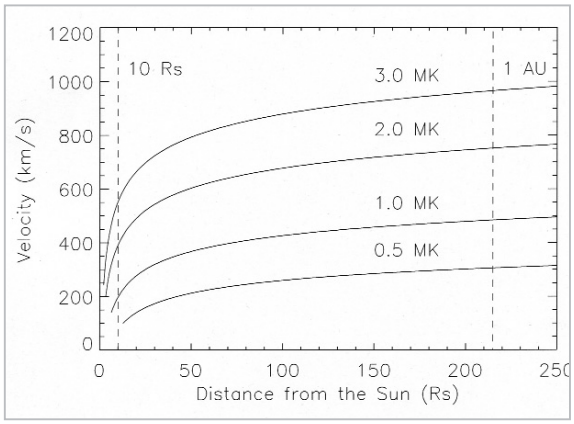


図1 パーカーの理論による太陽風加速

現在では、この付加的な太陽風加速のエネルギー源は、太陽コロナを6千度から百万度に加熱するエネルギー源と同じものであると考えられている。光球面の対流が磁力線を揺らし波動が磁力線に沿ってコロナにエネルギーを運ぶという「波動説」[10][11]と小さなフレアがひっきりなしに起こってコロナにエネルギーを供給するという「ナノフレア説」[12]があるが、まだ、観測による十分な検証はなされていない。

ナノフレア説については、現在の観測から得られるフレアのサイズと発生頻度の関係から推定されるコロナへのエネルギー供給ではコロナの加熱を説明するには不十分であるとされている[13]～[16]。より高分解能、高感度の観測でナノフレアの発生頻度を調べる必要がある。一方、高速太陽風の源となっているコロナホールでは乱流によりコロナ輝線のスペルトル幅が静穏領域(閉じた磁場の領域)よりも大きいことがRajuら[17]によって観測されており、この観測結果は波動によるエネルギーの供給を支持するものかもしれない。

2.2 太陽風の性質

2.2.1 地球近傍での平均的な性質

平均的な太陽風のパラメータを表1に示す。地球近傍での太陽風中の音速は約60 km/sなので、数百km/sの速度を持つ太陽風は超音速の流れとなっている。太陽風によって運び出されるエネルギーは太陽から放出される全エネルギーの100万分の1程度にすぎないが、宇宙環境の変動を起こす主原因となっている。

組成は水素イオンがほとんどの部分を占め、5％程度のヘリウムイオン、少数の重イオンからなり、イオンとほぼ同数の電子が存在する。また、密度が小さいため、太陽風中の衝撃波は、ショックの厚さが衝突距離より薄い、無衝突衝撃波（collisionless shock）となっている。

表1 平均的な太陽風のパラメータ

パラメータ	平均的な値
速　度（km/s）	450
温　度（K）	1.2×10^5
密　度（cm^{-3}）	6.6
磁場強度（nT）	7.0

2.2.2 惑星間空間磁場とセクター構造

太陽風プラズマは電気伝導度が高いので、磁場はプラズマに凍結（frozen-in）されており、プラズマの運動に引きずられるように動く。太陽風のプラズマは太陽から放射上に運動しているが、太陽が自転しているため、太陽風の磁場はアルキメデススパイラル（Archimedes spiral）と呼ばれる曲線となる（図2）。スパイラル磁場と半径方向のなす角ϕは、

$$\tan\phi = \frac{B_\phi}{B_r} = -\frac{\omega r}{V} \quad \cdots\cdots(3)$$

で与えられる。ここで、B_rは磁場のr成分の大きさ、B_ϕは磁場のϕ成分の大きさ、ωは太陽自転の角速度、rは太陽からの距離、Vは太陽風の速度を表す。地球付近では、ϕは約45度となる。太陽から離れるに従って、ϕは大きくなり、木星付近では90度に近くなる。

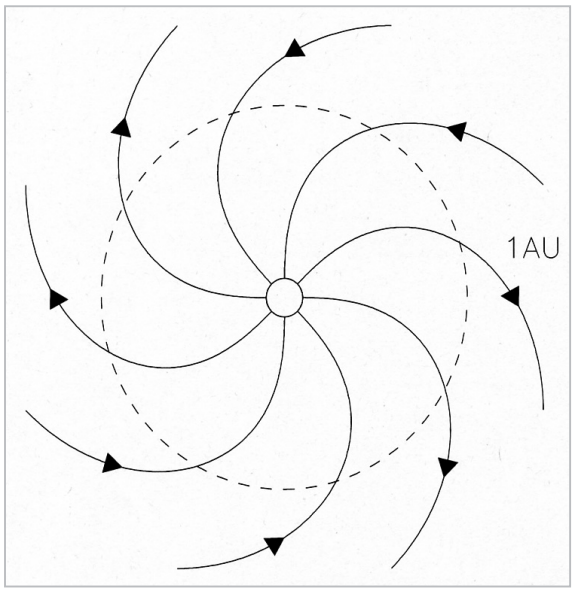


図2 惑星間空間磁場のスパイラル構造

太陽風中の磁場は惑星間空間磁場（IMF: interplanetary magnetic field）と呼ばれる。このIMFは、太陽から外向き（+: away）と内向き（−: towards）領域がほぼ太陽の自転周期27日で繰り返すようなセクター構造（sector structure）をしている。外向きと内向きの磁場が切り替わる領域をセクター境界（sector boundary）と呼ぶ。

2.2.3 高緯度の太陽風

欧州宇宙機関（ESA: European Space Agency）と米国航空宇宙局（NASA: National Aeronautics and Space Administration）が共同で打ち上げた探査機ユリシーズは、太陽活動の極小期（1994 − 1995）と極大期（2000 − 2001）に太陽系の高緯度領域の観測を行った。ユリシーズの観測によれば、極小期には速度が速く密度の低い高緯度の領域と、速度が遅く密度が高い低緯度の領域がはっきりと分かれている[18][19]。一方、極大期付近では、太陽風は全体的に速度が遅く密度の低い状態で低緯度の領域と高緯度の領域でそれほどはっきりと分かれていないことが分かった[20][21]。

2.2.4 地球磁気圏との相互作用の季節変化

地磁気擾乱は春と秋に多く発生する傾向がある。これは太陽風と地球磁気圏の相互作用の季節依存性によるもので、幾つかの原因が考えられている。春と秋に地球の自転軸が太陽と地球を結ぶ線とが直交するので、太陽風に対して地球磁気圏がケルビン・ヘルムホルツ（KH）不安定を起こしやすくなるという「地軸説」[22]、太陽の

自転軸と地球の公転面の関係から春と秋に地球が太陽のより緯度の高いところに位置するので、中緯度にあるコロナホールの影響を受けやすいためとする「日軸説」[23][24]、地球の自転軸が公転面に対して約23.5度傾いているので、春には(−)のセクターで、秋には(+)のセクターで、それぞれ太陽磁場の半径方向の成分から南向きのIMF成分が生み出されるとする「ラッセル・マクファーン効果(Russell − McPheron Effect)」[25]が考えられている。この季節依存性に関して、最近、Cliverらの論文[26]により「地軸説」が再評価されている。

2.2.5 太陽圏

太陽風の勢力圏は「太陽圏」と呼ばれており、太陽風の圧力と星間空間の圧力が釣り合う90AU付近に境界が存在すると考えられているが、太陽周期活動に伴う太陽風圧力の変化により太陽圏の大きさは変動する[27]。2002年現在、85AU付近を飛翔中のボイジャー1号や67AU付近を飛翔中のボイジャー2号などの探査機により、近い将来、太陽圏の境界が直接観測されると思われる。太陽圏は周囲の星間物質に対して20km/sの速度で動いているので、彗星のように尾を引いた構造をしていると考えられている。

3 太陽風の擾乱について

3.1 回帰性の擾乱

図3に地球近傍で観測された太陽風パラメータのプロットを示す。図に示した太陽風速度などに見られるように、太陽風の変動には太陽の自転周期27日で繰り返すものがある。これは、太陽のコロナホール(coronal hole)と呼ばれる領域から吹き出される高速の太陽風によるものである。コロナホールは開いた磁場構造をしており、図4に示したように軟X線では暗い領域として観測される。図3の矢印の高速太陽風はこのコロナホールに関連したものである。コロナホールからの高速太陽風が先行する遅い太陽風に追いつくとその境目を中心にプラズマの圧縮が起こる。遅い太陽風の領域では圧縮によるプラズマ密度の増大が見られ、後ろから追いついた速い太陽風中ではプラズマの運動エネルギーが熱エネルギーに変わり温度が上昇する。この流れの接触面をstream interface、圧縮された領域を太陽の自転とともに共回転する相互作用領域(CIR: Co-rotating Interaction Region)と呼ぶ(図5)。CIRの中ではIMFの強度が強められるとともにその方向が乱されているため、太陽の自転周期、約27日で繰り返す回帰性地磁気擾乱の原因となっている。

太陽から離れるに従ってCIRは発達し、衝撃波が形成されるようになる[28][29]。これを共回転衝撃波(corotating shock)と呼ぶ。この衝撃波は、前進衝撃波(forward shock)と後進衝撃波(reverse shock)の組合せで発達する。CIRに続く高速太陽風の領域では、アルフヴェン波的なIMFの大きな変動があり、高速流とこのIMFの大きな変動により、弱い地磁気擾乱が長く続くこともある[30][31]。

3.2 突発性の擾乱

突発的な太陽風擾乱の原因となるCMEは、1970年代から1980年代かけてOSO-7衛星、スカイラブ(Skylab)、P78-1/Solwind、SMM(Solar Maximum Mission)など一連の宇宙からのコロナグラフ(太陽本体と周辺の明るい部分の像を遮蔽してコロナを観測する装置)による観測でその存在や性質が明らかにされた[32][33]。

典型的なCMEは、明るいループ(フロント)、暗い部分(cavity)、プロミネンスの三つの部分からなる。図6にSOHO/LASCOで観測されたCMEの時間発展の様子を示す。発生頻度は太陽活動に応じて増減し、極大期では平均して1日に1〜2回程度である。また、発生領域は、極小期には太陽の低緯度に集中し、極大期には高緯度まで広がる傾向にある。平均的なCMEは、広がりが40〜50度、速度が400〜500km/s、質量が〜10^{12} kg、そのエネルギーが〜10^{30}エルグである[32][33]。

磁場の歪として蓄えられたエネルギーが開放されてCMEが起こると考えられているが、そのトリガーのメカニズムに関しては、まだ、はっきりと分かっていない。光球面の流れによる磁気ループの足元のシアーモーションやコンバージングモーション、光球から浮上してくる磁場とのリコネクションなどいろいろなアイデアが出され、シミュレーションなどによる理論的な

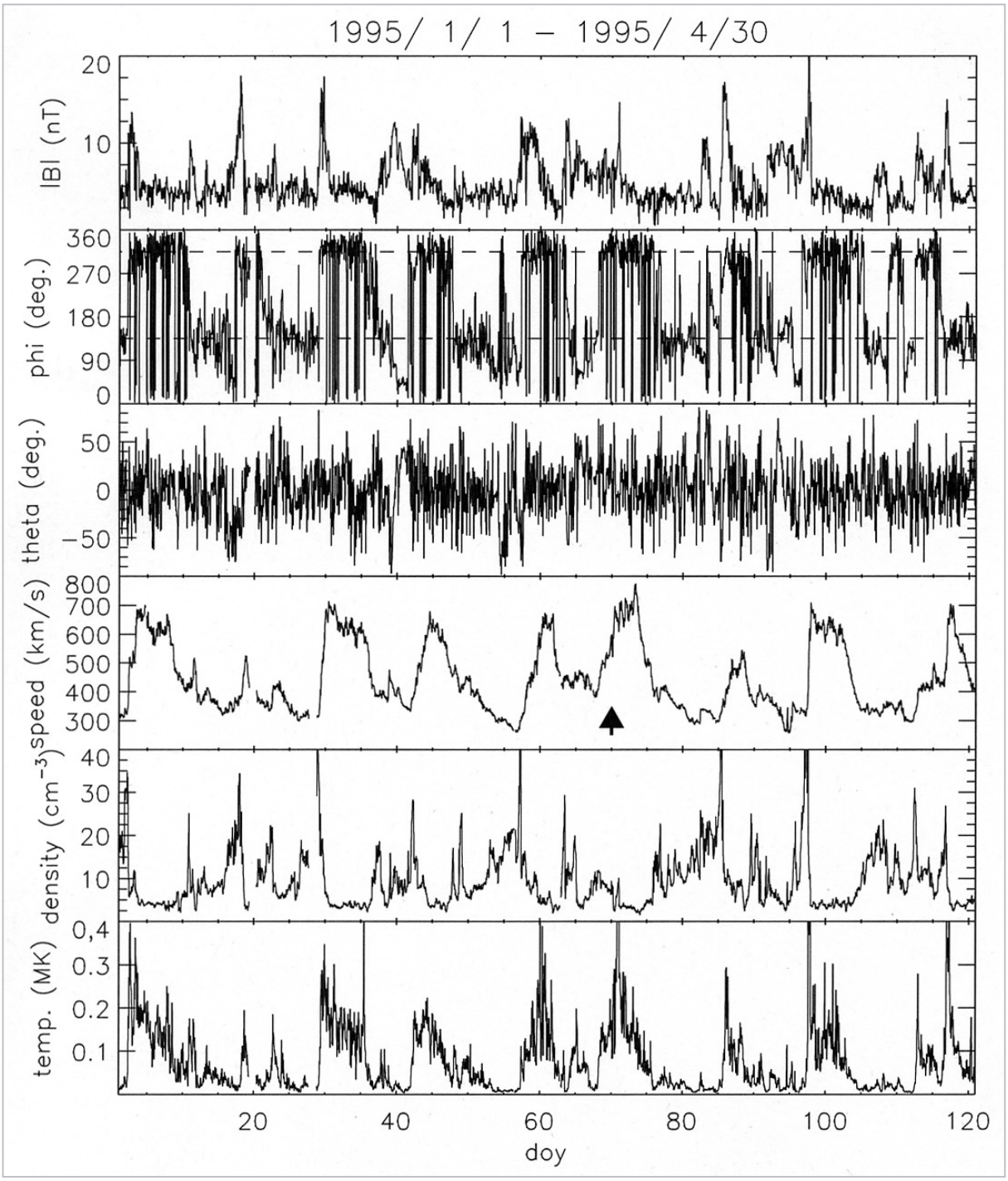


図3 約27日で回帰性を示す太陽風（NASAのOMNIデータより）

研究が進められているところである[34][35]。

これまでの研究により、CMEに伴ってフィラメント消失やLDE（Long Duration soft X-ray Event）と呼ばれる継続時間の長いX線強度の増加が観測されることが多いことが知られている[36]。日本の宇宙科学研究所が1990年夏に打ち上げた「ようこう」衛星は、搭載された軟X線望遠鏡（SXT）によって、CMEに対応してしばしば軟X線のアーケードが形成されることを示した[37][38]（図7）。この軟X線アーケードの形成がLDEの原因と考えられている。

ESAとNASAが1995年に打ち上げたSOHOは、高感度、広視野（太陽半径の約30倍）のコロナグラフ（LASCO）を搭載しており、多くのCMEが観測されている[39]。特にhalo CMEと呼ばれるリング状に見えるCMEが多く観測されて

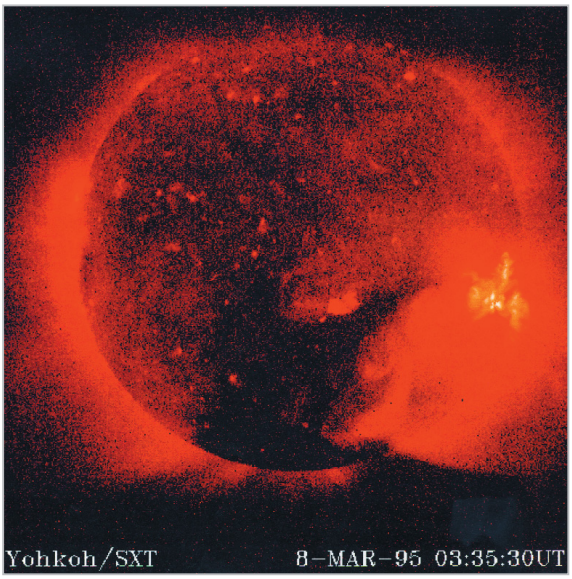


図4 「ようこう」衛星の軟X線望遠鏡で観測されたコロナホール
（ようこうSXTチーム提供）

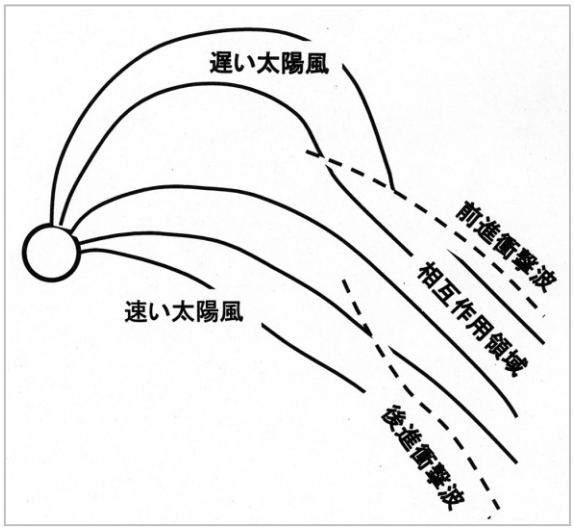


図5 高速太陽風によるCIRの形成

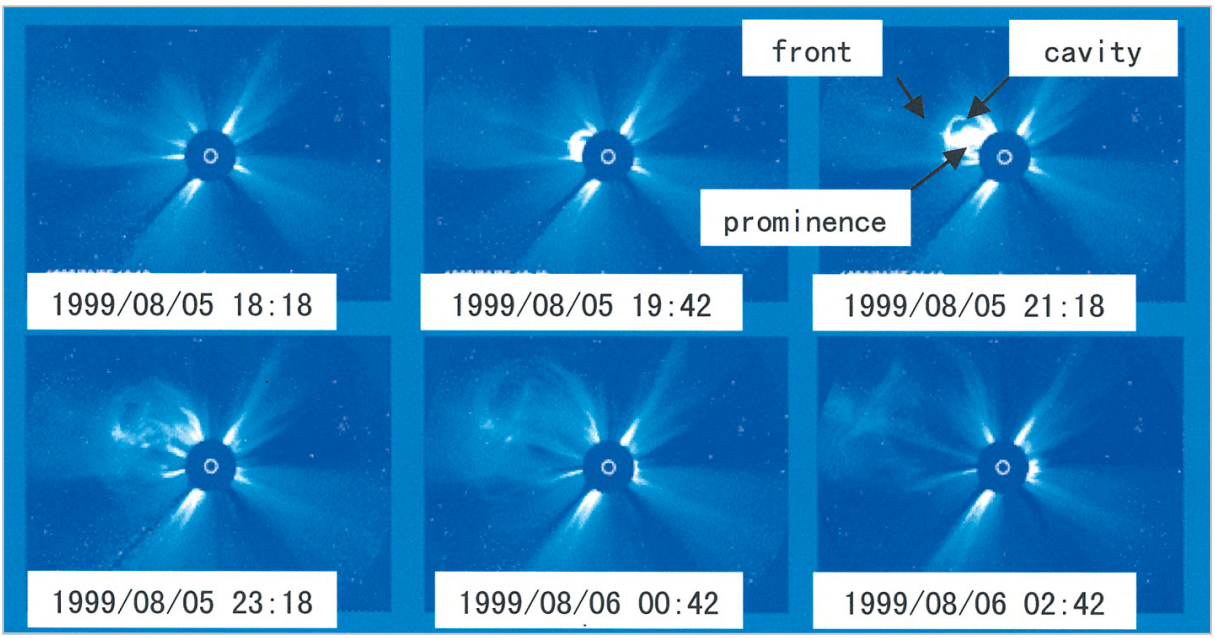


図6 SOHO/LASCOによって観測されたCME（ESA & NASA提供）

いる（図8）。これは、太陽から地球方向あるいは太陽の裏側で発生した現象に伴い地球と反対方向に向かう擾乱を観測したものである。CMEに伴う惑星間空間擾乱が地球に到来するとその衝撃波や強い南向き成分を持ったIMFにより地磁気擾乱が発生する[40]。

CMEの発生に伴って軟X線や極端紫外線の減光（dimming）がしばしば観測されている。これは、CMEによりコロナ中の物質が失われたためであろうと考えられている[41]～[45]。また、軟X線でS字型あるいは逆S字型の構造をした活動領域で、CMEが発生しやすいという報告[46][47]がある。この構造は、活動域での磁気シアーによるもので、北半球ではS字型、南半球では逆S字型の構造が多く観測される傾向にある。

SOHO衛星に搭載された極端紫外線望遠鏡（EIT）は、CMEに伴ってEIT波と呼ばれる同心円上に広がっていく波が観測されることがあることを示した[48][49]（図9）。EIT波に類似した太陽面現象としてフレアに伴ってHα線の観測によ

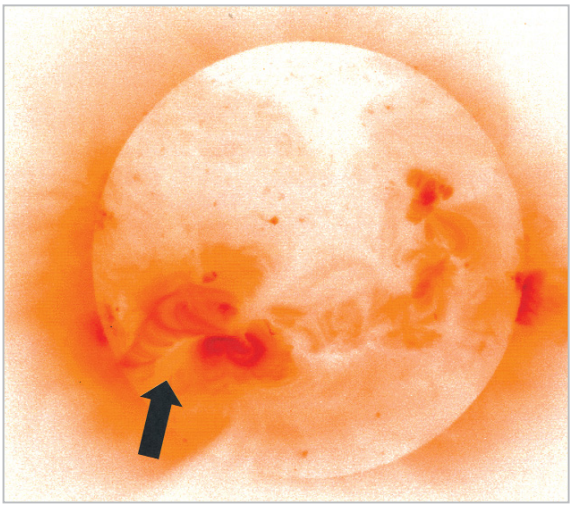


図7 「ようこう」によって観測された軟X線アーケード
（ようこうSXTチーム提供）

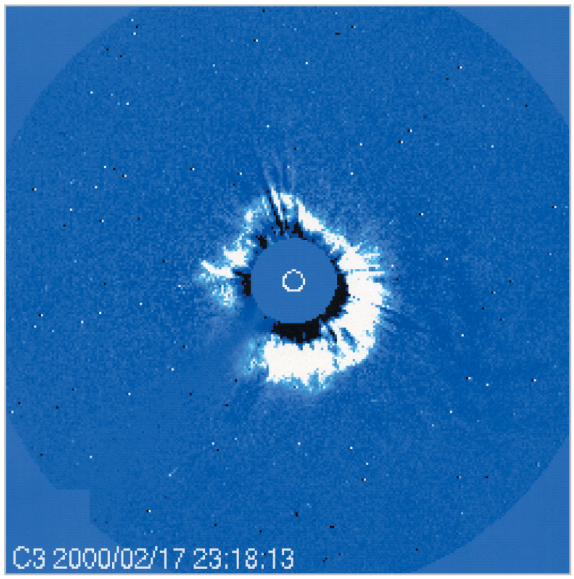
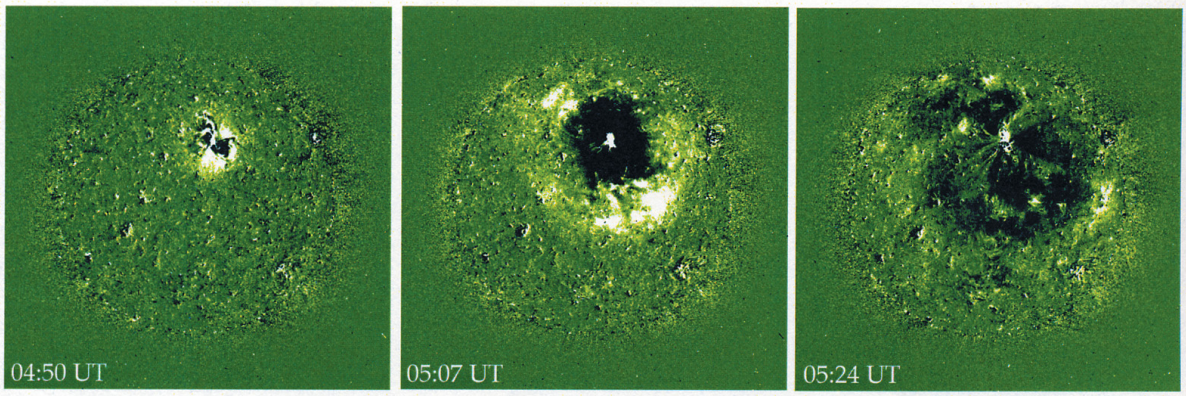


図8 SOHO/LASCOによって観測されたhalo CME（ESA & NASA提供）



SOHO-Extreme ultraviolet Imaging Telescope (EIT)
observations of Moreton wave expanding from coronal mass ejection (CME) initiation site
1997 May 12
First differences in Fe XII 195 Å (1.5 MK)

図9 SOHO/EITで観測されたEIT-wave（ESA & NASA提供）（注）図は差分をとった表示である。

り彩層で観測されるモートン波がある[50]。EIT波とモートン波の同時観測によれば、速度や場所にかなりの違いがあることなどから、両者は違うものである可能性が指摘されている[51]。

太陽フレアによるだけでなくCMEに伴う惑星間空間衝撃波により電子や粒子が加速され、地球近傍で高エネルギー粒子の増加が観測されることがある（プロトン現象、proton event）[52] [53]。時には、加速された電子がプラズマ波を励起し、衝撃波が電子密度の大きい太陽から離れるに従って、励起される電波が高い周波数から低い周波数へドリフトする惑星間空間II型電波バーストが観測される[54]。高エネルギー粒子の伝搬は惑星間空間磁場の影響を強く受けるため、その発生した位置と地球とのIMFの関係で、地球近傍で観測される高エネルギー粒子フラックスの時間変動やエネルギースペクトルの違いが出る。それらの観測結果から、図10のような惑星間空間擾乱の構造が考えられている[52][53]。すなわち、太陽の西側の経度でCMEが発生したときは、フラックスは急激に増加して時間とともに減少する、東側の経度でCMEが発生したときは、ゆっくり増加して衝撃波が地球に到達する近くで、最大のフラックスになる。

CMEによる擾乱に伴って、惑星間空間の太陽風中で、温度の低い領域、ヘリウムと水素の存

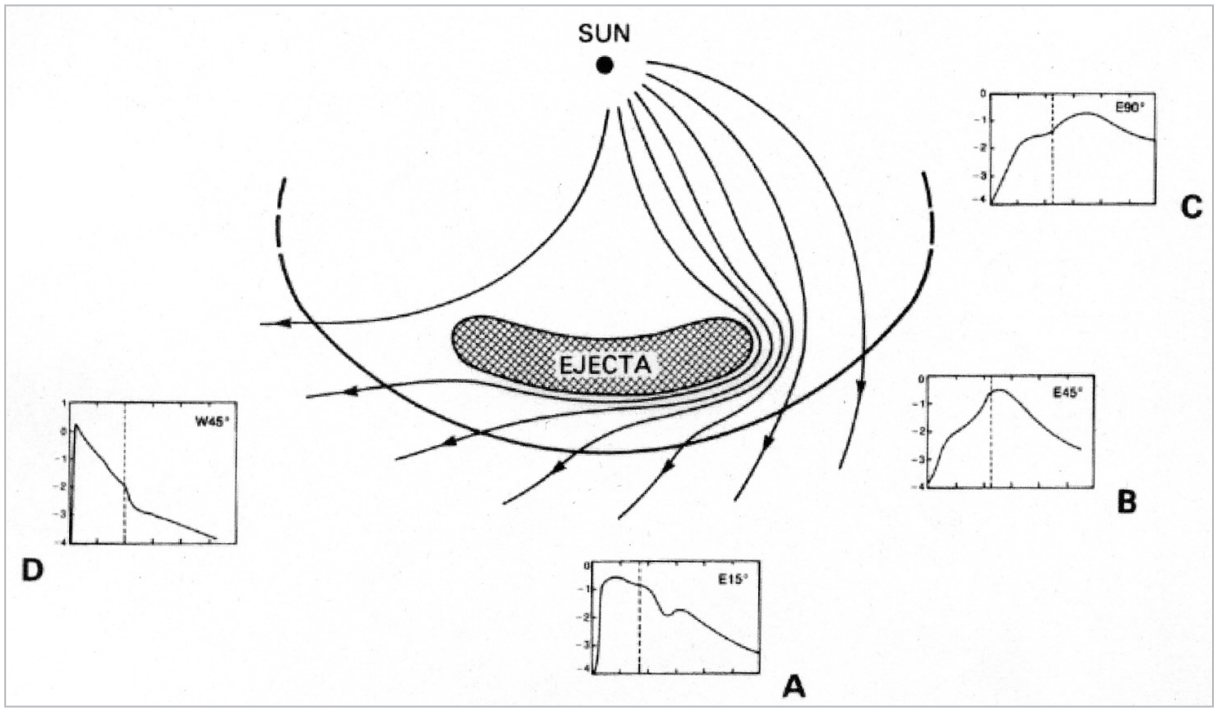


図10 高エネルギー粒子観測から推定される太陽風擾乱[52]

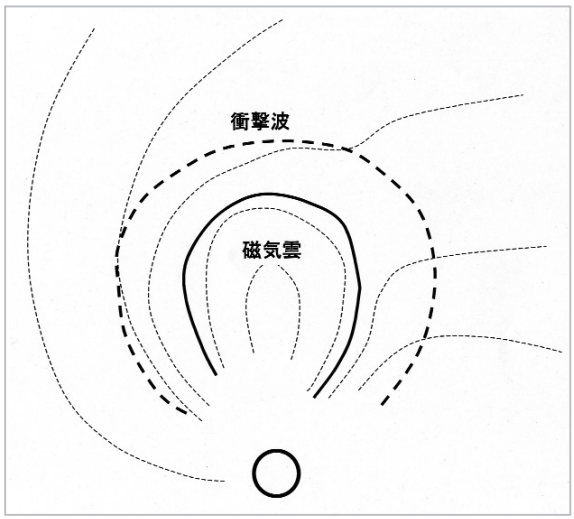


図11 観測から推定される太陽風擾乱の構造

在比が0.08より大きい領域、電子や粒子の双方向流（bi-directional flow）のある領域、磁場が強く磁場のベクトルがスムーズに回転する領域などが観測されることがある[55]。これらの観測結果をうまく説明するため、図11に示すような惑星間空間擾乱の構造が考えられている。

4 予報へのアプローチ

4.1 背景の太陽風速度とIMFの予測

観測を基に地球近傍の太陽風速度やIMFのセクターを予測しようという幾つかの試みがなされている。

4.1.1 Wang-Sheeleyモデル[56] [57]

太陽表面の磁場観測をもとに、地球における背景の太陽風速度やIMFの極性を予測する。まず、ポテンシャル場として、太陽表面の磁場観測データから2.5太陽半径離れたソースサーフェスと呼ばれる球面上での磁場を計算する。次に太陽表面とソースサーフェスにおける磁場のラジアル成分の比（expansion factor）とそれに対応する太陽風速度が反比例するという経験式を用いて太陽風速度予測を行うものである。米国海洋大気庁宇宙環境センター（NOAA/SEC）のArgeら[58]は、より多くのデータを用いてexpansion factorと太陽風速度の関係式を求め直し、毎日の太陽表面磁場観測データを用いてソースサーフェスの磁場を計算するなどして、太陽風速度の予測精度の向上を図っている。

4.1.2 コロナホールのサイズなどを用いた予報

Nolteら[59]は、スカイラブによる観測から、軟X線で観測されたコロナホールの面積とそこから吹き出される太陽風速度には比例関係があることを示した。そこで、亘ら[41]は、軟X線で観測されたコロナホールのサイズなどとそれに対応する太陽風速度の関係を統計的に求め、これを

地球近傍における太陽風速度の予測に使う手法の検討を行っている。軟X線観測データを用いる場合、太陽の活動が高いとコロナホールの観測が活動領域からの迷光の影響を受けることや観測機器の保護のためコロナホールの観測に必要な長時間露光データが得られないというような問題点がある。

4.1.3 IPS観測を用いた予報

名古屋大学とカリフォルニア大学サンディエゴ校（UCSD）は共同で、IPS観測データをトモグラフィー手法で解析し、太陽風の速度や密度の3次元構造を求めて地球近傍の太陽風や太陽風擾乱の予測する手法について試行している（http://stesun5.stelab.nagoya-u.ac.jp/forecast/）[60][61]。IPS観測を用いた手法は、電波星からの電波のシンチレーションを使うため惑星間空間中の多くの点での速度や密度のデータが得られるメリットがあり、太陽風擾乱の3次元的構造や回帰性の高速太陽風を捕らえることができる。

4.2 太陽風擾乱到来の予測

経験モデルや磁気流体（MHD）シミュレーションを用いた試みが行われている。アラスカ大学、EXploration Physics International Inc.（EXPI）、NOAA/SECのグループは、STOA（shock time of arrival）モデル、HAF（Hakamada-Akasofu-Fry）モデル、ISPM（interplanetary shock propagation model）モデルを用いて到来時刻予測を試行している[62][63]。

4.2.1 STOAモデル[64][65]

CMEに伴う衝撃波は太陽近傍のある距離まで一定速度を保ち、その後、距離の0.5乗に反比例してその速度が減速するというモデルである。これは、惑星間空間擾乱をスーパーノバや核爆発に伴う衝撃波の伝搬と類似した現象としてとらえたものである。モデルでは、II型太陽電波バーストから求められるコロナ擾乱の速度、背景の太陽風速度を入力することにより、地球への到来時刻を予測する。亘[66]は、Javaスクリプトを用いてホームページ上で擾乱の到来時刻の予測計算が行えるツールの開発を行った。

4.2.2 HAFモデル[67]

太陽近傍のソースからのプラズマの流れをもとにしたキネマティックなモデルにより、太陽風擾乱の伝搬を再現しようとしたものである。太陽半径の2.5倍のソースサーフェスにおいて、太陽圏中性面（heliospheric current sheet）から高緯度に向かって速度が増加するモデルやWang-Sheeleyモデルなどにより静穏太陽風の速度を決める。次に、経験的な速度と距離の関係式から静穏太陽風速度の空間分布を決める。擾乱に対応した円形の領域にガウス分布で速度分布を与える。速度には、急激に増加した後、徐々に減少するような時間変化を与え、擾乱の伝搬をモデル化する。擾乱の発生位置、空間的広がり、初期速度を入力することにより擾乱の伝搬を決定する。最近では、Fryら[63]により改良がなされ、実際の予報への試みが行われている。

4.2.3 ISPMモデル

DryerやSmithら[62][68]は、2.5次元あるいは3次元のMHDシミュレーションにより、1AUにおける衝撃波の到来時刻やその強さを予測するための研究を行っている。このモデルは、GOES衛星で観測されるフレアの大きさと継続時間、フレアの発生位置、II型太陽電波バーストから求められるコロナ擾乱の速度を入力として用い擾乱の伝搬について計算を行う。2.5次元や3次元でシミュレーションを行っているので、擾乱の中央部分が地球に到来した場合や周縁部分が地球へ到来した場合の到来時間や衝撃波の強さの違いなどを予測することができる。

4.2.4 高エネルギー粒子や宇宙線観測による予報

擾乱に伴う衝撃波によって加速された高エネルギー粒子は、擾乱本体より速く地球へ到来することから、擾乱が太陽から放出されたことを知り、地球への到来時刻を正確に予測しようという試みがなされている[69]。一方、太陽風擾乱による銀河宇宙線の強度変動は、フォーブッシュ減少（Forbush decrease）としてよく知られているが、最近、擾乱が地球に到来する前にその前面に形成された衝撃波により、銀河宇宙線の強度に独特な変動が生じることが発見された[70]。この前兆現象（Precursor）を世界的な宇宙線の観測網で観測して擾乱の到来の予測に使おうという研究が日本の宇宙線観測グループを中心としてなされつつある。

4.3 南向きのIMFの予測

亘ら[71]により、太陽観測に基づいた太陽風擾乱による1AUでの南向きIMFの予測の可能性が検討されている。地球磁気圏と相互作用を起こす南向きのIMFは、伝搬中に惑星間空間擾乱の前面でドレーピング(draping)により形成されるもの[72]と磁気ロープとして太陽から直接運び出されるものがある[73]。

図12に示したようにドレーピングによるものは、地球と太陽風擾乱の相対的な位置関係やIMFのセクター構造を考慮することで、ある程度予測することができる。また、磁気ロープによるものに関しては、太陽から地球までその構造が保持されて到来するとすれば、磁気ロープに対応する太陽面でのフィラメント消失や軟X線アーケードの観測を用いて推測することが可能である[73][74]。

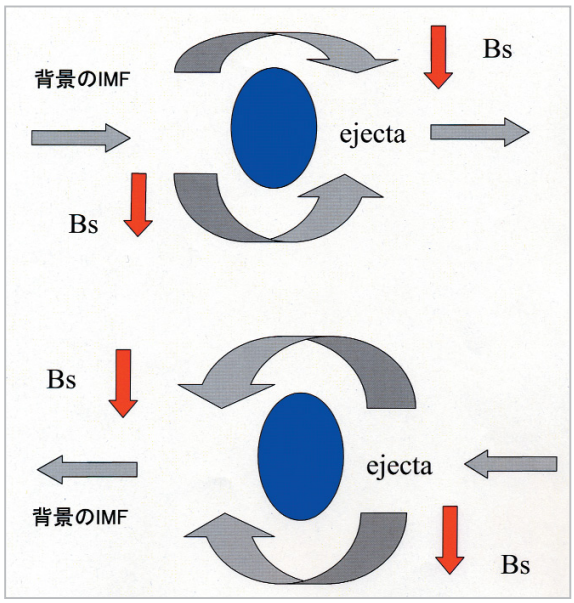


図12 ドレーピングによる南向きIMFの形成

ここでは二つのモデルを紹介する。南向きのIMFの予測としては、原因となる太陽の観測から予測を行う手法と、現在の太陽風の状態からその先の推移を予測する手法とがある。以下で紹介するWu-Dryerの予報モデル[75]は前者であり、Chenらの予報モデル[76][77]は後者である。

4.3.1 Wu-Dryerの予報モデル

WuとDryer[75]は、3次元のMHDシミュレーションを行い、擾乱の原因となった現象の太陽面での発生位置及び擾乱が伝搬するIMFセクターの構造から擾乱前面でのIMFの南北成分の変動を予測する手法を開発した。その手法をGoslingら[78]によって選ばれた大地磁気嵐の原因となった25のCMEイベントに適用した。その結果、25イベントのうち21イベントについて、擾乱の到来に伴って起こる1AUでのIMFの南北成分の変動を正しく予測することができたと報告されている[75]。

4.3.2 Chenの予報モデル

Chenら[76]は、太陽風の磁場のリアルタイム観測データから磁気ロープ構造を持つ太陽風擾乱について、数時間先の南向きIMFの最大値や継続時間を予測する手法を開発した。これは、磁気ロープ構造を持つ磁気雲中では、変動の少ない強いIMFが長時間続き、そのベクトルがきれいに回転するという特徴を利用したものである。IMFの東西成分Byと南北成分Bzが正弦波的に変動すると仮定して観測されたデータにフィッティングを行い、ベイズ判別法により過去のデータから得られた変動パターンと比較し、その大きさや継続時間を予測する。この手法を1978年8月から12月の5か月間の太陽風データに適応してテストを行った結果、この期間に発生した六つの地磁気嵐の原因となった太陽風擾乱のうち、五つを正しく識別することができたことが報告されている[77]。

5 むすび

これまでの研究の結果、太陽コロナ中の擾乱であるCMEが太陽風擾乱に深くかかわっていることが分かってきた。また、太陽風擾乱に伴う衝撃波により高エネルギー粒子の加速が起こることや地磁気嵐の原因となる南向きのIMFの形成とCMEの関連などが明らかになってきた。さらに、これまでの研究成果を用いて太陽風擾乱を予報する試みがなされつつあり、今後の研究によりその精度向上が期待される。

太陽風擾乱の三次元構造については、2005年の年末にNASAが打ち上げを予定しているSTEREO(Solar Terrestrial Relations Observatory)が、2機の衛星で太陽風擾乱のステレオ観測を行うことにより明らかにされると思われる[79]。また、依然として解明されていない太陽コ

ロナの加熱や太陽風の加速メカニズム、CMEのトリガーメカニズムについては、2004年に日本の宇宙科学研究所が打ち上げを予定しているSolar-B衛星による光球磁場・速度場の精密観測が何らかの糸口を与えてくれる可能性がある[80]。

参考文献

1 Z. Svestka and Y. Uchida (Eds.), "The YOHKOH (SOLAR-A) Mission", Kluer Academic Publishers, 1991.
2 B. Fleck, V. Domingo , and A. I. Poland (eds.), "The SOHO Mission", Kluwer Academic Publishers, 1995.
3 K. T. Strong, M. Bruner, T. Tarbell, A. Title, and C. J. Wolfson, "TRACE - the Transition Region and Coronal Explorer", Space Sci. Rev., Vol.70, 119-122, 1994.
4 B. R. Dennis, R. P. Lin, R. C. Canfield, C. J. Crannel, A.J.Gordon, H. H. Hudson, G. J. Hurford, J. C. Ling, N. W. Madden, W. Norman, and R. Ramaty, "High-Energy Solar Spectroscopic Imager (HESSI)", in Missions to the Sun, David, M. R. (ed.), Proc. SPICE, Vol.2804, pp.228-240, 1996.
5 C. T. Russell (ed.), "The Global Geospace Mission", Space Sci. Rev., Vol.71, 1995.
6 C. T. Russell, R. A. Mewaldt, and T. T. von Rosenvinge (eds.), "The Advanced Composition Explorer Mission", Kluwer Academic Publishers, 1999.
7 K. P. Wenzel, R. G. Marsden, D. E. Page, and E.J. Smith, "The ULYSEES Mission", Astron. and Astrophys. Suppl., Vol.92, 207-219, 1992.
8 E. N. Parker, "Dynamics of interplanetary gas and magnetic fields", Astrophys. J, Vol.128, 644, 1958.
9 R. R. Grall, W. A. Coles, M. T. Klinglesmith, 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.
10 G. Alazraki and P. Courtier, "Solar wind acceleration caused by the gradient of Alfven wave pressure", Astron. Astrophys., Vol.13, 380, 1971.
11 J. W. Belcher, "Alfvenic wave pressures and solar wind", Astrophys. J., Vol.168, 509, 1971.
12 E. N. Parker, "Nanoflares and the solar-x-ray corona, 1998", Astrophys. J, Vol.330, 474-479, 1988.
13 T. Shimizu, "Energetics and occurrence rate of active region transient brightenings and implications for the heating of the active-region corona", PASJ, Vol.47, 251-263, 1995.
14 S. Krucker and A. O. Benz, "Energy distribution of heating process in the quiet solar corona, 1998", Astrophys. J, Vol.501, L213-L216, 1998.
15 C. E. Parnell and P. E. Jupp, "Statistical analysis of the energy distribution of nanoflares in the quiet sun", Astrophys. J, Vol.529, 554-569, 2000.
16 M. J. Aschwanden, R. W. Nightingale, T. D. Tarbell, and C. J. Wolfson, "Time variability of the "quiet"sun observed with TRACE I. Instrumental effects, event detection, and discrimination of extreme-ultraviolet microflares", Astrophys. J, Vol. 535, 1027-1046, 2000.
17 K. P. Raju, T. Sakurai, K. Ichimoto, and J. Singh, "The physical conditions in a polar coronal hole and nearby regions form Norikura and SOHO observations", Astrophys. J., Vol. 543, 1044-1050, 2000.
18 D. J. McComas, S. J. Bam, B. L. Barraclough, W. C. Feldman, H. O. Funsten, J. T. Gosling, P. Riley, R. Skoug, A. Balogh, R. Forsyth, B. E. Goldstein, and M. Neugebauer, Geophys. Res. Lett., Vol.25, 1-4, 1998.
19 D. J. McComas, B. L. Barraclough, H. O. Funsten, J. T. Gosling, E. Santiago-Munoz, R. M. Skoug, B. E. Goldstein, M. Neougebauer, P. Riley, and A. Balogh, "Solar wind observations over Ulysses' first full polar orbit", J. Geophys. Res., Vol.105, 10419-10433, 2000.
20 E. J. Smith, A. Balogh, R. J. Forsyth, and D. J. McComas, "Ulysses in the south polar cap at solar maximum: Heliospheric magnetic field", Geophys. Res. Lett., Vol.28, 4159-4162, 2001.
21 D. J. McComas, R. Goldstein, J. T. Gosling, and R. M. Skoug, "Ulysses' second orbit: Remarkably different

solar wind", Space Sci. Rev., Vol.97, 99-101, 2001.

22 A. L. Cortie, "Sunspots and terrestrial magnetic phenomena", 1898-1911: The cause of the annual variation in magnetic disturbances, Mon. Not. R. Astron. Soc., Vol.73, 52, 1912.

23 J. Bartels, "Eine universelle Tagsperiode er erdmagnetischen Aktivitat", Meteorol. Z., Vol.42, 147, 1925.

24 J. Bartels, "Terrestrial-magnetic activity and its relation to solar phenomena", Terr. Magn. Atmos. Electr., Vol.37, 1, 1932.

25 C.T. Russell and R.L. McPherron, "Semiannual variation of geomagnetic activity", J. Geophys. Res., Vol.78, 92, 1973.

26 E. W. Cliver, Y. Kamide, and A. G. Ling, "Mountains versus valleys: Semiannual variation of geomagnetic activity", J. Geophys. Res., Vol.105, 2413-2424, 2000.

27 J. D. Richardson, "The heliosphere interstellar medium interaction: One shock or two?", Geophys. Res. Lett., Vol.24, 2889-2892, 1997.

28 前田　担,“太陽惑星環境の物理学”, p.119, 共立出版, 1982.

29 A. J. Hundhausen, "Coronal Expansion and Solar Wind Speed", Springer, 1972.

30 B. Tsurutani, C. M. Ho, J.K. Arballo, B. E. Goldstein, and A. Balogh, "Large amplitude IMF fluctuations in corotating interactions regions: Ulysees at midlatitudes", Gophys. Res. Lett., Vol.22, 3397-3400, 1995.

31 S. Watari, "The effect of the high speed stream following the corotating interaction region: Analysis of large south polar coronal holes observed between December 1993 and June 1994 and long-duration geomagnetic disturbances", Ann. Geophysicae, Vol.15, 662-670, 1997.

32 A. J. Hundhausen, "5. Coronal Mass Ejections, in The Many Faces of the Sun; A Summary of the Result from NASA's Solar Maximum Mission", Strong, K. T., Saba, J. L. R., Haisch, B. H., and Schmelz, J. T. (eds.), p.143-200, New York, NY: Springer-Verlag, 1997.

33 A. J. Hundhausen, "An introduction, in Coronal Mass Ejections", Crooker, N., Joselyn. J. A., and Feynman, J.(eds.), Geophys. Monograph., pp.1-7, Washington, DC, AGU, 1997.

34 T. G. Forbes, "A review on the genesis of coronal mass ejections", J. Geophys. Res., Vol.105, 23153-23165, 2000.

35 J. A. Klimchunk, "Theory of coronal mass ejections", in Space weather, Song, P., Singer, H. J., and Siscoe, G. L. (eds.), Geophys. Monograph., pp.329-337, Washington, DC, AGU, 2001.

36 S. W. Kahler, "Solar flares and coronal mass ejections", Ann. Rev. Astrophys., Vol.30, 113, 1992.

37 A. H. McAllister, M. Dryer, P. McIntosh, H. Singer, L. Weiss, "A large polar crown coronal mass ejection and a "problem" geomagnetic storm: April 14-23", J. Geophys. Res., Vol.101, 13497-13516, 1994.

38 S. Watari, T. Detman, and J. A. Joselyn, "A large arcade along the inversion line on May 19, 1992 by Yohkoh, and enhancement of interplanetary energetic particles", Solar Phys., Vol.169, 167-179, 1996.

39 O. C. St. Cyr, R. A. Howard, N. R. Sheeley Jr., 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.

40 G. E. Brueckner, J. P. Delaboudiniere, R. A. Howard, S. E. Paswaters, O. C. St Cyr, R. Schwenn, P. Lamy, G. M. Simnett, B. Thompson, and D. Wang, "Geomagnetic storms caused by coronal mass ejections (CMEs): March 1996 through June 1997", Geophys. Res. Lett., Vol.25, 3019-3022, 1998.

41 S. Watari, Y. Kozuka, M. Ohyama, and T. Watanabe, "Soft X-ray coronal holes observed by the Yohkoh SXT", J. Geomag. Geoelectr., Vol.47, 1063-1071, 1995.

42 A. C. Stering and H. S. Hudson,"YOHKOH SXT observations of x-ray "dimming"associated with a halo coronal mass ejection", Astrophys. J, Vol.491, L55, 1997.

43 B. J. Thompson, S. P. Plunkett, J. B. Burman, O. C. St. Cyr, and D. J. Nichels, "SOHO/EIT observations of an Earth-directed coronal mass ejection May 12, 1997", Geophys. Res. Lett., Vol.25, 2465-2468, 1998.

44 D. M. Zarro, A. C. Sterling, B. J. Thompson, H. S. Hudson, and N. Nitta, "SOHO EIT observations of extreme-ultraviolet "dimming"associated with a halo coronal mass ejection", Astrophys. J, Vol.520, L139-L142, 1999.

45 B. J. Thompson, E. W. Cliver, N. Nitta, C. Delannee, and J. P. Delaboudiniere, "Coronal dimmings and energetic CMEs in April-May 1998", Geophys. Res. Lett., Vol.27, 1865-1868, 2000.

46 R. C. Canfield, H. S. Hudson, and D. E. McKenzie, "Sigmoidal morphology and eruptive solar activity", Geophys. Res. Lett., Vol.26, 627-630, 1999.

47 A. C. Sterling, H. S. Hudson, B. J. Thompson, and D. M. Zarro, "Yohkoh SXT and SOHO EIT observations of sigmoid-to-arcade evoluyion of structures associated with halo coronal mass ejections", Astrophys. J, Vol.532, 628-647, 2000.

48 B. J. Thompson, J. B. Gurman, W. M. Newmark, J. S. Delaboudiniere, O. C. St Cyr, S. Stezelberger, K. P. Dere, R. A. Howard, and D. J. Michels, "SOHO/EIT observations of the 1997 April 7 coronal transient: Possible evidence of coronal Moreton waves", Astrophys. J, Vol.517, L151-L154, 1999.

49 B. J. Thompson, B. Reynolds, H. Aurass, N. Gopalswamy, J. B. Gurman, H. S. Hudson, S. F. Martin, and O. C. St. Cyr, "Observations of the 24 September 1997 coronal flare waves", Sol Phys., Vol.193, 161-180, 2000.

50 G. F. Moreton, "Fast-moving disturbances on the Sun, Sky and Telescope", Vol.21, 145, 1961.

51 S. Eto, H. Isobe, N. Narukage, A. Asai, T. Morimoto, B. Thompson, S. Yashiro, T. Wang, R. Kitai, H. Kurokawa, and K. Shibata, "Relation between a Moreton wave and an EIT wave observed on 1997 November 4", PASJ, Vol.54, 481-491, 2002.

52 H. V. Cane, D. V. Ream, and T. T. von Rosenvinge, "The role of interplanetary shocks in the longitude distribution of solar energetic particles", J. Geophys. Res., Vol.93, 9555-9567, 1988.

53 D. V. Reames, "Energetic particles and structure of coronal mass ejections", in Coronal mass ejection, Crooker, N., Joselyn, J. A., and Feynman, J. (eds.), Geophys. Monograph., pp.217-226, Washington, DC, AGU, 1997.

54 M. J. Reiner, M. L. Kaiser, J. Fainberg, J.-L. Bougere, and R. G. Stone, "On the origin of radio emissions associated with the January 6-11, 1997", CME, Geophys. Res. Lett., Vol.25, 2493-2496, 1998.

55 M. Neugebauer and R. Goldstein, "Particle and field signatures of coronal mass ejections in the solar wind", in Coronal mass ejection, Crooker, N., Joselyn, J. A., and Feynman, J. (eds.), Geophys. Monograph., pp.245-251, Washington, DC, AGU, 1997.

56 Y. M. Wang and N. R. Jr. Sheeley, "Why fast solar wind originates from slowly expanding coronal flux tubes", Astrophys. J, Vol.372, L45-L48, 1991.

57 K. Hakamada, M. Kojima, T. Ohmi, M. Tokumaru, K. Fujiki, and A. Yokobe, "Solar wind speed and expansion rate of the coronal magnetic field in solar maximum and minimum phase", Solar Phys., Vol.207, 173-185, 2001.

58 C. N. Arge and V. J. Pizzo, "Improvement in the prediction of solar wind conditions using near-real time solar magnetic field updates, 2000", J. Geophys. Res., Vol.105, 10465-10480, 2000.

59 J. T. Nolte, A. S. Krieger, A. F. Timothy, R. E. Gold, E. C. Roelof, G. Vaiana, A. J. Lazarus, J. D. Sullivan, and P. S. McIntosh, "Coronal hole as source of solar-wind", Solar Phys., Vol.46, 303-322, 1976.

60 K. Asai, M. Kojima, M. Tokumaru, A. Yokobe, B. V. Jackson, P. L. Hick, P. K. Manoharan, "Heliospheric topography using interplanetary scintillation observations 3. Correlation between speed and electron density fluctuations in the solar wind", J. Geophys. Res., Vol.103, 1991-2001, 1998.

61 M. Tokumaru, M. Kojima, K. Fujiki, and A. Yokobe, "Three-dimensional propagation of interplanetary disturbances detected with radio scintillation measurements at 327 MHz", J. Geophys. Res., Vol.105, 10435, 2000.

62 Z. Smith, M. Dryer, E. Ort, and W. Murtagh, "Performance of interplanetary shock prediction models: STOA and ISPM", J. Atomos. and Solar-Terrestrial Phys., Vol.62, 1265-1274, 2000.

63 C.D. Fry, W. Sun, C.S. Deehr, M. Dryer, Z. Smith, S.-I. Akasofu, M. Tokumaru, M. Kojima, "Improvements to the HAF solar wind model for space weather predictions", J. Geophys. Res., Vol.106, 20985-21002, 2001.

64 M. Dryer and D. F. Smart, "Dynamical models of coronal transients and interplanetary disturbances", Adv. Space Res., Vol.4, 291-301, 1984.

65 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.

66 亘,“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”、通信総合研究所季報 12月号掲載予定.

67 K. Hakamada, S. -I. Akasofu, "Simulation of three-dimensional solar wind disturbances and resulting geomagnetic storms, 1982", Space Sci. Rev., Vol.31, 3-70, 1982.

68 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.

69 Z. Smith and R. Zwickl, "Forecastiong geomagnetic storms using energetic particle enhancements", in SOLAR WIND NINE Proceedings of the Ninth International Solar Wind Conference, Habbal, S. R., Esser, R., Hollweg, J. V., and Isenberg, P. A. (eds.), p.577-580, American Insitute of Physics, 1999.

70 K. Munakata, J. W. Bieber, S. Yasue, C. Kato, S. Akahane, K. Fujimoto, Z. Fujii, J. E. Humble, and M. L. Duldig, "Precursors of geomagnetic storms observed by the muon detector network", J. Geophys. Res., Vol.105, 27457-27468, 2000.

71 S. Watari, M. Vandas, and T. Watanabe, "Formation of strong southward IMF near solar maximum of cycle 23", submitted to Ann. Geophysicae, 2002.

72 D. J. McComas, J. T. Gosling, S. J. Bame, E. J. Smith, and H. V. Cane, "A test of magnetic field draping induced Bz perturbations ahead of fast coronal mass ejecta", J. Geophys. Res., 94, 1465, 1989.

73 Marubashi, K., "Interplanetary magnetic flux ropes and solar filaments", in Coronal Mass Ejections, Geophys. Monogr. Ser., Vol.99, edited by N. Crooker, J. A. Joselyn, and J. Feynman, p.147, AGU, Washington, D. C., 1997.

74 S. Watari, T. Watanabe, K. Marubashi, "Soft X-ray solar activities associated with interplanetary magnetic flux ropes", Solar Phys., 202, 363-384, 2001.

75 C. -C. Wu and M. Dryer, "Predicting the IMF Bz polarity's change at 1 AU caused by coronal mass ejections", Geophys. Res. Lett., Vol.23, 1709-1712, 1996.

76 J. Chen, P. J. Cargill, and P. J. Palmadesso, "Real-time identification and prediction of geoeffective solar wind structures", Geophys. Res. Lett., Vol.22, 2319-2322, 1996.

77 J. Chen, P. J. Cargill, and P. J. Palmadesso, "Predicting solar wind structures and their geoeffectiveness", J. Geophys. Res., 102, 14701, 1997.

78 J. T. Gosling, S. J. Bame, D. J. McComas, and J. L. Philips, "Coronal mass ejections and large geomagnetic storms", Geophys. Res. Lett., 17, 901-904, 1990.

79 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.

80 T. Shimizu and the Solar-B Team, "Solar-B", Adv. Space Res., Vol.29, 2009-2015, 2002.

亘（わたり）　慎一（しんいち）
企画部企画室主任研究員　博士（理学）太陽地球結合系物理