

2-1-4 STEREO 探査機を用いた太陽風の先行監視

2-1-4 *Preceding Monitoring of Solar Wind Toward the Earth Using STEREO*

長妻 努 秋岡眞樹 三宅 互 大高一弘

NAGATSUMA Tsutomu, AKIOKA Maki, MIYAKE Wataru, and OHTAKA Kazuhiro

要旨

ジオスペースじょう乱予測のリードタイムを長くするには、地球に到来する太陽風の情報をどれだけ先行して取得できるかが鍵となる。これは、ジオスペース(地球周辺の宇宙空間)が開放系であるために、系の駆動源である太陽風の情報が連続的に得られなければ、将来の状態を予測出来ないためである。STEREO (Solar-Terrestrial Relations Observatory) は、2 機の探査機が地球とほぼ同じ軌道を地球から徐々に離れながら太陽と太陽風の立体観測を行うミッションである。STEREO は ACE (Advanced Composition Explorer) と同様に、太陽と太陽風データに関するリアルタイムビーコンを送信しており、NICT でもそのデータ受信の一翼を担っている。太陽風構造の時間変化が無視できる場合、STEREO のデータを用いて地球に到来する太陽風の情報を先行的に取得できることから、ACE と STEREO の太陽風、惑星間空間磁場データの比較を行った。その結果、太陽風速度については、離隔が増大しても良い相関が見られるのに対し、惑星間空間磁場の南北成分については、離隔が増大するにつれて急速に相関が低下することが示された。これにより、惑星間磁場の時間/空間スケールは数時間/数百万 km 程度であることが推定された。また、STEREO データをじょう乱予測に用いる場合、磁場の南北成分の不確定性をモデル化して予測に活用する必要があることが示された。

The solar wind is a major driving force of magnetospheric dynamics. Since the geospace is an open system, continuous solar wind information is needed for forecasting of geospace disturbances with enough lead time. If the co-rotation of the solar wind structure is assumed, we can predict the solar wind parameters at ACE and at STEREO-A from the solar wind data obtained from STEREO-B. We will introduce the stability of solar wind and interplanetary magnetic field structure based on the comparison between ACE and STEREO data.

[キーワード]

太陽, 太陽風, STEREO, リアルタイムビーコン, 先行監視

The Sun, Solar wind, STEREO, Real time beacon, Preceding monitoring

1 はじめに

宇宙天気予報は、(地球)天気予報の持つイメージからの類推によって、内容やしぐみを理解したと思われることが多いが、言葉のイメージとは裏腹に、両者の間には大きな隔たりがいくつか存在することに留意する必要がある。一番大きな違いは取り扱う系を閉鎖系で近似できるか否かという点である。天気予報の場合は、地球システムを閉鎖系で近似して、初期値から将来の状態を予測する

ことが原理的には可能である。これこそが、大気大循環モデルを用いて気候の将来予測を可能ならしめている。しかしながら、宇宙天気予報の場合には、地球周辺の宇宙環境(ジオスペース)に生じる様々な宇宙環境じょう乱の主な発生要因は、上流側の太陽活動や太陽風であり、これらの情報が無ければ、ジオスペースに関してのみ優れた数値予報モデルやスキームが構築されたとしても、将来の状態を予測することは不可能である[1]。そのため、定量的、そして中・長期の宇宙天気予報の

実現には、太陽及び太陽風変動の情報や太陽から地球までを統合的に扱う数値シミュレーション[2]、データ同化技術が必要不可欠となる。

1997年に太陽-地球系のL1点に投入されたNASAのACE (Advanced Composition Explorer) は、科学研究を主目的とした探査機であると共に、リアルタイムビーコンモードでoperationalに太陽風及び太陽放射線のデータを連続的に提供する機能が初めて搭載された惑星間空間の探査機でもある。太陽-地球系のL1点は地球から見て150万kmほど太陽側に位置しており、太陽や太陽風を観測するのに最適な場所の一つである。リアルタイムビーコンはビットレートが低いため、分解能の低いデータしか送ることは出来ないが、常時データを流し続けることが出来るため、太陽風の状態を常時監視することができる。そこで、本データを宇宙天気を活用するために、NOAA (米国海洋大気局) と USAF (米国空軍) を中心として、NICT や英国のRAL (ラザフォードアップルトン研究所) が協力し、太陽風データを24時間受信する体制が整えられ、現在も運用を続けている[3][4]。ACEによる太陽風モニターは大変有益であり、NICTにおいてもそのデータを日々の予報業務や宇宙環境情報サービス、及びリアルタイムMHDシミュレーションなどに活用してきた。

しかしながら、L1点は地球に対して約150万km (0.01天文単位) しか上流にないため、約1時間先の予報しか行うことができない。予報のリードタイムを更に長くするためには、より上流側の太陽風変動の情報、すなわち、太陽と地球の間の内部太陽圏と呼ばれる領域の太陽風変動の情報が必要となる。しかし、これまでの内部太陽圏の観測手段としては、惑星間空間シンチレーション (IPS) による太陽風のリモートセンシング観測、地上観測や人工衛星等による太陽及び太陽近傍のコロナのリモートセンシング観測のみで、内部太陽圏の観測的なカバレッジが不十分な状況にあった。

2006年10月25日に、太陽及び内部太陽圏を観測する科学研究ミッションとしてNASAのSTEREO探査機が打ち上げられた。STEREO探査機は、STEREO-AとSTEREO-Bの2機の探査機を用いて太陽及び内部太陽圏を立体的に観測すること、及びその場のプラズマ環境を計測することが主な目的である。この探査機のデータも宇宙

天気予報及びその研究にとって有効な情報となることから、NASAはSTEREO探査機にもリアルタイム宇宙天気ビーコンを導入し、STEREOで取得される太陽及び太陽風のデータを低い分解能ではあるがリアルタイムに送信している。

STEREOのリアルタイム宇宙天気ビーコンに関しても、外国の研究機関等と協力して、データの受信を行っている。現在のところ観測のカバレッジは100%では無いが、各局でのリアルタイムデータ受信は概ね順調に運用されている。NICTのデータ受信にはVLBI観測用のアンテナ設備を利用している[1]。得られたデータは日々の予報業務等に活用している他、新たな予報への応用に向けての検討・解析に利用している。本稿では、太陽風の先行監視の応用に向けて、STEREO探査機とACE探査機の太陽風変動の相関関係を調べ、太陽風変動の安定性について解析を行った結果について述べる。

2 STEREO-Bを用いた太陽風の先行監視

太陽は約27日で自転しており、これに伴って太陽風の色度や密度、磁場強度やセクター構造が回帰性の変化を示すことが知られている (図1)。そのため、「太陽風の空間構造が定常的である (時間変化しない)」と仮定できる場合には、太陽の自転に対して上流側に位置するSTEREO-Bで観測される太陽風パラメータは、タイムラグ t_{lag} 後に地球 (ACE) に到来することが推定される。タイムラグ t_{lag} の推定式は次の通りである。

$$t_{lag} = \theta / (\omega_{sun} - \Omega_{earth}) - (\omega_{sun} / (\omega_{sun} - \Omega_{earth})) \cdot ((l_1 - l_0) / V_{sw}) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ω_{sun} は太陽の自転角速度、 Ω_{earth} は地球の公転角速度、 l_1 は太陽からSTEREO-Bまでの距離、 l_0 は太陽から地球までの距離、 V_{sw} は太陽風速度である。STEREO-Bは、地球の軌道進行方向と反対側 (後方) に徐々に離れていくようにするために、地球よりも若干外側の軌道をとっている。STEREO-Aは逆に進行方向へと徐々に離れていくようにするために、地球よりも若干内側の軌道をとっている。太陽-地球間の距離と太陽-STEREO-B間の距離が同一であれば、離隔のみ

でタイムラグが決まるが、距離差があるために、距離差分のタイムラグの推定に太陽風速度の情報が必要となる。

図2には2007年から2008年のACEとSTEREO-A、STEREO-Bの日面緯度、動径方向の距離差、離隔、式(1)を用いて推定した太陽風のタイムラグを上から順に示している。日面緯度の変化をそれぞれ赤線(STEREO-A)、黒線(ACE)、青線(STEREO-B)で示している。太陽の自転軸と地球の公転軸の間には7.15度の傾きがあるため、ACEの観測する太陽風の根元となる日面緯度は±7.15度の振幅で変動する。STEREO-A、-Bについてもほぼ同様である。そのため、ACEと

STEREOで観測される太陽風や磁場変動に違いが生じていた場合、日面緯度差の影響である可能性にも留意する必要がある。動径方向の距離差、離隔、タイムラグではそれぞれSTEREO-AとACEの関係を赤線、STEREO-BとACEの関係を青線で示している。太陽からの距離はSTEREO-A、ACE、STEREO-Bの順で近いため、STEREO-AとACEの差、ACEとSTEREO-Bの動径方向の距離差はそれぞれマイナスとなっている。地球との離隔はSTEREO-A、STEREO-B共に1年間で約20度ずつ離れていく。離隔の増大に伴って、タイムラグも増加していることがわかる。なお、タイムラグの実線は太陽風速度が400 km/sの場合、点線は800 km/sの場合を示している。図からも明らかのように、太陽風速度が速いほど、タイムラグが長くなるという点に注意する必要がある。

図2によると2007年の終わり頃から2008年の中頃にかけて、STEREO-Bのタイムラグは2日弱に達しており、太陽風の空間構造が定常的であれば、STEREO-Bのデータを用いて約2日先の太陽風変動の予測(先行監視)が行える状態であることがわかる。

3 ACEとSTEREOの太陽風変動の比較

STEREO探査機データによる太陽風の先行監視の現実性を検討するために、ACEとSTEREOの太陽風変動の比較を行った。図3は2007年12月のACE、STEREOの太陽風変動(速度、密度、温度)の1時間平均値を、タイムラグを補正せずに直接表示したものである。用いたデータはいずれもLevel2データである。この1か月間に600-700 km/s程度の高速太陽風が2回観測されており、STEREO-B、ACE、STEREO-Aの順番で高速太陽風を観測していることがわかる。

図4に同じく2007年12月の太陽風変動を表示しているが、STEREO-B及びSTEREO-Aの太陽風変動の時間を、前述した式(1)から推定したタイムラグを用いて補正し、ACEの観測と比較したものである。タイムラグの補正により、3機で観測された太陽風変動が非常に良く一致していることがわかる。

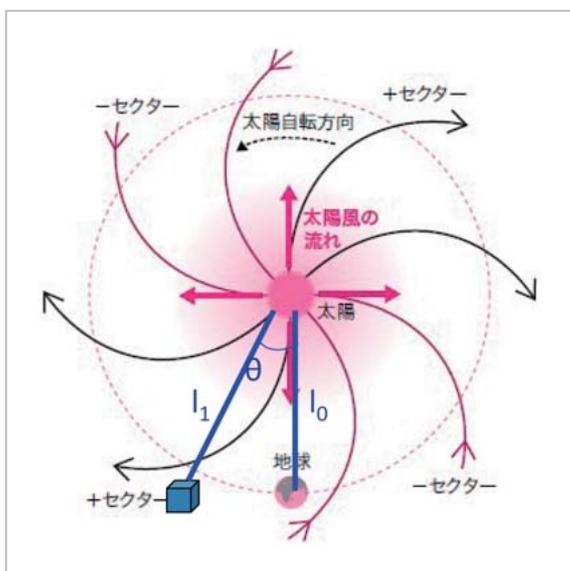


図1 太陽風のセクター構造
太陽の自転と同期して回転(共回転)している。

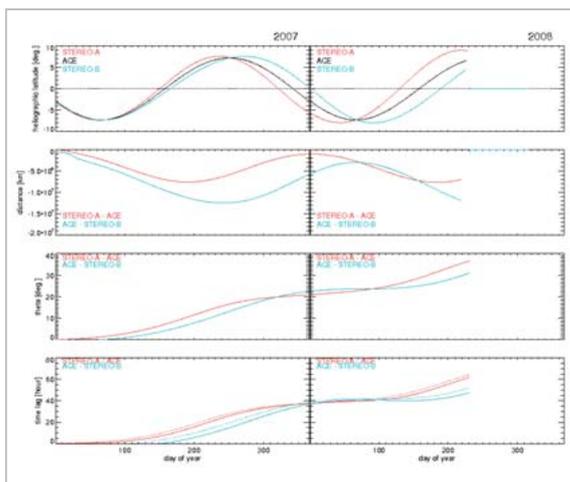


図2 ACEとSTEREOの日面緯度、動径方向の距離差、離隔、推定されるタイムラグの変化

同様にタイムラグの補正を行い、惑星間空間磁場の比較を行った結果を図5に示す。上段から、磁場強度(BT)、RTN座標系のR成分(太陽中心から探査機を結ぶ線の動径方向)、T成分、R-T平面の角度[セクター構造](R軸方向が0度、T軸方向が90度)を表している。ここで、RTN座標系はR成分が太陽中心から探査機を結ぶ線の動径方向、Nが太陽の北極方向、Tが右手系で太陽の西側のリム方向となる。太陽風速度変動と比べると、各探査機で観測される磁場変動の対応関係は相対的に低い傾向が見てとれる。これは、惑星間空間磁場に電磁流体波動的な変動が重畳していることによるものと考えられる。また、total day(通算日)の353日付近でSTEREO-Aの磁場強度が増大しているが、これはICME等の突発的な磁場変動の影響によるものと考えられる。一方で、ACE、STEREO間のセクター構造の対応関係は比較的良好いことがわかる。

図6にCarrington自転周期2055から2075までの2つの異なる太陽風変動をそれぞれ比較して得られた相関係数の変化を示す。図6の上段は太陽風速度の相関係数の変化、下段には南北成分(Bz成分)の相関係数の変化を示す。赤丸はSTEREO-AとACEの相関係数、青丸はACEとSTEREO-Bの相関係数、黒丸はACEと1Carrington自転周期前のACEの相関係数を表している。この結果から明らかなのは、太陽風に関しては、全般的に相関は高く、解析した期間においては、STEREOとACE間の相関は概ね0.6以上であり、1周期前のACEデータとの相関よりも良いことは明らかである。但し、黄色で囲んでいるように3箇所ほど相関係数が低下している期間が存在する。この期間においては、太陽風の構造の時間変化が発生しており、これに起因するものと思われる。一方、Bzに関しては、Carrington自転周期2055から3周期ほどで、0.5以下に低下している。Bz成分は太陽の自転面に対してほぼ垂直な方向であるため、太陽面の構造の状態を反映していると考えられる。Carrington周期の増加に伴って、STEREOの離隔は広がっていくことから、磁場の構造/時間変動の典型的なスケールは数百万km/数時間程度であることが明らかになった。

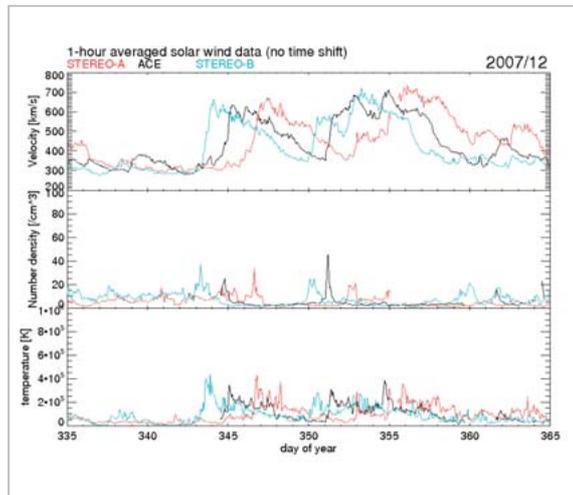


図3 2007年12月のACE、STEREOの太陽風変動(タイムラグ補正無し)

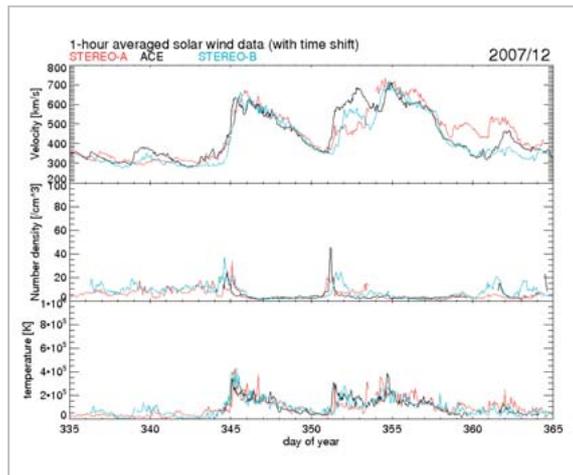


図4 2007年12月のACE、STEREOの太陽風変動(タイムラグ補正有り)

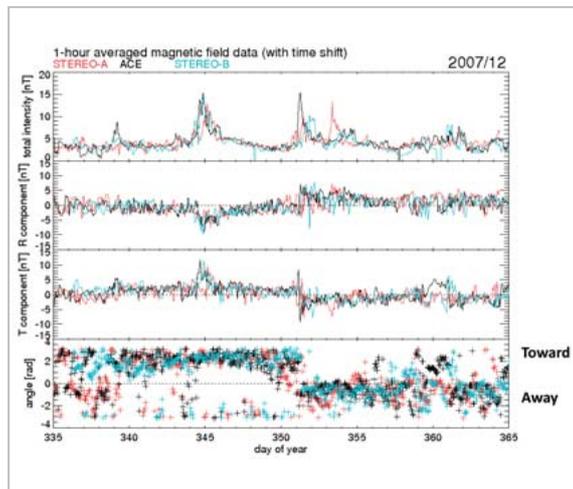


図5 2007年12月にACE、STEREOで観測された惑星間空間磁場の比較(タイムラグの補正有り)

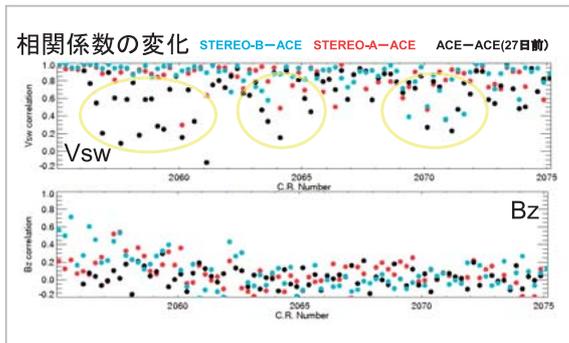


図6 Carrington周期2055から2075までの2つの異なる太陽風変動の相関係数の変化

上段：太陽風速度、下段：惑星間空間磁場の南北成分。

4 まとめ

ACEとSTEREO探査機の太陽風データを用いて、各探査機で観測されている太陽風変動の相関について調べた。その結果、全体的な傾向として、探査機の離隔が大きくなっても、太陽風速度に関しては相関の低下は、太陽風構造に時間変化が起こっている期間を除けばそれほど相関は低下せず、STEREO-Bを用いて概ね良く予測ができることが明らかになった。一方で地磁気じょう乱の観点からは重要なパラメータであるBz成分に関しては、離隔が大きくなるにつれて急激に相関が低くなり、Carrington自転周期3周期ほどで、0.5を下回る。このことから、磁場の構造／時間変動の典型的なスケールは数百万km／数時間程度であることが明らかになった。

以上のことから、速度やセクター構造に関して

は、そのままSTEREO-Bの情報を手掛かりにすることが可能であるが、Bzについては、そのままダイレクトに反映させることは難しい。そのため、Bz成分の不確定性をモデル化した上で、確率的な予報を考える必要がある。この他に、ICMEや太陽風構造の時間変動の影響の評価方法等の課題も残されているが、数日先の磁気圏の状態や地磁気じょう乱を予測することに、STEREO探査機の太陽風データは有効に活用できると考えられる。

今後は、リアルタイムビーコンデータのノイズ除去、物理量の補正手法や欠測時の取扱についての検討を行った後に、タイムラグの補正や座標変換等具体的なデータ処理を行い、作成した太陽風予測データを用いて磁気圏グローバルMHDシミュレーション[2]や地磁気活動度予測モデル[5]を駆動することで、数日先の磁気圏や地磁気活動の定量的な予測へと展開していく予定である。

謝辞

ACEのデータはCaltechのACE Science Center (<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/>)より提供を受けた。MAG及びSWEPAMの研究チームに感謝する。STEREOのデータはUCLAのIGPP Stereo Data Server (<http://atenigpp.ucla.edu/ssc/stereo/>)より提供を受けた。IMPACT(磁場データ)及びPLASTIC(太陽風データ)の研究チームに感謝する。

参考文献

- 1 秋岡真樹, 久保勇樹, 長妻努, 大高一弘, “太陽活動・太陽放射線の監視”, 情報通信研究機構季報, 本特集号, 2-1-1, 2009.
- 2 品川裕之, “統合型宇宙天気シミュレーションの意義と重要性”, 情報通信研究機構季報, 2-3-1, 本特集号, 2009.
- 3 丸山隆, 渡辺成昭, 大高一弘, 島津浩哲, “ACE衛星による太陽風モニター計画”, 通信総合研究所季報, Vol.43, pp.285-290, 1997.
- 4 佐川永一, 渡辺成昭, 大高一弘, 島津浩哲, R. D. Zwickl, “ACE/IMAGE衛星リアルタイムデータ受信”, Vol.48, No.4, pp.47-57, 2002.
- 5 長妻努, “ジオスペースじょう乱の監視・予測とその重要性”, 情報通信研究機構季報, 2-2-1, 本特集号, 2009.



長妻 努

電磁波計測研究センター宇宙環境計測
グループ研究マネージャー 博士(理
学) 太陽地球系物理学

秋岡真樹

新世代ワイヤレス研究センター推進室
主任研究員 博士(理学)
太陽物理、光学システム、宇宙天気



三宅 互

東海大学工学部航空宇宙学科教授
理学博士
宇宙環境科学



大高一弘

情報通信セキュリティ研究センターイ
ンシデント対策グループ研究マネー
ジャー
宇宙天気