

太陽風のグローバル分布に見られる南北非対称性 North-south asymmetry in global distribution of the solar wind

徳丸 宗利^{1*}, 藤木 謙一¹, 伊集 朝哉¹
Munetoshi Tokumaru^{1*}, Ken'ichi Fujiki¹, Tomoya Iju¹

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

1. はじめに

太陽風の南北非対称性は、in situ 観測から Heliospheric Current Sheet (HCS) の太陽赤道面からのずれとして研究されてきた。初期の in situ 観測では探査機が黄道面にあるため、緯度変化が1年で赤道を中心にして ± 7 度しか無く、HCSのずれを明瞭に捉えるのは難しかったが、極軌道探査機 Ulysses の観測では明瞭に HCS のずれが観測され、その原因として太陽磁場の南北非対称性が議論されている。また、Ulysses の観測からはサイクル 22/23 極小期における極域高速風の速度が僅かに異なることが報告された。一方、SOHO による Lyman- α 観測から南北非対称性が報告されているが、これは太陽風質量 flux の違いを反映したものである。このような南北非対称性が長期にわたりどのように変化しているかは、未だによくわかってない。但し、in situ や地磁気の長期データから ± 7 度の範囲での南北非対称性が議論されている。また、南北非対称の原因として太陽磁場の quadrupole 成分の寄与が指摘されている。本報告では、STE 研の IPS データを用いて太陽風のグローバル分布に見られる南北非対称性について調査した結果を紹介する。

2. IPS 観測にみられる南北非対称性

STE 研 IPS 観測データから 1985 年～2011 年について太陽風速度のグローバルな分布を決定した。得られた分布について、南北半球にわけて高速風・中速風・低速風の占める面積を計算し、それぞれの速度成分毎に南北の差を求めた。その結果、極大期(極性反転時)に大きな南北非対称性が現れていることがわかった。またサイクル 2 3 の極大期以降、高緯度の高速風において顕著な非対称性が長期間発生し、サイクル 2 3 では北半球が優勢だったのに対して、サイクル 2 4 に入ると南半球が優勢になっていた。

3. Ulysses 観測との比較

極域高速風の南北非対称性について、これまで IPS データと Ulysses 観測の比較が行われたのは、Ulysses の 1st Fast Pole-to-Pole Scan (1994～95 年、サイクル 2 2 / 2 3 極小期)であった。その時、Ulysses 探査機では北極の高速風が 19km/s 速かったが、IPS データでもこれと同程度の速度差があった。今回、2nd/3rd Fast Scan (2000～01 年、サイクル 2 3 極大期/2007～08 年、サイクル 2 3 / 2 4 極小期)について調べた。2nd scan の場合、IPS 観測と傾向は一致しているが、その絶対値は IPS より大きかった。これは、極大期のデータなので時間的な変化が Ulysses データに含まれていると考えられる。3rd scan の場合は、IPS 観測と誤差の範囲で一致していた。

4. 極磁場強度および多重極子成分との比較

まず Wilcox 観測所で測定している極磁場強度の南北差を IPS データと比較した。その結果、有意な相関は得られなかった。次に、同観測所データの解析から得られた磁場の多重極子成分と比較した。その結果、dipole 成分に対する quadrupole 成分の比の変化に、IPS データとよく似たパターンが存在することがわかった。即ち、サイクル 2 3 の後半にはこの比は正の値であるが、サイクル 2 4 には負の値へ変化している。しかし、年平均値をとって比較したところ両者に有意な相関は得られなかった。

5. B/f との比較

Kitt-Peak 観測所の磁場データをポテンシャルモデルで解析し、Source Surface から磁力線を追跡して磁力線拡率 f と根本での磁場強度 B を求める。次に、太陽風速度データと同様に B/f 値に応じてグループに分け、それぞれのグループについて南北半球の面積の差を求めた。その結果、 B/f 値に IPS データに似た南北非対称性が存在することがわかった。 B/f 値の大きい領域と高速風、 B/f 値の小さい領域と低速風の組み合わせで両者の相関をとったところ有意な相関が見られ、特にサイクル 2 3 以降の B/f 値の小さい領域と低速風の相関は高い値 (0.75) を示した。

6. まとめ

IPS 観測データから見られたサイクル 2 3 以降の大きな南北非対称性について解析を行ったところ、次の結果が得られた。(1) IPS データの南北非対称性は Ulysses 観測と矛盾しない、(2) 極磁場の非対称や多重極子成分の変化とよい相関はなかった。但し、Quadrupole/dipole 値に一部似たような変化が見られる。(3) B/f 値にも同様な南北非対称性があり、IPS データとよい相関があった。以上のことから、太陽風の非対称性は単に quadrupole 成分の寄与というより、様々な成分を含んだ Source surface の磁場特性を反映していると考えられる。

キーワード: 太陽風, 惑星間空間シンチレーション, 太陽活動周期, 太陽磁場, 太陽圏, 宇宙天気

Keywords: solar wind, interplanetary scintillation, solar cycle, Sun's magnetic field, heliosphere, space weather

光球磁場を用いた太陽風速度の推定

Estimation of solar wind speed by the photospheric magnetic field

袴田 和幸^{1*}, 徳丸 宗利², 藤木 謙一²

Kazuyuki Hakamada^{1*}, Munetoshi Tokumaru², Ken'ichi Fujiki²

¹ 中部大学, ² 名古屋大学太陽地球環境研究所

¹Chubu University, ²Solar-Terrestrial Environment Laboratory

本研究では、私自身が開発したコロナ磁場モデル (Radial-Field Model) と光球磁場観測値を用いてコロナ中の磁力線三次元構造を可視化し、コロナから惑星間空間へと開いた磁場と、名古屋大学太陽地球環境研究所の観測による太陽風速度とを比較した。今までに行った、カリントンローテーション毎の解析によれば、光球磁場 ($\text{Log}_{10}|\text{Br}_{\text{pho}}|$) と、コロナ磁場 ($\text{Log}_{10}|\text{Br}_{\text{sou}}|$) の値が、 $-1.0 \leq \text{Log}_{10}|\text{Br}_{\text{pho}}| \leq 1.5$, ($0.1 \text{ G} \leq |\text{Br}_{\text{pho}}| \leq 31.6 \text{ G}$), $-1.5 \leq \text{Log}_{10}|\text{Br}_{\text{sou}}| \leq 0.0$, ($0.0316 \text{ G} \leq |\text{Br}_{\text{sou}}| \leq 1.0 \text{ G}$), の範囲の磁力線に限ると、SWS, $\text{Log}_{10}|\text{Br}_{\text{sou}}|$, $\text{Log}_{10}|\text{Br}_{\text{pho}}|$ の間に強い相関のあることが分かっている。今回の解析では、SWS, $\text{Log}_{10}|\text{Br}_{\text{sou}}|$, $\text{Log}_{10}|\text{Br}_{\text{pho}}|$ とともに、カリントンローテーション平均値を用いた。以前の解析と同じように、SWS, $\text{Log}_{10}|\text{Br}_{\text{sou}}|$, $\text{Log}_{10}|\text{Br}_{\text{pho}}|$ の間に、 $\text{SWS} = a + b * \log_{10}|\text{Br}_{\text{sou}}| + c * \log_{10}|\text{Br}_{\text{pho}}|$ という関係があることを仮定し、重相関係数 (r) を求めたところ、 $r=0.855$ と非常に良い相関のあることが分かった。これらの結果から、 $\text{Log}_{10}|\text{Br}_{\text{sou}}|$ (コロナ磁場), $\text{Log}_{10}|\text{Br}_{\text{pho}}|$ (光球磁場) の値から SWS(太陽風速度) の値を導く経験式 ($\text{SWS} = 1027.7 + 181.6 * \log_{10}|\text{Br}_{\text{sou}}| - 346.6 * \log_{10}|\text{Br}_{\text{pho}}|$) を得ることができた。この経験式による太陽風速度の推定値と太陽風の観測値は、太陽風の観測値のある 1800 カリントンローテーション (CR 1800) から CR 2075 の間で、非常に良い一致を示している。このことから、太陽風の実測値のない期間にさかのぼってコロナ磁場から太陽風速度の推定が可能であることが分かった。その結果、太陽風速度のカリントンローテーション平均値は、1975 年から 2012 年の間で、太陽活動周期と同じように約 11 年を周期とし、400 km/s から 700km/s の幅で変動することが分かった。この惑星間シンチレーションの観測から推定した太陽風速度のカリントンローテーション平均値は、太陽圏の北極から南極までの全緯度範囲にわたる平均値であるので、地球近傍の人工衛星の観測による太陽風速度とは異なる長周期変動を示している。この結果は、宇宙天気予報や宇宙気候の研究にとっても非常に重要である。

キーワード: 太陽風, 光球磁場, 太陽周期変動, 推定

Keywords: solar wind, photospheric magnetic field, solar cycle variation, estimation

太陽活動の低下と電離圏 Low Solar Activity and the Ionosphere

柴崎 清登^{1*}

Kiyoto Shibasaki^{1*}

¹ 国立天文台野辺山太陽電波観測所

¹Nobeyama Solar Radio Observatory, National Astronomical Observatory of Japan

野辺山電波ヘリオグラフの20年間に亘る太陽全面画像観測により、太陽活動は極域と中低緯度の黒点・活動領域の両方とも低下していることが明らかになってきた。第23/24太陽活動極小期において黒点の出現しない期間が非常に長く継続したが、その間の極域の活動も低下していた。その後第24周期の活動は上昇してはいるが以前の周期に比較して活動度(黒点数、フレア規模・頻度等)が低く、約100年前の状況であることが示されている。2013年は第24周期の極大年であると予想されており、SCOSTEPは2013年をMiniMax24と銘打ってキャンペーン観測を組織している。このような低い太陽活動が地球大気にどのように影響を与えているかを知るため、長期に亘る太陽活動指数と地球上層大気活動指数の相関を調べた。

太陽活動指数としては、名古屋大学空電研究所と国立天文台野辺山太陽電波観測所が観測したマイクロ波帯電波強度の月平均値(1000, 2000, 3750, 9400 MHz)と、SIDCが提供する相対黒点数の月平均値を用いた。波長10cm(3000MHz)付近の電波フラックスは黒点数と非常に相関を示し、また天候や電離層の影響が少ないので欠測が少なく、準実時間の活動指数としてよく利用されている。さらにデータの較正方法が世界中の研究者によって確立されており、長期間安定したデータが提供されている。カナダの2800MHzでの電波強度(F10.7)は1947年から継続観測があり、世界中で利用されている。日本でも3750MHzで1951年11月から61年間の連続観測があり、その他にも1000、2000、9400MHzでの長期観測がある。しかし第23活動周期の最盛期の2000年頃から、黒点数に対して系統的に電波強度が増加(逆に電波強度に対して黒点数が減少)してきている。この状況は第24活動周期の現在も継続している。

地球上層大気活動指数としては、情報通信機構の提供する電離圏の特性周波数(国分寺における地方時12時のfoF2、理科年表より)の月別中央値を用いた。foF2は季節変動により年2回のピークを持つ。この影響を取り除いて長期変動を調べるために、黒点数を含む全データにおいて、13ヶ月(両端は0.5の重み)の移動平均値を用いた。foF2は電離圏における最大の電子密度を持つF2層のプラズマ周波数に対応し、これ以下の周波数の電波は反射され、これ以上の周波数の電波は通過する特性周波数である。電離圏の電子密度は、太陽からの紫外線による電離と、再結合過程とのバランスで決まるので、太陽活動によってそのプラズマ密度は変動する。最近の太陽活動低下がどのように電離圏の電子密度に影響を与えているかを調べた。解析期間は1969年から2011年までの43年間で、合計516ヶ月分のデータを用いた。

解析手法は、それぞれのデータの時系列の比較する、相関図プロットを作成する、さらに相関係数を求める、である。その結果、2000GHzの電波強度と電子密度(foF2の2乗に比例)の相関係数が最も高く、0.993であった。これに基づいて2000GHzの電波強度と電子密度の時系列を重ねたところ、第23/24の極小期および第24周期のF2層の電子密度は予想されるものよりも低いことが分かった。また、電波フラックスの方が黒点数よりも電子密度との相関がよい。

キーワード: 太陽活動, 長期変動, 黒点数, 電波強度, 電離層, foF2

Keywords: solar activity, long-term variation, sunspot number, total radio flux, ionosphere, foF2

樹木年輪中 ^{14}C 濃度高精度測定による 7-8 世紀のシュワーベサイクル周期長
Lengths of Schwabe cycles in the 7th and 8th centuries indicated by precise measurement
of carbon-14 content in tree rin

三宅 芙沙^{1*}, 増田 公明¹, 中村 俊夫²

Fusa Miyake^{1*}, Kimiaki Masuda¹, Toshio Nakamura²

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ² 名古屋大学年代測定総合研究センター

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ²Center for Chronological Research, Nagoya University

Radiocarbon (^{14}C) is produced in the upper atmosphere by galactic cosmic rays, which are modulated by solar magnetic activity. Its content in tree rings is retained and provides a record of past cosmic ray intensity and solar activity. We have measured the ^{14}C content in Japanese cedar tree rings from AD 600 to 760, a time interval including a small grand solar minimum in the 7-8th centuries, with a resolution of 2 year.

Periodicity analysis of the ^{14}C data exhibits a component in the frequency band of the Schwabe cycle with a period of 12-13 years continuing throughout the minimum. This is the fourth case of increase in the length of the Schwabe cycle observed in grand solar minima, after the Maunder Minimum, the Sporer Minimum, and the 4th century BC Minimum. A finding of the fourth of these cases strengthens the evidence that the length of the Schwabe cycle increases during grand solar minima.

Also a difference between the Maunder type and the Sporer type minima was found, i.e. the length of the Schwabe cycle of the Maunder type minima increase during the most period of the minima, while that of the Sporer type minima increase during only the preceding or the beginning of the minima. There is a correlation between the cycle length and the amplitude of the Maunder type minimum.

In addition to the increase in the cycle length, it was also found that short frequency components appear preceding and at the beginning of the minimum. These short frequency components are due to solar magnetic activity which is predicted by the flux-transport dynamo model (Choudhuri and Karak, 2009).

あかつき電波シンチレーション観測による太陽近傍の太陽風速度 Solar wind velocities near the sun observed by Akatsuki radio scintillation measurements

今村 剛^{1*}, 徳丸 宗利², 安藤 紘基³, 磯部 洋明⁴, 浅井 歩⁴, 塩田 大幸⁵, 宮本 麻由³, 矢治 健太郎⁶
Takeshi Imamura^{1*}, Munetoshi Tokumaru², Hiroki Ando³, Hiroaki Isobe⁴, Ayumi Asai⁴, Daikou Shiota⁵, mayu miyamoto³,
Kentaro Yaji⁶

¹ 宇宙航空研究開発機構, ² 名古屋大学, ³ 東京大学, ⁴ 京都大学, ⁵ 理化学研究所, ⁶ 立教大学

¹Japan Aerospace Exploration Agency, ²Nagoya University, ³The University of Tokyo, ⁴Kyoto University, ⁵Riken, ⁶Rikkyo University

Radio scintillation observations of the solar wind velocity at the heliocentric distances of 1.5-20.7 solar radii were conducted during the solar conjunction of the Japanese Venus explorer AKATSUKI during June 6-July 8 in 2011. One-way, X-band down-link signal stabilized by an onboard ultra-stable oscillator was transmitted from the spacecraft and received by an open-loop recording system at the Usuda Deep Space Center. Spectral analyses of the intensity fluctuation (scintillation) provides the velocity of the solar wind. Velocities were derived even in the 'strong scattering' regime near the sun for the first time by comparing the observed scintillation spectra with theoretical ones for strong scattering conditions. Simultaneous observations with a space solar telescope HINODE were also conducted over 4 days around the period of the minimum solar offset distance.

キーワード: 太陽風, 電波, シンチレーション, あかつき

Keywords: solar wind, radio wave, scintillation, Akatsuki

ICME フラックスロープの方向と発生領域の磁場構造

Orientations of flux ropes in ICMEs and magnetic field structures of their solar source regions

丸橋 克英^{1*}, チョー・キョンサク¹, 秋山幸子², 八代誠司², ゴパルスワミ・ナット²

Katsuhide Marubashi^{1*}, CHO, Kyongsuk¹, AKIYAMA, Sachiko², YASHIRO, Seiji², GOPALSWAMY, Nat²

¹ 韓国天文宇宙科学院, ² アメリカ航空宇宙局ゴダード宇宙飛行センター

¹Korea Astronomy and Space Science Institute, ²NASA, Goddard Space Flight Center

「地球に到達する CME (= ICME) はすべてフラックスロープ構造をもつか?」という設問に焦点をあてたワークショップが、2 度にわたって開かれた (CDAW 2010, 2011)。さらに、もしフラックスロープをもたない ICME があるならば、その発生源である CME の性質や伝播に特有の差異を明らかにする必要がある。この目的のため、ワークショップ企画者 (Gopalswamy et al..) は 54 例の ICME を選び、その発生源と思われる CME とともにリスト (CDAW リスト) にして、参加者に事前配布した。選ばれた ICME はフラックスロープ構造が明らかとされるもの (MC = Magnetic Cloud) 23 例とフラックスロープ構造が認められないとされるもの (EJ = non-MC Ejecta) 31 例である。

この研究では CDAW リストにある 54 例の ICME のそれぞれについて、ICME 領域およびその近辺の太陽風磁場にフラックスロープ構造がみとめられるかどうか、model に fitting による判定を試みた。model-fitting は円筒型とトーラス型の 2 つのフラックスロープモデルを用いて行なった。この結果 3 例を除く 51 例の ICME 領域にフラックスロープ構造があることが確認できた。次に、fitting で決定されたフラックスロープの軸の方向にもとづいて、対応する CME でコロナから飛び出したフラックスロープの軸方向を推定し、発生領域の磁場構造と比較した。ここで注意しなければならないことは、円筒型モデルとトーラス型モデルは一般に異なる ICME フラックスロープの軸方向を与えることである。これに依じて、ICME の磁場 fitting 解析からは、CME 発生時のフラックスロープの軸の方向について、円筒型/トーラス型に対応する 2 つの可能性な解が得られる。CME 発生領域の磁場構造と比較した結果、円筒型/トーラス型から推定した発生時フラックスロープの軸の方向のいずれかが、発生源領域の磁気中性線とほとんど平行になることが示された。

解析結果をまとめると、以下の結論が得られる。

(1) 地球に到達する ICME はすべてフラックスロープ構造をもっている。

(2) CME 発生時には、発生領域の磁気中性線と平行な構造をもつフラックスロープが飛び出し、地球到達までその方向を保存して ICME フラックスロープとして観測される。

最後に、これまでの研究結果との違いについて簡単に述べる。ICME 領域でフラックスロープ構造が見られることにあまり注意が向けられなかったことは、Burlaga による MC の定義にあまりにも強く引きずられたというのが大きな理由であろう。今回の解析でフラックスロープ構造を確認できなかった 3 例のイベントは、フラックスロープのサイズに関係して観測にかからなかったものとして理解できる。また、ICME フラックスロープの軸の方向が CME 発生時のフラックスロープの方向を保存しているという結果に対して、CME 発生時のフラックスロープは地球までの伝搬中に大きく (100 度程度) 回転するという考えが提案されている。これまでの ICME フラックスロープの軸の決定や、回転を示唆するシミュレーションに問題があったと思われる。

キーワード: 太陽風, コロナ物質放出, フラックスロープ, 円筒型モデル, トーラス型モデル, 磁気中性線

Keywords: solar wind, coronal mass ejection, flux rope, cylinder model, torus model, magnetic neutral line

一点観測を用いた太陽風磁気フラックスロープの時間発展の再現 Reconstruction of an evolving magnetic flux rope in the solar wind from single-spacecraft data

長谷川 洋^{1*}, Bengt Sonnerup², Qiang Hu³, 中村 琢磨⁴
Hiroshi Hasegawa^{1*}, Bengt Sonnerup², Qiang Hu³, Takuma Nakamura⁴

¹JAXA 宇宙科学研究所, ²ダートマス大学, ³アラバマ大学, ⁴ロスアラモス国立研究所

¹Institute of Space and Astronautical Science, JAXA, ²Dartmouth College, ³University of Alabama in Huntsville, ⁴Los Alamos National Laboratory

In situ measurements, often made by single spacecraft, have a difficulty in revealing spatiotemporal evolution of space plasma structures. We present a single-spacecraft method for decomposing spatial and temporal variations of physical quantities at points along the path of a spacecraft in spacetime, which can be used for reconstruction of slow evolution of two-dimensional (2D) and magneto-hydrostatic structures (namely, Grad-Shafranov equilibria) (Sonnerup and Hasegawa, 2010). The method is applicable to structures that are in Grad-Shafranov equilibrium and in which the flow is incompressible and the frozen-in condition is satisfied. Benchmark tests are conducted by use of synthetic data taken by a virtual spacecraft that traverses, at a constant velocity, a magnetic flux rope growing in a 2D magnetohydrodynamic simulation of magnetic reconnection. It is demonstrated that the new method can better recover the quantities in spacetime than does an earlier version, in which time aliasing effects had not been removed (Hasegawa et al., 2010). The application to a flux rope observed on 25-26 March 1998 by the ACE spacecraft in the solar wind suggests that its core part was evolving in an intriguing way during the ~17 hour interval of traversal.

Sonnerup, B. U. O., and H. Hasegawa (2010), On slowly evolving Grad-Shafranov equilibria, *J. Geophys. Res.*, 115, A11218, doi:10.1029/2010JA015678.

Hasegawa, H., B. U. O. Sonnerup, and T. Nakamura (2010), Recovery of time evolution of Grad-Shafranov equilibria from single-spacecraft data: Benchmarking and application to a flux transfer event, *J. Geophys. Res.*, 115, A11219, doi:10.1029/2010JA015679.

キーワード: 太陽風, 磁気フラックスロープ, グラッド・シャフラノフ方程式, 電磁静水圧平衡
Keywords: solar wind, magnetic flux rope, Grad-Shafranov equation, magnetohydrostatic equilibrium

太陽風中の障害物下流のウェイク中の”デバイ長”について Debye length in the wake of a non-magnetized object in the solar wind

中川 朋子^{1*}

Tomoko Nakagawa^{1*}

¹ 東北工業大学工学部情報通信工学科

¹Tohoku Institute of Technology

地球軌道付近の太陽風には、バルク速度がイオンの熱速度より速く、電子の熱速度より遅いという特徴がある。これが、太陽風中の障害物下流にできるウェイクに特徴的な電場構造を与えている。

太陽風のイオンや電子が、磁場や電離層を持っていない障害物にぶつくと、障害物の表面で吸収され、下流側にウェイクと呼ばれるプラズマのない領域ができる。このウェイクには周辺から太陽風プラズマが流入していく。

ウェイクへのプラズマ進入を考える際には、従来、真空へのプラズマ流入の理論や計算機実験が使われることが多かった。質量が小さい電子がウェイク中に入り、電子の圧力勾配と電場がつりあう形を作り、その電場とイオンの圧力勾配によってイオンが加速されながらウェイクに入っていくという描像である。

流れのない実験室的なプラズマの場合はこれでも良いかもしれないが、太陽風中のウェイクの場合は、障害物の帯電を考慮する必要がある。バルク速度がイオンの熱速度より速く、電子の熱速度より遅いため、電子だけがバルク速度に逆らって障害物の下流側に吸着することができ、障害物を負に帯電させる。

帯電による電場はデバイ長の範囲内に限定されるので、デバイ長に対して大きな天体の場合は帯電を無視できると考えがちであるが、ウェイク中は電子の密度が非常に下がっている上、密度自体に空間変化があり、上流の太陽風中のデバイ長に比べはるかに長い距離まで、帯電による電場の影響が及んでいる。本講演では、太陽風中のデバイ長に対し障害物の大きさを変えて2次元粒子コードで帯電を入れたシミュレーションを行った結果を報告する。

キーワード: デバイ長, ウェイク, 電子密度, 電子温度, 太陽風, 粒子シミュレーション

Keywords: 2-D PIC simulation, Debye length, wake, non-magnetized obstacle, electron density, electric potential

終端衝撃波における電子加速 Electron acceleration at the termination shock

松清 修一^{1*}, SCHOLER, Manfred²
Shuichi Matsukiyo^{1*}, Manfred Sholer²

¹ 九大総理工, ² マックスプランク研究所
¹ESST Kyushu Univ., ²Max-Planck-Institut

The ability of the termination shock as a particle accelerator is totally unknown. Voyager spacecraft data and recent kinetic numerical simulations revealed that the compression ratio of the termination shock is rather low due to the presence of pickup ions, i.e., the termination shock appears to be a weak shock. Nevertheless, two Voyager spacecraft observed not only high energy ions called termination shock particles, which are non-thermal but less energetic compared to the so-called anomalous cosmic rays, but also non-thermal electrons. In this study we focus especially on microstructure of the termination shock and the associated electron acceleration process by performing one-dimensional full particle-in-cell (PIC) simulations. The electron acceleration efficiently occurs through a shock drift acceleration mechanism when a shock angle becomes oblique. In the oblique termination shock a new type of self-reformation is seen even if a relative pickup ion density is not small (30%). Variations of the energy distribution functions of the accelerated electrons are discussed for a couple of parameter sets.

キーワード: 終端衝撃波, 電子加速, 粒子シミュレーション
Keywords: termination shock, electron acceleration, PIC simulation

径方向に開いた太陽風中の非線形アルヴェン乱流によるイオン加熱 Ion heating by the nonlinear evolution of low-frequency Alfvénic turbulence in the radially expanding solar wind

成行 泰裕^{1*}, 梅田隆行², 鈴木建³, 羽田亨⁴

Yasuhiro Nariyuki^{1*}, Takayuki Umeda², Takeru K. Suzuki³, Tohru Hada⁴

¹ 富山大・人間発達, ² 名大・太陽地球環境研究所, ³ 名大・理学研究科, ⁴ 九大・総理工

¹Univ. Toyama, ²STEL, Nagoya Univ., ³Department of Physics, Nagoya Univ., ⁴ESST, Kyushu Univ.

It is well known that the magnetohydrodynamic (MHD) turbulence with the high cross helicity (Alfvénic turbulence) is ubiquitously observed in the solar wind plasmas. The Alfvénic turbulence generated in the vicinity of the photosphere may play an important role in heating of coronal plasmas, and a number of authors have investigated the "wave modeling" of the solar wind plasmas. On the other hand, while the heating of ions is dominated by the collisionless damping of the low-frequency waves, few models including the low-frequency Alfvénic turbulence have gone beyond the MHD description. In this study, we present the nonlinear evolution of low-frequency Alfvénic turbulence in the radially expanding solar wind by using a kinetic-fluid model (Vlasov-MHD model). The heating of ions by low-frequency Alfvénic turbulence in the absence of the ion cyclotron resonance is demonstrated. In order to discuss the self-consistency of the ion kinetics, we carry out the test-particle simulation, in which the numerical data of the global MHD simulation is used. The other non-MHD effects are also discussed as the phenomenological parameters.

キーワード: 太陽風, アルヴェン乱流, イオン加熱

Keywords: solar wind, Alfvénic turbulence, ion heating

AMATERAS 高分解電波スペクトル観測で得られた太陽電波I型バーストの発生強度 頻度分布

Peak Flux Distributions of Solar Radio Type-I Bursts from Highly Resolved Spectral Observations by AMATERAS

岩井 一正^{1*}, 増田 智², 三好 由純², 土屋 史紀³, 森岡 昭³, 三澤 浩昭³

Kazumasa Iwai^{1*}, Satoshi Masuda², Yoshizumi Miyoshi², Fuminori Tsuchiya³, Akira Morioka³, Hiroaki Misawa³

¹ 国立天文台野辺山太陽電波観測所, ² 名古屋大学太陽地球環境研究所, ³ 東北大学・理・惑星プラズマ大気

¹Nobeyama Solar Radio Observatory, National Astronomical Observatory of Japan, ²STEL, Nagoya University, ³PPARC, Tohoku University

Type-I noise storms are one of the most frequently observed solar radio phenomena in the metric frequency range. They are thought to be plasma emission at the local plasma frequency. Type-I noise storms contain many complex fine structures in their spectra called type-I bursts. They are thought to be caused by some inhomogeneities of particle acceleration, wave generation, radio emission, and/or radio propagation processes. However, the detailed spectral characteristics of them have not been understood well because of the complex spectral structures, limited spectral resolutions of the previous observations, and numerous instances of radio frequency interference (RFI) in the observed radio spectra.

We developed a two-dimensional auto burst detection algorithm that can remove RFI and distinguish an individual type-I burst element from complex type-I noise storm spectra. This algorithm removes RFI from the observed radio spectra by applying a moving median filter along the frequency axis. Burst and continuum components are distinguished by a two-dimensional maximum and minimum search of the radio dynamic spectra. Then we derived the peak flux distributions of type-I bursts using AMATERAS (the Assembly of Metric-band Aperture Telescope and Real-time Analysis System; Iwai et al. 2012), a solar radio telescope that can distinguish the fine spectral structures of metric radio bursts with high time and frequency resolution. The analysis result shows that each type-I burst element has one peak flux without double counts or missed counts. The peak flux distribution of type-I bursts derived using this algorithm follows a power law with a spectral index between 4 and 5. This extremely soft spectrum is observed for the first time in solar phenomena.

キーワード: 太陽電波, コロナ, 地上観測, 粒子加速, AMATERAS

Keywords: Sun: radio radiation, Sun: corona, ground-based observation, particle acceleration, AMATERAS

「あかつき」の電波掩蔽観測による太陽コロナの電子密度変動のスペクトル解析 Spectral Analysis of the Electron Density Fluctuation in the Solar Corona obtained by Radio Occultation Experiments

宮本 麻由^{1*}, 今村 剛², 徳丸 宗利³, 安藤 紘基¹, 磯部 洋明⁴, 浅井 歩⁴, 塩田 大幸⁵, 矢治 健太郎⁶

mayu miyamoto^{1*}, Takeshi Imamura², Munetoshi Tokumaru³, Hiroki Ando¹, Hiroaki Isobe⁴, Ayumi Asai⁴, Daikou Shiota⁵, Kentaro Yaji⁶

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, ² 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部, ³ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ⁴ 京都大学宇宙総合学研究所, ⁵ 理化学研究所, ⁶ 立教大学理学部

¹Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, ²Japan Aerospace Exploration Agency, Institute of Space and Astronautical Science, ³Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University,

⁴Unit of Synergetic Studies for Space, Kyoto University, ⁵RIKEN, ⁶College of Science, Rikkyo University

コロナ加熱のメカニズムとして波動の寄与が考えられている。エネルギー輸送の点で Alfvén 波が注目されており、音波は光球や彩層などの太陽表面を出るとすぐに衝撃波を作り散逸してしまうためコロナに伝搬しにくいと考えられている。しかしコロナ中で音波は観測されており、これは Alfvén 波がその減衰過程で生成する音波ではないかと考えられている。したがって、コロナ中の音波の観測は Alfvén 波がエネルギーを散逸する過程を捉えている可能性がある。

現在太陽周回軌道を航行中の金星探査機「あかつき」は2011年に太陽コロナの電波掩蔽観測を行った。これは地上局から見て探査機が太陽の背後へ入出する際、探査機から送信された電波が太陽コロナを通過し地上局に届くことを利用した観測で、電波の受信周波数変動や強度の時間変化を得る。受信周波数変動からはコロナ中の電子密度変動の電波経路上の積分値が求まる。今回「あかつき」は太陽中心から1.5-20.5 Rs(太陽半径)という太陽近傍の観測を行った。本研究では、この受信周波数変動データのスペクトル解析を行い、コロナ中の音波の周期をはじめ、今まで算出されていなかった密度、エネルギーフラックスの太陽からの距離依存性とコロナ加熱への寄与を考察した。

フーリエ解析の結果から、太陽から遠いところ(3.5-20.5 Rs)では密度変動スペクトルが乱流のべき乗則に従う傾向が、太陽近傍(1.5-2.4 Rs)ではそれと異なる背景スペクトルから突き出るふくらみが見られるという全体的な特徴を捉えた。またウェーブレット解析の結果、3.5-10.5 Rs で周期100-3000 sの準周期的な密度変動が、1.5-2.4 Rs では周期100-3000 sと共に周期3000 sを超える準周期的な密度変動も見つかった。また、そのそれぞれの密度変動における周期とその継続時間が同等ということもわかった。密度変動の空間スケールが音波の波長程度と仮定し電波経路上の積分値から見積もった密度変動の振幅の背景密度に対する割合は太陽からの距離と共に大きくなる傾向を示し、0.2-40%であった。この傾向は Alfvén 波から二次的に生成される音波のエネルギーフラックスの1次元数値モデルによる推定と定性的に似ているが、振幅は小さい。観測された変動が音波によると仮定し見積もったエネルギーフラックスは最大でおよそ $10 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であった。この値もモデルの予想より小さかった。

キーワード: コロナ, 電波掩蔽, 音波, ウェーブレット, あかつき

Keywords: corona, radio occultation, sound wave, wavelet, Akatsuki

太陽風中で観測される上流伝搬ホイッスラーモード波動の類似性 Similarities of upstream whistler-mode waves observed in the solar wind

津川 靖基^{1*}, 加藤 雄人¹, 寺田 直樹¹, 小野 高幸¹, 綱川 秀夫², 高橋 太², 渋谷 秀敏³, 清水 久芳⁴, 松島 政貴²
Yasunori Tsugawa^{1*}, Yuto Katoh¹, Naoki Terada¹, Takayuki Ono¹, Hideo Tsunakawa², Futoshi Takahashi², Hidetoshi Shibuya³,
Hisayoshi Shimizu⁴, Masaki Matsushima²

¹ 東北大学理学研究科地球物理学専攻, ² 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻, ³ 熊本大学大学院自然科学研究科, ⁴ 東京大学地震研究所

¹Department of Geophysics, Tohoku University, ²Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology,

³Department of Earth and Environmental Sciences, Kumamoto University, ⁴Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Narrowband whistler-mode waves whose frequencies close to 1 Hz have been observed near the Moon by WIND [Farrell et al., 1996], Geotail [Nakagawa et al., 2003], Lunar Prospector [Halekas et al., 2006, 2008], and Kaguya spacecraft [Tsugawa et al., 2011]. These waves are propagated upstream against the solar wind and Doppler-shifted in the spacecraft frame to be left-hand polarized. Similar waves have been observed in the upstream regions of many solar system bodies over four decades and have been called '1 Hz waves' [e.g., Heppner et al., 1967; Russell et al., 1971; Fairfield, 1974; Orłowski et al., 1990, 1995; Brain et al., 2002]. However, some unclear issues in their propagation and generation processes have not been solved, such as required condition to observe the waves, spectral formation mechanism, and the frequency dependences of the processes.

In the present study, we compare the waves in different regions to answer the issues. We investigate common properties of the waves observed by Kaguya at 100 km altitude of the Moon and by Geotail in the upstream region within $20 R_E$ from the Earth's bow shock. Group velocity vectors of the waves in both regions are going to cancel the solar wind velocity vector. This condition is required to observe the waves and would make the narrowband spectra. We suggest that the wave frequency is determined so as to satisfy the condition. We reveal that the wave propagation angles in the upstream region of the Earth's bow shock are typically in the range of 20° - 40° degrees and are smaller than those near the Moon which are in the range of 20° - 70° degrees. This result suggests differences of the wave generation and damping processes.

AMATERAS によって観測された太陽電波 type-II バーストの微細構造 Fine spectral structures of a solar radio type-II burst observed with AMATERAS

佐藤 伸太郎^{1*}, 三澤 浩昭¹, 土屋 史紀¹, 岩井 一正², 増田 智³, 三好 由純³, 小原 隆博¹

Shintaro Sato^{1*}, Hiroaki Misawa¹, Fuminori Tsuchiya¹, Kazumasa Iwai², Satoshi Masuda³, Yoshizumi Miyoshi³, Takahiro Obara¹

¹ 東北大学大学院理学研究科惑星プラズマ・大気研究センター, ² 国立天文台野辺山太陽電波観測所, ³ 名古屋大学太陽地球環境研究所

¹ Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Graduate School of Science, Tohoku University, ² Nobeyama Solar Radio Observatory, National Astronomical Observatory of Japan, ³ Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

太陽電波 type-II バーストは、コロナ中の衝撃波で加速された電子によって引き起こされる。その発生周波数はおよそ電波源となる領域のプラズマ周波数かその整数倍となる。さらに type-II バーストには、メイン構造の中に「herringbone」と呼ばれる高速な周波数ドリフト構造を持つ微細なスペクトル構造が含まれる場合があり (Robert, 1959) それらの微細構造は加速された非熱的な電子ビームの挙動を反映していると解釈されている。しかし、そのような微細構造の特徴を示した解析結果の報告は少なく、起源となる電子の加速機構についても未だ結論は出ていない。本研究の目的は、高分解能スペクトル観測データの解析によって微細構造の持つ性質を抽出し、電子の加速機構に新たな制約を加えることである。

東北大学が所有するメートル波帯太陽電波望遠鏡「AMATERAS」は、時間分解能 10ms、周波数分解能 61kHz の性能を持ち、太陽電波バースト中の微細なスペクトル構造を鮮明に観測することが可能である (Iwai et al., 2012)。2010 年 11 月 12 日、AMATERAS によって特徴的な微細構造を持った type-II バーストが観測された。この観測された微細構造のスペクトルについて解析した結果、以下のことが明らかになった。

1. 惑星間空間方向へのドリフト構造は、太陽方向へのドリフト構造よりも多く存在した。
2. 多くの場合、太陽方向へのドリフト構造の開始周波数は、観測された type-II メイン構造の中心周波数近傍に存在した。
3. 電子ビームの平均速度とその偏差は、太陽表面からの動径距離が離れるにつれて、大きくなった。

キーワード: 太陽コロナ, 粒子加速, 地上観測

Keywords: solar corona, particle acceleration, ground-based observation

IPRT/AMATERAS により観測された太陽電波 Type IV バースト中における狭帯域 Fiber bursts (NFB)

Narrowband fiber bursts (NFBs) in type IV bursts observed with IPRT/AMATERAS

西村 由紀夫^{1*}, 小野 高幸², 加藤 雄人², 熊本 篤志², 三澤 浩昭³, 土屋 史紀³, 岩井 一正⁴

Yukio Nishimura^{1*}, Takayuki Ono², Yuto Katoh², Atsushi Kumamoto², Hiroaki Misawa³, Fuminori Tsuchiya³, Kazumasa Iwai⁴

¹ 株式会社シー・キューブド・アイ・システムズ, ² 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻, ³ 東北大学大学院理学研究科惑星プラズマ・大気研究センター, ⁴ 国立天文台野辺山太陽電波観測所

¹C3IS Systems Corporation, ²Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, ³Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Graduate School of Science, Tohoku University, ⁴Nobeyama Solar Radio Observatory, National Astronomical Observatory of Japan

Solar Type IV bursts are a type of intense radio phenomenon that accompanies solar flares. Following the discovery by Elgaroy (1959), many observations have suggested that Type IV bursts are accompanied by several kinds of spectral fine structure. One type of prominent fine structure is fiber bursts, which are generally assumed to be emitted through the wave-wave coupling between Langmuir waves and whistler-mode waves propagating in the corona. Recent observations in a frequency range of several GHz with high frequency and time resolution have revealed that narrowband fine structures similar to fiber bursts occur in Type IV bursts. In the meter-wavelength range, however, few spectral observations with high resolution have been carried out, unlike at decimeter wavelengths.

In the present study, we have investigated the fine structures in a wide frequency range from 100 to 500 MHz, obtained with a large-aperture radio telescope and a high-frequency and high-time resolution spectrograph, the Assembly of Metric-band Aperture Telescope and Real-time Analysis System (AMATERAS) installed on the Iitate Planetary Radio Telescope (IPRT) was developed by Iwai et al. (2012) and enables us to observe solar radio bursts in the frequency range from 150 to 500 MHz with a time resolution of 10 ms, a frequency resolution of 61 kHz, and a minimum detectable flux of 0.7 SFU. Moreover, both left- and right-handed polarized components can be observed simultaneously. The resolution of IPRT/AMATERAS for observations of metric solar radio bursts is the highest in the world as of January 2013.

We analyze Type IV bursts observed on 7 June, 2 and 4 August, and 6 September 2011 with IPRT/AMATERAS. They consist of the spectral fine structures drifting within narrow-frequency bands. In this study, these fine structures are termed as narrowband fiber bursts (NFBs). They are similar to the phenomena previously reported by Elgaroy and Sveen (1979) in the meter-wavelength range, and Chernov et al. (2008) in the decimeter range. The present analysis of the event on 7 June 2011 reveals the following results: (i) the individual NFB has a negative frequency drift with about -30 MHz s^{-1} , (ii) NFBs exhibit two types of large-scale frequency drift, characterized by negative and positive frequency drift rates, (iii) the negative frequency drift rate is almost the same as that of the individual NFB, while the positive one is about 90 MHz s^{-1} .

Based on the observed characteristics, we discuss the generation mechanism of NFBs as follows: (i) the observed negative frequency drift rate of NFBs can be explained by the propagation of whistler-mode waves in the corona, (ii) the observed frequency interval of NFBs is too small to account for it by the double plasma resonance (DPR) theory, which was applied to similar phenomena in the frequency range above 1 GHz (Chernov et al., 2008), and (iii) a new model is proposed in which a single NFB is emitted from a localized micro-scale emission region and widely distributed emission regions form a group of NFBs. We suggest in the proposed model that the regions are generated by upward whistler-mode waves and intermittent downward-propagating electron beams.

In this presentation, we report the analysis results of NFBs and discuss the generation mechanisms.

Keywords: Sun, radio, Type IV burst, AMATERAS