

## 太陽電波 Type-I バーストのスペクトル構造における統計的特徴 Spectrum characteristics of solar radio type-I burst by statistical analysis

岩井 一正<sup>1\*</sup>, 三澤 浩昭<sup>1</sup>, 土屋 史紀<sup>1</sup>, 森岡 昭<sup>1</sup>, 三好 由純<sup>2</sup>, 増田 智<sup>2</sup>

IWAI, Kazumasa<sup>1\*</sup>, MISAWA, Hiroaki<sup>1</sup>, TSUCHIYA, Fuminori<sup>1</sup>, MORIOKA, Akira<sup>1</sup>, MIYOSHI, Yoshizumi<sup>2</sup>, MASUDA, Satoshi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学・理・惑星プラズマ大気, <sup>2</sup> 名古屋大学太陽地球環境研究所

<sup>1</sup>PPARC, Tohoku University, <sup>2</sup>STEL, Nagoya University

コロナ中の粒子加速現象によって非熱的に加速された電子の一部はメートル波帯域で電波を発生させる。これが地上では太陽電波バーストとして観測される。Type-I ノイズストームはメートル波帯域で最も頻りに観測される太陽電波バーストの1つであり、その放射過程はプラズマ放射であると考えられている。Type-I のスペクトル中には継続時間1秒未満の複雑なスペクトル微細構造が多く存在する。これらは非熱的電子の生成過程、粒子が静電波を励起する過程、静電波が電磁波に変換される過程、電磁波がコロナ・惑星間空間を伝搬する過程等において、何らかの変調を受けているものと考えられる。従来の観測では分解能等の制約から、微細なスペクトル構造の最小構造まで分解することが難しく、その発生過程は未だよくわかっていない。本研究の目的は高分解スペクトル観測から Type-I のスペクトル微細構造を求め、その特徴から Type-I の生成過程に制約を与えることである。

福島県飯館村に東北大学が所有する大型メートル波電波望遠鏡 (IPRT) の広帯域偏波スペクトル計 AMATERAS は、時間分解能 10ms、周波数分解能 61kHz の世界最高レベルの高分解スペクトル計測システムであり、微細かつ微弱な電波スペクトル構造を検出可能である。本研究グループではこの装置を用いて 2010 年から太陽電波の観測を継続的に行っている。この観測結果から Type-I のスペクトル構造について、バーストエレメントの最小構造は典型的な継続時間が 100 ms から 1000 ms で、周波数幅が 1 から 5 MHz であることが分かった。個々のバーストは極大強度に対してほぼ対称に指数関数的な成長および減衰を示していた。更に電波強度の発生頻度解析を行った結果、バースト成分の電波強度は冪状分布し、その冪指数は 2 - 3 と、通常の Type-III 電波バーストやフレア現象で示される冪指数より大きく、電波強度スペクトルがよりソフトであることが分かった。logistic avalanche model と呼ばれる数学的モデル (Aschwanden et al 1998) を用いて結果を解釈すると、Type-I は、個々のバーストの生成領域がごく小さい領域に局在化しているか、または個々のバーストを生成する不安定性の成長が遅いことが示唆される。

キーワード: 太陽, コロナ, 電波バースト, 地上観測, 粒子加速

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

## 「あかつき」の太陽コロナ電波掩蔽観測による電子密度変動スペクトルの解析 Power spectra of the electron density fluctuation in the solar corona obtained by radio occultation observations

宮本 麻由<sup>1\*</sup>, 今村 剛<sup>2</sup>, 安藤 紘基<sup>1</sup>, 磯部 洋明<sup>3</sup>, 浅井 歩<sup>3</sup>, 塩田 大幸<sup>4</sup>, 矢治 健太郎<sup>5</sup>

MIYAMOTO, mayu<sup>1\*</sup>, IMAMURA, Takeshi<sup>2</sup>, ANDO, Hiroki<sup>1</sup>, ISOBE, Hiroaki<sup>3</sup>, ASAI, Ayumi<sup>3</sup>, SHIOTA, Daikou<sup>4</sup>, YAJI, Kentaro<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院 理学系研究科 地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部, <sup>3</sup> 京都大学宇宙総合学研究ユニット, <sup>4</sup> 理化学研究所, <sup>5</sup> 立教大学理学部

<sup>1</sup>Department of Earth Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, <sup>2</sup>Japan Aerospace Exploration Agency, Institute of Space and Astronautical Science, <sup>3</sup>Unit of Synergetic Studies for Space, Kyoto University, <sup>4</sup>RIKEN,

<sup>5</sup>College of Science, Rikkyo University

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6月6日~7月8日にかけて、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(位相)や強度の時間変化を解析することで太陽風中の電子密度擾乱や太陽風速度の情報を得ることができる。特に今回の観測では太陽中心から1.5~20.5Rs(太陽半径)という、これまであまり観測されていない太陽近傍までカバーすることができた。また太陽との距離が特に近い6月24-27日には太陽観測衛星「ひので」との同時観測も行った。電波経路は太陽の北極域を通過したが、この期間中には目立った極域コロナホールはなく、ジェットや噴出現象など目立つ現象も見られなかった。

5.6Rsより外側の周波数データからは、標準的な太陽風速度を仮定するとおよそ波長 $10^3 \sim 10^6$  kmの電子密度擾乱スペクトルが得られ、乱流のKolmogorov則に近い傾きが見られた。2.3Rsより内側では波長 $10^3 \sim 10^5$  kmのスペクトルが得られ、ここでは波長およそ $10^4$  kmを境に短波長側では急峻、長波長側では平坦化という、遠方とは異なる特徴が見られた。

キーワード: 電波掩蔽観測, 太陽コロナ

Keywords: radio occultation observations, solar corona

## 内部太陽圏の太陽風データ同化による流源関数評価と太陽風変動

### Data assimilation of the solar wind in the inner heliosphere to estimate the source function and solar wind variation

埜 千尋<sup>1\*</sup>, 篠原 育<sup>1</sup>, 塩田 大幸<sup>2</sup>, 片岡 龍峰<sup>3</sup>, 三好 由純<sup>4</sup>, 徳丸 宗利<sup>4</sup>

TAO, Chihiro<sup>1\*</sup>, Iku Shinohara<sup>1</sup>, SHIOTA, Daikou<sup>2</sup>, KATAOKA, Ryuhō<sup>3</sup>, MIYOSHI, Yoshizumi<sup>4</sup>, TOKUMARU, Munetoshi<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ISAS/JAXA, <sup>2</sup>理化学研究所, <sup>3</sup>東京工業大学, <sup>4</sup>名古屋大学太陽地球環境研究所

<sup>1</sup>ISAS/JAXA, <sup>2</sup>RIKEN, <sup>3</sup>Tokyo Institute of Technology, <sup>4</sup>STEL, Nagoya University

We develop a technique for predicting variations of the solar wind and source functions by incorporating wind velocity data from interplanetary scintillation (IPS) into a three dimensional magneto-hydrodynamic (MHD) solar wind model in the context of data assimilation using the Ensemble Kalman filter. In the data assimilation process, we constrain the solar wind source function which relates the observable magnetic field on the solar surface and terminal solar wind velocity. Previous studies estimated the function statistically, while we estimate the best fit model coefficients in this study.

We perform the "twin experiments" to evaluate the data assimilation method and containment of the source function and obtain results as follows : i) Variations of the solar wind and source function coefficients are well reproduced by the data assimilation. ii) Case for Ensemble number of being larger than 15 shows good estimation for 40 data per day case. iii) IPS data positions do not affect the prediction effectively because the source function affects large structure. The number of the state of a system is 21 (radial) x 360 (longitude and latitude) x 8 (MHD parameter) + 2 (source function coefficients) = 60,482, while SOHO/MDI magnetic field data is referred at the inner boundary and IPS observation ~40 per day is assimilated. We discuss the applicability of this method to the observed solar wind.

キーワード: 太陽風, データ同化, シミュレーション, MHD

Keywords: solar wind, data assimilation, simulation, MHD

## サイクル23全周期及び23/24極小期における太陽風加速モデルの検証 Relationship between solar wind speed and coronal magnetic field parameter through solar cycle 23 and 23/24 minimum

藤木 謙一<sup>1\*</sup>, 野田 桃太郎<sup>2</sup>, 徳丸 宗利<sup>1</sup>

FUJIKI, Ken'ichi<sup>1\*</sup>, Momotaro Noda<sup>2</sup>, TOKUMARU, Munetoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学太陽地球環境研究所, <sup>2</sup> 名古屋大学大学院理学研究科素粒子宇宙物理学専攻

<sup>1</sup>Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, <sup>2</sup>Division of Particle and Astrophysical Science, Graduate School of Science, Nagoya University

Solar wind acceleration mechanism is one of the most important issues to be solved in solar wind physics. We have been studied the relationship between velocity of solar wind which comes from coronal holes and coronal magnetic field parameter. Precedence researches in our group showed that solar wind speed,  $V$  had been in proportion to a parameter  $Bp/f$  from solar minimum in cycle 22/23 to solar maximum in cycle 23, where  $Bp$  and  $f$  are magnetic field strength and expansion factor of the magnetic flux tube, respectively [1]. In solar minimum in the cycle 23/24, however, polar magnetic field gets weaker and solar wind has lower density, lower temperature, and lower mass flux than the previous minimum [2]. For this reason, we examined the relationship between  $V$  and  $Bp/f$  from 22/23 to 23/24 solar minima. In this analysis we used following data set. Solar wind velocity map in each Carrington rotation was derived from the interplanetary scintillation measurements at Solar-Terrestrial Environment Laboratory. Coronal magnetic field in each Carrington rotation was calculated by potential field source surface model using synoptic photospheric magnetic field data observed at Kitt Peak National Solar Observatory. As results, we found that  $V$  always correlates positively  $Bp/f$  over the solar cycle. Then we focused on the difference of slopes of the regression lines between two solar minima. The slope in the 23/24 minimum becomes larger, in other words, the fast solar wind in the 23/24 minimum has smaller  $Bp/f$  compared to that in the 22/23 minimum. This result was compared with a theoretical model of solar wind acceleration [3] by taking account of the declining of solar wind parameters. We confirmed that the difference of regression lines in two solar minima is consistent with global trend of solar and solar wind variations.

### Reference

[1] Fujiki et al., Adv. Space Res., Volume 35, Issue 12, 2185, (2005)

[2] McComas et al., Geophys. Res. Lett., 35, 18103, (2008)

[3] Suzuki, T. K., Astrophys. J. Lett., 640, 75, (2006)

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

Keywords: solar wind, interplanetary scintillation, solar cycle

## 銀河宇宙線太陽時日変化異方性の4太陽活動周期にわたる長周期変動 Long term variation of the solar diurnal anisotropy of galactic cosmic rays over four solar activity cycles

宗像 一起<sup>1\*</sup>

MUNAKATA, Kazuoki<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 信州大理

<sup>1</sup>Physics Dept., Shinshu U.

The galactic cosmic ray (GCR) anisotropy observed with the muon detector network monitoring high-energy GCR intensity provides us with unique information of physical parameters, such as the spatial density gradient and the scattering mean free path of GCRs, which reflect the large-scale magnetic structure governing the GCR propagation in the heliosphere. The solar cycle variation of the anisotropy particularly gives important information on the temporal variation of the GCR propagation in the heliosphere. In this paper, we analyze the solar diurnal anisotropy observed with a network of surface and underground muon detectors monitoring the primary GCRs in a wide energy range of 50-500 GeV. This network includes a detector at Nagoya which has been in operation more than 40 years. The derived anisotropy shows clear 11-year and 22-year variations respectively in clear correlations with the solar activity- and magnetic-cycles. We will discuss the physical mechanisms responsible for these long-term variations.

キーワード: 銀河宇宙線, 太陽時日変化異方性, ミューオン計ネットワーク

Keywords: galactic cosmic rays, solar diurnal anisotropy, muon detector networks

## 太陽風加速の長時間変動 Long-term variation of the solar wind acceleration

袴田 和幸<sup>1\*</sup>, 徳丸 宗利<sup>2</sup>, 藤木 謙一<sup>2</sup>

HAKAMADA, Kazuyuki<sup>1\*</sup>, TOKUMARU, Munetoshi<sup>2</sup>, FUJIKI, Ken'ichi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 中部大学, <sup>2</sup> 名古屋大学太陽地球環境研究所

<sup>1</sup>Chubu University, <sup>2</sup>Solar-Terrestrial Environment Laboratory

今までの解析で我々は、袴田の開発したコロナ磁場ポテンシャルモデル (RF-Model) と Kitt Peak の光球磁場のシノプティックチャートを用いて、1800 カリントンローテーションから 2075 ローテーションまでのほぼ 2 太陽活動周期にわたる約 20 年間のコロナ磁場 3 次元構造を計算した。このコロナ磁場を用いて各ローテーション毎に、ソース面上のコロナ磁場動径成分の絶対値の対数,  $\text{Log}_{10}|\text{Br}_{\text{sou}}|$ , のシノプティックチャートを描いた。また、光球磁場動径成分の絶対値の対数,  $\text{Log}_{10}|\text{Br}_{\text{pho}}|$ , をコロナの磁力線に沿ってソース面上に投影したシノプティックチャートも描いた。さらに、IPS 観測値を用いて CAT 法により推定した太陽風速度,  $V$ , のソース面上のシノプティックチャートも描いた。これら,  $V$ ,  $\text{Log}_{10}|\text{Br}_{\text{sou}}|$ , および,  $\text{Log}_{10}|\text{Br}_{\text{pho}}|$  のシノプティックチャートは、すべて、同じ形式の分布図であるので、3 者を直接比較することができる。 $\text{Log}_{10}|\text{Br}_{\text{sou}}|$  を x 軸,  $\text{Log}_{10}|\text{Br}_{\text{pho}}|$  を y 軸,  $V$  を z 軸とすると,  $V$  の分布は xyz 空間中の平面として表せることが分かった。そこで、平面の式,  $V = a + b * \text{Log}_{10}|\text{Br}_{\text{sou}}| + c * \text{Log}_{10}|\text{Br}_{\text{pho}}|$  を仮定し、これらの重相関係数  $r$  や、重回帰係数  $a, b, c$  の時間変化を調べた。 $r$  は、太陽活動極大期には 0.3 前後と低いものの、太陽活動極小期では 0.7 前後と非常に高い値を持つことが分かった。また、 $a, b, c$  の値も、太陽活動の変動に伴い、 $r$  と似た長周期変動をすることも分かった。この結果は、太陽風加速がコロナ磁場や光球磁場に因ることを示すと共に、他の長周期変動を示す未知の太陽風加速機構の存在を示唆していることが分かった。

キーワード: 太陽風, 加速, 長時間変動

Keywords: solar wind, acceleration, long-term variation

## 太陽風2次元観測を利用した太陽風磁気雲の形状推定

### Determination of 3D configuration of magnetic clouds using 2D imaging data of solar wind

丸橋 克英<sup>1\*</sup>, 徳丸宗利<sup>2</sup>, バーナード ジャクソン<sup>3</sup>

MARUBASHI, Katsuhide<sup>1\*</sup>, TOKUMARU Munetoshi<sup>2</sup>, JACKSON Bernard V.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> なし, <sup>2</sup> 名古屋大学太陽地球環境研究所, <sup>3</sup> カリフォルニア大学サンディエゴ校天文宇宙科学センター

<sup>1</sup>none, <sup>2</sup>STEL, Nagoya University, <sup>3</sup>CASS, University of California, San Diego

太陽風磁気雲の形状は太陽風磁場の衛星観測データを磁気ロープモデルにフィッティングすることにより研究されてきた。この方法では、衛星位置における観測結果に合うモデルを探して、磁気ロープの方向・サイズなど推定するため、推定結果はどんなモデルを使用するか依存することは避けられない。形状を正確に把握するためには、原理的には、同一の太陽風磁気雲を多くの人工衛星で同時に観測することが必要になり、非現実的である。そこでリモートセンシング手法による太陽風構造の観測データをモデル・フィッティングと併用することにより、太陽風磁気雲の全体像を決定することを試みた。リモートセンシング観測としては、太陽光の散乱を利用した太陽風撮像 (SMEI)、および太陽風の密度ゆらぎを電波星のシンチレーションを全天で測定する IPS 観測を利用する。これらの観測では、太陽風の高密度領域のひらき効果を効果的につかまえているので、太陽風磁気雲のうちで、高密度の観測例を選んで比較を行なった。一般に知られているように、太陽風磁気雲のプラズマ密度は低い場合が多いが、それでも 20 例ほどの高密度太陽風磁気雲を選ぶことができた。その構造をモデル・フィッティングとリモセンデータの組み合わせにより推定した形状は、太陽における太陽風磁気雲の発生領域の磁場構造との関連性を強く示唆している。

キーワード: 太陽風磁場, 磁気ロープ, 太陽風密度, モデル・フィッティング, 太陽風磁気雲

Keywords: solar wind magnetic field, magnetic flux rope, solar wind density, model fitting, magnetic cloud

## かぐやで観測された月周辺静電孤立波 (ESW) の源の推定

### Source estimation of Electrostatic Solitary Waves (ESWs) observed by Kaguya near the Moon

橋本 弘藏<sup>1\*</sup>, 大村 善治<sup>2</sup>, 笠原 禎也<sup>3</sup>, 小嶋 浩嗣<sup>2</sup>, 橋谷 真紀<sup>4</sup>, 小野 高幸<sup>5</sup>, 綱川 秀夫<sup>6</sup>

HASHIMOTO, Kozo<sup>1\*</sup>, OMURA, Yoshiharu<sup>2</sup>, KASAHARA, Yoshiya<sup>3</sup>, KOJIMA, Hirotsugu<sup>2</sup>, HASHITANI, Maki<sup>4</sup>, ONO, Takayuki<sup>5</sup>, TSUNAKAWA, Hideo<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 古代学協会, <sup>2</sup> 京都大学生存圏研究所, <sup>3</sup> 金沢大学, <sup>4</sup> 九州電力, <sup>5</sup> 東北大学, <sup>6</sup> 東京工業大学

<sup>1</sup>Paleological Association of Japan, <sup>2</sup>RISH, Kyoto University, <sup>3</sup>Kanazawa University, <sup>4</sup>Kyushu Electric Power Co., <sup>5</sup>Tohoku University, <sup>6</sup>Tokyo Institute of Technology

月周回衛星「かぐや (SELENE)」搭載 LRS[1] の WFC-L 波動観測装置 [2] では、100Hz-100kHz の波形を観測でき、多数の静電孤立波 (ESW) が観測されている。観測された ESW については、一部報告済みである [3]。

ESW のポテンシャルは 2 次元構造をしており、外部磁場に対して平行な成分だけでなく、垂直成分を多く含んでいる。これを電界として受信した場合、1 次元ポテンシャルを元にしたバイポーラ 波形から歪んだ波形が受信される。ポテンシャルの水平および垂直成分に基づく ESW の理想形に、受信波形の fitting を行い、垂直成分の影響を評価した。また、文献 [3] で、ESW が観測される位置について検討したが、その場における磁場方向の解析や磁気異常と 2 次元構造解析を併用して、ESW の源に関して論じる。

#### References

[1] Takayuki Ono, Atsushi Kumamoto, Yasushi Yamaguchi, Atsushi Yamaji, Takao Kobayashi, Yoshiya Kasahara, and Hiroshi Oya, Instrumentation and observation target of the Lunar Radar Sounder (LRS) experiment on-board the SELENE spacecraft, *Earth Planets Space*, 60, 321-332, 2008.

[2] Y. Kasahara, Y. Goto, K. Hashimoto, T. Imachi, A. Kumamoto, T. Ono, and H. Matsumoto, Plasma Wave Observation Using Waveform Capture in the Lunar Radar Sounder on board the SELENE Spacecraft, *Earth, Planets and Space*, 60, 341-351, 2008.

[3] K. Hashimoto, M. Hashitani, Y. Kasahara, Y. Omura, M.N. Nishino, Y. Saito, S. Yokota, T. Ono, H. Tsunakawa, H. Shibuya, M. Matsushima, H. Shimizu, and F. Takahashi, Electrostatic solitary waves associated with magnetic anomalies and wake boundary of the Moon observed by KAGUYA, accepted for publication in *Geophys. Res. Lett.*, 37, L19204, doi:10.1029/2010GL044529, 2010.

キーワード: 静電孤立波, 月, かぐや

Keywords: electrostatic solitary wave, moon, Kaguya



## 2次元粒子シミュレーションで見た太陽風中の障害物下流のウェイクへのプラズマの侵入

Proton entry into the plasma void formed downstream of an insulating, non-magnetized obstacle in the solar wind

中川 朋子<sup>1\*</sup>

NAKAGAWA, Tomoko<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東北工業大学工学部情報通信工学科

<sup>1</sup>Tohoku Institute of Technology

月のように、誘電体で構成され、固有磁場を持たない障害物に太陽風が吹きつけた場合、プラズマのほとんどがその表面で吸着され、下流にはウェイクと呼ばれるプラズマ密度の薄い領域ができる。近年、かぐや衛星をはじめ、Chandrayaan-1, Chang'E-1, ARTEMIS などさまざまな周回衛星によって月周辺のプラズマ観測が行われるようになり、ウェイク中でも月にごく近い場所でイオンが検出されるなどして、ウェイクへのイオンの侵入過程に注目が集まってきている。

ウェイクへのイオンの侵入を考える際には、真空中へのプラズマの流入の理論が良く使われてきた (Samir et al., 1983)。電気的中性を仮定した自己相似解は、ion の加速や rarefaction wave の形成を予測したが、ion front の形成は導出されなかった。Singh and Schunk(1982) や Denavit(1979) のシミュレーションでは ion front の形成が報告されているが、1次元のシミュレーションであったため、丸い障害物後方のウェイク中のどのような位置に ion front が形成されるのか明確でなかった。

本研究では、2次元粒子シミュレーションを用い、太陽風速度・電子熱速度・プロトン熱速度を変えて数値実験を行い、プロトンのウェイクへの侵入を調べた。その結果、ウェイク中の負の電位によるプロトンの加速が、太陽風の遅い場合には十分時間をかけて行われるため、プロトンは障害物から近い距離でウェイク中心に向かう速度を持ち、真空領域を早く埋めることになり、従って proton void の領域が狭くなることが分かった。near moon wake でのイオンの検出は太陽風速度が遅いときに起こると予想される。

キーワード: 月, ウェイク, プロトン加速, 太陽風速, 粒子シミュレーション, 電場

Keywords: moon, near moon wake, proton acceleration, solar wind, PIC simulation, electric potential