

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25247079

研究課題名(和文) 特異な太陽ダイナモ活動に伴う太陽圏全体構造の変動の解明

研究課題名(英文) Study of structural variation of the global heliosphere associated with the peculiar solar dynamo activity

研究代表者

徳丸 宗利 (Tokumaru, Munetoshi)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授

研究者番号：60273207

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,200,000円

研究成果の概要(和文)：異常に弱い活動度を示すサイクル24における太陽風の全球的分布とその時間発展を明らかにするため、改良された名古屋大学ISEEの多地点IPSシステムを用いて連続観測を行った。その結果、本サイクルにおいて速度が350km/s以下(超低速)で密度が高速風のように低い太陽風の出現が顕著に増えていること、開いた磁場領域の面積や磁束管拡大率と速度の関係には低い太陽活動の影響は見られないこと、などが判った。これらの事実は太陽活動の著しい低下に伴ってコロナからの質量供給率またはエネルギー注入率が減少していること示唆し、超低速風の領域でその効果が特に顕著であることは太陽風加速機構を探る重要な手掛かりを与える。

研究成果の概要(英文)：We carried out interplanetary scintillation measurements using the improved multi-station system of the Nagoya University in order to elucidate the global distribution of the solar wind and its evolution during the Solar Cycle 24 associated with extremely weak activities. As the result, we find that the occurrence of the very slow (< 350 km/s) solar wind, whose density is as low as the fast wind, increases distinctly in this cycle, and that the relation between the speed and either the open field areas or the magnetic flux expansion factor does not show any clear response to the solar activity. These facts suggest that the mass supply or energy injection rate from the corona decreases in association with a marked decline of the solar activity, and the fact that this effect is most prominent for the very slow wind provides an important clue to the solar wind acceleration.

研究分野：惑星間空間物理学

キーワード：太陽風 惑星間空間シンチレーション 太陽圏 宇宙天気 太陽ダイナモ

1. 研究開始当初の背景

(1) 2008 年から始まった第 24 太陽活動周期 (サイクル 24) は近代的な宇宙観測が開始して以来最も低い活動度を示している。この低下は約 100 年周期の Gleissberg サイクルに対応したものと考えられる。サイクル 24 初頭の観測からは、太陽から吹き出す太陽風に過去のサイクルとはことなる様々な特徴が見られた。その一つが太陽風動圧の減少であり、この事実は太陽圏全体の収縮を示唆する。

(2) 17 世紀の太陽活動が長期にわたって低下した期間 (Maunder 極小期) には、地球気候が寒冷化した。この太陽活動と地球気候の関係は未解明である。

(3) 2012 年 Voyager1 探査機が太陽圏境界を通過し、続いて Voyager2 探査機がいつ境界に到達するか注目が集まっている。また、IBEX 衛星による遠隔測定からも太陽圏境界域の探査が行われている。これらの太陽圏境界域の探査研究において、実際の観測に基づいた太陽風の全球的分布に関する情報が必須となっている。

2. 研究の目的

(1) 特異なサイクル 24 の極大期から次の極小期にかけて太陽風がどのような全球的分布を示し、それが太陽活動とともにどのように発展するかを IPS による全球的な観測によって明らかにすることで、太陽磁場に対する太陽風の応答を明らかにし、未だ謎となっている太陽風加速機構や太陽活動と地球気候の関係に関する新たな知見を得る。

(2) 得られた太陽風の全球的観測データに基づいて計算機シミュレーションを実施し、サイクル 24 における太陽圏全体構造とその時間発展を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 名古屋大学 ISEE では天体電波源の惑星間空間シンチレーション (IPS) を地上から観測することで太陽風速度および密度ゆらぎの全球的な分布を決定できる。この観測の分解能は、1 日に観測できる電波源の数によって決まる。本研究では、名大 ISEE の富士・木曽 IPS アンテナの低雑音増幅器を新たに開発したものに置き換えることにより、同アンテナの感度・信頼性を向上させ、1 日により多くの電波源につい

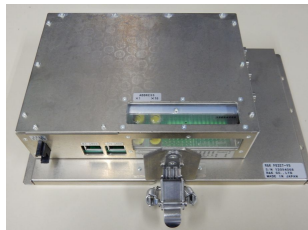


図 1. IPS 観測システム用に開発された低雑音増幅器 FE327-V5。富士・木曽ではこれをそれぞれ 96 台・72 台用いてフェーズドアレイ受信機を構成する。

て IPS 観測を可能にする。また同アンテナのフェーズドアレイシステムについて位相・利得を校正するシステムを開発し、アンテナ効率を最大にするようにする。さらに、観測システムの時計装置を更新し、時刻同期精度を高めるとともに、旧式となっている木曽アンテナの駆動制御装置の一部を更新し信頼性を向上させる。

(2) 改良された名大 ISEE の IPS システムを用いて連続して観測を実施し、得られたデータからサイクル 24 極大期～次極小期における太陽風速度と密度ゆらぎの全球的分布を決定する。得られた太陽風速度・密度ゆらぎの全球的分布を、太陽磁場観測データを用いて、太陽コロナ磁場の諸特性との比較を行う。また、飛翔体による太陽風データと比較して、IPS 観測の精度を検証する。

(3) 得られた観測データに基づいて MHD モデルによる太陽圏全体構造の計算機シミュレーションを行い、その結果を Voyager の観測結果と比較する。また IBEX 研究チームにも IPS 観測データを提供し、太陽圏境界域の調査を共同で行う。

4. 研究成果

(1) 2013 年 11 月～2014 年 6 月に実施した富士・木曽アンテナの改良作業によって、システムの感度と信頼性を向上させることができた。改良されたシステムを用いて 2014 年 6 月から 2017 年末まで IPS 観測を開始し、サイクル 24 の極大期から次極小期に至る期間について太陽風速度および密度ゆらぎの全球的分布を決定した。観測結果からは 2012 年に南北極域の高速風が消失した後、徐々に両極に高速風が発達してゆく様子が見られた。その成長過程で南北半球の太陽風分布に大きな非対称性が生じていることもわかった。

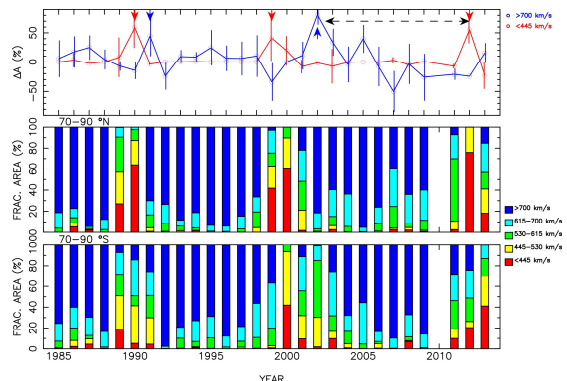


図 2. (中) 北極域および(下)南極域における太陽風速度分布の時間変化, (上) 南北非対称性: 赤線は低速風、青線は高速風 (Tokumaru et al., 2015)

(2) 高緯度における太陽風の南北非対称性について IPS 観測データを使って調査したところ、過去3つの極大期において南北非対称性が生じていることがわかった。また、その南北非対称性には北極の高速風の消失・再出現が南極より先行するという傾向があること、サイクル 23 極大～下降期に高速風の非対称性が増加していること、高速風の南北非対称性と太陽磁場の四重極子成分には有意な相関がみられること等が判明した。即ち、太陽活動の衰退に伴って双極子成分に対して四重極子成分の寄与が大きくなり、高速風の分布に変化を生じていると考えられる。

(3) 太陽風密度ゆらぎの観測結果からはサイクル 23 から 24 にかけて密度ゆらぎが全球的に減少していることがわかった。密度ゆらぎは太陽風密度の指標であることから、この観測結果は太陽風密度の全球的低下を示唆する。我々の観測データによると、この低下はサイクル 23 初頭から始まっていた。密度ゆらぎと太陽風速度の関係を詳細に調査したところ、速度が 350km/s 以下の太陽風（超低速風）において特に顕著な密度低下が起きていることが判明した。飛翔体の観測結果からも、この事実が裏付けられた。ここで、この変化は単調ではなく太陽活動周期に伴う変動が重畳している。太陽磁場のポテンシャル磁場モデル解析を使って超低速風の流源の特性を調査したところ、低密度の超低速風は中・高緯度に分布し、高密度と比べ磁束管拡大率が小さく、磁場強度も弱いことが判った。これらの事から、低密度の超低速風の起源としてサイクル 24 に出現が増えている pseudo-streamer が考えられる。また、太陽活動の低下に伴って太陽風密度が低下していることから、コロナから太陽風への質量供給率またはエネルギー注入率が低下してい

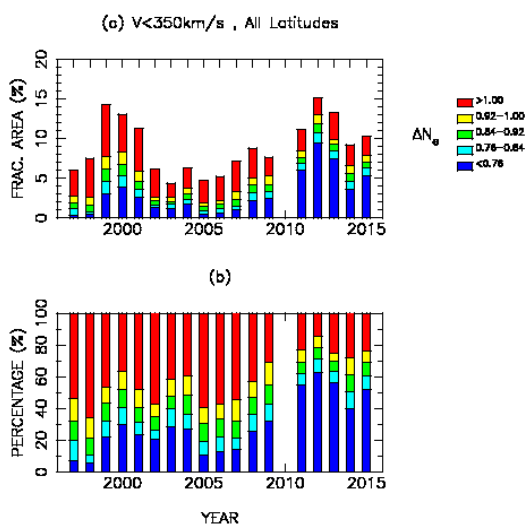


図 3.(a)超低速風の面積の時間変化と(b)超低速風における度々ゆらぎの分布 (Tokumaru et al., 2018)

ることが推定される。この密度低下が超低速風で顕著である事実は、太陽風加速機構を解明する上で重要な手掛かりを与える。

(4) 太陽磁場の開いた領域（コロナホール、CH）の面積と太陽風速度には比例関係があることは飛翔体観測データを用いた従来の研究から判っていた。今回、IPS 観測データを使って検証した結果、両者の比例関係が確認されたが、その傾きは従来の研究結果とは大きく異なっていた。我々の解析では、速度と CH 面積の対応を正確に求めていることや長期にわたるデータを用いていることから、より正確な結果と言える。ここで注目すべきは、サイクル 24 の太陽活動低下の影響が太陽風速度と CH 面積の関係には殆ど見られないことである。この事は、太陽表面の CH 面積を測定することで太陽風速度が正確に推定できることを示しており、宇宙天気予報への応用が期待される。

(5) 名大 ISEE の IPS 観測で得られた全球的な太陽風データを使って、MHD モデルによる計算機シミュレーションを実施した。その結果、外部太陽圏における太陽風速度に波長が 2 AU 程度の波動現象が見つかった。この事は現実的な太陽風の構造を再現したことによって初めて発見されたものである。

(6) 本研究期間に世界各地の IPS 観測局を結ぶネットワーク構築が大きく進んだ。そして、新しい装置を用いた IPS 観測との共同研究も活発に行われた。その一つが豪州に建設された低周波電波アレイ MWA との共同研究である。研究の結果、MWA と ISEE の IPS 観測結果はよく一致していることがわかった。MWA は目下計画されている超大型電波アレイ SKA にむけた装置であり、最新の技術が使われている。今回の共同研究の成果は将来 SKA で IPS を用いた観測研究を行ってゆく可能性を開拓したものと意義深い。

(7) 取得した IPS 観測データを使って、最近 7 年間における太陽風質量フラックスの全球的元分布を決定した。その結果と IBEX 衛星の観測データを組み合わせた解析から、太陽圏境界域の構造とその時間変化を明らかにした。この成果に基づいて、次期太陽圏境界域探査ミッション IMAP 計画に共同研究者として参加した。

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 19 件)

Tokumaru, M., T. Shimoyama, K. Fujiki, K. Hakamada, Rarefaction of the very-slow (<math>< 350 \text{ km/s}</math>) solar wind in Cycle 24 compared with Cycle 23, J.

Geophys. Res., 査読有、123, 2018, 印刷中 (doi:10.1002/2017ja025014).  
Tokumar, M., D. Satonaka, K. Fujiki, K. Hayashi, and K. Hakamada, Relation between Coronal Hole Areas and the Solar Wind Speeds Derived from Interplanetary Scintillation Measurements, Solar Physics, 査読有、292, 2017, 41 (doi:10.1007/s11207-017-1066-7).  
[https://nagoya.repo.nii.ac.jp/?action=repository\\_uri&item\\_id=23454](https://nagoya.repo.nii.ac.jp/?action=repository_uri&item_id=23454)  
McComas, D.J., E.J. Zimstein, M. Bzowski, M.A. Dayeh, R. DeMajistre, H.O. Funsten, S.A. Fuselier, P.H. Janzen, M.A. Kubiak, H. Kucharck, E. Moebius, D.B. Reisenfeld, N.A. Schwadron, J.R. Szalay, J.M. Sokol, and M. Tokumar, Seven years of imaging the global heliosphere with IBEX, Astrophysical Journal Supplement Series, 査読有、229, 2017 41 (doi:10.3847/1538-4365/aa66d8).  
Morgan, J.S., J-P. Macquart, R. Ekers, R. Chhetri, M. Tokumar, P.K. Manoharan, S. Tremblay, M.M. Bisi, and B.V. Jackson, Interplanetary Scintillation with the Murchison Widefield Array I: A sub-arcsecond survey over 900 square degrees at 79 and 158 MHz, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有、473, 2017, 2965-2983 (doi:10.1093/mnras/stx2284).  
Tokumar, M., K. Fujiki, M. Kojima, T. Iju, H. Nakano, D. Satonaka, T. Shimoyama, and K. Hakamada, Global Distribution of the Solar Wind and its Evolution during Cycles 22-24, Proceedings of Solar Wind 14, 査読有、AIP Conference Proceedings 1720, 2016, 030004 (doi:10.1063/1.4943827).  
Hayashi, K., M. Tokumar, and K. Fujiki, MHD-IPS analysis of relationship among solar-wind density, temperature, and flow speed, Journal of Geophysical Research - Space Physics, 査読有、121, 2016, 7367-7384 (doi:10.1002/2016JA022750).  
Fujiki, K., M. Tokumar, K. Hayashi, and K. Hakamada, Long-term trend of solar coronal hole distribution from 1975 to 2014, Astrophysical Journal Letter, 査読有、827, 2016, L41 (doi:10.3847/2041-8205/827/2/L41).  
Tokumar, M., K. Fujiki, and T. Iju, North-South Asymmetry in Global Distribution of the Solar Wind Speed During 1985-2013, J. Geophys. Res., 査読有、120, 2015, 3283-3296

(doi:10.1002/2014JA020765).  
[https://nagoya.repo.nii.ac.jp/?action=repository\\_uri&item\\_id=22151](https://nagoya.repo.nii.ac.jp/?action=repository_uri&item_id=22151)  
Sokol, J.M., P. Swaczyna, M. Bzowski, and M. Tokumar, Reconstruction of heliolatitudinal structure of the solar wind proton speed and density, Solar Physics, 査読有、290, 2015, 2589-2615, (doi:10.1007/s11207-015-0800-2).  
P. Janardhan, S. K. Bisoi, S. Ananthakrishnan, M. Tokumar, K. Fujiki, L. Jose, and R. Sridharan, A Twenty Year Decline in Solar Photospheric Magnetic Fields: Inner-Heliosphere Signatures and Possible Implications?, J. Geophys. Res., 査読有、120, 2015, 5306-5317, (doi:10.1002/2015JA021123).  
Yu, H.-S., B.V. Jackson, P.P. Hick, A. Buffington, D. Odstrcil, C.C. Wu, J.A. Davies, M.M. Bisi, and M. Tokumar, 3D reconstruction of interplanetary scintillation (IPS) remote-sensing data: global solar wind boundaries for driving 3D-MHD models, Solar Physics, 査読有、290, 2015, 2519-2538 (doi:10.1007/s11207-015-0685-0).  
Fujiki, K., H. Washimi, K. Hayashi, G. P. Zank, M. Tokumar, T. Tanaka, V. Florinski, and Y. Kubo, MHD Analysis of the Velocity Oscillations in the Outer Heliosphere, Geophysical Research Letters, 査読有、41, 2014, 1420-1424 (doi:10.1002/2014GL059391).  
Kim, T. K., N. V. Pogorelov, S. N. Borovikov, B. V. Jackson, H.-S. Yu, M. Tokumar, Modeling the Heliosphere Using Tomographic Reconstruction of the Solar Wind from Interplanetary Scintillation Observations as Boundary Conditions, Journal of Geophysical Research, 査読有、119, 2014, 7981-7997, (doi:10.1002/2013JA019755).  
Bisoi, S. K., P. Janardhan, M. Ingale, P. Subramanian, S. Ananthakrishnan, M. Tokumar, and K. Fujiki, A study of density modulation index in the inner solar wind during solar cycle 23, Astrophysical Journal, 査読有、795, 2014 69, (doi:10.1088/0004-637X/795/1/69).

他 5 件

〔学会発表〕(計 25 件)

M. Tokumar, et al., Rarefaction of the Very-Slow (<350 km/s) Solar Wind in Cycle 24, JpGU 2017, 2017.

徳丸宗利, 他、かにパルサーの周波数分散を用いたサイクル 24/25 極小期における極域太陽風密度の研究、地球電磁気・地球惑星圏学会 第 1 4 2 回総会及び講演会、2017.

Tokumaru, M., et al., Improved relation between the solar wind speeds and coronal hole areas, AOGS 2016, 2016.

徳丸宗利, 他、IPS 観測から得られた太陽風速度とコロナホール面積の関係、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016.

徳丸宗利, 他、IPS 観測から得られた太陽風速度とコロナホール面積の関係、地球電磁気・地球惑星圏学会 第 1 4 0 回総会及び講演会、2016.

徳丸宗利, 他、サイクル 2 2 - 2 4 の太陽風速度のグローバル分布に見られる南北非対称性、日本地球惑星科学連合 2015 年大会、2015.

Tokumaru, M., et al., Global Distribution of the Solar Wind and its Evolution during Cycles 22-24, Solar Wind 14, 2015.

徳丸宗利, 他、多地点 IPS 観測システムの更新とサイクル 2 4 極大期の太陽風観測、日本地球惑星科学連合 2014 年連合大会、2014.

Tokumaru, M., et al., 3D Reconstruction of the Heliosphere Using Interplanetary Scintillation Observations, AOGS 2014, 2014.

Tokumaru, M., et al., Long-Term Change in Global Distribution of the Solar Wind during Cycles 22-24, AOGS 2014, 2014.

徳丸宗利, 他、多地点 IPS 観測システムの更新とサイクル 2 4 極大期の太陽風観測 ( 2 )、地球電磁気・地球惑星圏学会総会・講演会、2014.

Tokumaru, M., et al., Interplanetary scintillation observations of the solar wind using SWIFT and upgraded multi-station system, AOGS 2013, 2013.

Tokumaru, M., et al., Long-Term Changes in Global Distribution of the Solar Wind, International CAWSES-II Symposium, 2013.

徳丸宗利, 他、太陽風のグローバル分布に見られる南北非対称性、日本地球惑星科学連合 2013 年連合大会、2013.

他 1 1 件

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:

発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等  
太陽風研究室のホームページ  
<http://stsw1.isee.nagoya-u.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

徳丸 宗利 (TOKUMARU, Munetoshi)  
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授  
研究者番号: 60273207

### (2) 研究分担者

( )  
研究者番号:

### (3) 連携研究者

藤木 謙一 (FUJIKI Ken'ichi)  
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・助教  
研究者番号: 20303597

### (4) 研究協力者

林 啓志 (HAYASHI Keiji)  
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・特任助教 (H27 年度)  
丸山 益史 (MARUYAMA Yasushi)  
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・技術職員  
丸山 一夫 (MARUYAMA Kazuo)  
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・技術補佐員 (H27 年度まで)  
伊集 朝哉 (IJU Tomoya)  
名古屋大学・理学研究科・大学院生 (H26 年度まで)