

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009 ～ 2012

課題番号：21340140

研究課題名（和文）

第24太陽活動極小期における特異太陽風構造の解明

研究課題名（英文）

STUDY OF PECULIAR SOLAR WIND STRUCTURE AT CYCLE 24 SOLAR MINIMUM

研究代表者

徳丸 宗利 (TOKUMARU MUNETOSHI)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授

研究者番号：60273207

研究成果の概要（和文）：我々は、名古屋大学太陽地球環境研究所の惑星間空間シンチレーション観測システムの改良を行い、同システムから得られたデータを使ってサイクル24極小期に観測された特異な太陽風構造の時間発展を調査した。その結果、サイクル24の太陽活動の上昇に伴う太陽風構造の変化には過去のサイクルと異なる特徴があることがわかった。また、太陽風密度が全球的に低下していることも判明した。このことは太陽圏全体が収縮していることを示唆し、太陽圏外圏域の探査や宇宙気候の研究にとって重要な成果である。

研究成果の概要（英文）：We improved the interplanetary scintillation measurement system of the Solar-Terrestrial Environment Laboratory of Nagoya University, and investigated long-term evolution of the peculiar solar wind structure observed at Cycle 24 solar minimum using data obtained from the system. As result, we found that the solar wind structure evolves with rising solar activity in Cycle 24 rather differently from that in the past cycle. We also found that the solar wind density globally drops in Cycle 24. Our result suggests that the heliosphere is significantly shrinking, and this is of great importance from viewpoint of exploration of the outer heliosphere and study of the space climate.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
2010年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2011年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2012年度	2,000,000	600,000	2,600,000
総計	13,900,000	4,170,000	18,070,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学

キーワード：太陽風・惑星間空間

1. 研究開始当初の背景

第24サイクル極小期(2007-2008年)は過去100年来の長期間にわたり黒点が出現しない状態が継続した。これと同時に、太陽や地球周辺の宇宙空間では過去の極小期とは異なる特徴が観測されている。特に、名古屋大学太陽地球環境研究所(STE研)で実施している惑星間空間シンチレーション(IPS)観測

からは、今極小期における太陽風のグローバルな構造が従来と著しく異なることが判明した。即ち、過去の極小期では極域に高速風が発達し赤道付近に低速風が分布していたが、今極小期では赤道付近に高速風が形成され極域の高速風に挟まれた領域に低速風が分布していた。このため地球軌道において、従来は出現率が低かった高速風が頻繁に観

測されるようになり、地球周辺の宇宙環境に大きな変化が生じている。よって、この特異な太陽風構造が今後どの様に発展するかは、多くの研究者にとって興味ある課題となっていた。米国太陽観測所の研究チームは、今回の太陽活動の低下が17世紀のマウンダー極小期のような状態（グランドミニマム）の前兆であることを報告している。もし、そうならば未だ謎となっているグランドミニマムにおける地球気候寒冷化のメカニズムを探る絶好のチャンスとなる。

サイクル24における太陽風構造の発展を解明する上でSTE研のIPS観測は貴重なデータを与える。STE研IPS観測は国内4箇所（豊川・富士・木曾・菅平）に設置した大型アンテナを用い、これらによる同時観測から太陽風速度を求めるもので、信頼性の高いデータを提供することができる。2008年にこの観測専用の高感度大型アンテナ（太陽圏イメージング装置）が豊川観測所に完成し観測を開始した。この新アンテナは仕様が既存のシステムと異なるため、多地点IPS観測を実施するには既存システムを更新しなければならない。特に、多地点IPS観測のために3地点観測が不可欠なので、富士・木曾観測所のシステム更新が緊急の課題となっていた。

2. 研究の目的

本研究課題では、サイクル24極小期に見られた特異な太陽風構造が、その後太陽活動の上昇に伴って如何に変化するかを、名大STE研のIPS観測から明らかにする。この観測からは、飛翔体では得られない極域を含む全緯度について太陽風速度および密度ゆらぎの分布を決定することができる。本研究課題の期間(2009~2012年)はサイクル24の太陽活動上昇期に相当し、これまでの観測から太陽活動の上昇に伴って、極域の高速風が衰退し、低速風が全面で優勢になることが期待される。果たして従来の変化が特異なサイクル24にも見られるかがポイントとなる。名大STE研のIPS観測は過去3サイクル以上にわたって実施されているため、今サイクルにおける太陽風構造の変化が従来と比べ、どの様な違いがあるかを詳細に調査することができる。また、今サイクルにおける太陽風の特徴と太陽磁場の変化を比較することで太陽ダイナモ活動と太陽風の生成機構の関係を明らかにする。特に、今期は極磁場が弱いため、過去のサイクルとは異なるパラメータ下での新たな太陽風と磁場の関係が見えてくる可能性がある。

3. 研究の方法

豊川観測所の太陽圏イメージング装置と同期して観測し、太陽風速度データが得られ

るように、富士および木曾観測所のIPS観測システムを更新した。図1に本研究課題で開発した富士アンテナの駆動制御装置および観測制御・データ収集システム、図2に木曾アンテナの観測制御・データ収集システムを示す。



図1 (左) 富士アンテナ駆動制御装置、(上) 同観測制御・データ収集システム



図2 木曾アンテナ観測制御・データ収集システム

更新された観測システムを使った3地点（豊川・富士・木曾）同時IPS観測は2010年10月下旬から開始し、以降、太陽風速度データが得られるようになった。なお、2009年は従来システムを用いて富士・木曾・菅平の3地点観測から太陽風速度データを求めた。得られた太陽風速度およびシンチレーション指数（g値）データを計算機トモグラフィ法をより解析し、各太陽自転周期毎に太陽風速度および密度揺らぎの全球分布を決定した。但し、2010年はシステム更新のためデータが乏しく、全球を十分カバーできていない。トモグラフィ法で求めた太陽風速度および密度揺らぎの分布は、Wilcox Solar Observatory (WSO)やKitt Peak National Observatory (KPNO)の太陽磁場データと比較した。WSOの場合、インターネットで公開されている極磁場データを使い、KPNOの場合、インターネットで公開されているデータをポテンシャルモデルで解析し、光球磁場Bと磁力線拡大率fの比(B/f)を求めた。

4. 研究成果

(1). 太陽風速度分布の長期変動

1985~2012年（サイクル22~24）の期間について、年毎に太陽風速度を高速・低速・その中間の3つの速度に分類し、それぞれの成分が占める面積を求めた。その結果を図3

に示す。図に示すように、全球面では(図上)太陽活動に伴って高速風(青)・低速風(赤)の面積が周期的に変化していることがわかる。一方、高緯度(図中)または低緯度(図下)について見ると、それぞれ高速風・低速風が全期間を通じて支配的であることがわかる。ここでサイクル24について過去のサイクルと比較すると、①全球的には極小期に高速風が少なく、極大期に低速風が少ないこと、②低緯度で高速風の面積が多いこと、が判明した。このことは、サイクル24の極磁場が弱いことによる効果と考えられる。また2012年のデータから、サイクル24は極大期に達したことがわかった。

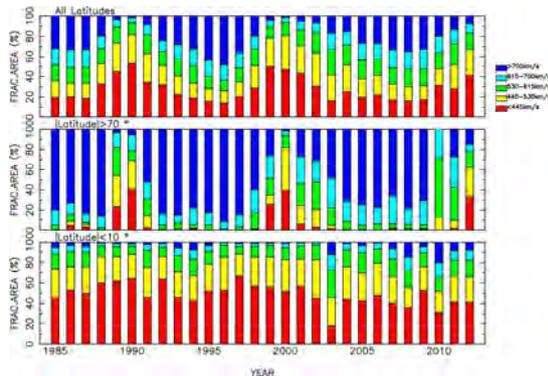


図3 太陽風速度分布の長期変動(上)全緯度、(中)高緯度、(下)低緯度

(2). 密度ゆらぎ分布の長期変動

太陽風速度と密度ゆらぎ ΔNe の同時観測がある1997年以降の期間について年毎の変動を調査した結果を図4に示す。図から、全緯度における太陽風速度のデータは明瞭な太陽活動依存性を示すのに対し、 ΔNe のデータには明瞭な太陽活動依存性が見られないことがわかる。ここで注目すべきは、 ΔNe データが単調減少の傾向を示すことで、全緯度・高緯度・低緯度のすべての場合に見られる。これは太陽風密度が全球的に減少していることを物語っており、太陽圏全体の収縮を示唆する。また、太陽風速度 V と ΔNe の関係を調べたところ、両者には $\Delta Ne \propto V^{-0.5}$ の関係があることがわかった。ただし、350km/s以下の低速風では、この関係式から外れる傾向がある。このことは超低速風を吹き出す領域は磁力線拡大率が極めて大きく、太陽風フラックスが低下するためと考えられる。

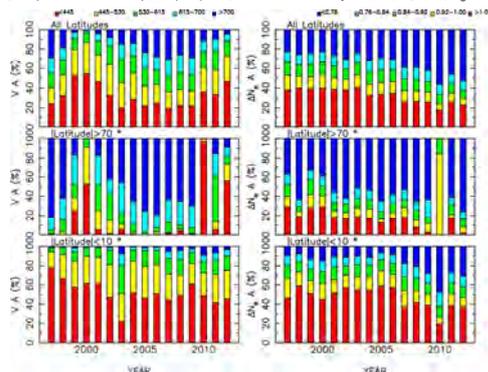


図4 1997~2012年の期間における(左)太陽風速度および(右)密度ゆらぎ分布の長期変動。上段は全緯度、中段は高緯度、下段は低緯度に対応する。

(3). 太陽磁場との関係

太陽極磁場データ(WSO)と太陽風速度データの相関を調べたところ、高速風は極磁場強度と正相関(図5左)、低速風は負相関(図5右)があることが判明した。この事実は極磁場が強くなると高速風の起源となるコロナホールの領域が拡大することで説明できる。ここで特記すべきは、サイクル24と極磁場の関係が従来のもものと異なっていることである。この差異は、高次の磁気モーメントの寄与により高速風がより多く生成されているためと推測される。また、KPNOの太陽磁場観測データから求めた B/f と太陽風速度 V の関係を調べたところ、両者にはよい相関関係があることがわかった。この事実は、磁気波動による太陽風加速モデルでよく説明できる。ただし、サイクル24において両者の直線関係の傾きが急になっていることが今回の研究から明らかとなった。このことは、サイクル24において太陽風の質量フラックスが減少していることで説明でき、(2)で得られた結果と一致する。

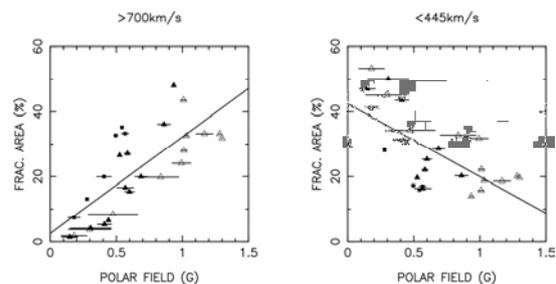


図5 (左)極磁場強度と高速風の面積の関係、(右)極磁場強度と低速風面積の関係

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 13 件)

- ① Tokumaru, M., Three-dimensional exploration of the solar wind using observations of interplanetary scintillation, Proceedings of the Japan Academy Ser. B, 査読有り, 2013, Vol. 89(2), pp. 67-79.
- ② Sokol, J.M., M. Bzowski, M. Tokumaru, K. Fujiki, D.J. McComas, Heliolatitude and time variation of solar wind structure from in-situ measurements and interplanetary scintillation

- observations, Solar Physics, 査読有り、2013, Vol. 285, page:167-200 (doi:10.1007/s11207-012-993-9).
- ③ Tokumaru, M., K. Fujiki, H. Itoh, T. Iju, M. Kojima, Global Observations of Evolving 3D Solar Wind Structure, Proceedings of 3rd Hinode Scientific Meeting, 査読なし、edited by T. Sekii, Astronomical Society of the Pacific (isbn: 978-1-58381-790-2), 2012, Vol. 454, pp. 413-420.
- ④ Tokumaru, M., M. Kojima, and K. Fujiki, Long-term evolution in the global distribution of solar wind speed and density fluctuations for 1997-2009, Journal of Geophysical Research, 査読有り、2012, Vol. 117, A06108, (doi:10.1029/2011ja017379).
- ⑤ Tokumaru, M., S. Fujimaki, M. Higashiyama, A. Yokobe, T. Ohmi, K. Fujiki, and M. Kojima, Two-station interplanetary scintillation measurements of solar wind speed near the Sun using the X-band radio signal of Nozomi spacecraft, Solar Physics, 査読有り、2012, Vol. 276, pp315-336 (doi:10.1007/s11207-011-9864-9).
- ⑥ Janardhan, P., S. K. Bisoi, S. Ananthakrishnan, M. Tokumaru, K. Fujiki, The prelude to the deep minimum between solar cycles 23 and 24: interplanetary scintillation signatures in the inner heliosphere, Geophysical Research Letters, 査読有り、2011, Vol. 38, L20108 (doi:10.1029/2011GL049227).
- ⑦ Tokumaru, M., M. Kojima, K. Fujiki, M. Maruyama, Y. Maruyama, H. Ito, and T. Iju, A newly-developed UHF radiotelescope for interplanetary scintillation observations: Solar Wind Imaging Facility, Radio Science, 査読有り、2011, Vol. 46, RS0F02 (doi:10.1029/2011RS004694).
- ⑧ Tokumaru, M., M. Kojima, and K. Fujiki, Solar cycle variations of the solar wind speed distribution from 1985-2008, Journal of Geophysical Research, 査読有り、2010, Vol. 115, A04102 (doi:1029/2009JA014628).
- ⑨ Tokumaru, M., M. Kojima, K. Fujiki, and K. Hayashi, Non-dipolar solar wind structure observed in the cycle 23/24 minimum, Geophysical Research Letter, 査読有り、2009, Vol. 36, L09101 (doi:10.1029/2009GL037461).

[学会発表] (計 15 件)

- ① Tokumaru, M., "Evolution of global distribution of the solar wind from cycle 23 to the early phase of cycle 24", the Solar Wind 13, 2012 Jun. 17-22, Hawaii, USA.
- ② Tokumaru, M., "Long-term variation in distribution of solar wind density fluctuations for 1997-2009", 2011 AGU Fall Meeting, 2011 Dec. 5-9, San Francisco, USA.
- ③ Tokumaru, M., "Global observations of the solar wind with STEL IPS array", AOGS 2011, 2011 Aug. 8-12, Taipei, Taiwan.
- ④ Tokumaru, M., "A New Radiotelescope for Interplanetary Scintillation Observations: Solar Wind Imaging Facility (SWIFT)", AP-RASC 2010, 2010 Sept. 22-26, Toyama, Japan.
- ⑤ Tokumaru, M., "Evolution of 3D solar wind structure during cycles 22 and 23" (invited), SCOSTEP Symposium 2010 STP12, 2010 July 12-16, Berlin, Germany.
- ⑥ Tokumaru, M., "Global Observations of Evolving 3D Solar Wind Structure", 3rd Hinode Scientific Meeting, 2009 Dec. 1-4, Tokyo, Japan.

[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

<http://stsw1.stelab.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・太陽地球環境研究所・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・太陽地球環境研究所・助教

研究者番号：20303597