

ジオスペース研究センター・プロジェクト「特異な太陽活動周期における太陽圏3次元構造の変遷と粒子加速の研究」H26年度報告書

H27.02.27

プロジェクトリーダー：徳丸宗利

所内メンバー：藤木謙一、伊藤好孝、松原 豊、埴 隆志、増田 智

### 実施状況

第24太陽活動周期は、過去の周期と比べ黒点の出現が少なく、極磁場が弱いことや高速太陽風の動圧が弱まっているなどの特異性がある。本プロジェクトは、この第24太陽活動周期において太陽圏の3次元構造がどのように変貌してゆくかを、国内外の研究者との共同研究を通じて明らかにしてゆこうとしている。また、同周期における太陽圏観測から粒子加速機構の解明も目指す。具体的には、次の3つ項目について取り組んでいる。

- 1) 惑星間空間磁場 (IMF) の大規模構造とその時間変動を明らかにするため、全球的なミュオン宇宙線観測網を整備する。
- 2) 太陽風の3次元構造とその時間変動を明らかにするため、名大STE研の惑星間空間シンチレーション (IPS) 観測システムを更新する。
- 3) Solar Mass Ejection Imager (SMEI) などの太陽圏撮像観測とIPS観測を組み合わせることで、太陽風の大規模構造やCMEの伝搬過程について調査する。

各課題に関する活動報告は以下の通り。

- 1) 宇宙線強度のモジュレーションから惑星間空間磁場の大規模構造を正確に捉えるには、全方向を漏れなくカバーできる汎世界的なネットワークが必要になる。このため、我々はこれまで信州大学・宗像教授のグループと共同して、名古屋ーホバート (豪)ーSao Martinho (ブラジル)ーキューートに設置した多方向ミュオン宇宙線検出器ネットワーク (Global Muon Detector Network; GMDN) の整備を行ってきた。昨年度、メキシコ Sierra Negra 山頂 (標高 4580m) に入射方向分解能の高いミュオン計を設置し、試験観測を開始した。このミュオン計はSTE研宇宙線グループが開発した太陽中性子観測装置 SciCRT を利用したもので、定常観測が開始すれば北米から南西インド洋にかけて存在する GMDN の観測空白域を埋めることができる。試験観測の結果から大気ミュオン強度の天頂角分布や地磁気東西効果による方位角分布が期待通り確認されたが、目的としている宇宙線異方性は未だ確認できていない。これは主にデータ記録の dead time (1 イベント当たり約 1 ms) のためと考えられる。今後、データ記録を高速化し dead time を大幅に減らす必要がある。また、観測地の電源やネットワークの整備してゆく必要もある。メキシコのミュオン計の整備と並行して、今年度は地上ネットワーク観測大型共同研究 (重点) によってキューートのミュオン計の拡張を行った。従来のキューート・ミュオン計の検出面積は 9 m<sup>2</sup>であったが、今回の拡張により検出面積は 25 m<sup>2</sup>となる。拡張に

必要となる比例計数管 80 本の開発を行い、2015 年 2 月に他の関連機器（東大乗鞍観測所から譲渡されたもの）を合わせてクェートに向け海上輸送している（図 1 参照）。2015 年 3 月上旬には現地に到着予定。その後直ちに宗像らが搬送された機器を使ってミュオン計を組み上げて、年度内に観測を開始する予定である。また、本年度は 2006 年以降の GMDN 観測データを解析し、太陽活動と関連した宇宙線密度勾配の長期変動を明らかにした。



図 1 （左）2006 年 3 月に設置されたクェートのミュオン計、設置時点の検出面積は 9 m<sup>2</sup> であるが将来に 25 m<sup>2</sup> に拡張可能な構造になっている（右）同装置の拡張のために開発された比例計数管 80 本をコンテナに積んだもの

我々は愛知工業大・小島教授、大阪市大・林教授らのグループと共同で Ooty (印) の超大型ミュオン望遠鏡 GRAPES-3 (総面積 560 m<sup>2</sup>) を用いた宇宙線強度変動と CME の研究を平成 20 年度から実施している。この比類のない面積を持った宇宙線計を用いた観測からは、細かな角度分解能でミュオン強度の分布を決定することができ (天空を角度 7 度で 225 のセルに分割)、Forbush decrease (FD) や GLE に伴う宇宙線強度の空間分布を詳細に調べることが可能になる。本装置の持つ高分解能は、特異な太陽活動に伴う IMF の 3 次元構造の研究にとっても強みとなる。目下、本装置は面積を 980 m<sup>2</sup> へ拡張する作業が行われている。今年度は、小島 (愛工大)、柴田、大嶋 (中部大)、林、川上 (大阪市大)、田中 (広島大) がインド国立タタ基礎科学研究所を訪れ、装置開発や解析結果の議論を行った (図 2 参照、地上ネットワーク観測大型共同研究)。今年度に制作した比例計数管は約 400 本であり、長期安定性などのテストを行っている。また今年度の解析から、Forbush decrease の剛度依存性や IMF との関係、宇宙線強度と太陽活動パラメータとの相関分布を明らかにしている。



図2 (左) 比例計数管の制作現場と(右) 真空漏れの検査の様子

- 2) 我々は平成 24 年度補正予算および科研費基盤 A (平成 25 年度～) に基づいて富士・木曾・菅平アンテナの大規模な更新作業を実施した。昨年度に富士・木曾・菅平アンテナについてパラボラ反射面・駆動装置などの更新、塗装作業を実施し、さらに低雑音受信機および位相・利得校正装置、受信機温度測定装置、駆動制御装置(木曾のみ)などを新たに開発した。富士アンテナについては低雑音受信機などの組み込みを完了していたが、今年度は木曾アンテナへの低雑音受信機などの組み込みを実施した(図3参照)。但し、昨年2月に豪雪により富士・木曾・菅平アンテナは甚大な被害をうけたので、富士・木曾アンテナについては更新作業の前に復旧作業を行っている。菅平アンテナについては、被害があまりにも重大で、多額の費用とマンパワーを要することや再度同様な被害を避ける対策が困難であることから、復旧作業は行わず、2次被害防止のための保安工事を実施した(今後、閉鎖の予定)。更新したシステムによる多地点 IPS 太陽風観測は7月頃から開始し、11月末で終了している。このように今年度の観測期間は例年に比べ短く、途中台風や落雷による被害もあったが、例年並み以上のデータ数を取得できた。これは更新により感度が改善したためと考えられる。取得されたデータからは、太陽風構造の顕著な南北非対称性が明らかにされている。



図3 木曾アンテナへの低雑音受信機 FE327-V5 の組み込み作業

3) 昨年度（11月23～24日）に名古屋大学において国際 IPS ワークショップを開催した ([http://stsw1.stelab.nagoya-u.ac.jp/ips\\_nagoya.html](http://stsw1.stelab.nagoya-u.ac.jp/ips_nagoya.html))。これには国内外から23名が参加。本ワークショップの成果は Solar Physics 誌の特集号として出版されることになり、目下査読が行われている。また海外の研究者が STE 研の IPS データを使って行った研究論文が、Solar Physics 誌（前述の特集号を含め）、JGR 誌、ApJ 誌などに投稿・出版された。

平成24年度から IPS 観測データを宇宙天気予報に応用する研究を UCSD、韓国宇宙天気センター（KSWC）の共同で実施している。昨年度までに UCSD グループが開発した Time-dependent tomography 解析システムが KSWC に設置され、STE 研 IPS データを即時的に収集・解析して太陽風の予報が行われるようになった。今年度は、STE 研の IPS データの解析結果を D. Odstrcil 博士（NASA）の開発した ENLIL モデルに入力することで太陽風予報を行うシステムを KSWC に構築した（図4参照）。今後、このシステムをさらに発展させて IMF の Bz 成分を含めて正確に太陽風の予報が行えるようにしてゆく予定である（STE 研の H27 共同研究（国際）に応募中）。

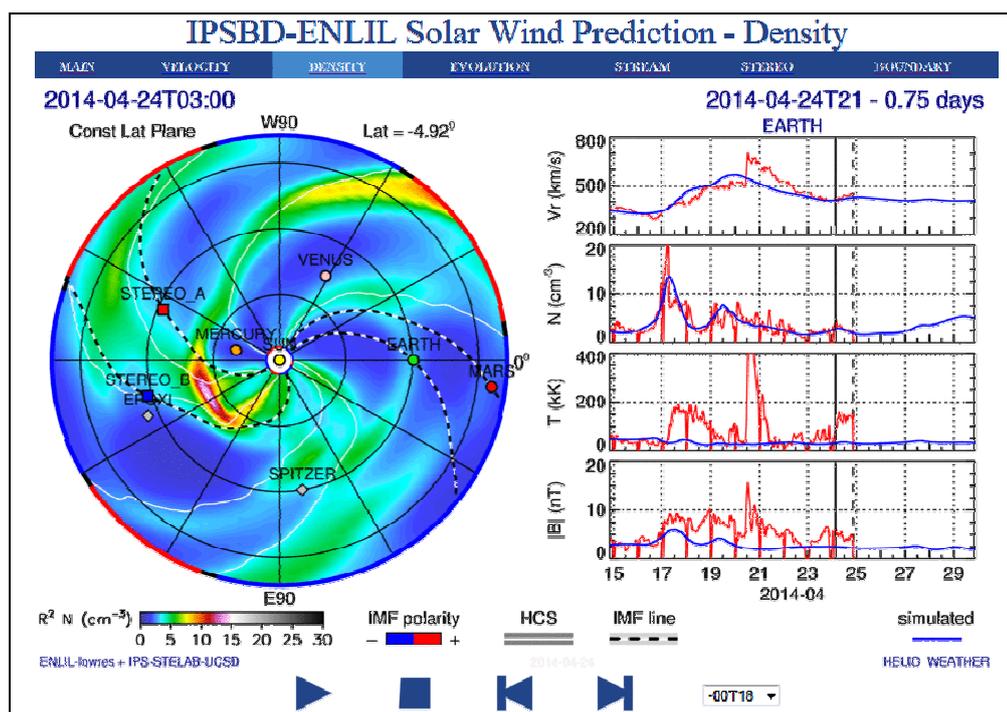


図4 STE 研の IPS データを入力として計算した ENLIL モデルによる太陽風予報

論文リスト (2013 年以降に出版された査読付き論文)

1. K. Munakata, et al., “Long term variation of the solar diurnal anisotropy of galactic cosmic rays observed with the Nagoya multi-directional muon detector”, *Astrophys. J.*, 791:22, 1-16, 2014.
2. Y. Sasai, et al., “Performance of the SciBar cosmic ray telescope (SciCRT) toward the detection of high-energy solar neutrons in solar cycle 24”, *Earth, Planets and Space*, 66, 130-137, 2014.
3. M. Kozai, et al., “The spatial density gradient of galactic cosmic rays and its solar cycle variation observed with the Global Muon Detector Network”, *Earth, Planets and Space*, 66, 151-158, 2014.
4. Y. Nagai et al., “First cosmic-ray measurements by the SciCRT solar neutron experiment in Mexico”, submitted to *Astroparticle Physics*, 2014.
5. ROCKENBACH, M., et al., GLOBAL MUON DETECTOR NETWORK USED FOR SPACE WEATHER PURPOSE, *Space Science Reviews*, 182, 1-18, 2014 (DOI 10.1007/s11214-014-0048-4)
6. M. Kozai et al., “The spatial density gradient of galactic cosmic rays and its solar cycle variation observed with the Global Muon Detector Network”, *Proc. 33<sup>rd</sup> Internat. Cosmic Ray Conf. (Rio de Janeiro)*, paper ID 183, 2013.
7. K. Munakata et al., “Long term variation of the solar diurnal anisotropy of galactic cosmic rays over four solar activity cycles”, *Proc. 33<sup>rd</sup> Internat. Cosmic Ray Conf. (Rio de Janeiro)*, paper ID 39, 2013.
8. Y. Nagai et al., “Properties of a new cosmic ray detector (SciCRT) installed at Mt. Sierra Negra Mexico”, *Proc. 33<sup>rd</sup> Internat. Cosmic Ray Conf. (Rio de Janeiro)*, paper ID 400, 2013.
9. Y. Nagai et al., “The observation of solar neutrons by a new experiment (SciCRT) using a very sensitive cosmic-ray detector”, *Proc. 33<sup>rd</sup> Internat. Cosmic Ray Conf. (Rio de Janeiro)*, paper ID 392, 2013.
10. Y. Sasai et al., “Development of a fast data taking system for a new cosmic ray detector (SciCRT) at Mt. Sierra Negra, Mexico”, *Proc. 33<sup>rd</sup> Internat. Cosmic Ray Conf. (Rio de Janeiro)*, paper ID 402, 2013.
11. H. Kojima et al., “Measurement of the radial density gradient of cosmic ray in the heliosphere by the GRAPES-3 experiment”, *Astroparticle Physics*, 62, 21-26, 2015.
12. H. Kojima et al., “Dependence of cosmic ray intensity on variation of solar wind velocity measured by the GRAPES-3 experiment for space weather studies”, Submitted to *Astroparticle Physics*, 2015.
13. M. Tokumaru, K. Fujiki, and T. Iju, North-South Asymmetry in Global Distribution of the Solar Wind Speed During 1985-2013, *J. Geophys. Res.*, in press, 2015.
14. Ando, H., D. Shiota, T. Imamura, M. Tokumaru, A. Asai, H. Isobe, M. Pazold, B. Hausler, and M. Nakamura, Internal structure of a coronal mass ejection revealed by radio occultation observations using Akatsuki spacecraft, Submitted to *J. Geophys. Res.*, 2015.
15. Jackson, B.V., P.P. Hick, A. Buffington, H.-S. Yu, M. M. Bisi, M. Tokumaru, and X. Zhao, A Determination of Bz from Closed-Loop Propagation, *Astrophys. J. Lett.*, in press, 2015
16. E. Aguilar-Rodriguez, J.C. Mejia-Ambriz, B.V. Jackson, A. Buffington, E. Romero-Hernandez, J.A. Gonzalez-Esparza, M. Rodriguez-Martinez, P. Hick, M. Tokumaru, and P.K. Manoharan, Comparison of solar wind 1 speeds using wavelet transform and Fourier analysis in IPS data, Submitted to *Solar Physics*, 2015.
17. Fujiki, K., M. Tokumaru, T. Iju, K. Hakamada, and M. Kojima, Relationship Between Solar

- Wind Speed and Coronal Magnetic Field Properties, Submitted to Solar Physics, 2015.
18. Yu, H.-S., B.V. Jackson, P.P. Hick, A. Buffington, D. Odstrcil, C.C. Wu, J.A. Davies, M.M. Bisi, and M. Tokumaru, 3D reconstruction of interplanetary scintillation (IPS) remote-sensing data: global solar wind boundaries for driving 3D-MHD models, Submitted to Solar Physics, 2015.
  19. P. Janardhan, Susanta Kumar Bisoi, S. Ananthkrishnan, M. Tokumaru, K. Fujiki, L. Jose, and R. Sridharan, Solar and Interplanetary Signatures of Declining Solar Magnetic Fields: Are We Headed to a Long Period of Little or No Sunspot Activity?, Submitted to J. geophys. Res., 2015.
  20. Iju, T., S. Abe, and M. Tokumaru, Ken'ichi Fujiki, Plasma distribution of Comet ISON (C/2012 S1) observed using the radio scintillation method, *Icarus*, 252, 301-310, 2015 (doi:10.1016/j.icarus.2015.02.007)
  21. Jackson, B.V, D. Odstrcil, H.-S. Yu, P.P. Hick, A. Buffington, J.C. Mejia-Ambriz, J. Kim, S. Hong, Y. Kim, J. Han and M. Tokumaru, THE UCSD KINEMATIC IPS SOLAR WIND BOUNDARY AND ITS USE IN THE ENLIL 3D-MHD PREDICTION MODEL, *Space Weather*, 13, 104-115, 2015 (doi:10.1002/2014SW001130)
  22. Mejia-Ambriz, J.C., B.V. Jackson, J.A. Gonzalez-Esparza, A. Buffington, M. Tokumaru, E. Aguilar-Rodriguez, Remote sensing of solar wind speeds using IPS at 140 and 327 MHz: MEXART and STEL, Submitted to Solar Physics, 2014.
  23. Miyamoto, M., T. Imamura, M. Tokumaru, H. Ando, H. Isobe, A. Asai, D. Shiota, T. Toda, B. Hausler, M. Patzold, A. Nabatov, and M. Nakamura, Radial distribution of compressive waves in the solar corona revealed by radio occultation observations using Akatsuki spacecraft, *Astrophysical Journal*, 797, 51, 2014 (doi:10.1088/0004-637X/797/1/51)
  24. Kim, T. K., N. V. Pogorelov, S. N. Borovikov, B. V. Jackson, H.-S. Yu, M. Tokumaru, Modeling the Heliosphere Using Tomographic Reconstruction of the Solar Wind from Interplanetary Scintillation Observations as Boundary Conditions, *Journal of Geophysical Research*, 119, 7981-7997, 2014 (doi:10.1002/2013JA019755)
  25. Kim, T. K., Pogorelov, N. V., Borovikov, S. N., Hayashi, K., Jackson, B. V., Tokumaru, M., Yu, H., Modeling the Global Heliosphere Using IPS-derived Time-dependent Boundary Conditions, Outstanding Problems in Heliophysics: From Coronal Heating to the Edge of the Heliosphere. Proceedings of a conference held 14-19 April 2013 at Myrtle Beach, South Carolina, USA. Edited by Qiang Hu and Gary P. Zank. ASP Conference Series, Vol. 484, 2014, p.91
  26. Susanta Kumar Bisoi, P. Janardhan, M. Ingale, P. Subramanian, S. Ananthkrishnan, M. Tokumaru, and K. Fujiki, A study of density modulation index in the inner solar wind during solar cycle 23, *Astrophysical Journal*, Vol. 795, 69 (8pp), 2014 (doi:10.1088/0004-637X/795/1/69)
  27. McComas, D.J., F. Allegrini, M. Bzowski, M.A. Dayeh, R. DeMajistre, H.O. Funsten, S.A. Fuselier, M. Gruntman, P.H. Janzen, M.A. Kubiak, H. Kucharek, E. Mobius, D.B. Reisenfeld, N.A. Schwadron, J.M. Sokol, M. Tokumaru, IBEX: The First Five Years (2009-2013), *Astrophysical Journal Supplement Series*, Vol. 213, 20 (28pp), 2014 (doi:10.1088/0067-0049/213/2/20)
  28. Imamura, T., M. Tokumaru, H. Isobe, D. Shiota, H. Ando, M. Miyamoto, T. Toda, B. Hausler, M. Patzold, A. Nabatov, A. Asai, K. Yaji, M. Yamada, M. Nakamura, Outflow structure of the quiet Sun corona probed by spacecraft radio scintillations in strong scattering, *Astrophysical Journal*, 788, 117, 2014 (doi:10.1088/0004-637X/788/2/117)
  29. E. Aguilar-Rodriguez, M. Rodriguez-Martinez, E. Romero-Hernandez, J. C. Mejia-Ambriz, J. A. Gonzalez-Esparza, and M. Tokumaru, The wavelet transform function to analyze interplanetary

- scintillation observations, *Geophysical Research Letters*, 41, 3331-3335, 2014 (doi:10.1002/2014GL060047).
30. Ken'ichi Fujiki, Haruichi Washimi, Keiji Hayashi, Gary P. Zank, Munetoshi Tokumaru, Takashi Tanaka, Vladimir Florinski, and Yuki Kubo, MHD Analysis of the Velocity Oscillations in the Outer Heliosphere, *Geophysical Research Letters*, 41(5), 1420-1424, 2014 (DOI: 10.1002/2014GL059391)
  31. Iju, T., M. Tokumaru, and K. Fujiki, Kinematic properties of slow ICMEs and an interpretation of a modified drag equation, *Solar Physics*, Vol. 289 (6), 2157-2175, 2014.
  32. Iju, T., M. Tokumaru, and K. Fujiki, Radial speed evolution of interplanetary coronal mass ejections during solar cycle 23, *Solar Physics*, Vol. 286 (1), 331-353, 2013.
  33. Iju, T., M. Tokumaru, and K. Fujiki, Kinematics of Interplanetary Coronal Mass Ejections in the Inner Heliosphere, *Proceedings of Solar Wind 13*, AIP, (AIP Conf. Proc. 1539), 183-186 (2013) (doi: 10.1063/1.4811018).
  34. Tokumaru, M., K. Fujiki, and M. Kojima, Evolution of global distribution of the solar wind from cycle 23 to the early phase of cycle 24, *Proceedings of Solar Wind 13*, AIP, (AIP Conf. Proc. 1539), 275-278 (2013) (doi: 10.1063/1.4811041).
  35. Bzowski, M., Sokol, J.M., Tokumaru, M., Fujiki, K., Quemerais, E., Lallement, R., Ferron, S., Bochsler, P., McComas, D.J., 2013, Solar parameters for modeling the interplanetary background, Chapter 3 in "Cross-Calibration of Past and Present Far UV Spectra of Solar System Objects and the Heliosphere", ISSI Scientific Report Series 13, ed. R.M. Bonnet, E. Quemerais, M. Snow, Springer Science+Business Media, New York, pp 67-138, 2013, 10.1007/978-1-4614-6384-9\_3 (astro-ph/1112.2967).
  36. Tokumaru, M., Three-dimensional exploration of the solar wind using observations of interplanetary scintillation, *Proceedings of the Japan Academy Ser. B*, Vol.89(2), pp.67-79, 2013.
  37. Kojima, M., W. A. Coles, M. Tokumaru, and K. Fujiki, Scintillation Measurements of the Solar Wind Velocity in Strong Scattering Near the Sun, *Solar Physics*, Vol. 283 (2), pp 519-540, 2013.
  38. 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*, Vol. 285, Issue 1, page:167-200, 2013 (doi:10.1007/s11207-012-993-9)
  39. Jackson, B.V., J. M. Clover, P. P. Hick, A. Buffington, M. M. Bisi, M. Tokumaru, Inclusion of Real-Time in-situ Measurements into the UCSD Time-Dependent Tomography and Its Use as a Forecast Algorithm, *Sol. Phys.*, Vol.285, pp.151-165, 2013 (DOI 10.1007/s11207-012-0102-x)