

令和 6 年 9 月 11 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03640

研究課題名(和文) 惑星間空間シンチレーション観測による太陽風加速と微細な密度ゆらぎとの関連性の解明

研究課題名(英文) Study of the relationship between solar wind acceleration and microturbulence by using interplanetary scintillation observations

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・名誉教授

研究者番号：60273207

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：1985-2019年における惑星間空間シンチレーション(IPS)観測データの計算機トモグラフィ解析により太陽風の微細な密度揺らぎ N_e と速度 V の関係を調査した。その結果、 N_e と V の間には $N_e \sim V^{\alpha}$ の関係があり、 α は2009年までは-0.5、それ以降は+1であることが判った。この事は、未解明である太陽風加速機構を考える上で重要な示唆を与える。本研究で得られた太陽風速度や密度擾乱度(g 値)のデータを用いて、太陽活動と太陽風速度の全球的分布の関係や惑星間空間擾乱の長期変動を明らかにした。さらに、同データを国際共同研究に供することで太陽風密度の全球分布やCMEイベントの物理特性を決定した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽風の変動は宇宙機器や地上の電気・通信設備に深刻な影響を与えることが知られており、その精度良い予測(宇宙天気予報)が現代社会において重要な課題となっている。宇宙天気予報を困難にしている原因の一つが太陽風加速機構の謎であった。本研究の成果は、太陽風加速機構を解明する上で重要な手掛かりを与えた他、IPS観測が宇宙天気予報に有用である事を示した。よって、本成果は宇宙天気予報の精度向上に寄与するものである。また、また、IBEXチームとの国際共同研究の成果は未踏野である太陽圏外圏域や恒星間空間の解明において重要な貢献となった。

研究成果の概要(英文)：The relation between solar wind speeds (V) and small-scale density fluctuations (N_e) was investigated from the computer-assisted tomography analysis of interplanetary scintillation observations for 1985-2019. The results demonstrated that the N_e was related to V as $N_e \sim V^{\alpha}$, where $\alpha = -0.5$ until 2009 and $\alpha = +1$ after that. This provides an important implication on the solar wind acceleration mechanism which remains an open question. Using data of the solar wind speed and density disturbance factor (g -value) obtained from this study, we elucidated the relation between the solar activity and global distribution of the solar wind speed and also the long-term variation of interplanetary disturbances. Furthermore, we determined the global distribution of the solar wind density and physical properties of the CME event from international collaborations using those data.

研究分野：惑星間空間物理学

キーワード：太陽風加速 惑星間空間シンチレーション プラズマ乱流 宇宙天気予報

1. 研究開始当初の背景

太陽から超音速で吹き出すプラズマの流れ・太陽風は、地球近傍の宇宙環境や超高層大気に大きな影響を与えており、高速の太陽風が地球へ到来すると宇宙機器や無線通信に深刻な障害が発生することがある。これらの宇宙災害を軽減するため、太陽風の影響を精度よく予報すること（宇宙天気予報）が現代社会の重要課題となっている。一方で、太陽風は約 100AU の広がりをもった太陽圏を形成し、恒星間空間から侵入する有害な高エネルギー粒子（銀河宇宙線）のフラックスを減らすことで、地上で生命が維持できる放射線環境を作りだしている。よって、太陽風や太陽圏は生命を育む環境の最外延部として、その物理過程を正確に理解する必要がある。

このような観点から太陽風に関する正確な理解は重要であるが、太陽風が如何にして生成・加速されるかという最も根本的な事柄について未だ説明されておらず、論争が続いている。目下、提唱されている仮説の中で有力視されているのが、太陽から放射される磁気波動によって太陽風を加速させるというモデル（磁気波動説）である。この説では太陽風を加速させるエネルギーを得るため磁気波動を効率よく散逸させることが必要となるが、最近の研究から太陽風の密度ゆらぎが磁気波動による太陽風加速において重要な役割を果たしていることが報告された（Shoda et al., 2019）。即ち、太陽風中には様々な空間スケールにわたって密度揺らぎが存在しており、これが磁気波動を反射することで散逸の効率を高めるのである。

太陽風の密度ゆらぎは、飛翔体による”その場”観測の他、電波が通過した際に発生する散乱現象（惑星間空間シンチレーション IPS など）の観測から研究されてきた。特に電波散乱観測は、従来の飛翔体観測では測れない微細（数 10 ~ 数 100 km）なスケールの密度ゆらぎ（micro-turbulence）に感度がある。このよう微細な密度ゆらぎは従来の飛翔体観測では分解能の制約から十分調査されていない。一方、過去の IPS 観測からはプロトンのジャイロ半径以下のスケールで Kolmogorov 的な乱流のエネルギーが散逸する現象が報告されており（Yamauchi et al., 1998 など）、太陽風の加熱や加速を考える上で重要な情報を提供している。また、過去の IPS 観測からは、太陽風速度 V と密度ゆらぎ ΔN_e の間に $\Delta N_e \propto V^{-0.5}$ の関係があることが報告されている（図 1 参照、Asai et al., 1998; Tokumaru et al., 2012）。この式の意味は十分理解されていないが、もし高速風と低速風間に質量フラックス (NV) が一定の関係があるなら、密度擾乱度 ($\Delta N_e/N$) と速度には $\Delta N_e/N \propto V^{0.5}$ の関係が示唆され、運動量フラックス (NV^2) が一定の場合、 $\Delta N_e/N \propto V^{1.5}$ が示唆される。このことは磁気波動説において密度ゆらぎが太陽風加速の効率を制御していることと整合している。申請者は、予備的な研究から V と ΔN_e の関係における冪指数 -0.5 は期間を通じて一定ではなく、最近の太陽活動が衰退した時期に $\Delta N_e/N$ の V 依存性が強くなることを示す結果を得ていた。このことは太陽活動衰退期に太陽風加速の効率が高くなっていることを示した先行研究（Fujiki et al., 2015）の結果とも一致する。 V と ΔN_e の関係に関する研究は限られた期間のデータについてしか実施されておらず、両者の関係をより長期にわたって詳細に明らかにすることで、太陽風加速機構の謎に迫ることが期待される。

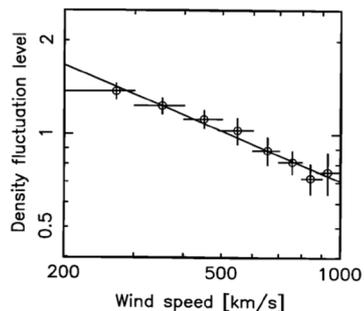


図 1 V (横軸) と ΔN_e (縦軸) との関係、実線 (Asai et al., 1998)

2. 研究の目的

本研究では名古屋大学宇宙地球環境研究所（名大 ISEE）の IPS 観測データから太陽風の速度

V と密度ゆらぎ ΔN_e の関係とその長期変動を明らかにし、太陽風加速における密度ゆらぎの果たす役割を検証することを目指す。名大 ISEE では 1980 年代から独自に開発した大型電波望遠鏡群を用いて多地点 IPS 観測を実施し、太陽風のデータを取得している (Kojima & Kakinuma, 1990; Tokumaru, 2013)。多地点 IPS 観測では、電波を散乱する太陽風の密度ゆらぎをトレーサーにして観測地点間の IPS の時間差を測定することで、太陽風の速度を求める。ただし、この速度には視線積分の効果が含まれているため、その補正が必要となる。申請者らが開発した計算機トモグラフィ (CAT) 解析法 (Kojima et al., 1998, 2007) は IPS 観測データの視線積分効果を補正し、飛翔体観測と比べうる精度で太陽風速度の全球的分布を決定できる。 V と ΔN_e の関係式は、この CAT 解析において IPS 観測データから太陽風速度の全球的分布を復元する際の重み関数として用いられている。よって、より正確な V と ΔN_e の関係式が決定できれば、CAT 解析の精度が向上する。本研究では、改善された CAT 解析を使って名大 ISEE の IPS 観測データを解析し、太陽活動に伴う全球的な太陽風の長期変動をより詳細に解明することも目指している。さらに、改善された CAT 解析の結果を Interstellar Boundary Explorer (IBEX) チームなどに提供することで太陽圏に関する国際共同研究 (McComas et al., 2020; Sokol et al., 2020 など) にも寄与する。

3. 研究の方法

本研究では名大 ISEE の IPS データから 2 つの方法で V と ΔN_e の関係を決定した。

1985年～2019年の期間についてIPSデータをCAT解析し、その結果が地球軌道付近の飛翔体観測データに最も一致するような V と ΔN_e の関係式を求める。本研究では、関係式 $\Delta N_e \propto V^\alpha$ を仮定し、年毎に最適な冪指数 α を決定した。最適化の指標としては、相関係数の他、両者の差 (bias値およびrms値) を用いた。比較する飛翔体観測データは、地球付近(L1地点)の探査機および極軌道のUlysses探査機で取得されたものである。さらに、CAT解析における他のパラメータの変化やデータ数の増減によってどれくらい飛翔体データとの食い違いを生じるかについて評価し、上記で求めた関係式の有意性を確認した。名大ISEEのIPS観測からは、太陽風速度とともにIPSの相対的な強度 (g 値) のデータが得られる。 g 値は ΔN_e の視線積分に比例していると考えられるので、IPS観測で得られた速度と g 値を同時にCAT解析することで V と ΔN_e の関係を決定することができる。 g 値データは1997年から現在まで取得されているが、2009年までの g 値データを用いた先行研究 (Tokumaru et al., 2012) からは解析期間を通じて関係式 $\Delta N_e \propto V^{-0.5}$ でよく説明できることが示されている。本研究では、2009年以降の g 値データについてCAT解析し、 V と ΔN_e の関係を決定した。 g 値データは観測システムの長期変動に影響される可能性があるため、CAT解析の前に観測システムの校正実験を行い、観測システムの長期変動の影響を評価した。また、信頼性の高い校正実験を行うため、観測システムの校正部を改良した。

得られた V と ΔN_e の結果を比較して、最も確かな V と ΔN_e の関係式を決定した。それを用いて1985年から現在までの太陽風速度分布を求め、太陽磁場の磁力線拡大率や光球面磁場強度との関係を調査した。この解析では、米国国立太陽観測所の太陽磁場観測データとポテンシャル磁場モデルを使ってコロナの磁力線を追跡し、太陽風の流源面と光球面磁場との対応付けを行った。以上の結果を総合して、磁気波動モデルの観点から密度ゆらぎが太陽風加速に果たしている役割や太陽活動の長期変動との関連を議論した。さらに、本研究で得られた太陽風データを用いて、IBEX チームを含む海外の研究者との共同研究を行った。

4. 研究成果

本研究では以下の成果が得られた。

- (1) まず 1985 年～2019 年の IPS データについて $\beta = -0.5$ を用いて CAT 解析を行った。その結果得られた太陽風速度は、2008 年まで地球軌道付近および Ulysses の観測結果と良い一致が見られたが、2009 年以降は CAT 解析の速度が飛翔体観測より高い値を示すことがわかった。この食い違いは IPS データ数の変化などの効果では説明できず、唯一の値を変化させることで解消することができた。2009 年以降の期間について飛翔体観測に最もよく一致する $\beta = +1.0$ であった (図 2 参照)。2009 年は太陽活動が大きく低下したサイクル 24 が始まった時に対応し、本研究で得られた結果は太陽風の加速効率が太陽活動の長期変動によって変化することを示している。即ち、本研究の結果はサイクル 24 では $\Delta N_e/N$ がより強く V に依存していることを示唆している (Tokumaru et al., 2021)。

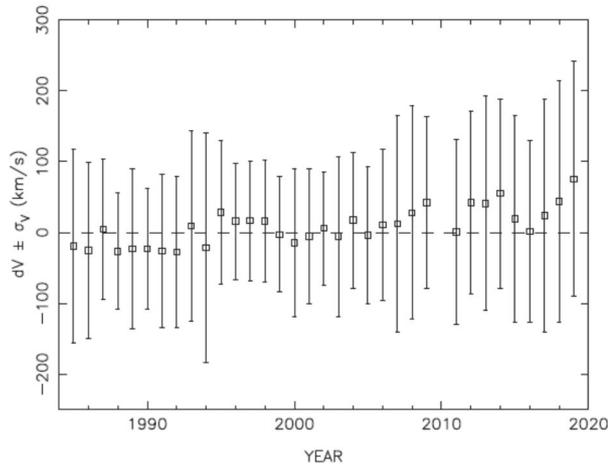


図 2 最適化された β を用いた場合の CAT 解析と飛翔体観測の速度差、 dV : bias、 σv : rms (Tokumaru et al., 2021)

- (2) g 値データを取得している豊川電波望遠鏡の校正装置を改良し、信頼性の高い校正実験を行えるようにした。校正実験の結果からは、パラボラ反射鏡を除いて電波望遠鏡の性能変化は無視できることが判った。そこで、2019 年までの期間について g 値と速度を同時に CAT 解析し、年毎に ΔN_e と V の関係を求めた。その結果、2009 年以降も全体としては 2008 年までの結果と同様な傾向 (< 0) を示していたが、 $V < 500 \text{ km/s}$ の低速風に注目すると > 0 を示すようになっていたことが判った。飛翔体観測が行われた地球軌道付近は低速風が卓越するので、(1) で得られた結果と矛盾はないと考えられる。申請者らの先行研究 (Tokumaru et al., 2018) からサイクル 24 における太陽活動の低下に伴って、従来の高密度低速風とは異なる低密度低速風の領域が増えていることが指摘されている。本研究で判明した $V < 500 \text{ km/s}$ における ΔN_e と V の関係の変化は、サイクル 24 における低密度低速風の発達と密接に関連していると考えられる (Tokumaru et al., 2021)。
- (3) 最適化した ΔN_e と V の関係式を用いて 1985 年～2019 年の期間の IPS 観測データを CAT 解析し、太陽磁場特性と太陽風速度分布の関係を調査した。その結果、高速風と低速風が太陽の極磁場強度の増減に伴って高い相関を持って系統的に変化していることが判った。サイクル 24 の太陽活動低下とともに極磁場強度も弱まり、高速風の面積も減少している。また、サイクル 23/24 および 24/25 極小期において高緯度の太陽風速度が南北非対称な分布をしていたことが判明し、これは太陽磁場の非対称性を反映したものと考えられる (Tokumaru et al., 2021)。
- (4) 本研究によって 1997 年から現在までの g 値データが連続して解析できるようになった。そこで、 g 値データを使って惑星間空間擾乱の統計解析を行った。まず、 g 値データから IPS 指数を計算し、地球軌道付近の太陽風速度・密度、Dst 地磁気指数との相関を求めた。その結果、IPS 指数が増加すると同時に太陽風密度が増加し、1～数日遅れて太陽風速度が増加す

ることが判った。また、Dst 指数は 1~数日遅れて減少することもわかった。これらのことから IPS 指数は惑星間空間擾乱の地球到来を示す指標として使えることがわかった。IPS 指数を使って年毎に惑星間空間擾乱の発生頻度を求めたところ、極大期および極小期にピークが見られた。極大期および極小期のピークは、それぞれ CME および Stream Interaction Region(SIR)の寄与によるものと考えられる。また、サイクル 24 では極大期にピークが見られなかったことは、同サイクルにおける太陽活動の低下を反映していると考えられる。さらに、CME イベントおよび SIR イベントについて IPS 指数の Superposed Epoch 解析を行ったところ、両者の東西対称性に大きな違いあることがわかった。即ち、CME イベントでは東西対称に IPS 指数の増加が生じるのに対し、SIR イベントではイベント通過前は東側、通過後は西側で IPS 指数が増加する。このことは CME および SIR の大規模構造の違いを反映したものと考えられる (Tokumaru et al., 2023a,b)

- (5) 本研究で作成した太陽風速度の全球的データを IBEX チームに提供して、国際共同研究を行った。IBEX データから恒星間ガスの空間分布を決定するには太陽風密度の全球的分布を知らなければならない。そこで太陽風のエネルギーフラックスが全球的に一定であることを仮定し、本研究で求めた太陽風速度データから太陽風密度の全球的分布を決定した(Porowski et al., 2022, 2023)。この密度モデルを使って IBEX 観測データの解析が行われている。また、本研究で作成した g 値データを使って Jackson 博士 (UCSD) らと国際共同研究を行い、2022 年 3 月 10 日に発生した CME イベントの 3 次元構造や伝搬特性を明らかにした (Jackson et al., 2023)。

<引用文献>

- Asai, K., et al., JGR, 103, 1991, 1998 (DOI: 10.1029/97JA02750)
Fujiki, K., et al., Solar Phys., 290, 2491, 2015 (DOI: 10.1007/s11207-015-0742-8)
Jackson, B.V. et al., Solar Physics, 298:74, 2023 (<https://doi.org/10.1007/s11207-023-02169-8>)
Kojima, M., & T. Kakinuma, SSR, 53, 173, 1990 (DOI: 10.1007/BF00212754)
Kojima, M., et al., JGR, 103, 1981, 1998 (doi:10.1029/97JA02162)
Kojima, M., et al., A&ATrans, 26, 467, 2007 (DOI: 10.1080/10556790701596200)
McComas, D., et al., ApJS, 248, 26, 2020 (DOI: 10.3847/1538-4365/ab8dc2)
Porowski, C., et al., ApJS, 259:2 (21pp), 2022 (DOI:10.3847/1538-4365/ac35d7)
Porowski, C., et al., ApJS, 264:11 (18pp), 2023 (DOI:10.3847/1538-4365/ac9fd4)
Shoda, M., et al., ApJL, 880, L2, 2019 (DOI:10.3847/2041-8213/ab2b45)
Sokol et al., ApJ, 897, 179, 2020 (DOI: 10.3847/1538-4357/ab99a4)
Tokumaru, M., et al., JGR, 117, A06108, 2012 (DOI: 10.1029/2011JA017379)
Tokumaru, M., Proc.Jpn.Acad.Ser.B, 89, 67, 2013 (DOI: 10.2183/pjab.89.67)
Tokumaru, M., et al., JGR, 123, 2520, 2018 (doi:10.1002/2017ja025014)
Tokumaru, M., et al., ApJ, 922:73 (18pp), 2021 (DOI:10.3847/1538-4357/ac1862)
Tokumaru, M., et al., Solar Phys., 298:22, 2023a (DOI:10.1007/s11207-023-02116-7)
Tokumaru, M., et al., Solar Phys., 298:127, 2023b (DOI:10.1007/s11207-023-02220-8)
Yamauchi, Y., et al., JGR, 103, 6571, 1998 (DOI: 10.1029/97JA03598)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Tokumaru Munetoshi、Fujiki Ken'ichi、Iwai Kazumasa	4. 巻 298
2. 論文標題 Interplanetary Scintillation Observations of Solar-Wind Disturbances During Cycles 23 and 24	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Solar Physics	6. 最初と最後の頁 22
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11207-023-02116-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tokumaru Munetoshi、Fujiki Ken'ichi、Kojima Masayoshi、Iwai Kazumasa	4. 巻 922
2. 論文標題 Global Distribution of the Solar Wind Speed Reconstructed from Improved Tomographic Analysis of Interplanetary Scintillation Observations between 1985 and 2019	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 73～73
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ac1862	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Tokumaru Munetoshi、Nagai Miho、Fujiki Ken'ichi、Iwai Kazumasa	4. 巻 298
2. 論文標題 East-West Asymmetry in Interplanetary-Scintillation-Level Variation Associated with Solar-Wind Disturbances	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Solar Physics	6. 最初と最後の頁 127
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11207-023-02220-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Porowski C.、Bzowski M.、Tokumaru M.	4. 巻 259
2. 論文標題 A New 3D Solar Wind Speed and Density Model Based on Interplanetary Scintillation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 2～2
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4365/ac35d7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Porowski C., Bzowski M., Tokumaru M.	4. 巻 264
2. 論文標題 On the General Correlation between 3D Solar Wind Speed and Density Model and Solar Proxies	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 11~11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/ac9fd4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Jackson Bernard V., Tokumaru Munetoshi, Iwai Kazumasa, Bracamontes Matthew T., Buffington Andrew, Fujiki Ken'ichi, Murakami Go, Heyner Daniel, Sanchez-Cano Beatriz, Rojo Mathias, Aizawa Sae, Andre Nicolas, Barthe Alain, Penou Emmanuel, Fedorov Andrei, Sauvaud Jean-Andre, Yokota Shoichiro, Saito Yoshifumi	4. 巻 298
2. 論文標題 Forecasting Heliospheric CME Solar-Wind Parameters Using the UCSD Time-Dependent Tomography and ISEE Interplanetary Scintillation Data: The 10 March 2022 CME	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Solar Physics	6. 最初と最後の頁 74
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11207-023-02169-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 徳丸宗利
2. 発表標題 惑星間空間シンチレーション指数と宇宙天気の関係
3. 学会等名 JpGU2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 徳丸宗利
2. 発表標題 惑星間空間シンチレーション指数から求めたサイクル23-24における太陽風擾乱の発生頻度の長期変動
3. 学会等名 第152回 SGEPS講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 徳丸宗利
2. 発表標題 Solar wind disturbances observed by interplanetary scintillation during 1997-2019
3. 学会等名 The 5th ISEE Symposium "Toward the future of Space-Earth Environmental Research" (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tokumaru, M., K. Fujiki, M. Kojima, K. Iwai
2. 発表標題 Improvement of the computer assisted tomography of interplanetary scintillation observations
3. 学会等名 JpGU2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 徳丸宗利、永井美帆、藤木謙一、岩井一正
2. 発表標題 太陽風擾乱イベントにおいて観測される惑星間空間シンチレーション強度の東西非対称性
3. 学会等名 第154回 SGEPPSS講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 徳丸宗利
2. 発表標題 惑星間空間シンチレーション観測による太陽風速度モデルの最適化
3. 学会等名 ISEE研究集会「太陽圏・宇宙線関連の共同研究成果報告会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Annual Solar Wind Speed Maps
https://stsw1.isee.nagoya-u.ac.jp/annual_map.html
IPS観測求めたg値データ
<https://stsw1.isee.nagoya-u.ac.jp/vlist/g/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	丸山 益史 (Maruyama Yasushi)	名古屋大学・全学技術センター (13901)	
研究協力者	山崎 高幸 (Yamasaki Takayuki)	名古屋大学・全学技術センター (13901)	
研究協力者	藤木 謙一 (Fujiki Ken'ichi) (20303597)	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・助教 (13901)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
ポーランド	Space Research Centre PAS (CBK PAN)		
米国	UCSD/CASS		