

令和 4 年 6 月 12 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H01153

研究課題名(和文) ドップラー振動撮像装置を用いた木星表面振動観測：内部構造と起源の解明に向けて

研究課題名(英文) Observation of Jovian surface oscillations with a Doppler imaging spectrograph:
Toward an understanding of the interior and origin of Jupiter

研究代表者

生駒 大洋 (Ikoma, Masahiro)

国立天文台・科学研究部・教授

研究者番号：80397025

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,200,000円

研究成果の概要(和文)：太陽系最大の惑星である木星は(人類の存在も含め)太陽系全体の形成に大きな影響をもたらしたと考えられている。しかし、その成因には未だ謎が残っている。木星形成を理解する手がかりは惑星深部に隠されている。本研究では、地球で行われている地震波を用いた内部探査をヒントに、木星内部を伝わる波を調べることで内部探査を行う装置開発・観測体制の整備をおこなった。また、古典的な木星形成理論を改良し、最新の内部構造の理解に即した新たな木星形成理論を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

木星は太陽系最大の天体であり、太陽系全体の形成に多大な影響をもたらしてきた。つまり、我々の住む地球の存在も、木星の存在と切り離すことができない。また、小惑星が地球に水や有機物を運んだという説があるが、その小惑星は元々木星の力で地球に飛ばされる。したがって、地球上の生命発生にも木星の存在が影響しているといえる。本研究課題は、我々の誕生の根本を明らかにするという意義を持つといえる。

研究成果の概要(英文)：Jupiter, the heaviest planet in the Solar System, is thought to have had a large influence on the formation of the entire Solar System (including the existence of humans). However, its formation remains a mystery. Clues to understanding the formation of Jupiter are hidden in the planetary interior. In this study, we have developed an instrument and observation system to investigate the interior of Jupiter by investigating waves propagating through the planet's interior, taking a cue from the seismic exploration of the planet's interior conducted on the Earth. In addition, we have improved the classical theory of Jupiter formation and constructed a new theory of Jupiter formation in line with the latest understanding of the interior structure of Jupiter.

研究分野：惑星天文学

キーワード：惑星大気 惑星内部 惑星形成

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

太陽系最大の惑星である木星は、その強い重力によって太陽系全体の形成に多大な影響をもたらしたと考えられる。そのため、木星の形成過程の理解なくして、他の惑星や小天体の起源、さらに言えば、地球の水や有機物の起源を解明することはできないと言える。木星が現在の位置になぜ存在し、いつ形成されたのか、さらに太陽系外に木星とは明らかに異なる巨大惑星が存在する原因は何か。木星型惑星の成因には未だ謎が多い。

木星形成の解明の鍵を握るのが、木星内部における重元素の量と分布である。しかし、木星内部構造は未だ不確定性が大きい。木星の内部構造の推定は、木星探査機がフライバイした際に測定した重力場に関する情報と統合的な内部構造モデルを理論的に再現することで行われてきた。しかし、コア質量やエンベロープ中の重元素量に関する現在の推定値には、不確定性が非常に大きく、木星形成過程を制約するのに全く不十分である。

一方、古典的な木星型惑星形成モデルでは、固体とガスが別々に集積することを仮定しており、重元素からなる中心核(コアという)と、それを取り囲む水素・ヘリウムからなる厚い大気(エンベロープという)という二層構造を必然的に予測する。しかし、木星周回機 JUNO による重力場観測データは、そのような明確な二層構造を必ずしも支持しない。

2. 研究の目的

従来の内部構造推定は、惑星周囲の重力場の情報を用いた間接的な方法に基づいており、それが内部構造の不確定性の根本的な原因であるといえる。そのため、より直接的に内部を探索できる方法が必要である。本研究課題では、その手法と装置、観測体制を確立することを目的とする。

一方、従来の木星形成理論は、中心コアの形成に焦点を当てた固体集積モデルに基づいていたが、木星形成後期においても固体集積が起きる可能性がある。そのため、特に木星形成後期においてエンベロープに重元素を取り込む物理過程を精査し、木星内部構造に関する最新の理解と整合する惑星形成モデルを構築することも目的とする。

3. 研究の方法

日震学で用いられてきた手法を木星に応用し、木星内部に伝わる波(木震波)を用いて、木星内部探査を行う手法を開発する。フランス・コートダジュール天文台の研究者およびアメリカ・ニューメキシコ州立大学の研究者との国際共同で、ドップラー振動撮像装置を開発し、国立天文台ハワイ観測所岡山分室(旧岡山天体物理観測所)188cm 望遠鏡クーデ室に設置する。同じ撮像装置をフランス・カレルン天文台およびアメリカ・サンスポット天文台それぞれにある 1m 望遠鏡にも設置する。そして、約 1 ヶ月間 3 地点での 24 時間ネットワーク観測を行う。

一方、理論面では、木星型惑星形成後期における集積過程を数値シミュレーションによって明らかにする。固体に関しては、円盤ガス集積によって成長しつつあり、中心星方向に移動するガス惑星の周囲の微惑星群に対して N 体シミュレーションを行い、固体集積過程を定量化する。一方、円盤ガスの惑星への降着過程を明らかにするために、輻射流体シミュレーションを行い、ガスの流入過程及びガス惑星の成長率を定量化する。

4. 研究成果

(1) ドップラー振動撮像装置の開発およびネットワーク観測体制の確立：木星および土星の表面自由振動を観測するドップラー振動撮像装置をフランス・コートダジュール天文台にて開発した。国立天文台ハワイ観測所岡山分室(以下、岡山観測所)188cm 望遠鏡用インタフェースの開発が予想以上に困難であることがわかり、予定より開発に時間を要したが、最終的に開発が完了し、岡山観測所 188cm 望遠鏡ドーム内クーデ室に輸送・設置した(図 1a; Goncalves et al. 2019, Schmider et al. 2020)。そして、同ドップラー振動撮像装置をフランス・カレルン天文台とアメリカ・サンスポット天文台に設置し、24 時間ネットワーク観測可能な体制を整えた。

(2) 木星表面ドップラー観測データの取得および大気運動の制約：岡山観測所 188cm 望遠鏡とドップラー振動撮像装置を用いて、木星観測を実施し、日本初の木星表面ドップラー観測データの取得に成功した(図 1b)。そして、十分な精度の観測データを取得できることを確認した。図 2 に岡山観測所での一夜の観測データの解析によって得られた速度プロファイルを示すが、赤道付近のジェットと大赤斑まわりの回転を確認することができる。さらに、ドップラー振動撮像装

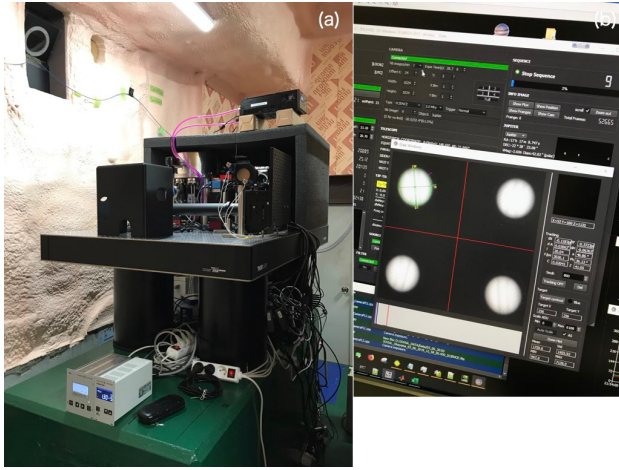


図 1: 本研究課題で開発したドップラー振動撮像装置 (a) と木星観測像 (b). 撮像装置は国立天文台ハワイ観測所岡山分室 188cm 望遠鏡クーデ室に設置した.

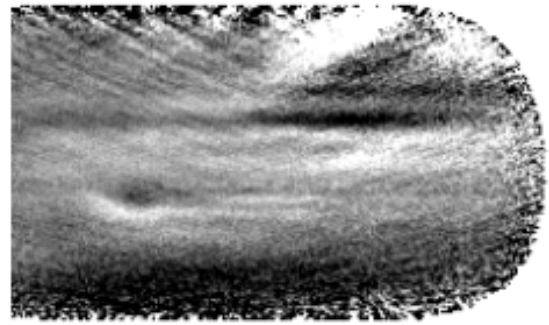


図 2: 国立天文台ハワイ観測所岡山分室 188cm 望遠鏡とドップラー振動撮像装置を用いて取得した木星表面の速度プロファイル.

置による木星表面の帯状風速度場の観測とハッブル宇宙望遠鏡による雲の運動による速度場推定の結果を比較した. 結果として, 二つの観測データは概ね整合的であるが, 低緯度付近で大きな違いがあることを発見した (Goncalves et al. 2019).

(3) 暴走ガス捕獲および移動中のガス惑星による微惑星捕獲過程の解明: 円盤ガス集積によって質量を増加しつつある原始木星まわりの微惑星のN体シミュレーションを行い(図3), それらの微惑星の力学的振る舞いを理解し, エンベロープに取り込まれる微惑星(重元素)量を定量化することができた (Shibata and Ikoma 2019). また, 近年, 太陽系外の中心星近傍を周回する巨大惑星(いわゆるウォームジュピター)も, 木星と同様に重元素に富むエンベロープを有していると推定されている. それらの重元素の由来を理解するために, ガス惑星の移動時における微惑星の獲得過程も同様にN体シミュレーションで調べた. その結果, 巨大ガス惑星は, 原始惑星系円盤内の特定の領域(スイートスポット)でのみ微惑星を大量に獲得できることが明らかになった (Shibata, Helled and Ikoma 2020, 2022).

(4) 巨大ガス惑星の後期ガス集積過程の解明: 巨大ガス惑星への円盤ガス降着過程およびそれに伴う質量増加過程は, 観測的検証の困難さのために十分に理解されていない. そこで, 観測的検証に向けて, 巨大惑星への降着ガスが経験する衝撃波加熱とそれに伴う水素輝線放射の理論モデルを構築し, H-alpha 線での観測可能性を定量化した (Aoyama, Ikoma, and Tanigawa 2018). 幸運にも, 本研究課題期間中に若い巨大ガス惑星 PDS 70 b および c による水素輝線が検出された. それに対して我々のモデルを適用し, それらの惑星へのガス降着率の推定およびガス降着構造の制約に成功した (Aoyama and Ikoma 2019). 特に, ガス降着が従来の理解とは異なり, 惑星表面の非常に狭い領域で起きることが示唆された. そこで, 高解像度2次元流体シミュレーションを独自に行い, その妥当性を検証することに成功した (Takasao, Aoyama, and Ikoma 2021). 巨大ガス惑星へのガス降着はこれまで原始恒星へのガス降着と同じモデルで考えられてきたが, 我々の新たな

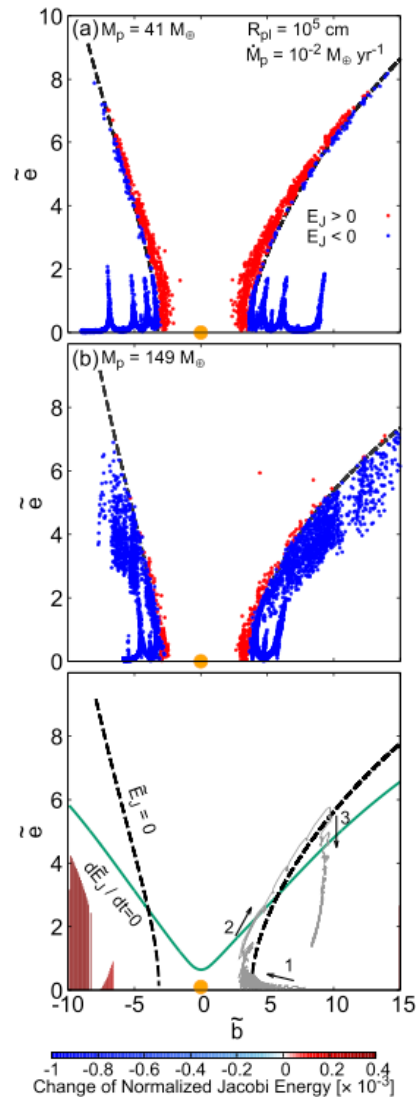


図 3: 成長する原始木星まわりの微惑星のN体シミュレーション (Shibata and Ikoma (2019) の Fig. 2 を改変). 横軸は原始木星からの距離, 縦軸は軌道離心率である. (a)と(b)は, 原始木星がそれぞれ 41 地球質量, 149 地球質量のときのスナップショット (EJ: ヤコビエネルギー). (c)は微惑星の典型的な振る舞いを模式的に示したものである.

モデルを適用することで、観測される水素輝線放射量から推定される質量降着率が従来の理解と大きく異なることが明らかになった (Aoyama et al. 2021).

<引用文献>

- ① Aoyama, Y. and Ikoma, M. (2019), Constraining planetary gas accretion rate from H-alpha line width and intensity: Case of PDS 70 b and c, *The Astrophysical Journal Letters* 885, L29, 6pp.
- ② Aoyama, Y., Ikoma, M., and Tanigawa, T. (2018), Theoretical model of hydrogen line emission from accreting gas giants, *The Astrophysical Journal* 866, id.84, 16pp.
- ③ Aoyama, Y., Marleau, G.-D., Ikoma, M., and Mordasini, C. (2021), Comparison of planetary H-alpha emission models: A new correlation with accretion luminosity, *The Astrophysical Journal Letters* 917, L30, 9pp.
- ④ Goncalves, I., Schmider, F. X., Gaulme, P., Morales-Juberia, R., Guillot, T., Rivet, J.-R., Appourchaux, T., Boumier, P., Jackiewicz, J., Sato, B., Ida, S., Ikoma, M., et al. (2019), First measurements of Jupiter's zonal winds with visible imaging spectroscopy, *Icarus* 319, 795-811.
- ⑤ Schmider, F. X., Dejonghe, J., Guillot, T., Ikoma, M. et al. (2020), Characteristics and performances of an interferometric Doppler imager installed at the 188 cm telescope of Okayama Observatory, *Proceedings of the SPIE*, 11447.
- ⑥ Shibata, S. and Ikoma, M. (2019), Capture of solids by growing proto-gas giants: Effects of gap formation and supply limited growth, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 487, 4510-4524.
- ⑦ Shibata, S., Helled, R., and Ikoma, M. (2020), The origin of the high metallicity of close-in giant exoplanets. Combined effects of resonant and aerodynamic shepherding, *Astronomy & Astrophysics* 633, A33, 13pp.
- ⑧ Shibata, S., Helled, R., and Ikoma, M. (2022), The origin of the high metallicity of close-in giant exoplanets. II. The nature of the sweet spot for accretion, *Astronomy & Astrophysics* 659, A28, 16pp.
- ⑨ Takasao, S., Aoyama, Y., and Ikoma, M. (2021), Hydrodynamic model of H-alpha emission from accretion shocks of a proto-giant planet and circumplanetary disk, *The Astrophysical Journal* 921, id.10, 18pp.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 Shibata S., Helled R., Ikoma M.	4. 巻 633
2. 論文標題 The origin of the high metallicity of close-in giant exoplanets. Combined effects of resonant and aerodynamic shepherding	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astronomy and Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A33 ~ A33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201936700	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 Aoyama Y., Ikoma M.	4. 巻 885
2. 論文標題 Constraining Planetary Gas Accretion Rate from H Line Width and Intensity: Case of PDS 70 b and c	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L29 ~ L29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab5062	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 Shibata S., Ikoma M.	4. 巻 487
2. 論文標題 Capture of solids by growing proto-gas giants: effects of gap formation and supply limited growth	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4510 ~ 4524
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz1629	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 Goncalves, I., Schmider F.X., Gaulme P., Morales-Juberias, R., Guillot T., Rivet J.-P., Appourchaux T., Boumier P., Jackiewicz J., Sato B., Ida S., Ikoma M., Mekarnia D., Underwood T. A., Voelz D.	4. 巻 319
2. 論文標題 First measurements of Jupiter's zonal winds with visible imaging spectroscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 795 ~ 811
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2018.10.019	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 Aoyama Y., Ikoma M., Tanigawa T.	4. 巻 866
2. 論文標題 Theoretical Model of Hydrogen Line Emission from Accreting Gas Giants	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 84 ~ 84
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aadc11	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 Hasegawa Y., Bryden G., Ikoma M., Vasisht G., Swain M.	4. 巻 865
2. 論文標題 The Origin of the Heavy-element Content Trend in Giant Planets via Core Accretion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 32 ~ 32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aad912	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 Kurosaki K., Ikoma M.	4. 巻 153
2. 論文標題 Acceleration of Cooling of Ice Giants by Condensation in Early Atmospheres	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 260 ~ 260
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/aa6faf	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 Shibata S., Helled R., Ikoma M.	4. 巻 659
2. 論文標題 The origin of the high metallicity of close-in giant exoplanets. II. The nature of the sweet spot for accretion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomy and Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A28 ~ A28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202142180	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 Takasao S., Aoyama Y., Ikoma M.	4. 巻 921
2. 論文標題 Hydrodynamic Model of H Emission from Accretion Shocks of a Proto-giant Planet and Circumplanetary Disk	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 10~10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac0f7e	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 Schmider F.-X., Dejonghe J., Guillot T., Ikoma M., et al.	4. 巻 11447
2. 論文標題 Characteristics and performances of an interferometric Doppler imager installed at the 188 cm telescope of Okayama Observatory	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 10~10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2559448	査読の有無 無
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13件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Ikoma, M.
2. 発表標題 Progress in and prospects for understanding of planet formation: Late stage accretion of gas giant planets
3. 学会等名 Subaru Telescope 20th Anniversary (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Schmider, F.-X., Guillot, T., Goncalves, I., Jackiewicz, J., Underwood, T., Voelz, D., Gaulme, P., Boumier, P., Appourchaux, T., Morales-Juberias, R., Ikoma, M., Sato, B., and Izumiura, H.
2. 発表標題 Jupiter atmospheric dynamics from ground-based Doppler imaging
3. 学会等名 EPSC-DPS Joint Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shibata S., Helled, R., and Ikoma, M.
2. 発表標題 The enrichment of giant exoplanets: Migration and planetesimal capture
3. 学会等名 EPSC-DPS Joint Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Marleau, G.-D., Aoyama, Y., Kuiper, R., Ikoma, M., and Mordasini, C.
2. 発表標題 Warm-start planets from core accretion, and H from accreting planets: Thermal and radiative properties of the accretion shock
3. 学会等名 American Astronomical Society, Extreme Solar Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 生駒大洋
2. 発表標題 Formation of planetary envelopes and atmospheres: Role of vaporized icy material
3. 学会等名 COSPAR 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 生駒大洋
2. 発表標題 系外惑星大気科学の現状と概観
3. 学会等名 JpGU 連合大会 2018 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Schmider, F.-X., Goncalves, I., Gaulme, P., Morales-Jubieras, R., Guillot, T., Appourchaux, T., Boumier, P., Jackiewicz, J., Underwood, T., Voelz, D., Sato, B., Ida, S., Ikoma, M., and Rivet, J.-P.
2. 発表標題 First measurements of the Jovian zonal winds profile through visible Doppler spectroscopy
3. 学会等名 European Planetary Science Congress 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ikoma, M., Sato, B., Sekii, T., Hanayama, H., Ida, S.
2. 発表標題 Probing the interior of Jupiter toward unveiling its formation: A new attempt with Jovian seismology
3. 学会等名 IAG- IASPEI (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ikoma, M.
2. 発表標題 Accretion limit of snowy protoplanetary envelope
3. 学会等名 10th RESCEU - 2nd Planet2 Symposium on Planet Formation around Snow Line (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ikoma, M.
2. 発表標題 Late-stage accretion and subsequent evolution of giant planets
3. 学会等名 CHARIS International Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ikoma, M.
2. 発表標題 Late-stage capture of solids by proto-gas giants.
3. 学会等名 Workshop on Giant Planet Formation, Evolution and Interior (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 生駒大洋, 黒崎健二
2. 発表標題 雪降る原始惑星エンベロープの冷却限界とガス集積過程への影響について
3. 学会等名 日本天文学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 生駒大洋
2. 発表標題 巨大惑星形成に関する未解決問題
3. 学会等名 木星トロヤ群小惑星探査ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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 分担者	佐藤 文衛 (Sato Bun'ei) (40397823)	東京工業大学・理学院・教授 (12608)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	花山 秀和 (Hanayama Hidekazu) (70794949)	国立天文台・水沢V L B I観測所・特任研究員 (62616)	
研究分担者	関井 隆 (Sekii Takashi) (20332158)	国立天文台・太陽観測科学プロジェクト・准教授 (62616)	

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		
フランス	コートダジュール天文台	パリ大11大学	
米国	ニューメキシコ州立大学		