

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：12101

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2011～2015

課題番号：23103004

研究課題名（和文）円盤から惑星へ

研究課題名（英文）From disks to planets

研究代表者

百瀬 宗武（Momose, Munetake）

茨城大学・理学部・教授

研究者番号：10323205

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 227,110,000円

研究成果の概要（和文）：我々のグループは、天文観測・理論研究・衝突実験の協働により惑星形成過程の研究を進めた。主要な成果は次の通りである。(1) アルマやすばる望遠鏡による高解像度観測の結果、原始惑星系円盤では非軸対称構造を持ちうるということがわかった。その中にあるダスト集中領域は、岩石微惑星の効率的形成が起こる可能性がある。(2) 理論研究との比較から、年齢が異なる複数の円盤で観測された溝構造が惑星起源で説明可能であることを示した。タイムスケールが異なる多様な惑星形成モードの存在を示唆する。(3) 星形成過程を通じたガス化学モデリングの結果、円盤内の重水やN₂H⁺の空間分布と相対存在量の再現に成功した。

研究成果の概要（英文）：Our group studied various subjects related to the planet formation process in a protoplanetary disk. Major accomplishments achieved by our collaborations between astronomical observations, theories and impact experiments are as follows: (1) High resolution observations with ALMA and Subaru telescope have revealed that asymmetric structure is quite common in a protoplanetary disk. The regions of dust concentration in such structure may be responsible for the formation of rocky planetesimals. (2) Our theories on planetary gaps show that the ring-like features seen in several protoplanetary disks with different ages can be explained by a gap carved by a protoplanet, suggesting that a planetary system may form in various modes with different timescales. (3) Modeling of chemical reaction network in the formation site of a star-disk system has successfully reproduced spatial distributions and relative abundances of gas molecules, including HD₂O and N₂H⁺, in a protoplanetary disk.

研究分野：電波天文学

キーワード：電波天文学 光学赤外線天文学 惑星起源・進化 理論天文学 原始惑星系円盤

1. 研究開始当初の背景

若い星の周囲には、惑星系の母胎とみられる円盤(原始惑星系円盤)が遍在している。当時までの「すばる」による観測により、円盤外域において、惑星形成が進行中であることを暗示する渦巻き構造や、主系列星に付随する残骸円盤中に原始惑星が作ったとみられるギャップの兆候が発見されていた。しかし当時の撮像観測では、太陽系惑星が存在する領域(中心星から 20au 以内)の円盤構造を捉えられるほどの高解像度は実現されていなかった。

このような中で、日本が北米や欧州諸国とともに建設した大型電波干渉計 ALMA が平成 23 年 10 月より初期運用を開始しようとしていた。ALMA は、最近傍の原始惑星系円盤に対し、1au スケールの解像度で撮像する能力を実現し、原始惑星が円盤内に作るギャップを直接捉え、また一挙に地球型惑星の形成領域にまで踏み込んで円盤構造を明らかにすることが期待されていた。

一方、国内関連分野の研究も急速に進展しつつあった。観測面では、すばる望遠鏡の新コロナグラフ HiCIAO が稼働し始めたこと、あかりによる赤外多波長測光データが多数蓄積されたことなどである。さらに、これら成果を解釈する際の基礎を与えるダスト粒子集合体の形成モデルやシミュレーション、低温実験の高度精密化も進展し、例えば氷マントルを持つダストの集積・破壊実験が可能になりつつあった。これらテーマでは、ALMA 観測との相乗効果によって、さらなる飛躍が期待されていた。

2. 研究の目的

ALMA による高解像度撮像観測を核として、原始惑星系円盤内で固体微粒子(ダスト)が成長して岩石コア(地球型惑星)の形成へと至る過程や、巨大惑星によるギャップ形成過程などを明らかにし、惑星系の形成と進化の研究を推進する。また、これらに関わる円盤物質(ダスト・氷・ガス成分)の相互作用の全貌を明らかにする。理論・実験的研究の成果を観測結果の解釈へとタイムリーに取り入れ、太陽系形成論を大幅に拡張し、一般的な惑星系における地球型および木星型惑星の形成・起源を解明する。

3. 研究の方法

(1) 原始惑星系円盤に対する観測結果を、関連する理論研究と比較しながら解釈する。

- ① 大型電波干渉計 ALMA を用いて円盤内のダスト分布を明らかにし、それを円盤進化や惑星ギャップ理論と比較して、ダスト進化や惑星の有無を明らかにする。
- ② すばる望遠鏡を初め可視・赤外線望遠鏡を用いて円盤散乱光を捉え、その中に見出される渦状腕や溝構造の形状を理論シミュレーションと比較することで、円盤構造や惑星の有無を明らかにする。

(2) ダストの構造や物性に関する新たな理論や固体物質の衝突破壊実験に基づき、惑星形成に至るダスト成長や惑星後期段階におけるダスト再生の詳細に迫る。

- ① 天体物理学的シミュレーションにより、円盤スケール全体でのダスト成長過程を明らかにする。
- ② ミクロ物性や衝突実験に基づき、ダストの成長破壊に関わる基礎過程を明らかにし、それを天体スケールへの現象にフィードバックする。
- (3) ガス化学反応モデル計算により、一連の星形成過程の中での円盤ガス成分の進化を理解する。
 - ① 地球型惑星の基本要素である水に着目した化学計算により、太陽系天体に見られる重水割合の多様性の起源を探る。
 - ② 円盤物理状態にも関係するイオン分子や、生命の起源とも関連する大型有機分子に着目し、ダスト表面反応も加味してガス化学進化を調べる。ALMA 観測との比較を通じてその妥当性を検証する。

4. 研究成果

(1) 原始惑星系円盤構造と進化の解明

ALMA やすばるの高解像度観測により、原始惑星系円盤には、非軸対称で動径方向に局在した柱密度分布が普遍的に存在することが明らかになった。さらに、年齢が百万年を切る HL Tau と、年齢が一千万年近い TW Hya の双方で、惑星形成が進行中である兆候が捉えられた。これらは、一般的な惑星形成過程にはおいてはタイムスケールを異にする多様なモードが存在することを示唆する。

- ① HD142527 に付随する原始惑星系円盤を ALMA で観測した結果、ダスト放射輝度が極めて高い領域を中心星から約 150 au 離れた場所に見出した(図 1)。ガス輝線データからダスト温度を推定し柱密度を見積る一方、一酸化炭素分子輝線の詳細なモデリングも行った。その結果、この領域が星間空間に比べガスに対しダストが 30 倍以上濃集していることを明らかにした。また、HL Tau に対する 3au 分解能の公開画像で示された溝構造の形成機構について、惑星ギャップの場合とダスト成長・破壊による場合でそれぞれ、独自の解釈を提唱した。惑星ギャップだとした場合では、観測から求められる溝の幅と深さから、土星から木星質量の惑星が 3 つ存在する可能性を示した(図 2)。惑星がない場合でも、高空隙ダストが焼結によって脆くなる領域でダストが渋滞し、複数の明るいリング構造が形成されうることを示した。さらに TW Hya では、一酸化炭素雪線付近に数海王星質量の惑星で説明可能な溝構造を 1au スケールの超高解像度観測により発見した(図 3)。
- ② すばる望遠鏡に搭載されたハイコント

ラストコロナグラフ装置 (HiCIAO) を用いた SEEDS プロジェクトでは, 10 以上の原始惑星系円盤を観測し, 太陽系サイズ程度の領域 (30au 以遠) で近赤外ダストからの散乱光の直接撮像に成功した。その結果, 複数の円盤で, 未検出の惑星に起因すると解釈できるリングや非軸対称構造を検出した。また, 中質量前主系列星の中間赤外線撮像サーベイでは, フレアしている円盤の内側には共通して穴があることを明らかにし, 従来考えられていた進化シナリオの見直しを促す結果を得た。さらに, 赤外線データの統計解析により, 円盤寿命の環境依存性 (低金属量, 星団環境下) も調べ, 銀河系外縁部の低金属量星団で, 同年代の太陽近傍星団に比して, 円盤の存在確率が有意に低いことを明らかにした。

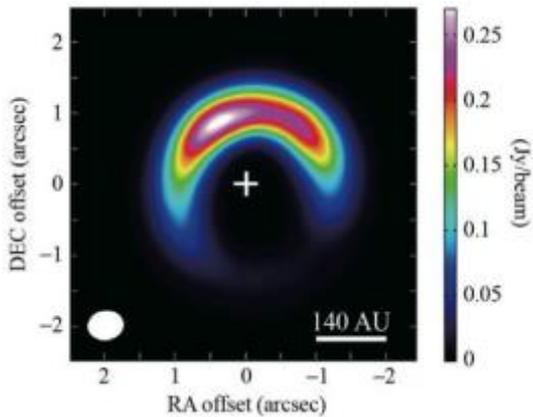


図 1: ALMA によって取得された若い星 HD142527 に付随する原始惑星系円盤のサブミリ波・ダスト連続波イメージ。十字は星の位置を, 左下の白い楕円は点源を観測したときに得られる広がり, それぞれ示す。

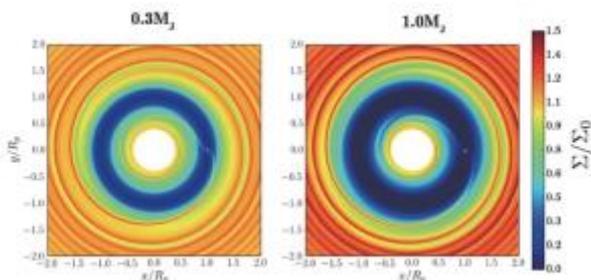


図 2: 観測により測定可能な惑星ギャップの幅と深さから惑星質量を予言する理論式的基础となった数値シミュレーションの結果例。

(2) 円盤内固体物質の組成や成長の解明

ダスト粒子の構造や物性に関する研究を展開した。ダストの成長・破壊過程に基づき, 円盤内でダストが成長して地球型惑星へと至る道筋を明らかにした。メートルサイズの障壁を超えてダストが成長する過程や惑星形成後期段階での円盤進化を解明する手がかりとして, 以下の成果を得た。

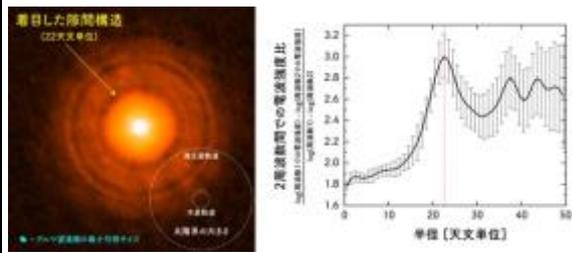


図 3: TW Hya の波長 1.7mm ダスト連続波イメージ(左)と波長 1.3-2mm での連続波のスペクトル指数の動径分布(右)。22au ギャップで, 大きなダストが掃き出された場合と整合的なスペクトル指数の極大が見られる。

- ① ダスト成長初期段階においては衝突圧縮が非効率なため, まず高空隙率・低密度な氷天体が形成されることを, 数値シミュレーションにより示した。さらにガス動圧や自己重力による圧縮効果を詳細に調べ, 天体サイズが約 100m 以上になるとガス動圧の影響が, km サイズ以上では自己重力の影響がそれぞれ顕著となり, 最終的に密度 0.1 g cm^{-3} 以上にまで圧縮されうることを初めて示した (図 4)。
- ② 物性に基づく理論研究では, 浮遊法を用いた融解粒子の室内実験結果を解析した結果, 円盤ダストの結晶化は過冷却状態 (融点よりも十分低温な条件下) で起ることを示した。あわせて結晶形態の冷却条件依存性を包括的に調べた。また, ダスト衝突付着条件や, 微惑星等からのダスト放出についても詳しい再検討を行った。今後の原始惑星系円盤やデブリ円盤の高解像度観測での検証が期待される。一方, 実験からは, 多数回衝突で氷が破壊される場合の衝突破壊強度が, それを積算エネルギー密度で表したときに単発衝突破壊で得た値と一致することがわかった。さらに, 石英粒子を用いたクレーター形成実験 (図 5) からイジェクタ速度分布を調べた結果, クレーターの掘削流に対する弾丸潜り込みの効果を定量的に明らかにした。これらと密接に関係する成果として, あかり衛星による中間赤外全天サーベイから抽出された残骸円盤の 1 つ (HD15407A) に対する追観測によってシリカの存在を確認し, 惑星形成領域における巨大衝突に起因している可能性を指摘した。

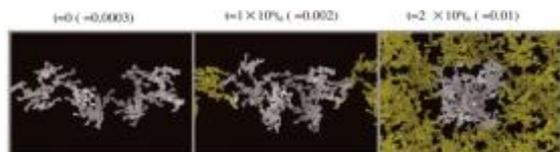


図 4: 高空隙率ダストの衝突・圧縮の計算機シミュレーション結果の一例。

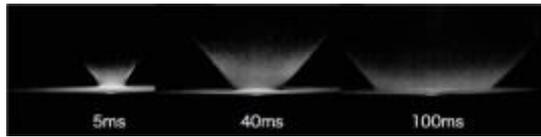


図 5: 石英砂への衝突クレーター形成実験の一例。高速ビデオカメラの撮影画像で数字は衝突時からの経過時間。

(3) 円盤ガス物質の組成や進化の解明

星間物質から惑星材料物質への進化を解明するため、最新のガス化学反応モデルを用いた解析を行った。その結果、太陽系でも確認されている惑星物質の化学的性質は、分子雲から星・円盤系が形成される過程を一連の物質進化の舞台とも位置付けることで初めて、理解される側面があることが以下の通り明確になった。

- ① 原始惑星系円盤の形成直前段階にあたる原始星について、その中心部（ファーストコア近傍）、及び外層部を対象にした分子ガス組成計算の結果をまとめ、論文発表した。また、地球の海水における HD0 と H₂O の比（約 10⁻⁴）が太陽系近傍での D/H 値より一桁高い事実を説明するため、原始星外層部で観測されている極めて高い HD0/H₂O 比（約 10⁻²）をもつ水が原始惑星系円盤に取り込まれた後、どのように破壊・再生成されるかをガス化学組成進化計算によって明らかにした。
- ② メタノールなどの大型有機分子の気相と固相での存在度比や、一酸化炭素分子（炭素の主要形態であり、円盤ガス観測の指標）の化学反応による減損を理論的に明らかにした。なおこのうち、N₂H⁺ など円盤内の主要なイオン分子の存在度の解析解を求めた研究は、ALMA での観測結果の分析でも用いられている。

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 218 件）

- ① Tsukagoshi, T., Nomura, H., Muto, T., Kawabe, R., Ishimoto, D., Kanagawa, K. D., Okuzumi, S., Ida, S., Walsh, C., & Millar, T. J., "A Gap with a Deficit of Large Grains in the Protoplanetary Disk around TW Hya", *ApJL*, Vol.829, L35, 2016.10. (査読有)
- ② Muto, T., Tsukagoshi, T., Momose, M., Hanawa, T., Nomura, H., Fukagawa, M., Saigo, K., Kataoka, A., Kitamura, Y., Takahashi, S. Z., Inutsuka, S.-i., Takeuchi, T., Kobayashi, H., Akiyama, E., Honda, M., Fujiwara, H., & Shibai, H., "Significant gas-to-dust ratio asymmetry and variation in the disk of HD 142527 and the indication of gas depletion", *PASJ*, Vol.67, 122, 2015.12. (査読有)
- ③ Ohsawa, R., Onaka, T., & Yasui, C., "Impact of the initial disk mass function on the disk fraction", *PASJ*, Vol.67, 120, 2015.12. (査読有)
- ④ Momose, M., Morita, A., Fukagawa, M., Muto, T., Takeuchi, T., Hashimoto, J., Honda, M., Kudo, T., Okamoto, Y. K., Kanagawa, K. D., Tanaka, H., Grady, C. A., Sitko, M. L., Akiyama, E., Currie, T., Follette, K. B., Mayama, S., Kusakabe, N., Abe, L., Brandner, W., Brandt, T. D., Carson, J. C., Egner, S., Feldt, M., Goto, M., Guyon, O., Hayano, Y., Hayashi, M., Hayashi, S. S., Henning, T., Hodapp, K. W., Ishii, M., Iye, M., Janson, M., Kandori, R., Knapp, G. R., Kuzuhara, M., Kwon, J., Matsuo, T., McElwain, M. W., Miyama, S., Morino, J.-I., Moro-Martin, A., Nishimura, T., Pyo, T.-S., Serabyn, E., Suenaga, T., Suto, H., Suzuki, R., Takahashi, Y. H., Takami, M., Takato, N., Terada, H., Thalmann, C., Tomono, D., Turner, E. L., Watanabe, M., Wisniewski, J., Yamada, T., Takami, H., Usuda, T., & Tamura, M., "Detailed structure of the outer disk around HD 169142 with polarized light in H-band", *PASJ*, Vol.67, 83, 2015.10. (査読有)
- ⑤ Aikawa, Y., Furuya, K., Nomura, H., & Qi, C., "Analytical Formulae of Molecular Ion Abundances and the N₂H⁺ Ring in Protoplanetary Disks", *ApJ*, Vol.807, 120, 2015.7. (査読有)
- ⑥ Kanagawa, K. D., Tanaka, H., Muto, T., Tanigawa, T., & Takeuchi, T., "Formation of a disc gap induced by a planet: effect of the deviation from Keplerian disc rotation", *MNRAS*, Vol.448, 994, 2015.3. (査読有)
- ⑦ Yasui, M., Hayama, R., & Arakawa, M., "Impact strength of small icy bodies that experienced multiple collisions", *Icarus*, Vol.233, 293, 2014.5. (査読有)
- ⑧ Yamamoto, T., Kadono, T., & Wada, K., "An Examination of Collisional Growth of Silicate Dust in Protoplanetary Disks", *ApJL*, Vol.783, L36, 2014.3. (査読有)
- ⑨ Fukagawa, M., Tsukagoshi, T., Momose, M., Saigo, K., Ohashi, N., Kitamura, Y., Inutsuka, S.-i., Muto, T., Nomura, H., Takeuchi, T., Kobayashi, H., Hanawa, T., Akiyama, E., Honda, M., Fujiwara, H., Kataoka, A., Takahashi, S. Z., & Shibai, H., "Local Enhancement of the Surface Density in the Protoplanetary Ring Surrounding HD 142527", *PASJ*, Vol.65, L14, 2013.12. (査読有)
- ⑩ Kataoka, A., Tanaka, H., Okuzumi, S., & Wada, K., "Static compression of porous dust aggregates", *A&A*, Vol.554, A4,

- 2013.6. (査読有)
- ⑪ Muto, T., Grady, C. A., Hashimoto, J., Fukagawa, M., Hornbeck, J. B., Sitko, M., Russell, R., Werren, C., Cur'è, M., Currie, T., Ohashi, N., Okamoto, Y., Momose, M., Honda, M., Inutsuka, S., Takeuchi, T., Dong, R., Abe, L., Brandner, W., Brandt, T., Carson, J., Egner, S., Feldt, M., Fukue, T., Goto, M., Guyon, O., Hayano, Y., Hayashi, M., Hayashi, S., Henning, T., Hodapp, K. W., Ishii, M., Iye, M., Janson, M., Kandori, R., Knapp, G. R., Kudo, T., Kusakabe, N., Kuzuhara, M., Matsuo, T., Mayama, S., McElwain, M. W., Miyama, S., Morino, J.-I., Moro-Martin, A., Nishimura, T., Pyo, T.-S., Serabyn, E., Suto, H., Suzuki, R., Takami, M., Takato, N., Terada, H., Thalmann, C., Tomono, D., Turner, E. L., Watanabe, M., Wisniewski, J. P., Yamada, T., Takami, H., Usuda, T., & Tamura, M., "Discovery of Small-scale Spiral Structures in the Disk of SAO 206462 (HD 135344B): Implications for the Physical State of the Disk from Spiral Density Wave Theory", *ApJL*, Vol.748, L22, 2012.4. (査読有)

[学会発表] (計 236 件)

- ① Masahiko Arakawa, "High velocity impact experiments on oblique impacts of planetary bodies and impact cratering on frozen sand", 2016 年 2 月 22 日, ホテル日航八重山 (沖縄県石垣市)
- ② Takashi Onaka, "Organic dust in galaxies", The 11th Pacific Rim Conference on Stellar Astrophysics, Physics and Chemistry of the Late Stages of Stellar Evolution, 2015 年 12 月 17 日, The University of Hong Kong (Hong Kong, PR China)
- ③ Takayuki Muto, "Connecting Disk Theory with High Resolution Observations", East Asia ALMA Science Workshop 2015, 2015 年 12 月 9 日, 大阪府立大学 (大阪府堺市)
- ④ Munetake Momose, "Long baseline observations with ALMA: Impact by the image of HL Tau", ALMA/45m/ASTE/Mopra Users Meeting, 2015 年 10 月 21 日, 国立天文台三鷹 (東京都三鷹市)
- ⑤ Hidekazu Tanaka, "Planetesimal formation via dust sticking", Protoplanetary Disk Dynamics and Planet Formation, 2015 年 10 月 1 日, 海洋研究開発機構 (神奈川県横浜市)
- ⑥ Misato Fukagawa, "A review of recent observations of

- protoplanetary disks", Protoplanetary Disk Dynamics and Planet Formation, 2015 年 9 月 29 日, 海洋研究開発機構 (神奈川県横浜市)
- ⑦ Yuri Aikawa, "Astrochemical models of water in molecular clouds and protoplanetary disks", Focus Meeting 15, International Astronomical Union General Assembly XXIX, 2015 年 8 月 3 日, Honolulu Convention Center (Honolulu, U. S. A.)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
○取得状況 (計 0 件)

[その他]

- ① WEB 国立天文台プレスリリース (2016 年 12 月 5 日) 「アルマ望遠鏡, 惑星の種の成長に迫る」
<http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/news/pressrelease/201612058078.html>
- ② WEB 国立天文台プレスリリース (2016 年 9 月 14 日) 「巨大氷惑星の形成現場を捉えた —アルマ望遠鏡で見つけた海王星サイズの惑星形成の証拠—」
<http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/news/pressrelease/201609148022.html>
- ③ WEB 北海道大学プレスリリース (2015 年 8 月 19 日) 「水の凝縮核生成の大規模分子動力学シミュレーション—室内実験レベルの低生成率での凝縮核生成の再現に成功—」
http://www.hokudai.ac.jp/news/150819_lowtem_pr.pdf
- ④ WEB 科学サイト Phys.org が沸騰分子動力学計算に関する我々の研究を紹介 (2015 年 3 月 24 日)
<http://phys.org/news/2015-03-theory-phase-transitions-supercomputers.html>
- ⑤ WEB 国立天文台プレスリリース (2014 年 1 月 17 日) 「アルマ望遠鏡が見つけた巨大惑星系形成の現場」
https://alma-telescope.jp/news/press/mt-post_527
- ⑥ WEB 総研大プレスリリース (2013 年 10 月 4 日) 「惑星の種はすき間だらけ〜「ダストから微惑星への成長の謎」を解明」
<https://www.soken.ac.jp/news/962/>
- ⑦ WEB 北海道大学プレスリリース (2013 年 9 月 5 日) 「過飽和気体における核生成過程の大規模分子動力学計算: はじめて室内実験との直接比較を実現!」
http://www.hokudai.ac.jp/news/130905_pr_lowtem.pdf
- ⑧ WEB すばる望遠鏡プレスリリース (2012

年4月11日)「原始惑星系円盤に小さな渦巻き構造を発見 - 密度波理論で探る惑星形成の現場」

https://www.subarutelescope.org/Pressrelease/2012/04/11/j_index.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

百瀬 宗武 (MOMOSE MUNETAKE)
茨城大学・理学部・教授
研究者番号: 10323205

(2) 研究分担者

深川 美里 (FUKAGAWA MISATO)
名古屋大学・理学研究科・准教授
研究者番号: 40509804

尾中 敬 (ONAKA TAKASHI)
東京大学・理学系研究科・教授
研究者番号: 30143358

田中 秀和 (TANAKA HIDEKAZU)
東北大学・理学研究科・教授
研究者番号: 00282814

山本 哲生 (YAMAMOTO TETSUO)
北海道大学・低温科学研究所・名誉教授
研究者番号: 10126196

荒川 政彦 (ARAKAWA MASAHIKO)
神戸大学・理学研究科・教授
研究者番号: 10222738

相川 裕理 (AIKAWA YURI)
筑波大学・計算科学研究センター・教授
研究者番号: 40324909

武藤 恭之 (MUTO TAKAYUKI)
工学院大学・基礎・教養教育部門・准教授
研究者番号: 20633803

塚越 崇 (TSUKAGOSHI TAKASHI)
茨城大学・理学部・助教
研究者番号: 20533566

(3) 連携研究者

片坐 宏一 (KATAZA HIROKAZU)
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授
研究者番号: 70242097

和田 浩二 (WADA KOJI)
千葉工業大学・惑星探査研究センター・主席
研究員
研究者番号: 10396856

村川 幸史 (MURAKAWA KOJI)
大阪産業大学・工学部・講師
研究者番号: 未取得

谷川 享行 (TANIGAWA TAKAYUKI)
一関工業高等専門学校・電子情報学系・准教授
研究者番号: 30422554

(4) 研究協力者
金川 和弘 (KANAGAWA KAZUHIRO)
シュツェチン大学・研究員
研究者番号: 60720787

木村 宏 (KIMURA HIROSHI)
名古屋大学・理学研究科・研究員
研究者番号: 10400011

樋口 あや (HIGHUCHI AYA)
理化学研究所・研究員
研究者番号: 00648214

安井 千香子 (YASUI CHIKAKO)
国立天文台・TMT推進室・助教
研究者番号: 00583626

ロ スニョン (ROH SOONYOUNG)
ウルサン大学・研究員
研究者番号: 未取得