

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23244034

研究課題名(和文)高精度位置天文観測時代を向かえての銀河系研究

研究課題名(英文) Study on the Milky Way as we face an age of high-precision astrometry

研究代表者

郷田 直輝 (Gouda, Naoteru)

国立天文台・光赤外研究部・教授

研究者番号：50202073

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,800,000円

研究成果の概要(和文)：JASMINEやGaiaといった高精度位置天文観測により今後期待できる科学的成果の検討を研究者コミュニティのコアグループを形成することにより検討を行うことができた。毎年度、検討会を開催し、科学的成果の具体化ができてきた。さらに、国際連携や公開のワークショップの開催によってコミュニティの拡大も行ってきた。小型JASMINEに関しては、JAXA宇宙研の小型科学衛星(公募型小型計画宇宙科学ミッション)の公募に対して、本研究成果をもとにミッション提案を申請することができた。

研究成果の概要(英文)：Scientific outputs expected in the future by high-precision astrometry such as JASMINE and Gaia were investigated by a core group of the research community formed by this grants-in-aid. Investigative commissions convened every year made it possible to crystallize the scientific outputs. Furthermore international cooperation and public workshops held by this grants-in-aid have led to enlarge the research community. The results obtained by this grants-in-aid allowed us to submit the mission proposal of Small-JASMINE to the public offering of small scientific satellite missions executed by ISAS/JAXA.

研究分野：天体物理学

キーワード：位置天文学 銀河系 宇宙物理学 天文

1. 研究開始当初の背景

位置天文観測は星の天球上の位置とその動きを測定する天文学において最も古い分野であり、脈々と続けられてきている人類の営みである。20世紀の末、ヨーロッパ宇宙機関(ESA)が世界で初めての位置天文観測衛星HIPPARCOS(ヒッパルコス)を打ち上げ、地上の観測精度に比べて一桁以上もの精度向上を果たした。これは、画期的な進展であり、位置天文観測を用いた新たな天文学、天体物理学の幕開けとなった。ただ残念なことにヒッパルコス衛星の精度は、年周視差では、1ミリ秒角であり、この精度ではまだ、我々から高々100pc以内の星までの距離しか年周視差で正確に求めることはできていないのである。銀河系全体に比べればはるかに小さいスケールである。そこで、当然ながら、世界の位置天文コミュニティは、ヒッパルコス衛星よりもさらに2桁も高精度(10マイクロ秒角)な測定を目指して、あらたな位置天文観測衛星の計画に乗りだした。ESAはGaiaという可視光での位置天文観測衛星計画を進めていた。さらに、Gaiaでは測定が困難な、銀河系中心付近のバルジ構造に含まれる多くの星の年周視差や固有運動の観測データを手に入れるため、日本では近赤外線による位置天文観測衛星JASMINEの計画を進めていた。

このように可視光・赤外線での位置天文観測衛星により高精度で大量な星の位置天文情報が近未来に手に入ろうとしていた。これにより、銀河系内天体の広域かつ遠方の3次元的位置や運動速度が初めて正確に分かり、銀河系自体や銀河系内天体に関して従来は不可能であった直接的かつ精密な議論が可能となる。質的および量的にも画期的な研究進展が可能となる。このような高精度位置天文観測時代をまもなく向かえるにあたり、それによって期待できる銀河系やそこに含まれる天体、天体現象の科学的成果を検討する好機となっていた。

2. 研究の目的

海外の位置天文衛星計画のみならず、我が国の計画からでも位置天文データを手に入れられる時代をむかえるに当たり、これらの観測データを用いて銀河系自体および銀河系内天体の解明に必要な手法の開発を目的とする。さらに我が国でも位置天文観測データを用いた銀河系研究のコミュニティの拡大が重要かつ必要である。特に若手の人材育成も急務であり、コミュニティ拡大と若手育成も本研究の目的とする。より具体的には以下の通りである。

(1)研究代表者を中心として日本で進めている、超小型衛星を用いる位置天文観測衛星Nano-JASMINEは、zwバンド(0.6~1.0ミクロン)で全天をサーベイする予定である。3ミリ秒角程度の精度をもつ位置や年周視差

のカタログを作成する。さらに、ヒッパルコス衛星の観測から25年程度以上経過していることを利用し、ヒッパルコスカタログとNano-JASMINEカタログの固有運動を結びつけて、ヒッパルコスカタログの固有運動精度よりも1桁程度精度が向上した最高精度の固有運動を得る。衛星が打ち上げられて観測データが得られた際には、これらの情報をもとに、比較的太陽系近傍を中心とした精密な銀河系研究を展開する予定であり、その時に見込まれる具体的な科学的成果の検討を行う。

(2) Nano-JASMINEに続き、JAXAのイプシロンロケット搭載が条件の公募型小型計画宇宙科学ミッションでの実現を目指す小型JASMINEは、銀河系中心核バルジの星に対する近赤外線での高精度位置天文観測を世界で初めて行う衛星計画である。衛星打ち上げ後に期待される観測データに備えて、銀河系バルジの精密分光観測を行う国内外の観測プロジェクトとも密接に連携しつつ、銀河系中心核バルジでの力学構造、巨大ブラックホールの形成、中心核での星形成など小型JASMINEで進展が見込まれる科学的成果の検討を行う。

(3)より優れた科学目的が達成できるように関連プロジェクトにフィードバックを行い、より有効な観測プロジェクト計画を進めることも本研究の目的とする。

(4)ESAによる可視光での全天位置天文観測衛星計画であるGaiaの観測データに備えての銀河系広域に関する研究も進展させる。

3. 研究の方法

Nano-JASMINEの観測データとヒッパルコスの観測データとの組み合わせにより、ヒッパルコスの精度よりも1桁程度精度が向上した固有運動が得られる。この特徴を活かし、ヒッパルコスカタログを用いて行われていた研究成果の見直しを行う。特に、太陽系近傍のダークマター量や分布、星団や変光星までの距離と運動をもとにした太陽系近傍の力学構造、星形成領域内の内部運動などの解析手法を準備し、実際にデータが得られた場合に適用する。位置天文観測データは幅広い天文分野に適用できるため、研究代表者、分担者に加えて、広い分野に渡る連携研究者にも参加してもらいつつ、Nano-JASMINEのデータ利用や来たるべきGaiaのデータに備えての銀河系自体の構造、進化や銀河系内天体の研究を進める。また、本科研費により研究協力者として研究代表者のもとに研究員を雇用し、JASMINEで拓ける科学的成果を広範囲に渡って検討してもらうこととした。このように、国内での研究者コミュニティのコアチームを形成するとともに、さらに、毎年度、研究会等を開催し、コミュニティの拡大お

よび人材育成を行い、来たるべき高精度位置天文観測データによるサイエンスの展開を我が国でも浸透するように努める。さらに、比較的近未来の小型 JASMINE の観測データに備えて、銀河系中心核バルジの研究を進める。

4. 研究成果

(1) 主な成果

JASMINE や Gaia の高精度位置天文観測により今後期待できる科学的成果の検討を研究者コミュニティのコアグループを形成することにより行うことができた。その際、毎年度、検討会を開催し、検討を継続してきたとともに、公開のワークショップを開くなどコミュニティの拡大も行ってきた。なお、JASMINE 等で期待される科学的成果に関して得られた具体的な結果の主要な例は以下の通りである。

天の川銀河の中心に潜む巨大ブラックホール形成：

小型 JASMINE による巨大ブラックホールの合体形成の観測的検証について検討した。銀河形成の標準理論に従えば、小さい銀河が衝突合体を繰り返し、大きな銀河が形成されるが、ブラックホール - バルジ関係が銀河形成期から成立していれば、元々の矮小銀河が持つ中間質量ブラックホールが取り込まれ、合体後の銀河には多数のブラックホールが存在するはずである。しかし、ほとんどの場合、観測される巨大ブラックホールは銀河の中心に1つだけである。従って、銀河形成標準理論が正しいならば、何らかのブラックホール合体過程が起こった可能性が高い。一方、ブラックホールが合体すれば、ブラックホールが銀河系中心に落ち込む際に力学的摩擦により中心核バルジの星の分布に影響を与える。この分布を観測する事によりブラックホールの生い立ちに迫る。どの程度の星をどの程度の精度で観測すると十分な信頼性でブラックホールが落ち込んだ形跡の有無を判別ができるか、多数の模擬カタログを作成し、実際の判別作業を統計的に行う事により定量的に見積もった。その結果、銀河系中心核バルジ領域（銀河系中心より半径0.7度の円内）において、（バルジに属する）3500個の星を年周視差の精度 $20 \mu\text{as}$ 、固有運動精度 $200 \mu\text{as/year}$ で観測を行えば99.7%の信頼性をもって中間質量ブラックホールが落ちこんだ形跡の有無を判別できる事を示す事ができた。

巨大ブラックホールへのガス供給機構の解明：

ブラックホールへのガスの降着は巨大ブラックホール形成のもう1つの重要なモデルとなっている。バルジは比較的ガス量が少ないと考えられているが、ディスクからバルジへのガス流入、そして、さらには、中心領域へと多段階的な流入があると考えられて

いる。こうした銀河系中心へのガスの供給機構は、バルジの力学構造、つまり重力場に強く依存する。ここでは、ガス供給機構と強く関連する銀河系中心核バルジの棒状構造モデルの棒状パターンの回転角速度といったパラメータへの制限を与える。特に、半径5kpc程度の大きな棒状構造とは別の中心核バルジ領域に、より小さな内部棒状構造が存在しているかどうかを、棒状構造のパターンの回転角速度の違いを利用して統計的に高信頼度で判断するため、星の個数や観測精度について定量的検討を行った。ここでも、多数の模擬カタログの作成により、統計的な検討を行った。結果、銀径 $-2 \text{度} < l < 0.5 \text{度}$ 、銀緯 $0.2 \text{度} < b < 0.5 \text{度}$ の範囲において、（バルジに属する）2000個の星を年周視差の精度 $20 \mu\text{as}$ 、固有運動精度 $150 \mu\text{as/year}$ で観測を行う事ができれば、内部バーが外部バーと独立した存在であり、力学的に安定的にその構造を保っている場合、99.7%の信頼性でその存在を判定できる事がわかった。

大質量 X 線連星の高密度星同定：

小型 JASMINE の位置決定精度(10マイクロ秒角)では、近傍の大質量 X 線連星に対して、0.03 太陽質量程度の精度で高密度星の質量を測定できることが分かった。例えば、大質量 X 線連星 Cas は、高密度星が白色矮星なのか中性子星なのか明らかになっていない天体である。検討の結果、Cas に対して、見込み通り 0.03 太陽質量の精度で高密度星の質量を測定できれば、これにより2 (95%) の信頼度で、白色矮星と中性子星の区別がつくことがわかった。また、Cas は Gaia 衛星で高精度位置天文観測ができず、Cas を対象とした高密度星の同定は小型 JASMINE が唯一可能であることも明らかにした。

ガンマ線連星の高密度星同定：

ガンマ線連星に対しても高密度星の質量を測定できる。ガンマ線連星 LSI +61 303 と HESS J0632+057 は、高密度星が中性子星なのか、ブラックホールなのかわかっていない天体である。小型 JASMINE の位置決定精度(10マイクロ秒角)では、これらの天体に対して、1太陽質量(LSI +61 303)と0.5太陽質量(HESS J0632+057)の精度で高密度星の質量が測定できることが分かった。この質量精度と、現在見つかっている中性子星(約2太陽質量以下)とブラックホール(約3太陽質量以上)の質量分布を考え合わせると、LSI +61 303、HESS J0632+057 いずれに対しても中性子星とブラックホールの区別がつけられることがわかる。これにより、これらの天体での高エネルギー放射機構を制限できることが期待される。

ブラックホール連星探査：

既知 X 線連星・ガンマ線連星の高密度星同定が可能であることは、未知のブラックホー

ル(または、中性子星)連星の探査が可能であることも意味する。つまり、まず伴星がいるかどうか不明な星に対して位置天文観測を行い、伴星を検出できたとする。その伴星に対して質量を計測することによってブラックホール(または中性子星)かどうかを判定する。検討の結果、小型 JASMINE の位置決定精度では、10 日から 100 年程度の周期のブラックホール(質量 5 太陽質量)連星を新たに発見可能であることが分かった。

中性子星 X 線連星を用いた中性子星物質の状態方程式への制限:

大質量 X 線連星 X Per、V725 Tau は、高密度星が中性子星であると分かっている天体であるが、これらに対して小型 JASMINE で位置天文観測を行った場合、それぞれ 0.05, 0.03 太陽質量の精度で中性子星の質量が測定できることがわかった。この精度で中性子星の質量が測定できれば、中性子星物質の状態方程式が制限できる。この質量測定方法は、従来のシャピロディレイを利用する測定方法と独立であり、中性子星の質量分布を明らかにする上でも重要である。

Cyg X-1 の軌道面の測定によるジェット形成モデルへの制限:

多くの X 線連星で電波観測によって絞られたアウトフロー(ジェット)が観測されており、その起源は現在盛んに議論されている。恒星由来のガスがブラックホールに吸い込まれる際に、その一部がジェットを形成すると考えられているが、詳細は不明である。その起源を探る重要なターゲットとして、ジェットが観測されている天体のうち軌道の視角が最も大きい X 線連星である Cyg X-1 が挙げられる。これまで X 線と電波の観測から得られている結果として、ジェットと軌道面が傾いていることを示唆する研究とそろっていることを示唆する研究がありどちらのモデルかは決着が付いていない。Cyg X-1 の軌道半径に対する小型 JASMINE の位置決定誤差は 30%程度であるので、天球面上の軌道面の方向が 15-30° の誤差で決定できる。電波観測により Cyg X-1 のジェットの天球面上の方向は数度程度の誤差で測定されているため、ジェットの方向と軌道面の方向を比較することができる。ジェットが軌道面に対して傾いていることを支持する研究では、その傾き角は 37° であるので、小型 JASMINE の観測により傾いていないモデルと区別できる可能性があることがわかった。

追観測による惑星質量決定:

視線速度法には「質量の下限値しか得られない」という問題があるが、アストロメトリ観測では質量そのものを決定することができる。したがって、視線速度法によって発見された惑星を小型 JASMINE で追観測することにより、質量を決定することができる。現時

点では 15 の惑星系をターゲット天体として挙げている。これらは中心星の軌道半径の視角が大きく、かつ周期が 1 年以内であるという条件で選ばれたが、中心星が赤色巨星である天体、連星を組んでいる天体など興味深い天体を含んでいる。このうち、軌道半径の視角が最も大きい天体に対しては 4-6%の誤差で質量を決定できることがわかった。

褐色矮星周りの惑星探査:

近年、観測感度の向上により太陽の 10 分の 1 以下の質量を持つ褐色矮星の周りの惑星が 20 個程度見つかってきている。小型 JASMINE は赤外線で位置天文観測を行うため、褐色矮星周りの惑星探査に対して有利である。褐色矮星は、表面温度が低いために可視光では暗く赤外線で見える。さらに、主星が軽いために惑星重力によるふらつきが大きくなる。このことは、中心星が太陽程度の質量を持つ主系列星の場合に比べて、より軽い惑星にまで検出感度を持つことを意味する。小型 JASMINE の探査可能領域を調べた結果、軌道周期-惑星質量図上の広い領域を探査可能であることがわかった。(図 1 赤網掛け部分)。この領域には、地球質量の数倍の惑星も含まれている。また、これまで褐色矮星周りの惑星探査に主に用いられてきた直接撮像法(図 1 青網掛け部分)では探査できない領域を探査可能であることもわかり、褐色矮星周りの惑星の統計的性質に迫れることが期待される。

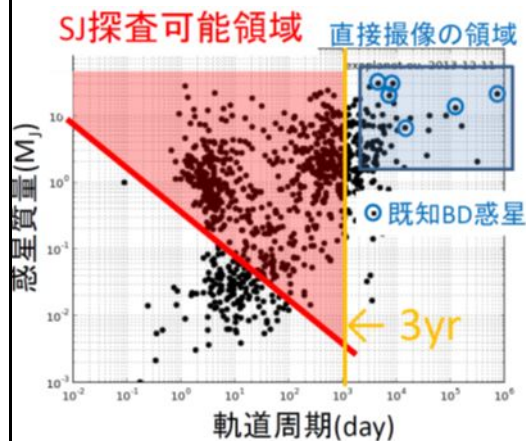


図 1 褐色矮星周りをまわる惑星の探査可能領域(赤網掛け)。惑星系までの距離は 10pc を仮定。

長周期惑星の探査:

小型 JASMINE のミッション期間は 3 年間の運用を必要最小としている。この間に、どれだけ長い周期をもつ系外惑星が発見できるかをあらかじめ検討しておくことは、他の探査法(直接撮像法、視線速度法など)とのシナジーを考える上で重要である。位置天文観測により固有運動・年周楕円運動からのずれを検出することが長周期惑星の検出に直接つ

ながら。検討の結果、図2の赤線より上の領域の惑星に対し、小型 JASMINE を用いて探査可能であることがわかった。図2から 10 木星質量の惑星に対して軌道長半径が 30AU 程度(周期にして 200 年程度)であっても検出できることがわかる。このとき、3 (99.73%) の信頼度での検出を想定している。中心星から 10AU 程度離れていれば、直接撮像法によって現在の観測技術で検出可能である(図2青網掛け部分)。図2において、探査可能領域と直接撮像可能領域が重なっているため、小型 JASMINE によって発見された長周期の惑星を直接撮像法により追観測することで直接発見が可能である。このことから、直接撮像法とのシナジーが期待される。

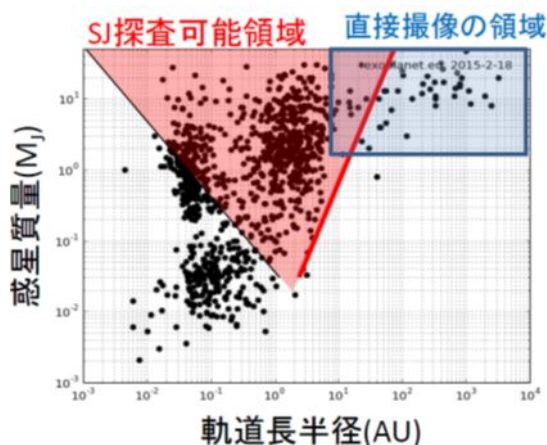


図2．長周期惑星を含めた小型 JASMINE 探査可能領域(赤網掛け)。惑星系までの距離は 10pc、中心星の質量は 1 太陽質量を仮定。

非位置天文観測による重星の束縛・非束縛の判定：

常に連星間距離が長い連星は、天球面上で分解できる。それぞれの星の位置天文観測データ(位置、速度、年周視差)を用いることで、その系が重力的に束縛された真の連星なのか、単なる通りすがりなのかを判定することができる。まず Hipparcos データを用いて、有名な重星に対して束縛・非束縛の判定を行った。その結果、白鳥座のアルビレオ系(離角 34 秒)とこと座 星系(離角 208 秒)はそれぞれ 8、5 の信頼度で非束縛であることがわかった。また、北斗七星の一角を構成するミザール・アルコル系(離角 12 分)は非束縛系であることを示唆するが、Hipparcos データのみでは確定できないという結果であった。さそり座 星系に対しても検討したが、連星である可能性があることが分かった。次に Nano-JASMINE で観測した場合どの程度精度が上がるかを検討した。その結果、ミザール・アルコル系は非束縛であれば、ほぼ確実に非束縛であると判定できることが分かった。

位置天文観測による恒星表面活動の解明：
恒星表面には太陽表面にできる黒点と比べて 10 倍以上大きい黒点(またはホットスポット)が観測されているが、その生成・消滅メカニズムは不明である。恒星の自転に伴う黒点移動により、恒星の光学中心位置が自転周期に同期して運動するため、小型 JASMINE で黒点運動を検出できる可能性がある。近くの恒星や赤色巨星に対しては、この光学中心移動が小型 JASMINE の精度と同程度かそれ以上となりうるということがわかった。また、位置天文観測は測光観測も同時に行っているため、この光学中心の移動が黒点によるものかホットスポットによるものかがわかる。さらに、星の半径を推定できれば、おおよそのホットスポット・黒点の大きさも推定できることがわかった。位置天文観測で恒星黒点を検出した例はこれまでにないので、恒星黒点に対して従来の観測と独立なデータが得られることが期待される。

銀河系の力学構造の構築：
位置天文観測データによって得られる星の 3 次元的位置と運動速度をもとに、ダークマターを含む、重力を及ぼす物質が作りだす、重力場や位相分布関数を構築する方法を検討した。具体的には、Torus fitting 法と呼ばれる方法を開発し、位相分布関数の構築にとって必要不可欠な、系の積分量の構築を可能とした。さらに、位相分布関数の導出方法に対して、その精度を評価した。
また、恒星の運動星団をもとに銀河系の非軸対称成分であるバー構造や渦巻き構造のパターン速度を推定する方法を検討した。

(2)得られた成果の国内外における位置づけとインパクト：

小型 JASMINE に関しては、イプシロンロケットへの搭載が条件である、JAXA 宇宙研の公募型小型計画宇宙科学ミッションの公募に対して、今までの成果をもとに応募準備が整い、ミッション提案書を作成し申請することができた。

また、国際連携に関しては、米国の地上分光観測プロジェクトである APOGEE 計画とのサイエンス連携に関して、会合をもつとともに、APOGEE チームと JASMINE チームとでサイエンス連携に関する覚書(MOU)を締結するに至った。さらに、Gaia のデータ解析チームや米国の WFIRTS チームとの連携も深めた。

(3)今後の展望：

Gaia による観測データは、2022 年頃の最終リリース以前に中間データリリースがこれから 4 回にわたって行われる予定である。また、Nano-JASMINE の打ち上げは、2017 年度末が今のところ見込まれている。まずは、これらの観測データが出た際には、今までの検討成果を活かして、実際のデータを用いた

解析を行い、科学的成果の創出に努めたい。さらに、小型 JASMINE に関して科学的見地から更なる検討を進め、より良いミッションとして実現に近づけたいと考えている。

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15件)

上田晴彦、原拓自、郷田直輝、矢野太平、
Torus-fitting method for obtaining
action variables in two-dimensional
Galactic potentials, Monthly Notices
of the Royal Astronomical Society, :
Vol.444, 2014, pp.2218-2227, DOI :
10.1093/mnras/stu1490、査読有

山田慧生、山口正輝、浅田秀樹、郷田直輝、
Improving the moment approach for
astrometric binaries: possible
application to Cygnus X-1,
Publications of the Astronomical
Society of Japan, Vol.66, 2014, pp.97-1,
pp.97-8, DOI: 10.1093/pasj/psu071、査読有

井上茂樹、郷田直輝、Astrometric mock
observations for determining the local
dark matter density, Astronomy &
Astrophysics, Vol.555, 2013, A105-1
-A105-15,
DOI: 10.1051/0004-6361/201321355、
査読有

郷田直輝、JASMINE、Scholarpedia,
6(10):12021, 2012、
DOI:10.4249/scholarpedia.12021、
査読有

[学会発表](計74件)

郷田直輝、Infrared Space Astrometry
missions: JASMINE、Division A meeting
at the XXIX General Assembly of IAU、
2015年8月7日、10日、Hawaii Convention
Center (米国・ハワイ州)

郷田直輝、JASMINE/Nano-JASMINE
overview、CU9/GENIUS plenary meeting、
2014年7月7-9日、ウィーン(オーストリア)

郷田直輝、Infrared Space Astrometry
mission for the Galactic Bulge、WISH
Science Workshop 2013、2013年12月2
-3日、国立天文台(東京都・三鷹市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

郷田直輝 (GOUDA, Naoteru)

国立天文台・光赤外研究部・教授
研究者番号: 50202073

(2)研究分担者

辻本 拓司 (TSUJIMOTO, Takuji)
国立天文台・光赤外研究部・助教
研究者番号: 10270456

矢野 太平 (YANO, Taihei)
国立天文台・光赤外研究部・助教
研究者番号: 90390624

(3)連携研究者

梅村 雅之 (UMEMURA, Masayuki)
筑波大学・数理物質科学研究科・教授
研究者番号: 70183754

西 亮一 (NISHI, Ryoichi)
新潟大学・自然科学系・准教授
研究者番号: 80252419

浅田 秀樹 (ASADA, Hideki)
弘前大学・理工学研究科・教授
研究者番号: 50301023

長島 雅裕 (NAGASHIMA, Masayuki)
文教大学・教育学部・准教授
研究者番号: 20342628

山田 良透 (YAMADA, Yoshiyuki)
京都大学・理学研究科・助教
研究者番号: 20230493

住 貴宏 (SUMI, Takahiro)
大阪大学・理学研究科・准教授
研究者番号: 30432214

羽部 朝男 (HABE, Asao)
北海道大学・大学院理学研究院・教授
研究者番号: 90180926

(4)研究協力者

山口 正輝 (YAMAGUCHI, Masaki)
国立天文台・JASMINE 検討室・特任研究員
研究者番号: 00779217