

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400233

研究課題名(和文) 適合格子細分化法シミュレーションで探る星形成の環境効果

研究課題名(英文) Effect of environment in star formation investigated with adaptive mesh refinement

研究代表者

松本 倫明 (MATSUMOTO, Tomoaki)

法政大学・人間環境学部・教授

研究者番号：60308004

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：乱流や磁場などの様々な環境下における星形成を調べるために、数値シミュレーションを用いた研究を行った。数値シミュレーションでは適合格子細分化法を用いて高い空間分解能を実現した。大きなスケールから順に、分子雲同士の相互作用、分子雲スケールから原始連星形成、原始連星の星周構造に関する研究を行った。

ALMA望遠鏡などを用いた観測も高い空間分解能が得られるので、数値シミュレーションと直接比較することが可能である。本研究では、数値シミュレーションと観測を比較することによって、いくつかの天体(分子雲Cyg OB 7、高密度分子雲コア MC27、原始連星 L1551 NE)における様々な現象を議論した。

研究成果の概要(英文)：We have studied star formation in the several environments, i.e., different levels of turbulence and magnetic fields. We have performed large-scale numerical simulations with adaptive mesh refinement (AMR), which allows us to obtain a local high resolution. Several models were investigated: cloud interaction (cloud-cloud collision), protostar formation starting from a cloud scale, and circumbinary structure.

The results of the numerical simulations were compared with the recent high-resolution observation with ALMA and the 45 m telescope at Nobeyama Radio Observatory. By comparison between the numerical simulations and the observation, we discussed several phenomena in the molecular cloud Cyg OB 7, the high-density molecular cloud core MC27, and protobinary stars L1551 NE.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：星形成 分子雲 分子雲コア 原始連星 原始星 MHD 数値シミュレーション AMR

1. 研究開始当初の背景

(1) 恒星の形成（星形成）の現場は分子雲である。分子雲の高密度領域である分子雲コアが、重力によって収縮して星を形成する。

これまでの報告者グループをはじめとするいくつかのグループの研究によると、分子雲コアの質量が星形成の性質を決めるだけでなく、分子雲コアが持つ磁場・回転・乱流も星形成を制御する要素として重要であることがわかってきた(たとえば Matsumoto & Hanawa 2011)。

(2) たとえば、分子雲コアの回転は、原始星と原始惑星系円盤の角運動量の源である。角運動量は原始惑星系円盤の成長を促進し、原始惑星系円盤が分裂して連星や惑星の形成を促す効果もある。乱流は角運動量の起源であり、乱流が大きいほど大きな角運動量が分子雲コアに持ち込まれる。磁場は磁気制動によって、原始星と原始惑星系円盤の回転を止める働きがある。

(3) このように、磁場・回転・乱流が分子雲コアにおける星形成をコントロールすることが明らかになってきたが、従来の研究ではそれらを人為的に仮定するという問題点があった。

2. 研究の目的

(1) 本研究では上記の問題点を是正する。分子雲スケールの環境からシミュレーションをはじめ、そこにおける分子雲コアの形成を自然に再現する。これにより、分子雲コアスケールにおける磁場・回転・乱流などの星形成を制御する要素が自動的に取り入れることが可能になる。

(2) このシミュレーションを遂行するためには、モデルによってはパーセス(pc)スケールから天文単位(au)スケール以下までを横断する非常に大きなダイナミックレンジが要求される。本研究では適合格子細分化法 (AMR法) と呼ばれる高度なシミュレーション技術を用いて、この大きなダイナミックレンジを実現する。

(3) 最近の観測は高解像になり、シミュレーションと直接結果を比較することが可能になった。たとえば ALMA 望遠鏡は、従来の観測よりも飛躍的に高解像でダイナミックレンジが高い観測結果を提供している。これに対応してシミュレーションも高解像度化と高ダイナミックレンジ化が必要である。

(4) また、ALMA 望遠鏡などの観測が示す最近の星形成像は、従来考えられていた標準的なモデルと比較して多様性があることがわかってきた。報告者は星形成の多様性の原因を、星形成が置かれた環境にあると予想している。本研究はこのような観測の高解像度化

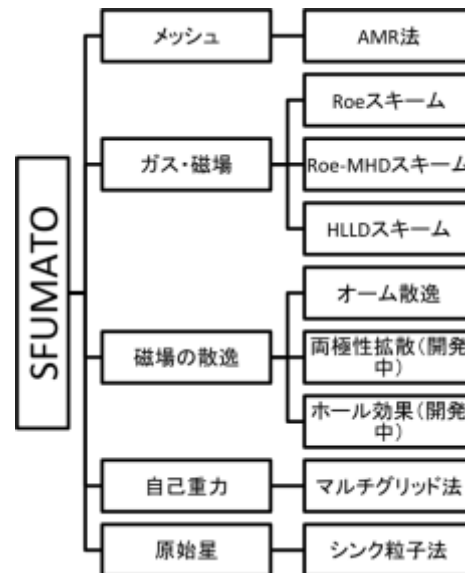


図 1 SFUMATO コードの構成。

AMR 法によるメッシュ生成をベースとして、ガス、磁場、磁場の散逸、自己重力、原始星のモデルを解く。

時代に呼応した研究である。

3. 研究の方法

(1) 上記の目的を達成するために、大規模な数値シミュレーションを遂行した。大きなスケールから順に、①分子雲同士の相互作用、②分子雲スケールから原始連星形成、③原始連星の星周構造に関する研究を行った。

(2) 上記の研究を遂行するためには、空間で 6-7 桁に渡る広いダイナミックが必要になる。したがって AMR 法を用いた数値シミュレーションコードが必須である。

(3) 本研究で用いる自己重力 MHD-AMR コード (SFUMATO コード) の概要を図 1 に示す。①コードの主要部分は既に完成し、その成果は論文に出版済である (Matsumoto 2007)。またスキームの空間精度を 2 次精度から 3 次精度に向上している。②SFUMATO コードはオーム散逸を、陰解法を用いて高速に解くことができる (Matsumoto 2011)。オーム散逸は原始星近傍の高密度ガスにおいて重要な磁場の散逸機構である。オーム散逸の高速解法は、高密度領域の進化を長時間追跡することを可能にする。③SFUMATO コードはシンク粒子法を実装している。シンク粒子は原始星のサブグリッドモデルであり、原始星の内部構造を解くことを回避して分子雲全体の長時間の進化を計算することを可能にする。

(4) SFUMATO コードは大規模な並列計算に対応し、国立天文台天文シミュレーションプロジェクトにおける共同利用を利用して、クレイ社製スーパーコンピューターXC30 を利

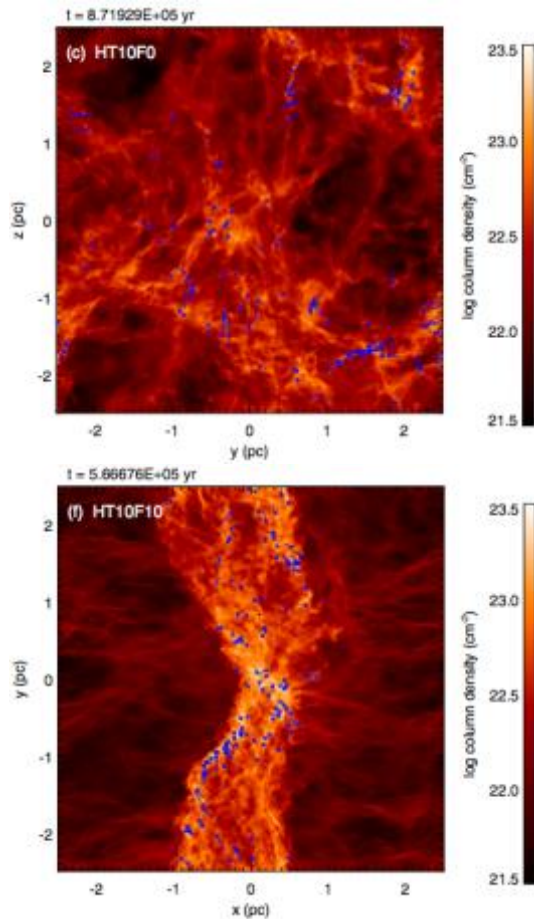


図 2 分子雲の乱流と衝突流による分子雲同士の相互作用の数値シミュレーション。色はガスの柱密度を示し、青い点と線はシンク粒子（星のモデル）の位置と軌跡を示す。上の図は初期にマッハ 10 の乱流を与えた場合、下の図はマッハ 10 の乱流に加えて、マッハ 10 衝突流を与え、分子雲同士を衝突させた場合である。出典：Matsumoto et al. 2015a

用した。通常は 512 コア並列の計算を行い、大規模な計算資源が必要な場合には 1024 コアの並列計算を行った。

4. 研究成果

(1) 分子運動同士の相互作用に関する研究成果はつぎの通りである。シミュレーションでは、 $(5 \text{ pc})^3$ の大きさを持つ計算ボックスに水素分子の個数密度が 1.4×10^3 個のガスを満たし、超音速の乱流を与えた。なお、単純化のためこのモデルでは磁場は無視をした。図 2 の上図はマッハ数 10 の乱流を与えた場合である。乱流とガスの自己重力によってフィラメント状の分子雲が多数形成される。図 2 の下図はマッハ数 10 の乱流とマッハ数 10 の衝突流を加えたものである。フィラメント状分子雲は流れに乗って衝突し、フ

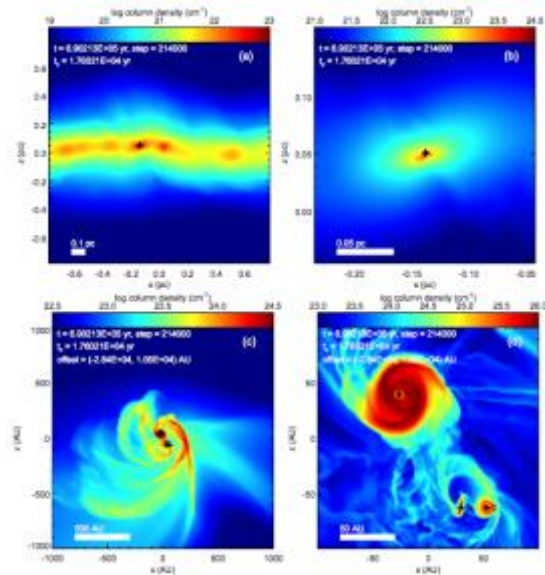


図 3 乱流を持ったフィラメント状分子雲から分子雲コアが形成し、分子雲コアが収縮して多重星が形成される数値シミュレーション。出典：Matsumoto et al. 2015b

ィラメント状分子雲が複雑に相互作用する。ガスは衝突によって圧縮されるため、衝突流がない場合と比較して星形成は活発になる。このような状況は、多数の電波観測で近年示唆されている分子雲の衝突（たとえば Dobashi et al. 2014 によって報告された Cyg OB 7）の状況と整合的である。この結果は論文(Matsumoto et al. 2015a)で詳しく報告されている。

(2) 分子雲スケールから原始星が形成するシミュレーションの結果は以下の通りである。上記のように分子雲はフィラメント状であることが多いため、本研究では初期にフィラメント状の分子雲を置き、そこにマッハ数 1 の乱流を与えた。このモデルでも単純化のために磁場は無視した。その結果を図 3 に示す。初期のフィラメント状分子雲（図 3a）は分裂して分子雲コアを形成する（図 3b）。分子雲コアは自己重力によって収縮するが、その課程で複数に分裂し、結果として三重星が形成した（図 3d）。三重星それぞれが原始星に対応する。三重星の軌道運動によってエンベロープは渦状腕のような複雑な構造を呈する（図 3c）。とくに 1000au 程度の長い弓状の構造が特徴である。このような複雑な星周構造（とくに弓状構造）は、高密度分子雲コア MC27 の ALMA 望遠鏡による高空間分解能観測でも得られており（Tokuda et al. 2014）、本研究で再現されたようなダイナミックな状況が実際の星形成でも起こっていることが示唆される。この結果は論文(Matsumoto et al. 2015b)で詳しく報告されている。

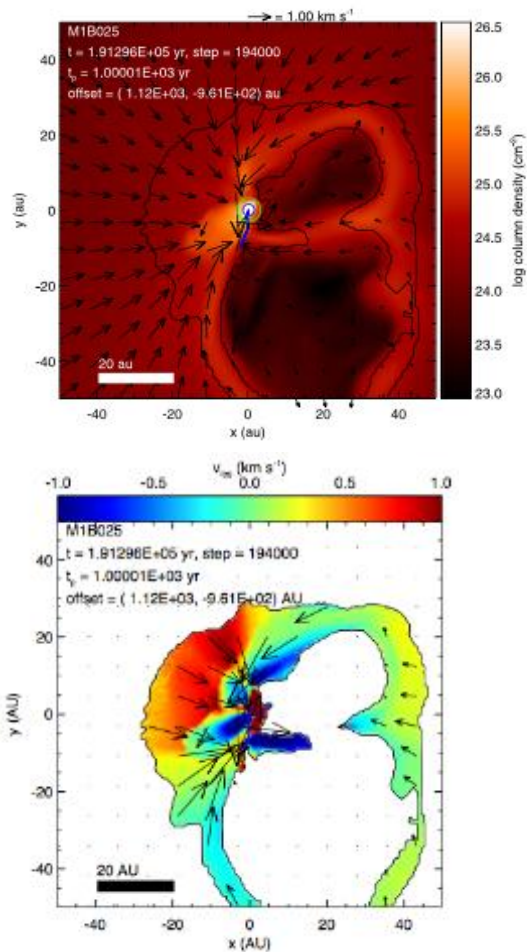


図 5 磁場を考慮したモデルに現れるエンベロープの穴。上図は面密度分布を示し、下図は速度（色は視線速度、矢印は天球面上に射影された速度）を示す。出典：Matsumoto et al. 2017a, 2017b

(3) 磁場を考慮したシミュレーションも行っている。乱流と磁場を持つ分子雲コアにおける原始星形成の数値シミュレーションを行った。磁場を考慮するとエンベロープに穴が空いた星周構造が現れることがある（図 4 上図）。穴の輪郭部は周囲よりも柱密度が高く、弓状の構造として観測される可能性がある。またシミュレーションで再現された弓状の構造の速度（図 4 下図）は観測と整合的である。したがって、Tokuda et al. 2014 で観測された原始星周囲の 1000 au スケールの長い弓状の構造は、前節(2)で述べたエンベロープの渦状腕でも、本節(3)のエンベロープの穴でも説明可能である。弓状構造の成因を明らかにするためには、理論と観測の両面からのさらなる研究が必要である。

(4) 原始連星の星周構造に関する研究成果は以下の通りである。原始連星をもした 2 個のシンク粒子を計算ボックスの中に置き、これらを公転運動させる。そこに計算ボックスの境界からガスを注入し、ガスが星周構造を

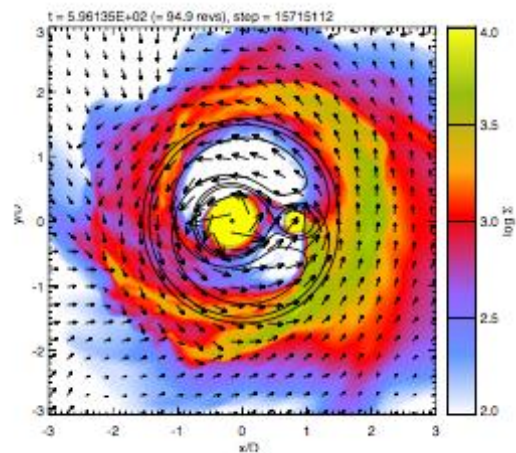


図 4 数値シミュレーションで再現された連星のまわりの星周構造の様子。色は面密度を示し、矢印は赤道面上の速度を示す。連星の重力と遠心力が作るロッシュポテンシャルも参考のため図示した。出典：Matsumoto et al. 2017b

作る様子を計算した。これは分子雲コアにおけるガスの落下を模している。また比較的成長した星を考慮するので、ガスの自己重力を無視した。その計算結果を図 5 に示す。連星それぞれの星の周囲に星周円盤が形成され、連星系を取り囲むように周連星円盤が形成される。このような周連星円盤は原始連星 L1551 NE の ALMA 望遠鏡による高空間分解能観測でも明らかになった (Takakuwa et al. 2014)。図 5 に示すように、周連星円盤に渦状腕が現れる。これは連星の公転運動による重力トルクが原因である。シミュレーションデータにもとづいて観測的な可視化を行い、観測データと比較した。その結果、観測によって得られたデータ、渦状腕の特徴的な速度構造が見られることが明らかになった。これは周連星円盤の渦状腕を観測によってはじめて捉えた画期的な成果である。

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 12 件)

- ① Matsumoto, Tomoaki; Tokuda, Kazuki; Onishi, Toshikazu; Inutsuka, Shu-ichiro; Saigo, Kazuya; Takakuwa, Shigehisa, Theoretical Models of Protostellar Binary and Multiple Systems with AMR Simulations, Journal of Physics: Conference Series, Volume 837, Number 1, 8 pp. (2017b)
DOI: 10.1088/1742-6596/837/1/012009

- ② Matsumoto, Tomoaki; Machida, Masahiro N.; Inutsuka, Shu-ichiro, Circumstellar Disks and Outflows in Turbulent Molecular Cloud Cores: Possible Formation Mechanism for Misaligned Systems, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Volume 839, Issue 1, article id. 69, 14 pp. (2017a). DOI: 10.3847/1538-4357/aa6alc
- ③ Takakuwa, Shigehisa; Saigo, Kazuya; Matsumoto, Tomoaki; Saito, Masao; Lim, Jeremy; Hanawa, Tomoyuki; Yen, Hsi-Wei; Ho, Paul T. P., Spiral Arms, Infall, and Misalignment of the Circumbinary Disk from the Circumstellar Disks in the Protostellar Binary System L1551 NE, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Volume 837, Issue 1, article id. 86, 14 pp. (2017). DOI: 10.3847/1538-4357/aa6116
- ④ Machida, Masahiro N.; Matsumoto, Tomoaki; Inutsuka, Shu-ichiro, Conditions for circumstellar disc formation - II. Effects of initial cloud stability and mass accretion rate, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有, Volume 463, Issue 4, p. 4246-4267 (2016). DOI: 10.1093/mnras/stw2256
- ⑤ Shimoikura, Tomomi; Dobashi, Kazuhito; Matsumoto, Tomoaki; Nakamura, Fumitaka, Discovery of Infalling Motion with Rotation of the Cluster-forming Clump S235AB and Its Implication to the Clump Structures, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Volume 832, Issue 2, article id. 205, 11 pp. (2016). DOI: 10.3847/0004-637X/832/2/205
- ⑥ Lim, Jeremy; Hanawa, Tomoyuki; Yeung, Paul K. H.; Takakuwa, Shigehisa; Matsumoto, Tomoaki; Saigo, Kazuya, Formation of the Unequal-mass Binary Protostars in L1551NE by Rotationally driven Fragmentation, *The Astrophysical Journal*, Volume 831, Issue 1, article id. 90, 13 pp. (2016). DOI: 10.3847/0004-637X/831/1/90
- ⑦ Lim, Jeremy; Yeung, Paul K. H.; Hanawa, Tomoyuki; Takakuwa, Shigehisa; Matsumoto, Tomoaki; Saigo, Kazuya, Rotationally driven Fragmentation in the Formation of the Binary Protostellar System L1551 IRS 5, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Volume 826, Issue 2, article id. 153, 20 pp. (2016). DOI: 10.3847/0004-637X/826/2/153
- ⑧ Tokuda, Kazuki; Onishi, Toshikazu; Matsumoto, Tomoaki; Saigo, Kazuya; Kawamura, Akiko; Fukui, Yasuo; Inutsuka, Shu-ichiro; Machida, Masahiro N.; Tomida, Kengo; Tachihara, Kengo; André, Philippe, Revealing a Detailed Mass Distribution of a High-density Core MC27/L1521F in Taurus with ALMA, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Volume 826, Issue 1, article id. 26, 10 pp. (2016). DOI: 10.3847/0004-637X/826/1/26
- ⑨ Matsumoto, Tomoaki; Onishi, Toshikazu; Tokuda, Kazuki; Inutsuka, Shu-ichiro, An origin of arc structures deeply embedded in dense molecular cloud cores, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 査読有, Volume 449, Issue 1, p.L123-L127 (2015b). DOI:10.1093/mnrasl/slv031
- ⑩ Matsumoto, Tomoaki; Dobashi, Kazuhito; Shimoikura, Tomomi, Star Formation in Turbulent Molecular Clouds with Colliding Flow, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Volume 801, Issue 2, article id. 77, 21 pp. (2015a). DOI: 10.1088/0004-637X/801/2/77
- ⑪ Dobashi, Kazuhito; Matsumoto, Tomoaki; Shimoikura, Tomomi; Saito, Hiro; Akisato, Ko; Ohashi, Kenjiro; Nakagomi, Keisuke, Colliding Filaments and a Massive Dense Core in the Cygnus OB 7 Molecular Cloud, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Volume 797, Issue 1, article id. 58, 22 pp. (2014). DOI: 10.1088/0004-637X/797/1/58
- ⑫ Takakuwa, Shigehisa; Saito, Masao; Saigo, Kazuya; Matsumoto, Tomoaki; Lim, Jeremy; Hanawa, Tomoyuki; Ho, Paul T. P., Angular Momentum Exchange by Gravitational Torques and Infall in the Circumbinary Disk of the Protostellar System L1551 NE, *The Astrophysical Journal*, Volume 796, Issue 1, article id. 1, 17 pp. (2014). DOI: 10.1088/0004-637X/796/1/1
- ⑬ Tokuda, Kazuki; Onishi, Toshikazu; Saigo, Kazuya; Kawamura, Akiko; Fukui, Yasuo; Matsumoto, Tomoaki; Inutsuka, Shu-ichiro; Machida, Masahiro N.; Tomida, Kengo; Tachihara, Kengo, ALMA Observations of a High-density Core in Taurus: Dynamical Gas Interaction at the Possible Site of a Multiple Star Formation, *The Astrophysical Journal Letters*, 査読有, Volume 789, Issue 1, article id. L4, 6 pp. (2014), DOI:10.1088/2041-8205/789/1/L4

〔学会発表〕（計 8 件）

- ① Matsumoto, Tomoaki, Theoretical Models of Protostellar Binary and Multiple Systems with AMR Simulations, East-Asian Numerical Astrophysics Meetings (EANAM7), 2016 年 10 月 24 日, Beijing (中国)
- ② 松本倫明、アウトフローと回転円盤の整列・不整列、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016 年 9 月 15 日、愛媛大学 城北キャンパス（愛媛県・松山市）
- ③ Matsumoto, Tomoaki, Theoretical Models of Protostellar Binary and Multiple Systems with AMR Simulations, ASTRONOMY 2016, 2016 年 6 月 9 日, Monterey (アメリカ)
- ④ 松本倫明、連星降着モデルで探る周連星円盤の構造 II、日本天文学会 2016 年春季年会、2016 年 3 月 14 日、首都大学東京 南大沢キャンパス（東京都・八王子市）
- ⑤ 松本倫明、連星降着モデルで探る周連星円盤の構造、日本天文学会 2015 年秋季年会、2015 年 9 月 10 日、甲南大学（兵庫県・神戸市）
- ⑥ 松本倫明、乱流と衝突をともなう高密度分子雲における集団的星形成 II、日本天文学会 2015 年春季年会、2015 年 3 月 20 日、大阪大学 豊中キャンパス（大阪府・豊中市）
- ⑦ 松本倫明、分子雲コアの中心に存在するアーク構造の起源、日本天文学会 2015 年春季年会、2015 年 3 月 19 日、大阪大学 豊中キャンパス（大阪府・豊中市）
- ⑧ 松本倫明、乱流と衝突をともなう高密度分子雲における集団的星形成、日本天文学会 2014 年秋季年会、2014 年 9 月 13 日、山形大学（山形県・山形市）

〔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〕

ホームページ等

<http://redmagic.i.hosei.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 倫明 (MATSUMOTO, Tomoaki)

法政大学・人間環境学部・教授

研究者番号：60308004

(3) 連携研究者

犬塚 修一郎 (INUTSUKA, Shu-ichiro)

名古屋大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：80270453

町田 正博 (MACHIDA, Masahiro)

九州大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：10402786

土橋 一仁 (DOBASHI, Kazuhito)

東京学芸大学・教育学部・教授

研究者番号：20237176