

令和 5 年 5 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17H01105

研究課題名(和文) 磁場駆動円盤風を考慮した原始惑星系円盤進化と惑星形成に関する研究

研究課題名(英文) Evolution of protoplanetary discs and planet formation with magnetically driven disc winds

研究代表者

鈴木 建 (SUZUKI, Takeru)

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号：80431782

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,900,000円

研究成果の概要(和文)：円盤風が原始惑星系円盤の進化と惑星形成に与える影響を理解することが、本研究の目的である。磁気駆動円盤風を介した不安定性により、円盤に円環-空隙構造が形成されることを大局的な数値実験により明らかにし、さらなる高解像度計算のため局所円柱座標による数値実験の枠組みの構築に着手した。また、解析的モデルによる長期間計算を行い、磁気駆動円盤風が進化の初期から中期に円盤の内側のガスの散逸に本質的に寄与する一方、光蒸発風は最終盤に主に円盤外側で重要となることが判明した。円盤のガス分布が円盤風に大きく影響される場合、惑星の材料となる固体や原始惑星の中心星への落下が回避され、惑星形成の効率が上がることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

惑星は、誕生しつつある星を取り巻く原始惑星系円盤で形成されると考えられている。一方で惑星の形成過程には、惑星材料物質や形成された原始惑星が円盤ガスとの相互作用により中心星への落下してしまうという大問題があり、どのように惑星が形成されるのかは全く理解できていないといっても過言ではない。本研究の学術的意義は、磁気駆動円盤風が原始惑星系円盤の構造と進化に影響を与え、惑星形成に都合の良い環境を自然に与えることを指摘したものである。宇宙の歴史の中で地球上生命の誕生や進化を理解する上で、惑星形成の解明は避けては通れない重要課題であり、ここに一つの解決策を示したことが社会的意義である。

研究成果の概要(英文)：Understanding the impact of disk winds on the evolution of protoplanetary disks (PPDs) and planet formation is the goal of this study. We demonstrated that ring-gap structures are created in protoplanetary disks via a global instability through magnetically-driven disk winds. For further studies with higher-resolution numerical simulations, we are constructing the framework of a cylindrical shearing box model. We also performed long-time calculations with a semi-analytical global model and found that the magnetically-driven disk wind plays a substantial role in the dispersal of the inner gas disk during the early and intermediate stage of the evolution, while the photoevaporating wind is important at later epochs in the outer disk. When the gas distribution of PPDs is significantly affected by the disk winds, the inward migration of solid bodies and protoplanets to the central star can be avoided and the planet formation effectively proceeds.

研究分野：天体物理学

キーワード：磁気流体力学 原始惑星系円盤 惑星形成 磁場駆動円盤風 乱流 光蒸発

### 1. 研究開始当初の背景

誕生しつつある恒星の周囲には、ガスとダスト(塵)から成る原始惑星系円盤が取り巻く。我々太陽系の惑星や、これまでに数千個発見されている太陽系外惑星は、おそらくその全てがこの原始惑星系円盤から誕生した。原始惑星系円盤は、恒星から惑星、さらには私たちのような生命体をつなぐ上で、いわば結節点となる天体の一つであり、その時間進化の理解は天文学、惑星科学における重要課題である。

約10年前より観測を開始した Atacama Large Millimeter Array(以降 ALMA と略す)では、原始惑星系円盤の詳細観測や、しばしば観測されていた複雑な構造をはじめとする原始惑星系円盤の諸問題に特化したプロジェクトが多数行われ、観測天文学の観点から原始惑星系円盤の研究は大きく進展した。その研究の流れを通して重要性が認識された現象の1つとして、円盤から流れ出す物質流である円盤風を挙げることができる。円盤風は、原始惑星系円盤を散逸させるという直接的な効果に加えて、円盤構造への影響を介して間接的に惑星形成にも大きく影響することが示唆されている。しかしながら、理論的には理解できていない事項が多数残存しているという状況であった。

### 2. 研究の目的

円盤風が吹き出している状況下における、原始惑星系円盤の進化を包括的・統一的に理解し、惑星形成への影響を吟味することが本研究の主目的である。円盤風の駆動機構として、中心星からの放射を受けて加熱されたガスが上昇流となる、光蒸発機構がこれまで専ら注目を集めてきた一方で、研究代表者らの貢献もあり、磁場過程により駆動される円盤風の重要性が近年認識されてきている。本研究では特に、磁気駆動円盤風の円盤進化に果たす役割に焦点を当てて研究を進めた。

### 3. 研究の方法

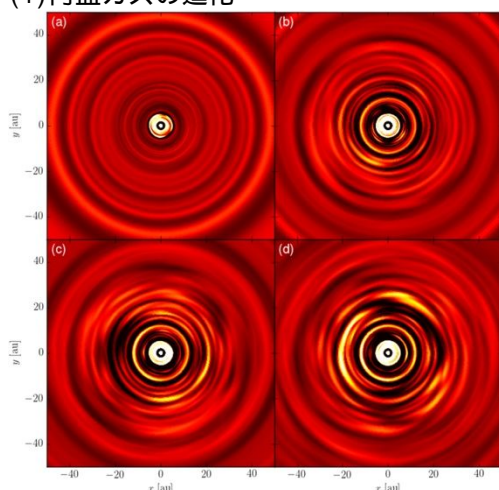
上述した ALMA などの近年の大規模観測機器による観測結果の説明や、さらには将来行われるより詳しい観測の予言を念頭に置いた、理論的手法による研究に取り組んだ。具体的には、(i) 実験的要素も多分に含まれる大規模数値シミュレーションを駆使する手法と並行して、(ii) 原始惑星系円盤の進化の典型的な時間スケールである数百万年から数千万年を追うことが可能な、解析的理論モデルを用いた長時間進化計算も行った。前者(i)の手法により、円盤内のエネルギーや角運動量、ならびに物質の輸送過程などの詳細な物理機構を精査し、後者(ii)の手法により、全般的な円盤進化の大枠を俯瞰的に把握することができる。両手法を両輪として活用することにより、原始惑星系円盤の進化の包括的な理解を目指した。

### 4. 研究成果

(本項目の引用文献で特に注釈のないものは、本研究プロジェクトの成果であり、「研究発表等」の項目に詳細な情報が掲載されている。)

本研究では、円盤風が駆動される状況下での、原始惑星系円盤のガス成分とダスト成分の進化のそれぞれに取り組んだ。両者で得られた成果を以下の(1)と(2)に記述する。

#### (1) 円盤ガスの進化

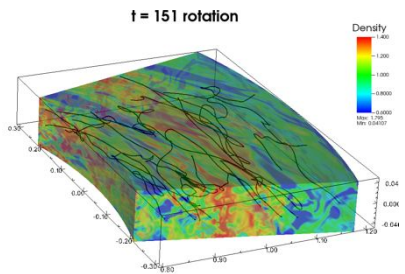


左図は、大局的な原始惑星系円盤の磁気流体数値シミュレーションの結果(Suriano et al. 2019)である。図で示されているのは、円盤上空から見た面密度であり、(a) $\Rightarrow$ (b) $\Rightarrow$ (c) $\Rightarrow$ (d)は時間経過に対応している。いずれの時刻においても、密度の濃淡が形成されていることが分かる。磁場強度との関係を調べると、密度が低い領域では磁場が強い、すなわち、密度とガスが逆相関して分布していることが判明した。詳細な物理機構の解析により、強磁場領域では円盤風が強く駆動しガスを持ち去るため、さらに磁場の影響が相対的に強くなり、より一層強い円盤風が吹き出すという、ある種の不安定性が働

いていることが理解された。このような原始惑星系円盤の円環-空隙構造は複数観測されていたが、その形成の主要因としては観測できていない惑星の存在が盛んに議論されていた。この研究結果は、惑星がたとえ存在していなくても、磁気駆動円盤風を介した磁気流体機構により円環-空隙構造が形作られることを指摘したという点で、非常に大きな意義がある。

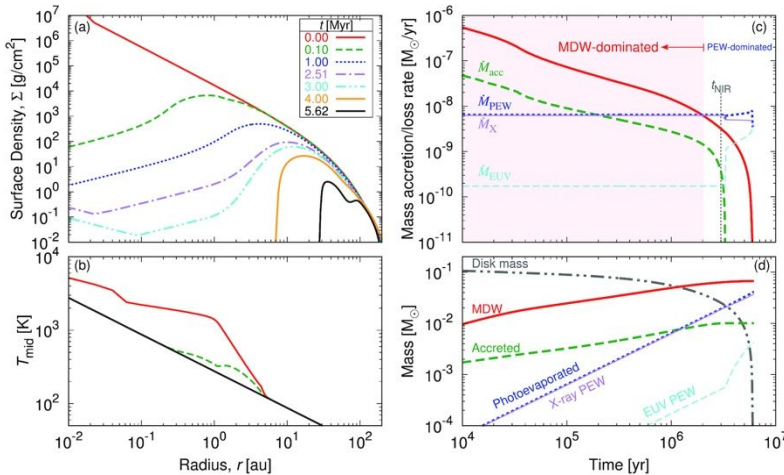
ここで述べた円環や空隙構造に代表される、原始惑星系円盤で見られる微細な構造を数値シ





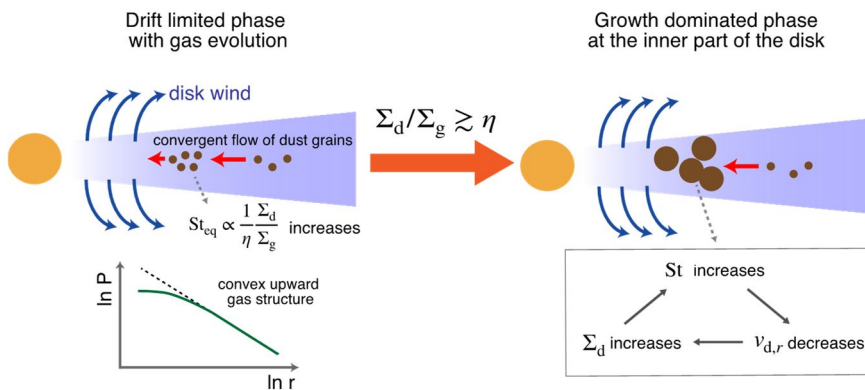
シミュレーション的手法で調査するためには、十分な解像度が必要となる。しかしながら大局的な計算では、十分な解像度のためには大きな計算コストが必要となる。そこで、円盤の一部のみを取り出した、局所的な領域のみをシミュレーションすることにより、計算コストを抑制しつつも十分な解像度が得られるような数値計算手法の開発に着手した。このような手法は、円盤の一部を局所デカルト近似することにより解く手法がこれまで数多く行われていたが、この場合直方体形状をした計算領域の対称性に起因して、円盤の中心星の方向や回転方向を正しく定義できないという弱点があった。本研究では円柱座標系を採用することにより対称性を破り、角運動量が通常通り定義可能となった結果、降着構造の再現などより現実的な取り扱いが可能となった。一方で、境界条件の実装は煩雑なものとなったが、保存則に則した手法を適用することにより実用に耐え得る計算コードを完成させ、上図にあるような円柱系の局所円盤の磁気流体数値実験を行った(Suzuki et al.2019; Suzuki 2023 投稿中)。なお本研究期間終了までに円盤風の直接的な取り扱いまでを実装することができなかったが、基盤研究(B)22H01263 へと引き継ぎ、

継続して取り組んでいる。原始惑星系円盤の長期進化の理解のため、解析的な理論モデルを用いた計算にも取り組んだ。左図は、磁気駆動円盤風と光蒸発による円盤風の両方を考慮した原始惑星系円盤の進化である(Kunitomo et al. 2020)。磁気駆動円盤風は中心星近傍のガスに散逸により効くため、内側の面密度から先に減少し(左上図)、粘性加熱の影響も



急激に低下する結果、温度も低下し中心星からの放射による平衡温度へと帰着する(左下図)。円盤の散逸を担う割合としては、磁気駆動円盤風によるものが最も大きい、円盤ガス消失の最終盤には光蒸発も重要となる(右図)ことが分かった。この研究は、中心星の放射の時間進化を考慮し、特に光蒸発風に特化した研究課題にも拡張された(Kunitomo et al.2021)

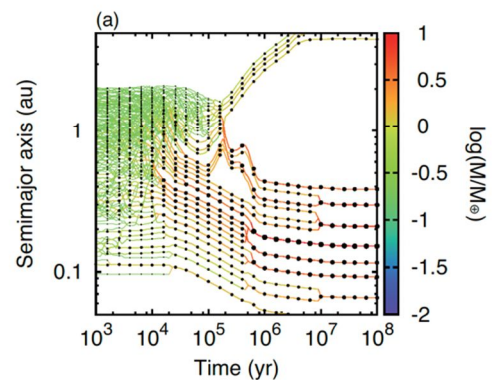
## (2) 原始惑星系円盤内の固体成分の進化



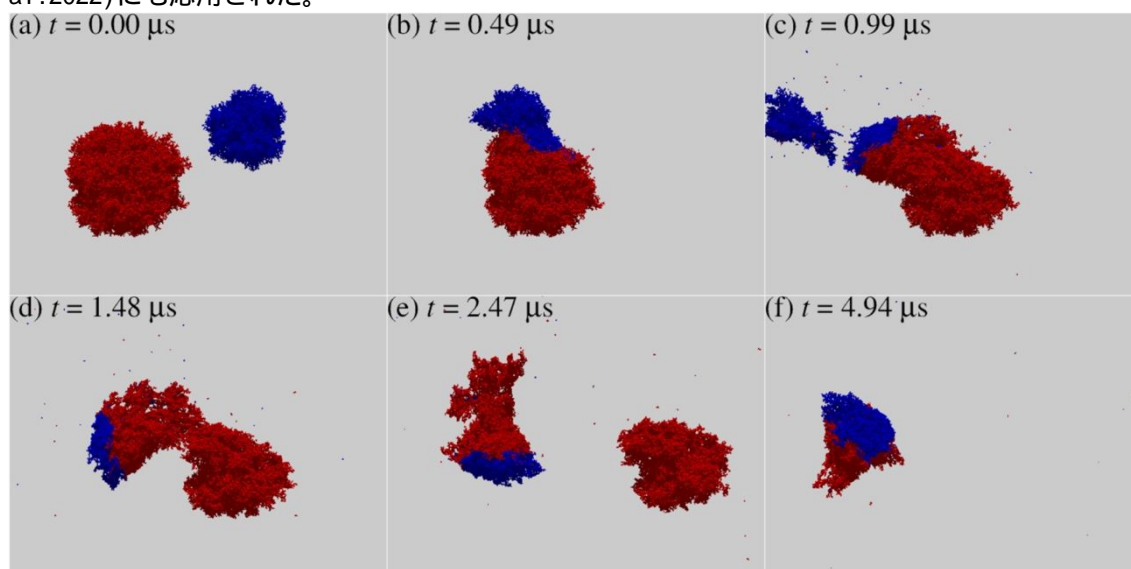
磁気駆動円盤風が固体成分の進化に与える影響を、解析的理論モデルを用いて調査した(Taki et al. 2021)。磁気駆動円盤風は円盤内側のガスを選択的に消失させるため、面密度勾配が通常より緩やかになったり、さら

には、通常と逆向きになったりする。勾配が変化する場所には、円盤外側からガス成分との摩擦により落下してきた小石や岩石サイズの固体が集積するため、合体成長による大きな物体の形成にとって非常に都合の良い場所となる。さらに、固体の成長とともに落下速度がするため、合体成長自体がさらに加速するという正のフィードバックが掛かり、急速な固体成長が見込まれる(上図)。

磁気駆動円盤風による原始惑星系円盤の構造の変化は、微惑星(大きさ約 1km)や原始惑星(大きさ約 1000km)などの大きな固体の軌道進化にも大きな影響を及ぼす。前ページ下の図は、円盤風影響下にある原始惑星系円盤



における、原始惑星の軌道の進化を示したものである(Ogihara et al.2018b)。円盤風による質量の損失がない場合、原始惑星達はほぼ全て内側に移動し、中心の原始星に落下してしまう。一方この図から分かるよう、円盤風が吹き出すとガス円盤の散逸による面密度構造の変化により、特に1天文単位(=太陽地球間距離)より外側にある惑星は、外側に移動している。内側に位置する惑星達も、若干内側に移動するものの中心星に落下せずに残っていることが分かる。円盤風は、形成された原始惑星を、効率良く存続させる機構であるといえる。惑星移動に関する研究課題は、太陽系惑星の形成(Ogihara et al.2018a)や、小質量恒星周囲の惑星形成(Ogihara et al.2022)にも応用された。



固体の合体成長の最初の段階である、ダストの合体成長の直接数値実験による研究にも取り組んだ(上図;Hasegawa et al.2021; 2023)。これまでほとんど研究されてこなかった、非等質量の場合の衝突計算を行い、より大きな衝突体(図中の赤)から小さな衝突体(青)への質量移動が、かなり広い衝突速度範囲で起きていることが判明した。これは、固体の合体成長が従来考えられていたよりも、遅くなることを示している。今後惑星形成の理論モデルに、この効果を考慮することが不可欠であるということであり、非常に意義深い研究成果である。なお本研究課題は、円盤風との関係を調査する前のより基礎的な研究内容という位置付けであるが、今後新たな理論モデルの構築により、ダストの合体成長における円盤風の役割の解明を目指す研究へとつなげていく。

### (3)研究成果のまとめ

本研究プロジェクトを通して、原始惑星系円盤からの円盤風に関する諸問題に取り組み、円盤進化とそこでの惑星形成における円盤風の役割の重要性がなお一層明らかになった。研究開始時期である2017年から比較し、全世界的な研究の潮流もこれと一致するものとなっており、本プロジェクトからの研究成果も、その流れの駆動に大きく寄与してきた。本研究プロジェクトの期間終了直後の2023年4月には、数年に一度のみ開催される国際会議`Protostars & Planets 7`で、原始惑星系円盤からの円盤風に関するレビューを行う6名グループが構成された。研究代表者もこのグループの一員であり、執筆者に名を連ねるレビュー論文(Pascucci et al.2023)として近日中に出版される予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計68件（うち査読付論文 68件 / うち国際共著 17件 / うちオープンアクセス 21件）

1. 著者名 Taki Tetsuo, Kuwabara Koh, Kobayashi Hiroshi, Suzuki Takeru K.	4. 巻 909
2. 論文標題 New Growth Mechanism of Dust Grains in Protoplanetary Disks with Magnetically Driven Disk Winds	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 75 ~ 75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abd79f	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 Kunitomo Masanobu, Ida Shigeru, Takeuchi Taku, Pani? Olja, Miley James M., Suzuki Takeru K.	4. 巻 909
2. 論文標題 Photoevaporative Dispersal of Protoplanetary Disks around Evolving Intermediate-mass Stars	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 109 ~ 109
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abdb2a	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 Hasegawa Yukihiko, Suzuki Takeru K., Tanaka Hidekazu, Kobayashi Hiroshi, Wada Koji	4. 巻 915
2. 論文標題 Collisional Growth and Fragmentation of Dust Aggregates with Low Mass Ratios. I. Critical Collision Velocity for Water Ice	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 22 ~ 22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abf6cf	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 Suzuki Takeru K, Taki Tetsuo, Suriano Scott S	4. 巻 71
2. 論文標題 Magnetohydrodynamics in a cylindrical shearing box	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 id.100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz082	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 該当する

1. 著者名 Kunitomo Masanobu, Suzuki Takeru K, Inutsuka Shu-ichiro	4. 巻 492
2. 論文標題 Dispersal of protoplanetary discs by the combination of magnetically driven and photoevaporative winds	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3849 ~ 3858
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa087	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 Kimura Hiroshi, Kunitomo Masanobu, Suzuki Takeru K., Robrade Jan, Thebault Philippe, Mitsuishi Ikuyuki	4. 巻 183
2. 論文標題 Hot grain dynamics by electric charging and magnetic trapping in debris disks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Planetary and Space Science	6. 最初と最後の頁 104581 ~ 104581
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pss.2018.07.010	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 該当する

1. 著者名 Takasao Shinsuke, Tomida Kengo, Iwasaki Kazunari, Suzuki Takeru K.	4. 巻 857
2. 論文標題 A Three-dimensional Simulation of a Magnetized Accretion Disk: Fast Funnel Accretion onto a Weakly Magnetized Star	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 4 ~ 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aab5b3	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 Ogihara Masahiro, Kokubo Eiichiro, Suzuki Takeru K., Morbidelli Alessandro	4. 巻 612
2. 論文標題 Formation of the terrestrial planets in the solar system around 1 au via radial concentration of planetesimals	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 L5 ~ L5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201832654	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 該当する

1. 著者名 Ogihara Masahiro, Kokubo Eiichiro, Suzuki Takeru K., Morbidelli Alessandro	4. 巻 615
2. 論文標題 Formation of close-in super-Earths in evolving protoplanetary disks due to disk winds	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A63 ~ A63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201832720	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 該当する

1. 著者名 Suriano Scott S, Li Zhi-Yun, Krasnopolsky Ruben, Suzuki Takeru K, Shang Hsien	4. 巻 484
2. 論文標題 The formation of rings and gaps in wind-launching non-ideal MHD discs: three-dimensional simulations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 107 ~ 124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty3502	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 該当する

1. 著者名 Takasao Shinsuke, Tomida Kengo, Iwasaki Kazunari, Suzuki Takeru K.	4. 巻 878
2. 論文標題 Giant Protostellar Flares: Accretion-driven Accumulation and Reconnection-driven Ejection of Magnetic Flux in Protostars	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L10 ~ L10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab22bb	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 Takasao Shinsuke, Suzuki Takeru K., Shibata Kazunari	4. 巻 847
2. 論文標題 A Theoretical Model of X-Ray Jets from Young Stellar Objects	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 46 ~ 46
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa8722	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 Ogihara Masahiro, Kokubo Eiichiro, Suzuki Takeru K., Morbidelli Alessandro, Crida Aurélien	4. 巻 608
2. 論文標題 Effects of global gas flows on type I migration	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A74 ~ A74
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201730777	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 該当する

1. 著者名 Takasao Shinsuke, Tomida Kengo, Iwasaki Kazunari, Suzuki Takeru K.	4. 巻 857
2. 論文標題 A Three-dimensional Simulation of a Magnetized Accretion Disk: Fast Funnel Accretion onto a Weakly Magnetized Star	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 4 ~ 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aab5b3	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 Ogihara Masahiro, Kokubo Eiichiro, Suzuki Takeru K., Morbidelli Alessandro	4. 巻 612
2. 論文標題 Formation of the terrestrial planets in the solar system around 1 au via radial concentration of planetesimals	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 L5 ~ L5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201832654	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 該当する

1. 著者名 Suzuki Takeru K	4. 巻 70
2. 論文標題 Stellar winds and coronae of low-mass Population II/III stars	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 34-34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy023	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 Ogihara Masahiro, Kokubo Eiichiro, Suzuki Takeru K., Morbidelli Alessandro	4. 巻 615
2. 論文標題 Formation of close-in super-Earths in evolving protoplanetary disks due to disk winds	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A63 ~ A63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201832720	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 該当する

1. 著者名 Ogihara Masahiro, Kokubo Eiichiro, Nakano Ryuunosuke, Suzuki Takeru K.	4. 巻 658
2. 論文標題 Rapid-then-slow migration reproduces mass distribution of TRAPPIST-1 system	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A184 ~ A184
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202142354	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 Takasao Shinsuke, Tomida Kengo, Iwasaki Kazunari, Suzuki Takeru K.	4. 巻 941
2. 論文標題 Three-dimensional Simulations of Magnetospheric Accretion in a T Tauri Star: Accretion and Wind Structures Just Around the Star	5. 発行年 2022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/ac9eb1	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 Kunitomo Masanobu, Suzuki Takeru K, Inutsuka Shu-ichiro	4. 巻 508
2. 論文標題 Erratum: Dispersal of protoplanetary discs by the combination of magnetically driven and photoevaporative winds	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2492 ~ 2492
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab2748	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 Suzuki Takeru K., Ogihara Masahiro, Morbidelli Alessandro, Crida Aurélien, Guillot Tristan	4. 巻 668
2. 論文標題 Evolution of protoplanetary discs with magnetically driven disc winds (<i>Corrigendum</i>)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 C1 ~ C1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201628955e	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 該当する

1. 著者名 Takasao Shinsuke, Tomida Kengo, Iwasaki Kazunari, Suzuki Takeru K.	4. 巻 941
2. 論文標題 Three-dimensional Simulations of Magnetospheric Accretion in a T Tauri Star: Accretion and Wind Structures Just Around the Star	5. 発行年 2022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/ac9eb1	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 Takasao Shinsuke, Tomida Kengo, Iwasaki Kazunari, Suzuki Takeru K.	4. 巻 946
2. 論文標題 Erratum: " Three-dimensional Simulations of Magnetospheric Accretion in a T Tauri Star: Accretion and Wind Structures Just Around the Star " (2022, ApJ, 941, 73)	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 57 ~ 57
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acc39b	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 Hasegawa Yukihiko, Suzuki Takeru K., Tanaka Hidekazu, Kobayashi Hiroshi, Wada Koji	4. 巻 944
2. 論文標題 Collisional Growth and Fragmentation of Dust Aggregates. II. Mass Distribution of Icy Fragments	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 38 ~ 38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acadda	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, Kobayashi H	4. 巻 519
2. 論文標題 Heavy-element accretion by proto-Jupiter in a massive planetesimal disc, revisited	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1713 ~ 1731
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac3568	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 該当する

1. 著者名 Tominaga Ryosuke T., Tanaka Hidekazu, Kobayashi Hiroshi, Inutsuka Shu-ichiro	4. 巻 940
2. 論文標題 Nonlinear Outcome of Coagulation Instability in Protoplanetary Disks. II. Dust-ring Formation Mediated by Backreaction and Fragmentation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 152 ~ 152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac97e8	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 Tominaga Ryosuke T., Kobayashi Hiroshi, Inutsuka Shu-ichiro	4. 巻 937
2. 論文標題 Nonlinear Outcome of Coagulation Instability in Protoplanetary Disks. I. First Numerical Study of Accelerated Dust Growth and Dust Concentration at Outer Radii	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 21 ~ 21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac82b4	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 Ohashi Satoshi, Nakatani Riouhei, Liu Haiyu Baobab, Kobayashi Hiroshi, Zhang Yichen, Hanawa Tomoyuki, Sakai Nami	4. 巻 934
2. 論文標題 Formation of Dust Clumps with Sub-Jupiter Mass and Cold Shadowed Region in Gravitationally Unstable Disk around Class 0/I Protostar in L1527 IRS	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 163 ~ 163
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac794e	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 Ohashi Satoshi, Kobayashi Hiroshi, Sai Jinshi, Sakai Nami	4. 巻 933
2. 論文標題 No Evidence of the Significant Grain Growth but Tentative Discovery of Disk Substructure in a Disk around the Class I Protostar L1489 IRS	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 23 ~ 23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac6fcf	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 Tominaga Ryosuke T., Inutsuka Shu-ichiro, Kobayashi Hiroshi	4. 巻 923
2. 論文標題 Coagulation Instability in Protoplanetary Disks: A Novel Mechanism Connecting Collisional Growth and Hydrodynamical Clumping of Dust Particles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 34 ~ 34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac173a	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 Kobayashi Hiroshi, Tanaka Hidekazu	4. 巻 922
2. 論文標題 Rapid Formation of Gas-giant Planets via Collisional Coagulation from Dust Grains to Planetary Cores	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 16 ~ 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac289c	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 Sugiura Keisuke, Kobayashi Hiroshi, Watanabe Sei-ichiro, Genda Hidenori, Hyodo Ryuki, Inutsuka Shu-ichiro	4. 巻 365
2. 論文標題 SPH simulations for shape deformation of rubble-pile asteroids through spinup: The challenge for making top-shaped asteroids Ryugu and Bennu	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 114505 ~ 114505
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2021.114505	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 Okamura Tatsuya, Kobayashi Hiroshi	4. 巻 916
2. 論文標題 The Growth of Protoplanets via the Accretion of Small Bodies in Disks Perturbed by the Planetary Gravity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 109 ~ 109
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac06c6	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 Nakatani Riouhei, Kobayashi Hiroshi, Kuiper Rolf, Nomura Hideko, Aikawa Yuri	4. 巻 915
2. 論文標題 Photoevaporation of Grain-depleted Protoplanetary Disks around Intermediate-mass Stars: Investigating the Possibility of Gas-rich Debris Disks as Protoplanetary Remnants	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 90 ~ 90
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac0137	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 Ohashi Satoshi, Kobayashi Hiroshi, Nakatani Riouhei, Okuzumi Satoshi, Tanaka Hidekazu, Murakawa Koji, Zhang Yichen, Liu Hanyu Baobab, Sakai Nami	4. 巻 907
2. 論文標題 Ring Formation by Coagulation of Dust Aggregates in the Early Phase of Disk Evolution around a Protostar	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 80 ~ 80
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abd0fa	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 Kimura Hiroshi, Wada Koji, Kobayashi Hiroshi, Senshu Hiroki, Hirai Takayuki, Yoshida Fumi, Kobayashi Masanori, Hong Peng K, Arai Tomoko, Ishibashi Ko, Yamada Manabu	4. 巻 498
2. 論文標題 Is water ice an efficient facilitator for dust coagulation?	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1801 ~ 1813
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa2467	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 Morota T., Sugita S., Cho Y., Kanamaru M., Tatsumi E., Sakatani N., .... Kobayashi H. et al.	4. 巻 368
2. 論文標題 Sample collection from asteroid (162173) Ryugu by Hayabusa2: Implications for surface evolution	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 654 ~ 659
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aaz6306	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 該当する

1. 著者名 Sugiura Keisuke, Kobayashi Hiroshi, Inutsuka Shu-ichiro	4. 巻 181
2. 論文標題 High-resolution simulations of catastrophic disruptions: Resultant shape distributions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Planetary and Space Science	6. 最初と最後の頁 104807 ~ 104807
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pss.2019.104807	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 Kobayashi Hiroshi, Isoya Kazuhide, Sato Yutaro	4. 巻 887
2. 論文標題 Importance of Giant Impact Ejecta for Orbits of Planets Formed during the Giant Impact Era	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 226 ~ 226
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab5307	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 Higuchi Aya E., Saigo Kazuya, Kobayashi Hiroshi, Iwasaki Kazunari, Momose Munetake, Lou Soon Kang, Sakai Nami, Kunitomo Masanobu, Ishihara Daisuke, Yamamoto Satoshi	4. 巻 883
2. 論文標題 First Subarcsecond Submillimeter-wave [C i]?Image of 49 Ceti with ALMA	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 180 ~ 180
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab3d26	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 該当する

1. 著者名 Sugiura Keisuke, Kobayashi Hiroshi, Inutsuka Shu-ichiro	4. 巻 328
2. 論文標題 Collisional elongation: Possible origin of extremely elongated shape of 11/ ' Oumuamua	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 14 ~ 22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2019.03.014	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 Sugiura K., Kobayashi H., Inutsuka S.	4. 巻 620
2. 論文標題 Toward understanding the origin of asteroid geometries	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A167 ~ A167
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201833227	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 Suetsugu Ryo, Tanaka Hidekazu, Kobayashi Hiroshi, Genda Hidenori	4. 巻 314
2. 論文標題 Collisional disruption of planetesimals in the gravity regime with iSALE code: Comparison with SPH code for purely hydrodynamic bodies	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 121 ~ 132
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2018.05.027	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 Kobayashi Hiroshi, Tanaka Hidekazu	4. 巻 862
2. 論文標題 From Planetesimal to Planet in Turbulent Disks. II. Formation of Gas Giant Planets	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 127 ~ 127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aacdf5	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 Kobayashi Masato I N, Kobayashi Hiroshi, Inutsuka Shu-ichiro, Fukui Yasuo	4. 巻 70
2. 論文標題 Star formation induced by cloud?cloud collisions and galactic giant molecular cloud evolution	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 S59 ~ S59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy018	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 Genda Hidenori, Fujita Tomoaki, Kobayashi Hiroshi, Tanaka Hidekazu, Suetsugu Ryo, Abe Yutaka	4. 巻 294
2. 論文標題 Impact erosion model for gravity-dominated planetesimals	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 234 ~ 246
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2017.03.009	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 Ishihara D., Kondo T., Kaneda H., Suzuki T., Nakamichi K., Takaba S., Kobayashi H., Masuda S., Ootsubo T., Pyo J., Onaka T.	4. 巻 603
2. 論文標題 A likely detection of a local interplanetary dust cloud passing near the Earth in the AKARI mid-infrared all-sky map	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A82 ~ A82
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201628954	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 -

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Suzuki, Takeru K.
2. 発表標題 MHD in a Cylindrical Shearing Box
3. 学会等名 Turbulence and Structure Formation in Protoplanetary Disks 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Suzuki, Takeru K.
2. 発表標題 Magnetohydrodynamics (MHD) in a Cylindrical Shearing Box
3. 学会等名 14TH ASIA-PACIFIC PHYSICS CONFERENCE (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Suzuki, Takeru K.
2. 発表標題 Magnetic Activity in the Galactic Centre Region
3. 学会等名 2nd Asia-Pacifc Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Suzuki, Takeru K.
2. 発表標題 Roles of dv in Alfvénic wave-driven solar wind
3. 学会等名 Growth of Small Scales in the Corona and Solar Wind 2021(Online Conference) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 鈴木 建	4. 発行年 2020年
2. 出版社 日本評論社	5. 総ページ数 216
3. 書名 高校生からの天文学 驚異の太陽	

1. 著者名 東京大学教養学部	4. 発行年 2020年
2. 出版社 白水社	5. 総ページ数 188
3. 書名 生命の根源を見つめる	

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究代表者の個人web <a href="https://ea.c.u-tokyo.ac.jp/astro/Members/stakeru/">https://ea.c.u-tokyo.ac.jp/astro/Members/stakeru/</a> 研究代表者個人ページ <a href="http://ea.c.u-tokyo.ac.jp/astro/Members/stakeru/">http://ea.c.u-tokyo.ac.jp/astro/Members/stakeru/</a> 研究代表者個人ページ <a href="http://ea.c.u-tokyo.ac.jp/astro/Members/stakeru/">ea.c.u-tokyo.ac.jp/astro/Members/stakeru</a>
--

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	小林 浩  (KOBAYASHI Hiroshi)  (40422761)	名古屋大学・理学研究科・准教授    (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
---------	---------