

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：32613

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26800106

研究課題名(和文) 原始惑星系円盤の詳細構造から探る物理過程と惑星形成

研究課題名(英文) Probing Planet Formation from Detailed Structures in Protoplanetary Disks

研究代表者

武藤 恭之 (Muto, Takayuki)

工学院大学・教育推進機構(公私立大学の部局等)・准教授

研究者番号：20633803

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、原始惑星系円盤に観測される様々な構造が、円盤や惑星形成についてどのようなことを示唆するのかを、観測のモデリングや理論計算を通じて明らかにすることを目指した。まず、HD 142527周囲の原始惑星系円盤のアルマ望遠鏡観測に基づく、ガス・ダスト分布の詳細なモデル計算では、この円盤内にダストが強く濃集されている領域があることが分かった。次に、惑星が作るギャップ構造に関するモデルを、アルマ望遠鏡による HL Tau の高解像度観測にいち早く適用した。また、差動回転円盤における流体力学的不安定性の詳細な計算から、長年の問題であった、ロスビー波不安定性の中立交定条件の問題の一部を解決に導いた。

研究成果の概要(英文)：High resolution observations of protoplanetary disks are now available with large telescopes and many protoplanetary disks show various structures. The goal of this research is to develop the methods to derive implications on physical status of protoplanetary disks and on planet formation processes from such observations. From the modeling work of the disk around HD 142527, we have found that there is a location in the disk where the dust particles are strongly concentrated. In the work on the shape of the gap structures produced by a planet embedded in the disk, our group is one of the first to derive the estimate of the planet mass in the disk around the HL Tau, in which several ring-like structures are found in the ALMA long-baseline campaign observations. In the work of linear stability analyses of Rossby wave instability, we have derived the marginally stable conditions of the instability, which have been a mystery over several decades.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：原始惑星系円盤 惑星形成 電波天文学 赤外線天文学 理論天文学 降着円盤

## 1. 研究開始当初の背景

原始惑星系円盤は、惑星が生まれる現場として精力的に研究されている。近年、その原始惑星系円盤の構造が、空間分解して取得できるようになってきた。本研究費の申請時点では、すばる望遠鏡を用いた円盤および系外惑星の直接撮像プロジェクト『SEEDS』により、様々な構造が近赤外線の偏光差分撮像という手法によって得られてきていた。また、アルマ望遠鏡の初期観測が開始され、原始惑星系円盤に、サブミリ波で非常に強い非軸対称性を持つものが存在することが明らかになってきていた。

研究開始当初においては、原始惑星系円盤が豊かな構造を持つということが認識されつつあった状況であり、これまでの「軸対称で滑らかな」円盤の描像が変わろうとしていた。惑星形成の現場としての「原始惑星系円盤」とは何か、という大きな問題が、当時の最新の観測から浮かび上がってきていた。

## 2. 研究の目的

このような背景のもと、本研究は：

1. 原始惑星系円盤の構造と、温度・密度などの円盤の物理状態がどのように結びつくのかを明らかにすること

2. 原始惑星系円盤において観測される構造が、円盤におけるどのような物理過程と結びついているのかを明らかにすること

の二点を目標として掲げ、さらに、アルマ観測などによって、多数の原始惑星系円盤のデータが出てくれば、そこから「典型的な原始惑星系円盤」の描像を考察していくことを目指した。

## 3. 研究の方法

本研究では、理論的な手法と観測的な手法を織り交ぜて研究を行っている。

理論的な手法としては、原始惑星系円盤における流体力学的な素過程の計算や、輻射輸送による観測のモデル計算といったことを行っている。

また、観測的な手法としては、主にアルマ望遠鏡に対して観測提案を行い、データの解析を行っている。また、適宜、アーカイブデータの使用も行っている。

## 4. 研究成果

研究内容は純粋に理論的な研究から観測的な研究まで多岐にわたるが、以下で、本研究によって得られた成果の一部について、トピック的に紹介する。

○HD 142527 周囲の原始惑星系円盤におけるガス・ダストの分布に関する研究(百瀬宗武氏、花輪知幸氏、スン・カンロウ氏、片岡章雅氏他との共同研究)

若い星 HD 142527 の周囲に存在する原始惑星系円盤には、これまでの観測によってさまざまな構造が見つかった。特に、深川美里氏・百瀬宗武氏・塚越崇氏らによるアルマ望遠鏡を用いた観測によって、ダスト放射に強い非軸対称性があるものの、ガス放射は比較的軸対称に近いことがわかってきた。

本研究では、この円盤のガス・ダストの分布について、特にダスト放射が明るい方向と暗い方向の二つの方向について、花輪知幸氏の協力を得ながら、ガス分布とダスト分布の詳細なモデリングを行った [雑誌論文 6]。その結果、ダストが濃い場所では、薄い場所の 70 倍程度濃集していること、また、ダストが濃い場所においては、ガスがダストの 3 倍程度

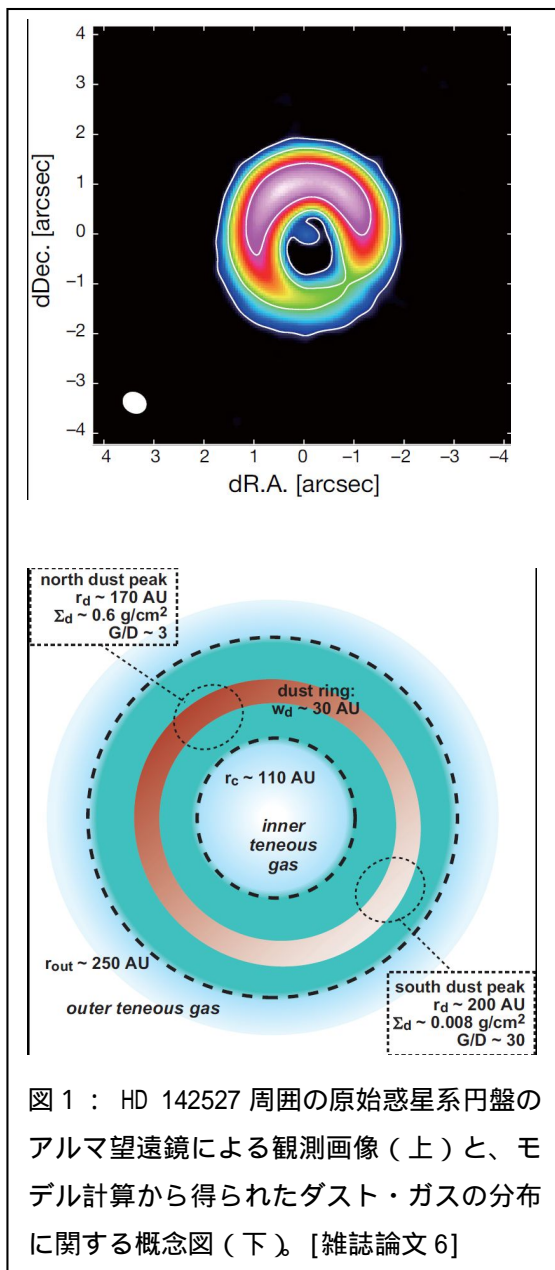


図 1 : HD 142527 周囲の原始惑星系円盤のアルマ望遠鏡による観測画像(上)と、モデル計算から得られたダスト・ガスの分布に関する概念図(下)。[雑誌論文 6]

度しか存在しないことが示唆された。通常の星間空間においては、質量比にして、ガスはダストの 100 倍程度存在するので、この円盤では、非常にダストが濃集している場所がある、ということが分かった。このことは、この円盤において惑星がすでに形作られている、あるいは、今後惑星が形成される可能性があることを示唆している。

その後、ダスト連続波放射をもとに、すべての方位角方向に関するダスト面密度分布を求めるという研究がカンロウ・スン氏を中心に行われた [雑誌論文 1]。その結果、この円盤においては、ダストの散乱オパシティが、通常用いられる値のままであると観測を説明することが難しく、通常と比較してこの値が一桁程度小さい可能性がある、ということが示唆された。

これは、球形のダストを考えるような従来のダストモデルで、観測を説明しづらいということを示唆している。上記のダスト・ガス比の問題とも相まって、原始惑星系円盤はどのような状態にあるのか、より詳しい検討が必要になっている。

本研究課題を遂行する中で、原始惑星系円盤における散乱偏光という、新しい着想を得ることができた。きわめて明るい HD142527 周囲の原始惑星系円盤からの放射を説明するためには、ダスト粒子が 1mm 程度の大きさになっていなければならないが、その時、ダストによる散乱の影響を無視できなくなる、という着想を得た。一般に、散乱によって電磁波に偏光が生じることが知られているが、このことが、原始惑星系円盤のミリ波・サブミリ波放射においても生じるかどうか、という点を、片岡章雅氏とともに検討した。その結果、原始惑星系円盤における連続波放射においても、ダストの大きさによっては、アルマ望遠鏡によって観測可能なレベルの散乱が生じるということがわかった [雑誌論文 4]。

このアイデアをもとに、片岡氏が中心と

なってアルマ望遠鏡に観測を提案、実行し、実際に原始惑星系円盤から偏光シグナルを得ることに成功した。その偏光パターンの一部は、散乱による偏光の予測するパターンと類似したものであった [雑誌論文 2]。ミリ波・サブミリ波の偏光は、従来、磁場に対して整列したダストによって生じるという説が有力であったが、本研究によって、新たな偏光のメカニズムを提唱し、また、偏光観測が、原始惑星系円盤におけるダストの大きさを測定するための一つの手法として有効であるという可能性を示すことができた。

○原始惑星系円盤におけるギャップ構造に関する研究 (金川和弘氏・田中秀和氏他との共同研究)

原始惑星系円盤に惑星が存在すると、円盤と惑星の間の重力的な相互作用により、その周囲に様々なガスやダストの構造が作られる。これらの構造は、円盤全体に広がる構造であるため、惑星そのものよりも観測がしやすく、円盤における惑星存在の間接的な証拠となる可能性がある。したがって、惑星や円盤のパラメータと構造のパラメータを定量的に結び付けることは、原始惑星系円盤における惑星形成過程を実証的に調べていくうえで重要である。

本研究では、金川和弘氏、田中秀和氏らと協力しながら、質量の大きな惑星が円盤に作るギャップ構造に注目し、物理的な議論や多数の数値計算により、ギャップの幅や深さがどのようなかを、惑星の質量、円盤の温度 (厚み)、および円盤の粘性の 3 つのパラメータと結び付けた。

本研究が進んでいるさなかに、アルマ望遠鏡による長基線観測モードの試験観測のデータが公開された。これは、HL Tau という若い星の周囲の原始惑星系円盤を高解像度で観測したところ、複数の細かいギャップ構造が連続波イメージで見つかった、というものである。

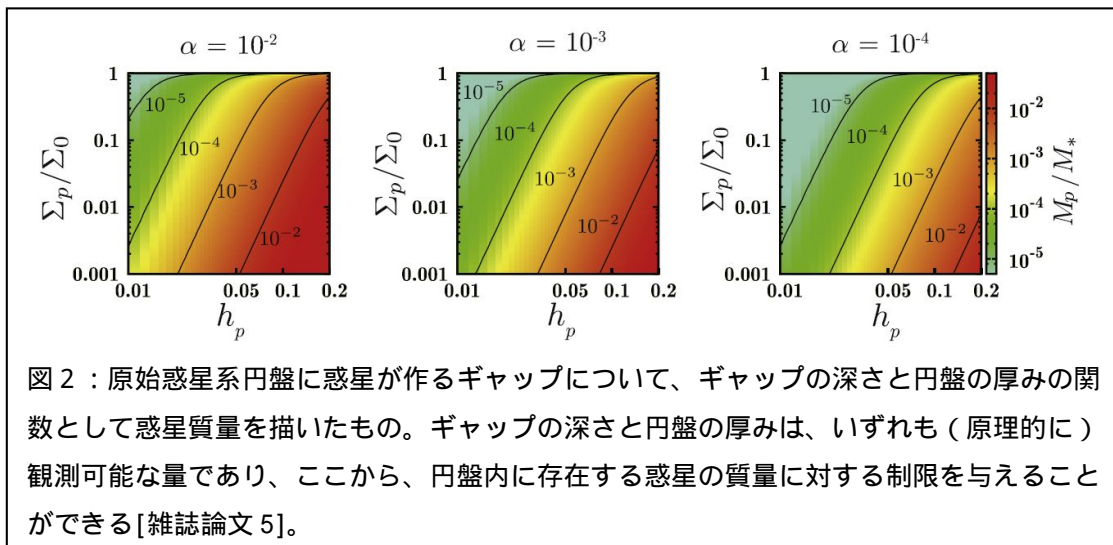


図 2 : 原始惑星系円盤に惑星が作るギャップについて、ギャップの深さと円盤の厚みの関数として惑星質量を描いたもの。ギャップの深さと円盤の厚みは、いずれも (原理的に) 観測可能な量であり、ここから、円盤内に存在する惑星の質量に対する制限を与えることができる [雑誌論文 5]。

そこで、HL Tau 周囲の原始惑星系円盤に見いだされたギャップ構造について、データ公開後、いち早くその解析に取り組み、この構造がもし惑星によってできたものであるならば、惑星の質量は木星質量程度かそれ以下であろう、という見積りを与えた [雑誌論文 5]。この論文は、HL Tau 周囲の原始惑星系円盤の アルマ望遠鏡による科学試験観測データを用いた最初期の論文の一つであり (本論文の掲載された査読誌の同一巻に、米国のグループの論文も掲載されており、これらが公開データを用いた最初の論文である) アルマ望遠鏡の一つの大きな区切りとなる重要なデータについて、その解析で世界に先駆けた成果を得られた。

### ○原始惑星系円盤におけるロスビー波不安定性に関する研究 (小野智弘氏他との共同研究)

アルマ望遠鏡などの観測によって見いだされた原始惑星系円盤における非軸対称性の起源は何であろうか。この問題に迫るための基礎的な物理過程として、原始惑星系円盤における流体力学的な不安定性に着目した。

原始惑星系円盤において、動径方向に急激な物理量の変化がある場合、円盤に流体力学的な不安定性が存在することが知られている。具体的には、円盤の厚み (スケールハイト) と同程度の長さスケール (これは、中心星とその場所の間の距離の 10% 程度の長さスケールに相当する) で円盤ガスの圧力や密度が変化している場合に不安定が生じ、円盤全体にわたる非軸対称な、馬蹄形の構造ができることが知られている。このような構造は、原始惑星系円盤内でダストを集積する場所になるということが知られており、例えば HD 142527 の周囲の原始惑星系円盤に観測されているような、大きなスケールの非軸対称構造を説明できる可能性がある。

この不安定性はロスビー波不安定性と呼ばれ、数十年に渡って研究がなされてきたが、これまでの研究では、不安定性の必要条件のみが求められており、不安定の必要十分条件については、非線形の数値計算から類推するという方法でしかなされてきていなかった。

そこで、本研究では、小野智弘氏と協力しながら、流体力学の基礎方程式に立ち戻り、いくつかの背景流に対して、詳細な二次元の大局円盤に関する線形解析を行った [雑誌論文 3]。具体的には、背景流として、動径方向のバンプ状構造・ギャップ状構造・階段関数的な密度変化といったいくつかの場合を考えて詳細な線形解析を行い、不安定モードや成長率の計算を行った。その結果、様々な場合において、ロスビー波不安定性の起こる条件を計算することに成功した。

さらに、線形解析の過程を徹底的に見直すことで、渦位の保存則をもとに、不安定性が

起こる条件 (中立安定条件) を半解析的に求めることに成功した。このことで、適当な背景流に対して、その流れがロスビー波不安定性に対して安定か不安定かを予測することが可能になり、長年の課題となっていた「ロスビー波不安定性の必要十分条件」という問題に対する、一つの解答を与えることに成功した。

その後、この研究の発展として、富田賢吾氏他によって開発されたコードを用いて、数値シミュレーションによって、ロスビー波不安定性の非線形発展に関するパラメータ・スタディを行っている。その結果は、論文として投稿している段階である。

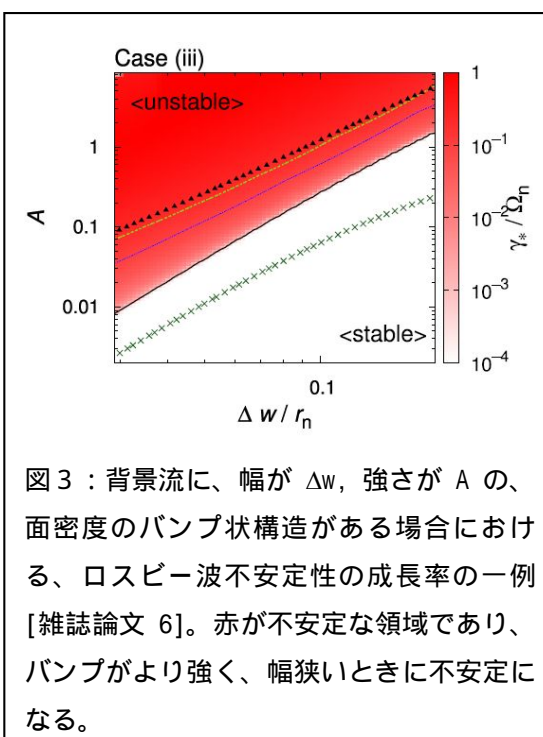


図 3 : 背景流に、幅が  $\Delta w$ 、強さが  $A$  の、面密度のバンプ状構造がある場合における、ロスビー波不安定性の成長率の一例 [雑誌論文 6]。赤が不安定な領域であり、バンプがより強く、幅狭いときに不安定になる。

### ○アルマ望遠鏡アーカイブデータのサーベイによる原始惑星系円盤構造の推定

アルマ望遠鏡は、原始惑星系円盤の様々な構造を明らかにしてきた。そのデータは、取得後一年間の PI による占有期間を過ぎると公開され、世界中の研究者が使用可能な状態になる。アルマ望遠鏡は、初期科学観測運用の段階から様々な成果を出してきたが、アーカイブには多くのデータが利用可能な状態で存在しており、これを活用して原始惑星系円盤に関する新し知見を得ていくことが出来るものと期待される。

本研究では、主にアルマ望遠鏡の初期科学運用段階で取得された、星形成領域に存在する原始惑星系円盤のスナップショットサーベイのデータを中心に、アーカイブに存在するデータの一部の再解析を行った。

解析にあたっては、電波干渉計の実際の測

定データに近い、空間のフーリエ成分のデータ(ビジビリティ)に注目し、原始惑星系円盤の非軸対称構造を引き出すことが出来るような新規のデータ解析の手法を考案した。このことで、実空間のイメージ上で非軸対称性があからさまには分からないような低解像度のスナップショットデータであっても、実際には非軸対称性が存在する可能性のある候補天体のリストを作成することができた。現段階で、10天体程度の候補天体リストがあり、また、その一部について、アルマ望遠鏡への観測提案を提出して受理され、データが取得されている。今後、データの解析を行い、原始惑星系円盤の構造に対する理解をより深めていきたい。

## 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34件)

本文中で引用した論文を中心に、一部を記載する

[1] Soon, Kang-Lou; Hanawa, Tomoyuki; Muto, Takayuki; Tsukagoshi, Takashi; Momose, Munetake, "Detailed modeling of dust distribution in the disk of HD 142527", PASJ, 69, id.34 (2017), 査読あり  
DOI: 10.1093/pasj/psx007

[2] Kataoka, Akimasa; Tsukagoshi, Takashi; Momose, Munetake; Nagai, Hiroshi; Muto, Takayuki; Dullemond, Cornelis P.; Pohl, Adriana; Fukagawa, Misato; Shibai, Hiroshi; Hanawa, Tomoyuki; Murakawa, Koji, "Submillimeter Polarization Observation of the Protoplanetary Disk around HD 142527", ApJL, 831, id.L12 (2016), 査読あり  
DOI: 10.3847/2041-8205/831/2/L12

[3] Ono, Tomohiro; Muto, Takayuki; Takeuchi, Taku; Nomura, Hideko, "Parametric Study of the Rossby Wave Instability in a Two-dimensional Barotropic Disk", ApJ, 823, id.84 (2016), 査読あり  
DOI: 10.3847/0004-637X/823/2/84

[4] Kataoka, Akimasa; Muto, Takayuki; Momose, Munetake; Tsukagoshi, Takashi; Fukagawa, Misato; Shibai, Hiroshi; Hanawa, Tomoyuki; Murakawa, Koji; Dullemond, Cornelis P., "Millimeter-wave Polarization of Protoplanetary Disks due to Dust Scattering",

ApJ, 809, id.78 (2015), 査読あり  
DOI: 10.1088/0004-637X/809/1/78

[5] Kanagawa, Kazuhiro D.; Muto, Takayuki; Tanaka, Hidekazu; Tanigawa, Takayuki; Takeuchi, Taku; Tsukagoshi, Takashi; Momose, Munetake, "Mass Estimates of a Giant Planet in a Protoplanetary Disk from the Gap Structures", ApJL, 805, id.L15 (2015), 査読あり  
DOI: 10.1088/2041-8205/806/1/L15

[6] Muto, Takayuki; Tsukagoshi, Takashi; Momose, Munetake; Hanawa, Tomoyuki; Nomura, Hideko; Fukagawa, Misato; Saigo, Kazuya; Kataoka, Akimasa; Kitamura, Yoshimi; Takahashi, Sanemichi Z.; Inutsuka, Shu-ichiro; Takeuchi, Taku; Kobayashi, Hiroshi; Akiyama, Eiji; Honda, Mitsuhiro; Fujiwara, Hideaki; Shibai, Hiroshi, "Significant gas-to-dust ratio asymmetry and variation in the disk of HD 142527 and the indication of gas depletion", PASJ, 67, id.122 (2015), 査読あり  
DOI: 10.1093/pasj/psv098

他、28件

[学会発表](計38件)

国際研究会、招待講演を中心に、一部を記載する

[1] Takayuki Muto, "Physical Mechanisms of Rossby Wave Instability and its Non-linear Outcome: Implications for Lopsided Structures in Protoplanetary Disks", Exoplanets and Planet Formation (2017)

[2] Takayuki Muto, "Detecting Non-Axisymmetric Structures of Protoplanetary Disks from Low-Resolution Radio Interferometric Data", RESCEU/Planet2 International Symposium "Planet Formation around Snowline" (2017)

[3] 武藤恭之、「原始惑星系円盤構造の観測と惑星形成への示唆」、宇宙生命計算科学連携拠点第3回ワークショップ (2017)

[4] Takayuki Muto, "Detecting Non-Axisymmetric Structures of Protoplanetary Disks from Low-Resolution Radio Interferometric Data", Planet Formation and Evolution 2017 (2017)

[5] Takayuki Muto, “Hydrodynamical Structures in Protoplanetary Disks and their Possible Connections to Observations with ALMA”, Mini-Workshop on Protoplanetary Disks (2017)

[6] Ya-Wen Tang and Takayuki Muto, “ALMA Observations the Protoplanetary Disk around AB Aur: the Inner Gaseous Spirals Observed inside the Dust Cavity”, JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (2017)

[7] Takayuki Muto, “Gap and Vortex in Protoplanetary Disks”, EA ALMA Science Workshop (2017)

[8] Takayuki Muto, “Protoplanetary Disk Observations with ALMA”, ALMA/45m/ASTE Users Meeting 2016 (2016)

[9] Takayuki Muto and Tomohiro Ono, “Rossby Wave Instability in Incompressible Fluid”, Japan-Germany planet formation workshop (2016)

[10] 武藤恭之、「原始惑星系円盤の流体力学」, GFD セミナー講師 (2016)

[11] Takayuki Muto, “Recent Results on the Observations and Modeling of the Disk around HD 142527”, TIARA/CHARMS Mini-Workshop on Disks in the Protoplanetary Systems (2016)

[12] Takayuki Muto, “Significant Variations of Gas-to-Dust Ratio of the Disk around HD 142527”, Protoplanetary Discussions (2016)

[13] Takayuki Muto, “Significant Variations of Gas-to-Dust Ratio of the Disk around HD 142527”, Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity III (2016)

[14] 武藤恭之、「原始惑星系円盤における力学過程と詳細構造の観測」, 理論懇シンポジウム (2015)

[15] Takayuki Muto, “Connecting Disk Theory with High Resolution Observations”, East Asia ALMA Science Workshop (2015)

[16] Takayuki Muto, “Significant Gas to Dust Ratio Asymmetry and Variation in the Disk of HD 142527: North South Asymmetry”, Protoplanetary Disk Dynamics and Planet Formation (2015)

[17] 武藤恭之、「原始惑星系円盤の詳細構造と多波長観測」, 国立天文台理論コロキウム (2015)

[18] Takayuki Muto, “Asymmetric Structures in Transitional Disks: NIR and ALMA observations”, Transition disks and planet formation: Link between Models and Observations (2015)

[19] Takayuki Muto, “Protoplanetary Disk Morphology and High-Resolution Imaging Observations”, The 2014 German-Japanese Meeting on Exoplanets and their formation (2014)

[20] Takayuki Muto, “Direct Imaging Observations of Protoplanetary Disks with TMT”, Thirty Meter Telescope Science Forum (2014)

他 18 件

〔図書〕(計 1 件)

[1] 井田茂・田村元秀・生駒大洋・関根康人 編 『系外惑星の事典』, 朝倉書店、2016 年発行、総ページ数 364 ページのうち、202-203 ページ担当

〔その他〕  
ホームページ等

<http://www.ns.kogakuin.ac.jp/~ft13389/research.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

武藤 恭之 (Takayuki Muto)  
工学院大学・教育推進機構・准教授  
研究者番号：20633803

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし

### (4) 研究協力者

百瀬 宗武 (Munetake Momose)  
深川 美里 (Misato Fukagawa)  
塚越 崇 (Takashi Tsukagoshi)  
花輪 知幸 (Tomoyuki Hanawa)  
カンロウ スン (Kang-Lou Soon)  
片岡 章雅 (Akimasa Kataoka)  
金川 和弘 (Kazuhiro D. Kanagawa)  
田中 秀和 (Hidekazu Tanaka)  
小野 智弘 (Tomohiro Ono)  
富田 賢吾 (Kengo Tomida)