

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月1日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008 ～ 2011

課題番号：20540232

研究課題名（和文） ベガ型星の観測により検証可能な微惑星形成理論の構築

研究課題名（英文） Modeling the Planetesimal formation Process and Its Comparison to Observations of Vega-like stars

研究代表者

竹内 拓（TAKEUCHI TAKU）

東京工業大学・大学院理工学研究科・科学研究費研究員

研究者番号：40372651

研究成果の概要（和文）：微惑星の形成過程についての理論研究を行った。特に、ダストの沈殿によって円盤乱流を生じる効果、ダストが自己重力によって集積し微惑星ができる条件、ダストの破壊を考慮したダスト成長、小さいダストの静電反発、の計算を行い、微惑星形成に必要な円盤条件などを求めた。また、ベガ型星ダスト円盤の観測との比較のため、輻射とガスの影響によるダスト円盤の構造形成の理論研究、およびダストの衝突破壊の実験的研究を行い、ベガ型星ダストが衝突破壊を起こした時の破片サイズ分布を求めた。さらに、ベガ型星円盤の前段階と思われる遷移円盤の観測に参画し、ダスト円盤の構造からガス円盤の性質を求めた。

研究成果の概要（英文）：We study planetesimal formation processes. The following effects are studied: turbulence induced by the dust layer formed at the midplane of the gas disks, self-gravity of the dust layer, grain charges, and collisional fragmentation. We derived properties of the gas disks required for planetesimal formation. In order to compare the planetesimal formation theory to the observations of Vega-like stars, we study dust disk structure affected by the stellar radiation and the disk gas. We have also performed experimental studies of high velocity collisions of dust particles and derived the size distribution of collisional fragments. Finally, we derived the gas disk properties from the observation of the transitional disk, which is considered to be a former stage of Vega-like disks.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：理論天文学、惑星形成、原始惑星系円盤、ベガ型星、太陽系外惑星系

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 惑星形成とは、原始惑星系円盤において  $1\mu\text{m}$  よりも細かいダストが集まり、直径  $1\text{万 km}$  以上にまで成長して作られる過程であ

る。この過程のうち、もっとも謎に包まれているのが、直径数  $\text{km}$  程度の「微惑星」ができる過程である。「付着成長説」と「重力不安定説」という二つの仮説が20年以上対立している。我々が「微惑星形成」を理解して

いないため、種々の原始惑星系円盤からどのような惑星系が生まれるのかをダイレクトに結び付けることはできていない。そこで、微惑星形成の素過程について詳しく調べ、それぞれの素過程がどのような役割を果たしているかを明らかにすることが重要である。とくに「付着成長説」と「重力不安定説」について、どのような条件の原始惑星系円盤がどちらの説に好ましいかを峻別する必要がある。

(2) また、最近ベガ型星ダスト円盤の観測が急速に進歩している。ベガ型星ダスト円盤とは微惑星（もしくは彗星、小惑星）からまき散らされたダストが作る円盤であり、見えない微惑星の情報を持っていると考えられる。このベガ型星ダストの研究を行うことにより、微惑星の形成過程とベガ型星の観測を結びつけることが可能となる。

## 2. 研究の目的

(1) 微惑星の形成過程は、ダスト粒子が一つ一つ合体していく「付着成長説」と、原始惑星系円盤の赤道面に沈殿したダスト層が重力不安定を起こし微惑星が一気にできる「重力不安定説」がある。ここでは、両方の説を検証する。それぞれの素過程を詳しく調べ、これらの説による微惑星形成がどのような条件で起こるのかを明らかにする。ここで調べる素過程は、ダストの破壊、電荷による反発、ダスト層形成に伴う乱流、重力不安定におけるガス抵抗の効果、である。

(2) また、微惑星形成理論をベガ型星ダスト円盤の観測と比較検討するには、ベガ型星ダスト円盤で、どのようなダストサイズ分布が実現され、どのような円盤構造ができるかを理論的に予測する必要がある。この目的のため、中心星輻射の効果による、ダスト円盤構造の進化を求める。また、ベガ型星ダストの生成を模擬するような高速度での衝突破壊実験を行い、どのような破片サイズ分布が実現されるかを求める。ベガ型星や、その前段階である遷移円盤の観測的研究に参画し、観測から円盤の諸性質を求める。

## 3. 研究の方法

### (1) 微惑星形成過程

衝突による破壊の効果を取り入れた、ダスト合体過程のシミュレーションコードを開発し、破壊の効果によってダストの鉛直方向の分布がどのように進化するかを求めた。

ダストが帯電することを考慮した、ダスト合体成長を解き、ダストの静電反発を乗り

越えて成長するための条件を求めた。

原始惑星系円盤の赤道面に沈殿したダスト層が誘発する乱流の強さを、解析的に見積もる方法を開発した。エネルギー論的に乱流の強さを求める式を導出し、乱流の数値シミュレーションを行った先行研究との比較により、解析式の有効性を確かめた。

ダスト層の重力不安定による微惑星形成について、上記で見積もった乱流の強さと、ガス抵抗の効果も考慮して、不安定の条件を求めた。

### (2) ベガ型星ダスト円盤

ベガ型星のダスト円盤構造の進化を求めるため、中心星輻射と円盤ガスがあることによって生じる、光泳動が起こる円盤条件を求め、またどのような構造ができるのかを求めた。

ベガ型星におけるダストを模擬した高速衝突実験を行い、破片サイズ分布を求めた。これは、レーザーによって模擬ダストを加速し、これまでにない高速度衝突を行うものである。

ベガ型星ダスト円盤の前段階と思われる、遷移円盤のすばる望遠鏡の観測に参画し、得られたダスト散乱光の解析から、ガス円盤の温度などの性質を割り出した。

## 4. 研究成果

### (1) 微惑星形成過程

ダストの破壊によってできた非常に細かい破片は、これまで考えられていたよりも、円盤赤道面に密集した分布となる。また、パラメータで $10^{-5}$ よりも乱流の強さが小さいと、衝突破壊があってもダストは成長を続けることができることを明らかにした。(論文)

ダストが帯電することにより、ミクロンサイズの細かいダストの成長が著しく阻害されることを示した。ダストの成長は、原始惑星系円盤の1 AU 程度より中心星に近いところか、100AU 以上のところでのみ起きることを示した。(論文)

原始惑星系円盤の赤道面に沈殿したダスト層が誘発する乱流の強さは、ダストの中心星への落下のエネルギーによって決定づけられることを示し、乱流の強さを解析的に見積もる式を導いた。この解析は、乱流を引き起こす不安定性の種類によらず適用できる。これまでケルビンヘルムホルツ不安定があ

る場合の乱流の強さを求める手法が知られていたが、本結果は、さらに一般的な条件で適用できるものである。この結果を、先行研究の乱流の数値シミュレーション結果と比較した。(ケルビンヘルムホルツ不安定による乱流およびストリーミング不安定による乱流の両方との比較を行った。) どちらのシミュレーション結果も、本研究の解析解とよく一致することを示し、解析式の有効性を明らかにした。(論文)

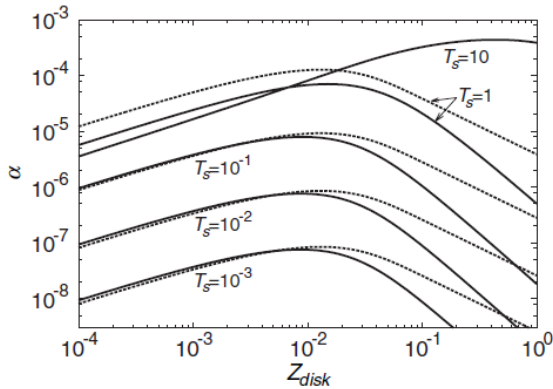


図1. 解析的に見積もられた乱流の強さ(パラメーター)を鉛直平均したダストガス比に対して描いたもの。Tsはダストの大きさを表すパラメーター。

円盤赤道面でのダスト層のガス抵抗を介した永年重力不安定を起こす条件を求めた。これにはダスト層での乱流の強さを知る必要があるが、得られた乱流の強さの見積もりを用いることにより、この解析が可能となった。まず、円盤の鉛直方向に平均したダストガス比が太陽組成の数倍あれば、永年重力不安定が十分速い成長率で起きること

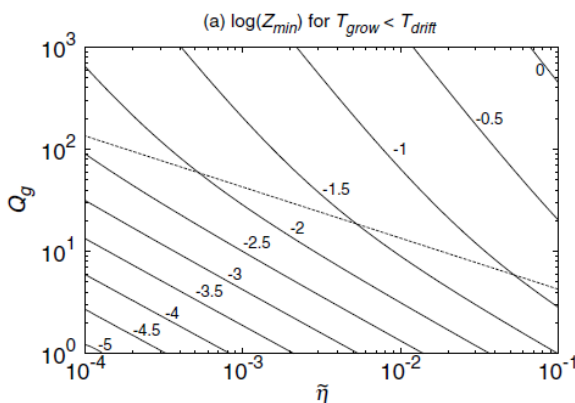


図2. 永年重力不安定を起こすのに必要な、ダストガス比。横軸は、円盤のケプラー回転からのずれを表すパラメータ、縦軸はガス円盤の重力不安定になりやすさを示すパラメーター。等高線が永年重力不安定を起こすのに必要な、ダストガス比の対数を表す。

を示した。また、円盤ガスの乱流の強さはパラメーターにして  $10^{-5}$  程度よりも小さい必要があることを示した。円盤のダストガス比は、ダストの半径方向の移動により数倍程度の上昇は見込めるため、永年重力不安定による微惑星形成が十分起こり得ることを明らかにした。(論文)

## (2) ベガ型星ダスト円盤

ベガ型星ダスト円盤において、ダストの光泳動が起きるには、円盤ガスが中心星輻射に対して透明になるほど薄くしなければならないことを示した。その結果、中心星のごく近傍のみで光泳動が有効になり、直径  $0.3AU$  ほどの穴が開くことを示した。この半径は、ダストの大きさとガスの平均自由行程が等しくなる位置であり、ベガ型星ダスト円盤の観測から、非常に薄いガスについても情報が得られることを明らかにした。また、円盤のある領域(ダストサイズによるが、 $1-10AU$  程度)では、ダスト粒子の回転によって光泳動が阻害される場合があることを示した。(論文)

ベガ型星ダスト円盤においてダストが高速で衝突した場合の破片サイズ分布を、実験的に求めた。積算したサイズ分布は  $-2$  から  $-5$  という絶対値の大きなべき指数を持っている。これは、衝突カスケードによる平衡状態から期待されるものよりも、より多くの非常に細かい破片が一回の衝突で生成されることを示している。ベガ型星の観測から、非常に細かいダストが多く存在するものが示唆されているが、これは高速衝突によって多量にできたダストを見ている可能性があることを指摘した。(論文)

若い中質量星 SAO 206462 の周りにある遷移円盤のすばる望遠鏡の偏光撮像観測から、円盤に渦巻き状の構造があることが明らかとなった。この渦巻パターンの解析から、円盤ガスの温度などが割り出せることを明らかにし、音速とケプラー速度の比が  $0.1$  程度であることを示した。これは、遷移円盤がどのようにしてベガ型星円盤に進化するかを調べる際に必要な情報を、ダスト円盤の構造から求められることを示したものである。(論文)

## 結果のまとめ

これらの(1)の結果から、微惑星形成について、衝突破壊を乗り越えて付着合体成長を起こすためにも、またダスト層の重力不安定を起こすためにも、円盤ガスの乱流は十分弱くなければならないことが明らかとなった。もし円盤ガスが、磁気回転不安定性

(MRI)による強い乱流状態にあれば、いずれの場合でも微惑星の形成は難しい。デッドゾーンと呼ばれる、MRI不活性な領域が微惑星形成に好都合な場所であるが、(1)の結果は、そのような場所(中心星から数十AU以内の場所)では、ダストがまだ細かい段階で、静電反発によってダストの成長が阻害されており、新たな問題が存在することがわかった。一方(2)の研究から、ベガ型星のダスト円盤について、微惑星の分布をダストの観測から求める際には、ガスの影響が重大なことを明らかにした。さらに、高速度衝突によって細かい破片が効率よく形成されることから、ダスト円盤の観測から微惑星の分布を求める際にはこれらの効果を組み込む必要があることを示した。また遷移円盤の観測に参画することにより、ダストの観測からガス円盤の温度といった性質をも明らかにできることを示した。

#### 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25件)

Takeuchi, T., and Ida, S., Minimum Dust Abundances for Planetesimal Formation via Secular Gravitational Instabilities, *The Astrophysical Journal*, 749, 2012, 89(8pp) 査読有

Muto, T., Grady, C. A., Hashimoto, J., et al. (Takeuchi, T. as the 16th author of 62 authors), Discovery of Small-Scale Spiral Structures in the Disk of SAO 206462 (HD 135344B): Implications for the Physical States of the Disk from Spiral Density Wave Theory, *The Astrophysical Journal Letters*, 748, 2012, L22(7pp) 査読有

Takeuchi, T., Muto, T., Okuzumi S., Ishitsu, N., and Ida, S., Induced Turbulence and the Density Structure of the Dust Layer in a Protoplanetary Disk, *The Astrophysical Journal*, 744, 2012, 101(16pp) 査読有

Muto, T., Takeuchi, T., & Ida, S., On the Interaction between a Protoplanetary Disk and a Planet in an Eccentric Orbit: Application of Dynamical Friction, *The Astrophysical Journal*, 737, 2011, 101(16pp) 査読有

Takasawa, S., Nakamura, A. M., Kadono, T., Arakawa, M., Dohi, K., Ohno, S., Seto, Y., Maeda, M., Shigemori, K., Hironaka, Y., Sakaiya, T., Fujioka, S., Sano, T., Otani, K., Watari, T., Sangen, K., Setoh, M., Machii, N., Takeuchi, T., Silicate Dust

Size Distribution from Hypervelocity Collisions: Implications for Dust Production in Debris Disks, *The Astrophysical Journal Letters*, 733, 2011, L39(4pp) 査読有

Okuzumi, S., Tanaka, H., Takeuchi, T., & Sakagami, M-a., Electrostatic Barrier Against Dust Growth in Protoplanetary Disks. I. Classifying the Evolution of Size Distribution, *The Astrophysical Journal*, 731, 2011, 95(20pp), 査読有

Okuzumi, S., Tanaka, H., Takeuchi, T., & Sakagami, M-a., Electrostatic Barrier Against Dust Growth in Protoplanetary Disks. II. Measuring the Size of the "Frozen" Zone, *The Astrophysical Journal*, 731, 2011, 96(14pp), 査読有

T. Takeuchi, Growth of Settling Dust Particles in Turbulent Disks, *Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity*, eds. T. Usuda, M. Ishii, and M. Tamura, 1158, 163-164, (2009)、査読無

Takeuchi, T., & Krauss, O., Photophoretic Structuring of Circumstellar Dust Disks, *The Astrophysical Journal*, 677, 1309-1323, (2008), 査読有

[学会発表](計49件)

竹内拓, 磁気乱流不活性領域を考慮した原始惑星系円盤の面密度分布、日本天文学会2012年春季年会、2012.3.22、龍谷大学、京都

Takeuchi, T., Disk-Planet Interaction and Planetesimal formation、Ishigaki International Workshop (FSP2011) "Formation of Stars & Planets 2011"、2011.10.3、Ishigaki, Okinawa, JAPAN

竹内拓, ダスト層起源の乱流とダスト衝突破壊、日本天文学会2011年春季年会、2011/3/18、筑波大学

竹内拓, 円盤ダスト層で励起される乱流についてのエネルギー的議論、惑星系の起源と進化に関する研究会、2010/11/12、長浜市、招待講演

竹内拓, ダストの沈殿、衝突合体、破壊によるダスト層の構造について、日本天文学会2010年秋季年会、2010/9/24、金沢大学

竹内拓, 原始惑星系円盤でのダストの沈殿と成長、第28回 Grain Formation Workshop、平成22年度銀河のダスト研究会、2010/9/3、神戸大学、招待講演

Takeuchi, T., Dust Particle Growth and Sedimentation under the Effect of Fragmentation、Ishigaki International Conference on Evolving Theory for Planet Formation、2010/6/20-26、Ishigaki Island,

Japan

Takeuchi, T., Structure of the dust layer formed by particle sedimentation, coagulation, and fragmentation, Material Circulation in the Early Solar System, 2010/5/29-30, Hakone, Japan

T. Takeuchi, Dust in Protoplanetary Disks: Dust Growth and Planetesimal Formation, NCU-CPS Japan-Taiwan Planetary Science Workshop 2009, 2009/12/8 - 9, National Central University (台湾中坜市)

Takeuchi, T., Growth of Settling Dust Particles in Turbulent Disks, The 2nd Subaru International Conference "Exoplanets and disks: Their Formation and Diversity", March 9-12, 2009

Keauhou, Hawaii, USA

Takeuchi, T., Growth of Settling Dust Particles in Turbulent Disks, 5th Spitzer Conference "New Light on Young Stars: Spitzer's View of Circumstellar Disks", 2008/10/26-30, Pasadena Hilton, CA, USA

竹内拓, 乱流円盤中で沈殿しながら合体成長するダストの数値計算, 日本天文学会秋期年会, 2008/9/11-13, 岡山理科大学

[図書](計2件)

相川祐理, 現代の天文学 第11巻, 日本評論社, 2009, p.212-232

Takeuchi T., Small Bodies in Planetary Systems, Springer-Verlag GmbH, 2009, 1-35

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

竹内 拓 (TAKEUCHI TAKU)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・科学研究費研究員  
研究者番号: 40372651

### (2) 研究分担者

中川 義次 (NAKAGAWA YOSHITSUGU)  
神戸大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 30172282

相川 祐理 (AIKAWA YURI)  
神戸大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号: 40324909  
(平成20 - 21年度)

田中 秀和 (TANAKA HIDEKAZU)  
北海道大学・低温科学研究所・准教授  
研究者番号: 00282814  
(平成21 - 23年度)