

## 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 5月28日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2009年～2011年

課題番号：21654065

研究課題名（和文）原始惑星系降着円盤の運動構造に関する地球流体力学的考察

研究課題名（英文）A study on geophysical fluid dynamics of a proto-planetary accretion disk

研究代表者

林 祥介 (HAYASHI YOSHIYUKI)

神戸大学・大学院・理学研究科・教授

研究者番号：20180979

研究成果の概要（和文）：

原始惑星系降着円盤ガスを記述する基礎方程式の定式化を検討し、そこへの地球流体力学的諸概念の適用可能性を検討すること、そして、基本場と擾乱の構造を地球流体力学的に見直すことを試みた。地球流体力学で知られている軸対称循環場が満足すべき条件は、原始惑星系降着円盤ガスにおいても満足されているべきことが確認されたが、擾乱の構造に関しては地球流体力学で知られる傾圧不安定擾乱の構造とは大きく異なっている可能性がある。

研究成果の概要（英文）：

We examine formulation of the governing basic equations that describe developments of a protoplanetary accretion disk, and discuss applicability of various concepts of geophysical fluid dynamics to its fluid motions, and reconsider the structures of basic fields and disturbances. We confirm that the condition that should be satisfied by axisymmetric fields of geophysical fluid dynamics should be satisfied also for the nebula gas fields of protoplanetary accretion disk. However, it seems that the structure of disturbances is quite different from that of baroclinic unstable disturbances of geophysical fluid dynamics.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,200,000	0	1,200,000
2010年度	900,000	0	900,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	270,000	3,270,000

研究分野：数物系分野

科研費の分科・細目：地球惑星科学・気象・海洋物理・陸水学

キーワード：原始惑星系円盤，対流不安定，ダスト成長，乱流，惑星形成

## 1. 研究開始当初の背景

系外惑星の発見、太陽系始原物質の分析的研究の進展、そして、計算技術の進歩にともない、原始惑星系星雲のガスとダストの動態を調べる試みが近年活発に行われるようになってきた。しかし、それらの試みはまだ開始されたばかりであり、そもそもどのような大規模運動（子午面循環や波や渦などの秩序構造）が存在しているのかという基本的な問題に関してさほど考察が進んでいるわけではない。

原始惑星系星雲内で形成されたダストが微惑星（そして惑星）に至るためには、凝集したダストが中心星へ落下することを妨げるような適当な仕組みが必要となる。子午面（動径  $R$  - 円盤垂直方向  $z$  面）内の運動や、方位角方向に構造を持った波や渦などの秩序ある運動が存在しておれば、これらに拘束されたダストは中心星に落下することなく原始惑星系星雲中にトラップされる可能性が想像される。実際、NASA のスターダスト探査機が持ち返った彗星 81P/Wild2 起源のダストからは結晶質珪酸塩が見つかっており (Brownlee et al. 2006)、太陽近傍の高温下 ( $>800\text{K}$ ) でのみ生成される結晶質珪酸塩が太陽系の外縁部で生成される彗星を構成している一つの解釈として、原始太陽系星雲ガスの大規模な子午面循環の存在を予想することができる。また、近年の分析技術の進歩によって隕石から推測される原始太陽系星雲内での物質分布にも、そのような大規模な輸送の存在が示唆されている (Yurimoto & Kuramoto 2004)。

子午面循環に関する現状は、チャネル領域（中心星からある程度離れたところでの局所  $R$ - $z$  領域）におけるダスト集積、中心面降着、動径方向輸送を議論する (Takeuchi and Lin 2002) 程度にすぎず、動径方向、すなわちケプラー回転軸と直交する方向に温度勾配があるにもかかわらず、局所一様系を想定しているためその効果（気象学・海洋学では温度風平衡としてよく知られている効果）はきちんと取り込まれていない。

大規模な波や渦の存在に関しては、降着円盤二次元系 ( $R - \theta$  面、 $\theta$  は方位角) での計算によって秩序構造の存在が見出されつつある。しかし、これらの構造に関しても、気象海洋擾乱に対するようには流体力学的構造に根ざしたレベルでの理解がなされておらず、したがって、パターン形成をもたらす物理的条件が整理され一般化されているわけではない。

本研究では、地球流体力学で培われてきた諸概念に照らしあわせて原始惑星系星雲のガスやダストの循環を考察することにより、これまで得られてきた循環の描像に新たな

理解を与え、循環の考察に新たな展開をもたらすことにある。気象学・海洋学で培われてきた地球流体力学の諸概念が、重力と回転の働き方が大きく異なる原始惑星系星雲でどの程度有効であるかは未知である。しかし、本研究の試みは、1950 年代、数値天気予報・気候予測の実現を旗印にそれまで別々に蓄積されてきた気象学と海洋学の知見が整理統合され、地球流体力学が生み出されたのと同様のことを、原始惑星系星雲と大気海洋との間で行うことを試行することに他ならない。地球流体力学として蓄積されてきた考え方を積極的に原始惑星系星雲に適用することは、天文学・惑星科学の発展を促すだけでなく、そもそも回転成層流体の一般理論としての地球流体力学をより豊かな言語に鍛えることであり、それにより、分野横断的な理解の共有を担保することでもある。

## 2. 研究の目的

原始惑星系星雲のガス運動を記述する枠組を、地球流体力学の知見を活用し、基礎方程式レベルから見直す。

- (1) 基本場、すなわち、場の軸対称成分に関する記述を、温度風の見地、すなわち、回転成層系における場の、動径  $R$  依存性と回転軸方向  $z$  依存性の整合性に注目して検討し、平均子午面循環の必要性に関して考察する。
- (2) 擾乱場、すなわち、波や渦の生成と維持機構に関する記述に上記基本場のエン트로ピー勾配を用いた渦位の概念の適用可能性を考察し、可能ならその構造の渦位からの記述に踏み込む。
- (3) これらの考察と並行して、原始惑星系星雲の大循環モデルへ向けての、できるだけ簡略な方程式系を選び、試行的な数値計算の実現をめざす。

## 3. 研究の方法

基本場（軸対称場）の定式化、非軸対称擾乱（波あるいは渦）の線形理論並びに弱非線形理論の定式化を順次進め、温度風平衡、渦位と渦位混合、渦位による非軸対称擾乱の記述、非軸対称擾乱と平均流の相互作用、など地球流体力学の基本概念の適用可能性を逐次チェックする。軸対称 2 次元系ならびに円盤 2 次元系の数値シミュレーションモデルを、すでに我々が開発してきたモデルをベースに構成し、従来の研究を追跡し、その解の振舞の地球流体力学的解釈を試みる。

### (1) 基本場の考察：

基礎方程式系の問題点は、基本場をどう扱うかにある。動径  $R$  方向に温度勾配がある場合は、降着円盤と直交する  $z$  方向にシアーを持たざるを得ないはずであるが、

原始惑星系星雲の記述で従来用いられてきた基本場は、流体運動の存在を無視する局所場を用いているため、 $z$  方向にシアがない。この状況は地球流体力学者から見ると非常に不思議なことであるが、静的で熱的な構造を第一に考えてきた天文学・惑星科学の世界ではさほど問題だとは認識されていなかった可能性がある。

この軸対称場に対し、軸対称な強制、すなわち、角運動量の供給あるいは軸対称な熱の供給を、 $R-z$  二次元空間内の局所的に与えた場合の軸対称な応答を数値的に検討し軸対称な子午面循環の可能な形を探る。軸対称な加速の供給は、降着円盤中心面に集積し成長するダストによる抵抗を想定したものであり、加熱は放射の効果を想定したものである。

#### (2) 擾乱場の考察：

非軸対称な擾乱の記述方法を、保存量の表現、特に渦位がどのようになるのかに着目して検討する。上記項目で検討された軸対称基本場の回りに流体力学的物理量を展開し擾乱を再定義することが肝要になる。

これらの考察をすすめるために、過去の研究で得られてきた非軸対称擾乱を再現し、その構造を解析することを数値的に行う。円盤 2 次元系の基礎方程式は、地球流体力学で良く知られている浅水系と同じ枠組にあるが、重力の入り方が、地球流体で良く知られている気象学・海洋学の場合とは異なることをどう扱うかが検討の課題である。

円盤 2 次元系の構築と同時に、3 次元系の線形擾乱の構造の調査に着手する。中心円盘面  $z = 0$  ではなんらかの特異性が存在していると想像されるが、地球流体力学の赤道  $\beta$  面で検討されてきたような手法が参考になるだろう。系の運動構造を理解する上でそこに存在する線形擾乱の掌握は必須であり、線形解析による理解が進展すれば、順次、弱非線形論（計算）、完全非線形数値計算の実行に進展できると期待される。いわゆる力学コアの構築につながる。

#### (3) 数値モデルの開発と追実験：

これらの考察を進めるためのツールとなる数値計算ソフトウェアを設計実装し、過去の研究で知られている軸対称場と擾乱の再現実験を行い、それらの再解釈に供する。数値モデルは地球流体電脳倶楽部の階層的地球流体スペクトルモデル群 (<http://www.gfd-dennou.org/library/spmodel>) を適用する。

### 4. 研究成果

原始惑星系降着円盤ガスを記述する基礎

方程式の定式化を検討し、軸対称場の基本的性質、すなわち、定常流が満足すべき平衡状態や軸対称定常流の安定性の基準を中心に考察を行い、具体的な設定としてダスト層起源の乱流を題材にして流体力学的な構造の探索を進めた。

#### (1) 基本場の考察：

軸対称循環の基本場については、軸対称循環の基本場が満足すべき条件とその安定性に関する再考察をおこなった。遠心力、圧力傾度力、重力などの力のバランスや基本場の安定性の十分条件は、地球流体力学では Charney (1973) で詳しく議論されており、そこでの方程式系と天文学で用いられてきた方程式系との対比検討を行うことにより、原始惑星系降着円盤ガスにおいても地球流体力学で知られている力のバランスが満足されていない場合、また同様の安定性十分条件が満たされなければならないことが確認された。動径  $R$  方向に温度勾配がある場合は、降着円盤と直交する  $z$  方向にシアを持たざるを得ない。降着円盤では  $z=0$  は特異点であり、 $z$  方向の重力は  $z^2$  に比例して働くため、温度場の動径方向勾配による  $z$  方向シアは  $z^2$  に比例することが特色である。

このような軸対象場を基本場とした軸対象強制に対する応答問題の考察に向けて、大域的な構造を扱える数値シミュレーションモデルの構築を進めた（後述）。

#### (2) 擾乱場の考察：

原始惑星系降着円盤ガスにおいては、降着円盤中心面 ( $z=0$ ) は、その対称性から、 $z$  方向のエントロピー勾配がゼロである特異点となる。このことは、 $z=0$  において軸対象基本場の平均的な渦位がゼロであることを意味し、 $z=0$  を境界面と見立てての地球流体力学的な意味での傾圧不安定波が形成できないことを示していた。状況は回転球面上の赤道域と類似しており、 $z=0$  面を挟んで、 $z > 0$  で渦位の値は正、 $z < 0$  では負となる。しかるに、降着円盤では特異点は二次のゼロとなるため回転球面上で有効であった  $\beta$  面近似の手法を使うことができない ( $\beta=0$  であることと等価である)。降着円盤ガスのシア不安定の地球流体力学的構造の解明には抜本的な再考察（波の構造の研究）が必要であることが理解された。

また、円盤中心面  $z=0$  はその対称性から地球流体力学でいうところの「地表面」として働くことが期待される。そこでは散逸過程が特に重要な役割を担うと考えられるため、平行して、エネルギー的な議論により、ダスト層があった場合の乱流の強さを、円盤のダスト・ガス比、ダ

ストの大きさ、などの関数として表現することを試みた。考察の結果、ダストの中心星への落下によって解放されたエネルギーの約 20%であることが示された。微惑星がどのようにしてできたのかはいまだによくわかっていないが、この考察は、ダスト層起源の乱流を解析的に見積もる方法を示すことにより、微惑星形成の研究に寄与する可能性がある。

(3) 数値モデルの開発と追実験：

角運動量あるいは熱の供給を受けた際の軸対称場の大域的な構造を行う系の設計に関しては、円領域を無限直線に射影する方法の適用可能性を検討した。一方、同時に、円盤面の計算においては、球面を無限平面に投影する写像を用いた数値計算手法(Ishioka, 2008)の適用可能性を検討した。また、若干異なる手法として、回転球面上の赤道付近の扱いと同様、z方向に放物柱関数を用いたスペクトル変換法によって定式化することを試みた。回転球面上では放物柱関数は方程式系の固有関数列と密接に関連するが、降着円盤系ではその優位性は薄れる。しかし、無限平面の球面投影を用いる方法を用いることにより、円盤方向もスペクトル変換法で計算でき、ポータブルな計算環境を実現できる。スペクトル変換法による計算では、系の自由度をあまり大きく取らなくとも大域的な性質がうまく表現できる場合があるという利点と、地球流体力学的な考察、特に、波と角運動量の相互作用に関する考察を行うのに便利であるという利点がある。残念ながら、数値計算モデルの完全なる実装とデバッグは研究実施期間内には完了できず、パラメータ計算には至っていないが、渦の挙動計算など流体力学的な基礎計算でこれを検証しつつある。今後も継続してこれを行うことを予定している。

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5件)

- ① Takeuchi, T., and Ida, S., Minimum Dust Abundances for Planetary Formation via Secular Gravitational Instabilities. *The Astrophysical Journal*, 749(2012), 89(8pp)
- ② 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)

- ③ Murakami, S.-y. and Iwayama, T., A role of filaments on axisymmetrization process of an isolated two-dimensional elliptic vortex with non-uniform vorticity distribution. *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, 59(2011), 285-292.
- ④ H. Nomura., Y. Aikawa, Y. Nakagawa, T. J. Millar, Effects of accretion flow on the chemical structure in the inner regions of protoplanetary disks. *Astronomy and Astrophysics*, 495 (2009), 183-188 .
- ⑤ 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, 2009, 163-164.

〔学会発表〕(計18件)

- ① 竹内拓, 原始惑星系円盤におけるダスト層起源の乱流. 研究会「天文学を中心とした理工学での乱流研究」, 2011.10.28-29, 東京大学 生産技術研究所、東京.
- ② 竹内拓, ガス抵抗およびダスト層内の乱流を考慮したダスト層の重力不安定性, 日本惑星科学会 2011 年度秋季講演会, 2011.10.24, 相模女子大学、神奈川県.
- ③ 竹内拓, Disk-Planet Interaction and Planetary formation. Ishigaki International Workshop (FSP2011) "Formation of Stars & Planets 2011", 2011.10.3, Ishigaki, Okinawa, JAPAN.
- ④ 竹内拓, 弱い乱流下にあるダスト層でのダスト成長と衝突破壊. 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 2011.5.24, 幕張メッセ国際会議場、千葉
- ⑤ 村上真也, 岩山隆寛, フィラメントが2次元楕円渦の軸対象化に果たす役割. 日本気象学会 2010 年度秋季大会, 2010 年 10 月 29 日, 京都テルサ.
- ⑥ 村上真也, 岩山隆寛, 非一様楕円渦の軸対称化過程におけるフィラメントの役割. 第 59 回理論応用力学講演会, 2010 年 6 月 10 日, 日本学術会議.
- ⑦ 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 2010 年秋季大会, 2011 年 3 月 18 日, 筑波大学.
- ⑧ Takeuchi, T., Muto, T., and Ida, S. Dust particle growth and fragmentation in the dust layer with a weak turbulence. 第 7 回 太陽系外惑星大研究会, 2011 年 3 月 9-11 日, 国立天文台.
- ⑨ 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, 2010 年 11 月 12 日, 長浜市.
- ⑩ 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 年秋季大会, 2010 年 9 月 24 日, 金沢大

学.

- ⑪ 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年9月3日, 神戸大学.
- ⑫ 竹内拓, ダスト層で励起される乱流の強さ, 2010年度惑星形成理論研究会. 2010年9月1日, 紀州鉄道—那須塩原ホテル,
- ⑬ Takeuchi, T., Dust Particle Growth and Sedimentation under the Effect of Fragmentation. Ishigaki International Conference on Evolving Theory for Planet Formation. 2010年6月20-26日, Ishigaki Island.
- ⑭ Takeuchi, T., Structure of the dust layer formed by particle sedimentation, coagulation, and fragmentation. Material Circulation in the Early Solar System. 2010年5月29-30日, Hakone,
- ⑮ 竹内拓, 破壊を考慮したダストの合体成長, 日本地球惑星科学連合2010年大会. 2010年5月25日, 幕張メッセ国際会場.
- ⑯ T. Takeuchi, Dust in Protoplanetary Disks: Dust Growth and Planetesimal Formation. NCU-CPS Japan-Taiwan Planetary Science Workshop 2009, 2009年12月8-9日, National Central University
- ⑰ 村上真也, 岩山隆寛, 孤立した2次元非一様楕円渦のバリンストロフイー生成 日本流体力学会年会2009, 2009年9月2日, 東洋大学白山キャンパス
- ⑱ 中川義次, Perspective of Center for Planetary Science at Kobe University. The 1st Annual Symposium on Planetary Exploration. 2009年5月22日, 千葉工業大学津田沼キャンパス

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

林 祥介 (HAYASHI YOSHIYUKI)

神戸大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号: 20180979

### (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

岩山 隆寛 (IWAYAMA TAKAHIRO)

神戸大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号: 30172282

竹内 拓 (TAKEUCHI TAKU)

東京工業大学・理工学研究科・特任准教授

研究者番号: 40372651

### (3) 連携研究者