

## 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25年5月30日現在

機関番号： 1 4 3 0 1  
 研究種目： 若手研究(B)  
 研究期間： 2 0 0 9 ~ 2 0 1 2  
 課題番号： 2 1 7 4 0 1 3 7  
 研究課題名（和文） 惑星形成過程の観測的検証法：原始惑星系円盤のダスト進化とガス散逸機構  
 研究課題名（英文） How to observationally diagnose planet formation process:  
 dust evolution and gas dispersal mechanisms in protoplanetary disks  
 研究代表者  
 野村 英子（NOMURA HIDEKO）  
 京都大学・大学院理学研究科・助教  
 研究者番号： 2 0 3 9 7 8 2 1

研究成果の概要（和文）：最近の太陽系外惑星の発見と原始惑星系円盤の詳細観測の進展を背景に、地球型惑星および木星型惑星の源となる円盤内の塵とガスの進化過程と環境効果、およびその観測量への影響を調べた。最新の観測データとモデル計算の比較の結果、円盤表層部における小さい塵および乱流の存在が示唆された。またモデル計算より、大型ミリ波・サブミリ波干渉計ALMAを用いた分子輝線観測から、様々な円盤ガス散逸機構の観測的検証が可能であることを示した。

研究成果の概要（英文）：Following the recent discovery of exoplanets and development of detailed observations of protoplanetary disks, we have studied evolution of dust and gas in the disks, which will turn into Terrestrial and Jovian planets, its environmental effects, and its effects on observational properties. Comparison between our model calculations with brand-new observations suggests existence of small dust grains and turbulent mixing in the disk surfaces. Also, our model calculations suggest that molecular line observations with the Atacama large millimeter/submillimeter array (ALMA) will reveal various gas dispersal mechanisms from disks.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	500,000	150,000	650,000
2010 年度	700,000	210,000	910,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
2012 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

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、星・惑星系形成

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 系外惑星と原始惑星系円盤観測の進展  
 近年の多様な系外惑星の発見により、惑星形成論の見直しが行われてきた。一方で、原始惑星系円盤の詳細な観測とモデルとの比較による、円盤物理・化学構造の観測的検証に関する研究が世界的に盛んに行われている。さらにALMA

により、惑星形成領域のガス輝線・ダスト放射の統計的高空間分解観測が可能になると考えられている。

(2) 原始惑星系円盤進化モデルの構築  
 原始惑星系円盤内のダスト進化およびガス散逸

は惑星形成過程を制御する重要な要素である。研究代表者の研究も含め、これまでに様々な理論的研究が各々の過程に対しなされてきた。しかし両者を統括的に扱った研究は未だなく、自己完結的円盤進化モデルの構築は、惑星形成を考える上で解くべき課題の1つであった。

## 2. 研究の目的

(1) 惑星形成に大きな影響を及ぼす原始惑星系円盤内のダスト進化とガス散逸を包括的に扱ったモデルの構築と、(2) 分子の化学的・分光学的特性やダストの物性に着目した観測量の理論計算と最新の観測結果との比較による円盤進化モデルの検証により、従来の惑星形成論を見直す。また、若い星団内において近接する大質量星からの紫外線照射量など、惑星形成第一段階における環境の違いが円盤進化に及ぼす影響を調べることで、系外惑星の多様性への起源を探る。

## 3. 研究の方法

### (1) 包括的円盤進化モデルの構築

研究代表者のこれまでの円盤モデルに関する研究を進展させ、円盤内ガス流とダスト進化の相互作用に着目した、「包括的円盤進化モデル」を構築する。具体的には、光蒸発流、ガス降着流およびダスト進化を数値計算し、様々な環境下での円盤ガス・ダスト進化を調べる。

### (2) 円盤進化モデルの観測的検証

上述の円盤進化モデルをもとに輻射輸送及び化学計算を駆使してガス輝線・ダスト放射の観測量の理論計算を行い、シリケート・フィーチャーや水素、水、有機分子の輝線観測などの最新の観測データと比較することで、円盤内縁部の物理・化学構造の進化を観測的に検証する。

## 4. 研究成果

### (1) 原始惑星系円盤中の有機分子生成過程

原始惑星系円盤内における有機分子生成は、我々の生命起源にも繋がり得る重要な過程である。宇宙空間において大型有機分子は、ダスト表面反応を介して生成されることが理論的・観測的に示唆されている。原始惑星系円盤内では外縁部の低温高密度領域において表面反応が進むと考えられる。本研究ではダスト表面反応および光脱離過程を考慮し円盤内の化学進化を計算した。その結果、円盤外縁部の中層部においてダスト表面反応がおこり、かつ中心星からの紫外線照射により生成されたダスト表面分子が光脱離することにより、気相の有機分子量が増加することが示された。我々の計算によるとALMAによりこの有機分子からの輝線が観測可能であり、円盤内におけるダスト表面反応による有機分子生成が検証され得ることが示された(Walsh et al. 2010)。

また近傍の大質量星からの照射加熱により、特に円盤表層部からの高励起分子輝線強度に強くなることを示した(Walsh et al. 2013)。今後、

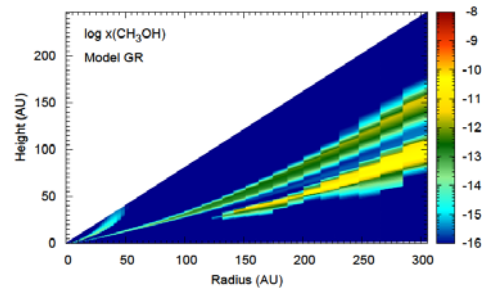


図1 原始惑星系円盤中の気相メタノールの分布。主にダスト表面反応と光脱離により生成された。

### (2) 原始惑星系円盤からの中間赤外線分子輝線へのガス流の影響

スピッツァー望遠鏡により観測された水および有機分子輝線は、円盤内縁の表層部より放射されている。ここで円盤内縁部では力学時間尺度が短く、ガス流が化学構造に影響を及ぼすと考えられる。本研究では、粘性降着・乱流拡散・円盤風といったガス流が円盤化学構造に及ぼす影響を調べた。その結果、特に乱流拡散により円盤表層部の水や有機分子の存在量が大きくなり、中間赤外線分子輝線に大きな影響を及ぼすことを示した。本研究の結果とスピッツァーの観測とを比較したところ、乱流拡散モデルを支持する結果が得られた(Heinzeller et al. 2011)。

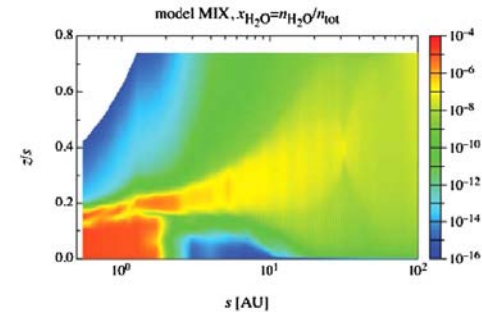


図2 原始惑星系円盤中の水分子の分布。乱流拡散により、円盤内縁上層部の存在量が増加する。

### (3) 若い星団内における円盤の光蒸発過程

星の多くは若い星団内で形成される。本研究では星団内における近傍の大質量星からの紫外線による円盤表層部の加熱、および光蒸発を考慮し、一次元数値計算により円盤面密度進化を計算した。さらに一次元数値流体計算により、光蒸発流のシミュレーションを行った。これらの計算結果はオリオン星雲のトラペジウム星団に観測されるプロプリッドの観測を良く再現しており、若い星団内において円盤ガスが光蒸発により散逸していることを確認した。また計算の結果、円盤は外縁部より散逸していることが分かった。これは、若い星団内で形成された原始惑星系円盤からは氷型惑星および残骸円盤が形成されやすいことを示唆している(2011年・田村隆哉修論)。

盤半径10AU以遠の赤道面付近においてはHCO+が最も存在量の多いイオンであり、HCO+輝線観測により円盤電離度、ひいては磁気回転不安定性

ALMAを用いた若い星団中の円盤からの分子輝線観測により、光蒸発に必要なガス温度の検証を行う。

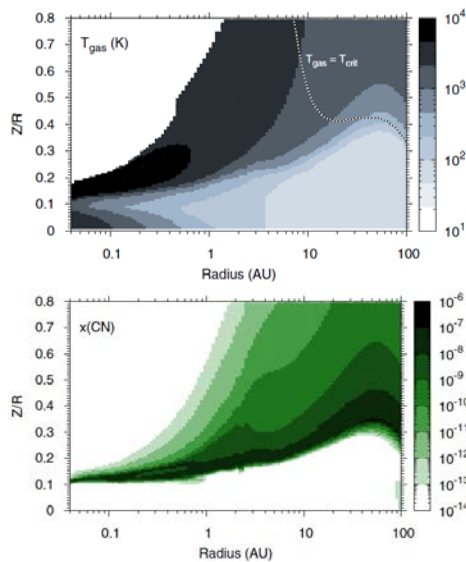


図3 原始惑星系円盤中の光蒸発可能領域( $T_{\text{gas}} > T_{\text{crit}}$ )とCN分子の分布。CN分子輝線の観測により、光蒸発の検証が可能。

#### (4) 円盤内の高空隙率ダスト進化と光学特性

円盤内におけるダストの衝突合体成長・沈殿は、惑星形成の第一段階となる重要な過程である。この過程において、ダストの空隙率進化はガスからの抵抗力、すなわち、沈殿速度と衝突率を決める重要な要素であるが、従来の研究では簡単のため、空隙率を考慮しない非現実的な計算が行われてきた。本研究では最新の空隙率進化モデルに基づきダスト合体成長・沈殿計算を行った。その結果、従来のモデルに比べ中心星への落下速度が遅くなり、微惑星を形成しやすい環境となることが示唆された。さらにその光学特性を調べたところ、従来のモデルでは説明できなかった、10 $\mu\text{m}$  シリケート・フィーチャーを本モデルでは再現できることを示した(2012年・片岡章雅修論)。

#### (5) 円盤電離度と磁気回転不安定性への影響

原始惑星系円盤内の化学進化は、円盤ガスの電離度、すなわち、磁気回転不安定性を制御する。本研究では、特に円盤表層部の紫外線・X線照射による電離過程を詳細に扱って円盤内の電離度を計算し、磁気回転不安定性について議論した。その結果、円盤表層部は紫外線・X線照射の影響で電離度が高く磁気回転不安定であるのに対し、照射が遮蔽されかつ高密度の赤道面付近では電離度は低く、内縁部ではオーム散逸、外縁部では双極性拡散により安定化/不安定性が弱まることを示された。またさらに、円

### 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15件)

①C. Walsh, T. J. Millar, 野村英子, Molecular Line Emission from a Proto-

の観測的検証が可能であることを示唆した (Walsh et al. 2012)。

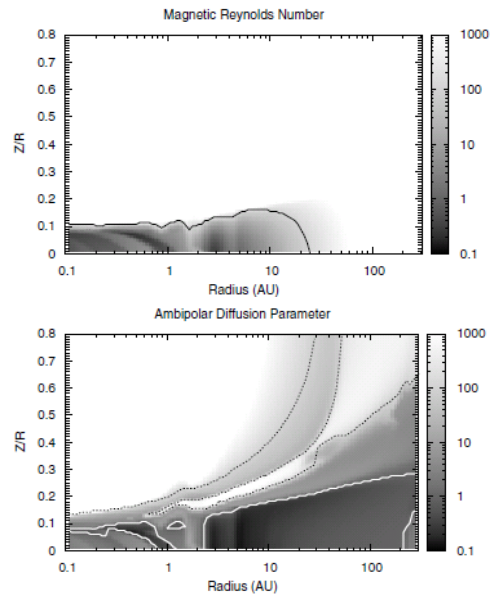


図4 円盤内において、オーム散逸および双極性拡散により磁気回転不安定性が安定化/弱まる領域。

#### (6) 円盤風の分子輝線スペクトルへの影響

原始惑星系円盤ガス散逸機構の一つとして、磁気回転不安定性起源の円盤風が最近提唱されている。一方で、近赤外線CO輝線の高分散観測により、分子輝線スペクトルに円盤風の兆候が最近見つかった。本研究では、円盤風が円盤表層部の分子種の存在量を増加させ、赤外線輝線強度を強くすることを示した。また円盤風の速度構造によっては、近赤外線CO輝線のみではなく、ALMAで観測されるようなミリ波・サブミリ波輝線のスペクトルにも影響を及ぼすことを示した。今後、赤外線高分散分光装置やALMAによる多波長観測とモデル計算の比較により、円盤風の速度構造、ひいては円盤風によるガス散逸率に制限を与える(2013年・石本大貴修論)。

#### (7) 円盤からの水分子輝線への塵成長の影響

最近、スピッツァーおよびハーシェル宇宙望遠鏡により、原始惑星系円盤からの中間・遠赤外線水分子輝線が観測されている。本研究では円盤中のダスト成長が、水分子分布および水分子輝線強度におよぼす影響を調べた。その結果円盤表層部に小さなダストが存在し、かつ乱流拡散が存在する場合に、中間・遠赤外線水分子輝線は比較的温度的の高い領域から放射され、観測値が良く再現できることを示した (Nomura et al. 2013)。

[学会発表] (計48件)

①野村英子, Diagnosing Gas Dispersal Processes in Protoplanetary Disks, New Trends in Radio Astronomy in the ALMA Era, 2012年12月3-8日, 箱根プリンスホテル

②野村英子, Water and Organic Molecules

planetary Disk Irradiated Externally by a Nearby Massive Star,  
The Astrophysical Journal Letter, 査読有,  
vol. 766, 2013, 23(21pp)  
DOI:10.1088/2041-8205/766/2/L23

②梅林豊治、勝間謙仁、野村英子、Effects of Dust Growth and Settling on the Ionization by Radionuclides. I. Formulation and Results in a Quiescent State of Protoplanetary Disks, The Astrophysical Journal, 査読有, vol. 764, 2013, 104(21pp),  
DOI:10.1088/0004-637X/764/1/104

③C. Walsh, 野村英子, T.J. Millar, 相川祐理, Chemical Processes in Protoplanetary Disks. II. On the Importance of Photochemistry and X-Ray Ionization, The Astrophysical Journal, 査読有, vol. 747, 2012, 114(19pp)  
DOI:10.1088/0004-637X/747/2/114

④野村英子, C. Walsh, D. Heinzeller, T.J. Millar, Hot core chemistry in young stellar objects: protoplanetary disks and outflows, EAS Publications Series, 査読無,  
vol. 52, 2011, pp. 229-234  
DOI:10.1051/eas/1152037

⑤D. Heinzeller, 野村英子, C. Walsh, T.J. Millar, Chemical Evolution of Protoplanetary Disks - The Effects of Viscous Accretion, Turbulent Mixing, and Disk Wind The Astrophysical Journal, 査読有,  
vol. 731, 2011, 115(22pp)  
DOI:10.1088/0004-637X/731/2/115

⑥C. Walsh, T.J. Millar, 野村英子, Chemical Processes in Protoplanetary Disks, The Astrophysical Journal, 査読有,  
vol. 722, 2010, pp. 1607-1623  
DOI:10.1088/0004-637X/722/2/1607

⑦J-E. Lee, E. A. Bergin, 野村英子, The Solar Nebula on Fire: A Solution to the Carbon Deficit in the Inner Solar System, The Astrophysical Journal Letters, 査読有,  
vol. 710, 2010, pp. 21-25  
DOI:10.1088/2041-8205/710/1/L21

in Protoplanetary Disks, Workshop on Interstellar Matter 2012, 2012年10月17-19日, 北海道大学

③野村英子, Water in Protoplanetary Disks, The Astrochemical Universe Unveiled with Herschel, 2012年7月2-3日、ローマ(イタリア)

④野村英子, Chemical Structure of Protoplanetary Disks - Observational Diagnostics with ALMA, Star Formation through Spectro-imaging at High Angular Resolution, 2011年6月20-24日, 台北(台湾) [招待講演]

⑤野村英子, Chemical Models of Young Stellar Objects - Hot Core Chemistry -, The 5th Zermatt ISM Symposium: Conditions and impact of star formation: New results with Herschel and beyond, 2010年9月19-24日, ツェルマット(スイス) [招待講演]

⑥野村英子, Chemical Models of High Mass Young Stellar Objects, Great Barriers in High Mass Star Formation, 2010年9月13-17日, タウンズビル(オーストラリア) [招待講演]

⑦野村英子, 原始惑星系円盤中のダストの物理的・化学的進化, 日本地球惑星科学連合2010年大会, 2010年5月23-28日, 幕張メッセ国際会議場 [招待講演]

⑧野村英子, Dust evolution in protoplanetary disks: Effect on observations of dust emission, Workshop on the Magnetorotational Instability in Protoplanetary Disks, 2009年6月2-3日、神戸大学

[その他]

H24年度に原始惑星系円盤に関する国際研究会「Revealing Evolution of Protoplanetary Disks in the ALMA Era」を開催し、以下のホームページを設立した。

[www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/kyoto\\_disk/](http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/kyoto_disk/)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

野村 英子 (NOMURA HIDEKO)  
京都大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号: 20397821