

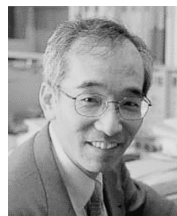
# 赤外線観測で迫る原始惑星系円盤の総合的描像

芝井 広<sup>1</sup>・深川 美里<sup>2</sup>

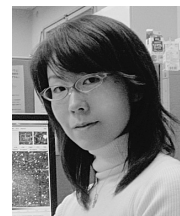
〈大阪大学大学院理学研究科 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-1〉

<sup>1</sup> e-mail: shibai@ess.sci.osaka-u.ac.jp

<sup>2</sup> e-mail: misato@ess.sci.osaka-u.ac.jp



芝井



深川

惑星系形成過程を解明するには、その誕生の場である原始惑星系円盤の密度・温度分布といった性質を理解しなければならない。そのためには、これまでの観測結果を踏まえて、特に赤外線によるダストの詳細観測を中心に、実験室実験・理論を取り入れた「原始惑星系円盤の具体的・総合的描像の構築」を行うことが重要である。これによって地球型惑星形成過程をより一般的で精密な円盤モデルに基づいて論じることが可能となる。

## 1. はじめに

昨年末、系外惑星の分野において重要な観測結果が発表された。木星型惑星を直接撮像でとらえたというものである<sup>1</sup>。これまでも同様の発表はなされてきたが、惑星質量の見積もりが正しいのか、本当に星に重力的に束縛されているのかという点でケチがつくことが多かった。しかしどうやら今回はもっともらしい。そして観測結果はまたもや「太陽系との類似」から遠く離れる。中心星は太陽の1.5倍程度の質量を持ち、3個の惑星候補天体は木星の10倍程度の重さで、星から20-70 AU程度も離れた軌道をまわっているのである。ただし、現在の観測技術は太陽系に類似した惑星系をとらえるには不十分であり、したがって将来的には、技術の向上によって地球型惑星の像も撮られるようになるだろう。どのような環境からどのような惑星系が誕生するのか。そしてそれら多様な惑星系の中で、太陽系における地球型惑星はどのような位置づけになるのか。これらの問いに答えるには、系外惑星系の「形成過程」を観測によって理解することが不可欠となる。

## 2. 研究の動向

惑星系形成の前段階であり初期条件とも言えるのが「原始惑星系円盤」である。原始惑星系円盤はガスとダスト（塵）が混じりあって形作られており、円盤の密度分布（質量）や温度分布が惑星形成過程に重要な影響を与える。近年の太陽系惑星形成論は、太陽と同じ元素組成かつ軸対称の「標準的」円盤から出発し、解析的および大規模数値シミュレーション手法によって、木星などの巨大ガス惑星や、地球型惑星、氷惑星などの形成過程を大筋において説明することに成功した。さらには密度分布、重元素量、中心星の質量と光度を変化させることで多様な惑星系の誕生を予言することに成功し、続々と発見されつつある太陽系外惑星との対比によって、研究を急速に進展させて魅力ある分野を形成してきた<sup>2</sup>。

一方において、原始惑星系円盤の観測も赤外線・サブミリ波で大きく進展した。「すばる」など地上大望遠鏡のコロナグラフによる観測では、軸対称円盤だけでなく渦状の分布構造を持つものがあるなど、非軸対称あるいは非赤道面对称の円盤

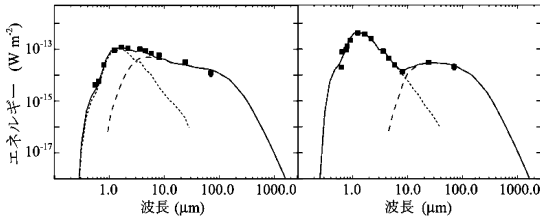


図1 原始惑星系円盤のエネルギー分布の例。光球からの放射(点線)と円盤(モデル)からの放射(破線)を重ねて表示している。右の円盤は近赤外線での超過成分がほとんど見られないため、星近傍の熱いダストが消失している可能性がある。

が特殊でないことがわかってきた<sup>3)</sup>。また IRAS, ISO, Spitzer 宇宙望遠鏡や日本の「あかり」衛星によって、赤外線(主に遠赤外線)が恒星自身の放射より超過している天体が発見されてきた。これらは星周円盤ダストが中心星によって温められて熱放射していると解釈できる。最近の観測からは原始惑星系円盤から残骸円盤への進化過程において赤外放射スペクトルの多様性(円盤構造の多様性を反映)が明らかにされ、円盤内部の温度分布の複雑さが示唆されている<sup>4)</sup>(図1)。さらに惑星を持つ主星の重元素量や光度にも大きいバラつきが見られることから、原始惑星系円盤の組成や結晶性にも当然ながら大きい変化が期待される。

このように最近の研究によって「原始惑星系円盤はきわめて多様」という重要な知見が明らかにされてきた。すなわち形状(対称性、一様性)、サイズ、温度分布、総質量、重元素量など、「標準的」円盤とは大きく異なるものが多く、地球型惑星の形成過程を一般的に論じるには、円盤について広い範囲の初期条件を調べる必要がある。

また、「多様性」の存在は明らかになったものの、観測に基づいて具体的な描像を確立するにはまったく至っていない。たとえば円盤ダストの温度分布については「日下モデル」をはじめさまざまなモデルが提案され用いられているが<sup>5)</sup>、これらはダスト自身の光学的性質を仮定してはじめて得られるものであり、観測的検証が必須である。

ダストの温度分布は微惑星形成過程を大きく左右するからである。また、円盤の質量(面密度分布)は形成される惑星の質量や形成過程(コアアクリション、重力不安定)に密接に関連するが、これにもまた、観測から見積もられる質量は円盤中のダストの大きさ等に依存するという不定性がつきまとう。たとえば最近では従来よりも長い波長で円盤を観測し、すでに成長したダストの質量も加味しようとする試みがある。この場合、考えられていたよりも円盤の質量が重くなり、重力不安定で惑星が作られる程度になるという報告もある<sup>6)</sup>。さらに現実の円盤の理解に近づくために、温度、密度分布の時間変化についても詳細な観測がようやく進み始めた。これまでに、可視・近赤外線においては高解像撮像観測が可能であることから、円盤上層にあるダストからの散乱光がとらえられている天体がいくつかある。中には、激しい降着活動がおさまったと考えられる原始惑星系円盤で、表面輝度の時間変動が確認されている例がある。その同じ天体について、あたためられたダストからの熱放射(近赤外線)も変動していることが確かめられている<sup>7)</sup>。これらの観測結果は、近赤外線での放射が生じる円盤内縁領域において、何らかの原因によって構造の変動が起り、それが外側の散乱光での見え方に影響を与えている可能性を示唆している(図2)。実際、渡辺らは理論研究によって円盤の構造そのものが時間変動することを予測している<sup>8)</sup>。そこで我々のグループでは単に円盤構造を空間分解するのみでなく、時間変動のメカニズムの解明に特化した観測を「すばる」等を用いて開始している。

いずれの例をとっても、我々はいまだ原始惑星系円盤の性質の理解には程遠く、惑星形成理論に制限を与えるには至っていないことが明らかであろう。そこで観測・実験による「原始惑星系円盤の具体的・総合的描像の構築」によって、続々と発見される系外惑星の形成論、一例としての太陽系形成論の進展、さらに「地球型惑星の形成条

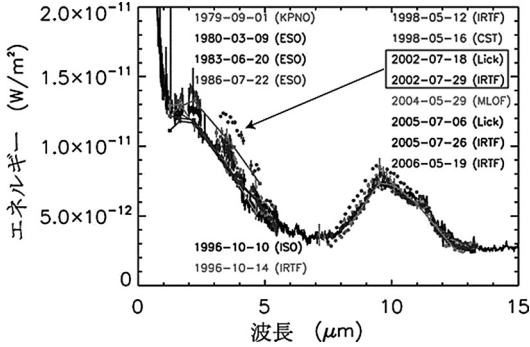


図2 原始惑星系円盤におけるダスト熱放射の時間変動<sup>7)</sup>。2002年付近で放射が大きくなっている。熱放射が大きい時期に、星から離れた領域では円盤表面のダストによる散乱光が暗くなる傾向がみられ、円盤の構造変化が示唆されている。

件」の解明に寄与することが、きわめて重要となっている。

### 3. 赤外線による詳細観測—世界初の宇宙遠赤外線干渉計 FITE (Far-Infrared Interferometric Telescope Experiment)

原始惑星系円盤について解明すべき主要な性質のうち、重元素量については中心星の値を用いることでほぼ良いと考えられるが、その他の性質については高解像観測が必須である。円盤の形状、広がり（サイズ）については近赤外線観測、ダストの温度分布については中間赤外線や遠赤外線観測、円盤の総質量についてはサブミリ波やミリ波観測が最も直接的な情報をもたらすであろう。しかしながら、近赤外線に対しては円盤が不透明であること、遠赤外線では空間分解能が足りないことなど、単一の観測だけでは原始惑星系円盤の性質を明らかにすることが難しい。そこで最先端の観測機器を用いて、近赤外線（高温円盤の放射および散乱光）、中間赤外線（中温円盤の放射）、遠赤外線（低温円盤の放射）、サブミリ波（低温円盤の放射）のデータを集積し、これらを総合して解釈することが必要であろう。

この中で最も技術開発が必要なのは遠赤外線である。IRAS, ISO, Spitzer 宇宙望遠鏡、「あかり」などによって、原始惑星系円盤を全体として測光し、エネルギー分布 (SED) を求めてモデルと比較する研究は進んできた。

しかしながらダストがこの波長帯に鋭いスペクトルフィーチャーを持たないこともあり、遠赤外 SED と円盤モデルとの比較だけから詳細な構造を導くのはかなり難しく、解像度の欠如による結論の不確かさは時として大変歯がゆいものがある。近赤外線、サブミリ波では 0.1 秒角あるいは 1 秒角の高解像観測がすでに実現されているが、熱放射のピークである遠赤外線では高解像観測をしない限り、ダストの温度分布、密度分布を正確に決定することはできないだろう。

この波長帯では、解像能力は望遠鏡の「回折限界」で制限される。電磁波は「波」であるために波長程度以下の小さい場所に像を結ばせることができないという制限である。波長 100 ミクロンの遠赤外線を口径 1 m の望遠鏡で撮像するとき、この限界は 20 秒角程度である。「あかり」や Spitzer 望遠鏡では 30 秒角、今年打上げ予定の Herschel 宇宙望遠鏡やわが国のプロジェクトである SPICA は 3 m クラスの口径をもつが、それでも回折限界解像度は 7, 8 秒角である。この解像度でおうし座分子雲の原始惑星系円盤を観測する場合、解像できるのは 1000 AU 程度である。そのため依然として原始惑星系円盤全体の放射をみており、それ以上細かい様子を直接見られないという状況は変わらない。望遠鏡の口径を大きくすれば解像度は上がるが、単一の望遠鏡ではおのずと限界がある。そこで小さい望遠鏡を距離を離して設置し（距離を基線長という）、それぞれの望遠鏡でとらえられる電磁波を「干渉」されることによって、高い解像度を実現する技術が有効となる。電波ではこの干渉計の技術が広く用いられている。南米チリの高地に建設中の ALMA では、この干渉計の技術によって 0.01 秒角オーダーの解像度（おうし座分子

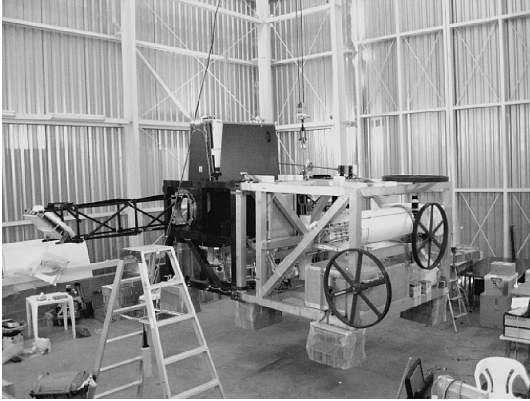


図3 遠赤外線干渉計 FITE (全体図). 実験室内での試験の様子. 奥の黒い部分が干渉計, 手前は制御部である.

雲の距離で 1 AU に対応) が達成されるであろう. また可視光, 近赤外線, 中間赤外線でも干渉計技術がめざましい進歩を遂げており, 0.001 秒角あるいはそれ以下の解像度が達成されつつある.

そこで私たちは, 遠赤外線波長帯において 1 秒角の解像度を実現するために, 干渉計を開発してきた<sup>9), 10)</sup>. 遠赤外線は大気を透過しないためス

ペースに打上げる必要がある. 将来はロケットで宇宙空間に打ち上げることを目指すが, まずは科学観測用大気球で 3 万 5 千メートルの成層圏に打ち上げることとする. 干渉計としては地上望遠鏡で用いられている Michelson 型ではなく, Fizeau 型を採用した. 宇宙空間では望遠鏡を地上に固定する必要がないため, すべての電磁波に対して光路差をゼロのままに保つことが出来る Fizeau 型が有利である.

図3に我々が開発した遠赤外線干渉計 (Far-Infrared Telescope Experiment: FITE) の写真を示す. 口径 40 cm の二つの開口を基線長 8 m で設置し, 共通の焦点に集光・干渉させる. このビームを遠赤外, 中間赤外, 可視に分けて, それぞれアレイセンサーで撮像する. ちなみに遠赤外線アレイセンサーは「あかり」で開発した技術を発展させたもので, 世界トップの感度を達成している. 観測されるのは干渉縞 (フリンジ) であり, これから像を再生するには基線長と基線の変える必要がある. また気球に吊り下げられた状態で

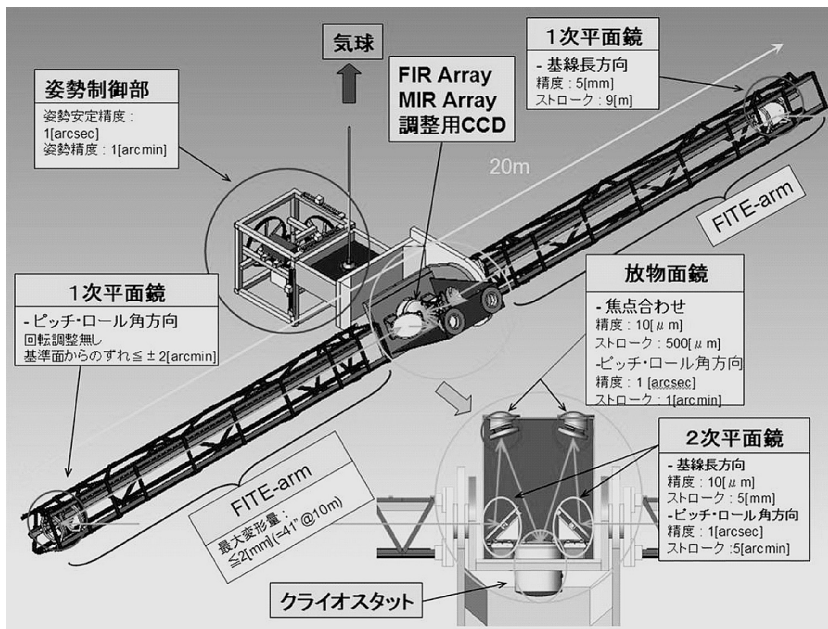


図4 遠赤外線干渉計 FITE (光学系部).

干渉計を正確に天体に向けてのための姿勢制御システムなど、気球搭載望遠鏡に必要なさまざまな機能も開発した。

2008年12月に波長150ミクロン、基線長8メートル(4秒角に相当)で初観測を計画した。気球フライトはJAXA、ブラジル宇宙科学研究所(INPE)の日伯共同研究で実施された。しかしながら予想外の悪天候のために、フライトが可能な期間内に準備が完了せず、残念ながらフライトは次年度以降に延期することになった。次のステップでは20メートルの基線長を用い分解能1秒角を目指す。これはおうし座分子雲の距離で100AUオーダーに相当する。原始惑星系円盤内部の温度分布を詳細に観測するには分解能が若干不足であるが、より高解像のサブミリ波データとあわせることで、円盤の温度分布に関して観測的制限をつけることが十分可能であると考えている。より近距離、あるいは実サイズの大きい円盤については、遠赤外線観測のみから温度分布の情報が得られると期待される。我々が指摘したように<sup>11)</sup>円盤の外縁で重力不安定による巨大ガス惑星形成の可能性についても確認できる可能性がある。この遠赤外線の干渉技術は将来のスペース干渉計につながることを期待される。

#### 4. ま と め

惑星系形成の解明にあたってはその初期条件である原始惑星系円盤の性質の理解が不可欠である。これまでの観測は、実在の円盤について、その多様性を明らかにしてみせた。今後は円盤サンプルの増加と個々の天体についての多波長データの集積、またダスト素過程の理解<sup>12), 13)</sup>によって「原始惑星系円盤の具体的・総合的描像の構築」を目指す。これによって太陽系外惑星系の一般的形成論、一例としての太陽系形成論の進展、さらに最終目的である「地球型惑星の形成条件」の解明

が大きく進むと期待される。また中間赤外線や遠赤外線の高度技術の開発成果は、次代のさらなる発展にむけて道をつけるものである。

#### 参 考 文 献

- 1) Marois C., Macintosh B., Barman T., et al., 2008, Research Article published online in Science Express Nov. 13th, 2008
- 2) Ida S., Lin D. N. C., 2005, ApJ 626, 1045
- 3) Fukagawa M., Hayashi M., Tamura M., et al., 2004, ApJ 605, L53
- 4) Hillenbrand L. A., et al., 2008, ApJ 677, 630
- 5) Kusaka T., Nakano T., Hayashi C., 1970, Prog. Theor. Phys., 44, 1580
- 6) Greaves J. S., Richards A. M. S., Rice, K. M., Muxlow, T. W. B., 2008, MNRAS 391, L74
- 7) Sitko M. L., et al., 2008, ApJ 678, 1070
- 8) Watanabe S., Lin D. N. C., 2008, ApJ 672, 1183
- 9) Matsuo T., Shibai H., Kawada M., Hattori M., Ohta I. S., Matsuo H., 2008, PASP 60(2), 303
- 10) Kohyama T., Shibai H., Kawada M., et al., 2008, in Optical and Infrared Interferometry, ed. Schöller, M., Danchi, W. C., Delplancke, F., 2008, Proc. SPIE·7013, 70133O.
- 11) Matsuo T., Shibai H., Ootsubo T., Tamura M., 2007, ApJ 662, 1282
- 12) Yamamoto T., Chigai T., 2005, Highlights of Astronomy 13, 522
- 13) Kaito C., Miyazaki Y., Kumamoto A., Kimura Y., 2007, ApJ 666, L57

#### Toward Comprehensive Models of Protoplanetary Disks

Hiroshi SHIBAI and Misato FUKAGAWA

Department of Earth and Space Science, Osaka University

Abstract: Protoplanetary disks are birthplaces of extrasolar planets. In order to understand planet formation process, it is essential to observationally understand their properties such as surface density and temperature distributions. More specific and comprehensive models should be developed with infrared observations, laboratory experiments, and theoretical investigations. These studies will allow us to discuss in detail the formation process of Earth-like planets.