特集「物質科学的研究・観測的研究で探る惑星系の誕生と進化」 「すばる・CIAO」が見た星・惑星系の 誕生現場

工藤智幸1

(要旨)惑星は恒星ができる過程で、副産物として形成される.恒星が生まれる際、周囲にダストの円盤を伴い、 その中で惑星形成が起こると考えられているため原始惑星系円盤と呼ばれている.つまり、惑星の起源を探るに は、ホストとなる恒星の星周構造を詳細に調べることが必要不可欠である.本稿では、すばる望遠鏡と、星・惑 星系の形成過程を調べるべく開発された観測装置CIAOを駆使して得られた最近の成果について報告する.

1. はじめに

「宇宙人っているの?」

「いきものがいるのは地球だけ?」

この問は世代を超え,世界中の老若男女,誰もが気 になっていた話題だろう.

いのちが生まれた現場,それは地球.地球が生まれたところ,それは太陽の隣….

つまり,広い宇宙で仲間探しをするには,太陽のような「恒星」の進化を調べてみることが一番自然なア プローチではないだろうか.

恒星は分子雲と呼ばれるガスとダストが集まった部 分が収縮して生まれる.その際,元となるガスやダス トが角運動量を持つため,星の周りには円盤構造がで きると考えられている.この円盤は惑星形成の現場と なることから「原始惑星系円盤」と呼ばれ,その性質 を知ることは惑星系ができる過程を理解する上で大切 になってくる.特に,実際に見る観測(撮像観測)が 描き出す空間構造は,温度や密度構造など円盤内の物 理条件を反映して変化していくはずであり,各進化段 階で円盤の形を追っていくことは,惑星形成の理論に も大きな制限を与えることとなる.

生まれる現場を見る研究が盛んに行われている.

本稿では、円盤の直接撮像観測に焦点を当て、すば るのコロナグラフ装置CIAOで得られた近赤外線にお ける最近の成果を紹介していくことにする.

2. 近赤外線コロナグラフカメラ CIAOとは…

円盤はサイズが小さく,しかも明るい中心星のすぐ 近くに存在するため,観測が非常に難しい.

また,いかにすばるのような口径の大きな望遠鏡で あっても,ものを分離し,細かく見る能力(空間分解能) は,地球の大気に左右されてしまう.そこで,この2 つの影響をなくすべく開発された観測装置が近赤外 線コロナグラフカメラCIAO (Coronagraphic Imager with Adaptive Optics)である.CIAOは,明るい中 心星を隠すためのマスクと,余分な回折光を軽減する リオストップを持っており,星周囲の淡い構造を検出 するのに威力を発揮する.(原理的には人工的に皆既 日食を起こさせるのと似ている).加えて,大気の揺 らぎをリアルタイム (1000分の1秒ごと!)に打ち消 す補償光学 (Adaptive Optics; AO)を利用すること により,0.1秒角の解像度を得られ,数100AUのディ スク構造と,それに伴う惑星の直接検出に迫ることが 出来る.もちろん,星本体が分厚いダストによる減光



図1: コロナグラフ機構

星周構造を取り出すため、望遠鏡から入射してくる 明るい天体部にマスクをかけ減光する.さらに、リ オストップという周囲の回折光を抑える部分を通す ことで、ダイナミックレンジが上がる.これにより、 検出器の飽和を防いで、暗い構造を検出するための 長時間積分が可能となる.

で,まだ比較的暗い原始星段階の場合,マスクを使わ ずそのまま高いダイナミックレンジ(光の変化を再現 できる範囲)を利用した高解像度赤外線カメラとして も使用できる.

また, CIAOには偏光機能も備わっている. 観測さ れる光の偏りは, 星を取り囲むガスやダストが中心星 からの赤外線を反射して生じる. つまり, 偏光データ を用いることで, 星の周りにどのようなものが, どの ように分布しているのかといった情報を逆に調べるこ とが可能となる. 口径8 ~ 10メートルクラスの望遠鏡 における赤外線観測では, 光の偏りを調べる工夫は進 んでおらず, この組み合わせは非常にユニーク, かつ 強力な手法である.

3. 円盤の撮像観測

星周構造のおおまかな進化に関しては、太陽質量程 度の低質量星(Tタウリ型星)と、太陽の2~10倍の 質量を持つ中質量星(Herbig Ae/Be型星)において、 すでにある程度理解が進んでいる. 星の年齢が10⁵年の段階では、中心の星と円盤を囲 むエンベロープ構造(1000 AU スケール)が卓越す るが、星の年齢が10⁶年になるとエンベロープが散逸 して円盤(100 AU スケール)のみが残ると考えられ ている[1].

これまでの研究としては、天体のエネルギー分布 (SED)を再現するように構造のモデルを構築すると いう手法が一般的だった.しかし、こういった間接的 な方法では構造を一意に決めることが難しく、円盤内 の細かい構造を推測することは不可能である.ミリ波 干渉計などの観測から円盤の存在とその大きさ(半 径)は知ることはできていたが、サイズの小さい細か い構造、ましてやそれに付随する中心星の極近傍にあ る暗い惑星候補を分解するには、やはりすばるのよう な8m級の大型光赤外線望遠鏡による観測が必要不可 欠である.

太陽質量の10倍以上の大質量星では,低質量星に比 べ進化が速い(前者は主系列に至るまで10⁴年のオー ダーであるのに対し,後者は10⁷年と考えられている) ため,前主系列段階がどのようなものかはわかってい ない.さらに,分子雲に深く埋もれており,地球から 比較的遠い1kpc以遠に存在するため,高感度・高分 解能の観測が難しく,進化や構造についての理解が進 んでいないのが現状である.

3-1 低質量星(2太陽質量以下)の星周構造

ハワイ観測所では、より若い星の星周構造から、主 系列直前まで進化が進んだ星に付随する惑星候補天体 までを対象に、2002年から近傍分子雲中のTタウリ型 星における系統的な観測を進めてきた(Subaru Disk and Planet Search; SDPS).

図2(a) は、そのプロジェクトで得られた結果の一 つ.おうし座分子雲(距離140pc)にあるTタウリ型 星HL Tauの近赤外線画像である.波長1.6μmを青、 2.2μmを緑、3.7μmを赤とした3色擬似カラー合成を している.補償光学を用いることで0.15~0.2秒角の 解像度を達成した.これは、約20AUもの細かい解像



図2: (a) CIAO と AO を用いて観測した T タウリ型星 HL Tau の近赤外線3 色合成画像.北が上.左が東である. 点線は望遠鏡の副鏡を支持している構造が引き起こ す偽のパターン (spider) を示す [2].



図2: (c) 波長 1.6 µ m と 2.2 µ m のデータの差をとった画 像に、ミリ波で得られたコンターを重ね合わせたも の、南西側の明るい領域がダスト分布のサイズとほ ぼ等しく、ものが濃い領域(円盤に相当)による減光 を示している

度で星周構造を見ていることになる.この天体の年齢 は10⁵~10⁶年と考えられ,原始星からTタウリ型星円 盤へと進化する途中段階である.これまでの観測か ら、一酸化炭素分子が半径2000AUにわたって存在す ることがわかっており[3]、そしてミリ波干渉計のデ ータから半径150AUの円盤が見つかっていた[4].また、 可視光の観測から円盤に垂直に出るジェットが確認さ



図2: (b) ジェット軸方向 (P. A= 45 度:北から反時計回りに 45 度方向)をY軸とし、それに直行する方向をX軸として、 散乱光のピークを表示、東側の cavity の壁と、北西に伸 びるエンベロープが同方向に動いていることがわかる.

れている[5]. ハッブル宇宙望遠鏡の可視光観測では, 星本体は埋もれていて見ることができなかった[6].

近赤外線の観測は可視光と同じく、ダストによる散 乱光を捉える.しかし、可視光より波長が長いため、 密度の低い領域は見通すことができるという利点があ る.

本観測は、デコンボリューション(数学的な画像処 理[7])をしていない初めての高解像度撮像結果であり、 3色のうちの1つはこれまでの近赤外線観測ではもっと も長い波長(L'-band: 3.7µm)である.周囲に大き さ約500AUのエンベロープ構造,さらに、北東側(図 の左上)には、アウトフローによって引き起こされた と考えられるU字型の空洞の壁(cavity)が星の光を 散乱して明るくなっているのを捉えた.また、2002年 と2004年のデータを比較すると、このcavityがジェッ ト軸に対し、徐々に広がっていることがわかり、さら に中心星の歳差運動と考えられる回転を捉えることに も成功している(図2(b)).こういった「動き」を捉 える観測は、コア集積モデル等への重要なヒントにも なる.

図2(c) は、近赤外線の色の違い(減光量)と野辺 山ミリ波干渉計で撮られた2mmダスト連続波のコン ター図を重ね合わせたものである。ミリ波のデータは 円盤をなすダストそのものの熱放射を見ている。円盤 上部にあたる視線方向手前側はcavityでの前方散乱が 強く,円盤による吸収は見えないが,南西側の明るい (赤い)構造は、ミリ波のコンター図とほぼ同じサイ ズであることから、後方のcavityから来る散乱光がデ ィスクを通過して赤化している領域と考えられる.こ のように,色の違い(吸収度合いの違い)から,傾い た円盤を同定することもできた.

今回,0.1秒角に迫ろうかという高解像度により, 年齢が10⁵ ~ 10⁶年へと進化する途中段階にある若い 星の,中心星の質量降着による星周円盤,アウトフロ -,エンベロープからなるシステムを分解することが でき,典型的な産まれつつあるできたての星の,躍動 する姿を鮮明に捉えることができた.

3-2 中質量星(2~10太陽質量)の星周構造

図3は現名古屋大学の深川らが観測した、おおかみ 座方向にあるHerbig Ae 型星HD142527のコロナグラ フ画像である. 明るい中心星をマスクしているとは いえ,ごく近傍の淡い構造をそのまま検出するには厳 しい. そこで,周囲に何もないことがわかっている星



図3: CIAO が捉えた波長 1.6µm での Herbig Ae 型星 HD 142527 の星周構造. 星は黒丸の中心に位置している. 主星の影響は解析時に取り除いてあるため,ここで 見えているのは円盤の表層にある塵からの散乱光の みである. 実際はもっと小さいマスクで星を隠して いるが,解析時の影響で本来の構造として議論でき ない領域を黒丸として表示している [8].

も同時にマスクして観測し,解析時にその成分を引く ことで,こういった構造が明瞭に見えてくる.

円盤は2つのバナナ状の構造が向き合った形をしてお り、さらに外側に向かって腕のようなものが伸びて いる.この結果は、これまで天体のエネルギー分布 (SED)から間接的に示唆されていた形状とはまった く違う構造であり、特殊な円盤と言える.

南側に見えるギャップは,円盤の内側に楕円軌道で 主星の周りを回る別の見えない天体が存在し,これが 重力的に影響を及ぼしているために形成されたのでは ないかと推測されている.また,外側の腕構造につい ては,円盤外側を別の星が通過し,円盤外側の物質が 引きずられた可能性がある.

Herbig Ae 型星は、微惑星同士がぶつかってできた 残骸円盤をもつとされる主系列星(ベガ型星)の前進 化段階と位置づけられている.っまりHerbig Ae型星 の進化も知ることで、ベガ型円盤の起源、すなわち中 質量以下の恒星における惑星系形成過程の理解へもっ ながっていくことになる.

3-3 大質量星(10太陽質量以上)の星周構造

大質量星の形成メカニズムとしては、いくつかの低 質量星が合体して大質量星となるというもの(合体説) と、重力収縮の結果生まれた円盤状構造からの質量の 降り積もりによって生まれるという考え(降着説)の 2つが主流となっている.しかし、これまでどちらの 説に対しても観測的な証拠が少なかった.

図4は、中国紫金山天文台のJiangと国立天文台ら の研究チームによる大質量星BN天体の偏光撮像観測 の結果である.北東(左上)と南西(右下)に白く偏 光強度が大きい領域が存在し、それらに間は偏光度 が小さくなっている.アウトフローに起因した空洞 (cavity)にはものが無いので、星からの光はさえぎ られず、空洞の壁に当たることで散乱されて偏光が生 じる.しかし、円盤では、ものが多く密度が濃い領域 なので、多重散乱となり、偏光度合いは相殺されて小 さくなる.つまり、この構造の発見は、円盤とアウト



図4: 波長1.6µmで見た大質量星BN天体の偏光画像[9].

フローからなるシステムが存在する証拠であり、大質 量星も太陽と同じく周囲の物質が降り積もることで形 成されることを物語っている.一般的に若い大質量星 はかなり明るく、その星周構造を直接に見るのは厳し い.しかし、偏光を利用してコントラストを上げるこ とで、ものの濃い領域と薄い領域を分離することに成 功している.今回の高解像度の赤外線偏光観測が大質 量星の星周円盤を研究する上で強力な手法であること がわかったため、今後、大質量原始星の解明も進んで いくだろう.

4. まとめと今後…

このように,高解像度の撮像観測によって原始惑星 系円盤の形態が様々であることが次第に分かってきた. 現時点では,円盤の検出率,散乱光の明るさ等におい て,日αの等価幅(質量降着活動の指標)や赤外超過 量に対する明確な相関は得られていないが,今後,自 分の結果と他の望遠鏡の結果も合わせて,観測された 円盤の性質(散乱光の明るさや半径)と中心星の質量 や年齢,その他星の進化指標となる可能性があるパラ メータとの間にも相関があるかどうかを,今進めてい る博士論文で重点的に議論しようと考えている. また,ここでは取り上げなかったが,CIAOによる 連星系の直接観測も進んでいる[10][11].

しかし、いくら空間分解例が増えてきたとはいえ、 一般的な円盤の形態進化を語るには、まだまだサンプ ルが足りないと思われる。観測された円盤は光学的に 厚く、近赤外線での撮像は円盤上層のダストによる散 乱光をとらえているにすぎない。円盤の鉛直方向の高 さが半径とともに増加する形状の場合(フレアしてい る場合)には、円盤上層のダストは中心星からの光を 効率良く受け止めることができるため、散乱光で観測 されやすい、今まで以上に、平坦な円盤、小さい円盤、 暗い円盤を検出するには、これまで以上のコントラス トが必要となる。

現在,国立天文台の田村らはハワイ大と協力して, 次期高性能コロナグラフ装置HiCIAO(ハイチャオ) の開発を進めている.補償光学も今の36素子から188 素子へのグレードアップが進行中である.今年中には 稼働が見込まれており,現行CIAO+AOに比べ,コン トラストが一桁以上良くなり,より恒星の近くにある 構造を見分けることができる.もちろん,円盤を観測 していく過程で 伴星,すなわち惑星候補を見つけ 出すことも狙っている.もし惑星を直接撮像できれば, 太陽系外の惑星を初めて生で見ることになり,これま での世界観を大きく広げることになる.

また, 偏光観測においても, 2角度分同時に撮像可 能なウォラストンプリズムも搭載される予定である. これにより,時間変動も抑えることが可能となり, デ ータの質がさらに改善されることになるだろう. 今後も数多くの円盤を追い続け,系統的な観測を進め ていけば,年齢や質量の違いによるダストの変化, 連 星系であるか,といった星の個性がわかるようになる.

そして、「見た!」だけで終わらず、円盤を形づく るガスやダストの組成に注目した分光観測[12]や、密 度、温度情報を得るための、ALMA望遠鏡によるミ リ波、サブミリ波観測と連携し、円盤がどのような性 質を持つのかを理解することも重要となってくる. そこに、物質科学的研究や理論的研究のアプローチも 加われば,我々のいる太陽系が一般的な姿なのか,そ れとも特別な存在なのかといった疑問も少しずつわか ってくるだろう.

私は修士まで地球科学を専攻していた. そこでは, 地磁気を主とし,気象,雪氷,地震,火山,鉱物な ど,地球上で起こりうる様々な現象について学んでき た.博士課程から天文台に来たのだが,その一番の理 由は「生きている地球そのものが産まれる現場を研究 したい」という気持ちがあったから….

すばるのあるハワイ島は、できてからまだ100万年 ほどしか経っていない。それとほぼ同い年の惑星誕生 現場を研究しているというのも何だか不思議な感じが する.

すばる望遠鏡や各種観測装置の製作に携わった方々, そして温かく見守ってくれている家族に感謝するとと もに,今後もその恩恵を十分に活かし,星や惑星誕生 の謎に一歩でも近づく努力を続けていければと思って いる.

謝 辞

本稿を書くにあたり,指導教官である国立天文台の 田村元秀先生に大変お世話になりました.

また,執筆の機会を与えてくださった東京大学の橘 氏,そして原稿をチェックして頂いた査読者のかたに も感謝の意を表したいと思います.

参考文献

- Andre, P. et al., 1994, Editions Frontieres, Gifsur-Yvette, p.179.
- [2] Kudo, T. et al., 2007, in prep.
- [3] Hayashi, M., Ohashi, N., Miyama, S. 1993, ApJ, 418L, 71.
- [4] Kitamura, Y., et al., 2002, ApJ, 581, 357.
- [5] Mundt, R. et al., 1990, A & A, 232, 37.
- [6] Stapelfeldt, K. et al., 1995, ApJ, 449, 888.

- [7] Close, L.M. et al., 1997, ApJ, 478, 766.
- [8] Fukagawa, M. et al., 2006, ApJ, 636L, 153.
- [9] Jiang, Z. et al., 2005, Nature, 437, 112.
- [10] Itoh, Y. et al., 2002, PASJ, 54, 963.
- [11] Mayama, S. et al., 2006, PASJ, 58, 375.
- [12] 藤原英明, 2007, 遊星人, 本号
- [13] 田村元秀, 深川美里. 2003, 天文月報, 96, 182.