

アタカマ電波干渉計で探る惑星系円盤

百瀬 宗武¹

1. はじめに

1.1. 惑星系形成論と天文学

つい最近まで、惑星系形成の研究とは太陽系形成を対象にしたものを指していた。それは一般的な事象に対する包括的シナリオの構築というよりは、むしろ唯一の歴史をひも解くという性格が強かったように思う。もちろん太陽系形成モデルには天体物理学で得られた知見も利用されていたが、太陽系形成自体は過去に済んでしまったイベントなので、それ自体を観測することは不可能である。このため、太陽系形成論を検証する手段は、もっぱら太陽系内の始源的物質(隕石など)を対象にした実験的研究に限られていたと言えよう。

しかしこのような事態にも変化の兆しは見られる。その一つの例が、つい最近本誌でも特集された「比較惑星系形成論」という見方の登場である[1]。このような見方が提案される契機になったのは、最近の天文観測により、若い星の周囲に惑星系の母体と見られる円盤(原始惑星系円盤)が検出されたり、主系列星に付随する惑星系が次々発見されたことである。原始惑星系円盤に対する観測の現状は太陽系形成論と詳しく比較するには不十分なレベルであるにも関わらず、太陽系形成に興味をもつ理論家・実験家にそれなりのインパクトを与えつつある。これは、隕石などの研究ではなかなか探ることが難しかった円盤の大局的性質やその時間進化について、観測から粗削りながらも一定の情報を導くことができたからであろう。また、太陽系と全く異なる惑星配置をもつ惑星系の発見は、太陽系

を再現することを目指していた以前の研究では見過ごされてきた視座を新たに提供した。「分野の垣根を越えて」とまではいかないにせよ、他手法の研究に対する興味が芽ばえ、それが刺激となって各分野で新たな展開を生んでいることは確かであろう。

このような傾向は、アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計(ALMA)と呼ばれる電波望遠鏡計画が実現すれば一気に加速すると考えられる。今回は、惑星系形成過程に関する研究にとって、このALMAという装置がどのように貢献するかをわかりやすく概観したい。なお惑星科学とALMAとの関係という点で興味深いトピックとして、他に太陽系内天体や主系列星周囲のデブリ円盤の観測もあげられる。当初はこの二点についても関連させながらとりあげるつもりだったが、分量が多くなりすぎたため今回は詳しい紹介をあきらめた。太陽系内天体の観測的研究はこれまで日本で必ずしも盛んであったとは言えないが、ALMAで大きな進展が期待できるテーマであることには変わりない。この点についても、近々多くの方と議論できればと考えている。

1.2. ALMA(アルマ)とは?

観測の話をする前に、まず装置計画について簡単に紹介しよう。アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計(ALMA)とは、電波観測にとって理想的サイトであるチリ・アタカマ砂漠高地(標高約5000m)に、日米欧三者合同で巨大な電波干渉計を建設しようという計画である(図1)。干渉計とは、複数のアンテナを組み合わせ、その最大アンテナ間隔の回折限界で決まる解像

¹茨城大学理学部

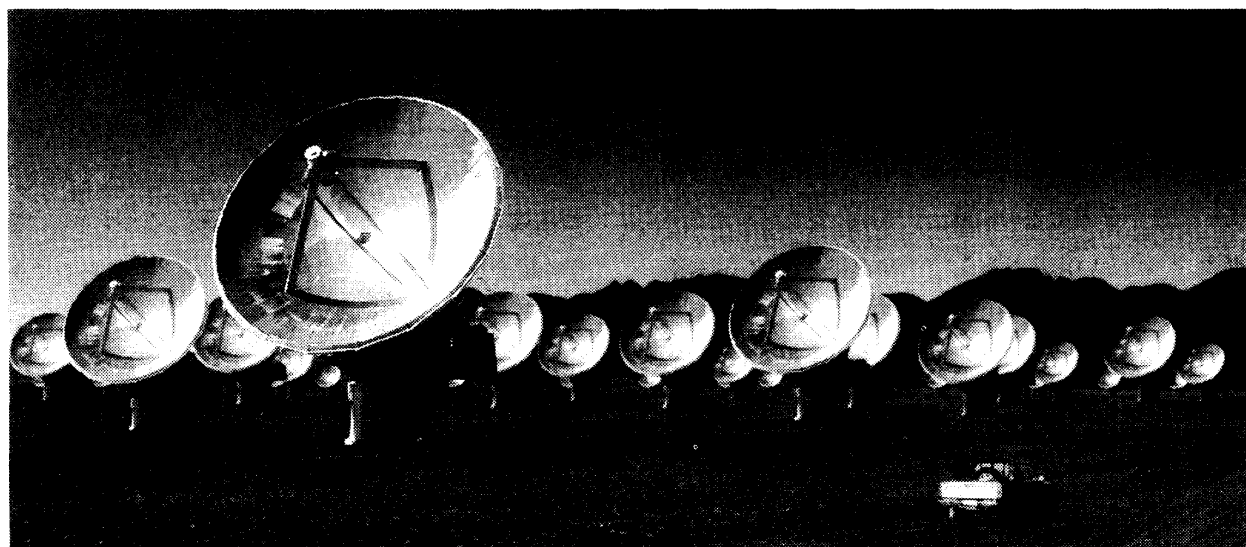


図1：ALMA想像図(阪本成一氏作成)。風景写真はALMA建設予定地のもの。

度を得るタイプの望遠鏡である。ALMAの場合、口径12mのアンテナ64台を最大約10km間隔で配置することにより、直径10kmのアンテナに相当する解像度(0.01秒角)と口径96mのアンテナに相当する集光力の実現を目指している。ALMAが備えるもう一つの大きな特徴は、高いイメージング能力である。干渉計を構成する2つのアンテナ信号からえられる干渉縞は、天体が示す電波強度分布の空間フーリエ成分の一つに相当する。既存のミリ波サブミリ波干渉計は6-12台のアンテナで構成されているが、これらに比べアンテナ数の多いALMAでは、30-140倍も効率良く空間フーリエ成分を取得できる。つまり、高品質なイメージがより短い時間で得られることになる。このようにALMAは、高解像度・大集光力・高いイメージング能力とまさに三拍子そろった装置なのである。

「ALMAというのは初めて聞いた」という方でも、大型ミリ波サブミリ波干渉計(LMSA)計画というのはご存知かもしれない。実はALMAと同様の計画はもともと日本・米国・欧州が独立にもっており、そのうちの日本の計画がLMSAと呼ばれていた。しかし様々な折衝を経て、これら三つが一本化されALMA計画になったのである。もともとLMSAは「すばる」に続く日本の大型観測装置として構想されたもので、国立天文台野辺山のグループが本格的なサイト調査を

チリで始めたのは約7年前に遡る。当初は、電波透過率や気象条件を測定する小型装置をサイト候補地に持ち込んで無人で動作させ、数ヶ月後にディスク上に蓄えられたデータの回収や保守のため再び現地に赴くといった具合に調査が進められていた。とはいえ、この手の測定にトラブルはつきものである。チリにもこの調査の協力者がいたとはいえ、候補地は飛行機の便がある大都市(サンチャゴ、アントファガスタ)から車で片道4-5時間かかる高地であり、トラブルがおこると即座に対応ができず、データ取得もままならないということもあった。当時はハワイ・マウナケア山でもサイト調査が進められていたが、アクセスやインフラ整備の容易さからむしろチリより有力視されていた時期もあった。しかし調査が進み、電波環境の良さや10kmのアンテナ間隔を確保できる平坦な土地があるなど、チリ高地サイトの圧倒的優位性が明らかになるにつれて、困難は承知でそこにLMSAを建設したいという気運が高まっていった。一方、日本と情報交換しながらサイト調査を進めていた米国や欧州も、アクセスの容易なサイトから観測条件のベストなサイトへと狙いを移していった。結局三者は現在のサイト予定地(チャナトール、バンパ・ラ・ボラ領域)に集結し、しかも単一装置の共同建設を目指そうということになったのである。

このような経緯をみると、三者の協力が決まるまでには随分回り道をしたと感ぜられるかもしれない。しかし、アクセス困難なサイトに国際共同で大型装置を建設するという、誰にとっても楽でない形で事業を進めていく決心を固めるには、やはり必要なプロセス・時間だったといえるだろう。ALMAは2010年の本格運用開始を目指しており、国内でもすでに様々な開発検討がなされ、建設予算獲得の努力が国立天文台を中心に続けられている。

2. 宇宙の中での惑星系形成とALMA

それではALMAによってどんな成果が期待できるのだろうか。その議論の準備として、まずミリ波・サブミリ波観測の特徴を簡単にまとめておこう。ミリ波・サブミリ波帯には星間ガスに含まれる分子、原子、イオンからの輝線放射が豊富に存在するので、これらの観測からガスの化学組成や物理状態、速度情報を得ることができる。一方これら波長帯ではダスト熱放射が光学的に薄くなるため、他波長に比べ星間物質のより正確な定量が可能になる。これらはどんな天体を調べる上でも基本的な情報なので、ALMAは天文学のあらゆるテーマで画期的な成果をもたらすものと期待されている[2]。もちろん原始惑星系円盤や太陽系内天体に関する観測も例外ではない。例えばALMAが実現する0.01秒角という空間分解能はハッブル宇宙望遠鏡の性能を10倍以上上回るものであり、木星の距離では40km、最も近傍の星形成領域である牡牛座分子雲でも1.4AU(1AUは太陽地球間の平均距離)の構造を識別できる能力に相当する。またALMAの卓越したイメージング能力により、高品位なイメージを得るために必要な時間も大幅に短縮される。例えば太陽系天体の観測の場合、既存の電波干渉計では自転周期などに比べ観測時間が長かかきすぎるといった問題があるが、ALMAでは惑星表面や彗星を数十分程度の時

間隔でイメージングすることも可能になるだろう。

いささか先走りしてALMAと惑星科学との関係にまで触れてしまったが、何となくその潜在能力がわかったのではないかと思う。以下ではALMAで期待される成果を、これまでの研究と比較しながらさらに詳しく紹介していこう。なお、原始惑星系円盤発見の経緯やこれまでの研究の進展についての詳しい解説は、以前の原稿[3]を参照して欲しい。

2.1. 円盤内部の物理構造とその進化に関する研究

原始惑星系円盤の直径は200AU程度である。これは、もっとも近傍の星形成領域にある円盤の場合でも約1.5秒角の広がりにはかならない。既存の干渉計で得られるビームサイズ(点源を観測したときに得られるイメージの広がり)は約1秒角なので、現状は円盤全体の広がりを何とか認識できるというレベルでしか

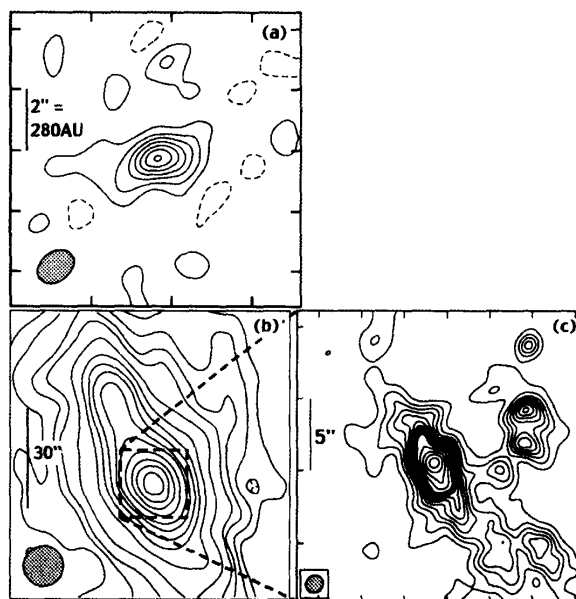


図2: (a) 野辺山ミリ波干渉計で得られた牡牛座DG星に付随する円盤の3mmダスト連続波イメージ(文献[4]より改変)。左下のグレーで示したのがビームサイズ(点源を観測した場合のレスポンス)で、半値幅(1.5" x 1.1")のガウシアン。得られたイメージはビームサイズより有意に広がっていることから、これが円盤起源の放射であることがわかる。(b) オリオン領域の広域ダスト連続波マップ(波長1.3mm, 文献[5]より改変)。太線で囲われた領域がオリオンKL領域。左下のグレーで示したのがビームサイズで、半値幅12"のガウシアンである。(c) (b)で太線で囲われた領域の高解像度ダスト連続波マップ(波長2mm, 文献[6])。左下のグレーで示したのがビームサイズで、半値幅(1.2" x 1.1")のガウシアン。

い (図2(a)). 適当な温度分布・面密度分布を仮定したモデルの助けを借りれば内部構造についてある程度の議論はできるものの, その詳しい内部構造は未解明とあって良いだろう. これに対し ALMA は, 一番近傍の円盤を 1.4AU の解像度で空間的に分解してイメージングする能力をミリ波からサブミリ波にかけての広い波長帯域でもたらす. ALMA によって得られた多波長円盤イメージをすばる望遠鏡などで得られる赤外線での高解像度イメージと合わせれば, 円盤内の各地点での温度・面密度を直接導くことができる. また分子輝線の分光観測では, 円盤の空間構造に加え内部の速度場を 0.1km/s 以下の分解能で探ることができる.

ちなみに解像度が桁で向上すると天体の見え方はどのように変わるのだろうか. それを実際の天体画像で見てもらうため, 図2(b)・2(c)に有名な大質量原始星であるオリオン KL 領域のダスト連続波イメージを示した. 図2(b)は今から約10年前に 12" のビームで得られたイメージ[5]である. 強度最大の点付近に着目すると, そこにはビームに比べ広がった楕円形の放射が確認できることから, 何らかの円盤状構造の存在が示唆される. ただその内部にどのような微細構造があるかまでは判然としない. ちょうどこれまで得られてきた原始惑星系円盤マップと良く似ている. 一方, 図2(c)は最近我々が得たイメージ[6]で, 野辺山ミリ波干渉計と野辺山45m 望遠鏡を組み合わせた「レインボー干渉計」と呼ばれる装置を使い, 1秒角のビームで観測した結果である. 図2(b)では単なる楕円形にしか見えていなかった領域には, 南北(上下方向)に伸びた構造の他に多くのサブピークが存在し, 実に複雑な構造が隠されていたことがわかる. つまり, 解像度が桁で向上するとそれまで全く見えなかった構造が見えてくるのである. このような例を見ると, 原始惑星系円盤内部にどんな構造が隠されているかも大変楽しみになってくる.

では円盤内部の物理構造が解明できると, どのよう

な議論が可能になるだろうか. まず第一に, 分子ガスの収縮から惑星系の完成(あるいは未完成)へと至る一連の流れをより深く理解できるようになると考えられる. ALMA はこれまでの観測で探られてきた現象 ([3]参照)を詳しく解き明かすだけでなく, これまで理論的研究でしか扱えなかった過程——例えば円盤形成初期における非軸対称モードの重力不安定性や, 惑星系形成に伴うギャップ形成など——を実際に見出す可能性も高い. 観測と理論との比較を通じてこれら素過程の本質を理解するとともに, それらを一連の時間系列として整理していくことにより, 星形成と惑星系形成を一つの大きな流れの中で統一的に理解できるようになるだろう. 第二に, 円盤物理状態の普遍性・特殊性とそこから生まれる惑星系との関係について議論ができるようになる期待される. 円盤の初期物理状態とそこから誕生する惑星系の特徴とは密接に関連しているはずである[7]. 例えば最近の系外惑星の検出結果をみると, 木星型と見られる惑星が星のごく近くに存在する例(ホットジュピター)が報告されているが, このような惑星の形成は, 円盤内域での初期面密度が十分高ければ太陽系形成論の拡張で説明できるのではないかと提案もなされている[8]. ALMA によって多くの惑星系円盤の物理状態が解明され, それと並行して系外惑星の検出や惑星系形成をより一般的に扱える理論の確立もあわせて進めば, 宇宙の中の惑星系の位置づけや太陽系の普遍性・特殊性について, より確かな描像を得ることができに違いない.

2.2. 円盤構成物質の性質とその進化に関する研究

円盤を構成する物質そのものの性質と進化の解明も ALMA の重要なテーマであろう. ミリ波・サブミリ波帯にはさまざまな原子・分子・イオンの輝線が存在しており, これらをうまく組み合わせれば円盤を構成するガスそのものの性質についての情報を得ることが可能である. これまで観測例は少ないものの, いくつかの円盤について分子輝線サーベイが行われ, 円盤中

での分子相対存在度がある程度体系的に求められている[9]. この結果を化学反応モデルや彗星の観測結果などと比較することで, 円盤内での物質進化を理解しようとする試みもなされ始めている[10]. また, ミリ波・サブミリ波で光学的に薄くなるダスト熱放射強度を複数周波数で測定することにより, ダスト粒子が集団としても放射率の周波数依存性を調べることができる. この周波数依存性はダストのサイズ分布と関係している可能性があり(図3(a)), 惑星形成への第一ステップとも言えるダスト成長を探る手がかりになると考えられている[11]. 実際これまでの観測により, 多く

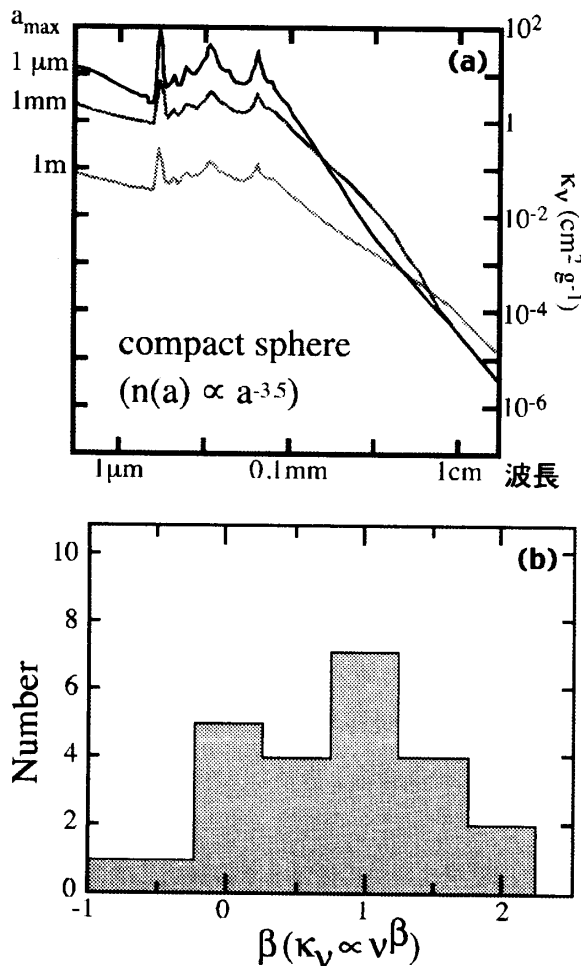


図3: (a) 文献[11]で得られたダストサイズ分布とその放射率との関係(図は文献[13]より改変). ダストの形状は球, 個数密度はダスト直径の-3.5乗に比例するとして, 最大サイズを変化させたときの放射率をプロットしたもの. ミリ波帯からサブミリ波帯での周波数依存性が最大サイズに依存して変化していることに注目. (b) ダスト連続波の多波長観測からモデルを介して得られた原始惑星系円盤中のダスト放射率の周波数依存性べき指数の分布. 文献[12]中の図を改変.

の原始惑星系円盤中のダスト粒子の放射率が周波数の(0.1)乗のべき依存性もつとして良く説明できることが明らかになっている(図3(b))が, これは一般星間空間中のダスト粒子が示すべき指数(2乗)とは明確に異なり, ダスト成長の間接的証拠と見なす研究者も多い[12].

このような円盤物質に対する観測の現状は, 比較的観測しやすい対象を選び, その円盤全体の平均的な性質が調べられている段階である. ALMAではそれをさらに進め, 円盤構成物質の性質を星からの距離や時間進化と関連させながらより精度良く議論できるようになると考えられる. 例えばALMAでは複数輝線の効率的観測が可能になるが, その特徴を生かして同一分子の異なる状態遷移に対する輝線を複数観測して相対的な強度比が求められると, そこからその分子のエネルギー状態分布が導かれる. この状態分布は主に水素分子との衝突により支配されていることから, 観測結果からガスの密度やその分子の存在量についての情報を得ることができる. いくつか鍵になりそうな分子を選び, それらについて複数輝線データに基づいた解析をマップベースで行えば, ガスの物理状態だけでなく化学組成の空間依存性も明らかにすることができよう. また, 連続波データからはダストの光学的性質の空間分布が導かれ, これをもとにダスト成長速度の場所ごとの違いなども議論できるようになると期待される.

ここで強調したいのは, 観測以外の手法との協力がより一層重要になるという点であろう. 原始惑星系円盤は天文学の対象としてはかなり特殊な環境である. そのため, そこで得られる観測データを正しく解釈していくためには, これまで天文学で通用していた「常識」だけでは不十分であり, 理論や実験から得られた情報とも積極的に比較検討していくことが必要になると考えられる. 例えばダスト放射率の周波数依存性については, サイズ分布だけでなく鉱物組成とも関係している可能性が指摘されており[13], 適切な解釈

のためには観測データと他手法の研究結果との注意深い比較が必要であろう。また天文観測では、円盤ガスの中で最も主要な成分である低温の水素分子を直接とらえることが困難である。木星型惑星の形成を考える上で重要なイベントである円盤からのガス散逸を扱うには、ダスト連続波やその他の分子に対する観測結果からだけでも説得力ある議論を可能にするような「知恵」が、観測以外の研究からも提案される必要があるだろう。

2.3. 円盤性質や進化に対し周辺環境が与える影響に関する研究

これまで説明してきたテーマは近傍に存在する個々の円盤の詳しい観測が必要なものだったが、一方でこれら円盤の性質やその進化が、周辺環境からどのような影響を受けるのかも興味深いテーマである。これまでの電波観測の多くは、感度や解像度の不足を少しでも緩和するため、最も近傍の星形成領域である牡牛座分子雲中の円盤を対象にしていた。牡牛座分子雲は太陽程度かそれ以下の質量をもつ星が穏やかに生まれている領域であるが、宇宙全体で見るとこのような場所から誕生する星は珍しい存在で、巨大分子雲中で大質量星とともに誕生する星のほうが圧倒的に多数派である。巨大分子雲では、大質量星起源の紫外線や星風、その死（超新星爆発）に伴う爆風などにより、星間ガスが圧縮されたり電離されたりしている。これらは星・惑星系形成過程にも大きな影響を与えられ、実際、ハッブル宇宙望遠鏡によるオリオン領域の観測では、円盤表面が紫外線により電離されている様子がとらえられている[14]。もし円盤性質やその進化が誕生する領域の環境にも大きく依存するのだとすれば、これまで主に牡牛座領域の観測から得られてきた原始惑星系円盤の描像は、あまり一般的なものではないということになるのかもしれない。

ALMAは、我々の銀河系に存在する標準的な質量をもつ原始惑星系円盤であれば、非常に短時間で検

出できる感度をもつ（例えば、銀河中心にある0.007太陽質量の円盤を1時間程度で検出できる）。もちろん実スケールでの解像度は距離に比例して悪くなるので、遠方に存在する円盤の内部構造を探ることはそれに応じて困難になるが、それでも円盤を空間的にそこそこ分解できる距離範囲には、様々な環境の星形成領域が多数含まれている。これら異なる領域の円盤に対して大局的物理量や内部物質の性質に関する統計的研究を行い、領域ごとの比較を行うことにより、周辺環境が円盤性質や進化に対しどのような影響を与えるのか、具体的な理解が得られるものと期待される。

3. おわりに

これまで惑星科学と天文学の接点は必ずしも大きいとはいえなかった。もちろん、研究手法や発展の歴史的経緯が違ふという点もその大きな要因ではあったが、それ以外に、学問を動機づける発想にも大きな違いがあったと個人的には感じる。つまり、惑星科学が「我々自身の生活の場」である地球や太陽系を理解したいという発想が強いのに対し、天文学は我々自身の存在というよりむしろ、文字通り「この宇宙がどうなっているのか」という純粹かつ単純な発想が主な原動力になっているように思う。

原始惑星系円盤の観測的研究に興味を惹きつけられる要因としては、単に大きな科学的成果が期待できるテーマの一つだからというだけでなく、他の天文学上のテーマに比べ、我々自身の「存在意味」についてより深く考えさせられる可能性があるという点もあげられるだろう。科学研究が人間の営みである以上、あるテーマについて理解を深めていくには、動機づけや発想が豊かであるほど良いだろう。このような観点からも、惑星科学と天文学との共同作業が今後有意義なものになると確信している。

参考文献

- [1] 特集「比較惑星系形成論」1999: 遊・星・人 8, 163
- [2] <http://www.nro.nao.ac.jp/~lmsa/index-j.html>
- [3] 百瀬宗武, 1999: 遊・星・人 8, 174
- [4] Kitamura et al. 1996: *Astrophys. J.* 465, L137
- [5] Mezger et al. 1990: *Astron. & Astrophys.* 228, 95
- [6] Momose et al. in preparation
- [7] 渡邊誠一郎, 1999: 遊・星・人 8, 163
- [8] 井田茂, 1999: 遊・星・人 8, 199
- [9] Dutrey, A. 1997: *Astron. & Astrophys.* 317, L55
- [10] 相川祐理, 1999: 遊・星・人 9, 86
- [11] Miyake, K. and Nakagawa, Y. 1993: *Icarus* 106, 20
- [12] Beckwith, S.V.W. and Sargent, A.I. 1991: *Astrophys. J.* 381, 250
- [13] Beckwith et al. 2000: *Protostars & Planets IV*, 533
- [14] Johnstone, D. et al. 1998: *Astrophys. J.* 499, 758