ALMAで惑星科学: ミリ波・サブミリ波観測による惑星科学研究とその展望

関口朋彦¹, 長谷川哲夫¹, 香内晃², 徂徠和夫³, 阪本成一¹

1. アンデス山脈の砂漠から惑星科学

1. 1 PWマ!?

ALMA (アルマ, Atacama Large Millimeter/submillimeter Array [1]) はアンデス山脈が連なる南米チリ共 和国の北部, アタカマ砂漠の標高 5000m の高地[2]に 日本、北アメリカ、ヨーロッパの諸国が協力して建設す る巨大電波望遠鏡(ミリ波サブミリ波干渉計)のプロ ジェクトである(図1).80台の高精度パラボラアンテ ナ(望遠鏡)で構成される大型干渉計 ALMA によって、 HST(ハッブル宇宙望遠鏡)をも凌駕する0.01 秒角の 空間分解能がミリ波・サブミリ波帯で実現される.こ れは太陽系近傍星周りのダスト円盤, 例えば「ベガ型 星」と呼ばれるダスト円盤を伴った主系列星のひとつ エリダヌス座イプシロン星(ε Eri)ならば0.03AUの空 間解像力で撮像できることになる. また, 大集光力を 活かした高時間分解能観測によって彗星の分子組成 やジェット構造の時間変化, 惑星・衛星の大気大循環 ダイナミクスを描き出すことができよう. ALMA によっ て惑星科学研究には大きな進展が期待される. ALMAによって何がなされるか、何を明らかにできる か,いま何が必要か.惑星科学の研究者と天文学者 が冬の札幌に集い、熱い議論を繰り広げた.



図1: ALMA(アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計)の完成 予想図(合成写真、国立天文台提供)

- 1. 国立天文台
- 2. 北海道大学 低温科学研究所
- 3. 北海道大学 理学研究科物理学専攻

1.2 研究会「ALMAで惑星科学」

2003年1月24日から25日にかけて北海道大学低温 科学研究所講堂において開かれたNRO(国立天文 台野辺山宇宙電波観測所[3])ワークショップ「ALMA で惑星科学」は、惑星科学や天文学の分野から約50 名の参加があり、週末に掛かったにもかかわらず盛 会であった. 観測研究者のみならず, 理論や実験の 手法による研究者の参加も多かった. 研究会では ALMA計画やそれを用いたミリ波・サブミリ波観測 の特徴に関するイントロダクションのあと, 原始惑星系 円盤とベガ型星の星周円盤,太陽系の小天体,惑星 大気などの主要なテーマについての講演と意見交換 が行われた. 最後に行われたパネルディスカッション では, 既存のミリ波サブミリ波望遠鏡で可能な研究 を始めてみることの重要性が認識された. また観測 結果と理論を結びつけるための基礎的な研究(たと えば微惑星形成前のダストとデブリ円盤の識別法な ど)の重要性が指摘され、さらに惑星大気の観測など いくつかの具体的な観測計画が提案された. 惑星形 成に関しては観測・理論の両面で実績を持つ日本だ が, 惑星科学全体を見渡すと観測的研究を行う研究 者はまだ少ない. すばる望遠鏡に加えてALMAを用 いた観測が可能になる時代を控えて, 惑星および太 陽系天体の地上観測を主として行う研究グループを 立ち上げる必要性を強く感じた.

なお、ここで行われた惑星科学に関する議論は、 2003年5月26日—29日に幕張メッセ国際会議場で開かれる地球惑星科学関連学会2003年合同大会のセッション「アルマで惑星科学」にて発展的に継続さ ALMAで惑星科学:ミリ波・サブミリ波観測による惑星科学研究とその展望。関ロ・長谷川・香内・徂徠・阪本

97

れる.

以下に本ワークショップでの各講演についてその概要を紹介しよう。

表1:研究会のプログラム

- I. ALMAで惑星科学 イントロダクション
 - ALMAとは何か
 - ASTE望遠鏡の紹介
 - ミリ波/サブミリ波に見る惑星科学研究の展望
 - 北大の研究室紹介

長谷川哲夫: 国立天文台

阪本成一: 国立天文台

関口朋彦: 国立天文台

低温研: 荒川政彦, 地球惑星: 倉本圭,

物理:徂徠和夫

II. ALMAで探る惑星系形成と太陽系外惑星

- 星間塵表面反応に関する実験

- 惑星系形成理論の現状

- 惑星系円盤・星周円盤の観測

- 原始惑星系円盤の形成過程の観測的研究

- Vega 型星観測について

- 塵有機物から見る惑星系円盤初期と小惑星の起源

- 星間雲から原始惑星系円盤への同位体進化: 隕石と星間物質とのリンク 渡部直樹: 北大

田中秀和: 東工大

百瀬宗武: 茨城大

北村良実: 宇宙研

岡本美子: 北里大

香内晃: 北大

圦本尚義: 東工大

III. ALMAで探る太陽系惑星(及び衛星)大気

- 彗星 - ALMAで期待される新展開

- 彗星 - ALMAで期待される新展開(2)

- 名古屋大学におけるミリ波地球大気観測と ALMAでの惑星大気観測

- ALMAによる木星型惑星大気探査

- ALMA による地球型惑星の大気電波観測

- 金星

- 木星磁気圏のイメージング

- 比較惑星学の現状

渡部潤一: 国立天文台

河北秀世: ぐんま天文台

水野亮: 名大

長谷川均: アステック

中村良介: NASDA

はしもとじょーじ: 東大

渡部重十: 北大

倉本圭: 北大

IV. パネルディスカッション ALMA で何が見えるか?

V. まとめ

2. ALMA, ASTEと惑星科学

ワークショップの第一部ではALMA計画およびチリで稼動を始めたばかりの最新装置ASTEの紹介とこれらによる科学的展望の紹介が行われた。また会場となった北海道大学の惑星科学研究グループの紹介講演が行われた。これに関しては第5章に内容を記した。

2. 1 ALMA計画

まず長谷川哲夫がALMA計画の概要とその進展 状況を紹介した. 日本は、電波天文学の分野では、 1982年に開所した野辺山宇宙電波観測所の45m望 遠鏡やミリ波干渉計および名古屋大学や東京大学を はじめとする大学のグループが建設・運用する中小 の電波望遠鏡の活躍, そして宇宙科学研究所が打ち 上げた「はるか」衛星によるスペース VLBI 観測など によって、世界における研究の最先端を走ってきた. これらの研究を引き継ぎさらに大きく飛躍させるため に. 野辺山の次の計画としてミリ波・サブミリ波で観 測する大型の干渉計型望遠鏡が構想されたのは今 から20年近く前のことである。電波を集める精密ア ンテナ、低雑音受信機や、スーパーコンピュータをもし のぐ高速演算を行うデジタル相関器など, 野辺山を 中心に日本で培われた技術を結集して計画は立案さ れていった. 大気に吸収されやすいサブミリ波の観 測には、空気が薄く乾燥した高地、しかも大干渉計が 展開できる平坦な土地が必要だが、もはや国内には その要求を満たす場所はなかった. 野辺山の研究者 たちは大気の透明度を測定する自作の装置をピック アップトラックに積み、中国の奥地、ヒマラヤのふもと、 南米などを踏沓した、その結果、チリ北部のアンデス 山中に、5000mという標高にもかかわらず驚くほど平 坦な絶好の建設候補地を見つかった([4]). こうして まとめあげられた日本の計画が大型ミリ波サブミリ波 干渉計LMSA(ラムサ)計画である.

当時、このようなことを考えていたのは日本だけで

はなかった. アメリカでは広視野撮像能力を重視した ミリ波干渉計計画が、ヨーロッパではチリに建設しミ リ波で大集光力をもつ大型南天干渉計計画が検討さ れていた.日本を含む3つのグループはお互い情報 を交換しつつプロジェクトの準備を進めていたが、や がて協力の機運が高まり、三計画を合体して一つの 大きな計画 ALMA が誕生した([5]). 2001 年のことで ある(図2). 予算獲得のためのねばり強い努力が実 って、アメリカの建設予算が2001年に承認され、ヨー ロッパでも2002年に建設開始が承認された. しかし 日本だけは,構造改革と財政再建の波に飲まれ, 2002年度からの建設予算は見送られ、代わりに二年 間の研究開発予算が認められた.いま,建設予算を 得た北米(アメリカ合衆国およびカナダ)とヨーロッパ (ヨーロッパ南天天文台加盟の10か国とスペイン)は, 2012年の本格稼働開始をめざしてALMAの基本部 分の建設を開始しようとしている. 日本は二年遅れと なるものの、2004年度からの建設予算獲得を目指し て各方面と調整を進めているところである.

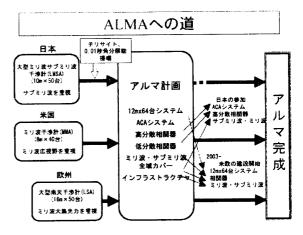
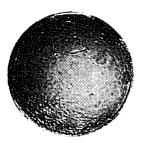


図2:ALMAへの道. 北米、ヨーロッパ、日本の参加により すばらしい性能を実現する.

冒頭にも述べたように、ALMA は波長 10mm から 0.35mm にいたるミリ波・サブミリ波で天体の観測を 行う電波望遠鏡である.この波長域では、温度数 K から数十 K ないしそれ以上の物質(星間ダストや固体惑星表面など)による熱放射(図3)のほか、多種多様な分子や原子によるスペクトル線(図4)やバンド構

造が観測される. そのため、星間雲中で星が誕生する現場、誕生した星の周りの原始惑星系円盤([6])、そして大小の太陽系天体などの観測に活躍が期待される. ALMAの優れた感度によって、高い空間分解能と時間分解能を同時に実現することができ、ヘテロダイン分光により最高数 m/s の速度分解能でガスの運動を調べることができる. さらに、惑星系形成領域の物質(主にガス)のスペクトルによる分析は、天文学、惑星科学のみならず、生命科学ともつながる新しい研究分野の誕生を予感させる[7].



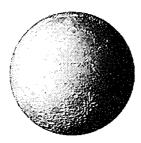


図3:ハワイのJCMT望遠鏡のボロメータアレイ(SCUBA)で 撮像されたサブミリ波(0.85mm)でみた月のイメージ. 我々の目(可視光)で見る月は太陽光の反射成分であるが、一方サブミリ波長では低温天体自身が放つ熱放射を観測する. 右と左では月齢にして6日の位相差がある.

画像提供:JCMT(ジェームズ・クラーク・マクスウェル望 遠鏡) [8]

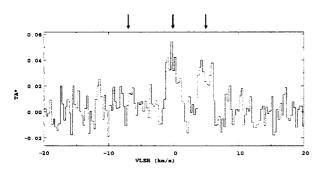


図4:2002年3月31日、4月1日に野辺山45m鏡を用いて観測された153P/lkeya-Zhang彗星コマのシアン化水素(HCN)輝線、縦軸はアンテナ温度、横軸は視線速度、波長3.4mmのミリ波で周波数88.63GHzの回転遷移輝線(J=1-0)を捉えている、矢印は左からそれぞれF=1-0、2-1、1-1の超微細構造線が現れる位置を表す[9]。

2. 2 動き出した ASTE 望遠鏡

続いて阪本成一によるASTE 望遠鏡とその進捗状況の紹介があった(図5). ASTE (Atacama Submil-

limeter Telescope Experiment)とは、国立天文台がチ リのALMA建設予定地付近(標高4840m)に設置し た南半球初の大口径サブミリ波望遠鏡であり, 国内 の大学および国立天文台の研究者がチリの天文学者 の協力を得て運用するものである. 電波と遠赤外線 の中間的な性質を持つサブミリ波では, 惑星・衛星 や星間物質などの低温の天体でもレイリー・ジーンズ 領域の放射として観測されるため, ガスやダスト成分 の定量が可能なほか, 光学観測と比べることでアル ベドの測定などを行うことができる. さらに、 $\lambda/\Delta\lambda$ で10の7乗にも達する高い分光性能はガス圧による 線幅の拡がりの効果(pressure broadening)の少ない 小天体においてガスの運動のよい指標となる.また, 地上観測装置であることや日中でも観測が可能であ ることは、太陽系内天体のモニタ観測にも威力を発 揮するだろう. もちろん惑星系形成領域の観測でも大 きな成果が期待される.8年後の本格稼働を目指して いるALMAを活かして惑星科学を大きく発展させる ためにも、すでに稼動を開始したこの望遠鏡で惑星 科学の観測的研究を進めておくことが重要であろう.

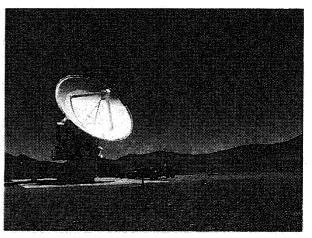


図5:チリ、アタカマ砂漠に設置されたASTE望遠鏡、口径10m、サイトの標高は4840m、南半球最初の本格的サブミリ波望遠鏡である。画像提供:国立天文台

2.3 惑星科学の展望

関口朋彦が本研究会の主旨と概略を踏まえた惑星 科学におけるALMAによる今後の展望を講演した. 現 在の惑星系太陽系形成理論の概略を紹介し. 最近見 つかってきた太陽系外惑星における「熱い木星(Hot Jupiter)」問題を矛盾点の例として取り上げた. このよう な問題へのアプローチの一つとして, ベガ型星として知 られる主系列星の周りの塵円盤の観測と、カイパーベ ルト天体の観測の研究可能性を示した. 太陽系外縁 部のカイパーベルト天体は太陽系形成論における氷微 惑星集合体であることが考えられる。また、ベガ型星の 塵はこの微惑星同士の衝突破壊現象によって生成し た二次的ダスト(原始惑星系円盤ではないという考え 方)である可能性が高い(図6、[10]). 太陽あるいは太 陽に似た主系列星でも中心星から数10-数100AU 領域にある天体では、その熱放射のピークが 100 µm (0.1mm)台に来る. このため地上から天体からの放射 を観測するにはサブミリ波長帯での観測がもっとも有 効である. 微惑星のサイズ分布や, そこから生成した 塵の空間分布を導出する研究は、外惑星の成長速度、 ガスとダストの散逸時期,惑星移動(migration)といっ た問題に直結した研究になるだろう

以上,国立天文台ALMA計画準備室メンバーによるALMA/ASTEとそれによる惑星科学研究の紹介で

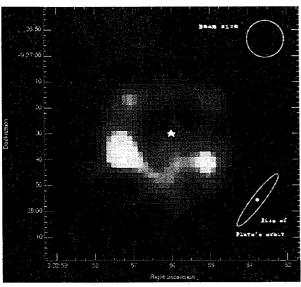


図6:我々の太陽系に近傍で太陽に類似した主系列星(K型)であるエリダヌス座イプシロン星のサブミリ波撮像.地球からはちょうど円盤を極方向から見える位置関係にあり、その低温ダストの分布を示している.真ん中の星印は中心星の位置.右上の丸は電波観測の分解能を表すビームサイズ.右下の楕円は我々の太陽系における冥王星軌道の大きさを表している. Greaves ら 1999 [10].

あった.以降は実際に惑星科学研究の最前線におられる方々の講演が続く.

3. ALMA で探る惑星系形成と 太陽系外惑星

続いてのセッションでは惑星系/太陽系形成に関する講演が行われ、ALMAによる観測の可能性が議論された.

3.1 星間塵表面反応に関する実験

渡部直樹氏から極低温 H₂O-CO アモルファス氷に 水素原子線を照射する実験の講演があった. 北大低 温研における惑星科学部門の実験装置による研究であり,装置はワークショップの最後にラボツアーとして 紹介された. 本実験では, CO 分子は氷上で H原子 逐次付加反応により CO => HCO => CH₂O => CH₂O => CH₂O + へと効率よく化学進化を遂げることがわかった. さらに進んで [H₂CO, CH₂OHの生成効率における温度依存性]を調べたところ, 10K — 20Kというわずかな温度範囲にもかかわらず大きく異なることがわかった. これらのことから,「氷星間塵上で CO 分子は H原子付加反応により H₂CO, CH₃OHへと進化し,その速度は原子線量のみならず,表面温度に大きく依存する」ということが示唆される.

観測家にとっても非常に興味深い講演であった. 渡部氏の実験結果を彗星や,分子雲,星間分子を観測することによって実際の宇宙空間においても反映されていることを確かめることはできないものだろうか. 実験屋と観測屋に惑星科学研究の共演が奏でられたら最高である.

3. 2 惑星系形成理論の現状

田中秀和氏による惑星形成論の現状に関するレビューが行われた. 我々の驚きとしては,惑星形成論の 長年の問題とされてきた惑星(特に外側の惑星)の形成時間の問題や,またこのところ観測天文学と惑星 ALMAで惑星科学:ミリ波・サブミリ波観測による惑星科学研究とその展望。関口・長谷川・香内・徂徠・阪本

科学との狭間で話題となっている「熱い木星」問題も解決できそうであるとの報告であった。木星型の大きなガス惑星はH₂Oの氷ができ、原始惑星の自己重力が及ぶ範囲が広い太陽系外側で作られる必要がある。この木星型の原始惑星は形成された後に内側へと移動してくるためにここのところ太陽系外惑星としてドップラー法によって発見されつつある中心星近傍の巨大惑星「熱い木星」も説明できる。今後の課題としては、惑星集積の初期条件を決め、惑星と原始惑星系円盤との相互作用による惑星移動(migration)を記述することが挙げられる。これに関わるダストの成長と沈殿に関する理論的な考察が示された。

3.3 惑星系円盤・星周円盤の観測

百瀬宗武氏が原始惑星系円盤の観測の最近の状況について講演を行った.野辺山ミリ波干渉計(NMA)を用いたおうし座領域の原始惑星系円盤の観測を紹介した.波長2mmの連続波観測によって塵の熱放射を撮像し,そのエネルギースペクトル(SED: Spectral Energy Distribution)を解析した.ここから円盤における中心星からの距離に従った塵の面密度分布および温度分布などの物理量を求め,Tタウリ型星の進化と多様性を追った.中心星から100AU付近の塵面密度分布は,京都モデルから予想される原始太陽系星雲のものとほぼ同程度であることが示された.また最近の研究である,原始惑星系円盤で観測される複雑な分子H。COの観測と化学進化モデルとの比較を行った研究や,すばる望遠鏡による撮像観測の紹介が最後に行われた.

3.4 原始惑星系円盤の形成過程の観測的研究

北村良実氏が、野辺山ミリ波干渉計(NMA)を用いた原始星やそれに伴うエンベロープ、双極分子流の運動に関する研究を報告した。おうし座分子雲 L1551 領域の原始星 IRS 5 の CO(J=1-0) 輝線を観測し、エンベロープの回転と落下運動を明らかにした。また CO(J=2-1) 輝線の観測によってその内側の円

盤の存在を示した. 分子輝線の視線方向に対する相対移動を赤色と青色で描き, 分子のドップラー偏移を表現した. 一方, 連星系を作らない星の周りでの円盤形成の例としておうし座 HL星の ¹³CO (J=2-1) 輝線の観測結果の報告や, 来るALMA計画の準備段階として野辺山ミリ波干渉計の観測周波数をサブミリ波長 345 GHz (0.86mm) の高周波数域まで高め国内でサブミリ観測を始める計画の着手(北村氏と著者の関口は 2002 年から 2003 年の年末年始をこの計画のために野辺山で過ごした) や, サブミリ波観測の相補的な研究をもたらすことが期待される赤外線衛星ASTRO-F計画の紹介もあった.

3.5 ベガ型星の円盤

岡本美子氏は、すばるの中間赤外線観測装置 COMICS による N バンド(10 μ m帯) および Q バンド (20 μ m帯)における星周塵円盤からのシリケイトフィ ーチャーの観測をレビューした. 赤外線衛星 IRAS や ISOなどによって主系列星周りの物質の存在が確認 されている. それは赤外フラックスの波長依存性 (SED)を調べた結果,赤外線領域で主星からの放射 成分以外の低温物質による熱放射成分(一般に赤外 超過と呼ばれる)が見つかったことによる. 今後原始 惑星系円盤の残存ダストの有無, その消失のタイムス ケールを求めるような観測が行われていくことだろう. 若い星の周りの塵円盤や星間物質、彗星などのスペ クトルの比較が特に興味深い. がか座 β 星周りの塵 と彗星塵では、ともにアモルファスシリケイトと結晶化 シリケイトに特徴的なフィーチャーが見られ、非常に 似通ったスペクトルを示すことが紹介された. これら の天体における塵の起源と熱的変遷を示唆している ものと思われる. ALMAでは、ガス輝線をプローブに してこれらの円盤の構造を明らかにしたい.

3.6 星間起源有機物から見る惑星系円盤初期と 小惑星の起源

香内晃が星間起源有機物の加熱蒸発・衝突実験 を紹介した. 実験の結果, 星間起源有機物は小惑星 帯領域での温度条件下では蒸発せず, またそのよう な条件下では有機物をまとったmmサイズの塵粒子 は5m/sの衝突速度でも付着合体することが明らかに なった、これらのことから、太陽から2.5-3.5 AUの 領域では, 星雲が乱流状態になっている降着円盤段 階後期においても星間塵の集合体の成長が急速に 進んだであろうと結論される. 塵の集合体が1m程度 になると, ガス抵抗を強く受け, 大部分の物質は内側 へ落下してしまう. なお,この時期は星雲が比較的高 温であるので、6AU以内には氷は存在していない. 一方, 塵表面に氷が存在した木星領域や有機物が蒸 発してしまった地球領域では,付着・凝集成長は起こ りにくい、星雲への物質の降着が終了し、星雲の温 度が下がると、3AU以遠では氷が再凝縮する.この 時には, 2.5-3.5 AUの領域には固体物質はほとん どなくなっていたと予想され、降着円盤の後期には小 惑星領域に固体物質の存在しない幅1-2AUのギャッ プが形成されることが予想される. ALMA によりこの ギャップが観測できれば,原始太陽系星雲の初期進 化の理解が進むであろう.

3.7 星間雲から原始惑星系円盤への同位体進化

以本尚義氏に「星間雲から原始惑星系円盤への酸素同位体進化:隕石と星間物質とのリンク」という題で講演を頂いた.分子輝線を電波観測では分子を構成する原子の同位体存在比が求まる.ここでは酸素同位体について議論を行った.酸素は太陽系の中で3番目に多い元素である.隕石に含まれる。○に富んだ鉱物にはもちろん酸素以外の元素も含まれているが,不思議なことにそれらには大きな同位体異常が見られない.。○に富むプレソーラー粒子はごくまれにしか発見されていない.以本氏は分子雲コアにおけるCOの紫外光による解離反応が隕石にみられ

る酸素の同位体異常の原因となっている可能性について議論した。自己遮蔽効果のため分子雲では「Oおよび」®Oを含んだCO分子が選択的に分解され、生成されたOは主にH₂Oに取り込まれると考えられる。原始太陽系星雲においては塵とガスの混合比は時間的空間的に変化する。H₂Oが濃集した領域では酸素同位体比は相対的に「Oに乏しく、逆に濃集のおきていない領域では「Oに富むようになるであろう。隕石はそれぞれの領域で固有の酸素同位体比を獲得した鉱物粒子の集合体として理解することができる。原始惑星系円盤の中心部と外縁部においてガス分子に酸素同位体比に違いが見られるかが鍵となりうる。このような観測は隕石の起源を理解するためにも極めて重要である。

3.8 巨大ガス惑星形成時のガス降着による原始 惑星の明るさの検討

なお,谷川亨行氏にはポスターにて原始惑星系円盤内での巨大ガス惑星形成時のガス降着の振る舞いの研究を紹介頂いた.ガス惑星が形成される際に降着過程によって生じる熱放射の見積もりが提示された.その結果は最大で一年当たり100倍の太陽輝度である.どの波長域で見るかによるであろうが,近い惑星系であれば,ALMAの高感度かつ高空間分解能撮像によって,この現場をとらえられる可能性が多いにある.

4. ALMAで探る太陽系

太陽系天体の観測においても、彗星やEKBOs、小惑星といった太陽系小天体の観測から、ガス惑星や地球型惑星およびその衛星の観測にいたるまで、ALMAによってなされる観測研究には多様な可能性がある。その展望がなされた。

4.1 彗星:ALMAで期待される新展開

渡部潤一氏は太陽系天体観測とくに彗星観測によ

る成果を報告した. 太陽系内の小天体は太陽系誕生 時の化石であると言われてきた. このうち, 小惑星は 比較的高温領域の情報を、彗星は低温領域での情報 を保持しているであろう. したがって彗星を観測する ことによって太陽系のより過去に関する研究を行うこ とができる.これまでの彗星の形成温度の推定は: 構成物質の昇華温度以下で形成されたという論理か らその上限値を求める研究手法が主に用いられてき た. これに対して分子のオルソパラ比を求めることに よりスピン温度を見積もって彗星物質が形成された 温度条件を知る観測を提案した. アンモニアなどの 観測から得られるスピン温度は原始太陽系円盤にお ける彗星の形成温度あるいは,太陽系の元になった 分子雲の温度を示しているのかもしれないが、これ までは観測例がまだ少ない、ALMAでは、H-COのよ うな分子を観測することによってこの手法を確立でき る可能性がある. また, ALMA であれば大彗星でな くとも毎年いくつかは回帰する周期彗星のような平凡 な彗星でも十分観測対象となるであろう.

4. 2 彗星: ALMAで期待される新展開(2)

続いて河北秀世氏が彗星の水素・重水素比(D/H比)を求める観測提案を行った。サブミリ波望遠鏡による彗星のHDO(水の重水素同位体)観測結果によれば、その(D/H比)は木星や土星といった巨大ガス惑星の値と大きく異なり、地球の海洋水の(D/H比)の値に近い。ここから、地球の海洋の起源を彗星に求めた研究結果が報告されているが、まだサンプル数に乏しく結論付けるのは早計だろう。彗星の(D/H比)導出の観測として、CH,Dなどの他の分子種での観測可能性を議論した。残念ながらCH,Dは回転遷移輝線としては弱いと予想されるが、一方ALMAではこれまで観測されていない分子種が観測可能ではないだろうか。NH,:NH,D:NHD;:ND,比、あるいは、H,CO:HDCO:D,CO比、CH,OH:CH,OD:CH,DOH比、H,O:HD:D,O比を求める研究ができるかもしれない。

4.3 名古屋大学におけるミリ波地球大気観測と ALMAでの惑星大気観測

名古屋大太陽地球環境科学研究所において地球 大気をミリ波サブミリ波観測するグループを立ち上げ つつある水野亮氏が講演された. 成層圏・中間圏オ ゾンとその破壊物質であるCIOの観測が、ALMAサ イトから数100km南にくだった場所に位置する南米 チリのラス カンパナス観測所にて開始されている. ミ リ波の分子スペクトル線を観測するが、これは紫外分 光,赤外分光,ライダーなどの手法に比べ24時間観測 可能であるというメリットがある. 高度40km付近の塩 素触媒反応サイクルと高度20kmでの反応によるオゾ ンホールの研究ができる. これを踏まえて ALMA で は惑星とりわけ火星, 金星の大気観測が考えられる. これによって大気の3次元分布の時間変動を高角度 分解能で捉えることができるだろう. 惑星の大気の 鉛直構造は自転周期の極めて遅い金星では昼と夜の 差,砂嵐のある火星では塵の振る舞いがポイントで あろう. ALMAを前にASTEで試験的な観測を行っ てみるのは有益であろう.

4.4 ALMAによる木星型惑星大気探査

長谷川均氏は自身の観測結果を踏まえ、今後のALMAによる観測計画を提案した. 地球では大気圏の外から、気象観測衛星ひまわりによって可視光と赤外線(水蒸気バンド)の観測によって大気と水蒸気の運動を明らかにし気象予報が行われている. 木星型惑星もこれと同じようにALMAによって地球から観測することによって雲の分布と運動を捉えることができないだろうか. 電波による惑星観測のメリットは惑星大気の雲粒子による散乱、吸収が少ないことが挙げられる. これにより、可視光では遮られて見えない雲の下の大気の運動がわかるはずである. 長谷川氏は野辺山ミリ波干渉計(NMA)による木星の観測(2000年12月—2001年3月)を例に議論を行った. アンモニアの量を変えて計算したモデル計算との比較により、ベルト領域ではアンモニアが少ないことがわかっ

た. NMAでは中空間分解能,中周波数分解能,低時間分解能であるが,ALMAでは空間分解能,周波数分解能,時間分解能ともに飛躍的に向上するであるう.

4.5 ALMA による地球型惑星の大気電波観測

中村良介氏の講演は、流星の観測から金星・火星、小惑星と多岐に渡った。33年ぶりに回帰したテンペル・タットル彗星に伴う2001年のしし座流星群の極大時(11月18日)、に東京大学の富士山望遠鏡を用いて491GHz帯での観測を行った。流星物質からのガス輝線を検出する目的であったが、このときの観測では輝線を検出することはできなかった。また一方、火星表面の水の散逸の問題と金星の温室効果の問題が提起された。水素(H)の主たる蓄え源(リザーバー)が水(H₂O)であることから、地球型惑星大気のD/H比を求める観測が提案された。サブミリ波で観測されるHDO(水の重水素同位体)を観測しマッピングすることにより気象変動を考慮した水の長期的変遷を追うことができるかもしれない。

4.6 ALMA で金星観測

はしもとじょーじ氏は金星大気についてのレビューを行った.最初に宇宙研などによって計画されている金星探査(Venus Climate Orbiter)の紹介があった.この計画では金星版の「気象衛星ひまわり」を作ることを目標に掲げられている.また,金星大気研究では大気循環における高度60kmまで角運動量を輸送する機構を解明することが必要である.これまでにもIRAM(Institut de RadioAstronomie Millimetrique)30m望遠鏡によるミリ波(115.2,230.53,220.39 GHz)観測があるが,ALMAでは以下に列挙するような,さらに進んだ研究ができそうである.

- 1. 高空間分解能,連続的な観測により上層大気 の風を直接に測ることが可能
- 2. 大気温度の3次元観測が可能(高度 > 40km)

- 3. 上層大気の化学組成観測により大気化学のモデルを検証
- 4. 硫酸蒸気量の高空間分解 2 次元マッピングを 作成

4.8 木星磁気圏のイメージング

渡部重十氏は惑星磁気圏観測のレビューを行っ た. 惑星磁気圏はこれまで、DE1、AKEBONO、 GEOTAIL, POLAR, FAST, CLUSTERといった人工衛 星、探査機、人工飛翔体などによって観測されてきた. 磁気圏は実はいろいろな惑星に存在し, 今後それぞ れの比較研究が必要である. 水星ではH+, 地球では O・や H・, 木星では O・や S, 土星では O・や H₂O や H である. 地上観測では, 電波天文学の歴史にも数多 く紹介されるデカメートル波観測や、大型干渉計では VLAによるセンチ波観測もある. ALMAでは木星シ ンクロトロン放射に関しては観測波長域の点で受け るのは難しいようだ. しかしながら, ALMA の高空間 分解能撮像, 分子輝線電波観測の高い速度分解能と いう特色を活かし、衛星イオの火山ガスの噴火の現 場をリアルタイムで捉え,それが木星のオーロラ現象 とカップリングする現象を瞬時に追跡できれば非常 に有益な観測になるであろう.

4.9 比較惑星学の現状

倉本圭氏により比較惑星学のレビューがなされた.また,講演の後半では同研究科の小高正嗣氏によって火星の気象学に関するレビューも行われた. 倉本氏の講演では最近行われたものと,近い将来の惑星探査ミッションが紹介され,それらの研究課題が挙げられた. とりわけここではアストロバイロジー的にも興味深い火星およびエウロパの地下水さらにタイタンの光化学スモッグで覆われた窒素大気の研究の紹介があった. 小高氏の発表ではマースグローバルサーベイヤー以前と以後の火星表層の科学の質的な違いが紹介され,高解像度の大気大循環モデルに基づいた火星気象学の現状と今後が展望された.

5. 惑星科学研究を牽引する北大の研究グループ

研究会の途中と最後には、ホストとなっていただいた北大の惑星科学・天体物理学研究グループの紹介とラボツアーが企画された。中でも研究グループ紹介は割愛するにはあまりにも惜しいものがあり、ここに一部を紹介したい。

5.1 北大低温科学研究所

荒川正彦氏より低温科学研究所の研究室紹介が行われた。本研究所は北海道という風土に根ざしその特徴を生かした研究室が多い。惑星科学研究部門でも以前より低温下での氷(H₂O)高速衝突実験,H₂Oアモルファス氷の物性測定などが行われ,世界的にもとても特色を持った研究がなされている。最近行われた真空磁場中でサブミクロンの個々のダスト粒子が結合し塊へと成長する実験のムービーが紹介され,会場から驚嘆とも歓声とも言える声が上がった。惑星形成論における難問の一つ「ダストから微惑星成長する短期間のプロセス」の手がかりになると期待が持たれる。

5. 2 北大 地球惑星科学真攻

倉本圭氏は地球惑星科学専攻における惑星科学研究を紹介した。まず北大においての惑星・宇宙科学全体の紹介があった。上に紹介のあった低温研では雪氷物性・惑星科学の部門がある。一方地球環境科学研究科の大気海洋圏科学専攻のグループは惑星大気も研究対象としている。また工学部量子物理工学専攻フォトニクス分野は北海道大学宇宙理工学教育研究グループの推進グループの一員である。

大学院重点化以前の学科構成に由来して北大の理学研究科地球惑星科学専攻には地球惑星物質科学分野と地球物理学分野の2分野がある. 惑星科学の研究室はその両方に渡って存在し太陽系物理学, 惑星物理学, 地球流体力学の研究室が挙げられる. 星

間惑星物質の起源を研究する太陽系物理学研究室は理論・実験・分析の研究手法をとっている. 惑星物理研究室では衛星探査と理論の両面から惑星大気および宇宙空間の構造と現象, ならびに地球および惑星の起源と進化について研究が行われている. 地球流体力学研究室ではIT技術を中核に数値シミュレーションによる惑星流体の研究が行われている. 倉本氏によると, これらの研究室スタッフは「仕事人」,「遊び人」,「必殺仕事人」と性格付けられるという.

5. 3 北大 物理学科

徂徠和夫により理学研究科物理学専攻宇宙物理学 研究室の紹介があった.この研究室はもともと銀河・ 銀河団の運動・進化等に関するシミュレーションや恒 星進化の計算など天体物理学の理論的研究を中心 に行っていたが、2000年より国立天文台と共同で電 波望遠鏡を北海道に移設し, それを用いた観測的研 究を行うグループが発足した. 口径11mの電波望遠 鏡は北海道大学の苫小牧研究林内に設置されてい る. 移設作業は2002年3月に完了し, 既存の装備の SバンドとXバンド(周波数が2GHz帯と8 GHz帯)に よる測地 VLBI (超長基線干渉計) 観測を定期的に行 う一方, 現在新たに23GHz 受信機を整備して星間ア ンモニア分子から放射されるスペクトル線を観測し. 銀河系スケールでの星形成に必要な分子ガスの物理 的条件を明らかにすることを目指している. 分子ガス と星形成という観点から, 惑星系形成にも接点を 持つ.

6. フリーディスカッションから

研究会の最後にはフリーディスカッションの形式で 今後の惑星科学研究の展望が議論された.

惑星形成の問題

田中氏からまずは円盤におけるギャップを見ること が重要で、惑星の有無や、 微惑星がほんとうにできる のかというような根源的な疑問に答えを出してくれるかもしれない。また、ソーラーアバンダンスからはなかなか現在の太陽系を作りづらいことが紹介され、ガスダスト比の測定の重要性が指摘された。微惑星ができる前のダストと、微惑星が壊れてできたダストとを見分けるような観測ができないかという問題提起がなされた。ALMAで空間分解するなら、主星から遠いところの氷ダストを見たいものである。

以本氏は隕石からの情報についてコメントした.これまでは星間空間にあるようなものを隕石から見いだそうとしていたが、実際には隕石は変成している可能性があり、どこまで星間雲の情報と対比できるのかはわからない.変成によっても変化しない同位体比をトレーサーにして、星間、彗星、隕石を見ていくような研究が行えるのではないかという観点が出された.また別の観点では有機物が重要である.

長谷川氏は、分子雲コア中で星の形成に直接関係 するスケールは ().()3pc=60()()AU であるとしたうえで、 これまではこのスケールでアバンダンスが変わりうる ことをあまり考えていなかったと述べた.

百瀬氏は、天文で観測する同位体比は平均化して みてしまっているため、隕石の同位体比とは直接比較 しづらい。個々を見るなら隕石分析の研究手法がや はり重要だろうという意見を出された。

中村氏は、ダストの研究をしていくのに見るものは 隕石だけでいいのか、彗星のようなより始原的な天体 を見るべきではないだろうかという問題を提起した.

観測天文学と惑星科学研究

続いて、惑星科学の観測的研究に向けた議論へと 進んだ.

関口が、日本の惑星科学は地上からの観測分野が、他の研究手段に比べて弱い。移動天体を観測する上での困難も多いが、ALMA、すばるはもちろん。国内の既存の望遠鏡を使ってはじめられることがあるのではないかと述べた。

阪本は、電波天文学について言えば、やはり干渉

計技術はハードルが高いこともあり、まずは今でも世界のトップレベルの性能を誇る単一鏡の野辺山45m 望遠鏡で経験を積むことが大事であろうとコメントした、関連して長谷川哲夫から45m望遠鏡にはショートプロポーザル制度があり、いわゆるコアな電波天文学者以外の方々への入り口となっていることを紹介した。

中村氏は、海外とは経験の差があることを認めた上で、可視なら木曽観測所のシュミット望遠鏡は太陽系の天体観測に適した装置であろうと述べた.小さい望遠鏡でできるサイエンスもいくつもある.

野辺山ミリ波干渉計による惑星大気観測を,初めて行った長谷川均氏からは,やはり最初は干渉計プロパーとの協力が必要であったので,天文台スタッフなどとの研究協力を薦めるとのコメントがあった.

水野氏からは、ASTEによって惑星大気研究を始めてみてはどうだろうという提案が出された。ASTEのチームにはまだ、惑星研究のグループはない。身近に使える装置かもしれない。

最後に、山本哲生氏から、この研究会(図7)が今後の惑星科学研究にとって重要なものであり、今後もこのような研究会を開いていくことが必要であるとの意見を頂いて会は終幕した。

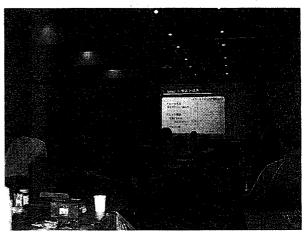


図7:2003年1月24日―25日に北海道大学低温科学研究所 において開催された

NRO ワークショップ「ALMA で惑星科学」の講演風景。 惑星科学の研究者を中心に約50名の参加者があった。

轺爈

ワークショップ会場の設営および当日の運営に大い に協力いただいた北大の倉本圭氏,同低温研の荒川 氏,渡部氏,また中野氏ら同大学院学生に感謝しま す.

参考文献

- [1] ALMA-jホームページ http://www.nro.nao.ac.jp/~lmsa/
- [2] 川辺良平, 近田義廣, 2001, 天文月報 94 巻, 573
- [3] 野辺山宇宙電波観測所ホームページ http://www.nro.nao.ac.jp/
- [4] 関口朋彦 2001, 日経サイエンス 31 巻, 6号, 1
- [5] 石黑正人, 2001, 天文月報 94巻, 567
- [6] 百瀬宗武, 2001, 遊星人 10巻, 4
- [7] 長谷川哲夫, 2001, 天文月報 94巻, 586
- [8] Jessop, J., Coulson, I., Greaves, J. et al., 2000, JCMT newsletter, 15 (http://www.jach.hawaii.edu/JACpublic/JCMT/ About_JCMT/Newsletter/n15/moon.html)
- [9] Sekiguchi, T, Hasegawa, H, Ukita, N. et al., 2002, Proc. of ACM 2002, ESA SP-500, 701
- [10] Greaves, J. S., Holland, W. S., Moriarty-Schieven, G. et al., 1998, Astrophys. J., 506, L133