# 化学の目で見た星形成:星形成領域の多様性

## 坂井南美1

2011年1月11日受領, 2011年2月4日受理.

(要旨)太陽のような恒星はいまも銀河系の中で活発に生まれている.星の形成は宇宙における最も基本的 な構造形成過程であるとともに,星間物質から惑星系物質への物質進化の場でもある.近年,電波観測の著 しい発展により,実際に誕生した原始星のまわりの化学組成が捉えられるようになってきた.我々は最近, 国内外の大型電波望遠鏡を駆使した観測により,これまで知られていた化学組成とは全く異なる化学組成を もつ太陽質量程度の原始星天体を発見した.この発見は,これまで一つと考えられてきた物質進化の道筋が, 実は多様性を持っていることを示しており,太陽系の物質的起源の理解にも関わる大きな問題を提起してい る.本稿では,星間分子雲から星・惑星系形成領域に至る物質進化を概観し,その中で上記の発見の意味と 今後の展望を議論する.

## 1.序章

私たちが住む地球.この豊かな惑星は46億年前に太 陽系の一員として太陽とともに生まれ,その後の悠久 たる時間の中で,多様な命を育むに至った.「太陽系 はどのような環境の下で生まれたのか?」「それは宇 宙の中でどれほどユニークであるのか?」これらの問 いは,宇宙における私たち自身の起源を辿り,存在意 義を問う上で極めて重要な問題であり,古くから人類 が思いを巡らせてきた謎でもある.もちろんこれは, 現代の惑星科学・天文学においても,主要テーマとし て活発に研究が展開されている.

上記の問いに答えるには、大きく分けて2つのアプ ローチがある.一つの方法は太陽系自体を調べること である.太陽系を構成する惑星や惑星間物質には、太 陽系が形成されたとき、あるいはそれ以前の痕跡が刻 まれているはずである.それらを丹念に調べ上げるこ とで、太陽系形成のシナリオを描き出すことができる. 宇宙から到来する隕石は、物質を直接手にとって調べ ることができる点で素晴らしいメリットがある.その 分析から、先太陽系起源と考えられる有機物や同位体 比が見つかっていることは大変興味深い. このような 手法は,惑星探査技術の進歩で新しい展開を見せよう としている.小惑星イトカワからサンプルを持ち帰っ た「はやぶさ」の成功はその先駆けと言える. その他 にも,彗星や惑星の観測探査,地球の地層に刻まれた 太陽系史の解読など,様々なアプローチがある. これ らの研究は,21世紀に大きく発展すると期待される.

もう一つの方法は、現在、太陽型の恒星が形成され ている現場を調べることである. 恒星は星間ガスが 100万年程度の時間をかけて重力収縮して形成される. 生まれたばかりの星(原始星)の周りには原始星円盤が 形成され動的降着源となる.原始星からT-Tauri型星 への進化とともに、その一部が原始惑星系円盤となり、 そこで惑星系が形成されると考えられている。従っ て、太陽系近傍にある多数の星・惑星系形成現場を調 べることで、かつての太陽系の形成を推し量ることが できる. 星形成の研究は、電波、赤外線観測技術の進 歩に伴い1980年代から大きく進展してきた。構造形 成過程の理解に止まらず、そこでの物質進化について も研究が急速に進みつつある。特に、星間雲から原始 星誕生に至る物質進化はかなり確立してきたと言って よい、その先は、2011年から動き出す巨大電波望遠 鏡 ALMA (Atacama Large Millmeter /submillimeter

<sup>1.</sup> 東京大学大学院理学系研究科ビッグバン宇宙国際研究センター nami@phys.s.u-tokyo.ac.jp

Array, [1])が大きな威力を発揮し、太陽系を調べる研 究とつながっていくであろう.

本稿では、後者のアプローチの例を取り上げる.初 めに星間化学の歴史を概観した後、太陽程度の質量を もつ原始星が生まれている領域の化学組成を調べる研 究を紹介する.そして最後に、星形成から惑星系形成 に至る化学進化を展望したい.なお、本稿に関連する 遊星人記事としては文献[2,3]があるので、参照され たい.

## 2. 星間空間における化学

#### 2.1 星間分子の発見と星間化学の始まり

星間空間で初めて分子が見つかったのは1940年頃 のことである.星の可視分光観測の際に、手前にある 希薄な星間雲に存在するCH、CH<sup>+</sup>, CNの吸収スペク トル(電子遷移)が検出された.実はこれは氷山の一角 だったのだが、当時はほとんど注目されなかった.極 低密度下にある星間空間で複雑な分子などできないと 考えられていたからである.電波領域の回転スペクト ル線で分子が見られるようになったのは、それから四 半世紀も後のことである.マイクロ波技術の進歩に伴 い、1963年にOHの吸収スペクトル線が、1960年代後 半からNH<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>CO,H<sub>2</sub>O,HCN,COなどの分子のス ペクトル輝線が相次いで発見され、1970年台前半の 星間分子の発見ラッシュにつながった[4].ここに及 んで、星間分子雲の存在が確立し、星間化学と星形成 の研究がスタートすることになった.

現在までに150種程度の星間分子が,主に電波望遠 鏡による観測で検出されている(最新の星間分子のリ ストは理科年表(丸善)に掲載されている). 星間分子 雲の主成分は水素分子だが,最大13原子までの多種 多様な分子が含まれる. なかでも有機分子は検出さ れた分子種の3/4を占める. これは,炭素原子の宇宙 存在度が高いこと(H, He, Oに次いで4番目)だけなく, 反応において "4本の手"を持つこと(結合の多様性) に由来する.

星間分子雲(図1)は温度が10 K, 密度が10<sup>4</sup>~10<sup>6</sup> cm<sup>-3</sup>と低温・低密度な環境にある. そのような極限 環境下における分子形成は化学反応動力学と密接に関 係しており, 化学の分野でも注目された. 星間分子雲



図1:南のかんむり座領域における光学写真. 白く抜けていると ころが星間分子雲で,その右上の部分で現在星が誕生して いる.

には光は入り込めないが,宇宙線は透過してくる.星間分子雲は宇宙線によって部分的にイオン化し,弱電 離プラズマ状態にある.Harvard大学のKlemperer は,そこに存在するイオンが中性分子と反応し(イオ ン・分子反応),様々な分子を作っていると提案した [5].たとえば,宇宙線イオン化によって生成したH<sub>2</sub><sup>+</sup> は周囲の水素分子と反応してH<sub>3</sub><sup>+</sup>を作る.

 $H_2^+ + H_2 \rightarrow H_3^+ + H$  $H_3^+ は別の分子Xと衝突して.$ 

 $H_3^+ + X \rightarrow XH^+ + H_2$ 

のようにプロトンを渡し、生成したXH<sup>+</sup>は別な分子 Yと反応して

 $XH^{+} + Y \rightarrow XY^{+} + H$ 

のように成長していくわけである. Herbstと Klemperer(1973)[6] は、多くの化学反応を考慮した ネットワークモデル(化学モデル)を作り、それらの反 応速度方程式の定常状態解を求めて、観測される様々 な分子が生成することを示した. これにより、星間化 学は理論的バックグラウンドを得ることになった.

#### 2.2 化学進化の概念の確立

1980年代初頭にかけて,星間分子雲で続々と新し い分子が発見されていく一方で,これらの分子がどの 分子雲でも同じように存在しているわけではないこと もわかってきた.当初,このような天体ごとに異なる 化学組成は,天体の物理状態,あるいは特殊性に起因 すると考えられた.しかし,様々な天体,とくに星形 成を起こしていない分子雲コア(星なしコア)の観測が 進んでくると,物理状態に差はなくても化学組成が大



図2:分子雲の化学進化の模式図. 3.2節でとりあげるWCCCは含まれていない.

きく異なることが示されるようになった.

前述のように、星間空間は地上に比べて非常に密度 が低いため、一つの分子は数日に一度しか他の分子と 衝突しない.従って、星間分子雲では化学組成が平 衡状態に達するのに10~100万年もの時間がかかる. 一方で、分子雲が重力収縮して星を誕生させるタイム スケールも同程度なので、分子雲の化学組成は時間の 関数として考えなければならない.このことに着目し て、Suzuki (1979) [7]は、化学モデルを用いて化学組 成の時間発展を計算した.その結果、有機分子、なか でも炭素鎖分子と呼ばれる、炭素が直線状に連なった 極端に不飽和な分子(CnHやHCnNなど)が、若い「年 齢」の段階で豊富になることを指摘した.このような 炭素鎖分子は、地上には存在しないが星間空間では非 常に豊富に存在するため、星間分子雲の化学組成を特 徴付ける分子でもある.

希薄な星間雲から分子雲を経て星形成に至る過程を 考えよう(図2).最初,炭素は主に炭素イオンまたは 炭素原子として存在する.希薄な星間雲では星間紫外 線が透過し,分子が壊されてしまうからである.密度 が上がって分子雲が形成されると,炭素原子は酸素 を含む分子と反応して安定な一酸化炭素(CO)分子へ 徐々に変換されていく.しかし,その初期の過程では, まだ炭素原子が多く残っている.このため,若いコア では炭素鎖分子が効率よく形成される.炭素鎖分子は 原料となる炭素原子がなくなると生成されないため, 分子雲の進化が進んで炭素原子がCOに固定されてし まう段階では当然少なくなってしまう.一方で,NH<sub>3</sub> やN<sub>2</sub>H<sup>+</sup>などの窒素を含む分子は,窒素原子の関与す る反応の反応速度が遅いことなどもあり,星なしコア 後期や,星形成の起こっているコアで豊富に存在する. このようなメカニズムで化学組成の系統的な違いが生 じる.

Suzuki et al. (1992) [8]は、50個の分子雲コアについ て炭素鎖分子CCSとNH<sub>3</sub>の観測を行い、実際にNH<sub>3</sub>/ CCS存在量比は星なしコアよりも星形成領域の方が 系統的に高くなっていることを示した.これにより、 化学組成が分子雲の物理進化に伴って系統的に進化し ていくという「化学進化」という概念が観測的にも確 立された.このことを利用すると、化学組成から分子 雲の老若がわかる.星なしコアでは、等温収縮を起こ しているために温度がほとんど変わらない.従って、 その進化段階のよい物理指標が存在しなかった.しか し、「化学進化」の概念の確立により、見ている星な しコアがどのような段階にあるかがわかるようになり、 星形成研究の進展に大きく貢献した.

一方, 星間分子雲には, ガスとともに星間塵も存在 している. そのため, 温度が低いまま密度が上がって くると, 分子の星間塵への吸着が起こる[9]. 水素分子, ヘリウム原子以外で最も存在量の多いCO分子も吸着 されるので, 分子雲の化学組成に大きな影響を及ぼす. 最も顕著な効果は, 分子への重水素濃縮の進行である.



図3:国立天文台野辺山45 m望遠鏡で観測した L1527のスペクトルの一例.様々な炭素鎖分子輝線が検出されている.

イオン分子反応による分子生成において重要な役割を 果たしているのが先に出てきたH<sub>3</sub><sup>+</sup>イオンである.低 温下では、

 $H_3^+ + HD \rightarrow H_2D^+ + H_2 + 230 K$ 

の反応が起こる.この逆反応は吸熱なので、低温の 分子雲では順反応のみが進行し、 $H_2D^+$ が濃縮される ことになる.その濃縮が他の分子に伝わり、様々な分 子の重水素濃縮度が高まるわけである.一方、 $H_3^+$ や  $H_2D^+$ の破壊は、主にCOへのプロトン移動反応なので、 COが星間塵に吸着されて減少すると、それらのイオ ンの寿命が延びる.この結果、重水素濃縮度が一層高 まる.実際、進化の進んだ星なしコアの中心部で重水 素濃縮度が非常に高いことが2003年にCaselliらによ って示されている[10].現在、重水素濃縮も星なしコ アの進化段階を示す化学指標として用いられている.

## 3. 原始星誕生後の化学進化を追う

#### 3.1 大型有機分子の発見

これまでの研究で, 星なしコアの化学組成の進化に ついては,おおよその統一的描像が得られたと言える. 一方で,原始星誕生以後の原始星近傍の化学進化につ いては,まだ端緒についたばかりと言ってよい.原始 星誕生に伴う温度上昇が鍵となるが,そのような領域 は,太陽質量程度の原始星の場合,一般に1000AU程 度と小さく,高感度・高空間分解能観測が要求される からである.

近年,太陽質量程度のClass 0<sup>(注)</sup>原始星において, HCOOCH<sub>3</sub>などの大型有機分子が高感度電波観測によ って検出され話題となった [11]. このような分子は星 間塵に吸着したCOなどを原料として固相反応で形成 され,星形成による温度上昇に伴って星間塵表面から 蒸発してきたものと見られる (Hot Corino chemistry). 大型有機分子が原始星近傍の数100 AUの領域に集中 して検出されたことは [12],それらがいずれは惑星系 にもたらされる可能性を意味しており,原始惑星系円 盤への物質進化の点で非常に重要である.

そこで, 我々は, 別の非常に若い低質量原始星 (NGC1333IRAS4B)でも観測を行ったところ, 大型有 機分子HCOOCH₃の検出に成功した[13]. この結果は, 大型有機分子がより"一般的"に低質量星形成領域に 存在することを示しただけでなく, 原始星進化のごく 初期段階ですでに生成されていることを明らかにした 点で大きな意義があった. 大質量星形成領域において も同様の傾向を見出し [14], 星なしコアから原始星円 盤が形成されるまでの過程の化学的な道筋が十分に把 握されたかに思われた.

#### 3.2 L1527の発見と炭素鎖分子の再生成

しかし、大型有機分子探査を他の様々な領域へ展開 する過程で、意外な発見があった。野辺山45m電波 望遠鏡を用いて、おうし座のClass 0原始星L1527の 高感度探査を行ったところ、HCOOCH<sub>3</sub>などの大型有

注)低質量原始星に関するClass 0. I. II. IIIの分類: 遠赤外線から 近赤外線に至る連続波スペクトルで低質量原始星を分類した もの.原始星の物理進化はこの順で進む. Class 0は形成した ばかりの原始星で,分子雲コアに深く埋もれているため近赤 外線でも見えないものが分類される. Class IIはそれよりも進 化が進んだ原始星で質量降着が激しく起こっている段階であ る. Class II, Class IIIはともにT-Tauri型星とよばれる前期主 系列星の段階にあたる. この段階では母体となった分子雲コ アはほぼ散逸している. Class IIIは古典的T-Tauri型星に対応 し,惑星系の母体となる原始惑星系円盤が形成されている. Class IIIはそれよりも進化が進んだ弱輝線T-Tauri型星に対応 し,原始惑星系円盤の内側がすでに散逸した段階とみてよい.



図4: L1527とTMC-1における炭素鎖分子の存在量比. L1527では 長い炭素鎖分子ほどTMC-1に比べて存在量が少ない傾向が みられる.

機分子のスペクトル線は全く検出されない一方で、炭 素鎖分子C4H2の高励起輝線が強く検出されたのであ る.上述したように、炭素鎖分子は星形成が始まる前 の若いコアで豊富に存在し、星形成領域では少なくな ると考えられている.事実、C4H2は他の星形成領域 で検出された例はなかった.直ちに国内外の大型電波 望遠鏡による追観測を行った結果、L1527では、C4H2 以外にも、C2H、C4H、C6H、HC5N、HC7N、HC6Nなどの 多種多様な炭素鎖分子が、原始星に落下しつつある高 密度で暖かいガスに豊富に存在していることが明らか になった(図3)[15].

星形成領域で一般に炭素鎖分子が少なくなる理由 は、星形成に至る時間スケール(10<sup>6</sup> yr程度)の間に化 学反応によって壊されたり星間塵に吸着されてしまう からである.これをもとに考えると、L1527で炭素鎖 分子が多いのは、重力収縮が自由落下に近く、他の原 始星の場合よりも速かったため、炭素鎖分子がある程 度生き延びているためと考えることができる.しかし、 L1527では、長い炭素鎖分子の存在量が著しく少なく、 星なしコアの代表であるTMC-1における炭素鎖分子 の存在量の特徴とは系統的に異なっている(図4).こ のことは、ただ単に生き延びているだけでは説明でき ず、原始星周辺で炭素鎖分子が再生成している可能性 を示唆する.

そこで、私達は次のようなメカニズムを提案した. 星間塵の氷層にはCH4が豊富に含まれている.CH4の 蒸発温度は25 Kなので低温の分子雲(10 K)では出て こないが、星形成周辺の暖かい領域で一挙に蒸発する.



図5: L1527におけるc-C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>の分布(上)と積分強度断面図(下). 25±2.5 Kになる大きさの領域でc-C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>の水素分子に対する 存在量比を一桁上げたモデルと観測された積分強度断面図 はよく一致している.下の2つのパネルはL1527における水 素分子の柱密度分布と温度分布のモデルをプロットしたも のである.密度分布と比較しても著しい存在量増加が見て とれる.

これにより一時的に気相に炭素が豊富な状態が作られ, 炭素鎖分子が爆発的に再生成されるというものである.



図6:WCCC天体,Hot Corino天体における炭素鎖分子C4H2とHCOOCH3のスペクトル線

これは、よく知られている冷たい星なしコアでの炭 素鎖分子生成メカニズム、(2.2で述べた化学進化初期 の炭素原子が豊富な段階での炭素鎖分子の生成)とは 異なり、温かい領域でCH4の蒸発をトリガーとして起 こる新しい炭素鎖分子の化学である、そこで、これを Warm Carbon-Chain Chemistry (WCCC)と名付けた. この提案を受け、WCCCは化学モデル計算でも確か められた.また、我々は最近Plateau de Bure ミリ波 干渉計を用いてL1527における炭素鎖分子の高分解能 観測を行った(図5).その結果、炭素鎖分子の水素分 子に対する存在量比は、原始星の半径1000 AU程度 の領域でその外側より1桁以上高くなっていることが わかった [16]. これは、ちょうどCH4が蒸発する温度 (25 K以上)の領域に対応しており、WCCCの考えを 強く支持する.

WCCCの発見は、新しい星間化学現象として大き く発展しつつある.L1527では、星形成領域で初めて 負イオン( $C_6H^-$ ,  $C_4H^-$ )が検出され[17, 18]、負イオン 化学の理解を大きく促進させた.また、気相中のCO<sub>2</sub> をトレースする $HCO_2^+$ も星形成領域として初めて検 出した[19].この発見は、解明が困難だった低質量星 形成領域における $CO_2$ の生成過程に重要な情報を与え た.

## 4. 化学的多様性

#### 4.1 同じ物理的進化段階で異なる化学組成

L1527の発見の最も重要な点は、大型飽和有機分子 が検出されているIRAS16293-2422などの「典型的」原 始星(以下Hot Corino天体と呼ぶ)と比べて化学組成 が明らかに異なっていたことにある.これまで、星形 成から惑星系形成に至る過程は統一的に理解され、そ の間の化学進化も天体による違いはないと信じられて きたが、その理解が覆ったことになる.したがって、 当然、「WCCCがL1527でのみ起こる特殊な現象では ないか?」という疑問が浮かび上がる.そこで、様々 な原始星天体に対して炭素鎖分子をサーベイ観測し、 第二のWCCC天体の探索を行った.

16天体を調べた結果,おおかみ座にL1527と酷似 した特徴を示す天体(IRAS15398-3359)を発見した [20]. この他にも,部分的にWCCCの兆候を示す天体 がいくつか見つかり,WCCCは程度の差はあれ星形 成領域での一般現象である可能性が出てきた.一方で, Hot Corino天体ではWCCC現象が弱い傾向が見られ た.



図7: 星形成領域における化学的多様性の起源.上がHot Corino 天体で,下がWCCC天体.星なしコア 時代の長短が星間塵マントルの組成の違いを生み,星形成後の気相の化学組成を大きく変える.

#### 4.2 化学的多様性の起源

星形成領域の化学組成を見た場合2つの極端なケー ス. WCCC 天体とHot Corino 天体があることがわか った.これは図6に示すスペクトルからも明らかであ る。その違いは、次に示すように、星形成に至る過程 における物理的違いを反映している可能性が高い(図 7).もし、分子雲が形成されてから原始星が誕生する までの時間が短ければ、原始星の周囲に炭素鎖分子が 多く取り残されるだけでなく、炭素が炭素原子のまま 星間塵に吸着され、順次水素化されてCH<sub>4</sub>となる。そ のため、原始星誕生直前の星間塵上でCH<sub>4</sub>が相対的に 豊富になると考えられる。 原始星が形成され周囲が温 められると、CH4が蒸発して炭素鎖分子が効率よく生 成される、一方、もし、星なしコア時代の時間が長 ければ、炭素は主に気相でCOに変化してから星間塵 に吸着され、水素化されてCH<sub>3</sub>OHや複雑な有機分子 となる. そうだとすると, WCCCとHot Corino化学 は相反していることになり、上記の観測事実とよく合 致する、星なしコア時代の長さの違いによって引き起 こされた星間塵表層の組成の違いが、その後の原始星 円盤の化学組成の違いを生んでいるというわけであ る. この場合, L1527やIRAS15398-3359では分子雲 コア形成から原始星の誕生が比較的速く進んだことを 意味し、Hot Corino 天体ではそれよりもゆっくりであ ったことを意味する、中間的天体の存在は、速度の違 いによって説明できる、事実、赤外線での星間塵表層

の氷の観測では,WCCC天体IRAS15398-3359におけ るCH4の吸収の大きさが他の天体よりも格段に大きい [21].

星なしコア時代の長さの違いによって原始星円盤 の化学組成が変わるという考え方は、L1527における 様々な分子の重水素濃縮度からも支持される。近年の 観測で、Hot Corino天体では分子における重水素濃 縮度が数10%と非常に高くなる現象が報告されてい る. 一方, L1527では、重水素濃縮度は数%に止まり、 Hot Corino 天体に比べて有意に低いことが明らかにな った [22]. 2.2で述べたように、分子における重水素 の濃縮は、星なしコア時代にCOが星間塵に吸着する ことで顕著に進む、星なしコア時代の長さが長いとこ の効果が効き、高い重水素濃縮度を示す、一方、重水 素濃縮はCやCOの吸着で加速されるので、星なしコ ア時代の長さが短ければ濃縮は起こりにくい. さらに、 重水素濃縮がH2D<sup>+</sup>から他の分子へ移動するのにも10<sup>5</sup> 年程度と比較的長い時間がかかり、この点でも星なし コア時代の長さが短いことは不利である。このような 理由から、星なしコア時代が短かった天体では重水素 濃縮度はあまり高くはならないと考えられ、L1527で の観測結果と一致する.

#### 4.3 現在から過去を探る

このような分子雲コア形成から星形成に至るまでの 時間の違いは、最近、星形成の研究においても星形成 率の領域ごとの違いという形で浮かび上がってきてい る、しかし、個々の天体の速い遅いを直接的にサポー トする「物理的」観測事実はこれまで報告されていない. これは、物理状態の観測が、"現在の"活動を調べる ことであって、"過去の"活動を知り得ないためとも 言える、これに対して、化学組成は過去の物理状態の 履歴を鋭敏に反映する、特に、複雑な分子であればあ るほどその効果は大きく、違いが明瞭に出る、このよ うに、化学の目が星形成現象の新しい側面を捉えてい るのである、複雑な分子を用いて星形成過程を探ると いう星間化学と星間物理学を繋ぐ研究手法は、物質進 化の理解とともに、従来の方法論とは異なる角度から 星形成の理解を促進すると期待される。なお、個々の 天体の収縮過程の違いは、分子雲コアの形成過程と密 接に関係しているはずである.従って、母体となる分 子雲コアの置かれている物理的環境を調べることによ り、化学組成との関連が見えてくるかもしれない、そ のような観測が現在進行中である.

## 5. 原始星円盤から原始惑星系円盤へ

Class 0天体における化学的多様性の起源は、その ものが星形成過程の多様性を意味しており、重要な研 究対象である.しかし、さらに興味が持たれるのはそ の後の進化である.Class 0天体で見られた多様性は、 原始星円盤の形成から原始惑星系円盤への進化におい て、どのように伝播していくのだろうか.WCCCと Hot Corino化学に起因する二極的な物質進化の分岐は、 それが惑星系まで保持されるとすれば、我々の住む太 陽系の環境がどちらの(あるいはどちらに近い)過程を 経て作られたのかという新しい問題を提起することに なる.

Hot Corino 天体では、大型有機分子は原始星近傍の 数100 AUの領域に局在して存在している [14]. 一方, WCCC 天体L1527でも、炭素鎖分子は原始星まわり の数1000 AU程度の範囲に広がって分布しているも のの、原始星近傍の数100 AU以内にも確実に存在し ていることが、最近の私たちの高分解能観測でわかっ ている. Class 0段階で、それぞれの化学的特徴を代 表する分子が、将来原始惑星系円盤へと進化すると考 えられる半径数100 AUの範囲に顕著に存在している ことが確認されたことで、化学的多様性の原始惑星系 への伝播はより現実味を帯びてきたと言える. しかしながら、この多様性がそのまま Class I/II天 体へ受け継がれるのか否か、形を変えるとしたらど のような多様性として受け継がれるのかについては、 WCCC天体と Hot Corino天体それぞれの進化形と考 えられる天体を Class I天体、そして Class II天体の中 に順に探し、その化学組成と分布をつぶさに調べ上げ ねばならない。

実は,現在までのところ,Class I天体に付随する ガスの化学組成を調べる観測はほとんど行われていな い.それは,円盤成分と周囲の広がった成分との切り 分けが観測的に難しいこと,さらには円盤成分が望遠 鏡の解像度に比べて小さく,大型有機分子輝線の強度 が著しく弱くなってしまうことなどが要因である.ミ リ波・サブミリ波の様々な遷移輝線を用い,現在稼働 中の望遠鏡による観測からヒントを得ることはできる. しかし,本格的に原始惑星系円盤への物質進化に切り 込もうとすると,やはりALMA が必要である.

ALMA[1]は、口径12mアンテナ54台と口径7mア ンテナ12台からなる電波干渉計である.ミリ波から サブミリ波に至る波長領域で、開口合成の手法により 高品質の電波画像を描く.空間分解能は0.01秒角でハ ッブル宇宙望遠鏡よりも1桁高い.感度も現存のミリ 波サブミリ波望遠鏡を1桁以上凌駕する.これは、観 測時間にして100倍以上の効果がある.北米、欧州、 東アジアの三極の共同で、チリのアタカマ砂漠の高地 (標高5000 m)のサイトで建設が進んでおり、2011年 には初期運用が、2013年には本格運用が開始される. この「究極の地上電波望遠鏡」による観測が、星間化 学と惑星科学の橋渡しをすることは間違いない.

太陽系はどのような環境で生まれたのか. その環境 はどれだけ普遍的, もしくは奇跡的なものであったの か. 現在も誕生し続ける第二・第三の"太陽系"を調 べることで明らかになるであろう.

なお,本稿執筆にあたって多大なご支援をいただい た山本智教授(東京大学大学院理学系研究科)に,深く 感謝いたします.

### 参考文献

- [1] http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/
- [2] 相川, 2005, 遊星人 14, 168.
- [3] 渡部ら, 2004, 遊星人 13, 226.

- [4] Rank, D. M. et al., 1971, Science 174, 1083.
- [5] Klemperer, W., 1970, Nature 227, 1230.
- [6] Herbst, E. and Klemperer, W., 1973, Astrophys. J. 185, 505.
- [7] Suzuki, H., 1979, Prog. Theor. Phys. 62, 936.
- [8] Suzuki, H. et al., 1992, Astrophys. J. 392, 551.
- [9] Caselli, P. et al., 1999, Astrophys. J. 523, L165.
- [10] Caselli, P. et al., 2003, Astron. Astrophys. 403, L37.
- [11] Cazaux, S. et al., 2003, Astrophys. J. 593, L51.
- [12] Kuan, Y.-J. et al., 2004, Astrophys. J. 616, L27.
- [13] Sakai, N. et al., 2006, Publ. Astron. Soc. Japan 58, L15.
- [14] Sakai, N. et al., 2007, Astrophys. J. 660, 363.
- [15] Sakai, N. et al., 2008, Astrophys. J. 672, 371.
- [16] Sakai, N. et al., 2010, Astrophys. J. 722, 1633.
- [17] Sakai, N. et al., 2007, Astrophys. J. 667, L65.
- [18] Sakai, N. et al., 2008, Astrophys. J. 673, L71.
- [19] Sakai, N. et al., 2008, Astrophys. J. 675, L89.
- [20] Sakai, N. et al., 2009, Astrophys. J. 697, 769.
- [21] Öberg, K. I. et al., 2008, Astrophys. J. 678, 1032.
- [22] Sakai, N. et al., 2009, Astrophys. J. 702, 1025.