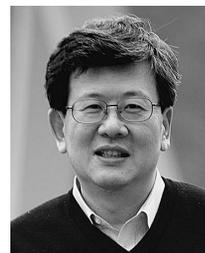


もっと化学を

山本 智

〈東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1〉

e-mail: yamamoto@phys.s.u-tokyo.ac.jp



星間分子雲の化学組成は星形成に至る物理進化の過程で系統的に変化する。この化学進化の考え方は、化学組成の多様性を多くの分子雲で探求する中で確立した。その主要な柱は、炭素の主要存在形態の変化、星間塵への分子の吸着、そして星形成に伴う分子の蒸発である。本稿では、化学進化の観測的確立について、われわれが果たしてきた役割を中心に述べる。化学組成という視点から分子雲進化と星形成過程を理解する手法は、ALMA時代を迎えていっそう重要になるだろう。

1. はじめに

今、宇宙の化学が新しい展開を見せ始めている。ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)¹⁾が動き始めたからだ。ALMAはミリ波、サブミリ波の電波領域で、これまでの電波望遠鏡よりも2桁程度高い解像度と感度を実現する。まさに、電波天文学者の夢の望遠鏡である。チリ共和国のアタカマ砂漠の高地(標高5,000 m)に、口径12 mのアンテナを全部で54台と口径7 mのアンテナを12台並べ、開口合成の方法で天体の電波画像を描き出す。わが国を含む東アジア、北米、欧州が共同して建設し、2013年3月に開所式を迎えた。わが国は国立天文台が建設を担い、アンテナ、受信機、相関器などで大きな貢献をした。開所式に先立ち2011年からは限られたアンテナ台数を使った初期科学運用が行われ、続々と成果が出てきている。ALMAは21世紀前半の天文学・宇宙物理学を牽引する主要装置の一つとして、宇宙初期からの銀河形成と進化を捉え、新しい恒星と惑星系が作られる過程をつぶさに明らかにし、そして、宇宙における物質進化と生命の起源に関する研究を大きく前進させるであろう。

他の波長の観測と比べて、ALMAの凄いところは、物質が詳細に見えることである。ALMAは主に原子の微細構造スペクトル線、分子の回転スペクトル線、および、星間塵からの熱輻射を観測する。このうち、原子・分子のスペクトル線の振動数(波長)は原子・分子に固有であり、観測されるスペクトル線の振動数からどのような原子・分子が存在しているかわかる。それだけでは、光や赤外線の場合とあまり変わらないが、ALMAを含む電波観測の特徴はスペクトル分解能が非常に高いことである。観測装置としては100万から1,000万のスペクトル分解能をもっており、通常、観測されるスペクトル線の線幅は装置による制限では決まらず、天体の内部運動で決まる。スペクトル分解能が高いおかげで、原子・分子のスペクトル線を間違いなく同定できるとともに、それらの運動も詳細にわかる。また、微量にしか存在しない分子を検出する上でも有利である。ALMAはこれらのスペクトル線をさまざまな天体で圧倒的な感度で観測する。言い換えると、さまざまな天体で「化学分析」が可能になるわけだ。これまでこのような「化学分析」の研究は星間分子雲から原始星が形成される過程について活発に行われてきたが、ALMAの登場に

よって、星形成から惑星系形成へ、そしてまた、銀河系から系外銀河へと大きく広がりがつある。本稿では、これまで私たちが取り組んできた研究を中心に、化学的視点から見た天文学研究の一端を紹介したい。

2. 多様な星間分子雲の化学組成

星と星との間には、希薄ではあるがガスと塵からなる星間雲が存在している。その中で、比較的に密度が高く、水素がほとんど水素分子として存在するものを星間分子雲と呼ぶ。典型的な水素分子の個数密度は 10^2 – 10^6 cm^{-3} 、温度は10–30 Kであり、新しい恒星が形成される場として重要な天体である。宇宙の元素存在度を反映して、質量のほとんどは水素分子とヘリウム原子が担うが、それらに対して個数にして1万分の1程度かそれよりもずっと少ない割合でさまざまな分子が存在している。星間分子と言われるものである。理科年表には最新の星間分子のリストが毎年掲載されているが、現在のところ約170種が主に電波観測によって検出されている。一酸化炭素(CO)やアンモニ

ア(NH_3)のような基本的な分子のほか、炭素が直線状につながった炭素鎖分子(HCCCCCN, CCCCH, CCSなど)や比較的大型の有機分子(HCOOCH_3 , $(\text{CH}_3)_2\text{O}$ など)、また HCO^+ , HN_2^+ , C_6H^- のような分子イオンも存在している。低温、低密度の星間分子雲において、これほどまでに多様な分子種が生成されているというのは驚くべきことと言える。また、分子イオンの存在は、星間分子雲が弱く電離した状態(電離度は 10^{-7} 程度)にあることを示している。

ここで注目すべきことは、いろいろな星間分子雲やその中で星形成領域を見たときに、どの天体でも化学組成が同じではなく、天体ごとに大きく異なっていることである。また、同じ星間分子雲の内部でも、場所によって化学組成が異なることが知られている。このような化学組成の多様性は、星間分子雲の電波観測が進展した1980年代にすでに強く認識され始めていた。その一例として、おうし座にあるフィラメント状の分子雲TMC-1における観測例を図1に示す²⁾。この分子雲において、CCSという分子は南東側(左下)

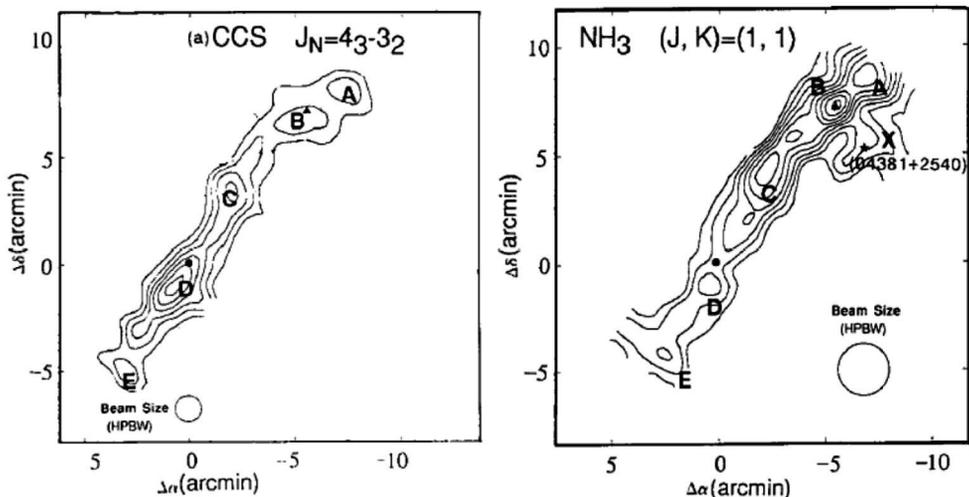


図1 TMC-1リッジにおける化学組成の勾配。CCSは南東側、 NH_3 は北西側で豊富に存在する。化学進化の考え方によれば、CCSは若い分子雲コアで豊富で、 NH_3 は進化の進んだ分子雲コアで増えるので、このフィラメント分子雲は北西側から南東側に形成されてきていることになる。事実、北西側には原始星04381+2540が付随する。文献2より許可を得て転載。

で豊富であり、 NH_3 は北東側(右上)に多い。このように、観測する分子によって分子雲の見え方が違うということは、それをもとに分子雲の質量や物理状態、さらにはそこでの星形成を議論する際の「障害」となると考えられた。そのような研究のためには、分子雲の質量の大部分を担う水素分子とヘリウム原子の分布を知りたい。しかし、それらは回転スペクトル線を出さないので、代わりにさまざまな分子のスペクトル線を観測する。そのときに、分子の存在量が場所ごとにコロコロ変わるようでは、何を見ているかわからないし、質量、密度、温度などの定量的な議論ができない。「そんなことでは困る」というわけだ。したがって、「星間分子雲の中で化学の影響をあまり受けけない分子は何か」ということになり、一酸化炭素(CO)とその同位体種などが好んで観測されるようになった。今では、 CO 分子も高密度領域では星間塵に吸着され、水素分子の量を必ずしも反映しないことが知られているのだが³⁾、当時はそれが最善と考えられた。また、ミリ波帯における星間塵の熱放射の観測は技術的に難しく、1980年代には一般的ではなかったことも背景にある。

化学の影響を受けない分子を観測しようという考えは、研究の方向性として一つの選択ではある。だが、化学出身の私の眼から見ると、なぜ星間分子雲ごとに化学組成がこれほどまでに違うのかということが、逆に大きな興味の対象であった。当時は、「星間分子雲がC-richの状態にあるときは炭素鎖分子が豊富にでき、O-richの状態にあるときは酸素を含む有機分子が主に作られる」という考え方がある程度説得力をもって語られていた。しかし、一つの天体の化学組成の特徴を何とか説明できても、なぜ、それがC-richなのか、あるいはO-richなのかを合理的に説明することはできなかった。所詮、化学組成の違いを原子の存在比に押し付けたに過ぎなかったと言える。

3. 化学進化の考え方

化学組成の多様性を解く手がかりとなったのが、当時東京大学東京天文台の鈴木博子氏が始めたいくつかの分子輝線による天体サーベイ観測だった。新星間分子CCSが45 m電波望遠鏡のラインサーベイと分子分光研究の協力で発見されたばかりのとき(1987年)で、それがどのような天体に豊富にあるのかを調べて、その化学的特徴を明らかにしようと始まった観測研究であった。CCS、 HC_3N 、 HC_5N 、および NH_3 のスペクトル線を49個の分子雲コアに対して観測したところ、確かにスペクトルの見え方が天体ごとに違う。これはまさに「化学分析」だと思った。次々と観測天体を変えて観測する中で、何かはわからないが、そこにはとても大きな可能性があると感じた。

その観測の直後、鈴木博子氏は清里の自宅の近くで自動車事故を起こし、急逝された。鈴木博子氏はわが国で初めて星間化学研究を始めたパイオニアで、私も多くのことを教えられた。大きな衝撃と深い悲しみの中で、この研究を何とかまとめ上げなければという思いから、それに没頭していった。

分子雲コアの化学組成は天体ごとに違っていたが、ある一つの傾向を示した。それは図2に端的に示される。まだ星形成が起っていない「若い」分子雲コアを見ると、CCSのような炭素鎖分子のスペクトル線が強く観測されるのに対して、 NH_3 のスペクトル線は非常に弱いか、あるいは観測されない。一方、すでに太陽型(低質量)原始星が生まれている分子雲コアでは、逆にCCSのスペクトル線は弱く、 NH_3 の強いスペクトル線が観測される。このことから、化学組成はでたために違うわけではなく、分子雲コアから星形成に至る過程で系統性をもって変化していることがうかがえる。観測した天体でCCSの柱密度(視線方向に分子の個数密度を積分した量)と NH_3 の柱密度を求めてそれをプロットしたもの

が図3 (左) である。プロット点はばらけるが、それはこの二つの分子で見たときの化学組成が天体ごとに違うことを意味している。そのうち、白抜き記号が星形成を伴う分子雲コアである。それらはプロットの左上側、すなわちNH₃が多く

CCSが少ない部分に多い傾向が見える。

星間分子雲コアは、温度が10 K程度、水素分子密度も10⁴-10⁵ cm⁻³程度の低温、低密度の環境にある。そのような場所では、一つの分子が水素分子とぶつかる頻度は1カ月に一度くらい、水素分子以外の分子とぶつかる頻度は数百年に一度である。そのような場所で、分子と分子がぶつかって化学反応が起こり、より大きな分子が作られていく。その時間スケールは非常に長く、化学平衡に達するまでに数十万年から100万年もの時間がかかる。一方、分子雲コア自体は自己重力で収縮するが、水素分子密度が10⁴ cm⁻³の場合、その自由落下時間は30万年程度である。したがって、分子雲コアは必ずしも化学平衡には達していないと考えられる。分子雲コアをたくさん観測したとすると、若いものも年をとったものも含まれる。化学平衡に達していなければ、その「年齢」に従って化学組成が変化していく。したがって、星形成という物理進化の程度を「年齢」の指標として見てみると、化学組成が系統的に異なって見えることになる。

では、どのような系統的変化が期待されるだろうか？ 分子雲コアがより希薄な星間雲から形成

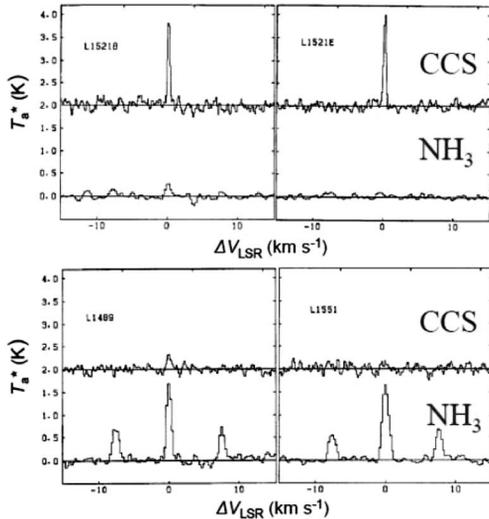


図2 星形成を伴わない分子雲コア (上の二つのパネル) と星形成領域 (下の二つのパネル) における CCS ($J_N=4_3-3_2$; 45 GHz) と NH₃ ($J, K=1, 1$; 24 GHz) のスペクトル線。両者で系統的な化学組成の違いが見られる。

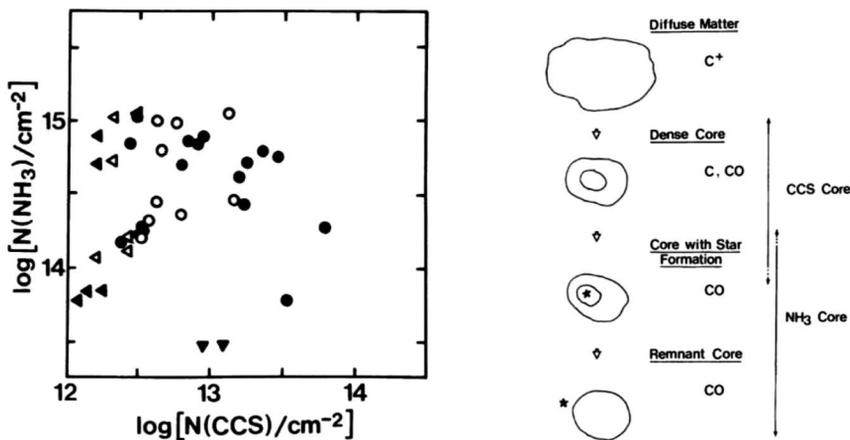


図3 (左) 分子雲コアで観測された CCS と NH₃ の柱密度のプロット。白抜き記号は星形成を伴う分子雲を示す。それらはプロットの左上にあることがわかる。(右) 分子雲コアの化学進化の模式図。炭素の主要な存在形態が炭素イオン、炭素原子、CO 分子と変化するにつれて、化学組成が系統的に変化する。文献5より許可を得て転載。

されていく過程を考えてみよう。希薄な星間雲では、星間紫外線が十分透過するので、分子は光解離で壊され、炭素原子はさらにイオン化されて炭素イオンとして存在する。その中で、密度が高まって紫外線が遮断されると、炭素イオンは中性化して炭素原子となり、さらに酸素を含む分子などと反応して一酸化炭素分子となって安定化する。それが平衡状態なので、それにかかる時間が数十万年から100万年というわけである。炭素鎖分子のような炭素を多く含む分子は、炭素がまだ一酸化炭素に固定される前の比較的初期段階、即ち、分子雲コアの「年齢」が若い時代に豊富に生成され、やがて壊されたり塵に吸着したりして「年齢」とともに減少する。CCSが若い分子雲コアで豊富に見られるのはこのためである。一方、窒素を含む分子(NH_3 や HN_2^+)は上記の炭素の形態変化とは無関係に「年齢」とともに増えていく。さらに詳しくは述べないが、生成に時間がかかるため、比較的進化の進んだ分子雲コアで豊富になる。CCSと NH_3 の反相関性はこのように説明できる(図3右)。

化学組成は時間とともに一定の規則で変化する。これが化学進化の考え方である。化学モデル計算では、多くの化学反応を考慮して、反応速度方程式を時間を追って計算する手法が取られていた。その過程で、炭素を含む分子が比較的若い時期に豊富になることは、鈴木博子氏が1979年に発表した初期のモデルでも指摘されていた⁴⁾。分子雲コアの化学組成に時間依存性があることは認識されていたが、それが観測で捉えられることはなかった。一つや二つの天体を見ても何もわからないからである。数多くの分子雲コアの化学組成を観測し、IRAS衛星による原始星天体の同定という背景に助けられ、さらに化学モデル計算に支えられて、初めて化学進化が見えたのである。この結果は、Suzuki et al. として1992年に出版された⁵⁾。鈴木博子氏の急逝から5年後であった。

その後、炭素鎖分子と $\text{NH}_3/\text{NH}_2^+$ を使って化学

進化を調べる研究は、多くの研究者によってさまざまな天体で行われている。星形成を伴わない分子雲の年齢を判断する重要な指標として、星形成研究にもインパクトを与えた。例えば、廣田朋也氏らはおうし座の分子雲コアL1521B, L1521E, L1495Bが炭素鎖分子に異常に恵まれていることを見だし、化学的に若い分子雲コアの存在を実証した⁶⁾。また、廣田氏らは、多くの分子雲コアの化学組成が領域ごとに系統的に異なることを示し、星形成に至るまでの時間スケールが領域ごとに異なる可能性を提示している⁷⁾。

4. 化学進化の展開—1

気相の化学進化を引き起こす大きな原因は、炭素の主要存在形態の変化である。炭素イオン、炭素原子がCO分子になって安定化する前に、炭素鎖分子が効率的に生成する。そこで、この化学進化をより直接的に捉えるためには、炭素原子の分布を観測して一酸化炭素分子の分布と比べれば良い。炭素原子はサブミリ波帯に微細構造遷移(492 GHzと809 GHz)をもつ。近傍の分子雲におけるCO分子の分布はミリ波帯の観測でよく調べられている。炭素原子のサブミリ波スペクトル線の分布を観測して、それと比較することで、分子雲形成を捉えることができるかもしれない。そう考えて、富士山頂に口径1.2 mのサブミリ波望遠鏡を作る計画を立てた。サブミリ波はミリ波と違って大気に含まれる水蒸気によって強く吸収される。したがって、標高が高く、乾燥したサイトからでない観測できない。いろいろ調べたところ、国内では富士山頂、しかもその冬季が唯一観測可能とわかった。しかし、望遠鏡を作ったことのないメンバーが主体となり、サブミリ波という全く経験のない波長域で、望遠鏡を遠隔で運用するなどということは、とんでもない計画と思われた。どうやって実現するか四苦八苦しているとき、幸いにも研究拠点形成プログラム(代表:佐藤勝彦教授)の一つとして実行させていただける

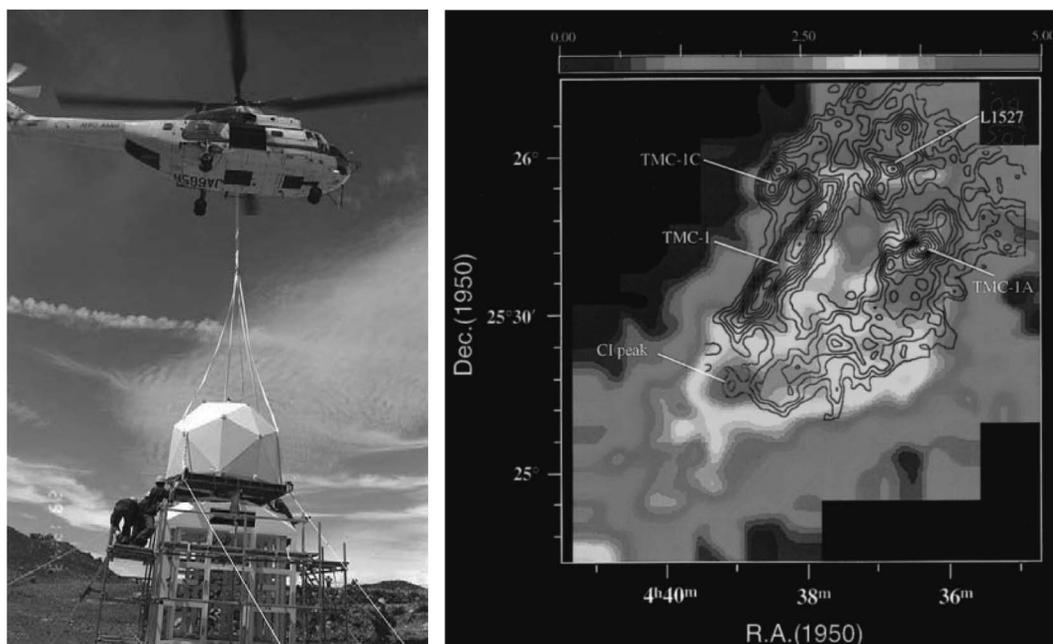


図4 (左) 富士山頂サブミリ波望遠鏡の設置の様子 (1998年7月). (右) おうし座Heiles Cloud 2領域における炭素原子 ($^3P_1-^3P_0$: 492 GHz) の輝線強度分布 (白黒) と $C^{18}O$ ($J=1-0$) の分布 (等高線). 両者の分布は反相関しており, 南側で炭素原子が豊富に存在する. 南側よりも北側の方が化学的に進化が進んでいる様子がわかる. TMC-1と記した細長いリッジが図1のTMC-1である. 図1の化学進化の方向と広い領域での化学進化の方向は一致する. 文献8より許可を得て転載.

ことが決まった. 1998年に多くの方々の支援と若手メンバーの活躍に支えられてこの望遠鏡は実現 (図4左) し, 2005年までの間に近傍分子雲の炭素原子の分布を圧倒的規模で明らかにした.

その代表的結果として, おうし座分子雲における炭素原子の分布を図4 (右) に示す⁸⁾. 炭素原子の分布 (カラー) はこの領域の南側を中心に広がって存在しているのに対して, CO分子の分布 (等高線) は北側を中心に分布している. このことから, 南側はCO分子に変換されていない炭素原子がまだ残っており, やや希薄な, 化学的に若い状態にあることを示している. この方向は, この領域に含まれるTMC-1フィラメントの化学進化の方向とよく一致している. このことは, この領域で分子雲コア形成が北側から南側に向かって起こっていることを意味する. 最近, 坂井南美氏らがCH分子の分布を波長9 cmのスペクトル線

の観測で調べたところ, この分子の分布が炭素原子の分布とCO分子の分布を繋ぐように分布していることを明らかにした⁹⁾. CH分子は炭素原子からCO分子が作られる際の化学反応の中間体であり, まさに炭素原子からCO分子への変換が起こっていることを空間分布としても確かめることができた. 炭素原子の分布は光解離領域と分子雲の境界として捉えられることが多かったが, これら一連の研究の中で, 炭素原子の分布の新しい意味が浮かび上がってきたと言える.

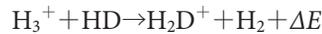
富士山頂サブミリ波望遠鏡は小さな望遠鏡ではあったが, わが国で初めての本格的サブミリ波望遠鏡として, 科学的成果の創出だけでなく, わが国がサブミリ波を一つのキーワードにしてALMAに参入する際の後押しにもなったと思っている. 化学進化の根幹を確かめようと思ったこのプロジェクトは, 上記のような成果を残し,

当初の目的をほぼ達成して2005年に終了した。

5. 化学進化の展開—2

化学進化の考え方は、1990年代後半から大きく発展した。その一つの契機は、Paola Caselli氏らが、低温の分子雲コアの中心部で星間塵への分子の吸着が起こっていることを明確に示したことである³⁾。Caselli氏らは光学的に薄いC¹⁷O (COの0.04%だけ含まれる)のスペクトル線の強度分布を進化の進んだ星なし分子雲コアL1544で観測し、星間塵からの連続波の強度分布と比較して、分子雲コアの中心で気相のCOの量が減っていることを明らかにした。水素分子密度が10⁴ cm⁻³の場合、分子が吸着する時間スケールはおよそ10万年となる。したがって、上の気相での化学進化の時間スケールとおおよそ同程度になるため、星間塵への分子吸着も化学進化に大きく寄与する。大橋永芳氏はこの天体でCCSの分布を干渉計観測で調べ、中心部分で少なくなっていることを見いだした¹⁰⁾。相川祐理氏は、HN₂⁺が逆に中心部分で増えることも含め、これらの現象を星間塵への吸着を考慮した化学反応モデルで再現した¹¹⁾。Caselli氏らの研究以来、星間塵への分子吸着の度合いは星間分子雲の進化指標の一つとしてよく用いられている。

星間塵への分子吸着は化学組成にさまざまな影響を与えるが、その一つの大きな効果は重水素濃縮の促進である。宇宙におけるD/H比は10⁻⁵程度であるが、星間分子雲中の分子には数%から数10%程度の割合で重水素化分子が含まれる。例えば、DNC/HNCの割合は星形成がまだ起っていない分子雲コアで2-3%程度となる。すなわち、1,000倍以上も分子に重水素が濃縮されている。これを重水素濃縮と言う。その仕組みを簡単に説明すると次のようになる。星間分子雲中の重水素は主にHDの形で存在しているが、HDはH₃⁺イオンと反応して



という反応でH₂D⁺を作る。この反応は230 Kほどの発熱反応なので、低温の星間分子雲では逆反応が進まない。その結果、H₂D⁺/H₃⁺比が高くなる。H₃⁺イオンはさまざまな分子を形成する「種」になるイオンなので、H₂D⁺の割合の増加は重水素化分子の割合を増加させる。このような過程で、分子の重水素濃縮度は時間とともに高まっていく傾向にある。これに拍車をかけるのが星間塵への分子吸着である。H₃⁺やH₂D⁺は電子と出会うと中性化して壊れるが、それよりもっと早く壊れる原因はCO分子との反応である。したがって、CO分子が星間塵に吸着して気相からいなくなると、H₃⁺やH₂D⁺の寿命が1桁程度長くなり、その分、重水素濃縮が進む。したがって、重水素濃縮度は化学進化の指標となる。廣田朋也氏は多くの分子雲コアでNH₃/CCS比とDNC/HNC比が非常によく相関することを示し、化学進化の考え方をより強いものとした¹²⁾ (図5)。また、分布についても同様で、上で述べたL1544では、化学進化の進んだ分子雲の中心で予想どおり重水素濃縮の高まりが見られる¹³⁾。

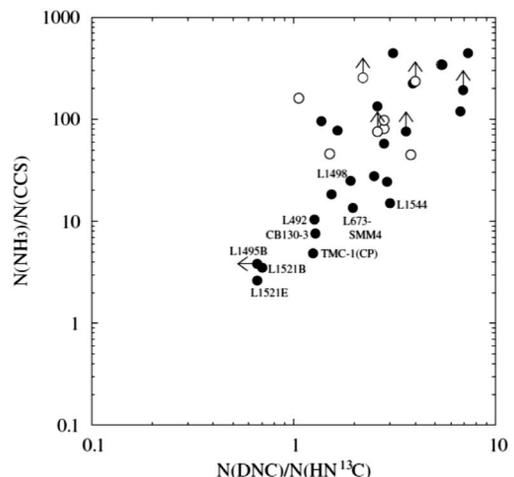


図5 化学進化の二つの指標、NH₃/CCS比と重水素濃縮度 (DNC/HN¹³C) のプロット。両者はよく相関している。文献12より許可を得て転載。

6. 分子雲の化学進化から星形成領域の化学進化へ

星間塵への分子の吸着は、さまざまな分子を気相中から取り除くだけでなく、もう一つの大きな効果がある。吸着した分子は、表面上での反応によってより複雑な分子になっていく。例えば、吸着したCO分子は水素原子との表面反応によって次々と水素化され、ホルムアルデヒド分子(H₂CO)やメチルアルコール分子(CH₃OH)になる。また、炭素原子は同様に水素原子との表面反応でメタン分子(CH₄)になる。

気相では、水素原子との反応による水素化は反応余剰エネルギーのやり場がないために起こらない。また、水素分子との反応についても、炭素が延びる反応のほうが起こりやすいために限界があり、その結果、炭素鎖分子が豊富に生成する。一方、塵表面での反応では、塵が第3体の役割を果たし、水素原子の付加反応が効率良く起こる。そのため、気相反応とは違って、水素に富んだ(飽和した)有機分子が効率的に作られるのである。ただし、分子雲コアは温度が10 Kと低いので、これらの分子は生成しても星間塵に凍りついたままで熱的に気相に放出されることはない。宇宙線の効果や反応余剰熱による一時的な温度上昇で生成した分子の一部は蒸発していることが最近明らかになってきたが¹⁴⁾、大部分は塵表面にとどまる。分子雲コアの中で原始星が誕生し、その周辺の温度が上昇してはじめて塵表面で生成したさまざまな分子が蒸発してくることになる。

2003年にフランスのグループは低質量原始星IRAS 16293-2422においてそうして気相に放出されたと考えられるギ酸メチル分子(HCOOCH₃)やシアン化エチル分子(C₂H₃CN)を検出した¹⁵⁾。実際、それらの分子は原始星近傍の数百AU程度の範囲に集中しており、温度上昇に伴う蒸発として理解できる¹⁶⁾。上記のような大型有機分子はそれまで大質量星形成領域のホットコアで見られ

ていたが、低質量星形成領域でも同様な高温領域(ホットコリノ)が存在していることがわかった。一方、坂井南美氏は、同じ低質量原始星であっても全く異なる化学組成を示す天体があることを発見した。星形成領域では非常に少なくなっているはずの炭素鎖分子が、原始星近傍に異常に豊富に存在している天体で、おうし座のL1527がその典型である。これは、星間塵上のCH₄が蒸発し、一時的に気相に炭素が豊富な状態が作られ、それが原因で炭素鎖分子が効率良く再生成していると考えられる¹⁷⁾。これは暖かい炭素鎖化学(Warm Carbon-Chain Chemistry; WCCC)と呼ばれ、原始星周りの化学組成の新しい化学過程として定着しつつある。

このように低質量原始星において化学組成の多様性が生まれる原因は、星間塵の組成の違いである。大型飽和有機分子が豊富であれば、ホットコリノ天体となり、CH₄が豊富であればWCCCが起こる。その組成の違いを決めているのは、やはり分子雲コア時代の化学進化である。もし、星形成までの時間が十分長ければ、炭素はCO分子に変換されてから星間塵に吸着し、水素化され、また互いに反応して大型飽和有機分子を作る。一方、星形成までの時間が短ければ、炭素は炭素原子として星間塵に吸着し、水素化されてCH₄を形成する。このように星形成までの物理過程が星間塵の化学組成として「記憶」され、星形成とともにその違いが気相の化学組成として表れるのである。原始星形成に伴う化学進化については、坂井南美氏が昨年(2017年)の天文月報に書いた記事¹⁸⁾や、Chemical Review誌の総説を参考にさせていただきたい¹⁹⁾。

7. 原始星から惑星系形成に至る化学進化

星間分子雲において、化学組成は時間とともに一定の法則で進化する。それをまとめたのが図6である。炭素原子からCO分子への変換、星間塵

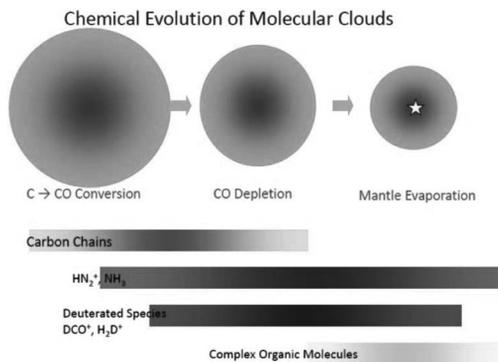


図6 星間分子雲から星形成に至る化学進化の模式図。化学進化は、炭素原子からCO分子への変換，CO分子の星間塵への吸着，および星形成に伴う星間塵からの分子蒸発の三つの素過程によって主導される。したがって，物理進化に伴い，化学組成は系統的に変化する。

への分子吸着，および，星間塵からの蒸発の三つが，化学進化を考える上での三つの重要な要素である。もちろん，個々の天体の置かれている環境などによる特殊事情はあるだろう。しかし，化学組成はでたらめに異なっているのではなく，上記の三つの基本原理に支配されている。このことを利用することで，分子雲の形成進化やそこでの星形成過程について，密度，温度，質量などの物理的指標とは違った豊かな情報が得られる。これらの研究において，化学指標は欠くことのできないものとなっている。

今，ALMAが動き始めて，「分子」はますます重要になってきている。ALMAの高い感度と分解能で，分子の分布の様子をいっそう克明に捉えることができるからだ。言い換えると，分子分布は好むと好まざるにかかわらずあらゆる観測で見えてくる。これは銀河系内天体にとどまらず，系外銀河においても同様である。このあふれる分子データをどう「料理」するか……。もちろん目をつぶることは容易だが，私はそこに無限の可能性があると思う。これまで，分子雲から星形成までの化学進化が明らかになってきた。ALMA時代では，星形成から惑星形成への化学進化が描き出さ

れるだろう。すでにALMAの初期運用においても，低質量原始星に降着するガスの遠心力バリアーとそこでの劇的な化学組成の変化の発見²⁰⁾，原始惑星系円盤におけるCOスノーラインの検出²¹⁾，低質量原始星における間欠的質量降着の兆候の発見²²⁾など，予想を超えた成果が続々と報告されている。本格運用においてはどのような成果が出てくるかと思うと，胸躍るものがある。このような研究は，太陽系自体を調べその起源をたどる惑星科学研究と相まって，太陽系の起源と宇宙の中での価値についてのわれわれの認識をいっそう豊かに，そして深くしてくれるものと信じる。

8. おわりに

今から約30年前，当時の東京大学東京天文台の45 m電波望遠鏡が動き出し，それまでとは比べものにならない感度で星間分子のスペクトルを描き出した。星間空間で繰り広げられるエキゾチックな化学は，少なくない分子科学分野の研究者の心を捉え，多くの共同研究が生まれた。CCSを初めとする多くの星間分子の発見という天文学としての成果のみならず，分子科学分野（分子分光学，反応動力学，量子化学計算，表面化学）にも多くの新しい研究テーマを誘発した。分野融合の一つの小さな成功例と言える。その中で，研究者の交流も進んだ。私も化学分野から天文学分野に移ってきた研究者の一人である。ALMA時代には，惑星科学から生物学までより大きな学問分野を巻き込んで，新しい研究潮流が生まれるだろう。そこには，分子，そして化学が一つのキーワードとなるに違いない。私が「もっと化学を」と叫ぶのはそのためでもある。そのような未来の融合研究展開のために，微力ながらお手伝いをしたいと思っている。

最後に，私を天文学分野に導き育ててくださった多くの諸先生・諸先輩方々，および，研究をともにした同僚，学生の皆様，そして，研究推進，望遠鏡の建設，運用にかかわったすべての人々に

この場を借りて心より感謝いたします。ありがとうございました。あまりに感謝すべき方が多く、お一人お一人お名前を挙げるのできない失礼を何卒お許してください。

参考文献

- 1) <http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/>
- 2) Hirahara Y., et al., 1992, ApJ 394, 539
- 3) Caselli P., Walmsley C. M., Tafalla M., Dore L., Myers P. C., 1999, ApJ 523, L165
- 4) Suzuki H., 1979, Prog. Theor. Phys. 62, 936
- 5) Suzuki H., Yamamoto S., Ohishi M., Kaifu N., Ishikawa S., Hirahara Y., Takano S., 1992, ApJ 392, 551
- 6) Hirota T., Ito T., Yamamoto S., 2002, ApJ 565, 359
- 7) Hirota T., Ohishi M., Yamamoto S., 2009, ApJ 699, 585
- 8) Maezawa H., et al., 1999, ApJ 524, L129
- 9) Sakai N., Maezawa H., Sakai T., Menten K. M., Yamamoto S., 2012, A&A 548, A103
- 10) Ohashi N., Lee S. W., Wilner D. J., Hayashi M., 1999, ApJ 518, L41
- 11) Aikawa Y., Ohashi N., Inutsuka S., Herbst E., Takakuwa S., 2001, ApJ 552, 639
- 12) Hirota T., Sakai N., Sakai T., Yamamoto S., 2011, ApJ 736, 4
- 13) Caselli P., Walmsley C. M., Zucconi A., Tafalla M., Dore L., Myers P. C., 2002, ApJ 565, 344
- 14) Bacmann A., Taquet V., Faure A., Kahane C., Ceccarelli C., 2012, A&A 541, L12
- 15) Cazaux S., Tielens A. G. G. M., Ceccarelli C., Castets A., Wakelam V., Caux E., Parise B., Teyssier D., 2003, ApJ 593, L51
- 16) Bottinelli S., Ceccarelli C., Neri R., Williams J. P., Caux E., Cazaux S., Lefloch B., Maret S., Tielens A. G. G. M., 2004, ApJ 617, L69
- 17) Sakai N., Sakai T., Hirota T., Yamamoto S., 2008, ApJ 672, 371
- 18) 坂井南美, 2013, 天文月報106, 780
- 19) Sakai N., Yamamoto S., 2013, Chem. Rev. 113, 8981
- 20) Sakai N., et al., 2014, Nature 507, 78
- 21) Qi C. et al., 2013, Science 341, 630
- 22) Jørgensen J. K., et al., 2013, ApJ 779, L22

More Chemistry in Astronomy!

Satoshi YAMAMOTO

Department of Physics, Graduate School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

Abstract: Chemical compositions of molecular clouds systematically change along physical evolution toward star formation. This concept of chemical evolution was established during an effort exploring chemical diversity of molecular clouds. Its main drivers are C-to-CO conversion, depletion of molecules onto dust grains, and evaporation of molecules after protostar birth. In this article, I describe how this concept was observationally established, with an emphasis on our contributions. Such a chemical approach to star-formation studies will be more and more important in the ALMA era.