

ミリ波・サブミリ波観測で切り拓く太陽系 アストロケミストリー

飯野孝浩¹・佐川英夫²

〈¹ 東京大学情報基盤センター 学際情報科学研究体 〒277-0882 千葉県柏市柏の葉 6-2-3〉

〈² 京都産業大学 理学部物理学科 〒603-8555 京都市北区上賀茂本山〉

e-mail: iino.takahiro@mail.u-tokyo.ac.jp



飯野

ALMAをはじめとするミリ波・サブミリ波観測測器の技術革新は、惑星・衛星・小天体といった太陽系内天体における気相化学過程の解明において重要な役割を果たしてきた。本稿では、木星以遠の天体に着目し、ミリ波・サブミリ波観測の黎明期からALMA時代に至る、ミリ波・サブミリ波太陽系アストロケミストリーの全体像の概観を試みる。

1. はじめに：ミリ波・サブミリ波太陽系電波天文学の特徴と太陽系アストロケミストリーにおける役割

アタカマ大型ミリ波・サブミリ波干渉計(ALMA)をはじめとするミリ波・サブミリ波での分光観測は、国内外において多様なアストロケミストリー研究を駆動してきている。その観測対象は太陽系内天体の大気にも及んでおり、探査機によるその場観測・理論計算・実験室実験と連携しながら、多様な気相化学過程の研究が展開されている。本稿では、木星以遠の惑星・衛星の大気および彗星コマのミリ波・サブミリ波分光観測研究の歴史を総説的に概観するとともに、気相化学をキーワードとした隣接分野との学際研究の推進について言及する。なお、本稿では、紙面の関係もあり、金星・火星には触れていないが、両天体に対する観測研究も活発に展開されていることは特に付言しておきたい。

ミリ波・サブミリ波分光の測器は、国立天文台野辺山宇宙電波観測所(口径45 m)や、欧州のIRAM(30 m)、ハワイのJCMT(15 m)やCSO(10 m)をはじめとした単一鏡型望遠鏡と、ハワ

イのサブミリ波干渉計SMAやチリのALMAのような干渉計型望遠鏡とに大別できる。波長の長い電磁波であるミリ波・サブミリ波の回折限界は、口径10 mの単一鏡型望遠鏡において典型的に数十秒角程度であるが、太陽系惑星の視直径は、平均値が最も大きな天体である木星でも~40秒角程度であり、探査機のような詳細な空間分解観測は不得手である。多様な大気組成を持ち、アストロケミストリー的な関心を強く集める天体である海王星、タイタン、冥王星、彗星のような天体の視直径はせいぜい数秒角以下であり、全球平均(Disk-averaged/integrated)の観測のみが可能となる。一方で干渉計型電波望遠鏡では、開口合成法により回折限界を超えた空間分解能での分光観測が可能であり、SMAやALMA、VLA等を用いた、遠方惑星・衛星の空間分解観測が行われてきた。太陽系電波天文学におけるALMAの革新性のひとつはこの高い空間分解能にある。ALMAの空間分解能は、配列にもよるが、サブミリ波のバンド7において3.63-0.0122秒角にまで達する。これは、上述したような視直径の小さい天体の空間分解観測を可能にする分解能である。

さて、分子ガスの存在高度の情報がその生成・

消滅にかかわる化学過程の理解において重要であることは、地球大気中のオゾンが成層圏に偏在することからも想像可能である。ミリ波・サブミリ波分光の強みは、ヘテロダイナミクス分光法が実現する周波数（波長）分解能の高さを活かした、惑星大気の観測視線方向分布、すなわち鉛直分布の導出にある。分子ガス輝線の輝線幅は、視線方向に停止している惑星大気においては分子の熱運動によるドップラー広がり成分と、気圧に比例する圧力広がり成分とで決定される。また、望遠鏡視野（ALMAの場合は合成ビーム）内での惑星の自転の視線方向成分（ドップラーシフト）の変化も、分子ガス輝線の線幅に影響を及ぼす。このうち、自転の成分は適切な処理により除去が可能であるため、一定以上の気圧の条件において、輝線幅はガスの存在する領域の気圧を反映すると考えることができる。その典型的な輝線幅は、300 Kの水素大気中におけるCO、HCN輝線でそれぞれ2.25、4.50 MHz/mbar程度であり、帯域が数百MHz～数GHz、周波数分解能が数十～数百kHzという近年の分光計であれば、大気化学過程によって多様な微量分子ガスの生成・消滅が生じる気圧0.1～数十mbarの高度領域で生成される輝線形状を連続波部分（輝線の「裾野」）から輝線のピークまで精密に観測することが可能となる。そして、各気圧領域の温度環境・分子ガス濃度で生成される輝線強度、有限空間分解能ビーム内の大気構造の正確なモデリングを行い、観測された分子輝線構造を再現する分子鉛直分布を探索することで、図1に示すように、視線方向の分子の分布の導出が可能となる。実際に、次節以降で具体例を示すように、大気中に一様に存在する分子ガスのほうが稀であり、高分散かつ、広帯域で安定した分光計の実用化による微量分子鉛直分布の導出と相互比較は、太陽系アストロケミストリーにおいて重要な役割を果たしている。

また、地上望遠鏡は太陽系天体のモニタリング観測が可能であり、季節変化に伴う大気ダイナミ

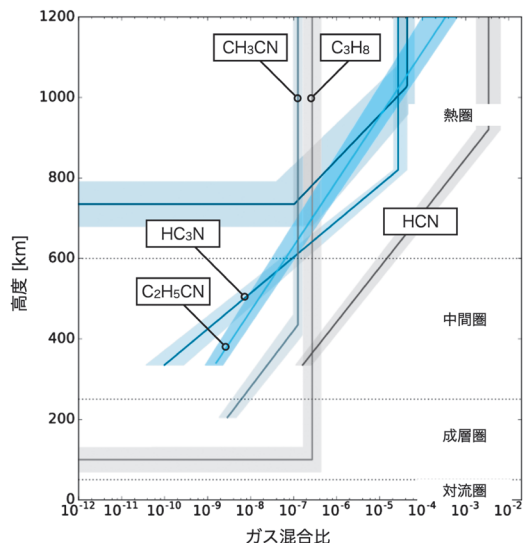


図1 ALMAがとらえたタイタン微量分子群のディスク中心付近における鉛直分布 ([1], Fig. 6より)。惑星大気中微量分子の視線方向の分布の情報を得られるのはミリ波・サブミリ波高分散分光観測の恩恵であり、その大気化学過程の解明において重要な役割を果たす。

クスや日照の変化に伴う大気化学過程の変動も観測可能である。これは天体をフライバイする軌道を取る探査機にはない強みである。

以下ではこれまで展開されてきたミリ波・サブミリ波での太陽系電波天文学の成果について、対象ごと（海王星、木星、タイタン、彗星、その他衛星・小天体群）に、その化学過程の研究に着目しながら紹介していく。

2. ALMA前夜のミリ波・サブミリ波太陽系電波天文学

2.1 海王星

太陽系内天体におけるミリ波・サブミリ波観測成果の嚆矢となったのは、1980～90年代初頭に行われた、単一鏡型望遠鏡を用いた海王星・タイタン等の一連の観測であった。海王星成層圏の大気組成は、他のガス型惑星に比べて数桁ほど高いCOおよびHCN分子の存在比によって特徴づけられている。1990年代初頭には、パリ天文台

の2つのグループによって、両分子の検出と鉛直分布の導出がなされている [2, 3]. ここでの重要な発見は、COが対流圏から成層圏まではほぼ一様に分布しているのに対し、HCNは成層圏に偏在しているという点にある. 理論計算より、海王星の対流圏界面(対流圏と成層圏の境界部分)は60 K程度の低温環境にあると予想されていた. そのため、HCNをはじめとした多くの微量分子は凝縮してしまい対流圏から成層圏へ気相のまま輸送されることができない. また、他の窒素化合物も検出されていないことから、HCNは成層圏に孤立して存在する窒素化合物であることが明らかとなった. そのため、HCNを成層圏に輸送もしくは成層圏で生成する手段として、HCNを含む彗星の衝突や惑星間・衛星起源水ダストの流入、凝縮温度の低い N_2 分子の対流圏からの輸送と成層圏における光化学反応による生成などが候補とされた [4]. このうち、外部からの輸送説は、HCNと同様に成層圏に気相 H_2O が偏在していることがわかったことや、後述する1994年の木星の木星衝突により木星成層圏に大量のHCNが検出されるようになったことから、有力な仮説となっていく.

また、2000年代には、広帯域分光により、CO分子の鉛直分布が精密に観測された. IRAM-30 m望遠鏡を用いた観測では [5], CO ($J=2-1$)の線幅が広い吸収線構造と狭い輝線構造の双方が同時に観測され、COの混合比は気圧が20 mbar以上と以下の高度でそれぞれ1.0, 0.5 ppmであることが示された. COは酸素原子の最大のリザーバーであり、高高度において高い混合比を実現するには、何らかの外部からの供給が必須である. 文献 [5]では対流圏における $H_2O \rightarrow CO$ の変換と成層圏におけるCOの鉛直拡散の計算を併せ行い、COが内部・外部双方の起源を持つことを示唆した. より光学的に厚いCO ($J=3-2$)の観測もJCMTを用いて同時期に行われ [6], 0.85 GHzの分光計帯域を周波数方向にスライドさせること

で、輝線中心から実に ± 10 GHzに及ぶ巨大な吸収線構造が観測された. 本研究でも先行研究同様の2層モデルを用い、成層圏・対流圏でそれぞれ2.2, 0.6 ppmという混合比が導出されている.

2.2 木星

海王星と並び活発に観測が行われたガス型惑星は木星である. その契機は1994年のシューメーカー・レヴィ第9彗星の衝突イベントであり、当時稼働していた多くの電波望遠鏡が観測に投入され [7-12], 生成された分子種の同定や、モニタリングによる時空間変動の観測が行われた. 木星成層圏の組成変化は、彗星衝突に起因する熱化学反応が生成する分子による短期的変化と、光化学反応により中長期的に維持される変化とに大別される. 酸素と窒素のリザーバーはそれぞれ衝突直後から現在に至るまでCO, H_2O , CO_2 とHCNである. 一方で、硫化物はダイナミックな時間変化を示した. 衝突直後にはミリ波分光によりCS, OCS分子が、HSTを用いた紫外線分光により S_2 , CS_2 , H_2S 分子が検出された. しかし、その後のモニタリング観測ではCS分子のみが継続して観測され続けた [11]. いったん熱化学反応による各硫化物分子の生成が終了すると、それらは光解離により失われる. CS分子はそれらの光解離生成物である. CSは自らが光解離してS原子となっても、豊富な CH_3 ラジカルとの反応で容易にリサイクルされる. さらに長期の観測では、安定して存在するはずのCS分子の減少が見いだされ、ここには国内の電波望遠鏡が用いられた. 筆者らが国立天文台のASTE望遠鏡を用いて行った2013年のCS ($J=7-6$)の観測では [13], CS分子のカラム量は2003年の1/10程度であることが示された. これは、CSが鉛直拡散により下方に輸送されることで、重合や凝縮によって気相から除去されることを示唆している. なお、CS分子を含めた硫化物のサーベイ観測は、同様にASTE望遠鏡を用いて海王星に対しても行われたが [14], 木星とは異なり全硫化物の不検出という結果に終

わり、海王星の成層圏は木星と比べて極端に硫化物が欠乏していることが示された。

木星成層圏の H_2O 分子の観測は、大気吸収の影響を受けないスペース望遠鏡により行われてきた。ハーシェル宇宙望遠鏡が導出した鉛直分布と鉛直拡散計算の比較により、現在観測されている木星成層圏 H_2O の95%以上が彗星衝突由来であり、惑星間ダストの寄与は限定的であることが示唆された [15]。

2.3 タイタン

木星・海王星と対照的に、土星最大の衛星タイタン大気においては多種多様な分子種が検出されており、その生成に関わる活発な光化学反応が存在している。ボイジャー1号の赤外分光観測は、HCN, HC_3N , C_2N_2 といった複雑な分子群の存在や [16]、数桁におよぶ緯度方向への柱密度のバリエーション [17]などを明らかにした。タイタンの太陽系随一の多様な大気組成とその季節変動は、 N_2 と CH_4 の光解離を起点とした多種多様な気相化学過程の存在を示しており、その全容解明を目指して、微量分子群のカatalog作成、3次元分布導出、同位体比導出といった観測的アプローチと、光化学過程やイオン・分子反応を統合した化学ネットワーク計算という理論的アプローチ、そして気相・固相双方にまたがる実験的アプローチが盛んに行われてきた。太陽系アストロケミストリー、そしてアストロバイオロジーという観点では、タイタンはこれまで一番盛んに研究されてきた天体と言っても過言ではない。ミリ波による分子ガス鉛直分布の導出は、観測的アプローチにおいて、探査機と相補的な重要な役割を果たしている。IRAM-30 mを用いた分光観測から、HCNは高度200 kmより下層では徐々に失われることが明らかになった [18]。HCNに代わる窒素のリザーバーは不活性な N_2 しか存在しないことから、HCNは対流圏に浮遊している有機ダストであるソリンに取り込まれ、その組成に影響を与えていることが示唆される。HCN以外の窒素

化合物群の検出や鉛直分布の導出も相次いで行われ [19]、 HC_3N は高度400 km以下で急速に減少すること、一方で CH_3CN はHCNを2桁スケールダウンしたような鉛直分布を示すことが同時に示され、化学反応ネットワークにおける異なる役割が示唆された。一方でOVRO干渉計を用いたCO ($J=1-0$)の観測から、COは大気中に一様に存在することが示され [20]、これはタイタンの窒素化合物群や海王星のCOと好対照をなし、COの化学的安定性を示している。

SMAやIRAM-30 mを用いた網羅的な同位体比の観測は興味深い結果を示した [19, 21]。HCNにおける $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ は N_2 におけるその半分ほどという低い値を示した。数値計算によれば、自己遮蔽により $^{14}\text{N}^{14}\text{N}$ の光解離は中間圏・成層圏で阻害され、 $^{14}\text{N}^{15}\text{N}$ の選択的解離が生じるため、 N_2 の解離により生成されたN原子と反応性の高い CH_3 ラジカルの反応で生成されるHCNの窒素同位体比が ^{15}N リッチとなると説明されている [22, 23]。一方で、炭素同位体比 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ は化合物にかかわらず太陽系の一般的な値と調和的であることも示されてきているが、これはタイタンに限ったことではなく、木星における彗星衝突由来分子を例外として [12]炭素同位体比の顕著な分別は太陽系内では未だに検出されていない。

2.4 彗星

多様な分子ガスを保持する彗星もまた、ミリ波・サブミリ波による重要なターゲットである。彗星は原始太陽系の様相を窺い知ることのできる貴重な対象であるが、その形成環境や変成史、そして観測される分子ガスの放出後の反応など、不明点が多く残されており、その解決を経て初めて原始太陽系の姿に迫ることが可能となる。

彗星の観測的研究は、ガス量の多い彗星の到来によってブレイクスルーが生じる。近年では、大型彗星であるC/1995 O1 (Hale-Bopp)が重要な対象である。CSO, IRAM-30 m, PdBIによる大規模なラインサーベイ観測により、SO, SO_2 , HC_3N ,

NH_2CHO , HCOOH , HCOOCH_3 といった多様な分子種が初めて検出された [24]. これらの微量分子群と主要分子である HCN や CH_3OH との組成比は一部の分子雲に類似しており, 本彗星に限っては, 原始太陽系円盤で受けた変成の影響は限定的である可能性が示された. 同位体比の観測も重要である. 同彗星では DCN ($J=5-4$) の初検出が JCMT を用いてなされている. $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$ の観測と併せ, 同彗星の形成温度が 30 K 程度の低温であること, すなわち上述の分子組成比観測と同様に, 同彗星が星間空間において形成されたことを示唆した [25]. なお, 同彗星に対しては野辺山 45-m を用いた HCN , HNC 分子空間分布の観測成果も存在する [26].

複数の電波望遠鏡を用いた同彗星に対するモニタリング観測では, OH , CO , CH_3OH , H_2S , H_2CO , HCN , CS , CH_3CN , HNC の生成量がモニターされた [27]. この大規模モニタリングによって, コマの主成分が 3 au を境に CO と H_2O とで入れ替わること, 遠方では存在量の少ない分子種が増えること, 生成量のべきが明確に変化する分子種 (OH , CH_3OH) が存在することが明らかになり, 太陽との距離と昇華速度の関係という彗星特有の挙動の精密なサンプルが得られている.

彗星のガス量は突如増大 (アウトバースト) することが知られており, このタイミングで分光観測を行えば大きな知見を得ることができる. たとえば, 2007 年の 17P/Holmes のアウトバースト時には, IRAM-30 m を用いて HCN における $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$, $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 同位体比が取得されている [28]. この原稿を書いている 2021 年末においても, まさに C/2021 A1 (Leonard) がアウトバーストを起こしており, このようなタイミングに即座に対応できるサブミリ波の電波望遠鏡が重要である. ほかにミリ波・サブミリ波での彗星組成観測は多いが, 原始太陽系円盤の始原成分の探索には微量分子の組成比観測と同位体比観測が重要である.

2.5 その他

ほかの木星以遠の太陽系天体に対する観測も精力的に行われており, 木星衛星イオの火山ガスの分光による SO , SO_2 , KCl , $^{34}\text{SO}_2$ の観測 [29-31], 木星と海王星の間を公転する小天体であるケンタウルス 174P/Echeclus における CO コマの検出 [32], 冥王星の CO 大気変化 [13, 33, 34], 土星・天王星成層圏における CO の検出と内部組成への制約 [35-37], またハーシェル宇宙望遠鏡による土星衛星エンセラダスの H_2O トーラスの発見 [38] など, 多くの興味深い成果が生まれている.

3. ALMA がもたらした太陽系アストロケミストリーの革新

ALMA 時代に入り, その高空間分解能・高感度観測性能により, それまでのミリ波・サブミリ波太陽系天文学の様相は一変した. そのブレイクスルーについて, 前章までの流れに沿って概観する.

3.1 海王星・木星

ALMA の高感度を活かし, 海王星成層圏において CS ($J=7-6$) の検出がなされた [39]. これにより, 木星で彗星残滓として長期にわたって検出されている CO , CO_2 , HCN , CS , H_2O のセットが海王星でも検出されたことになる. 成層圏に孤立して存在する硫化物の存在は, CO の成層圏における卓越と併せて, 成層圏の微量分子組成が過去の小天体衝突により影響を受けていることを木星に次いで強く示唆するものである.

ALMA の高空間分解能というほかにない特性は, 微量分子の空間分布情報をもたらすことになった. 上記の CS 観測と同時になされた HCN ($J=4-3$) 観測データの解析は, HCN の混合比が赤道と南極で高く, 南半球中緯度で低いという偏在を示した (図 2, [40]). 海王星成層圏では, 中緯度で上昇し, 赤道と南極で下降する 2 セルの子午面循環の存在が示唆されてきた. この循環モデルと, 中緯度で対流圏から成層圏に鉛直輸送され

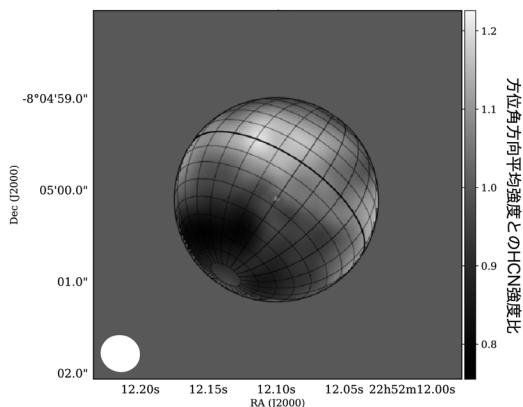


図2 海王星成層圏におけるHCN ($J=4-3$) 輝線強度図 ([40], Fig. 2 (a) より). 惑星上の異なる位置における海王星大気中の光路長の違いを考慮して描画されている. 赤道上空で明瞭な卓越を示しており, 中緯度で上昇し, 高緯度と赤道で沈み込む2セル型の大気大循環に沿ってHCNの生成がなされていることを示唆している. このように, 微量分子の空間分布の情報は大気化学過程を決定する重要な役割を果たす.

た N_2 から光解離によって生成されたN原子と CH_3 ラジカルの反応によるHCNの生成という光化学モデルの結合は, ALMAで観測されたHCNの分布を定性的に説明できる. このように, 大循環の下流で微量分子の増大が見えるのは成層圏光化学の特色であり, 地球や次節のタイタンにおいても見ることができる. 木星においては, 彗星起源分子のうち, COとHCNの緯度-高度分布が導出された [41].

3.2 タイタン

タイタンも海王星同様にALMA時代になって空間分解観測が実用的になった天体であり, ALMAを用いた成果が最も多く出版されている太陽系内天体である.

1タイタン年は約30地球年であり, 大気組成の季節変化の観測が現実的である. また, ALMAの観測期間はカッシーニ探査機の長期にわたるモニタリング観測期間とも重なっており, 両者の相互比較も可能となった. タイタンの観測研究の中

心となったのはNASAのゴダード宇宙飛行センター (GSFC) に所属する研究者らであり, 自らが主観測者として取得したデータや, ほかのALMA観測のキャリブレーション目的で取得されていた補助データを総動員し, 多くの論文を世に送り出した. また, このグループはカッシーニ探査機でのタイタン分光観測にも精通しており, 共通の輻射輸送コードを用い [42], タイタン大気の3次元構造や分子輝線の励起を考慮した, 精密な分子ガス・大気構造の導出をスピーディに行うことができたことは, 研究推進という点で大いに参考にすべき点であろう (惑星大気の観測研究に新規参入する際, 大気中の輻射輸送を如何にモデリングするかは常に大きな課題である).

ALMAの高空間分解能特性を活かし, ALMA初期運用のサイクル1においては, HC_3N とHNC分子が揃って両極に偏在している様子が描き出された [43]. さらに輝線強度の微弱な HC_3N の ^{13}C , ^{15}N 同位体の空間分布も捉えられている [44]. 輻射輸送計算の基礎データとなる気温の3次元構造も光学的に厚いCO輝線から導出されており, 2012年から2015年にわたるデータが世界中の研究者により利用されている [45]. また, 2012年から2015年までの7つのデータセットを用いた研究では, 主要な窒素化合物であるHCN, HC_3N , CH_3CN と C_3H_4 の南半球, 赤道, 北半球における鉛直分布とその時間変動が報告された [45]. カッシーニ探査機の土星突入に合わせた微量分子群の網羅的観測では, 上記に加えて C_2H_3CN , C_2H_5CN , HNCの空間分布も導出され, 化学寿命の差異に起因する窒素化合物群の空間分布の違いが明瞭に描き出された (図3, [46]).

ALMAの高感度性能を活かした新分子の検出 (C_2H_3CN [47], C_2H_5CN [48], CH_3C_3N [49], $c-C_3H_3$ [50]) は, 化学反応ネットワークにおける未解明部分を埋め, ネットワークを固相と接続する方向に拡張することに成功している. また, これら微量分子における同位体比の導出は大気化学過程の制約に重要な役割

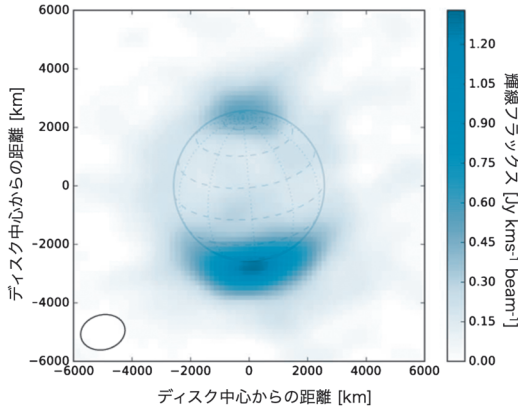


図3 ALMAがとらえたタイタンの HC_3N 分子の輝線強度図 ([1], Fig. 1より)。図1の鉛直分布と併せて3次元構造の描出を可能にする。冬極における HC_3N の偏在は、タイタンの南北半球を結合する1セル循環の下流で微量分子が卓越することを示す。季節変化の位相は分子により異なっており、エアロゾルへの吸着を含めた生成・消滅に関わる化学反応群を反映している。

を果たしている。 HC_3N における $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ は HCN 同様に N_2 より有意に低い値を示し、 HC_3N が HCN の娘分子である($\text{HCN} \xrightarrow{h\nu} \text{CN} \xrightarrow{\text{C}_2\text{H}_2} \text{HC}_3\text{N}$)ことが示唆された。一方で、不確かさは大きいものの、 CH_3CN においては $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ は N_2 と調和的であることが示唆された [51]。これは、 CH_3CN の生成が N_2 から直接行われ、2番目に豊富な窒素化合物である HCN を経っていないことを示唆しており、 CH_3CN は光解離ではなく銀河宇宙線による N_2 の解離により生成された N 原子から生成されるというモデル計算 [52] と調和的である。また、 HC_3N の3種の ^{13}C 同位体群は、星間空間では H^{13}CCCN and/or HCC^{13}CN が濃集を示すことが近年の観測・理論的研究で明らかになっているが (e.g., [53, 54])、タイタンでは 1σ の不確かさを超える濃集は検出されず [55]、 ^{13}C の濃集を引き起こすと考えられている同位体交換反応などはタイタン大気 (相対的に) 高温な環境では機能していないことが示唆された。本研究は、惑星大気と星間化学の研究者の協働である点も学際的な

研究成果として注目できるが、特にNASA/GSFCではこうした学際体制がすでに研究対象の垣根を取り除いたアストロケミストリー研究を実現していることは特筆したい。

このほかにも、タイタン大気では初となる $\text{C}^{16}\text{O}/\text{C}^{17}\text{O}$ の検出 [56] や、他の微量分子群における $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 、 $^{12}\text{C}^{13}\text{C}$ 、 H/D 同位体比報告 [44, 56–58] などが、やはりNASA/GSFCのグループを中心に矢継ぎ早に行われている。

なお、惑星大気化学の研究のスタイルとしてひとつ指摘しておきたいのは、これら同位体比の観測研究が対象とする同位体分別過程は、1) まさに現在発生しているものと、2) タイタン形成前後に生じたもの、とに分けることができる。特に微量分子においては1) が顕著であり、その分別過程の解明は、過程の解明そのものが目的であり、形成時の温度環境や位置の制約といった形成史の研究とは独立して扱うことが適当な場合もある。

3.3 彗星

ALMAの高空間分解能は、彗星コマにおける微量分子群とダストの空間分布の導出を可能にした。図4に示すように、C/2012 F6 (Lemmon) においては、連続波と HCN 分子輝線の強度がコマ中心から離れるに従って低減するのに対し、 HNC 分子輝線は空間的に非対称な構造を、 H_2CO 分子輝線は HCN と連続波よりも広がった構造を呈した [43]。これは、 HCN が主に核から放出されており、始原的な分子種である一方、 HNC と H_2CO は光化学反応により生成されていることを示している。なお、同時期に観測されたC/2012 S1 (ISON) では HNC の非対称な分布は検出されておらず、 H_2CO はC/2012 F6 (Lemmon) 同様の広がった分布を示した。こうした彗星間の差異については理解の端緒についたばかりという状況である。また、両彗星についてはダスト・ガス量の数十分単位での活発な時間変動もALMAにより検出されている [59]。

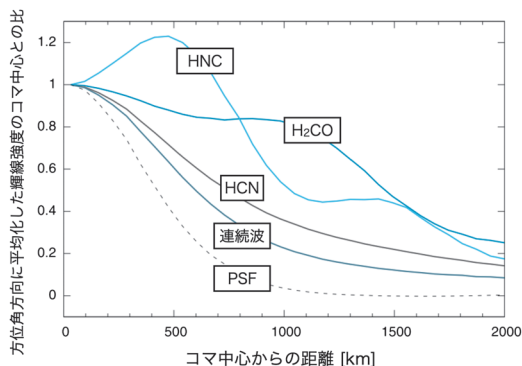


図4 彗星C/2012 F6 (Lemmon)における連続波強度と微量分子群輝線強度の動径分布 [43]. HNCと H_2CO 分子は他分子と連続波より広がった構造を呈し、コマ内での光化学反応に由来する非原始的分子であることが示唆される。

さらに、恒星間天体である2I/Borisovの観測では、 $[\text{CO}]/[\text{H}_2\text{O}]$ が0.35–1.05と、それまでに観測されたどの彗星よりも高いこと、一方で $[\text{HCN}]/[\text{H}_2\text{O}]$ は典型的な値であることが示された [60].

3.4 その他

ALMAの高感度観測は、冥王星におけるCO、HCNの検出 [61] と、その空間分布の導出およびHNCの検出 [62] という成果をもたらした。冥王星の地表付近は $\sim 40\text{ K}$ という極低温のため、気相で存在できる分子は N_2 、 CH_4 とCOのみであり、他の窒素化合物は N_2 を起点とする化学過程によって生成される。実際に、輝線形状から導出されたHCN分子の鉛直分布は、地表から高度600 kmまで増大し、600 km以上では一様というものであった。だが、冥王星の大気構造を考慮すると、導出された分圧では、HCNは極端な過飽和状態にあることが示された。この過飽和の存在は、極低温・低圧における大気ガス分子の在り方としても大変興味深い結果である。過飽和を維持する機構として、冥王星の上層大気環境下における結晶核の不在、極端に低い凝結速度などが提案されている。ニューホライズンズ探査機の探査では冥王星大気中に水平方向に一様なヘイズ（もや）の存在が明らかにされており、そのヘイズの

生成・消滅と大気微量成分の存在量をモデル化する試みも現在進められている。また、HNCの混合比はHCNの10%程度であった。この $[\text{HNC}]/[\text{HCN}]$ 比はタイタン上層の値と同程度であり、両天体で類似した化学過程の存在が示唆された。特にタイタン上層大気でのイオン-分子反応については [23] に詳しいが、本稿執筆時では実験されていない反応係数も多く、まだまだタイタン、冥王星の大気化学の理解に向けた観測・理論・実験の積み重ねが待たれる。

また、名古屋大学の古賀亮一氏により、イオの SO_2 が地表の火山・溶岩付近に偏在していることが示され [63]、その起源のさらなる制約につなげている。

4. 最後 に

本稿は、筆者の知る限り国内で初めて、木星以遠天体のミリ波・サブミリ波観測について大気化学的な視点で網羅的にまとめたものとなった。本稿を通して、太陽系アストロケミストリーという研究分野を概観することを意識して執筆した。網羅すべき内容が広く、総花的になってしまった部分もあるが、国内で活発に展開されている星間空間化学研究と太陽系研究との橋渡しができればと考えている。特に今年度からは同様の趣旨の科研費や、大型サブミリ波望遠鏡 (LST) での観測計画検討などの新プロジェクトも走り出しており、多くの方々のご助力をいただきながら、ミリ波・サブミリ波観測での太陽系アストロケミストリー研究に取り組んでいきたい。

謝 辞

本稿執筆の貴重な機会をいただきました、東京都市大学の津村耕司氏に感謝申し上げます。本稿を今後の学際研究の発展に活用させていただければと考えております。Figure 1 to 4 were reproduced by permission of the AAS.

参考文献

- [1] Cordiner, M. A., et al., 2019, ApJ, 870, L26
 [2] Rosenqvist, J., et al., 1992, ApJ, 392, L99
 [3] Marten, A., et al., 1993, ApJ, 406, 285
 [4] Lellouch, E., 1994, Icarus, 108, 255
 [5] Lellouch, E., et al., 2005, A&A, 430, L37
 [6] Hesman, B. B. E., et al., 2007, Icarus, 186, 342
 [7] Lellouch, E., et al., 1997, Planet. Space Sci., 45, 1203
 [8] Lellouch, E., et al., 1995, Nature, 373, 592
 [9] Moreno, R., 1998, Ph.D. dissertation
 [10] Moreno, R., et al., 2001, Planet. Space Sci., 49, 473
 [11] Moreno, R., et al., 2003, Planet. Space Sci., 51, 591
 [12] Matthews, H. E., et al., 2002, ApJ, 580, 598
 [13] Iino, T., et al., 2016, PASJ, 68, L1
 [14] Iino, T., et al., 2014, Planet. Space Sci., 104, 211
 [15] Cavalié, T., et al., 2013, A&A, 553, A21
 [16] Kunde, V. G., et al., 1981, Nature, 292, 686
 [17] Coustenis, A., & Bézard, B., 1995, Icarus, 115, 126
 [18] Hidayat, T., et al., 1997, Icarus, 126, 170
 [19] Marten, A., et al., 2002, Icarus, 158, 532
 [20] Gurwell, M. A., & Muhleman, D. O., 1995, Icarus, 117, 375
 [21] Gurwell, M. A., 2004, ApJ, 616, L7
 [22] Liang, M.-C., et al., 2007, ApJ, 664, L115
 [23] Vuitton, V., et al., 2019, Icarus, 324, 120
 [24] Bockelée-Morvan, D., 2000, A&A, 353, 1101
 [25] Meier, R., et al., 1998, Science, 279, 1707
 [26] Hirota, T., et al., 1999, ApJ, 520, 895
 [27] Biver, N., 1997, Science, 275, 1915
 [28] Bockelée-Morvan, D., et al., 2008, ApJ, 679, L49
 [29] Moullet, A., et al., 2008, A&A, 482, 279
 [30] Moullet, A., et al., 2010, Icarus, 208, 353
 [31] Moullet, A., et al., 2013, ApJ, 776, 32
 [32] Wierzchos, K., et al., 2017, AJ, 153, 230
 [33] Bockelée-Morvan, D., et al., 2001, A&A, 377, 343
 [34] Greaves, J. S., et al., 2009, MNRAS, 397, 757
 [35] Cavalié, T., et al., 2009, Icarus, 203, 531
 [36] Cavalié, T., et al., 2010, A&A, 510, A88
 [37] Cavalié, T., et al., 2014, A&A, 562, A33
 [38] Hartogh, P., et al., 2011, A&A, 532, L2
 [39] Moreno, R., et al., 2017, A&A, 608, L5
 [40] Iino, T., et al., 2020a, ApJ, 903, L1
 [41] Cavalié, T., et al., 2021, A&A, 647, 8
 [42] Irwin, P. G. J., et al., 2008, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf., 109, 1136
 [43] Cordiner, M. A., et al., 2014, ApJ, 792, L2
 [44] Cordiner, M. A., et al., 2018, ApJ, 859, L15
 [45] Thelen, A. E., et al., 2018, Icarus, 307, 380
 [46] Thelen, A. E., et al., 2019a, Icarus, 319, 417
 [47] Cordiner, M. A., et al., 2015, ApJ, 800, L14
 [48] Palmer, M. Y., et al., 2017, Sci. Adv., 3, e1700022
 [49] Cordiner, M. A., et al., 2020a, ApJ, 904, L12
 [50] Nixon, C. A., et al., 2020, AJ, 160, 205
 [51] Iino, T., et al., 2020b, ApJ, 890, 95
 [52] Dobrijevic, M., & Loison, J. C., 2018, Icarus, 307, 371
 [53] Taniguchi, K., et al., 2016, ApJ, 830, 106
 [54] Furuya, K., et al., 2011, ApJ, 731, 38
 [55] Iino, T., et al., 2021, The Planetary Science Journal, 2, 166
 [56] Serigano, J., et al., 2016, ApJ, 821, L8
 [57] Molter, E. M., et al., 2016, AJ, 152, 42
 [58] Thelen, A. E., et al., 2019b, AJ, 157, 219
 [59] Cordiner, M. A., et al., 2017, ApJ, 837, 177
 [60] Cordiner, M. A., et al., 2020b, Nat. Astron., 4, 861
 [61] Lellouch, E., et al., 2017, Icarus, 286, 289
 [62] Lellouch, E., et al., 2022, Icarus, 372, 114722
 [63] Koga, R., et al., 2021, ApJ, 907, L6

Advances of the Astro-chemistry in the Solar System with Millimeter and Submillimeter Wave Observations

Takahiro IINO and Hideo SAGAWA

Information Technology Center, the University of Tokyo, 6-2-3 Kashiwanoha, Kashiwa-shi, Chiba 277-0882, Japan

Abstract: Technical innovations on the ground- and space-based millimeter/sub-millimeter spectroscopic observation instruments such as ALMA have played key roles on the understanding of gas-phase chemistry on various solar system objects such as planets, satellites and small objects. In this article, we attempt to illustrate the overview of the big picture of solar system astro-chemistry driven by the millimeter/submillimeter observation techniques.