



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	彗星核の均質性および彗星氷中の分子の起源について
Author(s)	河北, 秀世; 小林, 仁美
Description	3章 惑星における氷の物理と化学
Citation	低温科学, 66, 89-95
Issue Date	2008-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/34717
Type	departmental bulletin paper
File Information	KAWAKITA.pdf





彗星核の均質性および彗星氷中の分子の起源について

河北 秀世 京都産業大学・理学部, 小林 仁美 京都産業大学・理学研究科

彗星は、46 億年前の太陽系形成初期に形成された氷小天体の残存物であり、太陽による加熱等の影響をほとんど受けていない始原天体である。本稿では、筆者らの最近の研究成果を中心にして、彗星核の均質性、起源、形成環境などについて述べる。特に、多くの破片に分裂した Schwassmann-Wachman 3 彗星の観測結果から分裂前の彗星核の均質性について議論すると共に、Machholz 彗星の観測結果から得られた分子の原子核スピン温度や重水素／水素比を手がかりとして彗星物質の起源について議論する。

1. はじめに

私たちの太陽系は、約 46 億年前にガス（および固体微粒子）からなる分子雲中に形成された密度の高いコア（分子雲コア）が重力的に収縮した結果、誕生したと考えられている。一般に、分子雲中に生じた分子雲コアが重力収縮した結果、その中心には原始星が誕生し、その周りにガスと固体微粒子からなる円盤（原始惑星系円盤）が形成されると考えられており、私たちの太陽系の起源も同様であるらしい。特に太陽系の場合の原始惑星系円盤を、「原始太陽系星雲」と呼ぶ事が多い。周囲の分子雲コアからのガスおよび固体微粒子の降着が収まるにつれ、原始太陽系星雲中では、固体微粒子が円盤の赤道面に沈殿し、「微惑星」と呼ばれるキロメートル・サイズの小天体が形成されたと考えられている。これら微惑星が互いに衝突・合体することにより、現在の太陽系に存在する惑星や準惑星が形成されたと考えられる。しかし、すべての微惑星が惑星・準惑星の形成に寄与したわけではなく、特に木星や土星などの巨大惑星の軌道付近に存在した微惑星は、重力的に強く散乱されて太陽から遠方へと至る軌道に「進化」したと考えられる。場合によっては、重力散乱の影響が大きすぎて太陽系外へ放逐され、あるいは逆に原始惑星に衝突して惑星形成に寄与した微惑星もあっただろう。こうした大惑星の形成領域は太陽からの距離が遠いため、温度が十分に低く、 H_2O をはじめ様々な成分の水が存在していたと考えられる。つまり、大惑星領域に存在した微惑星は水を含んでおり、氷と塵からなる「汚れた雪玉」とも言うべき小天体だったのである。特に、大惑星との接近によって軌道が変化し、太陽系外縁部まで異動してしまった氷微惑星は、太陽以外（太陽系が属する銀河系全体、あるいは太陽近傍の恒星や分子雲など）からの重力的な影響をうけて、更に軌道が変化する。こうして、太陽を中心とした半径約 1 万から

10 万天文単位（AU：1 天文単位は約 1 億 5 千万キロメートル）の球殻状の水微惑星分布が形成されたと考えられている。これらの氷微惑星のうちのいくつかは、銀河系全体、あるいは太陽の近くを通りすぎた恒星や巨大分子雲等による重力的な影響のため、再び太陽に近づくような軌道へと進化することがある。その結果、氷微惑星は太陽光を吸収して温度が上昇し、氷が昇華してガスとなって放出される（と同時に氷微惑星中の塵も宇宙空間へと放出される）。こうして氷微惑星がガスや塵を放出している状況をして、この天体を「彗星」と呼ぶ。通常、太陽系内を運動する惑星（および準惑星）以外の天体で、ガスや塵の放出を行う小天体を彗星と呼んでいる。

また、これらの球殻状分布とは別に、惑星に成長しきれなかった大量の水微惑星が、海王星軌道（太陽から約 30 天文単位離れている）よりも外側に大量に残存していることが分かっている。この領域にある氷微惑星も、海王星など大惑星の重力的影響によって軌道が徐々に変化し、一部は再び太陽系内部へと至る軌道に進化する。この場合にも先程と同様にガスと塵の放出が生じ、彗星として認識される。

通常、半径 1 万から 10 万天文単位にもおよぶ球殻状の水微惑星の分布を「オールト雲」、惑星の軌道面近く、海王星軌道より外側に存在する氷微惑星の円盤状分布を「カイパー・ベルト」と呼び、彗星の二大供給源であるとされている。このような供給源の存在は多くの彗星の軌道を分析して分かった事である。以降、「オールト雲起源」、「カイパー・ベルト起源」と呼ぶ時には、力学的な供給源を意味するものとする。そして、これら力学的起源と、そもそもの彗星物質の起源（どのような環境で彗星分子が作られたか）とは区別することにしよう。

ガスや塵の放出といった彗星を特徴付ける活動は、彗星の中心に存在する核（すなわち氷微惑星の残存物）における氷の昇華が原因である。そのため、太陽の周囲を

幾度も巡る間に彗星核は次第に質量を失い、最後は分裂・消滅、枯渇といった運命をたどると考えられる。その期間は太陽系誕生から現在までの時間に比べれば非常に短く(数百万年程度と見積もられる)、現在観測される彗星は、46億年前の誕生以来ほとんどの時間を太陽から遠くはなれた場所で過ごし、比較的最近になって太陽系内部まで至る軌道に進化したものと考えられている。つまり、彗星は太陽系形成初期の水や塵を現代に届けてくれる「過去からのメッセンジャー」なのである。

本稿では、特に彗星に含まれる水に焦点を絞り、そこに含まれる様々な情報から、彗星および彗星氷物質の起源について議論する。

2. 彗星核の均質性と微惑星形成

彗星核に含まれる水の成分については、昇華したガスの発光を分光分析するという手法によって調べられてきた(彗星核から昇華したガスの作る大気をコマと呼ぶ)。最も初期には可視光線による観測が中心であったが、その場合に観測できる分子は、彗星核から昇華した分子が太陽紫外線によって光解離した反応生成物がほとんどである。彗星核から直接放出されたガスの観測は、主に赤外線・電波領域で、分子の振動遷移や回転遷移による輝線を観測することで行われる。そうした結果、彗星氷の成分比(通常、彗星氷の主成分である H_2O に対する相対比)が、彗星ごとに異なっていることが分かってきた。あるものでは揮発性の高い水成分が欠乏していたり、またあるものでは炭素を含む有機分子が豊富であったりと、非常に個性豊かである¹⁾。ただし、このような差異が、彗星核中の氷成分に関する非均質性に起因する可能性もある。こうした彗星核内部の非均質性については、彗星核の形成とも関連して重要であると認識されてきたが、観測上の困難から、これまでほとんど研究されてこなかった。この難問を解決する一つの方法は、彗星核を直接探査することである。

2005年にNASAが行ったDeep Impact計画では、探査機から彗星核に衝突機をぶつけ、内部からの放出物を直接観測するという実験が行われた。その結果、衝突放出物の氷組成比と、衝突前の観測から得られた氷組成比とでは、一部の分子について差異が見られた²⁾。すなわち、通常の状態の水が昇華している部分と、衝突機がぶつかった部分とでは、組成比が異なっていた可能性がある。このような非均質性は、探査機による詳細な観測からも示唆されている³⁾。

こうした非均質性へのヒントは、他の彗星でも観測さ

れうるのだろうか? Deep Impact計画は、ある特定の彗星について行われたのみである。そこで、Deep Impact実験の翌年、もともと一つの彗星核だったものが多数の核に分裂したSchwassmann-Wachmann 3(シュバスマン・バハマン第3)彗星の観測が世界中で実施された。

シュバスマン・バハマン第3彗星(以後、SW3彗星)は、1995年に分裂が確認された周期約5.5年の彗星である。2006年に太陽に近づいた際には60個以上もの分裂核が確認された。こうした一つ一つの分裂核は独立した彗星として観測されており、個別の分裂核彗星の氷組成比を比較することで、もともとなっていた彗星核内部の均質性を探ることができる。筆者たちの研究グループでは、近赤外線波長域における有機分子の分光観測を行い、分裂彗星核同士の氷組成比を比較した⁴⁾。

観測は2006年5月に米国ハワイ島のマウナケア山の山頂(標高約4200 m)に設置された国立天文台ハワイ観測所のSubaru望遠鏡を用いて行われた。この望遠鏡は光を集める鏡の直径が8.2 mあり、世界最大級の口径を誇る。観測ではIRCSと呼ばれる装置を使用し、波長3 μm 付近のスペクトルを得た。標高が高いことから地球大気による吸収を避けることができ、スペクトル中には彗星からの分子輝線が捉えられた。図1は、得られたスペクトルの一例である。今回観測したのはSW3彗星の

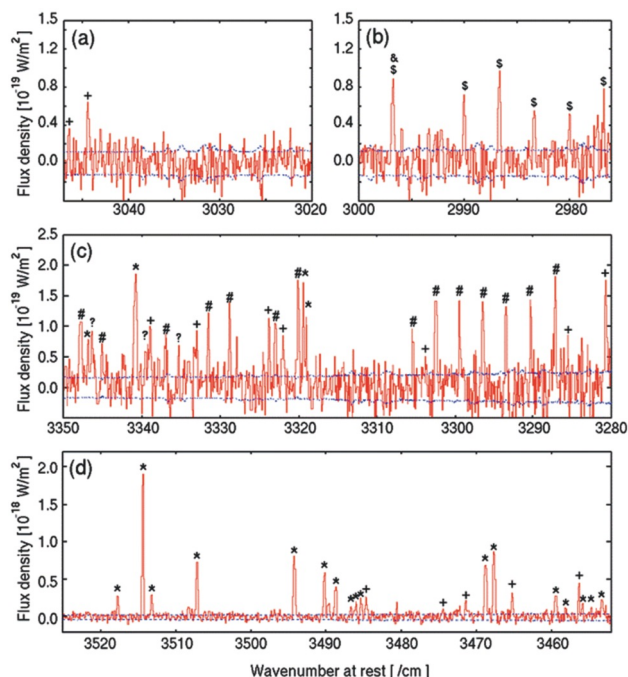


図1: SW3彗星B核の近赤外高分散分光スペクトル⁴⁾ H_2O (*印), OH (+印), HCN (#印), C_2H_6 (\$)印などの検出に成功した。コマ中のガスの回転温度は、120~130 K程度と求められ、得られた氷組成比はC核の値と観測誤差範囲で一致している。

分裂核のうち、B核と呼ばれるものである。我々の観測時には、最も明るい分裂核であるC核は既にKeck2望遠鏡によって近赤外分光観測がなされており、筆者らは少し暗めのB核に焦点を絞った。幸いなことに筆者らの観測時にB核は突如、急増光し（バースト現象）、高いSN比のスペクトルを得ることができた。ちなみに、バースト中の彗星を高分散近赤外分光観測で捉えた例は、筆者らの観測が初めてである。

表1に私たちの結果を含めてSW3彗星と他の彗星などとの比較を掲載した。これらの結果から、SW3彗星の彗星核について、以下のようなことが考えられる。

- SW3彗星のB核とC核は、共に C_2H_6 や C_2H_2 が(H_2O に対する比として見ると)極度に欠乏しているという特徴があり、他の分子組成比もほぼ一致している。もともとのSW3彗星の核は比較的均質な氷組成比を持っており、彗星核は比較的似たような環境で作られた氷微惑星の集合体であるという可能性が高い。
- 力学的には、SW3彗星もDeep ImpactのターゲットとなったTempel 1彗星も、共にカイパー・ベルトからやってきたと考えられている。しかし、 C_2H_2 がSW3彗星で極端に欠乏していることや、 CH_3OH などの組成比⁵⁾についての比較から、これらの氷微惑星は異なる環境下で作られたものである可能性が高い。

彗星核の均質性については、SW3彗星では均質性を支持しているが、前述のようにDeep Impact計画のターゲットであったTempel 1彗星では非均質な核モデルが支持されるなど、現状でも十分な理解は得られていない。もっとも、Tempel 1彗星の核表面に見られた非均質性が先天的なものであるかどうか、今後も検討が継続されるべきだろう。また、極度に有機分子が欠乏しているSW3彗星は、通常のカイパー・ベルト起源の彗星とは異

なる領域(比較的本星に近い、暖かな領域)で形成された微惑星の残存物であり、微惑星集積の状況も通常のカイパー・ベルト起源の彗星とは異なっていたという可能性もある。SW3彗星が頻繁に分裂をしていることも、こうした特徴に関係しているのかもしれない⁴⁾。SW3彗星と同様な有機分子欠乏タイプの彗星であったC/1999 S4 (LINEAR)彗星も、やはりバラバラに分裂して消滅してしまっている⁶⁾。今後、太陽系形成初期における微惑星の集積、衝突・合体等の力学的シミュレーションを通じて、彗星核の非均質性と微惑星形成領域との関係について理解が進むと考えられる。

3. 彗星分子の原子核スピン異性体比

彗星氷中の分子がどのような環境で形成されたかを探るため、筆者らのグループではH原子を対称な位置に持つ分子(H_2O , NH_3 , CH_4 など)の原子核スピン異性体(Nuclear Spin Modification)に着目した研究を行っている。水素原子核(つまり陽子)はフェルミ粒子であり、等価な二つのフェルミ粒子の交換操作に対して、分子全体の波動関数は反対称でなくてはならない。このため、特定の電子・振動・回転状態は、原子核スピンの特定の組み合わせ(あるいは特定の全原子核スピン: I)に対応する。 H_2O 分子の場合には、二つの水素原子核が持つ核スピンの平行($I = 1$)か反平行($I = 0$)かによって分類され、前者をオルソ H_2O 、後者をパラ H_2O と称する。これらの原子核スピン異性体は、気相中では放射遷移による相互遷移が禁止されており、彗星氷中での変換時間も非常に長いと考えられている(ただし残念ながら固体中での核スピン変換に関する実験は十分ではない⁷⁾)。そのため、オルソ H_2O とパラ H_2O の組成比は、分子が生成された、あるいは彗星氷中に捉えられた時点でのプロセスに依存していると考えられる。これまでに様々な観点から議論が行われており、少なくとも彗星核中や彗星核からの昇華過程における原子核スピン変換、彗星コマの中での化学反応等によるオルソ/パラ比の変化は難しいと考えられている。そこで、観測されたオルソ/パラ比を熱力学的平衡状態で実現するような温度を考え、これを「原子核スピン温度」と称する。この原子核スピン温度は、分子生成か氷形成時の温度に対する目安となるだろう。温度が十分に高いと、オルソ/パラ比は原子核スピンの統計重率で決まる値へ収束するが、 H_2O の場合、50 K以下では温度に依存して変化しており、温度計の役割を果たすことが分かる(図2)。

もしも分子が塵表面化学反応で生成されており、分子

表1: SW3彗星B核と他の彗星の比較^{2,4,5)}

	HCN/ H_2O	C_2H_6 / H_2O	C_2H_2 / H_2O
SW3B	0.3%	0.2%	<0.1%
SW3C	0.2~0.3%	0.1~0.2%	0.05%
OC*)	0.2~0.3%	0.6%	0.2~0.3%
Tempel 1*) D.I. 前	0.2%	0.2%	—
Tempel 1*) D.I. 放出物	—	0.6%	—

*) OC: オールト雲起源の彗星, D.I.: Deep Impact

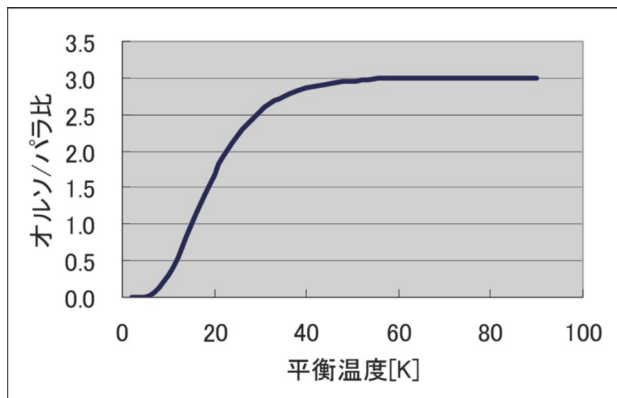


図2：平衡温度とオルソ／パラ比の関係
平衡温度（つまり，原子核スピン温度）が上がるに従って統計重率比3に近づき，50 K以上になると，ほぼ3となっている．そのため，オルソ／パラ比を温度プローブとして用いることが出来る範囲はおよそ 50 K 以下ということになる．

生成時に熱力学的平衡状態が達成されていたとすると，原子核スピン温度は，塵の物理温度を反映すると思われる．また，分子が固体微粒子上に吸着する際に，オルソとパラの選択的吸着が生じ，彗星水中のオルソ／パラ比が原子核スピンの統計重率比から外れてしまっている可能性もある（ H_2O の場合，振動基底状態において最も低いエネルギーを持つ準位はパラ H_2O に属しており，より回転エネルギーの小さなパラ H_2O の方が，オルソ H_2O よりも固体表面に吸着しやすいと考えられる）．この場合も固体微粒子の温度に対するプローブとなりうる．

これまでに，いくつかの彗星について H_2O や NH_3 などの原子核スピン温度が得られており，およそ 30 K 程度である．C/2001 Q4 (NEAT) 彗星においては，初めて H_2O , NH_3 , CH_4 の三つの分子について原子核スピン温度が得られ，それらがすべて誤差範囲で一致するという結果が得られた．その温度は，やはり 30 K 程度であった⁸⁾．星間空間では， H_2O , NH_3 , CH_4 は主に塵表面上で作られると考えられる．そのため，これらの分子から得られる原子核スピン温度が一致するという事は，彗星分子が約 30 K 程度の固体微粒子表面で作られたという先の仮説と矛盾しない．分子の吸着の際に固体微粒子の温度に応じてオルソ／パラ比が決まったという考えについては， H_2O , NH_3 , CH_4 で昇華温度が大きく異なることから，同じ温度環境で吸着が起こったとは考え難い．

原子核スピン温度は，従来，主にオールト雲起源の彗星について求められており，多くの彗星で 30 K 前後の値が得られていた．しかし，前出の SW3 彗星（カイパー・ベルト起源）においては，それよりも有意に高い温度が

得られている^{5,9)}．カイパー・ベルト起源の彗星については，過去に赤外線衛星 ISO による H_2O の観測例が一つあるが，このターゲットとなった彗星は，化学組成の観点からオールト雲起源ではないかと考えられており，注意が必要である．また， NH_3 の場合について原子核スピン温度の下限値もあるが，30 K よりも有意に高いとはいえない．SW3 彗星における結果は，原子核スピン温度の解釈や，彗星物質の起源について新たな問題を提示している．

一方，オールト雲起源の彗星である C/2004 Q2 (Machholz) 彗星においても， H_2O のオルソ／パラ比が 30 K よりも高い値をもつ可能性が得られた^{10,11)}．残念ながら， H_2O のオルソ／パラ比を求めるために用いている H_2O 分子の発光モデルの精度が十分ではないために，得られる結果にも誤差が大きい（モデルに必要な遷移確率の一部が実験室で得られていないため）．そこで，精密な発光モデルの構築が容易な CH_4 について原子核スピン温度

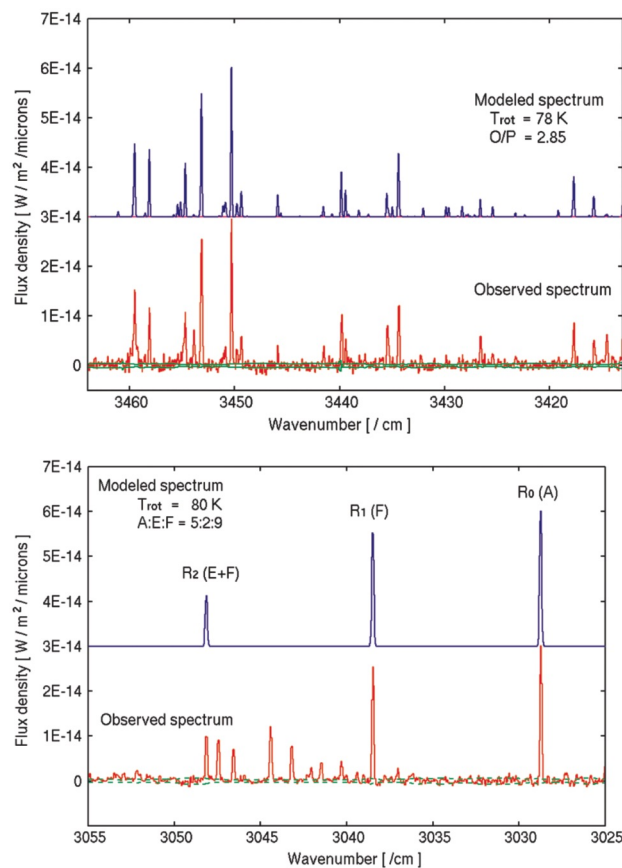
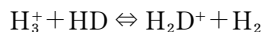


図3：C/2004 Q2 (Machholz) 彗星の H_2O (上) と CH_4 (下) の輝線スペクトル．各パネルで上側のスペクトルがモデル計算によるもの，下のスペクトルが観測より得られたものである．鎖線は観測の誤差範囲を示している． H_2O の輝線は波長 2.9 ミクロン付近のホット・バンドと呼ばれる振動遷移であり，遷移に関連する状態が二つとも振動励起状態である． CH_4 の輝線は基本振動 (ν_3) の振動遷移によるものである．

を求めた¹¹⁾。図3は、H₂OとCH₄の輝線スペクトルについて観測とモデルの比較をしたものである。観測から得られたCH₄の原子核スピン温度下限値は約40 Kであり、ほぼ原子核スピンの統計重率比で観測結果を説明できる。そして、この下限値はH₂Oにおける結果とも調和的である。このように、オールト雲彗星といえどもSW3彗星同様に高い原子核スピン温度を示すものが見つかり、彗星分子の原子核スピン異性体については更に謎が深まったと言える。

4. 彗星分子の重水素／水素比

先の章で述べた彗星分子の原子核スピン温度は、その解釈を巡って現在も議論が続いている¹²⁾。そこで、原子核スピン温度よりも解釈が容易な物理量から、同様に温度を見積もることが望ましい。そこで登場するのが、重水素である。分子生成に関与する一連の化学反応の中で、通常の水素が重水素に置き換わってしまうことがある。例えば、星間空間ではH₃⁺イオンが物質の化学進化に重要な役割を果たすが、このイオンは、



という反応によって重水素化される。反応は左から右へ向かう方向にわずかに発熱反応となっており、星間空間のような低温度環境では反応は右側へ促進される傾向にある。このため、様々な状態で存在する全ての水素原子と重水素原子の個数比：[D]/[H]比は（同様に[HD]/[H₂]比も）10⁻⁵程度だが、[H₂D⁺]/[H₃⁺]比はそれよりも大きくなる。このような重水素濃集の程度は、反応場の温度に依存すると共に、関与する化学反応にも依存している。先に述べたようにH₂Oなどの生成には塵表面反応が関与している可能性が高く、気相中でのイオン・分子反応だけで語ることはできないが、重要な温度プローブであることは間違いないだろう。

彗星の水分子における重水素／水素比（D/H比）は、[HDO]/[H₂O]×(1/2)と定義される。Halley彗星、Hyakutake彗星、Hale-Bopp彗星といった明るい彗星の観測（探査機によるin situおよび地上からのサブミリ波電波観測など）によって、これらの彗星についてD/H～3×10⁻⁴という値が得られている¹⁾。私たちの太陽系の元になった原始太陽系星雲における[D]/[H]比は2～3×10⁻⁵程度であると考えられており、およそ10倍程度の重水素濃集が起こっていることになる。さらに、Hale-Bopp彗星ではシアン化水素の重水素体も観測され、[DCN]/[HCN]の値が2×10⁻³と得られている。

およそ100倍の濃集に相当する。残念ながらこれ以外の分子についてはD/H比は求められていない。また、最近では、C/2004 Q2 (Machholz) 彗星において、水分子のD/H比が有意に3×10⁻⁴よりも小さいという観測結果が得られており¹³⁾、彗星ごとのバリエーションが存在する可能性がある。

そこで我々のグループでは、メタン分子のD/H比に着目した。メタンCH₄は球対称コマであり、永久電気双極子モーメントがゼロであるため放射による回転遷移は存在しない。そのためCH₄の観測は赤外領域の振動遷移による。メタンの重水素化体であるCH₃Dも永久電気双極子モーメントが小さく、電波領域での観測は困難である。幸い、CH₃Dも赤外領域に強い振動遷移を持ち、CH₄とCH₃Dの同時観測が可能となっている¹⁴⁾。我々のグループではC/2004 Q2 (Machholz) 彗星をKeck2望遠鏡で観測し、近赤外線領域の高分散スペクトルを得ており、その中からCH₃Dの輝線を探す事にした。観測時、彗星コマのガス温度はおよそ80 Kと推定されていたので（H₂O、HCN、CH₄などの回転温度より）、CH₃Dについても回転温度＝80 Kを仮定し、その温度で強く発光する輝線を集中的に探した。その結果、最も強く発光すると考えられる⁸R₃(3)というν₄振動バンドの回転遷移について、輝線候補が見つかったのである。輝線の中心波長は実験室の測定とよく合っており、CH₃Dの可能性が高い。また、このラインの強度を仮定した場合、他のCH₃Dのラインは今回の観測データではノイズレベル以下となってしまう、検出できないことも確認した。検出された輝線候補がCH₃D由来だと仮定すると、メタン分子のD/H比が得られる。その値は～6×10⁻³となった。

一方、サブミリ波の電波観測からは、水分子のD/H比として過去の観測結果（～3×10⁻⁴）よりも小さな上限値（2.2×10⁻⁴）が得られている¹³⁾。これらの結果と、先の原子核スピン温度の結果などをまとめたのが図4である。図中には、暗黒星雲中におけるイオン・分子反応の結果が、温度と共にプロットされている¹⁵⁾。分子種によって反応経路が異なるため、達成される重水素濃集の程度も異なっていることが分かる。

図4より、C/2004 Q2 (Machholtz) 彗星は、比較的高い温度環境（>40 K）での化学進化の結果作られた物質を取り込んでいたと考えられる。一方、D/H比が水とシアン化水素の両方で測定されたHale-Bopp彗星では、観測で得られたD/H比はともに～30 Kという温度でのモデル計算結果に近かった¹⁵⁾。Hale-Bopp彗星ではH₂OやNH₃の原子核スピン温度も28 K程度と得られてお

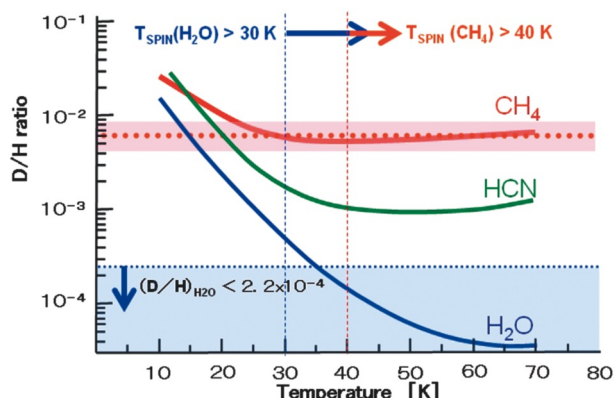


図4：暗黒星雲中のイオン・分子反応を仮定したD/H比対温度曲線（水，シアン化水素，メタン）。反応経路が異なるため，分子の種類によって同じ温度でもD/H比が異なることが分かる．図中の温度やD/H比はC/2004 Q2 (Macholz) 彗星の観測から得られた値．典型的なオールト雲起源彗星については，原子核スピン温度やD/H比から分子生成環境について約30 Kという温度が示唆されるが，この彗星の場合，D/H比も原子核スピン温度も比較的高い温度範囲を示唆している．

り，D/H比の結果と調和的である¹⁶⁾．

原子核スピン温度やD/H比という観点で見ると，通常のオールト雲彗星が～30 Kという温度を示すのに対し，どうしてC/2004 Q2 (Macholz) 彗星はより高い温度範囲を示したのだろうか（注：このMacholz彗星も，オールト雲彗星の一員である）．原始太陽系星雲中の化学進化が，その場所での温度（つまり太陽からの距離）に依存しており，そうしてできた物質を彗星（つまり微惑星）が最終的に取り込んでいたのかもしれない．現在，この彗星における様々な分子の組成比や，H₂CO，C₂H₂の原子核スピン温度などについても解析を進めている最中である．

5. まとめ

彗星を通して46億年前の太陽系形成初期の情報を探るという試みは，ここ10年で大きく進んできたように思える．その多くは，やはり明るい彗星の登場であり，Deep Impactに代表されるようなスペース・ミッションの実行にあった．現在，欧州宇宙機関（ESA）により，ROSETTAミッションが遂行中である．このミッションでは彗星核への着地を含めた，「その場（in situ）」観測が中心であり，彗星核の内部について更に多くの知見が得られるに違いない．それと共に地上からの観測も着実に新しい謎を解明し，また新しい謎を生み出している．

本稿では，ここ数年の彗星科学のトピックスについて，主に氷中に含まれる様々な分子から，その起源を探ろう

とする試みについて紹介した．特に筆者らの行っている原子核スピン異性体の研究や，メタン分子の重水素化体について紹介している．重水素化体の検出は，彗星に取り込まれた分子の化学進化を考える上で重要な役割を果たすと期待される．そして，これらの観測結果を解釈するためにも，塵表面反応を含めた現実的な化学進化モデルの構築が今後の課題である．観測という立場からは，更に多くのサンプルを集める必要があると思われる．

参考文献

- 1) D. Bockelée-Morvan, J. Crovisier, M. J. Mumma, H. A. Weaver, COMETS II, eds. M. C. Festou, H. U. Keller, & H. A. Weaver, Tucson, University of Arizona Press, 2004, p.391.
- 2) M. J. Mumma et al., Science **210** (2005), p.270.
- 3) L. M. Feaga, M. F. A'Hearn, J. M. Sunshine, O. Groussin, T. L. Farnham, Icarus **191** (2007), p.134.
- 4) H. Kobayashi, H. Kawakita, M. J. Mumma, B. P. Bonev, J. Watanabe, & T. Fuse, Astrophys. J. **668** (2007), p.L75.
- 5) N. Dello Russo, R. J. Vervack, H. A. Weaver, N. Biver, D. Bockelée-Morvan, J. Crovisier, & C. M. Lisse, Nature **448** (2007), p.172.
- 6) M. J. Mumma, N. Dello Russo, M. A. DiSanti, K. Magee-Sauer, R. E. Novak, S. Brittain, T. Rettig, I. S. McLean, D. C. Reuter, & Li-H. Xu, Science **292** (2001), p.1334.
- 7) 河北秀世, 放射線化学 83号 (2007), p.36.
- 8) H. Kawakita, N. Dello Russo, R. Furusho, T. Fuse, J. Watanabe, D. C. Boice, K. Sadakane, N. Arimoto, M. Ohkubo, & T. Ohnishi, Astrophys. J. **643** (2006), p.1337.
- 9) B. P. Bonev et al. (submitted to Icarus).
- 10) B. P. Bonev, M. J. Mumma, G. L. Villanueva, M. A. Disanti, R. S. Ellis, K. Magee-Sauer, N. Dello Russo, Astrophys. J. **661**, p.L97.
- 11) H. Kawakita & H. Kobayashi, American Astronomical Society, DPS meeting (2007), #39, #53.13 (Poster).
- 12) J. Crovisier (2007), astro-ph/0703785v1.
- 13) N. Biver, D. Bockelée-Morvan, et al., in abstract book of Asteroids, Comets, Meteors 2005, IAU Symp. No **229** (2005), p.43.
- 14) H. Kawakita & J. Watanabe, Astrophys. J. **582**

- (2003), p.534.
- 15) R. Meier, T. C. Owen, D. C. Jewitt, H. E. Matthews, M. Senay, N. Biver, D. Bockelee-Morvan, J. Crovisier, & D. Gautier, *Science* **279** (1998), p.1707.

- 16) H. Kawakita, J. Watanabe, R. Furusho, T. Fuse, M. T. Capria, M. C. DeSanctis, *Astrophys. J.* **601** (2004), p.1152.

(2007 年 12 月 17 日 改訂受付)

Origin of Cometary Ices:Composition, Nuclear Spin Modifications, and Deuterium-to- Hydrogen Ratio in Cometary Molecules

Hideyo Kawakita,
Department of Physics, Faculty of Science, Kyoto Sangyo
University, Motoyama, Kamigamo, Kita-ku, Kyoto 603-
8555, Japan

Hitomi Kobayashi
Department of Physics, Faculty of Science, Kyoto Sangyo
University, Motoyama, Kamigamo, Kita-ku, Kyoto 603-
8555, Japan

abstract:

Recently we performed near-infrared high dispersion spectroscopic observations of two bright comets, C/2004 Q2 (Machholz) and a nucleus “B” of 73P/Schwassmann-Wachmann 3 (SW3). The former was very bright and it allowed us to obtain very high-S/N ratio spectra. We extracted H₂O and CH₄ emission lines and determined nuclear spin temperatures of both molecules. The obtained temperatures are higher than the typical value for the Oort Cloud comets (~30K). Furthermore, we report a tentative detection of CH₃D in comet Machholz. The D/H ratio in methane was consistent with the temperature range obtained from nuclear spin temperatures. On the other hand, in the case of break-up comet 73P/SW3, we also derived higher nuclear spin temperature than the typical Oort Cloud comets. We also found the similarity in chemical composition between fragments of the same comet. Fragments “B” and “C” of comet SW3 are very similar to each other from the viewpoint of chemistry. This fact indicates that the parent body of SW3 was quite homogeneous in chemical composition of ices.

河北秀世

住所：京都市北区上賀茂本山

所属：京都産業大学・理学部・物理科学科

TEL：075（705）1612 FAX：075（705）1640（事務室）

小林仁美

住所：京都市北区上賀茂本山

所属：京都産業大学・理学研究科・物理学専攻

TEL：075（705）1612 FAX：075（705）1640（事務室）