

隕石の成分分析からわかる小惑星の軌道変化



藤谷 渉
Fujiya Wataru

1 隕石のふるさと

地球に飛来する隕石は、我々が地球上で手にすることのできる数少ない地球外物質であり、地球上の物質からは得られない情報を含んでいる。例えば、太陽系が誕生したのは現在から46億年前であるが、それは隕石の年代測定から得られた数値である。このように、隕石は太陽系惑星の誕生・進化過程を解明するのに重要な貢献をしてきた。

隕石が大気圏に突入する際には、火球として地上から目撃されることがあるほか、地上の建造物や自然に被害をもたらすこともある。過去には隕石衝突が生物の大量絶滅の引き金になったこともある。

隕石はどのような天体由来するのであろうか？火星と木星の公転軌道の間には小惑星が無数に存在しており、この領域を小惑星帯と言う。隕石が大気圏に突入する際の軌道や、隕石と天体の反射スペクトルの比較により、隕石の大部分は小惑星帯に存在する小惑星から飛来していることが分かっている。

太陽系の惑星はもともと小惑星のような天体が衝突・合体して形成したと考えられている。つまり、小惑星は惑星になるはずだった材料物質の名残であり、太陽系進化の化石であると言える。地球に飛来する隕石の90%はコンドライトという始原的隕石、すなわち、その母天体である小惑星が形成して以来、ほとんど化学組成が変化していない物質である。そのため、コンドライト隕石から太陽系の黎明期にお

ける惑星誕生の過程を知ることが可能である。

隕石は小惑星帯に存在する小惑星から飛来する、と先に述べたが、そのような天体が現在の小惑星帯の位置で形成したか否かは重要な問題である。木星や土星等質量の大きな惑星の公転軌道は過去に変化した可能性が示唆されており、その際に小惑星も惑星の重力によって散乱したかもしれないからだ¹⁾。しかし、隕石の分析から母天体が誕生した場所を特定するのは容易ではなく、惑星の軌道変化とそれに伴う小惑星の散乱に関する物質科学的な証拠はほとんどない。

本稿では、コンドライトの中でも水や有機物等揮発性の高い物質を豊富に含む炭素質コンドライトに焦点を当て、その成分分析から、母天体の形成環境を制約する試みについて述べる。具体的には、炭素質コンドライトに含まれる炭酸塩鉱物に対して、炭素の同位体比 ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) を測定することで、その起源を同定し、小惑星に含まれていた揮発性物質の存在量を推定した研究を紹介する。

2 隕石中の炭酸塩鉱物と炭素同位体

炭素質コンドライトは一般に揮発性物質を豊富に含んでいる。隕石の母天体では水と岩石が化学反応を起こし、含水鉱物（蛇紋石等の層状ケイ酸塩鉱物）や炭酸塩鉱物等が二次的に生成する。

炭酸塩鉱物は炭酸イオンを含むが、それがどのよ



図1 タギシュ・レイク隕石

左の立方体は一辺1 cm。画像提供：Mike Zolensky 博士（NASA ジョンソン宇宙センター）

うな物質から生成したのかはよく分かっていない。例えば、有機物が酸化されて CO_2 が生じた、もしくは、もし母天体が 80K 以下の低温環境で形成すれば、固体の CO_2 （ドライアイス）を含んでいた可能性もある。いずれにせよ、炭酸塩鉱物の起源の解明は、母天体に含まれていた揮発性物質とその存在量を知る手がかりになり、母天体の形成環境を明らかにする糸口になりうる。母天体に存在した様々な揮発性物質はおのおの特徴的な同位体比を持っていたはずであるから、物質の起源を議論するとき、同位体比は非常に強力な武器となる。

本研究では、 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比の測定を行い、炭酸塩鉱物（方解石： CaCO_3 ）の起源を解明することを目指した。分析したのは CM コンドライトというグループに分類される隕石から 2 試料（Nogoya 隕石と LAP 031166 隕石）と タギシュ・レイク隕石である。タギシュ・レイク隕石は化学組成や岩石・鉱物学的な特徴が他のどの隕石とも一致しない特異な隕石である（図 1）。この隕石は、前述の反射スペクトルから、D 型という分類の小惑星から飛来したと考えられるほぼ唯一の隕石である²⁾。一方 CM コンドライトは C 型の小惑星から飛来したとされている。

3 炭酸塩鉱物の炭素同位体比の測定

本研究では隕石の薄片試料を作製し、二次イオン質量分析（Secondary Ion Mass Spectrometry: SIMS）という手法で局所領域の $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比を測定した。隕石に含まれている炭酸塩鉱物の粒子は数 $10\ \mu\text{m}$ と小

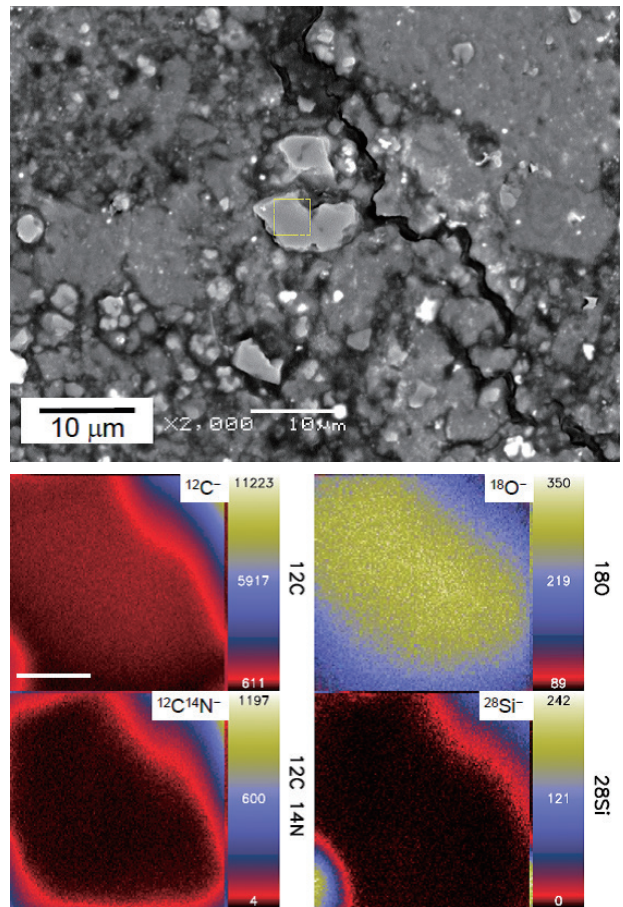


図 2 上 タギシュ・レイク隕石中の炭酸塩鉱物（方解石： CaCO_3 ）の電子顕微鏡像、下 方解石粒子のイオンイメージ

上：後方散乱電子により撮影。中央の薄いグレーに見える粒子が方解石。黄色の四角で囲まれた領域はイオンイメージングを行った部分。下：方解石粒子のイオンイメージ。イメージの右にあるカラーバーが信号強度を示す。方解石における ^{12}C の信号強度が周囲より弱いのは奇妙に思えるが、これは粒子の周囲に含水鉱物と有機物が混在しており、炭酸塩鉱物の炭素は有機物の炭素と比較して感度が悪い（二次イオンの生成率が低い）ためである。画像サイズは $3 \times 3\ \mu\text{m}^2$ 。Fujiya, et al., (2019) より改編⁴⁾

さいからである。特に、タギシュ・レイク隕石では $10\ \mu\text{m}$ 以下のものが多いため、イオンイメージングという手法を駆使して分析を行った（図 2）。

SIMS とは、イオンビーム（一次イオン）を試料表面に照射し、叩き出されたイオン（二次イオン）を質量分析して検出する手法である。本研究ではフランスの CAMECA 社製 NanoSIMS 50 を用いた（図 3）。 $1\ \mu\text{m}$ 以下に絞った Cs^+ の一次イオンビームにより発生した二次イオンを磁場型の質量分析計に導入し、 $^{12}\text{C}^-$ 、 $^{13}\text{C}^-$ 、 $^{18}\text{O}^-$ 、 $^{12}\text{C}^{14}\text{N}^-$ 、 $^{28}\text{Si}^-$ の各イオンを 5 つの二次電子増倍管を用いて同時に検出した。一次イオンビームは $3 \times 3\ \mu\text{m}^2$ の領域を走査（ラスタ）し、各点からの信号を 128×128 ピクセルの二次元画像

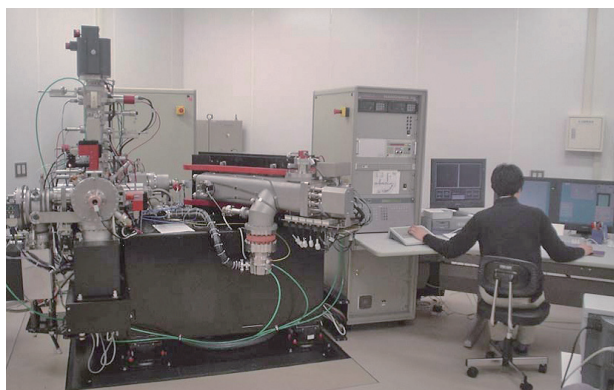


図3 二次イオン質量分析計 NanoSIMS 50

左上の鉛直に設置された部分で一次イオンビームを生成し、試料表面に照射する。画像提供：高畑直人博士（東京大学大気海洋研究所）

上に記録してイオンイメージを作成した。ピンポイントで微小な粒子に一次イオンビームを当てるのが難しくても、粒子の周囲を含むイオンイメージを取得することで、粒子からの信号のみを積算することができる。イオンイメージングは数 μm 以下の粒子の分析を行うときには非常に有効な手法である。

4 小惑星に含まれていたドライアイス

本研究で分析したすべての方解石粒子は、標準物質（Peedee Belemnite: PDB という矢石で $^{13}\text{C}/^{12}\text{C} = 0.01118$ という値をもつ）と比較して大きい $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比を示し、 ^{13}C に富んでいた。炭酸塩鉱物は地球上でも普遍的に産出する鉱物であり、その $\delta^{13}\text{C}$ 値（標準物質の $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ との差を千分率：‰で表したもの）は -12% から $+25\%$ であるのに対し³⁾、隕石では最大 $+80\%$ にも達する⁴⁾。

本研究で分析した CM コンドライトとタギシュ・レイク隕石では、炭酸塩鉱物の存在量や $\delta^{13}\text{C}$ 値の分布に顕著な違いが確認された。CM コンドライト（Nogoya 隕石と LAP 031166 隕石）においては、各々の方解石粒子の $\delta^{13}\text{C}$ 値は 20% から 80% の範囲で大きな変動を示し、極めて不均質であった。それに対し、タギシュ・レイク隕石では粒子間の不均一性は小さく、すべての粒子が $\delta^{13}\text{C} \sim 70\%$ という値をもっていた⁴⁾。更に、タギシュ・レイク隕石に含まれる炭酸塩鉱物は炭素量に換算して 1.3 重量％であり、CM コンドライトと比較して一桁ほど高い存在量を示す⁵⁾。

CM コンドライトで観察された大きな $\delta^{13}\text{C}$ 値の変

動は、 ^{13}C に富む物質と乏しい物質、すなわち、 $\delta^{13}\text{C} > 80\%$ と $\delta^{13}\text{C} < 20\%$ を示す物質の混合で説明できる。おそらく、それらの物質は母天体内で空間的に不均一に分布していたのであろう。それらが様々な割合で炭酸イオンを供給し、炭酸塩鉱物が形成したと考えられる。すると、タギシュ・レイク隕石で ^{13}C に富む炭酸塩鉱物が多く見られたことは、 ^{13}C に富む物質が卓越していたことを示唆する。

それでは、 ^{13}C に富む炭酸イオンはどのような物質から供給されたのであろうか？地球外物質において $\delta^{13}\text{C} > 80\%$ を示す有機物はほとんど発見されていない⁶⁾。地球外物質中の有機物の大部分は $\delta^{13}\text{C}$ 値が -10% から -30% の不溶性有機物である。タギシュ・レイク隕石には ^{13}C に富む炭酸塩鉱物が豊富に存在することから、有機物が酸化されて ^{13}C に富む炭酸イオンが供給された可能性は低い。むしろ有機物は ^{13}C に乏しい炭酸イオンの供給源であろう。

そこで、本研究では固体の CO_2 、すなわち、ドライアイスが ^{13}C に富む炭酸イオンを供給した物質であると結論した。母天体が低温環境で形成したならば、 CO_2 、 CO 、 CH_4 等の炭素化合物が固体（氷）として天体内に取り込まれうる。氷と岩石からなる彗星ではこれらの揮発性物質が観測されており、中でも CO_2 の存在量が最も大きい⁷⁾。ロゼッタ探査機によって観測された 67P/チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星コマの CO_2 は $\delta^{13}\text{C} = 65 \pm 51\%$ という値を示し、この結論と調和的である⁸⁾。とはいえ、誤差が大きいので、今後 CO_2 を含む揮発性物質のデータが蓄積し、より地に足の着いた議論が可能となることを期待したい。

炭酸塩鉱物がドライアイス ($\delta^{13}\text{C} = 80\%$) 及び有機物 ($\delta^{13}\text{C} = 20\%$) に由来する炭酸イオンから構成されているならば、炭酸塩鉱物の存在量と $\delta^{13}\text{C}$ の平均値からこれら端成分の寄与をそれぞれ見積もり、隕石中の存在量を推定することができる。なお、以下の考察は、上で仮定した端成分の $\delta^{13}\text{C}$ 値 (80% 及び 20%) にはほとんど依存しない。このように見積もった CM コンドライト及びタギシュ・レイク隕石中のドライアイス量の頻度分布を図4に示す。図4には参考として彗星のデータも示されている。

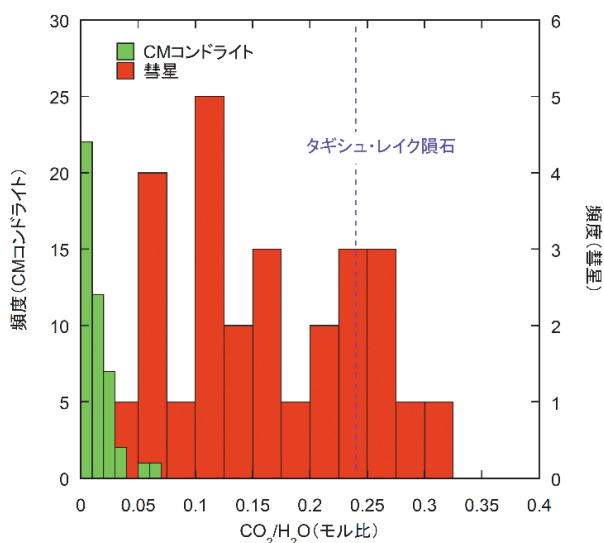


図4 CMコンドライト、タギシュ・レイク隕石及び彗星における氷のCO₂/H₂O比の頻度分布

CO₂存在量はCMコンドライト及びタギシュ・レイク隕石中の炭酸塩鉱物の存在量とδ¹³Cの平均値から計算^{6,9)}。H₂O存在量は先行研究より引用^{10,11)}。Fujiya, et al., (2019)より改編⁴⁾

この分布から、CMコンドライトに含まれていたドライアイス量は彗星中のドライアイス量よりも系統的に少ないことが分かる。一方、タギシュ・レイク隕石は彗星と同程度のドライアイスを含んでいたことが示唆される。したがって、タギシュ・レイク隕石の母天体はCO₂の凝縮温度(80K)以下の低温環境で形成した可能性が高い。そのような低温環境は太陽から遠く離れた場所で、現在の土星の公転軌道に遠である。あるいはカイパーベルトという太陽系の外縁部かもしれない。

先に述べたように、タギシュ・レイク隕石は反射スペクトルがD型の小惑星に由来する特異な試料

である。D型小惑星は、小惑星帯の外側(太陽から遠い側)や、木星トロヤ群という木星-太陽のラグランジュ点(L₄とL₅)に多く存在している。D型小惑星はもともと太陽系の外縁で形成したにもかかわらず、現在から40億年ほど前に惑星の軌道が変化した際、惑星の重力により散乱した可能性が数値シミュレーションから示されている¹⁾。本研究は、理論的に示唆されている惑星の軌道変化に対して、はじめて物質科学的な裏付けを行ったと言える。

地球外物質における氷や有機物の研究はまだ発展途上である。今後の研究対象は隕石にとどまらず、宇宙探査によって能動的に小惑星や彗星から採取した試料も重要であろう。それらの分析により、惑星の形成過程や惑星に存在する揮発性物質の起源に関する理解がより深まることが期待される。

参考文献

- 1) Levison, et al., *Nature*, **460**, 364-366 (2009)
- 2) Hiroi, et al., *Science*, **293**, 2234-2236 (2001)
- 3) Coplen, et al., US Geological Survey Water-Resources Investigations Report 01-4222 (2002)
- 4) Fujiya, et al., *Nat. Astron.*, **3**, 910-915 (2019)
- 5) Sephton & Botta, *Int. J. Astrobiol.*, **4**, 269-276 (2005)
- 6) Grady, et al., *Meteorit. Planet. Sci.*, **37**, 713-735 (2002)
- 7) Mumma & Charnley, *Rev. Astron. Astrophys.*, **49**, 471-524 (2011)
- 8) Hässig, et al., *Astron. Astrophys.*, **605**, A50 (2017)
- 9) Alexander, et al., *Meteorit. Planet. Sci.*, **50**, 810-833 (2015)
- 10) Alexander, et al., *Science*, **337**, 721-723 (2012)
- 11) Alexander, et al., *Geochim. Cosmochim. Acta*, **123**, 244-260 (2013)

(茨城大学 理学部)