

エポックメイキングな隕石たち(その9)： ～タギシュ・レイク隕石～ D型小惑星由来の隕石～

藤谷 渉¹

2016年7月3日受領, 査読を経て2016年7月5日受理.

(要旨) タギシュ・レイク隕石は, 反射スペクトルのデータからD型小惑星を起源としている可能性が高い. 物理的, 岩石鉱物学および地球化学的な特徴はこの隕石が既存の化学グループには属さず, 非常に始原始的で特異な炭素質コンドライトであることを示す. その特徴は, 小惑星帯の外縁部に多く存在するD型小惑星に予想されるものと調和的である.

1. はじめに

本稿では, 既存の化学グループには属さない炭素質コンドライトであるタギシュ・レイク (Tagish Lake) 隕石について紹介する. この隕石は比較的最近落下したものであるが, 太陽系物質の多様性や小惑星帯外縁付近の天体の性質, 母天体における物質の変成過程を理解するための貴重な試料として認識されており, 今日まで活発に研究されている.

タギシュ・レイク隕石は, 2000年1月18日にカナダ北部のタギシュ湖に落下した落下目撃隕石である [1]. この隕石が落下した冬の時点では湖は凍結しており, 春に氷が溶けるまでこの隕石は液体の水にさらされることはなかった. 地域住民のジム・ブルック (Jim Brook) は落下からわずか1週間後の1月25日に凍結した湖面から隕石の破片を発見し, 26日にかけて回収した. 回収した隕石は素手で触ることなくビニール袋に入れ, 凍結した状態で保存された. その結果, 極めて保存状態がよく地球上での汚染を最小限に抑えることができたのである. このように回収・保存された破片はおおよそ850グラムにのぼる. これから説明するように, タギシュ・レイク隕石は始原始的かつ特異な隕石で, 非常に学術的価値の高いものであるが, その隕石がこのようによい状態で保存されていたのは幸運と言



図1: タギシュ湖の地図. 矢印は火球の進行方向を, 楕円はタギシュ・レイク隕石が発見・回収された場所を示す. 理由は不明だが, Googleマップ日本語版にはタギシュ湖がタギシュ・レイク隕石と表記されている. Googleマップより(地図データ: Google).

うほかないだろう. なお, 春になって氷が溶けた後も10 kg程度の隕石片が回収されており, 隕石片が回収された場所は湖上で16 kmの長さの領域に及んでいる (図1).

2. タギシュ・レイク隕石の物理的特徴

タギシュ・レイク隕石は密度が 1.6 g/cm^3 ほどであり, これはCIやCMコンドライト (それぞれ $2.2\text{--}2.3$ と $2.6\text{--}2.9 \text{ g/cm}^3$) と比較して非常に小さい値である. そのぶ

1. 茨城大学 理学部
wataru.fujiya.sci@vc.ibaraki.ac.jp

ん空隙率は高く、40%ほどである。2000年に回収された直後、タギシュ・レイク隕石の細粒マトリクスは非常に脆かったと言われている。

タギシュ・レイク隕石のメテオロイドが大気圏に突入する際のさまざまな物理量は、衛星および地上からの火星の観測によって推定されている[1]。それによると、タギシュ・レイク隕石のメテオロイドが大気圏に突入した時点での総重量は約200トンで、その質量の大半が大気中で失ってしまった。大気圏への突入速度は約16 km/s、突入角度は17°と非常に浅い。このことが、低密度・高空隙率で強度の低い物質が上空で粉々に破壊されることなく、ある程度の大きさのまま地表面に落下した要因となった。

後にも触れるが、地球の成層圏で回収される惑星間塵(Interplanetary Dust Particle: IDP)や南極氷床から回収される微隕石(Micrometeorite)を含む宇宙塵の中には、鉱物組成がタギシュ・レイク隕石に類似したものがかなりの頻度で見られる。一般に、IDPの密度はタギシュ・レイクと同様に小さく、その多くは脆いことが知られている。このことは、タギシュ・レイク隕石のような強度の低い物質の破片が宇宙塵として地球上に降着していることを示唆しているのかもしれない。つまり、このような物質は宇宙塵として地球上で回収することができる一方、隕石としてある程度の大きさのものを手にするのは難しいのである。

3. タギシュ・レイク隕石の構成鉱物と水質変成作用

タギシュ・レイク隕石の岩石鉱物学的な特徴として特筆すべきは、その反射スペクトルが他のどの炭素質コンドライトとも異なり、D型あるいはT型小惑星のそれと類似していることである[2,3]。Hiroi et al. (2003)は小惑星308 Polyxoをタギシュ・レイク隕石母天体の候補として提案している[3]。D型小惑星の軌道長半径はほとんどが3 AU以上であり、普通コンドライトや他の炭素質コンドライトの母天体(S型やC型小惑星)よりも太陽から遠い位置に存在している。もし小惑星の形成した場所が現在の小惑星帯の位置だったとしたら、D型小惑星はC型小惑星より揮発性物質やプレソーラー粒子の存在度が高く、また、熱変成度の影響も小さい可能性がある。

タギシュ・レイク隕石は角礫岩の組織を示す。タギ

シュ・レイク隕石を構成する物質は主に層状ケイ酸塩のマトリクス、コンドルール、カンラン石の結晶片であり、水質変成の影響が顕著である[4]。難揮発性包有物もわずかに確認できる。マトリクスにはマグネタイト、Fe-Ni硫化物や炭酸塩鉱物が含まれる。マトリクスに含まれる炭酸塩鉱物の存在度は試料によって様々であり、初期分析における岩石学的記載では、炭酸塩鉱物に富む岩相と乏しい岩相が存在することが示されている。マトリクスを構成する層状ケイ酸塩鉱物は主にサポナイトであるが、蛇紋石をかなり含む部位も存在する。上述のような鉱物の組み合わせは多くの含水IDPと共通しており、含水IDPの母天体はタギシュ・レイク隕石の母天体に類似したD型小惑星であると考えられる。

ところで、タギシュ・レイク隕石には炭酸塩鉱物に富む岩相と乏しい岩相が存在すると述べたが、水質変成の程度やそれに伴う有機物の組成の変化などから、より多様な岩相が存在することが示唆されている[5]。筆者もこの隕石から、今まで報告例のない大きい粒子サイズ(約100マイクロメートル)の炭酸塩(ドロマイト)を発見し、多様な岩相が存在することを裏付けるものとして解釈している(図2)。なお、この岩相はコンドルールや多量のマグネタイトを含んでおり、CIやCMコンドライトの組織とは異なる。このドロマイトが形成した年代は ^{53}Mn - ^{53}Cr 年代測定から4564 Ma

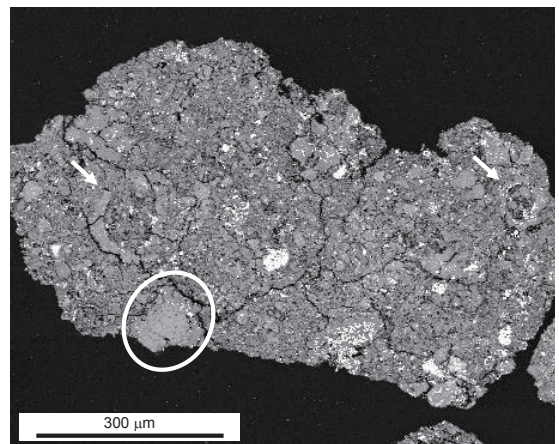


図2：タギシュ・レイク隕石の薄片の電子顕微鏡(反射電子)像。丸で囲った部分の薄いグレーに見える鉱物は粒子サイズの大きな(約100 μm)の炭酸塩(ドロマイト)。矢印で示したのはコンドルール。白く見えるものはマグネタイトや硫化物。他にも小さな岩片が観察でき、角礫岩であることを示している。[6]より改編。

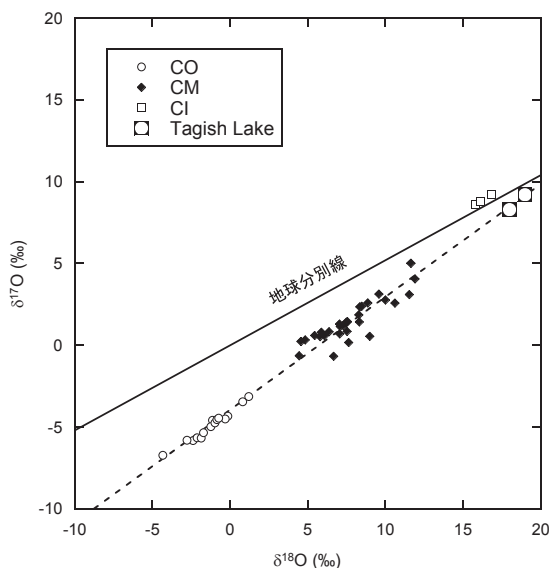


図3: タギシュ・レイク隕石, CI, CM, COコンドライト全岩の酸素同位体比を示す三酸素同位体図. タギシュ・レイク隕石の酸素同位体比は他のいずれの隕石とも異なるが, CM, COコンドライトのデータ点の回帰直線上の $^{17,18}\text{O}$ に富む側にプロットされる. データは[1,14]より.

と判明しており, これが地球外起源である(すなわち, 地球上での風化作用によるものではない)ことは明白である. この形成年代は, 他の水質変成を受けたコンドライト(CIやCMコンドライト)に含まれる炭酸塩鉱物の形成年代とほぼ同じである[6]. すなわち, 水質変成のタイミングはどの隕石母天体でもそれほど変わらなかったと考えられる.

タギシュ・レイク隕石には無水ケイ酸塩を含むコンドラールが観察され, CIコンドライト(岩石学的タイプ1)のようにコンドラールや無水ケイ酸塩が存在しない隕石より水質変成の程度が低いと考えられる. このことから, 岩石学的タイプは2とするのが妥当である. また, 層状ケイ酸塩の鉱物種や炭酸塩鉱物の存在度および化学組成が異なること, 多量のマグネタイトを含むことから, CMコンドライトとも区別される. このように, タギシュ・レイク隕石の岩石鉱物学的観察から, この隕石は既存の化学グループには属さない特異なものであることが結論される.

4. タギシュ・レイク隕石の地球化学的特徴

よく知られているように, 隕石全岩の酸素同位体比は隕石の分類をするうえで重要な分析値である. タギシュ・レイク隕石の酸素同位体比は, CIやCMコンドライトのいずれとも異なる[1]. 三酸素同位体図上で, タギシュ・レイク隕石はCMとCOコンドライトのデータ点の回帰直線上に, $^{17,18}\text{O}$ に富む側にプロットされる(図3). 同じような温度で水質変成を経験しているとする, 酸素同位体比からタギシュ・レイク隕石はCMコンドライトよりも水を多量に含んでいると考えられ, その水/岩石比(酸素原子数比)は1.2と見積もられている[7]. また近年, Cr安定同位体比も隕石の分類に有用であることがわかり, Crの最も中性子に富む同位体である ^{54}Cr の存在度(^{54}Cr 同位体異常)が隕石の化学グループごとに異なっていることが知られている. タギシュ・レイク隕石全岩の ^{54}Cr 同位体異常はCMとCIコンドライトの中間的な値を示すが, ケイ酸塩相に限定すると同位体異常はすべての隕石の中でもっとも大きい[8].

タギシュ・レイク隕石の炭素含有量は5.8 wt%であり, 他のどのコンドライトよりも多い[9]. 有機炭素の存在量は2.6 wt%でCMとCIコンドライトの中間的な値である. プレソラー粒子であるナノダイヤモンドの存在量はおよそ4000 ppmですべてのコンドライトの中でもっとも多い. プレソラー粒子の存在度が大きいということは, 先に述べたように, タギシュ・レイク隕石のケイ酸塩相の ^{54}Cr 同位体異常がすべてのコンドライト中で最も大きいということと関係しているのかもしれない. 一方でプレソラーケイ酸塩相の存在度は非常に低く, 水質変成によって失われてしまった結果であると解釈できる. Feをほとんど含まないカンラン石がマトリクスにごく少量しか存在しないことはこの解釈を支持しているであろう[10].

全岩の化学組成については, 大まかに述べると, タギシュ・レイク隕石はCMコンドライトと比較して揮発性元素に富んでいるが, CIコンドライトよりは乏しい[11,12]. 難揮発性元素は逆の傾向を示す. このようにタギシュ・レイク隕石はCMとCIコンドライトの中間的な元素存在度パターンを示すように思える. しかし, 揮発性・中程度の揮発性・難揮発性の3つの

元素の比(例えばZn/MnとSc/Mn比)を縦軸・横軸にとったグラフにCMとCIコンドライトの組成をプロットすると、タギシュ・レイク隕石のデータはこれらの隕石のデータの混合線上にはプロットされないことがわかる。

以上述べてきたように、地球化学的な特徴からタギシュ・レイク隕石は炭素質コンドライトに分類され、非常に始原的な物質であるが、既存の化学グループには属さない特異な隕石であることがわかる。

5. おわりに

これまで述べてきたように、タギシュ・レイク隕石は非常に始原的で特異な隕石であり、既存の化学グループに分類することはできない。反射スペクトルのデータから、タギシュ・レイク隕石の母天体はD型小惑星である可能性が高い。タギシュ・レイク隕石の岩石鉱物学的観察あるいは地球化学的分析から、D型小惑星は揮発性元素やプレソーラー粒子、水や炭素を多く含むこと、熱変成の影響をほとんど受けていないこと、密度が小さく空隙率が大きいことなどが明らかになった。このような特徴は、D型小惑星が小惑星帯の外縁部に存在していることと整合的である。タギシュ・レイク隕石はD型小惑星が起源だと考えられる数少ない隕石の一つだが(WIS 91600という隕石もD型あるいはT型小惑星由来かもしれない)、宇宙塵にはこれに類似した試料が高い頻度で含まれている。直径1 mm以下の宇宙塵は地球へ年間 $(40 \pm 20) \times 10^6$ kg落下し[13]、この降下量は全地球外物質の降下量の90%以上である。そのため、D型小惑星由来の物質は地球上の水や有機物を含む揮発性物質の起源を理解するために重要であり、タギシュ・レイク隕石はそのための貴重な手がかりである。この隕石の詳細な分析によって、太陽系の揮発性物質の始原的な姿やそれが小惑星内で変成されていく過程が明らかになるものと期待される。

謝辞

木村真博士、野口高明博士、岡崎隆司博士には本稿を執筆する機会を与えていただき、また、注意深く原稿を読んでいただきました。本稿を査読していただいた野口高明博士には有益なコメントをいただきました。

ここに御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Brown, P. G. et al., 2000, *Science* 290, 320.
- [2] Hiroi, T. et al., 2001, *Science* 293, 2234.
- [3] Hiroi, T. and Hasegawa, S., 2003, *Antarct. Meteorite Res.* 16, 176.
- [4] Zolensky, M. E. et al., 2002, *Meteorit. Planet. Sci.* 37, 737.
- [5] Herd, C. D. K. et al., 2011, *Science* 332, 1304.
- [6] Fujiya, W. et al., 2013, *Earth. Planet. Sci. Lett.* 362, 130.
- [7] Clayton, R. N. and Mayeda, T. K., 2001, 32nd Lunar Planet. Sci. Conf. #1885 (abstr.).
- [8] Petitat, M. et al., 2011, *Astrophys. J.* 736, 23 (8pp).
- [9] Grady, M. M. et al., 2002, *Meteorit. Planet. Sci.* 37, 713.
- [10] Nakamura, T. et al., 2003, *Earth Planet. Sci. Lett.* 207, 83.
- [11] Friedrich, J. M. et al., 2002, *Meteorit. Planet. Sci.* 37, 677.
- [12] Mittlefehldt, D. W. et al., 2002, *Meteorit. Planet. Sci.* 37, 703.
- [13] Love, S. G. and Brownlee, D. E., 1993, *Science* 262, 550.
- [14] Clayton, R. N. and Mayeda, T. K., 1999, *Geochim. Cosmochim. Acta* 63, 2089.