

エポックメイキングな隕石たち(その10)： ～ Y-81020～極めて始原的な日本の南極産隕石～

小松 睦美¹

2016年10月1日受領，査読を経て2016年10月28日受理。

(要旨) 始原的隕石の中でも炭素質コンドライトは化学的に未分化であり，太陽系生成期の情報を保存する物質であると考えられている。しかしながら，ほとんどの炭素質コンドライトは，原始太陽系星雲内での個々の隕石構成物質の形成環境と母天体集積後の反応(変成・変質作用)に関する情報を併せ持つため，この二つを切り分けることがこれまでの歴史を正しく解釈する上での重要な課題となっている。岩石学タイプ3.0の隕石は，「極めて始原的な隕石」と呼ばれ，母天体での変成作用の影響が極めて小さく，太陽系生成初期の母天体集積時の状態を最も保存していると考えられている。国立極地研究所が所有するYamato(Y)-81020は，極めて始原的な特徴を持つ数少ないCO3.0コンドライトの一つであり，特に日本の研究者により多くの重要な成果が発表されてきた。

1. はじめに

Y-81020は，第22次南極地域観測隊が発見した隕石の一つである。1981-82年のやまと山脈付近の裸水帯での隕石探査では，133個の隕石を採取，そのうち7個が炭素質コンドライトであった。Y-81020の質量は270gであり，ペア隕石であるY-81021～81025を含むと，全岩で378gの隕石である(図1)。

現在国際隕石学会で認定されている炭素質コンドライトのうち，CO3と分類されているのは532個存在する(Meteoritical Bulletin Database, 2016年9月)。サブタイプが決定されているCO3は全部で72個あり，その内14個がCO3.0として分類されている。しかしながら，その多くは北西アフリカの砂漠で最近発見された隕石(NWA)であり，詳細な研究は行われていない。これまで詳しく研究されているのは，ALH 77307, ColonyとY-81020の3つのCO3.0隕石のみである。

ほとんどの炭素質コンドライトは，母天体で様々な程度の変成・変質作用を受けている。CO3.0隕石のように変成・変質作用の影響が少ない試料は，隕石全体



図1：Y-81020隕石の全体写真(国立極地研究所提供)。

から見ても極少数(CRの一部とCH, Ungrouped-Cの僅か)しか確認されていない。また，上記の3つのCO3.0隕石の内，ALH(ALHA) 77307は低い程度ではあるが水質変質を受けており[e.g.,1]，Colonyは地球での風化の影響が大きい[2]。Y-81020にも軽微な水質変質の特徴が見られるものの，殆どの物質は変成・変質の影響を受けておらず，非常に貴重な隕石であるといえる。

Y-81020の初期の研究では，Mgに富むオリビンの組成とスピネルに富む難揮発性包有物(CAI)に多くの

1. 総合研究大学院大学 学融合推進センター
komatsu_mutsumi@soken.ac.jp

興味が注がれた[3-5]. 2000年代に入り炭素質コンドライトのサブタイプに関する議論が進むと、Y-81020の始原性が着目されるようになり、原始太陽系星雲での情報を最も良く保存する重要な隕石として広く認識された。後の章では、Y-81020から展開された研究の一部を紹介する。

2. COコンドライトと岩石学タイプ、サブタイプの評価

隕石母天体集積後の熱変成・水質変質作用については、岩石学タイプと呼ばれる番号により表される。タイプ4から6と番号が大きくなる程熱変成の度合いが増し、水質変質の程度は3, 2, 1の順に増加する。ほとんどの炭素質コンドライトは、岩石タイプ2または3に分類される。炭素質コンドライトの中でもCOコンドライトは、コンドリュールやCAIを多く含み、逆にマトリックスの量は相対的に少ないという特徴を持つ。全岩の揮発性成分は比較的乏しく、COコンドライト母天体での変成は主に温度に依存する反応であったと考えられ、その程度によりCO3.0-3.8のサブタイプに細分化される。またCO3隕石は熱変成作用の度合いが異なる隕石が多く発見されているため、母天体での熱変成の多様性を系統立てて議論することが可能である。

サブタイプの決定手法としては従来、コンドリュールに含まれるガラス(あるいはガラスから微細な結晶が晶出したメソスタシス)や斜長石の熱ルミネッセンス(TL)が用いられてきた[6]。しかしながらこの方法

は、普通コンドライトには広く適用できるものの、炭素質コンドライトでは、岩石学的な特徴と必ずしも一致しないことが分かってきた。そのため、TL法の代わりとなる炭素質コンドライトの化学的・岩石学的変化のサブタイプ評価指標が提案されており、以下に紹介するような系統的評価の確立にY-81020は大きく貢献している。

2.1 FeOに富むオリビンの組成

コンドライトの主な構成物であるFe-Mgコンドリュールは、FeOに乏しいタイプIコンドリュール(Mg#>90)とFeOに富むタイプIIコンドリュール(Mg#<90)に分けられる。[7]は、普通コンドライト中のタイプIIコンドリュールに含まれるFeOに富むオリビン中の Cr_2O_3 含有量やマトリックスの化学的特徴に着目し、サブタイプ評価の指標となることを示した(図2a)。普通コンドライトでは、岩石学サブタイプ3.0から3.2にかけて、FeOに富むオリビン中に存在する極細粒(<50nm)クロマイトの離溶により、オリビンの Cr_2O_3 含有量は系統的に変化する。クロマイトの離溶はサブタイプ3.2では完了すると考えられ、 Cr_2O_3 含有量のばらつきである標準偏差(σ)は、岩石学タイプ3.0から3.1にかけて増加し、その後緩やかな下降に転じ、組成が均一化する。また、 Cr_2O_3 含有量は3.1までは変化せず、それ以降はコンドリュールと接するマトリックスとの反応が進み、その結果、オリビン中の Cr_2O_3 含有量が減少することが示された。

さらに[8]では、COコンドライトでも普通コンドラ

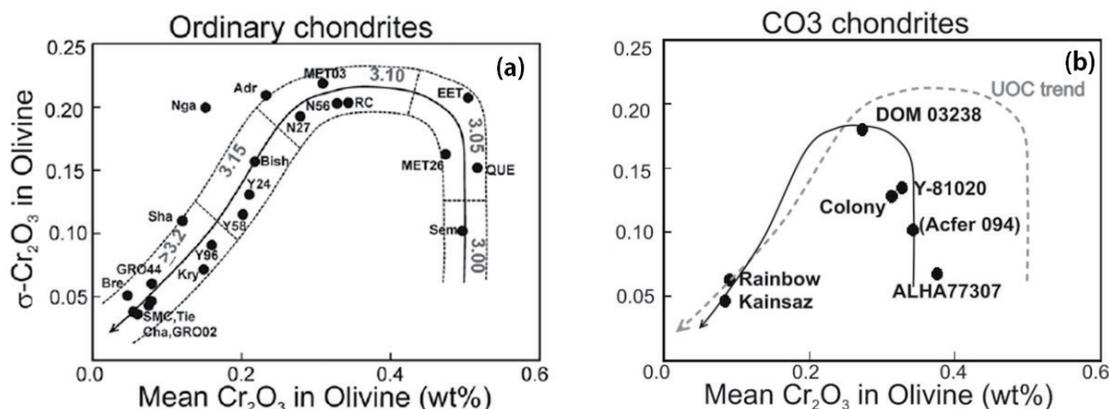


図2: 普通コンドライト(a)とCOコンドライトのCr量とサブタイプ(b)[5;6より引用]. タイプIIコンドリュールに含まれるFeOに富むオリビンの組成は、特に3.2以下の岩石学サブタイプの決定に有効である。Y-81020のサブタイプは3.05と分類される(b)。

イトと同様に、連続的な化学的変化が見られることが示された(図2b)。ALH 77307 (CO3.00)とDOM 03238 (CO3.1)と比較すると、Y-81020の Cr_2O_3 含有量は二つの隕石と近い値を持つが、その値の標準偏差 σ は二つの中間的な値を示し、Colony (CO3.05)と同程度の変成作用を受けたCO3.05とのサブタイプが見積もられている。

2.2 Fe-Ni 金属相の特徴

珪酸塩鉱物と同様に、Fe-Ni金属相からも極初期の二次変成作用の影響を読み取ることができる。[9]は、非平衡普通コンドライトとCOコンドライトの系統的な分析により、二次変成で生じるFe-Ni金属相の変化と岩石学的サブタイプの関連性について明らかにした。サブタイプ3.10以下の隕石に含まれるマトリックス中の金属相は、コンドリュール中の金属相に比べてCoに富む組成を持つ一方で、コンドリュール中の金属相では、岩石学タイプが増加するに従いNiに富む粒子の存在量が減少する。Y-81020の化学的及び鉱物学的特徴より、Y-81020のサブタイプは、普通コンドライトのサブタイプ3.0-3.10と同様の変成を経験したCO3.05と見積もられた。この手法により導き出されたサブタイプの値は、[8]により得られたタイプIIコンドリュール中のオリビンの Cr_2O_3 含有量からの評価と調和的である。

2.3 その他の指標

プレッシャー粒子の存在度も、その隕石の始原性を評価するための重要な指標である。プレッシャー粒子は、マトリックスに存在し、太陽系と大きく異なる同位体組成を持つことから、太陽系形成以前に存在した赤色巨星、AGB星や超新星爆発などを起源とする粒子であると考えられている。ナノダイヤモンド、グラファイト、炭化珪素、窒化珪素、酸化物、珪酸塩など、さまざまな鉱物がプレッシャー粒子として存在する。各粒子の熱的・化学的反応への耐性は異なるが、プレッシャー粒子の存在度と、含まれる隕石の岩石学タイプには相関があることが確認されており、母天体の二次変成作用の指標として用いることができる[e.g.,10]。COコンドライトでは岩石学サブタイプの増加に従い、ALH 77307 (CO3.00)、Colony (CO3.05)、Kainsaz (CO3.2)の順に炭化ケイ素などのプレッシャー粒子中

の希ガス存在度が減少することが確認されている[11]。[12]では、Y-81020のペア隕石であるY-81025が、ALH 77307よりも高いプレッシャー珪酸塩粒子存在度を持つことが示されており、Y-81020の高い始原性を示唆していると考えられる。

また、隕石中の高分子有機物のグラファイト化の度合いも岩石学サブタイプの決定、特に熱変成の履歴の評価に有効である。ラマン分析より、隕石中の高分子有機物はDバンド(欠陥構造; $\sim 1350 \text{ cm}^{-1}$)とGバンド(グラファイト; $\sim 1600 \text{ cm}^{-1}$)の二つのバンドを持つことが知られている。普通コンドライトでは、熱変成作用が進むにつれ、Dバンドの半値幅(FWHM-D値)が減少し、二つのバンドの強度比(I_D/I_G)の増加が見られ[13]。同様の相関がCOコンドライトでも確認されている[14]。Y-81020は始原的な高分子有機物の特徴を持つことが示されており、他の指標によるサブタイプの評価とも整合する[15]。

3. Y-81020コンドリュールのAl-Mg年代測定

始原的な普通コンドライトの分析により、普通コンドライトに含まれるFe-Mgコンドリュールは、CAIが形成された後、約100-250万年で形成されたとされる[16]。しかしながら炭素質コンドライトでは、26Al年代測定に必要なAlに富む鉱物やメソスタシスが少なく、粒径も小さいものが多いため年代測定が困難であった。[17]は、Y-81020の始原性に着目し、Fe-Mgコンドリュールに含まれるオリビン、輝石、斜長石について、 ^{26}Al を用いた年代測定を行った。太陽系初期の $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比を 5×10^{-5} とすると、タイプIとタイプIIコンドリュールの年代はそれぞれCAI形成後1.7-2.5Ma、2.0-3.0Maであることが示された。この形成年代は、始原的なL・LLコンドライト中のコンドリュールの年代とほぼ同じである。炭素質コンドライトと普通コンドライトは、その揮発性成分の違いから、太陽系の異なる場所で母天体が形成されたと考えられるが、異なるコンドライト種に含まれるコンドリュールの形成年代が類似した値を示すことは、太陽系星雲モデルに新たな制約を与えるものである。

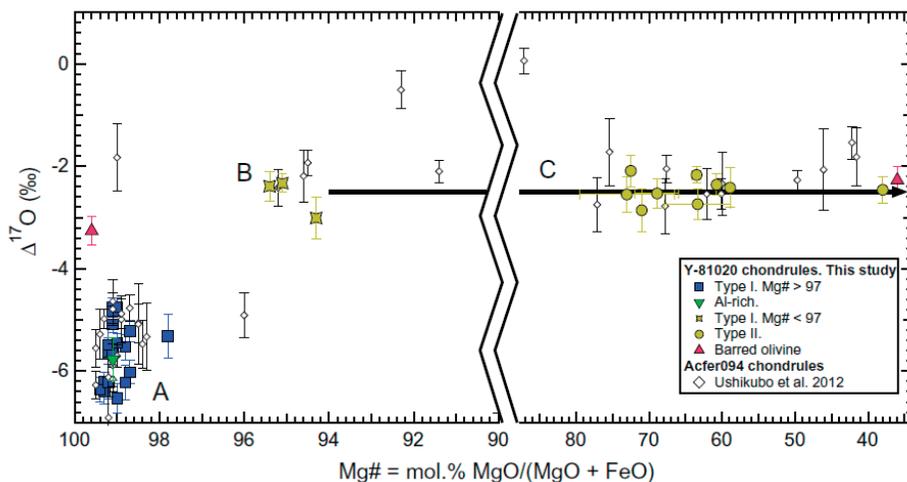


図3：原始的隕石であるY-81020とAcfer 094の“ホスト”の $\Delta^{17}\text{O}$ 値の比較。Mg#はコンドリュール中のオリビンと輝石組成の平均値より算出。本図が示すコンドリュールの進化は以下の通り；(A)コンドリュールの前駆物質は $\sim -5.5\%$ 程度の $\Delta^{17}\text{O}$ を持っており、ダストに富んだ環境(100×Solar)によりMg#>97のコンドリュールが形成された。(B)その後、正の(positive) $\Delta^{17}\text{O}$ を持つ H_2O 氷の付加により酸化的環境となりMg#<97、 $\Delta^{17}\text{O}$ が $\sim -2.5\%$ 程度タイプIコンドリュールが形成された。(C)さらなるダスト/氷の付加により、タイプIIコンドリュールが形成された。極めてFeに富むタイプIIコンドリュールは、Feに富む前駆物質の組成を反映していると考えられる。〔18〕より引用)

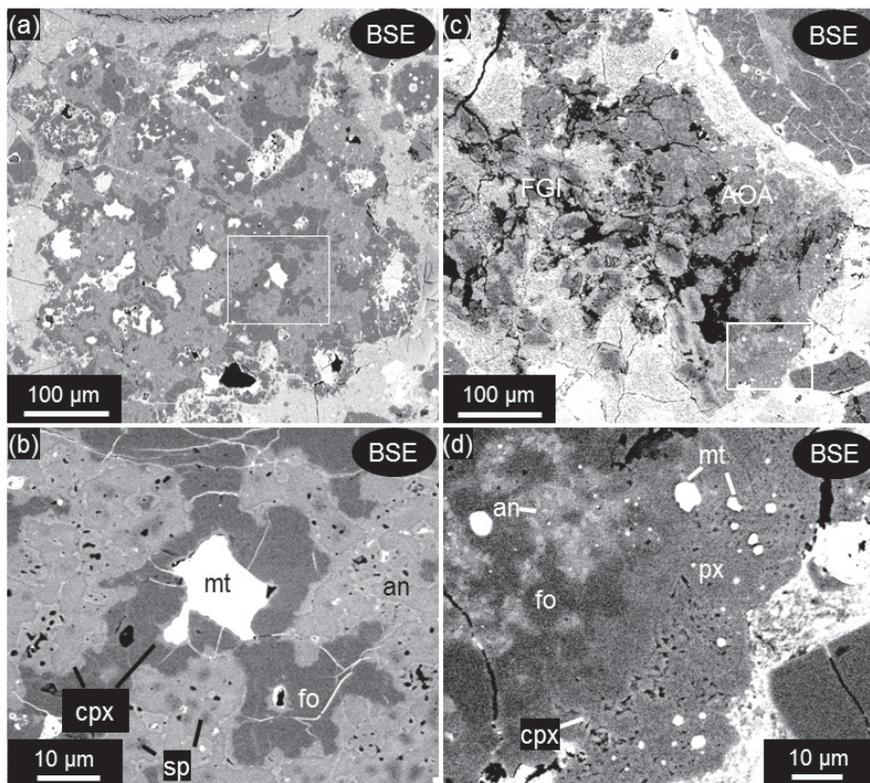


図4：Y-81020中のAOAの反射電子(BSE)像。(a,b)原始的特徴を持つAOA。斜長石(an)とスピネル(sp)から成るコアが、Al-輝石(cpx)、Mgに富むオリビン(fo)、Fe-Ni金属相(mt)に囲まれているような特徴を示す。二次変成の特徴は見られない。(c,d)AOA周縁部のオリビンがMg輝石(px)に置き変わった特徴を持つAOAも存在する。

4. Y-81020 コンドリュール・CAIの酸素同位体組成

さらに[18]は、[19]の始原隕石分析結果を踏まえ、Y-81020コンドリュールの詳細な酸素同位体分析を行った。その結果、コンドリュール形成領域の酸素同位体の異なる二つのリザーバー ($\Delta^{17}\text{O}$ が $\sim -5.5\%$ と正の値を持つものの2種)とダスト量の変化により、タイプIコンドリュールとタイプIIコンドリュールが形成された過程を明らかにした(図3)。

一方、原始太陽系星雲のCAI形成領域においても、 ^{16}O に富むリザーバーと ^{17}O 、 ^{18}O に富むリザーバーが存在していたことが分っている。[20]は、Y-81020に含まれるFGI(細粒CAI)の酸素同位体局所分析により、一つのFGI中に酸素同位体組成の異なる鉱物が含まれていることを示した。このことは、細粒CAIが ^{16}O に富む環境($\Delta^{17}\text{O} = \sim -40$ から -50%)で形成され、その後の部分熔融等の加熱イベントにより ^{17}O 、 ^{18}O に富むガス($\Delta^{17}\text{O} = \sim 0$ から -15%)との酸素同位体交換が起こったことを示唆しており、これらを説明する分子雲の進化モデルが提唱されている。酸素同位体組成に関する詳細な議論については、[21]を参照されたい。

上記のような高精度同位体分析結果は、二次変成の影響がほとんど無いY-81020であるからこそ成し得た成果である。

5. AOA(amoeboid olivine aggregates)とLIME-オリビン

炭素質コンドライトの構成物の一つであるAOA(アメーバ状オリビンアグリゲイト)からも、多くの報告がなされている。AOAとはオリビンと難揮発性鉱物から成り立つ細粒のアグリゲイトで、CAIと類似した環境で形成されたと考えられている包有物である。[22]はY-81020を含めたCOコンドライトに含まれるAOAに着目し、サブタイプとAOA中のオリビンのFeO量増加に相関があることを示した。

AOAはその組織的な特徴と ^{16}O に富む同位体組成を持つことから、星雲から凝縮過程を経て形成されたと考えられている。Y-81020に含まれるAOAには母天体での二次変成の特徴は殆ど見られず、その構成鉱物は平衡凝縮計算[e.g., 23,24]で予想されるものと概ね一致する。また、一部のAOAでは周辺部がMg輝石(エ

ンスタタイト)に置換されており、形成後の再加熱を示唆している(図4)。またY-81020中のAOAには、LIME (low-Fe, Mn-enriched)オリビンと呼ばれる、特徴的な化学組成を持つオリビンが含まれていることが分かった[25]。Y-81020の始原性によりLIMEオリビンの初期状態が示され、Mgオリビン(フォルステライト)の凝縮形成が、還元的な環境においてより低温のLIMEオリビンを形成する温度まで継続したことが示唆された。また変成度の異なる他の隕石との比較により、母天体での二次変成によりLIMEオリビン組成が徐々に失われたことが新たに示された。

6. 最後に

以上のようにY-81020からは、その極めて始原的な特徴から、多くの興味深い成果が発表されてきた。特に、全隕石種の中でも最も始原的で地球風化の影響が少ない隕石の一つとして、原始太陽系星雲及び炭素質コンドライト隕石の母天体変成の理解に大きく貢献している。[21]は、“新鮮な寿司を提供する良い寿司屋を選ぶように”始原隕石の始原物質を分析対象とすることは重要である、と述べている。そういった意味では、Y-81020は“絶品が並ぶ極上の寿司屋”のような隕石と言って良い。本稿では書ききれなかった研究を含め、現在もY-81020を活用した研究が数多く行われており、今後もエポックメイキングな成果が発表されることが期待される。

謝辞

木村眞博士、野口高明博士、岡崎隆司博士には本稿を執筆する機会をいただき、最後まで丁寧かつ的確なアドバイスをいただきました。山口亮博士、三河内岳博士には、原稿作成にご協力いただきました。また、査読者である牛久保孝行博士には、多くの有益なコメントをいただきました。この場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Ito, S. and Tomeoka, K., 2001, Antarctic Meteorites XXVI, 47.

- [2] Rubin, A. E. et al., 1985, *Meteorit. Planet. Sci.* 20, 175. 1271.
- [3] Graham, A. L. et al., 1985, *Meteoritics* 20, 654.
- [4] Kojima, T. et al., 1995, *Proc. NIPR Symp. Antarct. Meteorites* 8, 79.
- [5] Shibata, Y. and Matsueda, H., 1994, *Proc. NIPR Symp. Antarct. Meteorites* 7, 110.
- [6] Sears, D. W. G. et al., 1980, *Nature* 288, 791.
- [7] Grossman, J. N. and Brearley, A. J., 2005, *Meteorit. Planet. Sci.* 40, 87.
- [8] Grossman, J. N. and Rubin, A. E., 2006, 37th Lunar and Planetary Science Conference, no. 1383.
- [9] Kimura, M. et al., 2008, *Meteorit. Planet. Sci.* 43, 1161.
- [10] Huss, G. R. and Lewis, R. S., 1995, *Geochim. Cosmochim. Acta* 59, 115.
- [11] Huss, G. R. et al., 2003, *Geochim. Cosmochim. Acta* 67, 4823.
- [12] Kobayashi, S. et al., 2005, 46th Lunar and Planetary Science Conference, no. 1931.
- [13] Quirico, E. et al., 2003, *Meteorit. Planet. Sci.* 38, 795.
- [14] Bonal, L. et al., 2007, *Geochim. Cosmochim. Acta* 71, 1605.
- [15] Komatsu, M. et al., 2014, *Antarctic Meteorites XXXVII*, 45.
- [16] Mostefaoui, S. et al., 2002, *Meteorit. Planet. Sci.* 37, 421.
- [17] Kurahashi, E. et al., 2008, *Geochim. Cosmochim. Acta* 72, 3865.
- [18] Tenner, T. J. et al., 2013, *Geochim. Cosmochim. Acta* 102, 226.
- [19] Ushikubo, T. et al., 2012, *Geochim. Cosmochim. Acta* 90, 242.
- [20] Ito, S. et al., 2004, *Geochim. Cosmochim. Acta* 68, 183.
- [21] Yurimoto, H. et al., 2008, *In Reviews in Mineralogy & Geochemistry* 68, 141.
- [22] Chizmadia, L. et al., 2002, *Meteorit. Planet. Sci.* 37, 1781.
- [23] Ebel, D. S. et al., 2012, *Meteorit. Planet. Sci.* 47, 585.
- [24] Petaev, M. I. and Wood, J. A., 2005, *In Chondrites and the Protoplanetary Disk*, 373.
- [25] Komatsu, M. et al., 2015, *Meteorit. Planet. Sci.* 50,