

# エポックメイキングな隕石たち(その7)： Acfer 094隕石～初期太陽系微粒子の宝庫～

牛久保 孝行<sup>1</sup>

(要旨) コンドライトという種類の隕石には、微惑星形成以前に原始太陽系星雲に存在した微粒子を初生的な状態で含有しているものがある。こうした隕石は、太陽系初期に存在した微粒子を研究するために欠かせない試料である。サハラ沙漠で発見されたAcfer 094隕石は特にそうした微粒子の保存状態が良く、Acfer 094隕石を用いた研究で新粒子の発見等の多くの新しい知見が得られている。

## 1. はじめに

スミソニアン研究所のGlenn J. MacPherson博士が、2007年に当時私が所属していたウィスコンシン大学WiscSIMS研究室を訪れた際に「今度、スミソニアン(博物館)でもAcfer 094隕石を所有する事になった」と嬉しそうに話していたのを良く覚えている。Acfer 094隕石(図1)はUngrouped炭素質コンドライトで、



図1：Acfer 094隕石薄片の実体顕微鏡写真。白から明るい褐色の様々な形をした包有物がコンドルールとCAI。殆ど不透明の黒い部分は数ミクロン以下の微粒子が集積しているマトリックス。大小の割れ目に添って細粒の風化生成物が沈着し、コンドルールが褐色がかって見える傾向がある。写真の横幅は約15mm。

組織や同位体比を指標として細分化したどの炭素質コンドライトグループにも入らないマイナーな種類の隕石である。Acfer 094隕石は、強烈な閃光と轟く爆音を伴いながら地表に落下して多くの人達を驚かせたわけでも、発見に至るまでの経緯や発見後の数奇な運命の物語が人口に膾炙したわけでも無い。サハラ沙漠で見つかった僅か82 gの小さな石のつぶては、原始太陽系星雲に存在したダストを殆ど未変成のまま保持している“極めて始原的”な隕石として注目された。そして、その後の研究で多くの新しい知見が得られたことで、初期太陽系物質を研究する上での第一級の試料と認められるまでに出世した。Acfer 094隕石は、エポックメイキングというよりは知る人ぞ知る玄人好みの隕石かも知れない。

## 2. Acfer 094隕石

Acfer 094隕石は1990年にアルジェリア民主人民共和国内のサハラ沙漠、Reg el Acfer地域(27° 44' N, 4° 26' E)で発見された、僅か82gの小さな隕石試料である[1]。南極の氷床上では岩石の露出が無い為に過去に落下した隕石を効率よく発見出来る事が広く知られるが、砂沙漠(すなざばく)地域も同じ理由で隕石を効率良く発見できる事から、1990年代後半からアフリカ北部やアラビア半島、中国内陸部等の砂沙漠地域で隕石発見の報告が数多くされるようになってきている[2]。Acfer 094隕石は、記載と分類が行われる過程で炭素

1. 海洋研究開発機構 高知コア研究所  
ushikubot@jamstec.go.jp

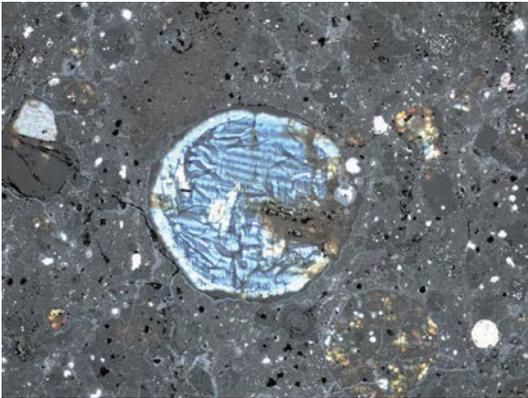


図2：コンドラールの顕微鏡写真。透過光と反射光を組み合わせで撮影。細かい割れ目に添って網目の様に沈着物が分布している。透過光では割れ目のある部分は沈着物のせいで褐色がかって見える。隕石オリジナルの鉱物に変質しているわけではない。写真の横幅は約1.5mm。

質コンドライトのCMグループとCOグループの両方の特徴を併せ持つ風変わりな隕石である事が明らかになった[3]。さらに、ケイ酸塩鉱物のFe/Mg比の分散が大きく、熱変成による組成の均一化の傾向が見られない事、細粒のマトリックスと呼ばれる部分に非晶質珪酸塩が見つかる一方で、含水鉱物は殆ど含まれず水質変成の影響も見られないという特徴を持つ。これらの事から、原始太陽系星雲を漂っていた微粒子が隕石母天体に集積した後も極めて始原的な状態で保存されている隕石である事が明らかになった[3,4]。その後の研究から、これまで見つかったコンドライトの中では母天体での熱変成の影響が最も少ない隕石であると考えられている[5,6]。

但し、Acfer 094隕石は地表へ落下後に沙漠の過酷な環境に晒されていたため、部分的に風化作用の影響がみられる。Acfer 094隕石の薄片を見ると、細かい割れ目にそって細粒の風化生成物が沈着して褐色がかって見える部分があり(図2)、何とも残念である。

### 3. 原始太陽系星雲のダストに関する 二つの重要な発見

ここではAcfer 094隕石の価値を決定的に高めた二つの発見について紹介する。これらの発見には多くの日本人研究者達が決定的な役割を果たした事は特筆に値すると思われる。

#### 3.1 プレスローラー珪酸塩粒子の発見

プレスローラー粒子は、赤色巨星や超新星で形成された星間塵が初生の特徴を保持したまま隕石等の惑星物質試料中に存在している粒子の事で、太陽系物質の起源や形成当時の周辺環境の情報を得るための貴重な試料である。隕石に酸処理等を施して取り出せるダイヤモンドやSiC、 $Al_2O_3$ 等の酸化物のプレスローラー粒子は早くに発見されていたが、固体物質の大部分を占める珪酸塩の組成を持つプレスローラー粒子が見つけられずにいた。2004年にNagashima et al.[7]とNguyen and Zinner [8]がそれぞれ独自の酸素同位体比イメージング手法を用いて、Acfer 094隕石のマトリックスから(7)ではNWA 530という隕石からも)プレスローラー珪酸塩粒子を発見した。少し遅れて別のグループもAcfer 094隕石での発見を報告している[9]。隕石中のプレスローラー珪酸塩粒子の探索に際して、Acfer 094隕石の始原的な特徴が高く評価され、最新の分析技術と多くの努力がAcfer 094隕石の分析に向けられた事が窺い知れる。発見された粒子はオリビン、パイロキシン、非晶質珪酸塩相等と多様で、これらの典型的な大きさは約200 nmでマトリックス中の濃度は200 ppmであった。

今日では他の隕石にもプレスローラー珪酸塩粒子がある事が明らかになり、中にはAcfer 094隕石に匹敵する含有量を示す隕石も報告されている[10]。また、成層圏で回収されたCP-IDP(Chondritic Porous Interplanetary Dust Particle:コンドライト的な組成を持ち、細粒な無水珪酸塩や有機物からなる地球外起源の微粒子。大きさは10  $\mu m$ 程度で、成層圏を飛行する特殊な航空機で採取される)やStardust探査機で持ち帰られた試料などの彗星由来の試料の方が、プレスローラー珪酸塩粒子を多く含む(最大で15,000 ppm)事が判っている[11]。しかし、含有濃度は高くても一つ一つの大きさが100  $\mu m$ にも満たない彗星由来の試料と異なり、Acfer 094隕石試料ならば多くの研究者が同質の試料を研究する事が出来る。プレスローラー珪酸塩粒子と太陽系物質の起源の解明に向けて、データの多様化と分析技法及び議論の高度化を進めて行く上で、Acfer 094隕石は重要な役割を果たし続けて行くに違いない。

### 3.2 宇宙シンプレクタイト(COS)の発見

Acfer 094隕石のマトリックスからは、宇宙シンプレクタイト(COSmic Symplectite, COS)(図3)という変わった粒子も見つかっている[12,13]. COSは磁鉄鉱( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )と鉄・ニッケルの硫化物( $\text{Fe}_{5-7}\text{Ni}_{3-3}\text{S}_8$ )がnmスケールで複雑に入り組むシンプレクタイト組織を持つ、大きさが数 $\mu\text{m}$ 程度の不定形の粒子である。酸素の3つの同位体( $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ )のうち、 $^{16}\text{O}$ だけが極端に欠乏した特異な酸素同位体比を持っている( $\delta^{17}\text{O} \sim \delta^{18}\text{O} \sim +180\%$ , 図4)[12]. 図4は酸素3同位体比の図で、 $\delta^{18}\text{O}$ と $\delta^{17}\text{O}$ はそれぞれ $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ と $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ の標準海水の値(VSMOW)からの差を表す[ $\delta^i\text{O} = \{(^i\text{O}/^{16}\text{O}) / (^i\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{VSMOW}} - 1\} \times 1000(\%)$ ]. 殆どの地球物質は傾き約0.52のTerrestrial Fractionation(TF)line上に分布する。地球外物質はTF線とは異なる傾き約1の線上に分布する傾向がみられる。珪酸塩鉱物の多くはCAIを端成分とする様にTF線の下側に分布する。これに対して、COSの酸素同位体比はCAIとは逆のTF線の上側、しかも同じ傾き約1の線上に分布する。こうした酸素同位体比分布の議論については本誌の過去の論文[14]に詳しい。COSは金属あるいは硫化物粒子が原始太陽系星雲中に存在した $\text{H}_2\text{O}$ と反応して出来たと考えられ、特異な酸素同位体比は水の同位体組成を反映していると解釈されている。水は揮発性も反応性も高いために、隕石母天体に集積しても脱ガスや周囲の物質との反応で初生の同位体比は簡単に失われてしまう。COSという水との反応生成物が発見された事で、原始太陽系星雲にあった水成分の同位体比を調

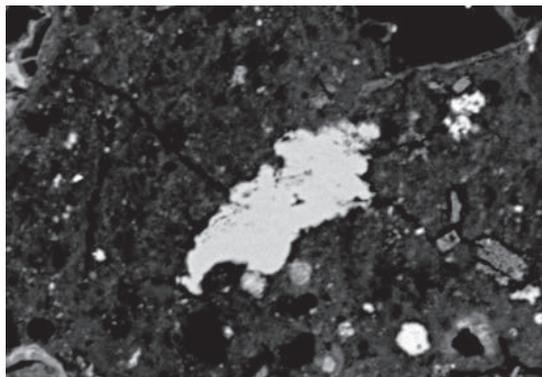


図3：COSの反射電子画像。シンプレクタイト組織は細粒すぎるため、走査電子顕微鏡による観察ではのっぺりした粒子に見える。画像の横幅は約60 $\mu\text{m}$ 。

べる事が出来るようになった。

COSは隕石母天体の変成作用に極めて弱いらしく、他のコンドライトでは存在が確認出来ずにいたが[15]. 最近になってMIL 07687という炭素質コンドライトからCOSに似た粒子が発見された[16]. その粒子は酸素同位体比異常の大きさや化学組成でAcfer 094にあるCOSと違う点があり、その解釈はまだ未確定である。この後続の研究を端緒として、Acfer 094以外の隕石からより多くのCOSに似た粒子が見つかるようになり、粒子の起源や母天体の変成作用の影響、原始太陽系星雲の水成分の同位体比の違いの有無について議論が発展して行く事が期待される。

### 4. コンドルールやCAI研究への貢献

Acfer 094隕石の始原的な特徴は、プレソーラー粒子の様なマトリックス中の極微細な物質の研究ばかりでなく、他のコンドライトにも普通に存在するコンドラール(図2)やCAI(Ca-, Al-rich Inclusion)等の大きな包有物の研究にも役立っている。大きな包有物にも変成の影響を受けやすい $\mu\text{m}$ スケールの多重の層構造や

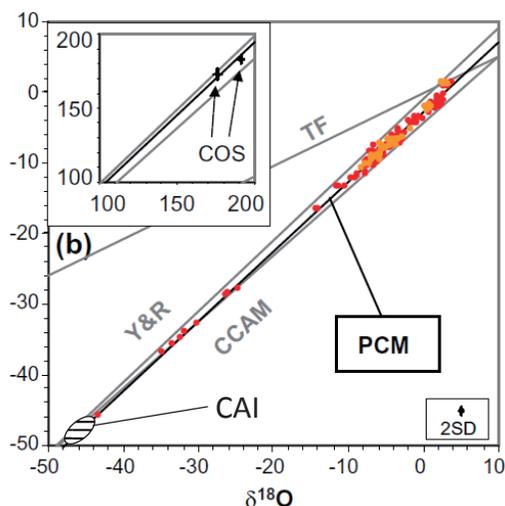


図4：Acfer 094隕石のコンドラールの酸素同位体比データ(濃赤：オリピン、淡橙：パイロキシン)とCOS、CAIとの関係。TF(Terrestrial Fractionation line)は地球物質の典型的な同位体分別線、CCAM(Carbonaceous Chondrite Anhydrous Mineral line)とY&R (Young and Russell line)はコンドライトの無水珪酸塩について提唱されている相関直線。PCM(Primitive Chondrule Minerals line)がAcfer 094隕石のコンドラールのデータの回帰直線。COSは[12]の点分析データを引用。([17]の図に加筆修正)

非晶質珪酸塩を含む構造があり、その部分が隕石母天体での変成作用の影響を受けていない事を明確に否定するのは難しい場合がある。Acfer 094隕石であれば、マトリックス中のSub- $\mu\text{m}$ の粒子が初生情報を保持している事から、コンドルールやCAIの $\mu\text{m}$ スケールの構造も初生情報を保持している事が期待される。

例えばAcfer 094隕石のコンドルールの結晶と非晶質部分の酸素同位体比を調べる事で、コンドルールを形成した珪酸塩メルトの酸素同位体比には幾つかの特徴的な値が見られる事、しかもその酸素同位体比とメルトの酸化還元状態に強い相関がある事が初めて明らかになった[17]。類似の特徴は他の炭素質コンドライトや彗星試料のコンドルールでも見られる事から[18]、コンドルール形成期に原始太陽系星雲内でダストと水の濃集に伴う酸素同位体比の変動が起きた、あるいは濃集の結果としてコンドルール形成が起きた、その記録を留めていると考えられる。また、図4が示す通り、Acfer 094隕石のコンドルールの酸素同位体比データの回帰直線(PCM線)を外挿すると、CAI( $^{16}\text{O}$ に富む成分)とCOS( $^{16}\text{O}$ が欠乏した成分)の両端成分の分布域とピタリと重なる。この事は、コンドライト母天体に集積した原始太陽系星雲中の微粒子の酸素同位体比の変動が、CAIとCOSが代表するガスもしくはダストと水の端成分の混合によって引き起こされていた事を示していると考えられる。

## 5. 最後に

Acfer 094隕石は始原的な炭素質コンドライトではあるが、有機物の先駆的研究は連載第6回で紹介されたMurchison隕石等の他の隕石試料で行われている。その理由には、総量が82 gと少なく炭素濃度も高くない事(炭素質コンドライトの分類に炭素濃度は関係無い)の他に、沙漠での風化作用で有機物に変質してしまっている事がある[19]。

コンドライトは異なる起源を持つ物質が集まった原始太陽系星雲起源の堆積岩であり、研究対象やその成果は一つの結論に収束するというよりはそれぞれが個別に発展して行く傾向が強く、隕石がもたらしたインパクトを全体として理解するのは難しい。しかし、Acfer 094隕石での研究が端緒となって他の隕石試料にも展開して発展した研究例が示す通り、挑戦的な研

究の起点として、そして複雑なデータを解釈する上で  
の基準として、Acfer 094隕石は抜群の存在感を示している。

## 謝辞

木村眞博士、野口高明博士、岡崎隆司博士からこの原稿を執筆する機会をいただきました。伊藤正一博士には原稿を読んでいただきました。この場を借りて感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Meteoritical Bulletin, No.71.
- [2] Meteoritical Bulletin Database (<http://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php>)
- [3] Newton, J. et al., 1995, Meteoritics 30, 47.
- [4] Greshake, A., 1997, Geochim. Cosmochim. Acta 61, 437.
- [5] Grossman, J. N. and Brearley, A. J., 2005, Meteorit. Planet. Sci. 40, 87.
- [6] Kimura, M. et al., 2008, Meteorit. Planet. Sci. 43, 1161.
- [7] Nagashima, K. et al., 2004, Nature 428, 921.
- [8] Nguyen, A. N. and Zinner, E., 2004, Science 303, 1496.
- [9] Mostefaoui S. and Hoppe, P., 2004, Astrophys. J. 613, L149.
- [10] Trigo-Rodriguez, J. M. and Blum, J., 2009, Publ. Astron. Soc. Aust. 26, 289.
- [11] Floss, C. et al., 2013, Astrophys. J. 763, 140.
- [12] Sakamoto, N. et al., 2007, Science 317, 231.
- [13] Seto, Y. et al., 2008, Geochim. Cosmochim. Acta 72, 2723.
- [14] 坂本直哉, 2009, 遊星人 18, 25.
- [15] Abe, K. et al., 2009, Meteorit. Planet. Sci. Suppl. 72, 5042.
- [16] Nittler, L. R. et al., 2015, Lunar Planet Sci. Conf. 46, #2097.
- [17] Ushikubo, T. et al., 2012, Geochim. Cosmochim. Acta 90, 242.
- [18] Nakashima, D. et al., 2012, Earth Planet. Sci. Lett.

357-358, 355.

- [19] Alexander, C. M. O' D. et al., 2007, *Geochim. Cosmochim. Acta* 71, 4380.