

Title	Acfer 094隕石における宇宙シンプレクタイトの存在度
Author(s)	阿部, 憲一; 坂本, 直哉; 圦本, 尚義
Citation	遊・星・人 : 日本惑星科学会誌, 19(4), 268-272
Issue Date	2010-12-25
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/48591
Rights	日本惑星科学会 本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである
Туре	article
Note	<特集>初期太陽系物質科学の最前線
File Information	planet_19_268.pdf



Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

# <sup>特集「初期太陽系物質科学の最前線」</sup> Acfer 094隕石における宇宙シンプレクタイ トの存在度

# 阿部 憲一<sup>1</sup>, 坂本 直哉<sup>2</sup>, 圦本 尚義<sup>1,2</sup>

2010年7月12日受領, 2010年11月4日受理.

(要旨) 宇宙シンプレクタイト(COS)は現在知られている太陽系物質の中で最も重い酸素同位体組成を持ち、 太陽系初期の水に由来することが示唆されている. COSが原子数比でFe:O:S≈4:4:1の特徴的な化学組 成を保持していることを利用して、FE-SEM-EDSによりAcfer 094隕石の広範囲かつ高空間分解能なX線元 素マッピングを行い、COSを探索した.1 mm四方の元素マップを7面取得し、1~260  $\mu$ m<sup>2</sup>の大きさの COSを66個同定した. COSの平均面積は32  $\mu$ m<sup>2</sup>、個数存在度は9個/mm<sup>2</sup>であり、Acfer 094隕石マトリッ クスにおいて体積存在度521 ppmで普遍的に存在することが明らかになった.

### 1. はじめに

酸素は太陽系において3番目に存在度が高い元素で、 固体物質においては最も存在度が高い元素である.また、酸素はいろいろな化合物を形成し、固体・気体・ 液体のすべての相に分配される.そのため、酸素同位 体は太陽系の物質進化の最もよいトレーサーの1つだ と考えられている.

酸素には質量数16,17,18の3つの安定同位体が存在し、天然ではそれぞれ99.757:0.038:0.205(%)の割合で存在している。酸素同位体の変化の割合は、地球の標準平均海水(SMOW)からの偏差を千分率(‰)で表した $\delta$ 値 $\delta^{i}O = [({}^{i}O/{}^{16}O)_{itH}/({}^{i}O/{}^{16}O)_{sMOW} - 1] \times 1000(i = 17,18)$ が一般的に用いられている。蒸発や凝縮などの熱力学が支配するプロセスにおいて、酸素同位体組成は質量差に依存し、縦軸に $\delta^{17}O$ 、横軸に $\delta^{18}O$ をとった3酸素同位体図上でその変化は傾き1/2の直線で表される。

隕石の主要な構成物であるCaやAlに富む難揮発性 包有物(CAI)やコンドリュール,それらの間を埋める マトリックス物質はこの地球型質量分別線から外れ,

1. 北海道大学大学院理学院

2. 北海道大学創成研究機構

傾き約1の直線で表される酸素同位体異常を示すこと が分かっている.この傾き約1の直線は<sup>16</sup>O成分に富 む端成分と,<sup>17,18</sup>Oに富む端成分の2成分混合によっ て説明されている.これまでに<sup>16</sup>Oに富む物質は前述 したCAIの他に、アメーバ状オリビン凝集物(AOA) などの星雲ガスからの高温凝縮物から見つかっている が [1],<sup>17,18</sup>Oに富む物質は特定されていなかった.

2007年に坂本らによって炭素質コンドライトAcfer 094隕石から発見された物質は3酸素同位体図上で隕 石構成物の傾き約1の直線の延長線上に位置し、現在 見つかっている太陽系物質の中で最も<sup>17.18</sup>Oに富む極 端に重い酸素同位体組成を持つ( $\delta^{17.18}$ O = +180 ‰) [2]. 瀬戸らによる鉱物学的研究により、この物質は直 径10~30 nm. 長さ100~200 nmの柱状の磁鉄鉱 (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)と100~300 nmの大きさを持つワーム状の鉄 ニッケル硫化物からなるシンプレクタイト構造をして いることが明らかにされ、宇宙シンプレクタイト (COS)と名付けられた [3]. この磁鉄鉱と鉄ニッケル 硫化物は約1:1の割合で混ざり合っているため、COS 粒子全体の原子数比はFe:O: S≈4:4:1というユ ニークな化学組成を持つ. このような組成はCOSに 特徴的で、他の隕石構成物からは見つかっていない. この物質は原始太陽系星雲のH<sub>2</sub>O(水あるいは水蒸 気)によって金属鉄又は硫化鉄が酸化されて形成され、

abeken@ep.sci.hokudai.ac.jp

Acfer 094 隕石における宇宙シンプレクタイトの存在度/阿部,坂本,圦本



図1: Acfer 094隕石の反射電子像. 白枠は1 mm四方のX線元素 マッピング領域. 赤丸は反射電子像のコントラスト観察に より発見したCOS, 黄丸はX線元素マッピングにより発見 したCOSを示す.

H<sub>2</sub>Oの酸素同位体組成を反映するものと考えられている [2, 3].

本研究では、Acfer 094隕石中のCOS粒子の存在度 とサイズ分布を決定する事を試みた. これまでに COSについては酸素同位体異常を利用した探索が行 われてきたが、同位体分析は広領域を分析するのに長 時間を要するので、存在度やサイズ分布のような統計 学的研究に対してサンプル数を増やす事は難しく、精 度を上げられない. そこで本研究では、COSが持つ 特徴的な化学組成に着目した. COSと同様の化学組 成を持つ物質はすべて同位体異常を示すことが報告さ れているので [2]、COSは化学組成による同定が可能 である. そこで、X線元素マッピング法を用いて Acfer 094隕石の広範囲の系統的なCOSの探索を行い、 その体積存在度と粒子サイズ分布を見積もった.

# 二 広範囲高解像度X線元素 マッピング法

本研究では炭素質コンドライトAcfer 094隕石の異 なる2枚の研磨薄片を用いた (Acfer 094#1, Acfer 094#2). 薄片全体の大きさはそれぞれAcfer 094#1が 23 × 17 mm, Acfer 094#2が8 × 5 mm(図1)である.

薄片観察およびCOSの探索にはエネルギー分散型 X線分析装置(EDS, Oxford INCA Energy)が付属し た電界放出型走査電子顕微鏡(FE-SEM, JEOL JSM-7000F)を用いた.反射電子像は物質の平均原子番号



図2: Acfer 094隕石の1 mm四方領域のRGBカラー合成X線元素 マップ. Feを赤, Sを緑, Oを青として合成している. 青 色はケイ酸塩鉱物又は酸化鉱物,赤色は金属鉄, 黄緑色は 硫化鉄鉱物に相当する. 紫色の脈は地球上の風化で形成さ れる水酸化鉄鉱物. COSは特徴的なオレンジ色に表示さ れるため発見することができる. 黄丸は発見したCOSの 位置を示している.

の差によりコントラストがつくため、COSは磁鉄鉱 (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)よりは明るく,硫化鉄(FeS)よりは暗く見える. COSはこの反射電子像の微妙なコントラストの違い からも発見することはできる (図1赤丸)が、 人為的な 見落としがあるため系統的な探索は困難である、そこ で本研究ではX線元素マッピング法を用いた. X線元 素マップは加速電圧15 kV. 照射電流10 nAの分析条 件で取得された. 電子顕微鏡像観察により発見した最 小のCOSが同定できるように、X線元素マップは45 μm × 60 μmの領域を256 × 192ピクセルの画素で取 得した.このとき、同時に反射電子像も取得した.こ れらのマップの画素解像度は約0.2 µm/pixelに相当す るが、薄片内での電子線の拡がりのため、X線元素マ ップの実際の空間分解能は1 µm程度である. この高 空間分解能を保持したまま広範囲(1 mm × 1 mm)を 分析するために、同じ大きさのX線元素マップを432 面取得した.1mm四方に相当する領域のX線元素マ ップを取得するのに約20時間を要した. これは同じ 面積を同位体分析した場合に比べ約10分の1の時間で ある.取得したX線元素マップの1ピクセルあたりの X線の積算時間は約2.3ミリ秒であった。得られたX

線元素マップはわずかに強度差があるものがあるため、 Adobe Photoshopを用いてすべてのX線元素マップ間 のレベル補正をした.その後、薄片におけるCOSの 位置の同定を容易にするために、これらのX線元素マ ップを結合して1 mm四方のモザイクマップを作成し た.X線元素マップの結合にはAdobe Photoshopの Photomerge機能を用いた.正確にマップを結合する ために、画像のコントラストが最もはっきりしている 反射電子像を最初に結合し、結合した各面の位置情報 を保存したファイルを作成した.X線元素マップのモ ザイクマップはその位置情報ファイルを用いて反射電 子像と全く同じ結合位置になるよう作成にした.

COS粒子を同定するために、COSを構成する元素 であるFeとO. SのX線元素マップを用いた. これら のX線元素マップからFeを赤、Sを緑、Oを青とした RGBカラーの合成元素マップを作成した(図2). その Fe-S-O合成元素マップにおいて隕石の大部分を構成 しているコンドリュールやマトリックス物質などのケ イ酸塩鉱物や酸化鉱物は青色、金属鉄は赤色、硫化鉄 鉱物は黄緑色に見える. Acfer 094隕石は砂漠で発見 された隕石であるため、地球上で風化を受けた時に形 成される水酸化鉄鉱物(FeOOH)の脈が薄片の至る所 に存在している、Fe-S-O合成元素マップ上でこの水 酸化鉄鉱物は紫色に見える。また、水酸化鉄鉱物と似 た元素で構成されている磁鉄鉱(Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)は、Acfer 094 隕石における存在度は極めて低いがわずかに存在して おり、マップ上で水酸化鉄鉱物に比べ少し赤い紫色に 見える.一方、COSは特徴的なオレンジ色に見え(図 3(b)). 他の物質から明確に区別することが可能であ る. COSを同定するために、マップから発見したす べてのCOS粒子に対してX線スペクトルを取得し、 すでに報告されている COS [2]の化学組成を持つ事を 確認した.X線スペクトルを取得する際に,硫化鉄鉱



図3: COSの反射電子像(a)とFe-S-O合成X線元素マップ(b). (a)の赤線はCOS粒子を示している。

物と水酸化鉄鉱物の境界付近からはCOSのスペクト ルと似たものが得られるため注意が必要である.

同定されたそれぞれのCOS粒子に対し,10~50 nmの画素解像度を持つ反射電子像を取得し粒子面積 を計算した.硫化鉄鉱物を伴っているCOS粒子は, 反射電子像にFe-S-O合成元素マップをオーバーレイ したイメージからCOS領域の境界を定め,硫化鉄鉱 物を取り除いた領域を1個のCOS粒子として面積を算 出した(図3).本研究では,COS粒子は不規則な形状 をしているので,この面積値を求めることにより COS粒子サイズと対応させることにする.

COSはマトリックス中に存在しているが、1 mm四 方のFe-S-O合成元素マップ中にはコンドリュールや CAIなどの大きな隕石構成物や、それらの鉱物破片も 含まれている。Acfer 094隕石は特に角礫岩化された 隕石であるため、1 mm四方のマップにおけるマトリ ックス領域が占める割合には変動があり、COSの存 在度を算出する時にマトリックス領域で規格化する必 要がある. そこで、すでにAcfer 094隕石のマトリッ クス存在度を見積もっているNewtonら [4]と同様の 定義を用いて50 µmより小さい物質をマトリックス 物質とし、マップ中のマトリックス存在度を見積もっ た. マップ中から50 um以上の物質を除外するため に反射電子像およびFe-S-O, Mg-Ca-Al合成元素マッ プを用いた. Fe-S-O合成元素マップは金属鉄や硫化 鉄鉱物を、Mg-Ca-Al合成元素マップはケイ酸塩鉱物 の形状をトレースするのに有効である.

# 3. Acfer 094隕石におけるCOSの 存在度

Acfer 094隕石で1 mm四方のX線元素マップを7 領域取得し,合計66個のCOS粒子を同定した.取得 したすべての1 mm四方のX線元素マップからCOS は必ず発見され,1 mm四方のX線元素マップ1領域 におけるCOSの個数存在度は最も多い領域で15個, 最も少ない領域で5個であり,1領域あたりに平均9 個のCOS粒子が含まれていた.同定したCOS粒子の 最小面積および最大面積は、それぞれ0.9 µm<sup>2</sup>と261.6 µm<sup>2</sup>であり、本研究で用いたX線元素マップの空間分 解能にほぼ等しい面積のCOS粒子まで発見された. 図4に同定したCOS粒子の面積分布を示す.ヒストグ ラムは小さいCOS粒子ほど指数関数的に増加してい



図4: COS粒子の面積分布. 粒子面積が小さくなるほど個数が 指数関数的に増加している.

るように見える,同定したCOS粒子の平均面積は32.4 μm<sup>2</sup>であった.

7 mm<sup>2</sup>のX線元素マッピング領域におけるマトリッ クス領域は4.11 mm<sup>2</sup>と計算された. これはマトリッ クスの存在度が59 %であることに相当する. 大きな コンドリュールが多数含まれているマッピング領域が 2領域あるため, [4]で報告された63 %に比べわずか にマトリックス存在度が低くなっている. マトリック スで規格化したCOSの体積存在度は521 ± 64 ppmと 計算され, COSはAcfer 094隕石マトリックス中に普 遍的に存在していることが分かった.

# 4. COSが Acfer 094 隕石のみから 発見される原因

本手法により COSは Acfer 094 隕石1 mm四方の領 域からは普遍的に発見された.しかし,他の炭素質コ ンドライトから同様の手法を用いて COSの探索を行 っているが,現在までに発見されていない [5].何故 Acfer 094 隕石からしか COS は見つからないのだろう か.これには(1) Acfer 094 隕石以外には元々 COSが 無かった,(2) COS は他の隕石にも元はあったが,減 少した(無くなった)の2つの可能性が考えられる.こ こからはそれぞれの可能性について考察する.

(1)については、Acfer 094隕石の特殊性が考えられ

る. 炭素質コンドライトは隕石母天体の形成領域や時 期を反映した原材料の違いに由来すると考えられてい る8つの化学的グループに分類され、それには全岩化 学組成と全岩酸素同位体組成が一般的に用いられてい る. しかし、Acfer 094隕石は、全岩化学組成はCM コンドライト [6,7]、全岩酸素同位体組成はCOコン ドライトに類似した特徴を持ち [8]、どの化学的グル ープにも分類されていないユニークな隕石である. 従 って、Acfer 094隕石は他の隕石とは異なる特別な隕 石であり、COSはAcfer 094隕石に固有の物質である 可能性が考えられる.

(2)については、Acfer 094隕石の始原性が考えられ る. 走査電子顕微鏡および透過電子顕微鏡によるマト リックスの詳細な研究から、Acfer 094隕石のマトリ ックスには隕石母天体での水質変成作用で形成される と考えられている層状ケイ酸塩鉱物がほとんど含まれ ず(1 vol%以下), 典型的に200~400 nm 程度の大き さを持つフォルステライト組成のカンラン石やエンス タタイト組成の輝石,硫化鉄鉱物,そして大量のアモ ルファス物質(40 vol%)を含んでいることが報告され ている [9]. 組織や化学組成から、このアモルファス 物質は分子雲又は太陽系星雲からの凝縮物であり、 FeO成分に乏しいケイ酸塩鉱物は太陽系星雲中でア モルファス物質からの結晶化又はアニーリングにより 形成されたことが示唆されている. ALHA77307 隕石 もマトリックスにアモルファス物質を含んでいること から [10]. Acfer 094隕石と同程度に始原的だと考え られているが、近年、始原的な隕石のさらに詳細な 分類により低度の熱変成作用を受けていることが示唆 されている[11]. また、Acfer 094隕石マトリックス には他の隕石に比べて高いプレソーラー粒子の濃集が 報告されている[e.g., 4, 12]. 以上の特徴からAcfer 094隕石は隕石母天体での水質変成や熱変成の作用を 受けた証拠が無く、太陽系初期の情報をよく保存した 最も始原的な隕石の1つだと考えられている[e.g., 4, 9]. 従って、COSが見つかっている Acfer 094 隕石は他の 隕石に比べて "超"始原的であり、他の隕石では水質 変成や熱変成などの二次作用によってCOSが破壊さ れてしまったために発見されないという可能性が考え られる. この場合, COSは高度に始原的な隕石を識 別するよい指標になると考えられる.

現時点で(1)と(2)のどちらかを判断することはでき

ないが、Acfer 094隕石が特別な隕石であるという他 の特徴に乏しいことから、(2)の方がもっともらしい ように思われる. COSは現在までにAcfer 094隕石以 外から発見されていないことから、他の隕石における COSの存在度はかなり低いことが予想される. その ため、Acfer 094以外の隕石について本手法を用いて マトリックス部分の分析面積をさらに増やしていく必 要がある.

## 5. おわりに

本研究で用いた広範囲高解像度X線元素マッピン グ法により、Acfer 094隕石の7 mm<sup>2</sup>の領域から1~ 260 µm<sup>2</sup>の大きさを持つCOSを合計66個同定した. 同定したCOSは平均面積32.4 µm<sup>2</sup>、個数存在度9個/ mm<sup>2</sup>であった.マトリックスで規格化した体積存在 度は521 ppmで、Acfer 094隕石マトリックス中に普 遍的に存在していることが分かった.この手法で得ら れた元素データはCOSの探索だけではなく、他にも プレソーラーSiCや炭酸塩鉱物などの特徴的な化学組 成を持つ物質の探索にも活用することができる.

現在, 我々が手に入れることができる隕石物質は, たまたま地球に落ちて来たものだけである. その中に あって, Acfer 094隕石のように太陽系初期の情報を 多く保存している高度に始原的な隕石は非常に希少で あり, 同じような隕石が落ちてくる可能性は極めて低 いだろう. 今後のサンプルリターンに期待したい.

#### 謝 辞

Krot, A. N.博士には大変貴重な Acfer 094 隕石薄片 を提供して頂きました.また,投稿原稿を丁寧に査読 して頂いた木村眞博士,本記事の執筆機会を与えて下 さった橘省吾博士にこの場をお借りして深く感謝の意 を申し上げます.

#### 参考文献

- [1] Clayton, R. N. et al., 1973, Science 182, 485.
- [2] Sakamoto, N. et al., 2007, Science 317, 231.
- [3] Seto, Y. et al., 2008, Geochim. Cosmochim. Acta, 72, 2723.

- [4] Newton, A. et al., 1995, Metoritics 30, 47.
- [5] 阿部ら, 2008, 連合大会, P137-008
- [6] Wlotzka, F. 1991, Meteoritics 26, 255.
- [7] Spettel, B. et al., 1992, Meteoritics 27, 290.
- [8] Bischoff, A. et al., 1991, Meteoritics 26, 318.
- [9] Greshake, A., 1997, Geochim. Cosmochim. Acta 61, 437.
- [10] Brearley, A., 1993, Geochim. Cosmochim. Acta 57, 1521.
- [11] Kimura, M. et al., 2008, Meteoritics & Planetary Science 43, 1161.
- [12] Floss, C. and Stadermann, F. 2009, Geochim. Cosmochim. Acta, 73, 2415.