特集「物質科学的研究・観測的研究で探る惑星系の誕生と進化| CAI中の短寿命放射性核種³⁶CIとその起源

中嶋 大輔^{1,2}

(要旨) 短寿命放射性核種³⁶Cl(半減期30万年)は初期太陽系に存在していたと考えられている。本研究では、 ³⁶Clの有無を確かめることを目的として,始源的隕石(Vigarano, Allende)の難揮発性包有物(CAI)に含まれ るソダライト (Na₄Si₈Al₈O₁)について, NanoSIMSによるCl-S同位体分析を行なった, Vigarano CAIのソダ ライトには、³⁶Clの娘核種である³⁶Sの過剰はみられなかった。一方で、Allende CAIのソダライトには、不均一な がら³⁶Sの過剰がみられた.このことは、初期太陽系において、³⁶Clが不均一に分布していたことを示唆している. この結果に基づき、³⁶Clの起源と元素合成モデルについて議論する.

1.はじめに

1.1 短寿命放射性核種

太陽系形成初期に存在していたと考えられている 半減期10万年から1000万年程度の短寿命放射性核種は, 初期太陽系で起こったイベントのトレーサーとして, 高精度の時計として, 初期太陽系進化過程に関する重 要な知見を与えてくれる。また、太陽系形成前後の元 素合成モデルに制約を与えることができるという点に おいても重要な核種である[1]. 短寿命放射性核種の 存在は、その娘核種の量と親核種の安定同位体の量の 相関によって確認することができる。例として、始源 的な隕石に含まれる難揮発性包有物 (CAI) 中に見ら れる²⁶Mg/²⁴Mg比と²⁷Al/²⁴Mg比の相関が挙げられる. このことは、CAI内の²⁶Alが壊変して²⁶Mgが蓄積した ことを意味する(半減期73万年; [2]). CAIには,同 様な相関から¹⁰Be(半減期150万年;[3])や⁴¹Ca(半 減期10万年; [4])の存在が確認されている。上記の 放射性核種のCAI形成時における存在度(初生存在度)

2. マックスプランク研究所

は,太陽系の元であった星間雲の中での存在度に比べ て高いため、他所からの供給を考える必要がある[5]。

太陽系は分子雲コアが超新星爆発を引き金として収 縮することで形成され、爆発時に合成された核種が原 始太陽系星雲に打ち込まれたという説がある[6].し かし,全ての短寿命核種が超新星爆発起源というわけ ではない. 恒星内では合成されない¹⁰Beは形成直後の 太陽からの宇宙線と太陽系物質との核破砕反応によっ て作られたと考えられている[3]. このように、短寿 命放射性核種は、それぞれ異なる起源をもって初期太 陽系に存在していたと考えられている.

1.2 CAI (Ca-Al-rich inclusions)

CAIとは、メリライト ((Ca, Na)₂(Al, Mg)(Si, Al)₂O₇) $\forall \mathcal{A} = \mathcal{A} \cup \mathcal{A}$ ((Fe, Mg)Al₂O₄) $\mathcal{A} \cup \mathcal{A}$ Alに富む高温凝縮鉱物から構成されている隕石物質 である. このため、CAIは太陽系形成時に最初に生じ た固体物質であると考えられている[7]. 同様のことは、 放射性同位体年代測定からも言われている[8]. CAI はTiや希土類元素のような難揮発性微量元素にも富 む一方で、Na, K. Cl, Feのような揮発性元素には

^{1.} 東京大学大学院理学系研究科地殼化学実験施設

乏しい.しかし,ネフェリン((Na, K)AlSiO₄),ソ ダライト(Na₄Si₃Al₃O₁₂Cl),鉄に富むスピネルもCAI 中に存在する.これらのような揮発性元素に富む鉱物 が高温鉱物と同時に形成されたとは考えにくく,高温 鉱物の二次変質によって形成されたと考えられている. しかし,この二次変質が隕石母天体内で起こったのか, それとも太陽系星雲中で起こったのかということにつ いては未だ明らかでない[9].

1.3. ³⁶Cl

短寿命放射性核種³⁶Cl(半減期30万年)は初期太陽 系内に存在していたと考えられている.³⁶Clの殆ど (98.1%)は³⁶Arに β ⁻壊変し,残りの1.9%は β ⁺壊変お よび電子捕獲により³⁶Sになる.ソダライトのような Clに富む二次変質鉱物を多く含むCAIもしくはソダラ イト中で³⁶Cl存在の証拠を探す研究が行われている.

CAIや隕石全岩中の³⁶Arを用いた³⁶Clの存在の証拠 を探す試みは1980年代初頭から行われてきたが、明確 な証拠を得るに至っていない. 最近, Lin et al. [10] はNingqiang隕石のCAI中のソダライトに³⁶S/³⁴S比 と³⁵Cl/³⁴S比の相関があることを発見した. このこと は、CAI内で³⁶Clが壊変して³⁶Sが蓄積したことを意味 している. 同様の相関はAllende隕石中のCAIとコン ドリュール中(ケイ酸塩鉱物から成る球粒物質)に も発見されている[11]. これらの相関から算出される ³⁶Cl/³⁵Cl比は凡そ4-5×10⁶であり、この比はソダライ ト形成時の値である. ソダライトの²⁶Al存在度と同 CAI中の高温鉱物の²⁶Al存在度の差に基づく年代差か ら,³⁶Cl/³⁵Cl初生比はおよそ10⁻⁴程度であると見積も られている[10, 11]. この値は, 超新星やAsymptotic giant branch (AGB) 星起源として見積もられる ³⁶Cl/³⁵Cl比に比べて高く、恒星内の元素合成では説明 できない[1,5].¹⁰Beのように,太陽宇宙線と太陽系物 質との核破砕反応によって³⁶Clは生成したと考えられ ている[11].¹⁰Beの存在度はどのCAIでもほぼ同じで あるのに対して[12],³⁶Clの存在度はCAI毎に大きく 異なる[13, 14].¹⁰BeがCAI形成領域で一様に分布して

いたのに対して,³⁶Clは不均一に分布していた可能性がある.

CAI中の³⁶Clに関する研究は僅か数例しかなく,³⁶Cl の起源を考えるためにはより多くのデータが必要であ る.本研究では、Vigarano隕石のCAIとAllende隕石 のCAI (Pink Angel; [15])中のソダライトについて, ³⁶Cl由来の³⁶Sの検出を行った.本稿では、この分析で 得られた結果から,³⁶Clの起源とそれに伴う元素合成 モデルに関する議論を行なっていく.

2. 試料と分析手法

マックスプランク研究所 (Mainz, Germany) と バイロイト大学 (Bayreuth, Germany) において, 走査型電子顕微鏡を用いて, Vigarano隕石のCAIと Allende Pink Angel CAI中のソダライトの産状を観 察した.

Vigarano隕石ではソダライトを含むCAIが二つみ られた. それぞれVI-1(直径2mm)とVI-2(直径 1.2mm)と名付けた. どちらのCAIも不定形であり, 粗粒でAlに富むメリライト(~ 500µm)が大部分を 占める. メリライト中には細粒でMgに富むスピネル が不均一に分布している(5-20µm). 以上のことから, これら二つのCAIは"fluffy" Type Aであると考えら れる[16]. ソダライトはネフェリンと共にメリライト の割れ目や空隙に産し,サイズは5-20µmであった(図 1a).

Allende Pink Angel CAIは、細粒で多孔な内部と 粗粒で密な外縁部からなる[15]. ソダライトの多くは 内部にみられた (5-50 μ m;図lb).

ソダライトのCl-S同位体分析はマックスプランク 研究所所有のNanoSIMS(Cameca NanoSIMS50) を用いて行なった. Cs⁺イオンを一次ビームとし(~ 25pA;直径1 μ m), スパッタされた³²S, ³⁴S, ³⁶S, ³⁷Cl, 及び³⁶Sバックグラウンド(³⁶Sピークから低質 量側に14ミリマス¹)をマルチコレクターで陰イオン

*1:1 ミリマスは 1 原子質量単位の 1000 分の 1



図1: (a) Vigarano CAI (VI-1)の反射電子像. メリライト (Me) 中にソダライト (So) とネフェリン (Ne) が産している. Sp:スピネル, Fa:ファッサイト (AI と Ti に富む輝石; Ca(Mg, Ti, Al)(AI, Si)₂O₆), Hi:ヒボナイト (CaAl₁₂O₁₉). (b) Allende Pink Angel CAI (PA-2)の反射電子像. 反射電子像 (a) と (b) は NanoSIMS 分析前に撮影された. (b) のソ ダライト粒子中にみられる窪みは, NanoSIMS 分析時にできたスパッタリング跡ではなく, 研磨薄片作成時にでき たものであると考えられる.

として検出した.³⁶S/³⁴S比を³⁶Sbackground/³⁴S比で補正 し、³⁷Cl/³⁴S比を³⁵Cl/³⁷Cl比 (3.13;[17]) で³⁵Cl/³⁴S比 に換算した. 続いて、³⁵Cl/³⁴S比をCl-S相対感度補正 係数 (0.83;[11]) を用いて補正した.標準試料として、 Mundrabilla隕石の硫化鉄 (FeS), Vigarano隕石中 の硫化鉄, Allende隕石のマトリックス (オリビン等; (Fe, Mg)₂SiO₄),地球のソダライトを用いた.

3.結果

図 2 はVigarano CAIとAllende Pink Angel CAI 中のソダライトの³⁶S/³⁴S vs. ³⁵Cl/³⁴Sプロットを示し ている. Vigarano CAIのソダライトの大部分は³⁶S過 剰がなく,データはベースライン上に分布している (図2a). ³⁶Sの過剰らしき点が二点見られるが,誤差 が大きく,2 σ 誤差をとった場合,これら二点の統計 的有意性は認められない.このようにVigarano CAI のソダライトには³⁶Sの過剰はみられない.この理由 として,母天体上での変質によってVigarano CAIの ソダライト中の³⁶Cl-³⁶S系が乱され,³⁶S過剰が見えな くなったという可能性が挙げられる.しかし,プレ ソーラー粒子の存在度や有機物のラマン分光分析か ら,Vigarano隕石はAllende隕石よりも変質度が低い と考えられている[18].一方で,Vigarano隕石中には, Allende隕石に類似した鉱物・化学組成をもつ部分が 存在することが知られている[19].従って、VI-1と VI-2がAllende隕石的な部分にある可能性は否定でき ない.しかし、Allende隕石のCAIのソダライトに³⁶Cl 過剰がみられることを考えると[11, 14], Vigarano CAIのソダライトの³⁶S過剰が変質によって失われ たとは考えにくい、Vigarano CAIのソダライトの ³⁶S/³⁴S-³⁵Cl/³⁴S間の加重回帰分析では正の相関は得ら れなかった.相関直線の傾きの2 σ 誤差から導かれる ³⁶Cl/³⁵Cl比の上限値は1.9×10⁶であった.

一方, Pink Angel CAI中のソダライトには, 誤差 は大きいが, ³⁶S過剰がみられる(図2b). この大きな 誤差は, ³⁶S_{background}の³⁶Sへの寄与が大きいためである と考えられる(\leq 90%). 加重回帰分析から算出され る³⁶Cl/³⁵Cl比は, PA-1で(4.4±1.7)×10⁶, PA-2では (1.4±0.8)×10⁶であった. PA-1とPA-2を測定した時 期は一年近く開いており, 標準試料の³⁶S/³⁴S比は異な っていた. 二つのCl-Sデータを混ぜるべきではないと 判断したため, 同じCAIではあるが別々に取り扱った. PA-10³⁶Cl/³⁵Cl比がHsu et al. [11]の結果とほぼ同じ であるのに対し, PA-2の³⁶Cl/³⁵Cl比はそれらに比べて 低い. このことは, 単一のCAI中で³⁶Cl/⁵⁵Cl比が不均 一であることを示す. ClがPink Angel CAIに取り込 まれる時点で³⁶Clは不均一であったかもしれない. あ



図 2: Vigarano CAI (VI-1, VI-2; 2a) および Allende Pink Angel CAI (PA-1, PA-2; 2b) 中のソダライトの³⁶S/³⁴S vs. ³⁵CI/³⁴S プロット、エラーバーは±1 σであり, ポアソン分布のみに基づく、横線(破線)は標準試料の³⁶S/³⁴S 比 (³⁵CI/³⁴S ~ 0).

るいは,³⁶ClはCAI中で均一に分布していたが,その 後の母天体上での変質で³⁶Cl-³⁶S系が乱されて不均一 になったという二つの可能性が挙げられる. Allende 隕石は母天体上での変質を比較的大きく受けている隕 石であるため[18],どちらの可能性が有力かをここで 論ずることはできない.

4.³⁶CIの起源と今後の課題

Pink Angel CAI中の³⁶S過剰は、Allende隕石が母天 体から放出されて地球に飛来するまでに受けた宇宙線 照射による中性子捕獲でも説明可能である。³⁵Clから 中性子捕獲で生成された³⁶Clは,³⁶Arと³⁶Sに壊変する。 Pink Angel CAIの³⁶Ar濃度とCl存在度から算出され る³⁶Cl/³⁵Cl比は2-12×10⁹であり[15, 20],本研究で算 出された³⁶Cl/³⁵Cl比は2-12×10⁹であり[15, 20],本研究で算 出された³⁶Cl/³⁵Cl比は2-12×10⁹であり[15, 20],本研究で算 出された³⁶Cl/³⁵Cl比は2-12×10⁹であり[15, 20],本研究で算 出された³⁶Cl/³⁵Cl比は2-12×10⁹であり[15, 20],本研究で算 出された³⁶Cl/³⁵Cl比は2-12×10⁹であり[15, 20],本研究で算 出された³⁶Cl/³⁵Cl比は記 明できない。³⁶Clの大部分が³⁶Arに壊変するにも関らず, ³⁶Ar過剰がみられないのは、Arの高い揮発性による ものであると考えられる。I-Xe分析からAllende隕石 母天体上での変質が指摘されており[21, 22],S同位体 は変質の影響をそれほど受けない一方で、³⁶Cl壊変に よる³⁶Arの大部分は失われたものと考えられる。

Lin et al. [10] とHsu et al. [11]はCl-S測定に加え て、Al-Mg測定を行なっている. CAI中のソダライ トは、³⁶Cl過剰と³⁵Cl/³⁴S比の明らかな相関を示す一方 で、²⁶Mg過剰は示さなかった.このことを²⁶Al消滅 後にソダライトが形成されたためであると解釈する と、CAI形成とソダライト形成の年代差は凡そ1.5My から3.5Myと見積もられる[10, 11]. この時間差から ³⁶Cl/³⁵Cl初生比は10⁴程度となる[10, 11]. ²⁶Alや他の 短寿命核種が超新星やAGB星などの恒星起源だとす ると、CAI形成時での超新星起源の³⁶Cl/³⁵Cl比は10⁶程 度[1], AGB 星起源の³⁶Cl/³⁵Cl比は5×10⁻⁷程度であり [5],恒星内での元素合成では³⁶Cl/³⁵Cl ~ 10⁻⁴という値 は説明できない.この点から、Hsu et al. [11]は³⁶Cl が形成直後の太陽からの宇宙線と太陽系物質間の核破 砕反応により生成されたと指摘している.

太陽系形成初期に存在していたとされる¹⁰Beも、恒 星内では生成されないことから、核破砕反応により生 成されたと考えられている[3].¹⁰Beと³⁶Clが同起源で ある場合,²⁶Alと⁴¹Caのように存在度に相関があると 考えられる[23].これまでに測定されたCAI中の¹⁰Be の存在度がほぼ一定であるのに対して[12]、本研究は CAI毎に³⁶Cl存在度が異なることを示した.¹⁰Beと³⁶Cl が単純な相関関係にあるとは言い難い.³⁶Clは太陽系 内において不均一に存在していた可能性がある.いず れにせよ,³⁶Clに関する研究は始まったばかりであり、 今後、より多くのデータを得ることが重要である.

形成直後の太陽からの宇宙線による核破砕反応起源 の³⁶Cl/³⁵Cl比は、モデル計算から 1.3×10^4 と見積もら れており[24]、³⁶Cl/³⁵Cl初生比(~ 10^4)とほぼ一致す る. このことから,³⁶Clは核破砕反応起源かと思われ る. しかし, Leya et al. [24]の計算は,親核種の生成 量と崩壊量がバランスすることにより親核種量の増加 が頭打ちになる放射平衡を考慮にいれていない. 従っ て,実際の核破砕反応では³⁶Cl/³⁵Cl比が1.3×10⁴より 低い値になる可能性があり, Leya et al. [24]の値は上 限値であることに留意する必要がある.

これまでの³⁶Clの起源に関する議論は,²⁶Al崩壊に よる³⁶Mg過剰の有無に依存している.一部のCAIのソ ダライトには²⁶Mg過剰を示すものがあり,そのソダ ライトはCAIの高温鉱物とほぼ同時期に形成されたと いう報告がある[25].このようなソダライト中のCl-S 測定を行うことで,³⁶Cl初生存在度をより直接的にみ ることができると考えられる.これにより,放射平衡 による³⁶Clの飽和,²⁶Alを含めた他の放射核種との関 係および起源について詳細な議論が可能となると考え られる.

謝 辞

本稿の査読者である木村眞博士(茨城大学理学部) には的確なコメントをいただきました.著者の共同 研究者であるU.Ott博士(マックスプランク研究所), P. Hoppe博士(同),およびA. El Goresy教授(バイ ロイト大学)には日頃より多大なるサポートおよび ご助言を頂きました.また,Pink Angel CAI薄片を 提供して下さったG.J. Wasserburg博士(CALTEC), Vigarano隕石厚片の作成に協力してくださったM. Biegler氏(マックスプランク研究所),隕石試料の電 子顕微鏡観察に協力してくださったJ. Huth氏(同) に深く感謝いたします.本稿を執筆する機会を与えて 下さいました橋省吾博士(東京大学理学系研究科)に この場を借りて御礼申し上げます. [2] MacPherson G. J. et al., 1995, Meteoritics 30, 365.

- [3] McKeegan K. D. et al., 2000, Science 289, 1334.
- [4] Srinivasan G. et al., 1994, ApJ 431, L67.
- [5] Wasserburg G. J. et al., 2006, Nuclear Physics A 777, 5.
- [6] Cameron A. G. W. and Truran J. W., 1977, Icarus 30, 447.
- [7] Grossman L., 1972, GCA 36, 597.
- [8] Amelin Y. et al., 2002, Science 297, 1678.
- [9] Brearley A. J., 2003, in Treatise on Geochemistry, 247.
- [10] Lin Y. et al., 2005, PNAS 102, 1306.
- [11] Hsu W. et al., 2006, ApJ 640, 525.
- [12] Marhas K. K. and Goswami J. N., 2004, New Ast. Rev. 48, 139.
- [13] Plagge M. et al., 2006, LPSXXXVII, #1287.
- [14] Ushikubo T. et al., 2006, LPSXXXVII, #2082.
- [15] Armstrong J. T. and Wasserburg G. J., 1984, LPSXII, 25.
- [16] MacPherson G. J. and Grossman L., 1984, GCA 48, 29.
- [17] Shields W. et al., 1962, J. Am. Chem. Soc. 84, 1519.
- [18] Huss G. R. et al., 2006, in Meteorites and the Early Solar System II, 1334.
- [19] Krot A. N. et al., 1998, M&PS 33, 1065.
- [20] Villa I. et al., 1981, LPSXII, 1115.
- [21] Swindle T. D. et al., 1988, GCA 52, 2215.
- [22] Pravdivtseva O. et al., 2003, GCA 67, 5011.
- [23] Sahijpal S. and Goswami J. N., 1998, ApJ 509, L137.
- [24] Leya I. et al., 2003, ApJ 594, 605.
- [25] Russell S. S. et al., 1997, LPSXXVIII, #1468.

参考文献

[1] 三木ほか, 2007 遊星人, 本号