

## 論文の内容の要旨

### Isotopic and REE studies of refractory inclusions in carbonaceous chondrites: formation of their precursors and rims

(同位体及び希土類元素を用いた炭素質隕石中の難揮発性包有物の  
起源物質及びリムの形成に関する研究)

氏 名 牛久保 孝行

始源的隕石に見られる難揮発性包有物；Refractory inclusion(又は Ca-, Al-rich inclusion: CAD)は、太陽系起源物質では最古の Pb-Pb 年代をもつ難揮発性物質 (Ca,Al 等) に富む粒子であり、O,Mg,Ca,Ti 等の様々な元素に同位体比異常がみられることから、その起源や形成機構を理解する事は太陽系初期の環境を理解する上で重要であると考えられる。

しかし、CAI の鉱物学的特徴や同位体の特徴が多様であることや、複数回の熱プロセスを経て形成された可能性がある一方でその熱源が明らかでないことから、CAI が如何にして形成されたかは必ずしも明らかにされていない。本研究では、東京大学にある二次イオン質量分析計 (SIMS) を用いて複数元素の同位体比測定と希土類元素濃度測定を行い、個々の CAI を形成した起源物質の同位体比や希土類元素 (REE) 濃度の特徴を明らかにし、それらを用いて CAI の起源や形成プロセスに制約を与えることを試みた。

CAI のうち、Coarse-grained CAI に分類される大型の CAI (~ 1 cm) は、熔融を伴う複雑なプロセスを経て形成されたと考えられている。Coarse-grained CAI は Wark-Lovering (W-L) rim と呼ばれる特徴的な層構造で外縁を囲まれている事が知られている。W-L rim は内側から ① spinel ( $MgAl_2O_4$ ) と少量の perovskite ( $CaTiO_3$ ) 層, ② melilite ( $Ca_2\{Al_2-MgSi\}SiO_7$ ) もしくは変成鉱物層, ③ diopside ( $CaMgSi_2O_6$ ) 層の 3 層構造を持つ (図 1)。W-L rim は厚さが僅か 50 $\mu m$  の程度の薄い層構造であること、CAI の最外殻に位置することから、CAI 形成の最終的なプロセスを反映している事が予想される。そのた

め、CAI 内部と W-L rim の比較を行うことで、coarse-grained CAI がどの程度多様な起源物質を取り込んで形成されたか、また如何にして形成プロセスが終了したかを理解する上で、W-L rim そのものの形成プロセスの解明は重要である。本研究では、まず W-L rim の Mg, O 同位体比と REE 濃度の局所分析を行い、rim 形成起源に関する考察を行った。

CAI 内部及び W-L rim の Mg 同位体比測定の結果を (図 2) に示す。F(Mg) は Mg 同位体比分別の大きさを示す (単位は ‰/amu)。Coarse-grained CAI 内部は重い Mg 同位体に濃集 (F(Mg)>0) している事が知られており、熔融時に Mg の蒸発を経験した為と考えられている。本研究では、W-L rim の spinel 層にも重い Mg 同位体の濃集 (F(Mg)>0) がある一方で、diopside 層には重い同位体の濃集は見られない (F(Mg)~0) 事を明らかにした。これは、W-L rim の spinel 層と diopside 層の起源が単一でない事を示している。また、REE 濃度分析の結果、W-L rim の spinel 層 (図 3 茶色) と diopside 層 (同 緑) の REE 濃度は CAI 内部 (同 青) と類似する事が解った。Spinel 層の重い Mg 同位体の濃集は、spinel が CAI 内部物質の熔融・固化の際に晶出したと考えると説明できる。これは、Coarse-grained CAI の平均組成とも調和的である。融解した物質は放射により表面から冷却が進行し、結晶の晶出はまず表面で行われる事が予想される。W-L rim の spinel 層は、融解した液滴の表面で晶出した spinel の痕跡であると考えられる。一方で、外側の構造は原始太陽系星雲ガスから供給されたと解釈せざるを得ない。これは、diopside 層の Mg 同位体比が重い同位体に濃集していないという測定結果と矛盾しない。Diopside

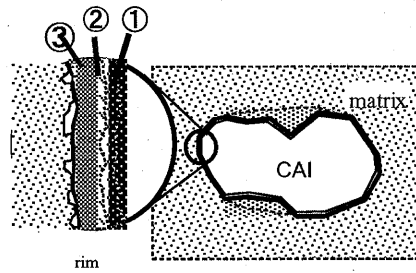


図 1 Coarse-grained CAI と W-L rim の模式図。

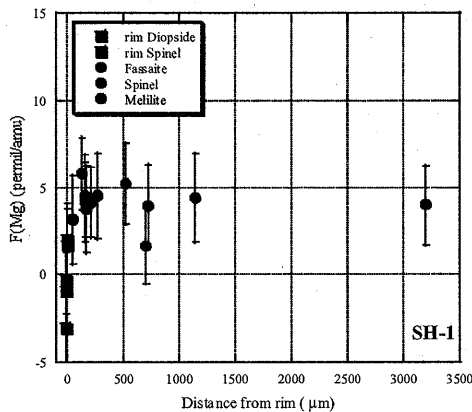


図 2 CAI 内部及び rim の Mg 同位体比

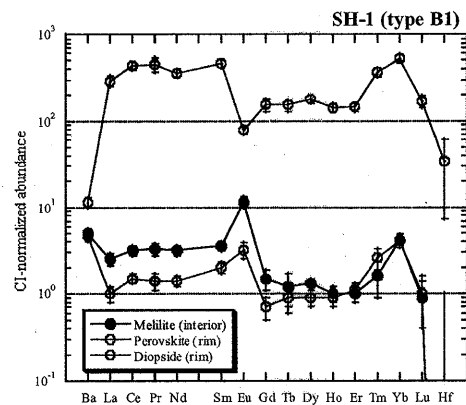


図 3 CAI 内部及び rim の REE 濃度層と CAI 内部の REE 濃度パターンが類似

する原因は明らかではないが、spinel 層を挟んで内部の物質と反応した可能性があるが、結晶化に伴う希土類元素の分配とは調和的ではない。本研究の結果は、CAI 内部と類似の REE 濃度パターンを持つ物質が集積したと考えると調和的である。この場合、coarse-grained CAI は共通の REE 濃度パターンを起源物質とする、極めて限定的な環境で形成されたことを示唆している。

次に、本研究では hibonite ( $\text{CaAl}_2\text{O}_9$ ) を主成分とする細粒の CAI ( $\sim 100\mu\text{m}$ ) (図4), hibonite inclusions, の Mg, O, Ca, Ti 同位体比の測定を行いその特徴について議論した。CAI には特徴的な酸素同位体比異常 ( $\delta^{17}\text{O}\sim\delta^{18}\text{O}\sim -50\%$ ) があることが知られており、CAI 形成領域に酸素同位体比異常があったと考えられている。Hibonite inclusions にはさらに Ca, Ti 同位体比異常を持つものがあることが知られている。しかし、Ca や Ti に同位体比異常がある CAI に関する O 同位体比のデータがほとんど無いため、Ca, Ti 同位体比異常を持つ CAI は特殊な (酸素同位体比的にも特異な) ものなのか十分に議論されなかった。多くの CAI の比較分析を行うため、薄片上の CAI を測定するだけでなく Freeze-thaw 法により隕石を破碎し直接 CAI を取り出す手法を用いた。図5に Ca, Ti 同位体比の測定結果を、図6に酸素同位体比の測定結果を示す。

Ca, Ti の同位体比異常は  $^{48}\text{Ca}$  と  $^{50}\text{Ti}$  に典型的に見られるため、図5には  $^{48}\text{Ca}$  と  $^{50}\text{Ti}$  の同位体比異常のみ示した。PLACs 及び Hib+Px spherule (図4参照) に大きな Ca, Ti

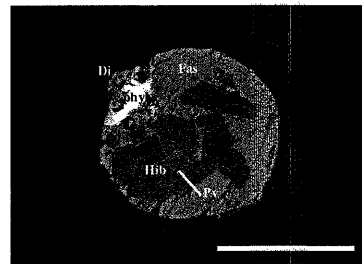
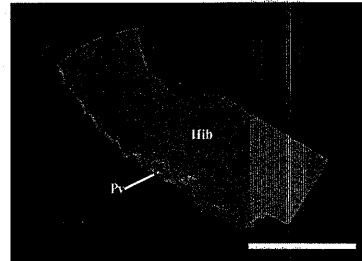


図4 Hibonite inclusions の SEM 像。Hibonite からなる PLACs (上) と Pyroxene を含む Hib+Px spherules(下)

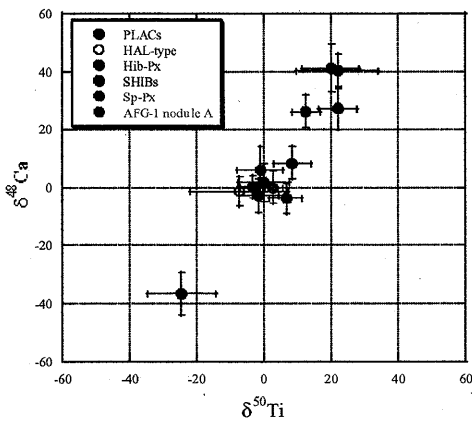


図5 Hibonite inclusions の Ca, Ti 同位体比。  $\delta^{48}\text{Ca}$ ,  $\delta^{50}\text{Ti}$  同位体比異常に正の相関がある。

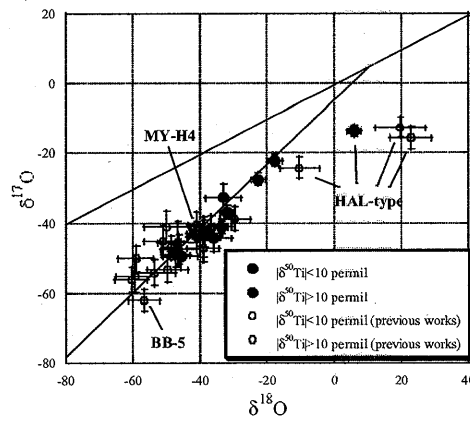


図6 Hibonite inclusion の酸素同位体比。  $\delta^{48}\text{Ca}$ ,  $\delta^{50}\text{Ti}$  に大きな同位体比異常を持つものも CCAM line 上に分布する。

の同位体比異常 (-40%~+40%) を持つものが見つかったが、酸素同位体比は CAI 全般に見られる CCAM line と呼ばれる直線上に分布した (HAL-type inclusions を除く)。図 5 に見られる  $\delta^{48}\text{Ca}$  と  $\delta^{50}\text{Ti}$  の正の相関は、これまで見つかった Ca, Ti 同位体比異常の傾向と一致している。このことから、Ca, Ti に大きな同位体比異常を持つ CAI も含めて、他の CAI と同様の酸素同位体比異常を持つ事が示唆される。

また本研究では、幾つかの PLAC 及び Hib+Px spherule の中に負の  $^{26}\text{Mg}$  同位体比異常を持つものがある事が明らかになった (図 7)。図 7 は PLAC 及び Hib+Px spherule と、一般の CAI のうち  $^{26}\text{Al}$  の放射壊変の影響の少ない Mg-rich 鉱物 ( $^{27}\text{Al}/^{24}\text{Mg} < 3$ ) の  $F(\text{Mg})$  と  $\delta^{26}\text{Mg}$  を同時に示したもので、それぞれ  $^{25}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$ 、 $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$  の同位体比異常の大きさに相当する。本研究における  $\delta^{26}\text{Mg}$  の測定精度は 1%程度であり、 $\delta^{26}\text{Mg} \sim 3\%$  は有意な値と考えられる。一般に、典型的な CAI には太陽系初期に存在した短寿命放射性各種； $^{26}\text{Al}$  (半減期 71 万年で  $^{26}\text{Mg}$  に壊変) の放射壊変に伴う正の  $^{26}\text{Mg}$  同位体比異常が見られる事が知られている。一方で、大きな Ca, Ti 同位体比を持つ PLACs と Hib+Px spherule は  $^{26}\text{Al}$  の痕跡が有意に小さい ( $^{26}\text{Al}$  存在量が少ない) ことが知られているが、単に  $^{26}\text{Al}$  の存在量が少ないだけならば、 $\delta^{26}\text{Mg} = 0$  になるはずである。 $\delta^{26}\text{Mg}$  の負の同位体比異常の存在は、太陽系形成初期には Ca や Ti 等の難揮発性元素の同位体ばかりでなく、比較的揮発性の高い Mg にも同位体比異常 ( $^{26}\text{Mg}$  の欠乏、あるいは  $^{24}\text{Mg}$  の欠乏) が残されていた証拠と考えられる。

$\delta^{26}\text{Mg}$  の負の同位体比異常は、PLACs や Hib+Px spherule に高い確率で見られる一方で、他の CAI からは有意な  $^{26}\text{Mg}$  の負の同位体比異常は見られなかった。これは、他の CAI に大きな Ca, Ti 同位体比異常が見られない事と調和的である。Mg, Ca, Ti 等の同位体比異常は、PLACs や Hib+Px spherule が形成された時期には太陽系内に同位体比の不均一があった事を示すと考えられる。また、そのような物質は coarse-grained CAI などの形成には寄与していないことも示唆される。

現在のところ、太陽系初期の同位体比の不均一性については十分な理解が得られていない。Mg は Ca や Ti に比べて極めて同位体比測定の容易な元素である。今後、太陽系初期の同位体比の不均一に関する研究を行う上で、Mg 同位体比測定は有力な手段になる事が期待される。

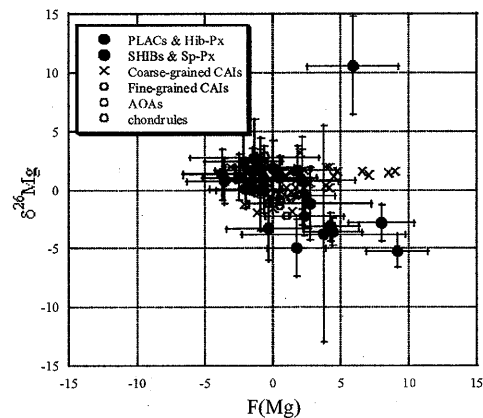


図 7  $F(\text{Mg})$ - $\delta^{26}\text{Mg}$  プロット。PLACs と Hib+Px spherule に  $\delta^{26}\text{Mg} < 0$  がみられる。