NWA8613隕石のヒボナイトとメリライトに富む難揮発性包有物の岩石学的研究

宇宙化学研究室 02142055 和田壮平

1 研究背景

炭素質コンドライトに含まれる難揮発性包有物 (CAI; Calcium-Aluminum-rich Inclusion) はCa やAl といった宇宙空間において最も蒸気圧が小さい元素群（難揮発性元素）に富む鉱物から構成されている. また, CAI は太陽系最古の年代 4567.30(±0.16) Ma を持つ (Connelly et al. 2012). そのためCAI の研究を通して, 太陽系形成初期の環境やどのようなイベントが起こっていたのかを明らかにすることができる(e.g. Yurimoto et al. 1998).
本研究では, CV3 コンドライトに分類されているNorth West Africa 8613 (NWA8613) 隕石に含まれる未研究のCAIの形成過程を明らかにするため, その岩石学的研究を行った.

2 対象と方法

対象 NWA8613 (CV3) 中に発見された未研究・未分類の CAI.

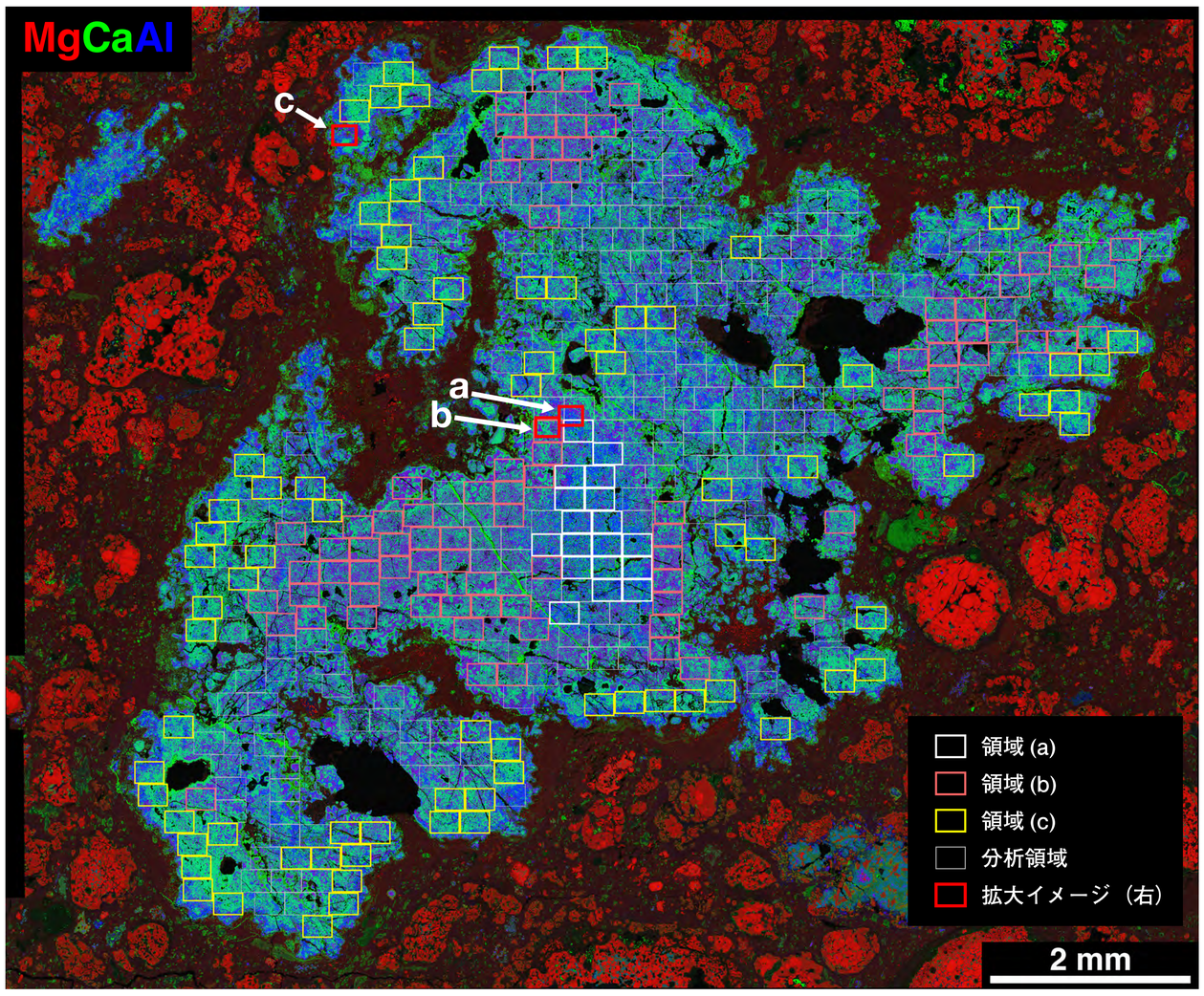
方法

分析	定量分析	BSE イメージング・X 線元素マップ
機器	FE-SEM (JEOL-7000F)	FE-SEM (JEOL-7000F)
	EDS (Oxford X-Max 50)	EDS (Oxford X-Max 50)
条件	加速電圧 15 kV	加速電圧 15 kV
	照射電流 1.3 nA	照射電流 18 nA
ソフトウェア	Oxford Aztec・Excel	Oxford Aztec・ImageJ・Photoshop

3 結果

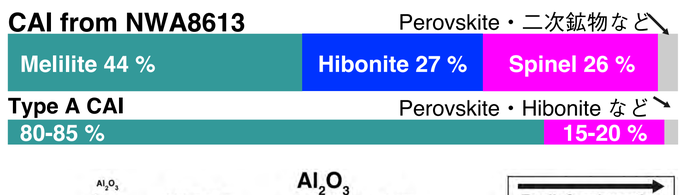
全体マップ

SEM-EDS で取得したX 線マッピングデータを, Photoshop でMg を赤, Ca を緑, Al を青として着色し, 岩石学的観察を行った. このCAI は不規則な外形をもつ. CAI 中心には, 主にヒボナイトとスピネルに富むコア領域(a) があり, その周りにはスピネルとメリライトに富む領域(b) がある. 最外部領域(c) はメリライトに富み, 外縁部はヒボナイトとスピネルからなるリムに囲まれている.



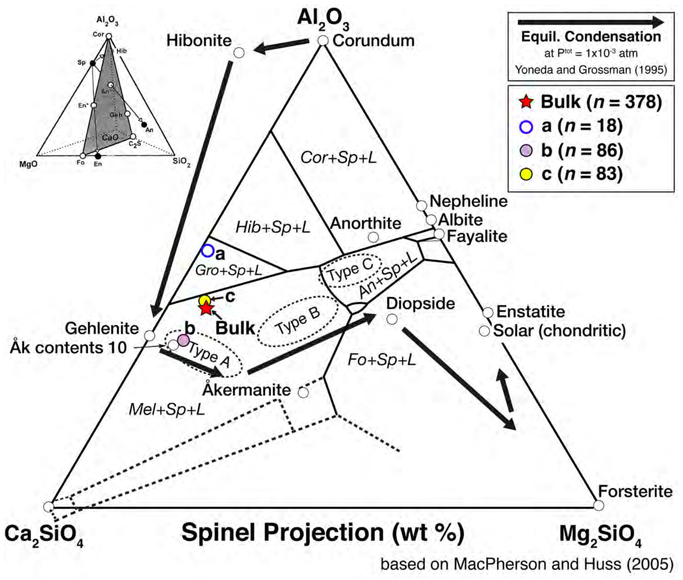
鉱物比

上のマップデータから鉱物比を割り出した. 本CAIはType A CAI に近い鉱物組み合わせをもつが, よりヒボナイトに富む. このような構成鉱物比をもつCAI はこれまでにほとんど報告されていない.



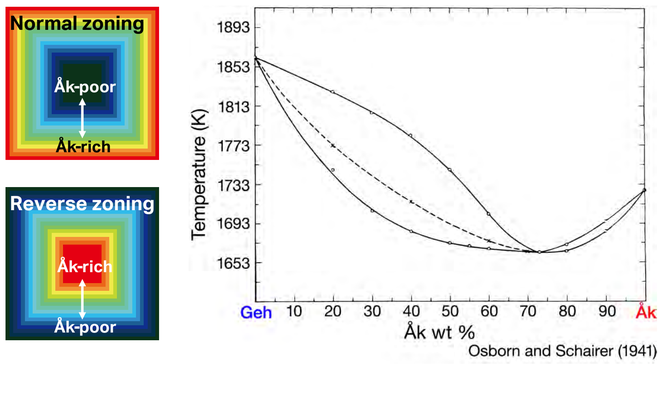
三角グラフ

CAI 全体を, マトリックスを含まないように 378 面の領域に分割し, 各面ごとにラスターした電子ビームを用いて定量分析を行った. 各面のデータをもとに, 領域(a), (b), (c) とバルクCAI の平均組成を計算した. それぞれの組成データはCaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2系のSpinel projection 図（右図）上でスピネル飽和面よりも上に位置する.

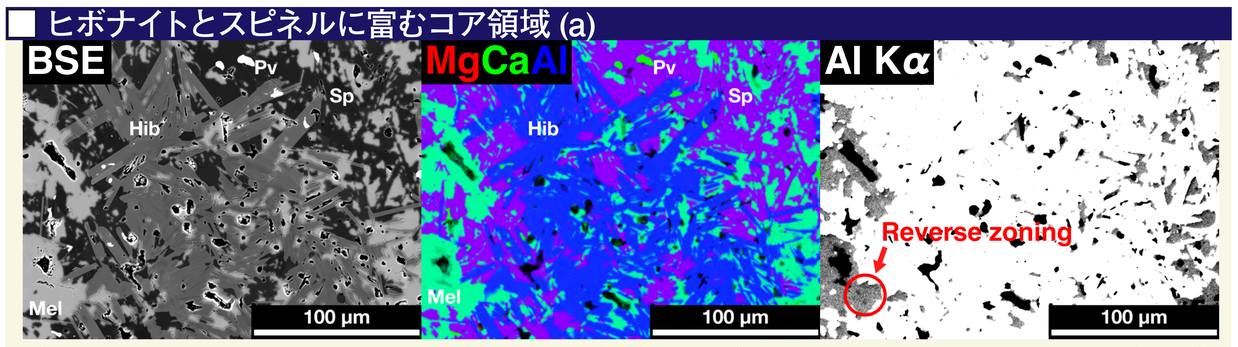


メリライトについて

オケルマナイト(Åkermanite) $Ca_2MgSi_2O_7$とゲーレナイト(Gehlenite) $Ca_2Al_2SiO_7$を端成分にもつ固溶体である. 相図を右に示す.
Normal zoning は火成プロセスと凝縮プロセスの両者により説明される. 対して, 本CAI のようなゲーレナイトに富むメリライトのReverse zoning は星雲ガスからの凝縮プロセスでのみ説明されている (MacPherson and Grossman 1984).

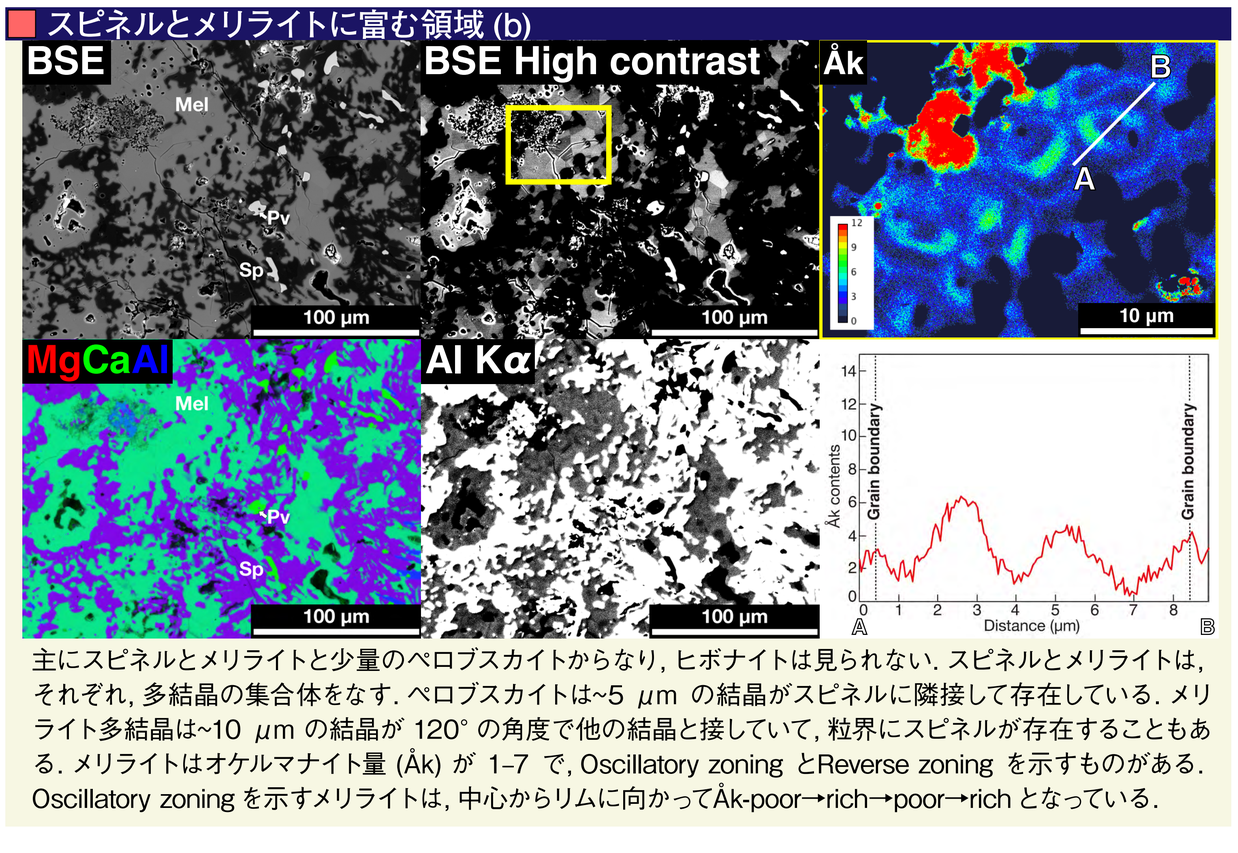


■ ヒボナイトとスピネルに富むコア領域 (a)



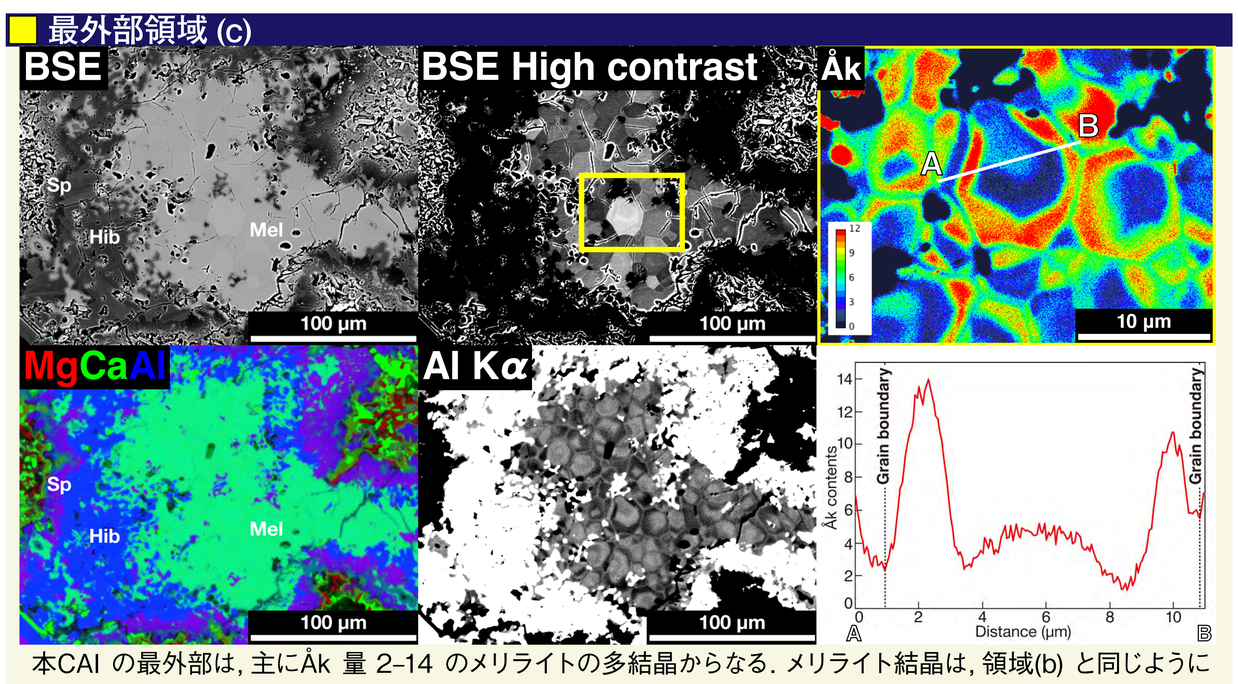
主に~100 μm のヒボナイト(Hib) とスピネル(Sp) と少量のペロブスカイト(Pv) とメリライト(Mel) からなる. 他の領域に比べてヒボナイトに富み, CAI の中心部分にしか見られないことから, コア領域とした. ヒボナイトは自形～半自形を示し, その周囲および隙間にメリライトとスピネルが見られる. メリライトは結晶サイズが 10 μm 以下であり, また化学組成の変化が乏しいことから, 顕著なゾーニングはあまり観察されなかったが, 一部のメリライト結晶はReverse zoning を示した.

■ スピネルとメリライトに富む領域 (b)



主にスピネルとメリライトと少量のペロブスカイトからなり, ヒボナイトは見られない. スピネルとメリライトは, それぞれ, 多結晶の集合体をなす. ペロブスカイトは~5 μm の結晶がスピネルに隣接して存在している. メリライト多結晶は~10 μm の結晶が 120° の角度で他の結晶と接していて, 粒界にスピネルが存在することもある. メリライトはオケルマナイト量 (Åk) が 1–7 で, Oscillatory zoning とReverse zoning を示すものがある. Oscillatory zoning を示すメリライトは, 中心からリムに向かってÅk-poor→rich→poor→rich となっている.

■ 最外部領域 (c)



本CAI の最外部は, 主にÅk 量 2–14 のメリライトの多結晶からなる. メリライト結晶は, 領域(b) と同じように ~10 μm の大きさの結晶が 120° の角度で他の結晶と接している. メリライトの粒界には 1–5 μm のスピネルがある. また, このメリライトはOscillatory zoning を示す. 中心からリムへÅk-rich→poor→rich→poor となっている結晶とÅk-poor→rich→poor となっている結晶がある. この波の回数は結晶サイズによって異なるが, 全ての結晶で粒界はÅk-poor となっている.
CAI の外縁はヒボナイトとスピネルのレイヤー構造で囲まれている. メリライト部分のすぐ外側は 10–15 μm のヒボナイトレイヤーがあり, さらに外側を 5–10 μm のスピネルレイヤーが囲んでいる. コア領域(a) のようなペロブスカイトは見られなかった.

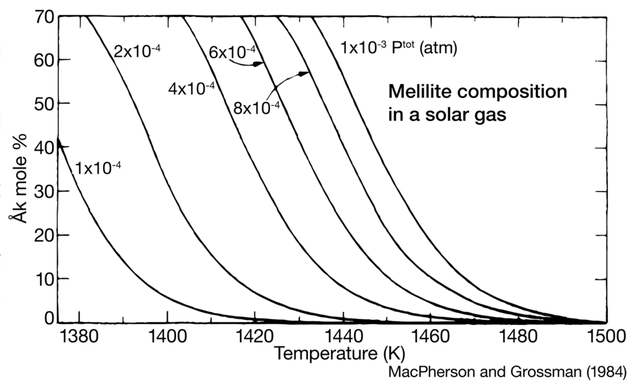
4.1 形成過程と結晶化シークエンス

各領域およびCAI バルクの化学組成のスピネル座標値(a: 24, b: 40, c: 16, Bulk: 27) は, 全てスピネル飽和面 (~0–10) より上にあることから, メルトから結晶化した場合, 最初にスピネルが結晶化する. 領域(b), (c) と, 領域(a) は, 化学ギャップを挟んだ座標にそれぞれプロットされている. つまり, 1 つの包有物内で異なる化学システムを持つ系が共存しているため, 単一メルトからの結晶化による本CAI 形成は考えにくい.

領域 (a)	**ヒボナイト・スピネル形成→メリライト形成** 化学組成がグロッサイト+ スピネル領域にプロットされたにも関わらず, グロッサイトの存在は確認されなかった. そのため, メルトからの結晶化では説明できず, 凝縮により形成したと考えられる. 自形に近いヒボナイトが集合していて, その周りにメリライトがあることから, ヒボナイト, メリライトの順で形成されたと考えることができる. この順序は凝縮による形成順序と調和的である.
領域 (b)	**スピネル形成→メリライト形成** この領域のメリライトのゾーニングはメルトからの結晶化では説明できない. そのため, この領域も凝縮により形成したと考えられる.
領域 (c)	**メリライト形成→再度の凝縮によるリムの形成** メリライトのゾーニングは領域(b) と同様, メルトからの結晶化では説明できないため, 凝縮により形成したと考えられる. 圧力が 1x10^{-3} atm のとき, Åk 量 2-14 のメリライトの凝縮温度は 1465–1490 K に対して, ヒボナイトは 1750 K である. そのため, リムを一度の温度降下中に作ることはできない. しかし, 再び温度上昇が起きたと考えると, メリライトの融け始める温度はÅk 量 2–14 で 1768–1833 K であることから, 内側のメリライトが融けることなくリムを凝縮プロセスで形成可能となる. また, メリライトは, このときの加熱による焼結で, 緻密な結晶粒で構成される組織をもったのかもしれない.

4.2 メリライトの結晶成長ゾーニング

星雲ガス中のメリライトは, わずかな圧力の変化でもその組成が変動すると考えられている. MacPherson and Grossman (1984) による太陽系星雲ガスからメリライトが凝縮するときの組成変化と温度圧力との関係を右図に示す. この図によれば, 今回のようなÅk 量 2–14 や 0–7 の範囲での変動は, わずかな温度圧力条件の変化で実現可能なことがわかる.
本CAI に見られるOscillatory zoning とReverse zoning のメリライトは本CAI が凝縮プロセスによって形成された証拠であり, 温度圧力条件が何度も変動していた環境下で形成されたことがわかる.



5 まとめ

本研究により, 本CAI は温度圧力条件が何度も変動する環境下で凝縮し形成したことが示唆された. 領域(b), (c) のメリライトの結晶成長ゾーニングは, 凝縮時の温度圧力変化を示す. また, 領域(c) のCAI リムの形成時には, 本CAI が再び高温下にあったはずである. 今後は, それぞれの組織の年代学的関係性を解明する. そのため, 各領域に含まれる鉱物の相対形成年代測定を, 二次イオン質量分析法を用いた ^{26}Al-^{26}Mg 法により行う.