

論文内容の要旨

論文題目 Mineralogical Study of Amoeboid Olivine Aggregates in CV3 chondrites:
Implications for Their Origin and Relation to Chondrules
(CV3コンドライト中の Amoeboid Olivine Aggregates の鉱物学的研究:
その起源とコンドリュールとの関連性について)

氏名 高橋(小松)睦美

1. 目的

Amoeboid olivine aggregates (AOA)は、数種の炭素質コンドライト中に見られ、細粒の鉱物から成る数 mm から数 cm 程度の集合体である。AOA の大きな特徴の一つは、その中に難揮発性鉱物と Mg ケイ酸塩鉱物とが共存しており、Ca,Al-rich インクルージョン(CAI)とコンドリュールとの関連を示唆していることである。本研究では、oxidized CV コンドライトより未分化で始原的であると考えられている reduced CV コンドライトを研究対象とし、その中に含まれる AOA の鉱物学的特徴、その熱史及び CAI とコンドリュールとの関連性について明らかにすることを第一の目的とした。

過去の研究により、AOA は原始太陽系星雲ガスからの凝縮物であり、凝縮後、層状ケイ酸塩を生成するほどの温度までガスと反応して形成されたと考えられている。しかし、本研究において reduced CV コンドライトの鉱物学的特徴を調べた結果、AOA の組織は、平衡凝縮計算とは合致しないことが明らかになった。この問題を研究するため、本研究ではさらに AOA に含まれる鉱物の加熱実験を行い、AOA に含まれる鉱物間の関係、その成因及び凝縮計算に基づいた AOA の形成過程について考察した。また、AOA には大規模な溶融を経験した組織が見られないことから、AOA のコンドリュールの前駆物質としての可能性も考察した。

2. AOA の鉱物学的及び化学的特徴

Reduced CV コンドライトの Efremovka, Leoville, Vigarano に含まれる AOA は、細粒の Mg 成分に富む Ol と Ca, Al に富んだ難揮発性ノジュールから構成されている。AOA 中に含まれる難揮発性ノジュールの大きな特徴は、An のコアの周りに Al-ディオプサイド(Cpx)が存在し、Ol と接していることである(図1)。また、AOA には大規模に溶融した形跡は見られないが、Ol の 120° triple junction、ドーナツ状の Ol、丸みを帯びた Fe,Ni 金属相の存在など、AOA が高温の annealing を受けたことを示唆する組織が存在する。これらの観察結果を基に、annealing が AOA に与えた影響を調べるため、合成のフォルステライト(Fo)、天然の Ol、An、メリライト(Mel)、ペロブスカイト(Pv)の混合粉末の等温実験及び冷却実験を行った。

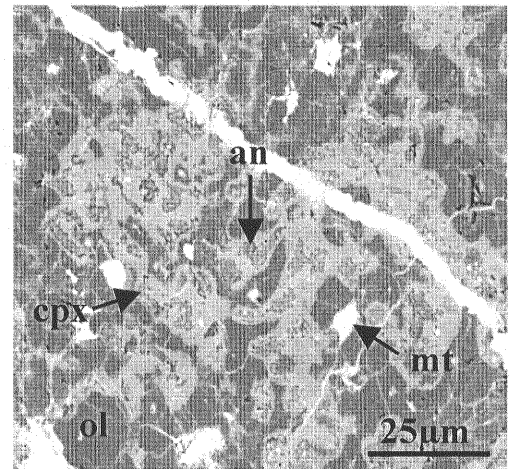


図1. AOA の BSE 像。An は Cpx に囲まれており、それらは Ol の aggregates に取り込まれている。

3. 加熱実験

粉末の出発物質は、酸素分圧制御された電気炉中において設定温度まで加熱後、等温実験ではクエンチ、冷却実験では冷却速度を一定に保ちながら冷却し、その後、SEM、EPMA、電子後方散乱回折像法 (EBSD) を用いた鉱物学的研究を行った。

3.1. Fo + An 混合粉末

図2 に Fo/An=1 の混合粉末の等温実験結果を示す。1298 °C で An はリムから部分溶融し始める(図2,b)。1318 °C では An と Fo の部分溶融により、メルト(Cpx-like phase) が出現する(図2,d)。1337 °C で An は完全に溶融(図2,e)し、Fo の溶け残りだけが観察された。

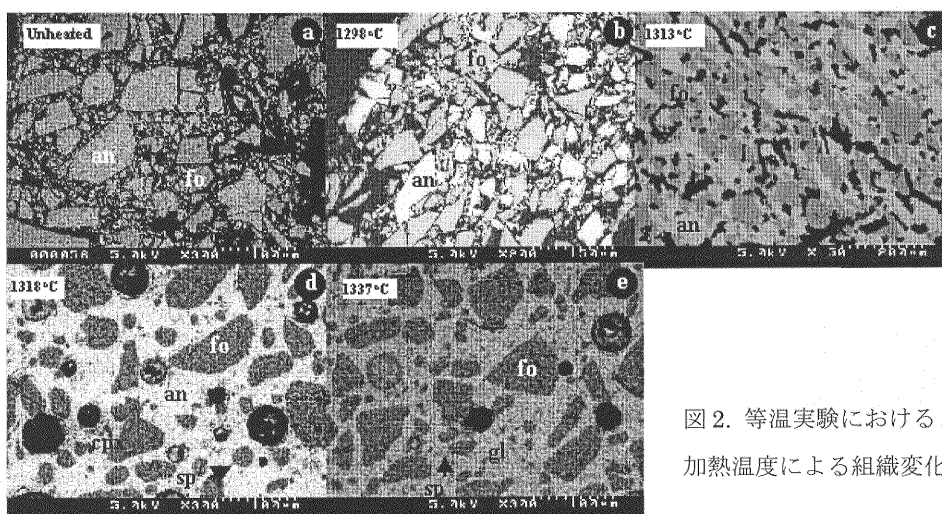


図2. 等温実験における Fo+An 混合粉末の加熱温度による組織変化(BEI 像)。

次に、Fo + An 混合粉末について $10^\circ\text{C}/\text{h} \sim 500^\circ\text{C}/\text{h}$ の冷却速度範囲で上記と同様の冷却実験を行ったところ、Cpx-like phase は等温実験のときよりも広い温度範囲で存在し、加熱温度が高い程 Cpx-like phase の量が多いことがわかった。冷却実験後の Fo + An チャージ中での、An の周囲に Cpx-like phase があるという

特徴は、AOAと共通するものである。また、10°C/hで冷却したチャージでは、500°C/hで冷却したものに比べて、Cpx-like phaseが塊状に存在する傾向がある。CAIの冷却速度は~1-10°C/h(Stolper and Paque, 1986)、コンドリュールの冷却速度は~5-2000°C/h(e.g., Hewins, 1988)であることを考慮すると、加熱の起こった場所はCAI形成域、コンドリュール形成域のどちらで起こったかは決定できない。

Fo+Anの等温実験チャージ及び冷却実験チャージに含まれるCpx-like phaseの化学組成を調べた結果、冷却実験チャージ中のCpx-like phaseの化学組成は、AOAに含まれるCpxの組成と近い値を持つことがわかった。一方、等温実験で得られたFo+An中のCpx-like phaseの化学組成はAOAのCpxの化学組成に比べて、SiO₂とCaO量が低い値を示した(表1)。

Cpxに含まれるTiO₂量の変化を調べるために、Fo+Anの出発物質にPvを加えた実験を行った結果、Tiを含むCpx-like phaseが得られた。しかし、AOA中に見られるPvはスピネルよりも内側に存在することを考えると、Pvを溶解するには、大部分のAnとスピネルが熔融されなければならない、PvがFoとAnの反応に関わった可能性は低いと考えられる。

表 1. AOA 中の Al-ディオプサイドと加熱実験で得られた Cpx-like phase の化学組成

wt%	AOA		Isothermal experiments			Crystallization experiments		
	Al-diopside	Al,Ti-diopside	ol+an	fo+an	ol+mel	fo+an	fo+an+pv1%	fo+an+pv5%
SiO ₂	48-53	35-38	40-45	43-48	36-41	43-54	40-47	36-45
Al ₂ O ₃	0-17	20-30	10-20	15-25	2-14	7-23	8-20	13-19
TiO ₂	0-3	7-10	0	0	0	0	0-8	1-12
FeO	0-1	0-1	6-7	0	0-5	0	0	0
MgO	14-16	9-10	11-30	13-14	10-26	11-24	15-20	10-18
CaO	17-25	21-25	5-16	15-17	29-40	14-20	19-22	15-23

3.2. Ol + An 混合粉末

Ol+Anの混合粉末の等温実験では、Fo+Anの等温実験と同様、加熱温度の上昇による組織の変化が見られた。1288°Cサンプルに見られるOl-Cpx-like phase-An組織は、AOAに見られるOl-難揮発性ノジュールの特徴と類似しているが、冷却実験後のチャージ中には、Ol、An、Cpx-like phaseに加えmesostasisが見られた。また、実験チャージに含まれるCpx-like phaseの化学組成は、AOA中のCpxに比べ低いSiO₂とCaO量を示した。

3.4. 結晶性

AOA中に含まれるOl、An、Cpx及び加熱実験チャージ中のCpx-like phaseの結晶学的特徴は、EBSDを用いて調べられ、その結果、AOA及び実験チャージ中の全ての結晶から菊池パターンが得られ、結晶であることが明らかになった。

4. コンドリュールとの関連性

AOAとAl-richコンドリュールは、その構成鉱物が類似しているだけでなく、バルク組成も近い値を持ち、二つが関連していることを示唆している。しかし、AOAに含まれるCpxの化学組成はAl-richコンドリュールに含まれるものに比べTi、Crの含有量が低く、AOAを直接熔融しただけではAl-richコンドリュールは生成

されないことが明らかになった。

5. 過去のモデルとの比較

平衡凝縮モデル計算によると(e.g., Yoneda and Grossman, 1995)、AOA の構成物質の凝縮温度はスピネル(1228°C)、Cpx(1176°C)、Fo(1170°C)、An(1143°C)である。平衡凝縮計算では An は最も低温で凝縮すると予想されているにもかかわらず、AOA ではスピネルと Cpx の間に存在する。過去の AOA の研究では An は Mel(1356°C)の2次的変成によって形成されたと考えられていたが(Grossman, 1976)、それでは低温で凝縮するスピネルの後に高温で凝縮する Mel が形成されたことになってしまう。さらに、2次変成を殆ど受けていない reduced CV にも An が含まれており、An は primary である可能性が高い。An がスピネル+ディープサイドと星雲ガスとの反応で出来るのに対し、Fo は星雲ガスから直接凝縮する (e.g., Grossman, 1972)ことを考慮すると、AOA の形成過程では、Al,Ti-ディオプサイド(Ti-Cpx)、スピネル、An から成り立つ難揮発性ノジュールが出来上がった後、細粒の Fo が集積したものと考えられる。その後、AOA は加熱を受け、Fo と An の部分溶融により Cpx が形成されたことが示唆された。

6. 結論

本研究において、reduced CV コンドライト中の AOA の鉱物学的研究を行った結果、reduced CV コンドライトに含まれる AOA は、oxidized CV コンドライト中のものに比べ、より始原始的であることが確認された。

AOA 中の難揮発性ノジュールの存在は AOA が高温で凝縮したことを示唆し、星雲内での CAI 形成領域に起源があることを示している。また、AOA は難揮発性ノジュールを中心とした concentric な組織を持ち、コアからリムに向かって、 $\pm(\text{Ti-Cpx} + \text{スピネル}) \rightarrow \text{An} \rightarrow \text{Cpx} \rightarrow \text{Ol}$ という鉱物層序を持つことが明らかになった。過去の研究では、AOA は凝縮後、層状ケイ酸塩を生成する温度までガスと反応したと考えられていたが、reduced CV コンドライト中の AOA に観察される組織と平衡凝縮計算を比較した結果、AOA は単純な平衡凝縮過程では形成されないことが示唆された。

AOA には大規模な溶融を経験した形跡は見られない。しかし、Ol の 120° triple junction 等、高温での annealing を受けたことを示す組織が見られた。加熱実験の結果、AOA が受けた annealing によって Fo と An の部分溶融が生じ、Cpx が形成された可能性があることが示された。Ti 量の異なる Cpx が2種存在すること、AOA 中で Cpx が Ol と An の間に存在することは、この反応が起こったことを支持するものである。

Al-rich コンドリュールは AOA と類似した鉱物から成り立ち、バルク組成も重なりを示す。しかし AOA には中揮発性元素が殆ど含まれておらず、AOA を直接溶融しただけでは Al-rich コンドリュールは生成されないことが明らかになった。また、AOA は星雲内で形成された後、エンスタタイト、Mn、Na、K が凝縮する部分からは独立した状況に置かれたことが示唆された。

本研究から推測される AOA 形成のシナリオは以下の通りである。①星雲ガスからのスピネル、Ti-Cpx の凝縮(1415~1176 °C)②星雲ガスからの Fo の凝縮(~1170°C)、スピネル+Ti-Cpx と星雲ガスとの反応により、An の形成(~1143°C)、③アグリゲイットの形成④高温の凝縮域からの物理的移動⑤再加熱及び部分溶融の結果、Cpx の形成⑥CV コンドライト母天体の形成⑦2次的変成。