

特集「初期太陽系の物質科学」

微小重力での実験宇宙科学に向けて

塚本勝男¹，佐藤久夫^{1,4}，小島秀和¹，高村 禪²，栗林一彦³

1. 微小重力実験の進展

地上からたった300キロ上空に上昇するだけでスペースシャトルの軌道に達する。その軌道では広大な宇宙空間が広がるだけでなく、重さを感じない微小重力環境がある。そこでは多数の材料科学に関する研究が行われ、2004年に運用開始予定の国際宇宙ステーション計画 (ISS) に向けて準備が進められている。これらのプロジェクトを推進してきた背景には、地上と微小重力では結晶の出来方がどのように異なるだろうかとという純科学的な興味がある。

微小重力でのいくつかの特徴を挙げるのは容易である。例えば、比重差が生じないので均質な混合物をつくりやすい、あるいは、対流の発生を抑制できるので、均質な結晶を作りやすい、等々である。しかし、この微小重力環境で結晶がどのようにして成長するのかの答えを出すのは容易なことではない。なぜならば、対比を行うためには、地上での結晶成長メカニズムの研究と同じ精度の実験が求められるからである。

これまでの宇宙実験はデモンストレーション的な実験が主であったことは否定できない。しかし、この事情はこの数年で大きく変わってきている。地上では行えない高精度な結晶成長の“その場観察”実験も宇宙空間では実施されている¹⁾。

これらの微小重力実験で培われてきたことは、惑星科学にとっても決して無縁ではない。この地上で実験をする限り重力というベールに包まれている。このベールを剥がすと、これまで見えてこなかった現象が頭を

持ち上げてくる。これらの現象の理解が惑星科学の将来にとって重要な鍵となるかもしれない。

2. 微小重力での結晶成長

これまでの微小重力実験の詳細を紹介するのは、ここでの目的ではない。ただ、微小重力での特徴として結晶の核形成が桁違いに遅れることは述べなければならない。これは、(1)液が浮遊して容器に接触しないために、不均質核形成が起こりにくい、(2)温度差や濃度差に起因する対流が起こらない、などが主な原因である。そのために過冷却度が大きくついた融液でも長時間安定に存在する。

原始太陽系が誕生する際に初めて溶融・固化を経た物質として、隕石中に多数含まれるコンドリュールをあげることが出来る。これまでコンドリュールの組成、組織などの解析を通して、太陽系形成時の情報を得ようとする研究が多数ある。たとえばコンドリュール特有の組織を再現する実験はTsuchiyama et al.[1]を初めとする多くの研究者によってなされている。

結晶はその誕生した環境の温度や濃度条件によって様々な形態をとる。ゆっくり成長したオリビン結晶は、短柱状のバルキーな形態をとることが常である。しかし、コンドリュールの中には切断面が短冊状のバー状構造をとるものがしばしば見られ(図1)、バードオリビン・コンドリュールと呼ばれる。これはコンドリュール特有のものであり、その成因を結晶成長の立場から理解し、生成条件を知ることは重要である。

1 東北大学大学院理学研究科

2 東京大学大学院工学研究科

3 宇宙科学研究所

4 (現在所属)地質調査所

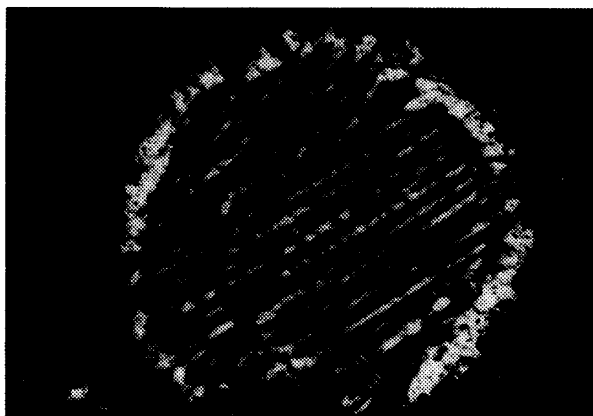


図1 Allende隕石に含まれるバードオリビン・コンドリュール（直径約2mm）。結晶化した最外層の“リム部”と内部のバー状組織の2重構造が見える。光学顕微鏡像

微小重力での結晶成長では、結晶は地上と異なる形態をとることが多い。図2にその一例としてディオプサイド($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$)の結晶を示した。地上では短柱状から針状をとるが、微小重力では全く予想しなかった羽毛状形態をとる[2]。この形態は対流が阻止されて拡散律速の成長となっただけでは説明が付かない。フォルステライト(Mg_2SiO_4)の結晶についてももしかり。急速な成長で期待されるような樹枝状形態とは異なるバー状組織が多く、形態の理解はこれまで十分になされ

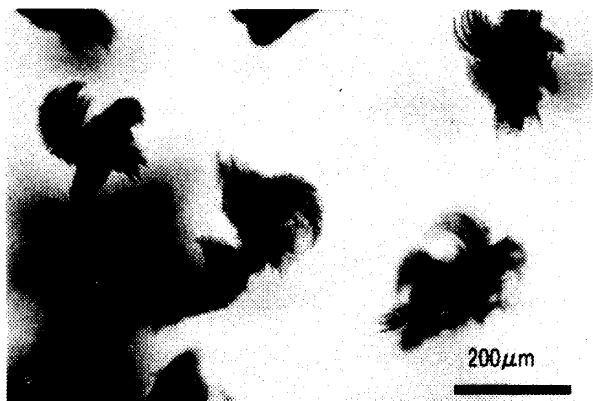


図2 微小重力で成長する羽毛状のディオプサイド結晶。重力下での成長では短柱状の結晶である。

ていない。

このように惑星空間で形成された結晶の多くは、現在の結晶成長学では十分に理解できない点が多い。

これらの問題のいくつかは微小重力での結晶成長の特徴に起因すると著者は考える。その一例として、図1のバードオリビン・コンドリュールに戻ろう。確かにこれまでの地上実験では、バー状組織の再現はなされ、数千～数万 $^{\circ}\text{C}$ /時の冷却速度での組織であると結論付けられている。しかし、従来の地上実験で得られたコンドリュールと天然のコンドリュールの間には決定的な違いがある。天然のコンドリュールは表層全面が厚さ数十 μm のオリビン結晶の層（以後、本稿では“リム部”と呼ぶ）で覆われている（図1）が、従来の合成コンドリュールにはそれが見られない。この現象を微小重力での融液の容器やホルダーとの非接触成長のせいと考えた著者は、微小重力での実験を計画した。その第一歩として、まず微小重力の特徴の一つである容器なしの浮遊実験を試みた。浮遊には幾つかの方法があるが、今回は超音波浮遊を利用した実験の紹介である。音波を使う限り真空での実験は出来ないという批判もある。しかし、浮遊法には静電浮遊や電磁浮遊もあることを忘れてはならない。ここでは、液の非接触がもたらす現象の理解に焦点をあてよう

3. 音波浮遊によるコンドリュールの初めての合成

今回利用した浮遊炉の構成を図3に示した。3軸方向に配置した6つの発信器から22KHzの超音波を出し、1点で数ミリのフォルステライト球を浮遊する方法である。Containerless Research Inc.製の装置特徴として、重力下での浮力を稼ぐために下方からアルゴンなどのガスを吹き付ける。加熱には大出力炭酸ガスレーザーを使用する。温度測定やマクロな画像の記録は1KHzでおこない急速な変化に追従させた。

実験の詳細はオリジナル論文に譲るとして、ここではエッセンスだけの紹介とする。出発物質として、2ミリ程度大のフォルステライト球を用意する。チョクラルスキー法で合成した試料でも天然試料でもかまわな

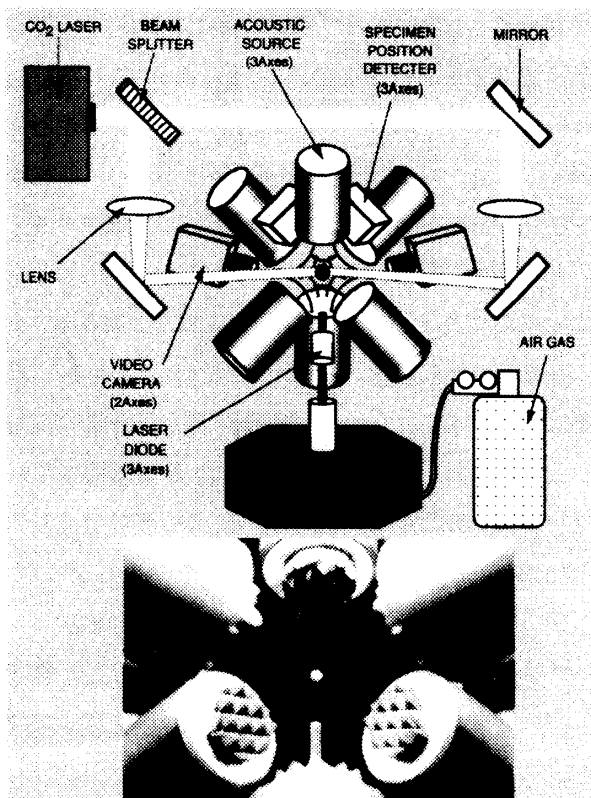


図3 音波浮遊装置の構成。写真(下)は浮遊している高温融液。Containerless Research Inc.提供。

い。浮遊前にこれを熔融・凝固させ球形にする。この作業は安定な浮遊に不可欠である。実験は、安定に音波浮遊させた球に炭酸ガスレーザーを左右から照射し熔融状態に数秒保つ。その後、レーザー加熱を停止し急激に冷却を行う。

この方法で作成した合成コンドリュールの走査電子顕微鏡 (SEM) 像を図4に示す。特徴的なのは表面を

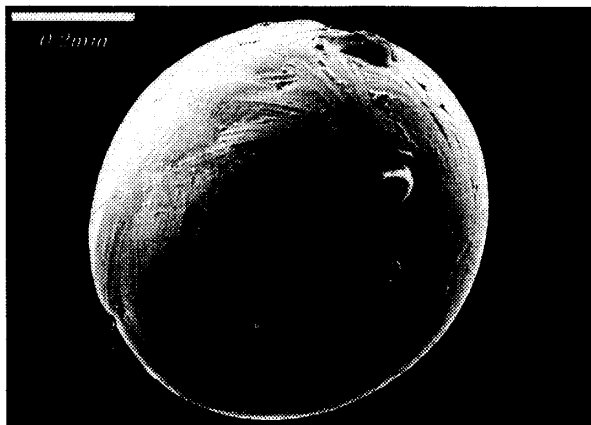


図4 音波浮遊による合成コンドリュール。SEM像。表面の2次元の樹枝状結晶と赤道面に沿って配列する突起に注目。

覆う2次元的な樹枝状結晶であろう。凝固したコンドリュールは完全な球ではなく1軸方向にひしゃげた回転体である。その赤道面にそって、火山のように吹き出した丘も見られる。前者は、浮遊のために下方から吹き付けるガス圧のため、後者は、回転に伴う遠心力のためと考えられる。

4. リカレンスの重要性

凝固過程の熱履歴測定(放射温度計)と組織観察(高速度TVカメラとSEM)の結果をまとめたものが図5である。純粋なフォルステライトは透明であるため、たとえ2波長で測定し補正しようとしても大きな誤差を生じる。そのために、縦軸の温度は相対的な値である。ただ、天然試料など不透明な融液では正しい値に近づく。図5(a)は天然試料を溶かした不透明融液からの温度測定である。加熱停止後1.5秒程度で1200℃付近まで温度が低下していく。その後急激な温度上昇に転じ、わずか0.1秒ほどの間に融点付近まで達した後、再び温度が振動しながら低下していくのが見られた。このような急激な冷却に続く急激な温度上昇は全く予想しな

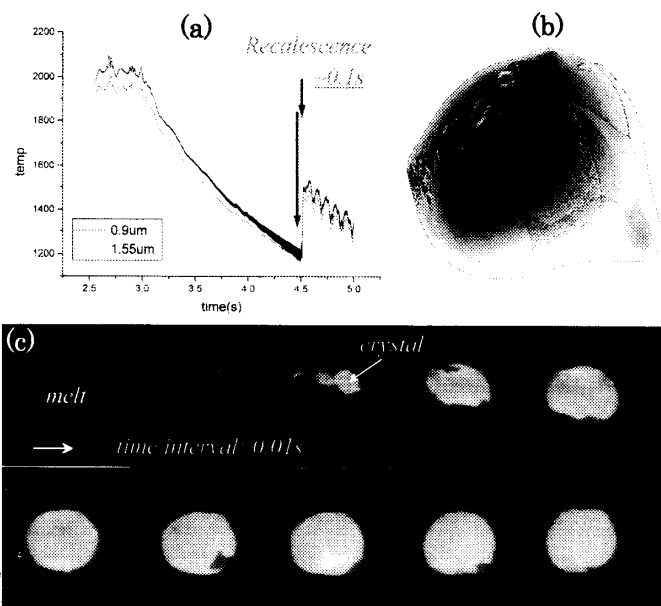


図5 コンドリュールの形成過程。(a)放射温度計による表面温度履歴、(b)合成後のSEM像、(c)高速度TVカメラによる可視光による連続画像。白く現れるのが2次元的な樹枝状結晶に対応。融液球は0.1秒で1回転し表面での結晶化が完了する。これはリカレンス過程の0.1秒間に対応する。

かったことである。ここで何が起きているかは、1/1000秒の時間分解能をもつ高速度TV画像を見れば分かる。

図5(c)はその連続画像であり1/100秒毎の像を示した。表面上に白く発達してくるのが2次元的な樹枝状結晶である潜熱の発生が周囲の核形成を抑制しているのが分かる。温度データと照らし合わせてみると、球が0.1秒で1回転する間に表面は結晶で覆われてリム部が形成されるのが良く分かる。結晶が球の赤道面近くに配列するのは遠心力によるのであろう。終盤になると内部の過冷却融液が外部へと噴き出し、いびつな球として凝固する。このコンドリュールのSEM像も示した(図5(b))。

重要なのは、無容器であるために1000°C程度の高過冷却が達成され、その後の0.1秒間に融液温度が融点近くまで急激に上昇しながら液表面での結晶化が完了することである。通常の実験では100°C程度の過冷却でも容易に結晶化が始まってしまうから、この過冷却度の大きさは驚異的である。この温度上昇は結晶化にともなうリカレンス(復熱過程)を示している。リカレンスとは、過冷された融液が結晶化過程で潜熱を放出し、再び固-液共存温度(融点)に戻ろうとする現象である。これまでの珪酸塩の結晶化で顕著なリカレンスの報告がなかったのは、高過冷却が達成されるような無容器実験がなかったからであろう。容器やホルダーに保持された液体では、熱は容易にホルダーを通して逃げる。また、接触点からの不均質核形成が起こりやすいため液体の高過冷却は達成されない。

このリカレンスは天然コンドリュールのリム部とバー状組織の2重構造の形成に決定的な意味を持つ。つまり、表層のリム部はリカレンス過程で形成される。この段階では球表面の温度は内部より高く、内部から外部への熱の拡散は起こり得ない。そのため内部には完全に断熱された状態で熔融状態が数秒間維持される。内部の冷却はリカレンスが終了した後、放射冷却により球表面の温度が内部より下がった段階

で初めて生じる。そのために内部の温度低下は周縁部に比べると位相差を生じることになる。この冷却過程の位相差がリム部とバー状組織の2重構造を生む原因となる[3]。1000°C近くの大きな過冷却がバー状組織をもつオリビン・コンドリュールの形成に重要であるという結論は、融液全体の速い冷却がバードオリビン形成に必要であるという従来の説とは大きく異なる。大きな過冷却で表層部の結晶化が始まれば自動的に潜熱の放出が続き、その後、内部の過冷却融液の凝固へと移行するという新しいモデルは、原始太陽系で高過冷却融液がどのようにして形成されたかに答える新しい情報となろう[3]。

図6には最も天然に近い2重構造をもつ合成コンドリュールを示した。ここでは、リム部と内部のバー構造は同時に再現されている。ここで注目すべきは中央部の穴である。これは加熱時に沸騰により発生したか、あるいは、外部から取り込まれた気泡である。高速度TV画像(図5(c))で示したように、浮遊している球は容易に回転する。無重力ではなおさらであろう。気泡が中央に位置するのは回転による遠心力のため軽いガスが“浮いて”くるからである。確かに天然のコンドリュールにはこのような気泡は観察されないが、あえてこの画像を提示するのは、この遠心力が融液からの軽元素の宇宙空間への飛散をも十分に阻止するのではないかと考えるからである。気-液間の元素の分配

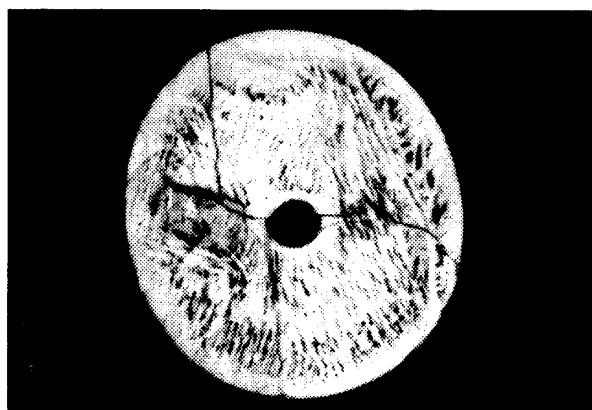


図6 気泡を含むコンドリュール。リム部とバー組織の2重構造は最も天然に近似。気泡は球の回転による遠心力で中心に集まる。直径は約1.5mm。透過顕微鏡像。天然オリビン組成。

という化学的な現象にも、このような物理現象が大きな影響を与えると考えるのは著者だけであろうか？

この浮遊による地上実験と同時に、微小重力での実験も始められている。図7には最近行われた航空機微小動実験の様子と機内での実験装置を示した。微小重力で浮力に起因する対流を抑制し、液の非接触効果と微小重力の効果を区別しようという試みである。そのために球の凝固過程を高速度TVカメラ(最大

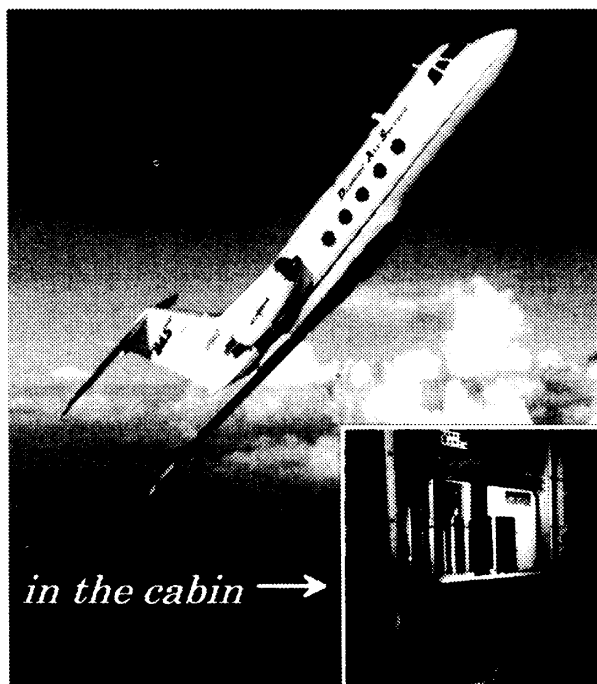


図7 最近の航空機による微小重力実験装置(1999年10月～11月実施)。融液中での対流や重力沈降を抑制した実験が出来る。浮遊実験と比較すると、浮遊による液の非接触効果と微小重力の効果が区別できる。

10,000フレーム/s)で詳細に顕微観察した。これらの成果は別の機会に報告することにしよう。

たった数ミリの小さな球の形成にも多くの物理現象が含まれている。これらの現象を解き明かすことが、宇宙空間で生じている現象の理解にも繋がることを信じて疑わない。微小重力現象に興味をもってきた著者にとって、これらの研究が宇宙惑星科学への橋渡しに少しでもなれば幸いである¹²⁾。

最後に航空機実験には(財)日本宇宙フォーラムの公募地上研究費を使用したことを記し謝辞とする。

参考文献

- [1] Tsuchiyama et al., 1980: Earth Planet. Sci. Lett., 48, 155.
- [2] 塚本勝男,月刊「地球」,号外No.12, 186.
- [3] Tsukamoto, K., Satoh, H., Kobatake, H., Takamura, Y., Kuribayashi, K.,in preparation.

注1) 日本マイクロ重力応用学会誌「JASMA」に多数の文献がある。

注2) お詫びしなければならないのは、この文章は海外を転々している間の作であるため十分な文献をあげることが出来なかった点である。関連の文献を求められる場合には、ktsuka@mail.cc.tohoku.ac.jpへご連絡下さい。