

Techno
Scope

微小重力環境が拓く 材料の新たなフロンティア



小型ロケットでは6～15分間の質のよい微小重力環境 ($10^{-4}G$) が得られる。写真はNASDA (宇宙開発事業団) の微小重力実験用ロケットTR-1A。この程度の時間が得られれば、金属合金の凝固現象、結晶成長などの実験が行える。実験コストは数億円。



航空機で得られる微小重力は小型ロケットに比べ質的にはあまりよくない ($10^{-1}G$) が、20～30秒間程度の比較的長い時間を何回か繰り返して実現できるため、実験機器の作動確認やパラメーターの入れ替えなどがしやすいというメリットがある。流体挙動の実験などに多く用いられている。実験コストは数百万円単位。

日本実験モジュール (JEM)
Japanese Experiment Module

スペース・シャトルは2週間程度の長時間の微小重力実験を可能にしたが、宇宙ステーションではさらに年単位での質のよい微小重力環境 ($10^{-6}G$) が得られる。半導体や蛋白質などの結晶成長のように実験に長い時間を必要とするものにも理想的な環境と考えられる。JEMの総予算は3,100億円。

1998年11月、国際宇宙ステーションの物質保管場所として使われる機能カーゴブロックの打ち上げがスタートした。引き続き約40回にわたって打ち上げ作業は繰り返され、米露日欧カナダ共同の宇宙実験室が組み上げられてゆくことになる。日本の実験モジュール (JEM/Japanese Experiment Module) は2002年から打ち上げが始まる予定になっている。材料開発という場面でも宇宙での研究がこれまでになかったブレイクスルーを生み出す可能性がさまざまに語られてきたが、JEMの実現はその大いなる橋頭堡となるだろう。今回はJEMに搭載される予定の材料関連の実験設備に焦点を当てつつ、微小重力環境における材料研究の前線の様子をレポートしてみる。

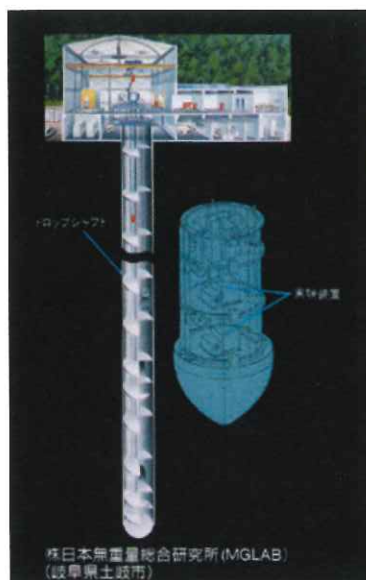
JEM実現で加速される微小重力下での材料創製研究

宇宙空間 (微小重力環境) での材料創製技術のうち、もっとも基本的なテーマのひとつに「粒子分散」というものがある。比重の違う材料どうしを微小重力環境で混ぜ合わせると、均一に分散させることができるというものである。たとえば水に砂利を入れることを想像してみると、重力があれば砂利は水の底のほうに沈んでしまうが宇宙空間ならば水のなかに砂利が均一に分散した状態を作りだせる。現実には水と砂利のかわ

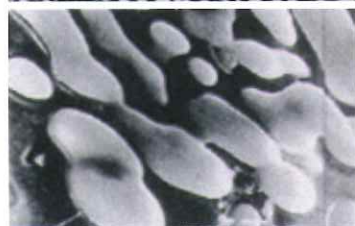
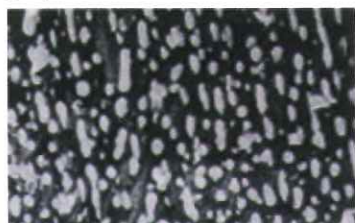
りに比重の異なる合金と複数種類のセラミックなどを均一に粒子分散させることで、地上では得られない質の高い複合材料をつくりだすことができる。

「粒子分散」は、〈浮沈効果が抑制される〉という微小重力環境の特性を生かすものだが、そのほかにも〈熱対流が生じない〉〈静水圧が作用しない (重力があれば水深が上がるにつれ大きな等方性の水圧がかかる)〉〈容器 (るつぼ) がいない〉などの条件が考えられる。

実践的な材料創製技術に限らず、種々のモデルの検証とい



落下塔を用いる方法は、質がよい微小重力 ($10^{-4}G$) が得られ、実験コストも数十万円から数百万円単位と安価だが、最大でも10秒間程度と短く、実験テーマの幅は限定されてくる。燃焼実験などに用いられることが多い。



ジルコニア/アルミナ/鉄を微小重力下で合成した試料 (上) と地上合成試料 (下)。微小重力下ではより細かく均質に分散していることが分かる。

っとも魅力的なものじゃないかと考えています」と述べるのは、今回の取材に対応してくださったNASDA宇宙環境利用研究システム本部主任研究員の依田真一博士である。

ここでいう準安定相とは、るつぼを使用せず試料を浮遊させた状態で溶融・冷却した場合の過冷却状態を指している。一般にも知られるように材料の溶融状態から結晶成長が起こる場合には、るつぼ表面が通常は結晶析出核として作用する。るつぼがない状態で試料を溶融させ冷やしていった場合、たとえば鉄を例にとるなら一般に融点として知られる1535℃を下回っても凝固が起こらなくなる。融点は1000℃近くまで下がる。これは、自由表面が結晶核の生成を抑制するためである。物質によっては、核が形成されないまま凝固する。これは液体が固体になった状態、つまりアモルファス材料である。

ス材料である。

地上でアモルファス材料を得る場合には、急冷ドラムなどによって核形成以前に凝固させる方法がとられているが、この場合、薄膜状のリボンで製造しそれをバルク化するという作業手順がとられている。もし宇宙空間の浮遊状態で金属を溶融・凝固させるとすれば、アモルファスのような準安定相をバルクで得ることができ、バルク状アモルファスの生成過程解明も含め新材料創製への新たな可能性に期待できるという。

C O L U M N

微小重力環境を得る5つの方法

微小重力環境を得るためには

- ①落下塔 (質はよいが最長で10秒間程度)
 - ②航空機 (質は落ちるが20秒間程度を繰り返し再現できる)
 - ③小型ロケット (質もよく6分間程度を確保できる)
 - ④スペース・シャトル (質がよく2週間程度)
 - ⑤宇宙ステーション (質がよく年単位)
- といった方法がある。

金属合金の凝固現象を観察するには小型ロケット程度の時間はどうしても必要になる。また半導体結晶 (数百時間)、蛋白質結晶 (数週間) は、シャトルやステーションでなければできない。金属合金関連の研究でも、質のよい微小重力が得られ時間的制限がない宇宙ステーションは、きわめて理想的な実験場になると考えられる。

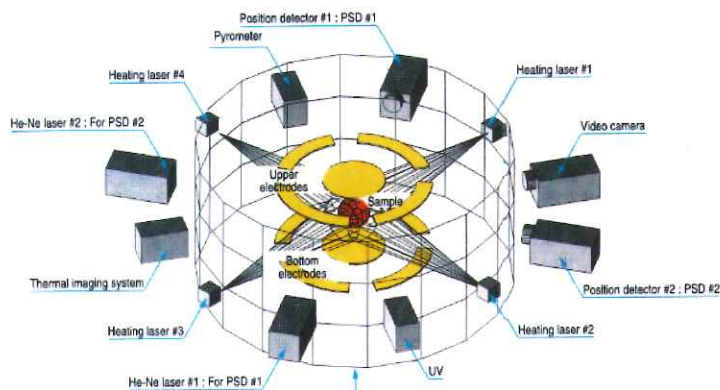
う面からも、微小重力空間はきわめて大きな可能性を秘めている。重力項が入ってくるためにモデル化が難しかった物理・化学現象等が、重力という非対称の力を除いて実際に観察したりできることから、これまでは見えなかった材料の本質が明らかにされていく可能性がきわめて高いと考えられる。

微小重力を応用する研究は、これまでに落下塔からシャトルまでいくつかの方法が、コスト的な背景も横目に睨みつつ行われてきたが、国際宇宙ステーションとJEMの実現は、質のよい微小重力が時間的制限を受けることなく得られるという意味では大きな画期となるはずである。

JEMには微小重力実験のためのさまざまな実験機器が搭載されることになっているが、以下そのうちの材料関連のものに焦点を当てながら、微小重力環境下での材料研究のテーマやその視点を概観してみよう。

準安定相研究と浮遊炉

「準安定相の研究こそ微小重力環境での材料研究のうちも



JEMに搭載される予定の静電浮遊炉。プラス／マイナスの電界をアクティブ・コントロールすることで試料の位置を保持する。セラミックなどの不導体にも適用でき、ローレンツ力が働かないため大きな過冷度を取りたい微妙な実験（準安定相を扱うなど）にも向いている。小さな力で制御を行うことができるので質の高い微小重力下での制御にも適している。



NASDAで開発された静電浮遊炉の地上用設備。試料を静電浮遊させ、レーザーにより溶融させる。



炉の中心部を上から見たところ。



浮遊させた試料のモニター画像。

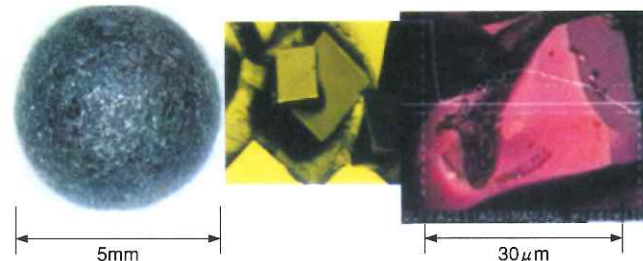
世界的にも期待の高い静電浮遊炉

このようにつばを使用せずに材料を浮遊させた状態で溶融・凝固させる装置が浮遊炉である。必然的に浮遊状態の材料の位置をどうコントロールするかが鍵になるが、NASDAでは静電力を用い、アクティブ・コントロールによって材料を浮かせるタイプの装置（静電浮遊炉）の開発に成功した。

浮遊炉には静電浮遊タイプのほかに音波浮遊タイプと電磁浮遊タイプがあり、カナダでは前者の、ドイツでは後者の開発に取組み成功している。しかし音波浮遊、電磁浮遊ともに問題がないわけではない。



溶融前 加熱開始 溶融 凝固



昨年11月にはTR-IA（微小重力実験用ロケット）による静電浮遊炉の機能検証も行われた。写真は実験時のもので、直径5mmのビスマス系酸化物（ペロフスカイト構造）試料を溶融・凝固させることに成功した。

たとえば音波浮遊タイプは媒体として不活性ガス（Xe, Ar等）を用いるが、ガスの不純物から（5N純度でも微量のO₂, H₂Oが含まれる）試料の酸化が引き起こされやすいという泣き所がある。加えて音速は温度に左右されるため、激しい温度勾配が存在する炉という場では、音速変動が大きくなりすぎ700～800℃が扱える限界だった。

また電磁浮遊タイプは試料そのものに電気を通してローレンツ力によって試料位置を制御するためセラミックなどの不導体には使えない。何よりも微小重力空間では、小さな振動さえも凝固時の核形成の要因になってしまうことを考えると、ローレンツ力のような比較的大きな力は、それ自体がきっかけとなって準安定状態の崩壊をまねきかねないと考えられる。大きな過冷度を取りたい実験には不利になってくる。

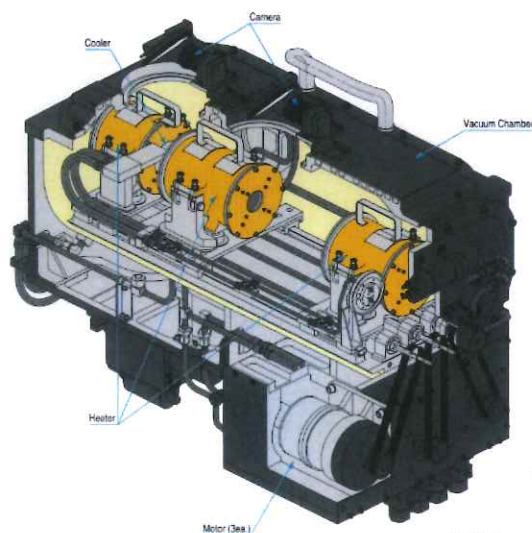
そうしたなかで比較的小さな力を用いて制御を行う静電浮遊タイプは不安定な状態の試料を制御するのに適しているが、十／一の電界を入れ替えながら試料位置を制御するため高度なデジタル制御技術が求められ、その点が開発にあたっての難しいポイントになっていた。

NASDAの静電浮遊炉はこの制御技術に成功し、一昨年の11月に小型ロケットによってその機能が検証された。その性能は準安定相研究者が集う国際シンポジウムでも世界でもっとも期待されるハードウェアのひとつとして関心を集めたほどだという。

JEMには、この静電浮遊炉が搭載され、準安定相研究はもちろんさまざまな材料実験が行われることになっている。

金属の凝固・拡散研究をバックアップする装置

次に材料関連の実験に大きく関わってくる装置としてあげられるのは温度勾配炉である。材料凝固の際、固／液界面のコ



JEMに搭載される予定の温度勾配炉。任意の温度プロフィールを達成するべく3つの加熱室が与えられ100℃/cm以上の温度勾配を与えることができる。固液界面形状を安定保持し、ブリッジマン法（半導体単結晶製造などで使われる）等による凝固コントロールをより自在にする。

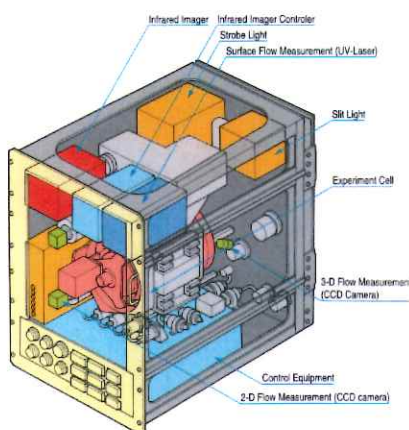
NASDAにある温度勾配炉の地上用設備。

ントロール（安定保持等）に際して重要なパラメーターになってくるのが凝固速度と温度勾配である。JEMに搭載される温度勾配炉は3つの加熱ゾーンを設けることで大きな温度勾配（100℃/cm程度）が与えられるよう配慮されている。これによりフレキシブルな温度プロフィールの設定が可能になり、物理蒸着法を用いる場合などにも、温度低下に伴う蒸着を防止し、希望箇所のみへの物理蒸着が可能である。

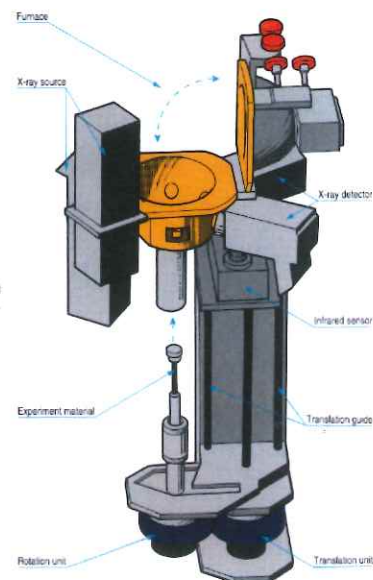
また高温熔融試料の凝固拡散現象の研究という場面で活躍するのが均熱炉である。大型試料が扱え、1800℃までの加熱凝固などができる。幅広い実験要求に応える多目的実験炉である。微小重力空間での金属結晶の成長や凝固に関わる研究にはこのあたりの装置が重要な位置を占めてくると考えられる。

マランゴニ対流を解明する

微小重力空間では、浮沈効果がなくなり（より正しくは極小化する）、熱対流も起こらなくなるわけだが、対流がまるで起こらないわけではない。別の要因、すなわち表面張力による流れが起こってくることになるからである。この流れは予測したイタリアの研究者の名をとって「マランゴニ対流」と呼ばれる。地上では重力にかくれて観測されにくいのが、宇宙空間へゆくとこのマランゴニ対流がより顕著に現れてくる。



流体物理実験装置では微小重力下で起こる表面張力による対流（マランゴニ対流）を観察することができる。微小重力下での凝固や結晶成長の過程を考える場合にも、マランゴニ対流の体系的な観察とそれによるモデルづくりが重要なテーマとなってくる。パーティクル入りのシリコンオイルなどが試料として用いられる。



帯域炉は加熱熔融した試料の挙動を2方向からのX線を用いて観察することができる。流体物理実験装置と合わせ、JEMでは透明から不透明まで幅広いプラントル数で微小重力下における液体の挙動を観察することができる。

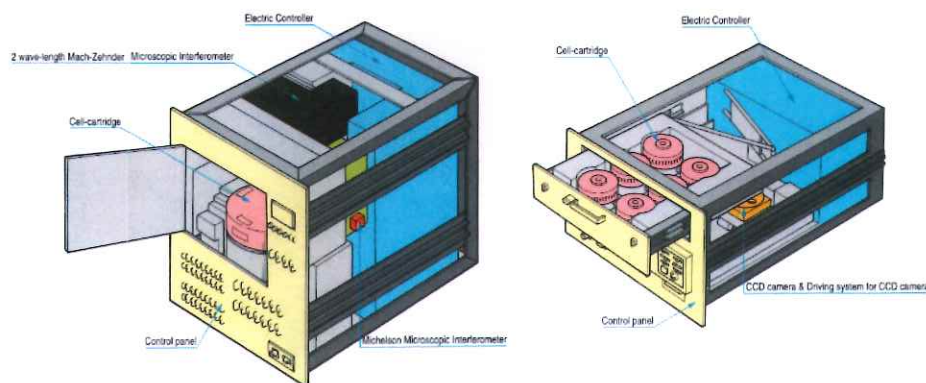
表面張力は温度によって変化するため、マランゴニ対流も温度差によってその状態が変わってくる。現状、マランゴニ対流は温度が上がるにつれ軸対称性の流れから非軸対称へと遷移していくことが分かっている。このマランゴニ対流の遷移モデルをつくるのが、宇宙材料研究においては、凝固や結晶成長の本質を解明するために欠かせない作業であり、NASDAでもひとつの研究課題になっているという。

こうしたマランゴニ対流の実態を詳しく研究分析するための装置が流体物理実験装置と帯域炉である。前者は透明液体（シリコンオイル等）を用いて実験を行うのに対し、後者は不透明な液体（熔融材料等）での実験をX線を使って観察するものである。

鉄鋼材料のような複雑な凝固現象を考える場合、地上では熱対流が樹状結晶の成長やそれにとまらぬ成分偏析に大きく関係してくると考えられているが、微小重力空間での金属材料プロセスにおよぼすマランゴニ対流の影響を解明し、かつその応用技術を開発することは、まさに21世紀的なテーマである。

結晶メカニズムの解明・応用の大きな成果に期待

静電浮遊炉や温度勾配炉などが熔融液体からの結晶成長及び凝固のための実験装置であったのに対し、溶液／蛋白質結晶成長実験装置は溶液からの結晶成長を研究するための装置である。結晶成長のメカニズムを理解するには、拡散支配における結晶成長過程での濃度場、温度場の変化を知る必要がある。微小重力空間ではそうした濃度場、温度場の様子を干渉縞などの形で、克明に視覚化し観察することが可能になる（6頁右上写真参照）。これまでになかなか見ることのできなかった結晶成長過程を視覚化し、その積み重ねによって結晶成長のメカニズムについての知識が得られることになるのである。



溶液／蛋白質結晶実験装置は、溶液からの結晶成長の過程（濃度場、温度場、成長速度）を理想的な状態で観察することができる。結晶成長の本質的理解を可能にするほか、ドラッグ・デザインの手がかりとなる高品質結晶が得られる。

この分野での成果が種々のジャンルで応用されうることはいうまでもない。

溶液からの結晶を扱う性質上、蛋白質結晶の実験も同装置の重要な用途のひとつとなっている。この部分は高分子・有機材料のプロセッシングとも関連する興味深いテーマなので触れておこう。

20種類におよぶアミノ酸のブロックを組み合わせて形成される蛋白質は分子量にして数万というきわめて複雑な構造からなっているが、この構造を解明することが実はドラッグ・デザインという視点からは重要なポイントになっているという。たとえばホルモンや酵素などでは機能そのものが知られている場合でも、その蛋白質構造のうちどの部分がどんな機能を果たしているのかが、これまではなかなか分からなかった。蛋白質の構造を確定するには高品質結晶を手がかりとせねばならないが、地上では重力が影響してなかなか得にくいという事情があった。

だが微小重力空間では、蛋白質のような複雑な分子もきわめて整然とした結晶をつくることが多い。この高品質結晶（欠陥密度が低く完全性が高い）を手がかりにすることで具体的な蛋白質の分子構造を確定でき、機能性のメカニズムを知ることができる。そしてその構造と機能をもとにすれば画期的な



溶液中（硝酸バリウム）で種結晶に向かって溶質が降り注いでいる様子。干渉縞がすばまっているあたりでは濃度と温度の急勾配が生じている。微小重力下ではこうした形で結晶の成長過程を観察することが可能になる。



NASDAの筑波宇宙センターに組み上げられたJEMのエンジニアリング・モデル。メーカーごとに製造されたパーツがここで合わせられる。



筑波宇宙センター内に設けられたJEMの管制室。

新薬も「設計」してゆくことができるという。

これまで新薬の開発は自然界からリサーチした物質をあてにして行われてきた。リサーチ作業だから10年かけて1万種類の物質を調べ、その知見をもとにひとつの新薬が生まれる。

蛋白質構造が解明されていけば、ドラッグ・デザインという新しい手法で目的の薬をつくりだすことができる。すでにスペース・シャトルのミッションにはこの蛋白質結晶の実験が殺到しているといわれる。HIVに作用する新薬などもこの方法による研究が期待されている。宇宙ステーションのような恒久的な実験施設の誕生は、さらに多くの実験とデータの収集を可能にしてくれる。JEMに溶液／蛋白質結晶成長実験装置が搭載されることから、この分野での日本の研究者には朗報といえるだろう。

微小重力実験の各テーマを概観してみると、宇宙での研究は、材料の基本的な物性をよりピュアな形でモデル化して意外に解明されてこなかった物質に関するより根源的な知識を与えてくれる可能性に満ちていることが分かる。未来の宇宙工場というイメージは分かりやすくシンボルとしても魅力的だが、そこへ到達する以前にも微小重力環境での研究が与えてくれるものの恩恵は決して小さくはない。材料の研究においては、その可能性は大きく開かれているといっていいいだろう。

[取材協力：宇宙開発事業団 (NASDA) 宇宙環境利用研究システム本部]

C O L U M N

無重力といわず微小重力というのはなぜ？

地球周回軌道上にある宇宙ステーションは一種の自由落下状態とみなすことができ、地球の重力の影響は受けないはずである。それでも無重力もしくはゼロG (Gravity) といわずに、微小重力と呼ぶのはなぜだろうか。

ひとつには軌道上にはごく稀薄ながら空气が存在し、その抵抗によってわずかながらマイナスの加速度（ドラッグ・フォース）が生じているということがある。それが微小Gとして作用している。

そしてもうひとつにはステーションの自重によって生じてくる重力傾斜がある。重心位置ではこのGの傾斜はゼロに近いが、離れるにしたがって影響は大きくなっていく。国際宇宙ステーションでは、重心から1m離れるごとに $10^{-8} \sim 10^{-7}G$ 程度の傾斜が生じてくるという。

人間の移動や機器の振動でも $10^{-4} \sim 10^{-3}G$ 程度の重力加速が加わる。