

■ 展望・解説 ■

短時間微小重力環境利用研究について

Research under Short-time Microgravity Circumstances

奥谷 猛*

Takeshi Okutani



1. はじめに

近年、欧米を中心にさまざまな宇宙環境利用研究が進められている。わが国でも1992年9月に毛利衛氏がスペースシャトル「エンデバー」に搭乗し、36種類の宇宙実験 FMPT (First Material Processing Test) が、さらに、1994年7月には向井千秋さんが「コロンビア」に搭乗し、生物系及び材料系の実験が行われて以来、とみに微小重力実験に多くの関心が集まるようになった。

これら宇宙環境利用、すなわち、宇宙空間で得られる微小重力(μ -g)環境の利用に注目され、材料及びバイオテクノロジー実験が行われている。 μ -g環境を利用して均一な組成の合金や理想的な結晶構造材料性能が優秀な医薬品の合成が可能になり、 μ -g環境は、魅力ある創造の場であることが明らかになってきた。

μ -gの環境を得るには図-1¹⁾に示すようにスペースシャトル、ロケット、航空機、落下塔などを使用することが必要である。一般の研究者が、 μ -g環境を利用

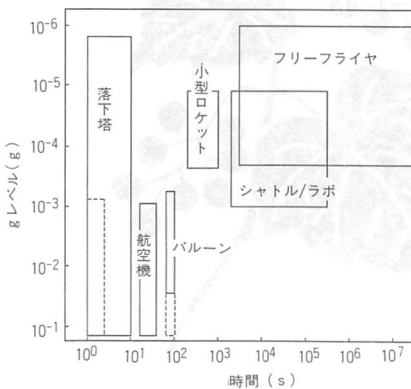


図-1 微小重力の質と時間

する研究を行うには、経費や実験の機会に難点があり、手軽には行えないのが現状である。 μ -g環境を得る手段として、落下塔は、 μ -gの時間は他の手段に比べ短いけれども、地上で簡単に実験が行え、かつ、良質の μ -g環境が得られる利点があり、最も身近で手に入りやすい手段である。1991年に、北海道砂川町に廃炭鉱の710mの立坑を利用して、10s、 10^{-4} gという世界で最長時間を持つ地下落下実験施設((株)地下無重力実験センター:略称 JAMIC)が完成し、一般の研究者が μ -g環境を利用する研究の機会を手軽に得ることができるようになった。また、北海道工業技術研究所(HNIRI)では1994年6月に1.2s、 10^{-3} gの短時間微小重力環境が得られる10mの落下塔が完成した。ここでは、JAMIC地下落下実験施設とHNIRI落下塔を用いて今まで行われた研究について概略を紹介する。

2. 微小重力の影響

μ -g空間とは厳密に言うとは外部からの力がごく微小しかかからない空間のことである。 μ -g空間ではなくしばしば無重力空間とも言われるが、正確にはどのような宇宙空間でも物体には力がかかる(万有引力の法則)ので無重力空間と言うのはありえない。ここではほとんど0に近い 10^{-4} g程度の重力を考える。ごく微小な重力しかかからない空間では、浮力、沈降、対流、静圧がほとんどない空間で、材料合成の際には次のような現象が現れる。

(1) 自重による変形がない。

μ -gの名のとおり物体の重さがほとんどないので、結晶が自分の重さでつぶされるようなことはなく、きれいな結晶ができる。また、液体の粒は真球になる。

(2) 熱による対流がない。

液体、気体の熱による対流が生じない。このような環境では、均一な合金、半導体などが製造できる。また、熱対流の影響を受けないために燃焼などの現象を正確に観察できる。

*工業技術院北海道工業技術研究所 極限環境材料部長
〒062 札幌市豊平区月寒東2条17-2-1

(3) 比重の異なる物質が分離しない。

気体と固体のように比重の異なる物質を均一に混合、懸濁でき、均一な大きさの気泡が均一に分散した高強度発泡体などが製造できる。

(4) 物質を空間に保持できる。

液体、固体を空間に浮遊できる。無容器無接触で物質を加熱、溶融、凝固、反応させることが可能で、高純度半導体結晶などの製造に利用できる。

このように μ -g下では、地上では起こり得ないことが起きたり、起きるべきことが起きなかったりする。このような現象は、私たちが地上に生活している限りほとんど手に入れることができない、このような特異な環境をセラミックスをはじめいろいろな材料の合成あるいは、複雑な物理現象の観察に利用できるならば、今まで手に入らなかった新材料や新たな知見を得ることができるようになる。

3. 短時間微小重力実験施設

地上で容易に行える微小重力実験施設は落下施設である。図-2に世界の主な実験施設を示す。日本では図-2に示したJAMIC、MGLAB、宇宙研、北工研の他に名古屋大、東北大など自由落下を利用して得られる短時間微小重力の装置が多く利用されるようになってきた。落下施設は単に物体を落とすことによって微小重力環境を得るものであるが、良質な環境を得るために真空中での落下、落下時の空気の抵抗を軽減する二重カプセル方式などが採用されている。落下施設にとって最も重要な点は制動である。高速で落下する装置を安全に破損することなしに回収するためにいろいろ工夫がなされている。最も一般的な制動方法は、砂やブ

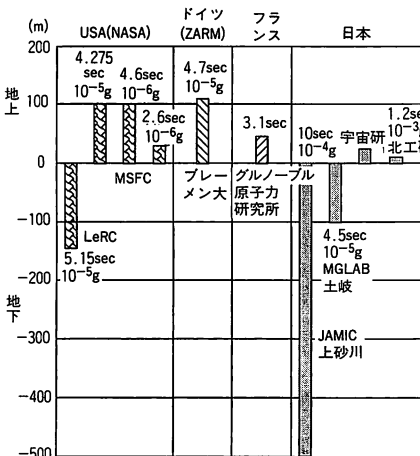


図-2 世界の主な微小重力落下実験施設

ラスチックビーズなどの緩衝材に装置を突入させ、制御する方法である。しかし、落下距離が長くなるほど落下速度は速くなり、制動は難しくなる。JAMICの実験施設はエアードンパーとメカニカルブレーキ、北工研落下塔ではリニアモーターを使ってスムーズに制動しようとするもので、装置類の破損なしに実験が行える施設である。これらの制動方式は世界で初めて採用され、成功を収めている方法で、本稿では二つの施設について簡単に説明する。

3.1 JAMIC地下落下実験施設

JAMIC地下落下実験施設の詳細は文献^{2), 3)}を参照していただきたい。ここでは簡単に紹介する。

地下落下実験施設の概念図を図-3に示す。カプセルは磁気ガイドに沿って490m落下し、10s、 10^{-4} gの μ -g環境が得られるようになっている。良質の μ -gを得るためには真空中を落下させることが必要である。カプセルは二重で、内カプセルと外カプセルの間は真空になっている。落下中、内カプセルは空気中を落下する外カプセルに接触しないように外カプセルの頂部から圧縮空気を吹き出させ、落下速度を制御できるようになっている。その結果、内カプセルは真空中を落下することになる。内カプセルへの搭載重量及び容積は500kg、870(W)×870(L)×918(H)mmである。

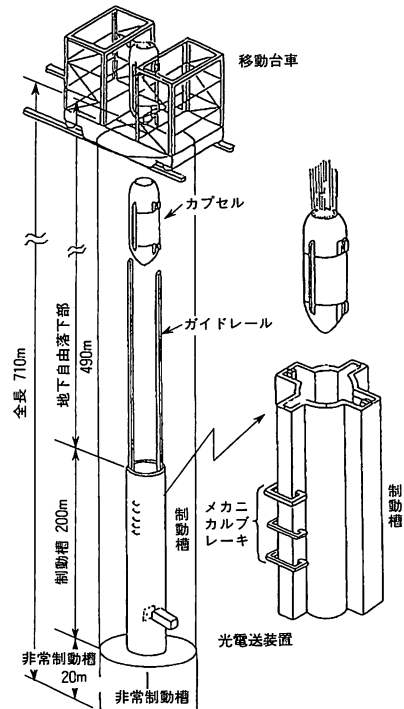


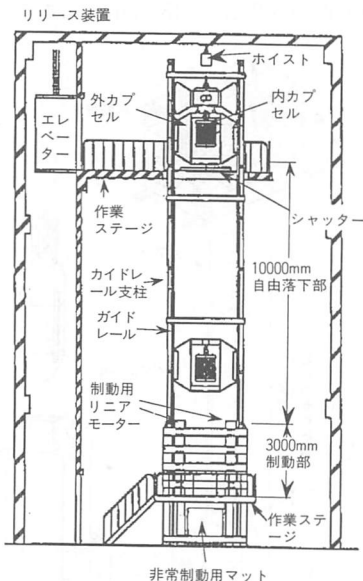
図-3 JAMICカプセル構成

約5.5tonのカプセルが490m自由落下した時点の速度は350km/hにも達する。このカプセルを減速し、安全に装置が壊れることなしに回収するために200mの制動槽にカプセルを突入させ、エアードンピング機構により滑らかに減速し、最終的には機械的ブレーキをかけてカプセルの停止を行う。この制動時の衝撃は8g以下で、カプセル中のガラス製実験装置や精密測定機器が壊れることはない。

3.2 HNIRI落下塔

HNIRI落下塔の外観を写真1に、その概略を図-4に示す。HNIRI落下塔には二つの特色がある。それらは二重カプセル構造と制動にリニアモーターを利用していることである。特に、制動にリニアモーターを利用している点においては世界で唯一の落下塔である。自由落下距離10mで得られる微小重力時間はわずかに1.2sである。カプセルは二重構造になっており、落下時の空気抵抗を外カプセル(写真2)で受け、内カプセルは外カプセル内を空気抵抗を受けることなしに落下できるようになっている。内カプセルは写真3に示したように外カプセル内部に設置され、落下直前に外カプセル内側の頂部に設置されている電磁石で内カプ

セルは吊り下げられる。落下時には内カプセルは外カプセルより一瞬早く切り放され、外カプセルとともに落下する。10m自由落下後は内カプセルは外カプセル下部に位置する。内カプセルの高さは外カプセルよりも低く、接触しないように調節される。その結果、微小重力レベルは空気中落下にかかわらず $10^{-3}g$ を維持している。制動には写真4に示したように3mの高さのリニアモーターによる制動を採用している。このリニアモーター制動では、電磁石に流す電流をコントロールすることにより(制動時連続的に電流を増加させる)、スムーズに制動でき、衝撃は4g以下である。微小重力実験は1hに4回可能で、JAMICの施設の3回/日と比べ機動性に富むが、1.2sという微小重力時間のために実験可能なテーマに限界がある。



装置仕様

自由落下距離：10m 制動距離：3m カプセル形式：二重カプセル 微小重力時間：1.2s 微小重力レベル： $10^{-3}g$ 制動方式：リニアモーター制動 制動時加速度：平均4g 最大積載重量：100kg 積載容量：720mm(直径)×920mm(高さ) 実験可能回数：4回/h

図-4 北工研落下塔

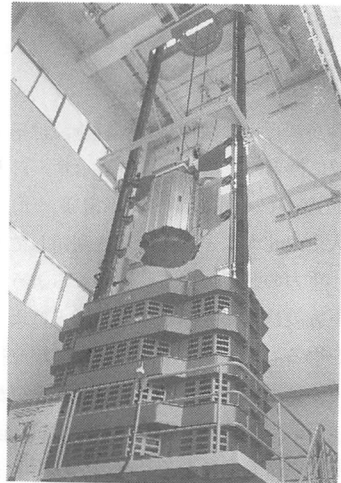


写真1 北工研落下塔の外観



写真2 外カプセル

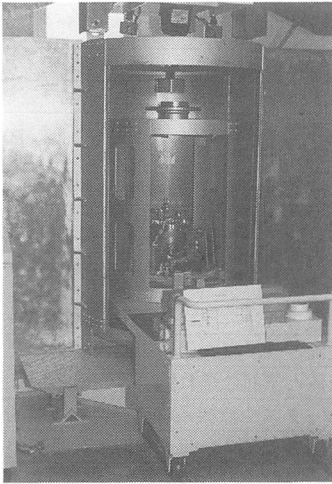


写真3 落下前の外カプセルに設置された内カプセル

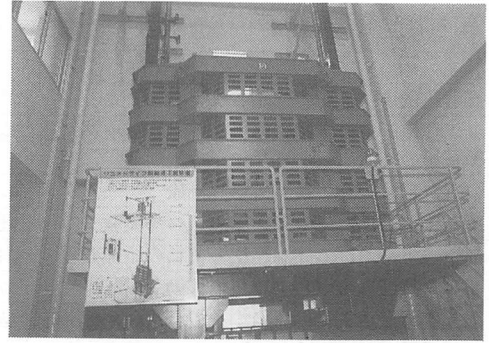


写真4 リニアモーター制御部

4. JAMIC地下落下実験施設を用いて行われた実験

JAMIC地下落下実験施設は、平成3年10月より営業運転が開始されて以来、平成8年3月末までの4年6ヶ月間で2092回の落下実験が行われた。平成3年度(3年10月～4年3月)は185回、平成4年度(4年4月～5年3月)は374回、平成5年度(5年4月～6年3月)は509回、平成6年度(6年4月～7年3月)は534回、平成7年度(7年4月～8年3月)は490回の落下実験が行われ、初期にはいろいろなトラブルが発生したが、現在は1日に3回の落下実験が余裕を持って行えるようになってきた。

今まで行われた落下実験のうち、材料関係を選び、表1⁴⁾に示す。μ-g実験には材料の他、燃焼、流体、ライフサイエンス、宇宙機器などに区分される研究がある。μ-g環境下では表面張力の効果が顕著にあらわれてくるなど、物性が地上とは異なる。材料合成にとってこれらの物性への影響は重要である。表1の各落下実験では、μ-g環境と地上で製造された材料を比較し、均質、均一分散などの差異が観察され、今後の材料合成に対するμ-g環境の有効性を明らかにしている。

落下実験では、10sの短時間μ-g環境下での実験のために研究者はいろいろな工夫を凝らし装置を組み上げ、実験を実施している。北海道工業技術研究所の研究者が行った、または、行っている研究は、

- (1) SiC微粒子の合成…重力場では合成困難な単分散SiC微粒子を気相反応により合成した^{5), 6)}。
- (2) 均一CuInSe₂薄膜の合成…微小重力下で溶融・

凝固により、組成・組織が均一な高効率太陽電池として期待されているCuInSe₂薄膜を合成した⁷⁾。

(3) シリカ・アルミナの合成…微小重力下でケイ素とアルミニウムのアルコキシドの混合物の加水分解により、均質で触媒活性の高いシリカ・アルミナを合成した⁸⁾。

(4) 燃焼合成法によるTi-Ni合金の合成…形状記憶合金であるTi-Niを燃焼合成法により均質多孔質化を達成する。

(5) 微粒子分散型複合新合金の生成…合金を高密度化するため、セラミクス微粒子を鉄やアルミ合金に混合し、それを微小重力下で溶融することによって均一に分散し、複合化した耐磨耗性、耐腐食性、耐熱性を持ち合わせた新しい良質の合金を短時間で造る。

(6) 高品質結晶材料の製造法の開発…微小重力下で電磁浮遊装置を利用した高精度の諸熱物性値を測定し、地上実験と落下実験による測定データを用いてシミュレーションすることにより、欠陥のない高品質結晶材料である半導体の製造法を開発する。

(7) 半球状表面半導体の製造技術の開発…柱状に加工したGeやInPの光電変換機能を持つ半導体の先端を微小重力下で溶融・凝固することにより、その先端を半球状にし、受光効率の向上した素子の製造を行う。

(8) 有機薄膜創製…微小重力下の表面張力の顕著化を利用して、重力下では得られない形状や構造を持つ高機能性有機薄膜を創製する技術を確立する。

(9) 微粒子表面改質技術…気固接触操作に優れた流動層の流動化状態を遠心力により制御し、当該流動化粒子の表面性状を低温プラズマ中で物理化学的に改質する技術を確立する。さらに、この技術の無重力環境への適用拡大を図る。

(10) 燃焼…自然対流のない微小重力下で燃焼を研究することにより、現象を単純化し、複雑な反応である

表1 短時間微小重力環境を利用して行われた材料関連実験テーマ

実験名称	主たる実験目的・目標
高温超伝導材料の単結晶成長実験	高品質材料の育成
μ -g環境下での気相反応によるセラミック超微粒子の製造	均一粒径、単分散セラミック超微粒子の合成
ガラス融液からの蒸発・対流現象	ガラス成分の蒸発、拡散現象と粒子の動きと対流
酸化物超伝導薄膜の高速加熱・冷却実験	超伝導薄膜の特性向上、評価
無重力下における高温超伝導材料の組織変化	溶融凝固プロセスによる組織制御
ガラス融液における物質・熱移動	ガラス微粒子の製造
酸化物超伝導物質の原料均一混合法	酸化物超伝導原料粉末を混合、圧粉による高品質材料
凝固過程における冷却実験	微小重力中に急冷凝固させ、凝固過冷却曲線測定
濡れ性評価実験	触媒生成における液体と壁面の濡れ性、界面の形状
SHS法による触媒創製の実験	SHS法によるセラミックや無機系材料の合成実験
超微粒子完全合金触媒の合成実験	ガス蒸発法による金属スモーク合成、微粉末製造
触媒微粒子合成の基礎実験	気相化学反応法による微粒子の合成実験
ゾルゲル法による複合金属酸化触媒の製造	水酸化ゲルの生成、評価
Ti-B-Al系複合化合物の燃焼合成	TiB ₂ -Al複合微粒子の燃焼合成と評価
燃焼合成を目的とした急熱・急冷実験	Ti-Ni系の金属間化合物の合成のための装置開発
溶融半導体の熱伝導率測定	熱物性定数の測定
気相反応による微粒子の合成及びSHS法による高融点無機化合物の合成	SHS法による材料合成とSHSの発熱を利用するケミカルオープンによる微粒子合成
機能性炭素クラスタ材料の創製	フラーレンナノチューブ素材の合成
重力-無重力遷移における溶融金属の挙動	金属凝固実験のための基礎実験
ガラス微粒子製造実験	機能性ガラス微粒子の合成
ケラスタの形成に関する研究	炭素クラスタ及び金属内包誘導体の合成
燃焼合成過程に関する研究	Ti-Ni金属間化合物の自己発熱反応を利用する溶融凝固
NO _x 触媒表面改質実験	銅-ゼオライト系触媒の耐水性向上
共晶合金の一方凝固実験	共晶組成を有する合金の成長形態及び μ -gの影響
Bi系超伝導材料のCaO浮上抑制	Bi系材料の初晶CaO浮上抑制し、均一なTc相の製造
偏晶系合金モデルの相分離過程のその場観察	冷却凝固法による均質な組成の過偏晶合金の合成
金属薄膜の合成	きれいな結晶からなる銀薄膜の合成
結晶化合物太陽電池の合成	SHS法や溶融-凝固による高効率太陽電池薄膜の合成

燃焼現象を解明する。燃焼として、液滴、微粉炭、ガスを取り扱う。

5. 北工研落下塔を用いて行われた実験

北工研落下塔は10mで、約1.2sの 10^{-3} gの短時間微小重力環境が得られる装置である。JAMICの10s、 10^{-4} gの施設と比べ、可能な落下実験は限られるが、この装置を用いて、現在、以下に紹介する四つの研究が主として行われている。

(1) 単一石炭粒子の着火機構の研究^{9), 10)}

石炭粒子の燃焼に関する研究はこれまで多く行われているが、特に、石炭着火性に関する知見は、石炭の燃焼のみならず、微粉炭焚きボイラーの吹き込みノズル近傍の火炎形成状況の把握、炭鉱や石炭応用プロセスにおける自然着火や粉塵爆発の防止技術の観点から

も重要である。石炭粒子の着火は以下のプロセスの順序で進行する。

加熱→粒子温度の上昇→揮発分の放出→揮発分の着火→揮発分燃焼の終了→チャーの着火→チャー燃焼

このプロセスのなかで石炭粒子から揮発分の熱分解過程が、着火機構に重要な役割を果たすが、比較的大きな粒子(1mm程度)を用いた1-g下では図-5(a)に示したように自然対流の影響で粒子回りから揮発分は持ち去られる効果が顕著になり、熱分解過程の影響を詳細に観察することは困難である。一方、 μ -g下では、自然対流の影響をなくすことにより図-5(b)に示すように揮発分の放出から着火に至る過程を真に観察できる。

(2) 一方向凝固によるIn-Sb合金の製造¹¹⁾

金属融体から高品質合金を製造することが難しいの

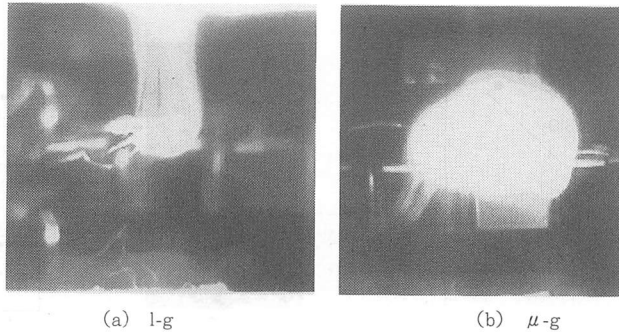


図-5 着火400ms後の石炭粒子

は、金属融体の混合制御、固化による相分離、ドメイン（磁区）の不均一成長が起こるためである。融体マトリックス中の熱対流が無く、比重の差異による分離が起こらない微小重力下では、均一な組織と組成を持つIn-Sb合金の生成が期待できる。図-6に示した装置を用い、原子比1:1のInとSb混合ペレット0.5gを水素還元後石英アンプル中（1mmφの穴を設けてある）に封入し、これを高真空容器（UHV）内に設置し、700°Cに加熱し、1.2sのμ-g下でUHV内に液体窒素を吹き込んで600°C迄冷却した。その結果、結晶性が高い均一組織のInSbが得られた。μ-g下では結晶成長が空気中の音波の伝播速度Cs (m/s) (=331+0.6t (t=温度°C)) で生じるとも言われている。この点を利用して融液を短時間μ-g下で急速冷却することにより、結晶性が高い均一組成の材料を合成することが可能になる。また、短時間μ-g下での急速冷却では、過

冷却が生じる。過冷却による結晶性の高い均一組織の準安定状態の材料を合成することが可能となり、従来にはない新しい機能を持った材料が期待できる。

(3) 濡れ性の測定¹²⁾

濡れ性の測定は基板と液滴との間の接触角により評価されている。液滴の重量、すなわち、液滴の仕事量により接触角は変化するが、仕事量と接触角の相関関係を求めることにより、普遍化し、濡れ性の評価を行っている。今、重力の異なる液滴間の接触面積の差異と液滴間のポテンシャルエネルギー (=仕事量) の差との関係は液滴と基板との濡れ性に関係がある。1-g下とμ-g下との差異は液滴の重量であり、1-g下とμ-g下の基板との接触面積の差異と1-g下での液滴断面の形状から求めたポテンシャルエネルギーの関係から、液滴と各種の基板との濡れ性の定量的な比較が可能となる。

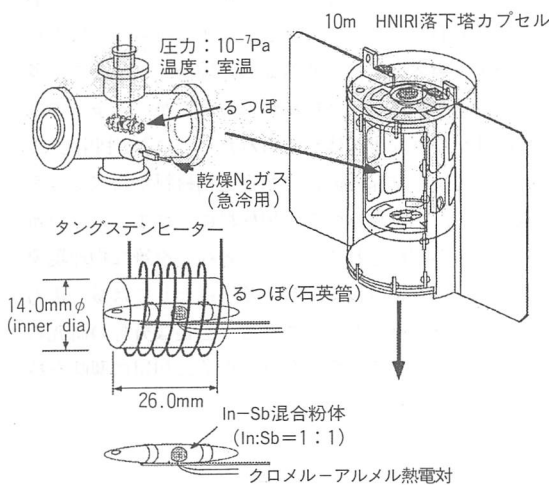
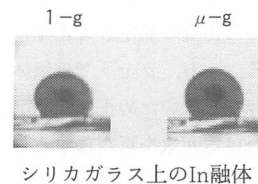


図-6 落下カプセル中のUHVプロセスシステムのセットアップ



シリカガラス上のIn融体

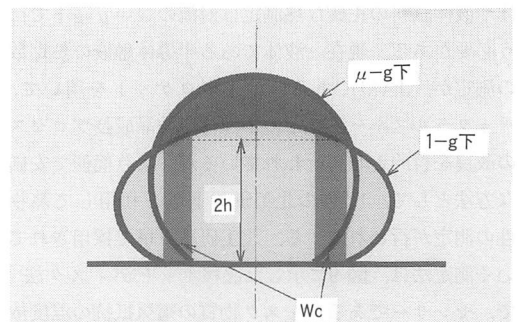


図-7 1-g及びμ-g下での融体の基板上での形状の模式図

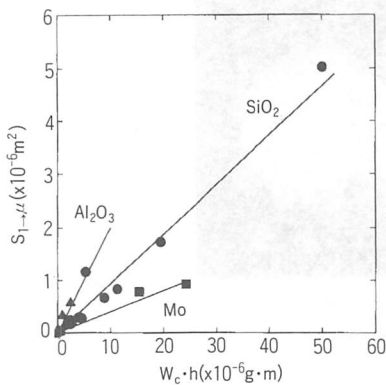


図-8 1-g下と μ -g下との融体と基板との接触面積差と仕事量との関係

モリブデン、シリカガラス、アルミナの各基板とインジウム融体の濡れ性の検討を $1.2\text{s}10^{-3}\text{g}$ の微小重力環境が得られる北工研落下塔を用いて行った。1-g下で各基板上で所定量のインジウムを融解し、その時の断面の形状を測定し、この状態で落下させ、微小重力下でのインジウム融体の断面形状を測定する。その模式図を図-7に示した。1-g下と μ -g下との接触面積の差と1-g下の断面形状と融体の重量から求めたポテンシャルエネルギー(=仕事量)との関係を図-8に示した。傾きが小さいほど濡れ性が良いことをあらわしている。各種の融液と各種の基板に適用できる普遍的な濡れ性の評価方法である。

(4) 熱物性測定

図-9に示したように1-g下では気体や液体中に生じる熱対流のために物質の熱定数を正確に測定することは不可能である。一方、 μ -g下では気体や液体中に生じる熱対流が存在しないため正確な測定が可能になる。固体試料の場合は雰囲気真空にすることにより熱測定に及ぼす対流の影響を無くすることができるが、気体や液体試料の正確な熱測定は対流のない μ -g下で行う必要がある。現在、液体である半導体融液の熱定数の測定が、JAMICあるいは小型ロケットを用いて、チョクラルスキー法などの半導体単結晶成長プロセスの改良を目的として行われているが、より簡便で安価な方法として、1.2秒の北工研落下塔を利用して熱物性の測定が行われている。北工研落下塔で採用されている測定法は、図-9に示した遷移ホットディスク法¹³⁾で、センサーであるディスク物質の電気抵抗の温度依存性を利用して熱定数を測定する方法である。この方法は測定が短時間で、精度も高く、液体などあら

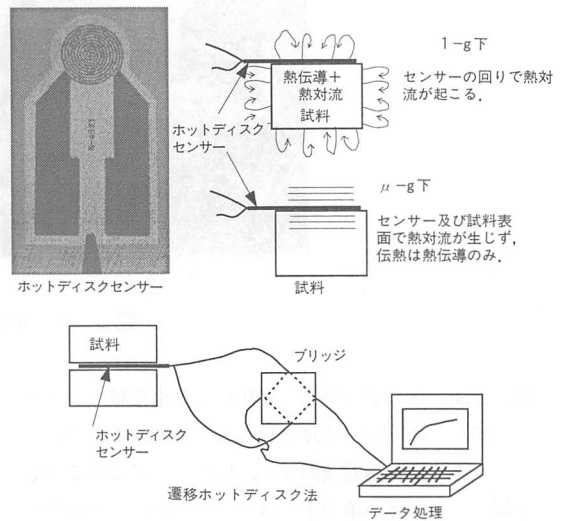


図-9 遷移ホットディスク法による熱物性測定

ゆる形態の試料の測定に適用可能である。

6. おわりに

短時間の微小重力環境を利用する研究は、ここ3～4年精力的に行われるようになったばかりで、研究の絶対数は少なく、今後地上では合成できない新機能材料や飛躍的に性能が向上した材料が微小重力下でどの程度合成できるのかまだわからないのが現状である。現在までの10sの短時間の微小重力実験の成果から、重力の影響は原子・分子オーダーでもあるのか、また、化学プロセスにどこまであるのか、まだはっきりしていない。正直な所、その影響は無いのか、もしくは、小さいかもわからない。しかし、当所の研究の成果より化合物半導体融液を急速冷却した場合、1-g下では多くの場合アモルファス材料が得られるが、 μ -g下では結晶性が良好な半導体を得られた。この点を利用して、過冷却により結晶性の良い準安定相材料が合成できそうである。高結晶性準安定相材料には今までにない新しい機能が期待される。また、各種の複雑な物理現象を単純化し、より良く理解する手段としては微小重力環境は非常に役立つようである。広範な分野の研究者が既存の枠をこえる短時間 μ -g環境の利用に興味を持ち、色々な分野にチャレンジしてほしい。

文献

- 1) 宇宙環境利用推進センター；「無重力落下実験施設の概要とその利用について」、平成2年3月。

- 2) T. Mori, K. Goto, R. Ohashi and A. B. Sawaoka ;
Microgravity Sci. Technol., V/4, 238 (1993).
- 3) 江上侑雄 ; 日本マイクロ重力応用学会誌, 9, 209
(1992).
- 4) 日本機械工業連合会, 宇宙環境利用推進センター ; 「平成
4年度微小重力実験の利用促進に係わる調査研究」, 平
成5年3月.
- 5) T. Okutani, Y. Nakata, M. Suzuki, Y. Maniette, N.
Goto, O. Odawara and K. Mori ; Mat. Res. Soc.
Symp., 286, 113 (1993).
- 6) 奥谷 猛; バウンダリー, 8 (10), 12(1992).
- 7) 奥谷 猛, 中田善徳, 永井秀明, 鈴木正昭, 小田原修, 中
野邦男 ; 日本セラミックス協会1994年会講演集, p.303
(1994).
- 8) 奥谷 猛, 中田善徳, 鈴木正昭, 永井秀明, 下川部雅英 ;
日本マイクロ重力応用学会誌, 10, 167 (1993).
- 9) H. H. Katalambula, K. Kitano, K. Ikeda and T. Chiba,
J. Chem. Eng. Jpn. in press.
- 10) H. H. Katalambula, K. Kitano, K. Ikeda, J. Hayashi
and T. Chiba, J. Chem. Eng. Jpn. submitted.
- 11) H. Minagawa, Y. Suzuki, K. Shimokawa, Y. Ueda, J.
Nagao and J. Kawabata, Drop days in Bremen '96,
ZARM, Bremen, Germany, 1996, p.5-12.
- 12) H. Nagai, Y. Nakata, T. Tsurue, M. Suzuki and T.
Okutani, Drop days in Bremen '96, ZARM, Bremen,
Germany, 1996, p.5-5.
- 13) S. E. Gustafsson, Rev. Sci. Instrum. 62 (3), 797-804
(1991).

共催行事ごあんない

「第7回国際蓄熱会議」について

〔主 催〕 国際蓄熱機構 (ICTES), (社)空気調和・衛生工学会 (SHASE) 他

〔後 援〕 通商産業省 (MITI), 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 他

〔日 時〕 1997年6月18日(水)~21日(金)

〔場 所〕 北海道大学学術交流会館

〔問合せ先〕 第7回国際蓄熱会議 (MEGASTOCK'97)

実行委員長 落藤 澄 (北海道大学工学部衛生工学科)

〒060 札幌市北区北13条西8丁目 TEL 011-706-6280, FAX 011-706-7890

Email Address : katsu@sany.hokudai.ac.jp