宇宙における新素材製造

—宇宙工場をめざして—

Advanced Materials Processing in Space

森 下 保 廣
Yasuhiro MORISHITA

●1929年6月生まれ
●人工衛星、ロケット等の自主技術化のための企画業務及びランドサット・データ受信局業務を経て、現在、宇宙ステーションの国際共同開発計画の推進業務に従事
●宇宙開発事業団宇宙環境利用推進室(〒105 東京都港区芝2-5-6)

Key Words : Materials, Composite Materials, Metallic Materials, Fluid Mechanics, Space Engineering, Industry

1. はじめに

宇宙空間における環境は、地球上では得がたい特異な環境因子がいくつかある。表1にそれらの環境因子を示す。特に微小重力については、地上の重力に起因する種々の阻害要因を極小化することによる新たな材料などの創出、拡散などの物理現象の理解、の2点のために近年、科学的及び産業技術的観点から大きな期待が寄せられている。

微小重力環境を利用した実験は、1950年代後半から、主としてロケットの液体燃料の微小重力下における挙動を調べる目的で、落下塔、航空機を用いて始められた。その後、材料実験、ライフサイエンス実験を目的として、アポロ計画での長時間微小重力実験、スカイラブ及び米ソ共同のアポロ・ソユーズ計画を経て、現在スペースシャトルを用いた微小重力下の研究へと引き継がれている。

日本における微小重力実験は、1973年のAg-SiC系複合材料におけるSiCウィスカーの均一分散を目的とした実験、1980年からの小形ロケットを用いた材料実験、スペースシャトルのゲッタウェースペシャル(GAS)を用いた実験などいくつかの例があるものの散発的なものとどまっている。一方、欧米諸国は、スペースシャトルを用いて長時間にわたる系統的な微小重力実験を

実施しており、これらにくらべても、我が国においてはこの分野の実験の遅れの感はいなめないのが現状である。

そこで我が国も、軌道上における本格的宇宙実験をめざし、スペースラブの1/3の規模をNASAより借用し、日本人の科学技術者が搭乗して、材料実験、ライフサイエンス実験を行う第一次材料実験(FMPT: First Materials Processing Test)を昭和66年中ごろに実施する計画が進められている。

本稿では、このFMPT計画のうち材料実験を中心として、宇宙における主として微小重力を用いた新材料の創製について述べることにしたい。

表1 宇宙における特異な環境

宇宙空間の環境因子	特徴
無重力 (微小重力)	無対流、無沈降等の地上では得られない物理現象を利用した研究を行う
高真空場	宇宙ステーションの軌道で 10^{-7} torrの広大な空間が容易に得られる。またウェイクを利用すれば、 10^{-14} torrレベルの空間が得られる
放射線場	全波長域にわたるふく射エネルギーが存在する
高エネルギー場	宇宙ステーションの軌道上で 1.4 kW/m^2 の太陽エネルギーが得られる

2. 第一次材料実験について

第一次材料実験を進めるにあたって、まず昭和54年に実施テーマを全国にわたり広く公募し、昭和59年の第二次選定を経て、最終的には34のテーマが選定された。その実験テーマの内訳は、材料関係が22件、ライフサイエンス関係が12件である。材料関係テーマの分野別では、材料製造に関して、化合物半導体が5件、無機材料2件、金属複合材料3件、有機高分子材料1件である。製造技術に関して金属製造技術が3件、半導体など製造技術2件、無容器処理製造技術3件、その他に、合金生成機構に関する研究が3件となっている(表2)。

表2 材料実験テーマ

テーマ番号	テーマ名
M-1	狭バンドギャップ三元混晶半導体鉛錫テルル単結晶の無重力下における結晶成長
M-2	無重力下における帯溶融法によるPbSnTe大形単結晶の試作
M-3	浮遊帯域溶融法による化合物半導体結晶の作製
M-4	新超電導合金の溶製
M-5	複合脱酸した鋼塊中の脱酸生成物の生成機構
M-6	粒子分散形合金の作製
M-7	二種の溶融金属の相互拡散および凝固生成する合金、化合物の組織と構造
M-8	ガラスの高温挙動
M-9	シリコン球結晶の成長とその表面酸化
M-10	非混合合金系の凝固・成長に関する研究
M-11	高剛性・超低密度炭素繊維/アルミ合金複合材料の製造研究
M-12	液相焼結機構の研究
M-13	無重力下におけるSi-As-Teアモルファス半導体の製造
M-14	無重力下における気相金属凝結機構の研究
M-15	音波浮遊装置内での液滴の挙動と音波干渉履歴の研究
M-16	温度こう配及び超音波定常波のある場における泡の挙動の解明
M-17	非可視域用光学材料の研究
M-18	無重力下での材料製造過程におけるマランゴニ対流の研究
M-19	無重力条件下における共晶系合金の凝固に関する研究
M-20	無重力下におけるサマルスカイトの合成
M-21	無重力環境下における有機金属結晶の成長
M-22	無重力環境下における化合物半導体結晶の作製(InGaAsの研究)

3. 微小重力を利用した新材料の創成

3.1 微小重力の効果 材料製造に利用できる微小重力の効果として、① 無対流、② 無沈降・無浮力、③ 無静圧、④ 無接触浮遊の四つがある。

ここでは、これらの微小重力による効果を利用して新材料製造をめざすFMPTの実験のいくつかについて述べる。

3.2 均質結晶成長 半導体結晶は、計算機、各種センサなど、現在電気工業製品にとって欠くことのできないものとなっており、高性能・高品質半導体の開発は、これら電子デバイス素材などの性能の高度化にとって極めて重要な技術開発要素となっている。これらの半導体の技術的課題として、転位密度の減少、大口径化を妨げる自重変形の減少、元素の比重差による組成不均一化の防止、容器との接触に伴う不純物元素の混入の防止がある。特に、半導体にとっては結晶の完全性、組成均一性、純度は半導体材料の電気的特性を決定する重要な因子である。例えばほんのわずかの(ppm以下)の不純物の混入が半導体としての特性を劣化させてしまう場合がある。

このような例として、インジウム、ガリウム、ヒ素からなる半導体(M-22;表2参照)は、シリコン半導体でない光電変換機能などを有し、オプトエレクトロニクス素材などの新電子材料として期待が寄せられているが、地上では対流などの影響により結晶に欠陥が生じやすく、均質成分組成をもつ大形単結晶が得られていない。また、シリコン-ヒ素-テルルアモルファス半導体は、可視光から赤外線領域にわたる光電変換機能をもつ応用範囲の広い電子材料である。しかし、地上では溶融の際に重力により構成元素の比重差で成分分離が生じ、不均質組成となるために、試料の特性を制御することが困難である。

また鉛錫テルル半導体(M-1, M-2)は、大形・高品質結晶の成長により遠赤外域のレーザ発光・受光素子材料としての応用に期待が寄せられている。しかし、地上では対流により結晶成長面の不安定性のため、組成が不均一になり、大形の単結晶が得られない。

これらの問題点に対して微小重力環境を用いれば、対流による核発生の減少、自重変形による転位の減少などの効果を利用して結晶の完全化、大形化などが可能となる。

3・3 ミクロ組織生成 超耐熱合金、金属系複合材料、有機複合材料などでは、高強度、高弾性を有する第二相、すなわち硬質セラミックス粒子、炭素繊維などを均一分散させることになり、高い機械的性質を有する材料の構成が図られている。

この種の材料(M-6)では、地上ではマトリックスと第二相間の密度差による沈降、浮力のために分離して第二相の均一分散した材料の製造が難しい。これらの複合材料の製造に微小重力を利用すれば、無沈降、無浮力、無対流の効果を利用して、微細均一組織を有する複合材料を製造することができる。図1にTT-500 A ロケットを用いて微小重力実験を行ったNi/TiC 複合材料の結果を示す。NiとTiCにはかなりの密度差が存在するために、地上で製造した試料は均一なTiCの分散状態が得られていない。地上のものと小形ロケットによる微小重力下で作製された試料の硬度を比較すると硬度は地上のものの2倍以上の値が得られていた。このことは、微小重力下で作製された試料の機械的性質が地上で作製された試料のものよりも明らかに優れていることを示すものである。

3・4 無容器処理 先に述べた半導体もわずかの不純物の混入により、その特性が著しく劣化する。今や大量情報伝達になくてはならない光ファイバにとって、広い波長範囲に対して高透過率をもつ透明なガラスの需要が大きい。この種の材

料にとって、地上では溶融体を保持するために、るつぼを使用するが、るつぼとの接触によって、吸湿、容器との反応による汚染が生じガラスの光学材料としての特性を劣化させている(M-17)。

微小重力下では、音波や静電気力などの微弱な力でもって物質を位置制御できるために、容器を用いずに物質を溶解できる。高純度物質の創製は、物性研究や新しい機能材料の製造などにおいて大きなインパクトがあり、また幅広い科学的、技術的応用が考えられる。従って浮遊物体の制御に関する技術的課題が克服されれば、宇宙実験による新材料の創出の可能性の最も高いものと思われる。

3・5 非混合合金の製造 偏晶合金は一般に重力下では、液相状態で2液に分離するために、均一に分散したバルクの合金を作ることはできない。しかしながら、微小重力下では無沈降・無浮力の効果により偏晶合金を作ることが可能であると期待される(M-10)。このため、1970年代から比較的多くの研究が行われているものの、ほとんどの場合2液相領域で析出液滴の凝集、分離が起こり、均一分散した組織は得られていないのが現状である。この原因については種々の説明がなされており、容器とのぬれ性の問題、表面張力のこう配などが考えられているが、まだそのうちどれが主原因であるか明らかとされていない。

興味深い結果として、スカイラブⅢで行われたPb-Zn-Sb合金の凝固実験を紹介する。微小重力下で凝固した材料の方が地上のものよりも均一な分散状態が得られた。また、未確認の相が見い出され、超電導の転移温度の変化が報告されている。

(a) 地上でのNi系合金の顕微鏡写真 (b) 無重力下で製造されたNi系合金の顕微鏡写真

図1 TT-500A形ロケットによる製造実験の成果写真

表 3 微小重力環境下の諸現象と材料製造へのその応用

	主 な 現 象	技 術 的 要 素
無 対 流 (自然対流がなくなること)	① 微小流・乱流の現われ	<ul style="list-style-type: none"> ・乱流による熱・物質移動 ・重力のふらつきによる微小流 ・温度・密度こう配による微小流
	② 無偏析	<ul style="list-style-type: none"> ・結晶のひずみの減少 ・化学反応の均一化 ・組成の均一化
	③ 界面現象の現われ	<ul style="list-style-type: none"> ・方向凝固過程の制御容易 ・凝固界面の観測容易 ・ぬれ・毛管現象の変化 ・界面張力による対流 (マランゴニ対流)
	④ 輸送現象の変化	<ul style="list-style-type: none"> ・外力による物質移動が容易 ・気体拡散の一樣化 ・気相析出・沈積の促進 ・腐食・電気化学過程の変化 ・液相の拡散・表面対流 ・液相/気相大形結晶成長
	⑤ 熱・密度のゆらぎの減少	<ul style="list-style-type: none"> ・相平衡の研究容易 ・整列組織の制御容易 ・核生成の抑制
	⑥ 温度こう配の増大	<ul style="list-style-type: none"> ・熱交換技術の必要性
無 沈 降 ・ 無 浮 力	⑦ 沈降の消失	<ul style="list-style-type: none"> ・泳動分離が容易 (電気的・磁氣的) ・大形モザイク結晶成長容易 ・懸濁化が容易
	⑧ 相分離の消失	<ul style="list-style-type: none"> ・多成分系の均質化学反応 ・比重差の大きい非混合系/複合材料製造 ・液体/固体の均質混合可能 ・液体/液体の均質混合可能
	⑨ 物質分布の変化	<ul style="list-style-type: none"> ・泡動力学の研究容易 ・泡の均一分散化容易
無 静 圧	⑩ 泡の分布の変化	<ul style="list-style-type: none"> ・脱泡技術の必要性 (超音波・遠心力等)
	⑪ 界面圧力の変化	<ul style="list-style-type: none"> ・気/液界面の重力変形の消失
	⑫ 界面現象の現われ	<ul style="list-style-type: none"> ・燃焼現象の変化 ・粘性液滴の合体現象の観測容易 ・液性・浮遊帯の形状安定化 ・臨界点付近の用転移の観測容易 ・移動界面の観測容易 ・ぬれ・吸着現象の現われ
	⑬ 自重変形の減少	<ul style="list-style-type: none"> ・結晶粒成長の制御可能 ・無転位化等, 格子不整の除去容易 ・均質アモルファス化
	⑭ 流体の変形の減少	<ul style="list-style-type: none"> ・壁効果の消失, 鑄造容易
無 接 触 浮 遊	⑮ 無容器・浮遊容易	<ul style="list-style-type: none"> ・音波遊技術の必要性 ・浮遊帯溶融性の応用拡大
	⑯ 界面現象の現われ	<ul style="list-style-type: none"> ・表面張力の影響大, 真球生成
	⑰ 浮遊状態の安定さ	<ul style="list-style-type: none"> ・浮遊液体の流体力学の研究容易 ・超高純度物質の製造容易 ・無接触により汚染・核生成の防止
	⑱ 熱環境の変化	<ul style="list-style-type: none"> ・冷却および急冷技術の必要性 ・高温・超高温化学反応 (無接触) ・放射冷却/加熱が顕著化

宇宙実験の意義は、先に述べた無対流、無沈降等の明白な効果を利用するという位置付けと、微小重力が我々のまったく予期しない現象を引き出し、新たな知見を我々にもたらすという位置付けの両者があると考えている。先の報告は、この後者に属し、我々の科学技術の新領域を切りひらくものである。

4. 科学技術としての宇宙実験

地上に比べて特異な環境である宇宙の微小重力を用いた新材料の創出について FMPT の実験テーマを中心として微小重力の効果の一部を概説した。表3に微小重力による主な現象と技術的要素を示す。表から明らかなように、微小重力が大きく効果を及ぼす場合とは、物質を構成する原子間の相互作用が弱い状態のもの、すなわち気体と液体の状態である。多くの固体はその生成時に熔融状態または気相の状態をとるために、物質の生成に当たって、微小重力の影響が固体の性質に大きく影響する可能性を有する。しかしながら、例えば結晶成長に及ぼす微小重力の影響についての基本的理解も現在のところ十分でなく、流体力学と結晶成長学との融合など、基本的課題が多く残されている。

従来の地上における科学技術の進歩は、試行錯誤的要素が強く、新材料の発見が先にきて、後に理論の構築が成されてきた。これは言わば、絨毯爆撃的手法であり、膨大な実験機会を必要とする。宇宙実験は、地上の研究と比べて膨大な費用、極めて限定された条件、実験機会が少ないなど種々の制約条件がある。このため宇宙実験の実施には、効率化と、熟考された実験計画の立案が

何より必要である。

例えば、宇宙環境では、地上で考慮されない現象が顕在化し、問題となる。例えば、るつぼとのぬれ性は地上ではほとんど考慮されないが、過去の宇宙実験では、容器とのぬれ性を考慮しなかったために、熔融物がるつぼから出て実験が失敗に終わった例がある。また、微小重力下では密度差による対流は無視されるが、かわりに表面張力による対流が顕在化し、これはマランゴニ対流と呼ばれ、結晶成長においてはこの対流を防ぐ技術的努力が必要となる。

この様に微小重力下の実験では、細心の注意が必要であり、さらに我々は微小重力下における物理現象のすべてを正確に理解しているわけではなく、むしろ未知のことのことが多い。この意味において従来の科学技術の探求方法が適用できず、宇宙実験の困難さはまさにこの点にある。

現在、日本、アメリカ、ヨーロッパ、カナダの国際協力の下、1990年代半ばころの完成をめざして計画が進められている宇宙ステーションは、地上約500 kmの軌道上を周回する恒久的実験施設である。この宇宙ステーションの完成をもって、材料、ライフサイエンス分野等の長期間にわたる系統的な宇宙実験が可能となる。そして、ここから生まれた新素材のいくつかは、将来は宇宙工場によって大量生産される日も夢ではない。

表3に示された微小重力環境下の諸現象を用いて新材料の創出を皆で考えていただきたい。宇宙という特異な環境を利用した科学が、科学技術の新たなブレークスルーとなるものと確信している。

(原稿受付 昭和63年5月24日)