

微 小 重 力 科 学 分 野  
研 究 シ ナ リ オ

第5版： 平成14年 3月  
初 版： 平成11年 3月

宇 宙 環 境 利 用 研 究 委 員 会  
微小重力科学専門委員会

## - 目 次 -

1 . はじめに .....	1
2 . これまでの課題の整理 .....	2
2 . 1 研究手法 .....	2
2 . 2 制度 .....	2
2 . 3 これまでの微小重力利用の研究シナリオ .....	3
3 . 各分野の特徴と課題 .....	3
3 . 1 物質科学と材料工学 .....	3
3 . 2 基礎物理・化学物理 .....	3
3 . 3 流体物理 .....	4
3 . 4 燃焼科学とその応用 .....	4
4 . 分野の方向性 .....	4
4 . 1 物質科学と材料工学 .....	5
4 . 1 . 1 凝固 .....	5
4 . 1 . 2 結晶成長 .....	6
4 . 1 . 3 材料プロセッシング .....	9
4 . 2 熱物性値計測 .....	10
4 . 3 流体物理 .....	11
4 . 4 燃焼科学とその応用 .....	12
5 . シナリオ構築の基本的な考え方 .....	13
5 . 1 微小重力科学研究シナリオ作成にあたっての視点 .....	13
6 . JEM利用研究シナリオの考え方と重点研究領域について .....	15
6 . 1 シナリオの前提と重点研究領域の設定 .....	15
6 . 2 シナリオの要素 .....	15
6 . 3 研究シナリオに基づく実験装置、実験技術 .....	18
6 . 3 . 1 溶液・融液からの結晶成長に関連した実験装置及び実験技術 .....	18
6 . 3 . 2 過冷凝固と準安定相研究 .....	25
6 . 3 . 3 次期実験装置の要求機能・性能 .....	30
7 . 研究シナリオの具体的な進め方 .....	35
付録 1 微小重力科学専門委員会構成員 .....	40

## 1.はじめに

我が国の微小重力科学実験計画は、1971年のスカイラブ実験に始まり、T T 5 0 0による小型ロケット実験、我が国独自の本格的な宇宙実験である第一次材料実験（F M P T）、国際微小重力実験室計画（I M L 1、2）などを経て、2002年にはJ E Mの利用が開始される予定である。

これまでの微小重力科学の研究成果を概観すると、拡散係数の高精度測定及び新たな温度依存性の発見、等軸晶形成の原因が不均一核発生に由来することの証明、地上では得られない大型結晶成長（ヨウ化水銀）、など幾つかの画期的な成果はあるものの、当初期待されたほどの成果は得られていない。現在では、これらのいくつかの宇宙実験成果を通じて、微小重力利用が有効な現象、研究領域等に関する理解が進みつつある。

微小重力環境を利用した体系的な研究成果をより早期にまたより優れたものとして創出するためには、微小重力利用の効果が有効で、かつ、大きな科学技術的な成果が期待される分野を絞り込み、ある程度重点的に進めることが必要である。

微小重力環境を有効に利用し成果の早期創出を図るため、宇宙環境利用研究委員会 微小重力科学専門委員会において、微小重力科学としての重点的な研究領域を検討し、これを基に微小重力科学研究シナリオ、研究シナリオの進め方、及び次期共通実験装置の種類と機能・性能の要求等を検討し、平成10年10月に中間報告書としてまとめた。

平成10年10月より中間報告書に対する各分野の専門家との意見交換、インターネット等を通じて各分野の研究者からの幅広い意見の収集を行い、平成11年3月に最終報告書をまとめ、宇宙環境利用研究委員会に報告・了承され、制定された。

その後、本研究シナリオが科学技術の進歩等に合わせ適宜改定することが適当であるとの視点から、平成11年7月の宇宙ステーション利用ワークショップでの議論、平成12年1月の宇宙環境利用研究システムにおける、平成10年に実施されたT R - I A 小型ロケット7号機、平成9年に実施されたM S L 1 及びS T S 8 4 のシャトル実験の実験成果の科学技術評価結果等を踏まえ、平成12年3月に一部内容の追加等の改訂を微小重力科学専門委員会にて行った。さらに、平成13年6月の宇宙ステーション利用計画ワークショップでの議論、国際公募および地上研究公募の状況を踏まえ、第2回目の改訂を微小重力科学専門委員会にて行った。

基礎物理学の領域についても、微小重力科学分野の一研究領域「基礎物理・物理化学」として取り扱ってきた。しかし、日本の物理学研究の特徴や研究者の関心の方向性を踏まえて微小重力利用の視点や考え方を明確にする必要から、微小重力環境を利用する基礎物理・化学物理の分野を「微小重力物理学分野」と定義することとなった。そして、物理学研究の実績と特徴に配慮しつつ微小重力物理学の研究領域を抽出し、日本の研究者に広く情報を提供するなど、基礎科学における微小重力環境利用の研究推進を目標として、当該領域を詳述した分冊「微小重力物理学研究シナリオ」が編集された。微小重力物理学分野の研究にあたっては、この分冊もあわせて参照されたい。

また、平成13年3月の科学技術基本計画において、当面5年間の科学技術政策として1)ライフサイエンス、2)情報通信、3)環境、4)ナノテクノロジー・材料の重点4分野が設定されたことを踏まえ、本シナリオにおいても重点4分野との関連について言及することとした。

本報告書は、今後の公募地上研究、JEM利用公募での重点領域の設定及び次期共通実験装置の設定等に反映されることとなる。

## 2.これまでの課題の整理

### 2.1 研究手法

宇宙実験実施の困難さは、地上で行われている研究に比べて実験機会の少なさ、実験設備開発にかかる膨大な資金等の種々の制約から、地上研究として従来から行われている試行錯誤的な研究手法を適用できない点にある。このため、微小重力実験の計画立案に当たっては、シミュレーションによる実験条件の予備検討や地上実験に基づく実験条件の詳細検討が必要となる。さらに、流体現象に関するシミュレーションを実施するためには、試料の粘性係数と温度依存性、表面張力の温度依存性などの実験試料に関する各種物性値の把握が必要となる。従って微小重力実験を実施するためには実験試料の各種物性値の測定、流体現象に関する知見、微小重力現象に関する知見、また、この実験を実施するための実験技術が必要となり、これらの知見を総合的に集約して初めて一つの実験計画が立案されるといつても過言ではない。

これまでの微小重力実験計画の立案を振り返ると、宇宙実験の実施には地上実験に比べ多くの知識を必要とすることから宇宙実験は地上研究の手法の延長とは言い難く、宇宙実験計画立案のためには新たな取り組みが必要である。

### 2.2 制度

これまでの我が国の宇宙実験は、実験機会がきわめて限られていることから、各実験機会毎に実験テーマを公募し、科学技術的な視点のもとで選定が行われてきた。公募による微小重力実験へのアクセスでは、提案する研究者の独自性に依存することから、おのずから実験結果及び成果が点と線になる傾向にある。少ない実験機会である程度の成果を創出するためには、あらかじめ計画された領域について体系的に研究を進めることが必要であるが、複数の宇宙実験にまたがるような実験結果の連続性を勘案した選定は行われていない。

昭和61年の宇宙基地特別部会の報告書では、産官学それぞれに利用取りまとめ機関が定義され、これに基づいてJEM利用が進められてきた。平成3年からは、科学技術庁、宇宙開発事業団が宇宙環境利用の底辺の拡大を目指してフロンティア共同研究を設立し、微小重力科学分野では金属・合金、セラミックス等5つのグループにおいて、微小重力利用のための地上研究を進めてきた。

利用とりまとめ機関における微小重力環境利用への積極的な取り組みがなされなかつたことから、平成7年より宇宙環境利用部会において新たな宇宙環境利用推進策が議論され、平成8年の宇宙環境利用部会の報告書に沿ってJEM利用を総合的に取りまとめた宇宙環境利用研究委員会が設立された。平成8年10月には、宇宙開発事業団に宇宙環境利用研究の体系化を目的として、宇宙環境利用研究システム及び宇宙環境利用研究センターが設置された。

フロンティア共同研究制度は、さらに広い新たな研究の取り込みを目指すことから平成9年をもって発展的に終了し、公募地上研究制度へと移行している。この公募型地上研究では平成9年以降3回のテーマ募集を行っており、第3回目のテーマ募集では、本研究シナリオで定義された重点研究領域を強調した選定が初めて行われた。

## 2.3 これまでの微小重力利用の研究シナリオ

JEMに関する利用要求取りまとめ作業として、昭和60年から宇宙基地利用計画ワークショップ等を通じてアンケート調査を実施し、6分野（材料、ライフサイエンス、理工学、通信、天体観測、地球観測）の分類を通じ、JEMの構造設計、基準ミッショングの作成等を行ってきた。これらの作業が、主としてアンケート調査であったことから、分野間の強弱、分野内分野での強調などは行われてこなかった。従って、これまでの微小重力利用のシナリオの設定は、分野間及び分野内分野均等、機会均等のシナリオであったと理解できる。それ以降において、宇宙環境利用或いは微小重力利用に関するシナリオは、本シナリオまで構築されていなかった。また、平成13年3月に設定された科学技術基本計画の重点領域（ライフサイエンス、情報通信、環境、ナノテクノロジー・材料）との整合性を考慮した。

## 3.各分野の特徴と課題

微小重力科学研究のシナリオ検討に先立ち、微小重力科学をいくつかの分野に整理し、各分野における特徴や課題を総括した。

### 3.1 物質科学と材料工学

物質科学と材料工学分野は、物質の微細構造と物性の間の関係及びこれらに及ぼす材料プロセッシングの影響を明らかにする研究領域であり、その最終目標は、目的とする優れた特性を有する材料を製造するためのプロセスを確立することである。我が国は電子材料、光学材料などの高機能材料製造において地上基礎研究から実利用研究までの幅広い研究領域においてアクティビティーが高く、また、微小重力科学分野においても限られた微小重力実験の機会を有効に利用して半導体単結晶実験等で成果を得ている。微小重力実験技術に関しては、静電方式無容器技術やシアーセルによる拡散係数計測技術、二波長干渉顕微鏡による濃度場・温度場のその場観察技術など独自の実験技術を確立しており、この領域では世界の先端にある。

### 3.2 基礎物理・化学物理

物理学を中心とした基礎科学の大きな目標は、基本的な自然法則の探求とその原理の理解を進め、包括的な理論を構築することにある。基礎物理・化学物理分野では、微小重力環境を利用して自然現象の理解に新たな視点を加えることを目標とする。

基礎物理分野での微小重力環境利用は、まず、対称性の維持にその有効性がある。すなわち、空間の等方性を維持した状態で特定の空間領域に実験試料を自由浮遊させる必要がある場合や、圧力・密度において試料全体の一様性を確保する必要がある場合に、微小重力環境の利用が現象の理解に大きく寄与する。また、対流を排除し、平衡から遠く離れた空間的構造の維持が必要となる場合にも有効である。このような条件下で実施可能な研究の方向性として、巨視的量子現象の原理的考察（ボース・アインシュタイン凝縮、量子核生成、超流動）、臨界点ダイナミクスの多様性と普遍性（臨界点近傍の緩和現象、濡れ層のダイナミクス）、複雑性をもたらす非平衡現象（反応拡散系、複雑液体系）など、統計物理学・凝縮系物理学・化学物理学などに関連した問題をあげることができる。

我が国では、これまで微小重力科学研究としての基礎物理・化学物理分野の研究提案がほとんどないことから、日本の実験棟「きぼう」利用の対象として取り上げられてこなかった。しかし、我が国においても統計物理学・凝縮系物理学・化学物理学の研究者が多数存在し、学術的に大きな貢献をしている。したがって、この分野の研究者に微小重力環境利用の情報を提供し、当該分野の宇宙環境利用推進を図る必要がある。そこで、微小重力環境を利用した基礎物理・化学物理の領域を「微小重力物理学」として設定し、日本の物理学研究の実績や特徴をふまえてこの分野を詳細化した研究シナリオを分冊として提示した。微小重力物理学分野の研究にあたっては、分冊を参照されたい。

### 3 . 3 流体物理

流体物理分野の目標は、流体の運動を表す挙動を明らかにすることである。この分野は航空機と原子力開発において飛躍的に進歩した。例えば原子力分野においては、効率的な熱除去のための流れと制御、安全性に関する流れの形態などの研究であり、これらの課題を解決させるために多くの取り組みがなされ、成果の創出が図られた。

微小重力科学研究においては、マランゴニ対流現象の解明、核沸騰、二相流、気泡の運動、濡れ性現象等の研究が行われてきた。これまでには、シリコンオイル等のモデル液体を利用した可視光によるその場観察実験が積極的に進められてきたが、低プラントル数流体(融体)での実験はほとんどない。宇宙ステーションにおける微小重力環境は、完全な無重力ではなく  $g$  ジッタと呼ばれる不規則に変動する微小重力環境となることが予測されている。微小重力環境利用のためには、この  $g$  ジッタによる流体の運動をシミュレートする技術を確立する必要がある。

### 3 . 4 燃焼科学とその応用

燃焼科学分野の最終的な研究目標は、基礎的な燃焼プロセスの解明に基づく燃焼現象の理解と燃焼機関の高性能化をめざす所にある。微小重力環境における燃焼研究は日本において始められた研究であり、現在も落下塔を中心に精力的に研究が進められている。

我が国の燃焼研究は、噴霧燃焼を中心的なターゲットとして、基礎プロセス、特に理論と比較可能な系を中心に研究が進められており、噴霧燃焼の研究アクティビティは世界のトップレベルにある。今後の課題としては、基礎燃焼プロセスの解明に必要な理論モデルの構築と実験を並行して進めると共に、地上燃焼機器への応用を明確にする方向で研究を進めることが重要である。

## 4 . 分野の方向性

3章での各分野に対して、より小さな分野を設定し、それぞれの小分野の微小重力科学研究としての今後の方針を以下にまとめる。なお、基礎物理分野については、分冊「微小重力物理学研究シナリオ」を参照されたい。

## 4.1 物質科学と材料工学

### 4.1.1 凝固

#### (1) 無対流凝固による分相と核生成

我が国の科学技術の発展は製鉄、精鍊における技術の高度化にあったと言っても過言ではないほどの時期があった。この時期において金属・合金の凝固は製鉄等の金属材料の製造プロセスとして広く研究されており、バックグラウンドが非常に充実した研究分野の一つになった。地上において工業的な材料製造のための理論や手法が発展しており、微小重力実験の成果が地上の研究にインパクトを与えるような応用研究を行うためには、十分に練られた計画の立案が不可欠である。

基礎科学的な視点では、シャトル実験において不均一核発生による内部凝固組織（等軸晶）の解明がなされるという画期的な成果が得られた。それ以降の微小重力実験では、核発生における密度差からの偏析現象、微細化のための添加元素と母相との密度差による偏析現象、及び母相と粒子の濡れ性を考慮した粒子分散合金の製造実験が行われた。合金系の相分離現象は、未だ不明な点が多く、特に相転移の理論モデル研究は現時点でも物性物理の最先端テーマの一つである。一般的に相分離を起こす合金系は互いの密度差が大きく、このため重力が相分離に及ぼす効果は明白である。特に従来から分散合金作成実験の対象として微小重力実験が行われている偏晶合金系については、分離した2液相のうち体積の少ない液相がもう一方の液相中に液滴となり、試料中の温度勾配によって移動・合体することが予想される。これら一連の過程における相分離現象のモデル化が偏晶合金系の微小重力実験としての今後の方向の一つであろう。また、オストワルド成長に代表される粒子群の粒径分布の経時変化の研究は、金属・合金の凝固を対象とした場合、地上での対流の影響を排除して微小重力利用での純粋な拡散移動による現象の定量的な把握とそれによる精密なモデルの検証として意義がある。

材料強度的な観点に立てば、現在メカニカルアロイング等により粒子分散材料が地上で製造可能であることから、微小重力利用による均一分散状態達成による機械的性質向上の観点よりむしろ、微小重力利用による微細構造制御と電気的、磁気的性質の関連に着目した研究が望まれる。分相を利用した微細組織形成について、近年ではナノサイエンスの観点から、より微細な構造の制御に関する研究が進められている。拡散支配による物質輸送や沈降・浮遊の除去など、これらのナノサイエンスに対する微小重力の意義が高く、新たな観点の研究が期待される。

#### (2) 過冷凝固（無容器処理）

微小重力環境を利用した浮遊試料の無容器処理は、地上重力環境では達成困難な極めて擾乱の小さい環境における実験を可能にし、大きな過冷却度の達成や新規の電子・光学材料である準安定状態の新物質、均一核発生による新たな研究領域の創出を期待させる。バルクアモルファスや準結晶など、過冷凝固と関連の深い特殊な状態の物質生成の研究については、これまでに日本が世界をリードしてきている。近年ではナノサイエンスの観点から、計算機科学との組み合わせにより相の生成条件の理解が進みつつある。無容器処理による浮遊試料の実験は、高度な技術を必要とすることから研究分野としては発展途中にあ

り、今後この分野の地上研究者の取り込み方策を含めて、地上研究分野としての発展を伴った研究の展開を図る必要がある。

電磁及び静電方式の無容器処理による実験的研究は、金属、半導体、セラミックスを中心とした高融点の無機材料研究に対して有効であり、核発生プロセスの研究などの基礎研究や準安定相等の作成について、共通の手法の確立を目指した横断的な分野として捉えることができる。たとえば、準安定相出現の予測をたてる場合、状態図の形状や各試料の物性値に基づく熱力学理論計算が適用され、近年では電子構造に基づく量子力学的計算などに基づいた研究が始まっている。

我が国においてJEM利用装置として開発を進めている静電方式浮遊炉は、従来の電磁誘導方式や音波方式浮遊炉と比較して擾乱が小さく、かつ電磁誘導方式では不可能なガラスなどの絶縁性物質の無容器処理を可能とする。そのため国際的な微小重力科学研究のテーマの公募において、各国の研究者から利用を求められることが予想される。従って我が国においてはこの実験技術の先導性を保ちながら、この技術の積極的な利用を図ることが肝要である。今後の方向として、過冷却状態からの凝固現象に関する理論モデルを構築する必要がある。このためには、関連する過冷却状態の熱物性値の精密計測及び急速な凝固現象の理論構築が必要であり、この方向での理論的・実験的研究が望まれる。また、大きな過冷却現象の研究には核発生理論に基づく最大過冷度の予測が不可欠であり、この点においての研究の進展が望まれる。

この領域に関する微小重力実験としては、1994年にドイツの電磁浮遊炉により過冷却状態での表面張力の計測、核発生挙動等の実験が行われている。電磁浮遊炉を使用できるような金属・半導体材料の実験は、欧米が先行している。我が国の特徴を生かすため、静電方式の利点を生かしたセラミック材料などの研究の推進が重要である。

準安定相研究は未だ多くの不確実性があることから地上装置を用いた地上研究が必須であり、この点で早急に地上装置の開発を図ると共に、関連研究者への利用提供による課題の抽出と研究の連携が必要である。また、位置制御機能等の技術開発については、地上研究や以降の微小重力実験機会を利用した技術検証を含め、確実に課題を達成することが必要である。

#### 4.1.2 結晶成長

##### (1) バルク成長

###### (ア) 融液成長と溶液成長

微小重力環境を利用した大型高品質の単結晶作製の試みや、結晶成長界面の安定性などの成長機構の解明を行うことは、微小重力環境利用の柱として数多くの研究が行われており、我が国は高度な半導体製造技術と相まって最もアクティビティの高い研究分野の一つである。欧米での半導体実験を中心とした微小重力実験の成果として、不純物を添加したGeの不純物濃度の均一分布や低転位密度を目指した単結晶成長、ヨウ化水銀化合物の気相成長において自重による変形の無い大型の単結晶の育成が報告されている。我が国は電子・光学材料の製造において、世界の先導的な位置にあり、基礎研究及び応用研究において多くの優れた研究成果を創出している。研究成果の利用方法に関しても、化合物半導体

は現在大きく発展している光通信用素子として産業に直結したインパクトを与えるものと期待できる。

結晶成長の機構は、結晶表面近傍での分子のキネティクス、結晶周囲の環境場における熱・物質輸送、結晶表面の形状安定性など共通的な素過程に分けることができ、それらの素過程は物質によらず共通の取り扱いが可能な場合が多い。たとえば、半導体材料において構築された結晶周辺の輸送モデルは酸化物セラミックスにおける結晶成長においても適用可能であり、またその場観察による結晶の形状安定性に関する実験方法はそのまま蛋白質結晶成長の実験手段として利用できるであろう。

微小重力利用として、対流の効果を含まない拡散のみによる溶質濃度分布を利用した高品質結晶育成が期待できる。特に液相線と固相線が離れているような3元系化合物半導体の結晶成長では、固液界面近傍の液相側に大きな濃度・密度勾配が発生する。微小重力環境は、対流による液相の擾乱を抑制し、液相の濃度分布を拡散から正確に予測し制御できる。ただし、微小重力実験場における残留重力、 $g$  ジッタを考慮した実験条件を設定しない限り十分な成果を上げることは難しい。液相の流体運動の制御において、磁場の利用は有効な方法の一つであるが、材料融液の電磁流体力学的な取り扱いは十分に研究されておらず、この種の研究の必要性は今後大きくなるものと考えられる。また、流体力学的な数値解析により残留重力及び $g$  ジッタを考慮した結晶成長実験条件の決定が必要である。このためには、解析に用いる重力環境のデータ、材料の精密な融液物性値、電気炉の熱環境などのデータが必須である。

溶液成長は成長速度が融液成長に比べてかなり小さく成長時間が長いため、残留重力の影響を融液成長以上に受ける場合があり、融液成長以上に実験条件の最適化に残留重力及び $g$  ジッタの影響についての考慮が必要である。特に溶液成長では、各種のモデル実験の成果をどのように反映させて良質な結晶を得るのかの視点が今後の課題であろう。

結晶成長におけるパターン形成の定性的・定量的理解は、非平衡過程の物理科学における今日的な科学課題であるのみならず、材料分野における自発的組織形成の制御技術に関連する重要課題である。結晶成長におけるパターン形成は、凝固に伴う潜熱の発生と熱輸送、界面異方性が主因子として相互作用することにより変化し、地上においては対流が現象の理解、特に定量化を妨げている。なお、デンドライト成長については、反応拡散系と関連して、分冊「微小重力物理学研究シナリオ」の中でも議論されている。

結晶周囲の環境場の流体力学的取り扱いや凝固過程を含めたシミュレーションの構築及び精密な熱物性の把握などと併せて研究方法の構築を図ることによって、微小重力下での共通基盤的な現象の理解と実験方法の確立を行うことができる。横断的な分野の設定を行い研究を進めることによって成果の早期創出を目指す意義は大きい。

近年、光学素子材料やメモリー材料としての高品質酸化物単結晶が注目されており、これらの結晶中の結晶欠陥や不純物の制御についての研究が進められている。この種の酸化物の単結晶の育成には一般にフローティングゾーン法やチョクラルスキー法が用いられる。微小重力環境を利用した液柱のマランゴニ対流パターンの予測・制御、流体シミュレーションに必須な物性値の取得などの研究の蓄積が、地上での高品質結晶の育成技術に貢献するものと期待される。

## (イ) 蛋白質結晶成長

蛋白質は生命現象を司る機能性物質であり、その機能はアクティブサイトとよばれる特定部位の立体構造に支配される。立体構造解析はX線回折によるが、そのためには0.3mm角以上の良質単結晶が必要となる。SPring8など第三世代放射光施設の登場により必要とされる結晶の大きさは約10分の1程度となったが、それでも高分解能で立体構造を決定するためには、品質の優れた単結晶が必要となる。また、蛋白質に結合している水和水の構造を決定することも重要であるが、水和水構造を決定する中性子線回折のためには1mm角以上の良質単結晶が求められている。しかし、地上では対流による濃度場の乱れ、重力による沈降などにより、これらの大きさの良質単結晶を育成することは困難であった。

これらの因子を排除することを期待して、これまで多くの微小重力蛋白質結晶成長実験が行われてきた。その結果微小重力利用によって結晶サイズの向上、結晶品質の向上が図られることが明らかとなったが、その多くは地上研究の延長として試行錯誤により実験が行われてきたために、成功率は決して高くなかった。このため、結晶育成手法の見直しが図られ、Step Gradient Technique、温度差法など結晶成長の進行とともに過飽和度をコントロールする新規育成手法が考案され、成功率の向上が図られつつある。しかしながら、これらの育成手法においてもその条件設定について明確な指針は未だ存在せず、結晶成長理論などを背景とした最適結晶育成手法の構築が求められている。そのためには、蛋白質の結晶成長を高精度に観察し、結晶成長機構を解明したうえで、最適な結晶育成手法を構築することが重要となる。

また、これまでの微小重力下での蛋白質結晶成長実験では、地上研究において結晶成長条件が設定されてきたが、これが微小重力下での最適条件であるとは言い難い。結晶成長条件の最適化のためには核発生挙動、成長挙動の把握が必要であり、溶解度、拡散係数、状態図などの基礎データの取得が必須である。

さらに、地上研究における実験条件に少なからず対流、成長結晶の浮遊・沈降等が影響していると考えられることから、これらの影響の精度良い把握が必要である。微小重力環境の利用は、溶質の輸送を拡散支配にすることにより高品質蛋白質結晶成長を実現しようとするものであり、このため溶液の粘性係数、蒸気圧などの関連する各種熱物性値の調査及び取得と、それを用いた対流シミュレーション等の実施は蛋白質結晶成長研究の微小重力実験計画立案にとって不可欠である。

具体的には、結晶成長機構、結晶成長速度を過飽和度、温度などの関数として高精度に求め、ファセット成長を与えるパラメータ域を特定し、これらファセット成長域がどのように与えられるかを理解するとともに、育成結晶をこのような成長域に維持する手法を開発することが重要となる。

J E M共通実験装置の溶液 / 蛋白質結晶成長装置 ( S P C F ) はマイケルソン干渉顕微鏡と二波長マッハツェンダー顕微鏡を有し、結晶成長速度と結晶成長界面における溶液の濃度場と温度場を同時に求めることが可能であり、結晶成長機構の高精度計測を通じて、蛋白質結晶成長機構の解明に大きく貢献することが期待される。

ポストゲノム時代に入り、「プロテイン3000」計画が始動するなど、蛋白質の詳細な立

体構造解明の要請はますます高まっており、微小重力実験に対する期待も高い。微小重力環境における蛋白質結晶成長実験はドラッグデザインなど商業的利用価値が高く、米国ではCMC（蛋白質結晶構造解析を手掛ける商業宇宙センターのひとつ）を中心として宇宙実験を大規模に進めている。現在、我が国はこの分野で米国に大きな遅れをとっているが、SPCFなどを積極的に活用し、結晶育成の高効率化を図るとともに、民間企業の参入を促進する枠組みを設定することにより、米国にキャッチアップすることが十分可能であると考えられる。

## （2）薄膜

化学反応を用いる気相成長CVDにおいては化学反応、物質輸送現象と得られる結晶の品質との関係に不明な点が多い。半導体材料やセラミックス材料研究の動向として、薄膜を利用した電子材料や誘電材料への応用化が進んでおり、情報通信用デバイスの開発に向けたより高性能の素材の開発や薄膜の均質化の研究が進められている。また、分子線エピタキシーによるナノレベルでの膜厚制御や、CVDと関連したフラー・レンの気相合成等、ナノテクノロジーに関連する研究も数多くなされている。これらの薄膜の製造プロセスはほとんどの場合CVD、液相エピタキシーや分子線エピタキシーなど見かけ上重力の寄与があらわれにくい方法が利用されている。分子線エピタキシーについては、分子の平均自由行程を長くするために高真空間で行われ、微小重力の効用はあまり期待できない。CVDや液相エピタキシーについては微小重力の利点が考えられ、反応の基礎現象の理解に貢献しうる可能性があるが、製造プロセスにおいては微小重力環境での拡散のみによる成長とは異なり流れが存在する。微小重力環境は熱対流等の影響を受けない制御された流れを提供することとなり、薄膜成長における基板近傍の濃度場と結晶性の関係について明らかにできる可能性がある。しかし、流れと結晶成長との関連に関する理論展開を含んだ十分な検討が地上において行われる必要がある。フラー・レン等のような気相中のナノ粒子の合成についても、微小重力の生成プロセスに及ぼす効果について明確にする必要がある。

## 4.1.3 材料プロセッシング

### （1）複合材料製造

粒子分散複合材料の製造実験は、微小重力下での浮遊・沈降の抑制を利用した、母相中の強化相粒子の均一分散を目的としている。これは、宇宙実験初期から始められた最も古典的な実験である。その後、凝固に伴う濡れ性に起因する粒子の母相への取り込み、粒子の凝集及び試料外への排除機構、試料中の気泡による粒子の凝集機構など粒子分散のメカニズムに関する現象の理解が進んでいる。粒子分散による強度の向上が報告されているが、機械的特性の計測のために必要な大きさの試料が得られていないため、粒子分散の効果が定量的に示されていない。

現在では、粉末冶金法、メカニカルアロイング技術が発展し、均一分散状態が地上でも十分達成されるようになっている。微小重力による理想的な分散の達成によって材料の強度が多少増加したとしても、構造物の強度は本来その形状に依存した応力集中が決定因子となっている。このため、微小重力利用の視点が均一分散における機械的性質の向上

だけではなく、形状による応力集中を考慮した粒子配分等実際の利用を考慮した計画立案が必要である。今後は、構造的な応力集中と分散状態の最適化等の観点から、構造的な視点を含めた材料組織の3次元的制御の研究として進められることが必要である。また、機械的性質としてこのほかにも重要な要因は、クリープ破壊、破壊靭性、疲労破壊があり、これらの視点からの研究も今後の方向である。

液相や固相における分相を利用した分散材料の形成や、スピノーダル分解による自発的な微細構造の形成に関する研究は以前から行われてきたが、近年ではナノサイエンスの視点から大規模な計算科学との組み合わせによる現象の理解がさかんに進められている。微小重力の利用に対しても、これらの理論的な解析に基づくより定量的な実験の構築が必要である。

## (2) 有機高分子材料・有機超伝導材料

欧米では有機高分子材料を用いて、ラテックスなどの微小な球やコンタクトレンズの作製を商業利用として行っている。近年ではスペースシャトルなどを用いて、コロイド溶液の凝集やコロイド粒子の結晶化などの観察が行われている。コロイド溶液系では粒子個々の運動を直接捉えることが可能であるため、凝固、結晶化などの相転移現象のモデル系として考えられている。しかし、ラテックスなどのコロイド結晶は斥力系であり、無機塩や蛋白質結晶など引力系のモデル物質としての妥当性が検討されなければならない。またコロイド溶液系に対する重力の効果を明確にし、コロイド粒子と水の比重を一致させた系を利用した擬似的な微小重力実験との切り分けを明確にする必要がある。

溶液の液液拡散法を用いた有機超伝導材料や有機強磁性体の単結晶作製（大型化及び良質化）がこれまでの微小重力実験において試みられているが、蛋白質結晶と同様に単に結晶を作製することが目的となっている。有機超伝導材料等は蛋白質と比較して単純な分子構造をしており、近年の分析技術や物性計測技術を用いれば構造決定や物性計測は可能であり、これらを目的とした大型単結晶作製の意義は小さい。また、これまでの実験からは微小重力環境が良質化に寄与した明確な結果は得られていない。結晶の良質化に及ぼす微小重力の利点を明確にすることが課題であるとともに、今後は分子性物質結晶化プロセス研究などのモデル物質として利用されるべきである。

## 4.2 熱物性値計測

熱物性値は、物理定数のデータベースを通じて、すべての科学研究の基盤といえる。熱伝導率や拡散係数などは、試料に温度勾配や濃度勾配を与えて測定することから、本質的に密度勾配が発生し、重力による対流が必ず発生する。拡散係数の測定においては、微小重力利用により高精度に測定可能であることが、シャトル実験、小型ロケット実験において実証されている。拡散係数は、結晶成長のモデル化、成長条件の最適化のシミュレーションなどにとって不可欠な物理定数であり、精度良い値は結晶成長条件の効率的な予測を促すこととなる。このため、拡散係数測定実験として各国が精力的に取り組んでおり、加熱及び冷却時の拡散を排除したシアーセルを用いた高精度測定技術の開発が進んでいる。

液体論においては実験データの不足から液体の拡散の理論構築が取り残されている。拡

散係数の高精度測定からその温度依存性を明らかにすることにより、液体状態輸送現象の理論構築が可能となる。この他にも、浮遊炉を用いて動的液滴形状を精密に測定することで表面張力、粘性係数等或いは液体密度等の物性値の測定を微小重力下で高精度に行うことができる。微小重力利用による熱物性値測定の方向性としては、実験手法の世界標準を構築し、微小重力利用から高精度なデータの体系的構築を図ることにあり、拡散係数などの精度良い熱物性値は、我が国の特徴である製鉄、精錬或いは半導体製造などの製造業の作業の効率化を通じて、経済活動に貢献することが期待される。なお、これらの熱物性値の取得に当たって、これまでには、微小重力実験が地上実験では取得できない未知のデータを創出する目的から試料の種類を多くして信頼性を時として犠牲にしてきた場合もあるが、今後は科学的、工学的或いは実用的なデータベースとしての利用に際してのデータの信頼性を明確にできる実験計画の立案が今後の方向として不可欠である。

計算科学の発展により、材料プロセッシングなどにおけるナノスケールのシミュレーションが行われている。固液共存状態からの結晶の形成など実際のプロセスに対応したシミュレーションを行う際には、液相のシミュレーションが重要となる。しかしながら、液体状態のシミュレーションを検証するための物性値や液体構造のデータが十分ではない。今後、微小重力を利用したデータの蓄積が図られることで、ナノサイエンスへの貢献が図られると期待される。

#### 4 . 3 流体物理

これまでの微小重力利用による流体物理の研究では、マランゴニ対流、二相流、沸騰現象などの基礎的な研究が行われてきた。マランゴニ対流に関しては、定常流から振動流、乱流への遷移メカニズム、及び、振動流、乱流の構造については、現状では未解明な点が多く研究の課題である。一方、溶融金属、溶融半導体等の低プラントル数流体のマランゴニ対流に関しては、半導体結晶成長実験として実施され、流体力学的な検討に至っていない。

温度差をさらに大きくした場合に発生すると考えられる乱流マランゴニ対流に関しては、乱流の精密な計測はもとより、観測さえ行われていない。振動流への遷移メカニズムを解明するには、(1)振動流への遷移モデルの構築、(2)実験、直接数値解析及び理論解析手法による遷移モデルの検証、(3)幅広いパラメータ（特にプラントル数）を取り扱う包括的な検討が必要である。

二相流（相変化を伴う気液二相流）の研究に関しては、しばしば宇宙インフラの排熱システムに関する基礎的研究が行われてきた。しかし最近の研究で流速が早い場合には伝熱特性は重力の影響をそれほど受けないことが解かってきており、宇宙インフラの排熱システムに関する研究では、具体的な課題を想定することが求められる。その一方で、強い非線形現象を伴う多体問題であることから、基礎的・理論的研究は、ともするとなおざりにされてきた傾向にある。例えば、臨界熱流束を決定している機構でさえ諸説があり明確ではないのが現状である。また、定常状態が存在するのかについても議論の余地が残されている。このような相変化を伴う気液二相流の基礎的あるいは理論的研究課題に対し、近年、単相流における乱流等の課題が解決しつつあること、及び計算機の著しい性能向上から、解決に向けた努力がなされ始めている。このようなメカニズム解明あるいはモデル検

証に関しては、浮力が相対的に大きく作用する低流速域での実験に対して、微小重力が特に有效地に作用する。従って、沸騰液膜の流体不安定現象等の熱流動不安定現象や前述の臨界熱流束（ドライアウト機構）等の研究課題についても、重力の影響が大きな低流速域での実験が望ましい。その際、単に技術開発の一環として実験を行うのではなく、地上研究に基づいたモデルの検証及びメカニズム解明等の視点が求められる。

核沸騰研究に関しては微小重力下では大型の安定した気泡が形成でき気泡挙動の詳細観測が可能なことから、沸騰現象の解明を目指して多くの研究が行われてきた。しかしながら地上での沸騰現象とは乖離しており、地上における沸騰現象の解明へ至るプロセスを明確にしつつ研究を進める必要がある。微小重力下では、定常状態のプール沸騰が長時間持続するため、排熱機器への応用研究が考えられるが、微小重力科学研究よりはむしろ技術開発としての取り扱いが適当である。尚、基礎現象としての気泡核発生、凝集、マイクロレイヤーの形成機構等については、依然として興味のある分野であり、今後の微小重力科学研究の課題であろう。また、核沸騰現象は、流速がゼロの場合の相変化を伴う二相流とを考えることができ、近年この観点から三相界面に関する研究が注目を集め始めている。

濡れ挙動に関する研究については、マクロ挙動の観察が行われてきた。今後は特に接触点近傍のミクロ挙動の観測及び分子動力学による数値解析を合わせた検討により、濡れ挙動の把握がなされるものと考えられる。

微小重力は、気体あるいは液体の状態に対して有効に作用することから、微小重力科学の実験計画の基本は流体現象の理解・解析にあると言える。この観点から、流体力学は、種々の目的の微小重力実験に積極的に貢献することが望まれる。例えば、JEM、宇宙ステーションにおける $g$ ジッタあるいは残留重力の影響を踏まえた実験試料の選定や実験試料容器の設計を進める必要がある。また、目的とする実験が成立するための最適パラメータの設定を流体力学から予測することも必要である。今後の微小重力科学における流体分野では、この様な貢献が期待される。

#### 4 . 4 燃焼科学とその応用

燃焼にともない大きな密度変化ある。本研究分野は、予混合ガス火炎、ガス拡散火炎、液滴・噴霧の燃焼、微粒子・ダストの燃焼、表面燃焼、くすぶり燃焼、燃焼合成と多岐にわたっている。NASAでは、宇宙インフラが発生することから、燃焼現象研究は微小重力利用が最も有効な分野の一つでの火災安全性の向上、及び内燃機関などの地上燃焼機器の高性能化を目指し燃焼研究を進めている。

ガス火炎の分野は、ガスの加熱による浮力効果や自然対流効果を顕著に抑制できることが特徴である。この特性を利用して、拡散のみによって支配される、静止した球状の火炎構造（Flame Ball）が希薄予混合気中に長時間安定に存在することの確認（MSL-1）、層流噴流拡散火炎を用いたすすの生成過程の詳細な観察等が行われ、この他、火炎伝播速度、燃焼限界に注目した実験がなされている。

液滴燃焼についても、浮力や自然対流の抑制による拡散支配下で、一次元球対称として現象を取り扱える利点を活かした单一液滴の蒸発・燃焼、消炎現象の解明、着火現象の観察、すす生成プロセスの観察等が行われている。また近年においては、单一液滴の燃焼研究で得られた成果を噴霧燃焼機構解明につなげるため、液滴間の干渉効果に着目した液滴

列や液滴群などの複数液滴に関する研究もなされるようになっている。

噴霧燃焼については、無沈降を利用した均一噴霧液滴燃料の火炎伝播機構が調べられている（TR-1A5号機、7号機）。微粒子・ダスト燃焼についても無沈降を利用しボイラ等の燃焼機器や防災に関する実験が行われている。表面燃焼、くすぶり燃焼においては宇宙船内等の防災を意識した実験がなされている。

燃焼科学は、高効率内燃機関への応用、あるいは、環境問題に関連した地上燃焼機器への対応と応用性が重要である。ガス燃焼においては層流燃焼から乱流燃焼へと研究対象が複雑になる傾向にあるが、これまでの研究は比較的単純な燃焼現象の解明に重点がおかれ、各種燃焼機器の複雑な燃焼の素過程についての現象解明に対して十分な配慮がなされてきたとは言えない。今後の展開として、燃焼プロセスの解明とともに、各種燃焼機器の高効率化、低公害化等の視点での応用を十分考慮した研究が望まれる。

燃焼合成は、材料プロセスとしては比較的簡易に超高温材料の製造が可能であるとの特徴を有する。その燃焼においては対流の影響が存在する。しかし、燃焼合成を構成する反応伝播過程と構造化過程の制御が困難であるなどの問題点が考えられ、これらの点の克服が課題である。

燃焼現象は微小重力利用の有効性はすでに実証された研究領域であるが、宇宙ステーションを対象とした長時間の微小重力環境の利用については、その必要性について実験計画立案に際し十分な検討が必要である。

## 5 . シナリオ構築の基本的な考え方

### 5 . 1 微小重力科学研究シナリオ作成にあたっての視点

微小重力科学研究シナリオを作成する上で留意すべき事項を記す。なお、微小重力物理学分野については、分冊「微小重力物理学研究シナリオ」を参照されたい。

#### （1）微小重力の利用

研究シナリオは微小重力利用に限定していることから、微小重力が有効に作用する研究領域である必要がある。微小重力は、超高真空、超高温、超高圧、高エネルギー放射線等と同様な環境因子である。これらの環境因子はそれを利用することにより、これまで困難であった現象の理解、理論の検証、新機能材料の製造などに利用可能である。従って、これらの環境因子は、現象解明などのツールとして利用されることにより新たな知識の獲得に大きな貢献が期待できる。微小重力利用が新理論の構築を促す要素は少なく、むしろ重力がないことにより生じる対称性を利用し、これまでにある理論の検証、地上の対流現象の複雑さを回避した単純化したモデルでの検証、対流という輸送現象を回避することによる現象の単純化及びこれによる熱物性値の高精度測定並びに材料特性の高機能・高品質化等に利用されるものであろう。

#### （2）我が国の特徴

今後の国際AOの実施、成果の国際的な水準等を勘案すると、限定されたリソースで微小重力利用研究を進めるべき視点としては、我が国のポテンシャルの高い研究領域を進めることが適当であろう。これらの研究領域としては、材料プロセッシング、熱物性計測としての拡散係数測定等が上げられる。

### (3) 基礎研究から応用研究の流れの重視

微小重力利用による成果が不透明ため、微小重力利用研究を取り巻く情勢は、世界的に基礎研究重視の傾向へ回帰しつつあると思われる。しかしながら、十分に良く検討され、地上研究が行われた実験計画の構築により応用研究を実施することから、最適実験試料容器設計、最適パラメータの設定などが行われ有意義な成果を創出出来るものと考える。十分な基礎研究の積み重ねによる研究手法を取り入れることから、応用研究を積極的に行うこととは、我が国としての独自性を出せる方向としてあり得ると考える。

### (4) 流体力学との融合

微小重力研究は、主として液体或いは気体の取り扱いにあると言っても過言ではない。最適実験条件の設定には、流体力学の知識、流体シミュレーションの実施が不可欠である。これまでの微小重力実験計画においては、一部のものを除き、積極的に流体シミュレーションを取り入れたものは、少ない。また、JEM利用において課題となるであろうgレベル、gジッタの研究目的に及ぼす影響などの検討も不可欠となる。我が国としての実験計画立案の特徴を出すためにも、あらゆる微小重力実験計画に流体力学の知識の積極的な融合を目指すべきである。一方、これまでの流体力学の微小重力研究は、基礎的な流体力学の理解に重点が置かれていた。このため、今後の流体力学研究は、相変化に伴う流体現象などの応用的な観点から、材料科学との融合を積極的に図りこれを進めることが適當であろう。

### (5) 微小重力の有効性が実証された分野の積極的な推進

すでに微小重力利用が有効であることが実証された様な領域では、積極的にこれを進めて、科学技術の発展に貢献することが大切である。例えば拡散係数測定は、微小重力利用によって高精度な測定が可能であることがすでに実証されている(D-1、TR-IA#5)。拡散係数などの熱物性値は、科学技術の基盤でありデータベースの体系的構築を通じて地上の研究、技術開発に大きな貢献を果たすと期待できる。この様な領域を進め、微小重力利用の有効性を広く認知させることは大切である。

### (6) 我が国の技術の特徴

我が国の宇宙実験技術の特徴としては、光学干渉計による溶液或いはX線による融体のその場観察技術、静電浮遊炉による浮遊位置制御技術、シアーセルによる高精度拡散係数測定技術等がある。諸外国に比較して優れた特徴ある技術は、さらにこれを進め有意義な研究の推進に貢献させる視点も必要であろう。

### (7) 研究シナリオと科学技術基本計画との対応

科学技術基本計画で設定された重点分野(ライフサイエンス、情報通信、環境、ナノテクノロジー・材料)へは、微小重力実験結果による関連分野の新素材開発や効率的な作製方法の考案を通じて貢献できる可能性を秘めている。後述する重点研究領域との対応でも、「溶液・融液からの結晶成長」による次世代光通信素子の開発による情報通信分野への貢献、蛋白質結晶成長技術の向上による蛋白質構造解明による製薬への貢献、過冷凝固を利用した新しいナノ材料の作製が挙げられる。

## 6 . J E M利用研究シナリオの考え方と重点研究領域について

### 6 . 1 シナリオの前提と重点研究領域の設定

4章での各研究領域での方向性及び、これらを有機的に体系化したものがJ E M利用研究シナリオとして考えられる。これに加え科学技術基本計画で設定された重点分野を加え考慮し、検討した結果、J E M利用研究シナリオとして以下の2つの重点研究領域を設定することとした。

#### (1) 溶液・融液からの結晶成長

これまでの我が国の微小重力科学研究においては、工業的な材料プロセッシングにつながる基礎と応用研究が数多く実施されてきた。すなわち微小重力科学分野における最もアクティビティの高い分野として物質科学と材料プロセッシングを挙げることができる。この研究領域には熱物性や流体挙動、結晶成長機構などの基礎的な研究から、情報通信技術の発展に必要な半導体単結晶育成などの応用研究まで極めて広範な研究が含まれている。

蛋白質結晶育成はドラッグデザインなど商業利用的価値が大きく、またポストゲノム時代のライスサイエンス研究における重要な課題である。米国ではC M Cを中心として大規模に宇宙実験を実施している。これに対し、我が国は優れたその場観察技術を有しており、これを十分に活用することによって、結晶成長機構を解明することが可能となり、これを反映した最適結晶育成手法の開発が可能となる。よって、このような蛋白質結晶育成の最適化・高効率化を我が国の独自性として打ち出すべきである。

従って、これらを踏まえた融体及び溶液からの結晶成長を当面の研究目標として掲げることが望ましい。

#### (2) 過冷凝固と準安定相研究

準安定相創成に関する研究は、微小重力環境を有効に利用したものであり、また新材料の創出との観点に立てばその可能性を秘めている領域である。ナノテクノロジーにおける重要な分野のひとつであるナノマテリアルについては大過冷却を利用した高機能材料作製が行われている。また、我が国は特徴ある浮遊炉を開発しており、この利用を積極的に図り、新たな研究領域を切り開くとの視点も重要である。従って、準安定相研究を当面の目標として進めることが望ましい。

### 6 . 2 シナリオの要素

「シナリオの前提」をふまえ、物質科学と材料プロセッシングのなかで、結晶成長及び過冷凝固による準安定相に関する研究を微小重力科学の積極的な推進課題として設定する。結晶成長は半導体などの溶液・融液からの結晶成長に加えて、蛋白質結晶成長も含めるものとする。

過冷凝固現象については、無容器処理による核発生制御を利用した研究が当面の目標となるであろう。過冷凝固は、これまでにない特性を有する材料創生を可能とすることが期待できる。これらの目標を達成するためには、これに関連する要素研究の積み上げが必要となる。これらは、研究シナリオの構成要素であり、各々の成果を有機的につなげることから研究シナリオとして体系化が図れる。従って、これらの研究要素が重点研究領域における具体的な研究課題と考えられる。これを以下に整理する。

#### (1) 溶液・融液からの結晶成長

溶液・融液からの結晶成長を目標として進める場合、以下の関連する研究を実施することが必要である。

### (ア) 拡散係数、粘性係数などの熱物性値の高精度測定及び液体構造に関する研究

半導体結晶成長における温度勾配や成長速度のような条件設定や  $g$  ジッタなどの流体的な解析を行う際に、拡散係数や粘性係数などの精度良い熱物性値が不可欠である。しかしながら、シリコンやゲルマニウムなどの単元素からなる半導体材料でさえ、詳細な熱物性値のデータが整備されているとは言い難い。特に化合物半導体の融液物性については、信頼できる物性値がほとんどないと言っても良い。熱物性値の高精度測定は実験的にも困難であるため、半導体材料に限らず一般的な測定方法の技術開発を含めて、より広範囲なデータベースの体系的構築を図る。また、これらの熱物性と液体構造との関連を解明することは、今後、科学的に大きな興味の対象である。例えば、擬2元系の3元化合物半導体における拡散は、分子拡散か原子拡散かは未だ不明である。

蛋白質などの結晶育成における育成条件設定や  $g$  ジッタなどの流体解析にあたっては、拡散係数や粘性係数などの正確な値とその温度依存性が必要となる。しかしながら、これらの物性値が既知の蛋白質ではそれほど多くなく、結晶育成の最適化を図るうえでこれらデータの取得が不可欠となる。よって、これらのデータを積極的に取得し、データベース化することが必要となる。

### (イ) 流体シミュレーション及び結晶成長と流れの理解

結晶成長実験において、融液中の密度差対流やマランゴニ対流のシミュレーションを行うことは、結晶界面近傍の濃度分布など材料プロセスを決めるための手段の一つとして必須である。微小重力実験における無対流を前提とした実験による均質結晶の育成を行う場合、 $10^{-3} g$  程度の  $g$  ジッタは融液の攪乱を引き起こすので、これを考慮した流体シミュレーションは微小重力実験の確実性を向上させるために不可欠な手法である。

### (ウ) 結晶成長のモデル化・理論の構築

融液結晶成長には界面の安定性や結晶周辺の温度場・濃度場、微視的な分子の取り込み、結晶表面での拡散などの様々な素過程が関連している。従って、結晶成長を体系的に理解するにあたり、これらの素過程を理解する必要がある。実験手法としては、従来の凝固組織の観察や干渉計を用いた温度場・濃度場の観察をはじめとして、X線、赤外線などの新規実験手段を利用した研究を進める必要がある。これらの研究をもとに凝固界面の安定性などの理解を深め、成長に最適な凝固速度や温度勾配等のパラメータを決定する必要がある。

溶液からの結晶成長は、溶液から結晶界面への物質の移動、結晶界面への取り込み、表面拡散、キンクへの取り込みなど一連の素過程からなり、結晶界面での取り込み過程、結晶界面の安定性、溶液相での物質、熱輸送などが絡み合って複雑な結晶成長機構を示す。このため溶液結晶成長を体系的に理解するには、これらの素過程をひとつひとつ明らかにする必要があり、光干渉顕微鏡や原子間力顕微鏡による結晶成長観察および結晶成長速度計測、二波長干渉計を用いた温度場・濃度場のその場観察などの新規実験手段の利用が必要となる。

また、蛋白質の結晶成長は界面での分子取り込みが律速過程となっている場合が多く、界面での取り込み過程（分子の配向、表面拡散など）を個々に明らかにすること、また界面での取り込み過程に影響を及ぼす分子特性などを特定することなどが重要となる。

### (エ) 高品質結晶成長（通信情報技術・ライフサイエンス研究への貢献）

均一不純物分布や低欠陥の高品質結晶を得るために、上記の結晶成長条件のほかに、坩堝表面からの欠陥の導入やストリエーション（成長縞）等の発生機構を理解し、制御する必要がある。この際、坩堝や電気炉の温度分布など工学的な観点からの研究を併せて進める必要がある。これら“高品質結晶”的定義には様々な要素が考えられるが、その目指

すべき機能・性能の設定については、通信情報技術からの要求や製品への応用を考慮する必要がある。

溶液成長に関しては、上記の研究要素を体系的にまとめ、高品質な結晶を得るための最適な条件を決定する。その際、結晶のモザイク化の防止や結合力の小さい壊れやすい結晶のハンドリング方法など結晶工学的な研究を含めて研究を行う必要がある。

蛋白質結晶成長については、これらの体系化の結果が地上の一般的な蛋白質結晶構造解析さらにはポストゲノム時代のライフサイエンス研究の発展に寄与できるよう考慮する必要がある。

## (2) 過冷凝固と準安定相研究

### (ア) 拡散係数、粘性係数、比熱、密度、表面張力などの熱物性測定

過冷却からの凝固プロセスの理解には、材料融液の正確な熱物性を知る必要がある。特に核発生の理解には拡散係数や表面張力・界面張力の実験値が不可欠である。しかしながら、過冷却状態の物性の実験は困難であるため、我が国においては研究の機会が限られており、測定法の確立を含めて早急に研究体制を整える必要がある。また対流の影響を評価するためには密度・粘性が必要であり、また浮遊炉実験を効率よく行うためには、材料融液の輻射率や電気抵抗、誘電率、磁化率などの電子的な物性の測定も必要となる。

### (イ) 流体シミュレーション

浮遊液滴の動力学的な解析は、液滴の振動からの減衰測定による粘性係数の測定、回転による変形及びこれを用いた表面張力の計測、回転による変形モードについて良く理論との一致を見ており、ほとんど確立されている。しかしながら、表面の温度・濃度分布に基づくマランゴニ対流や、核発生による液滴中の密度差対流についての研究はほとんど行われていない。従って、核発生プロセスにおける流体挙動を予測するための流体シミュレーションを確立する必要がある。また表面電荷の不均一による特殊な対流も考慮すべきであろう。

### (ウ) 液体構造の理解

核発生プロセスや準安定相の生成は、融液構造における短距離秩序と密接に関連している。従って液体状態での原子サイズ領域における3次元的構造を理解する必要がある。これらの研究には高エネルギーX線や中性子などの放射光利用を含めた散乱実験・解析の導入が不可欠である。上記の実験手法は、微小重力環境利用における技術開発項目には直接関連のない分野であるが、当該分野の研究者と積極的な交流を推進する体制を整える必要がある。

### (エ) 核発生のモデル化

従来の理論では、核発生は主に過冷却度に依存した臨界核半径と界面自由エネルギーが関連づけられている。しかしながら、核発生の先駆現象としてのエンブリオの発生消滅には原子拡散とゆらぎが関連しており、これらを考慮した新規モデルの構築が必要であろう。自由界面を有する融体の過冷却には温度差或いは濃度差マランゴニ対流の発生が避けられない。地上においては、振動誘起核発生の現象が観察されているが、これは坩堝壁によって不均一核発生(不純物或いは坩堝との反応生成物の融体への巻き込み)が生じることと理解できるが、自由界面において流れ或いは振動下での核発生は未だ明らかではなく、核発生理論の理解に寄与することが期待され、今後の大きな課題である。

### (オ) 热力学的・量子力学的解析による準安定相の予測

金属・合金の状態図は正則溶液などの簡単なモデルにはじまる熱力学モデルにより予測することができる。近年では、熱力学モデルとともに、量子力学計算に基づく金属・合金を構成する原子の電子構造に基づく結合エネルギーや結合の方向の予測が始まられている。準安定相出現の有無をこれらの手法を用いて予測することは、研究の効率化のために重要であると考えられる。

### (カ) 準安定相物質の製造（ナノテクノロジー・材料への貢献）

上記課題の研究成果を総合的に利用し、新規の準安定相の製造を試みることは工業、基礎研究両面において極めて意義深いものがある。金属・半導体材料に関しては、欧米で電磁浮遊炉を用いた研究が先行していることから、我が国では静電浮遊炉を利用したセラミックス等の電気絶縁性材料などの研究を進めることによって独自の研究成果を上げることが期待できる。

さらに、過冷凝固を利用したナノレベルでの組織制御の可能性が考えられることから、最新のナノテクノロジーの成果を取り入れながら研究計画を立案することが望ましい。

## 6.3 研究シナリオに基づく実験装置、実験技術

研究シナリオを構成する要素的な研究領域の研究を進める上で、地上実験または微小重力実験に必要となる実験装置及び実験技術を整理する。

### 6.3.1 溶液・融液からの結晶成長に関連した実験装置及び実験技術

#### (1) 热物性の高精度測定

拡散係数測定（ソーレ係数を含む）には比較的長時間の擾乱の少ない微小重力環境が必須である。従って、均熱炉もしくは多重加熱ゾーンの多目的炉が今後のJEM実験装置として必要である。研究のターゲットとなるであろう多元系の半導体やセラミックスなどの拡散係数の温度依存性を明らかとするためには、2000以上の中熱炉が望ましい。また化合物半導体材料は一般に蒸気圧が高いため、高蒸気圧（～5気圧程度）に対応したシアセルを開発する必要がある。

拡散係数は実験条件を設定するまでの必須のパラメータであることから、微小重力実験に先立って正確な数値を得る必要がある。小型ロケットやJEMへの他の装置の輸送に便乗するような短期の実験手段や透明な試料における干渉計或いは放射性同位元素やX線散乱を指標としたその場観察的な拡散係数測定技術開発が必要である。その場観察的な手法による拡散拳動計測には、屈折率の温度及び濃度依存性等の実験解析のための基礎のデータの蓄積が必須となる。

電気炉利用における温度計測に関しては、これまで微小重力実験では多くの場合カートリッジの外側で温度計測を行ってきた。より高精度な測定を行うために、坩堝あるいは実験試料に直接接触する方法が今後必要である。

熱伝導係数はレーザフラッシュ法などを利用することで比較的短時間の実験が可能であり、微小重力環境を利用する場合でも落下塔、航空機の利用が適当であろう。表面張力、粘性、密度については重力の影響は大きくないと考えられ、地上においてある程度の精度での取得は可能である。しかし、高融点や高反応性のために適当な坩堝材料が無いような物質の場合に、精度良く熱物性値を求めるためには浮遊炉の利用が効果的であろう。

濡れ性の評価は重要である。このため、使用が想定される坩堝材との実験想定温度での濡れ性を地上研究として計測する必要がある。また坩堝から溶出する不純物が試料に与える影響についても地上実験で検討する必要がある。

蛋白質の結晶育成にあたっては相図の作成が非常に重要であり、蛋白質濃度、沈殿剤濃度、塩濃度、pH、温度、圧力などの関数として状態図が作成されるべきである。また、過飽和度の算出に不可欠の溶解度測定は従来長時間を要し、また曖昧さを含むものであったが、光干渉法を利用することによって、高精度かつ短時間に測定が可能となった。本手法を用いて広範囲の溶解度データ、相図作成を試みることは非常に意義が高い。

結晶成長速度計測、その際の結晶成長界面における濃度場・温度場の同時計測は、結晶成長の過飽和度依存性を求めるために不可欠のデータである。これらの高精度計測を行うためには対流の影響を極力排除することが必要であり、また長時間の観察時間を必要とするためにJEMなどの長時間微小重力環境が必要となる。

#### (ア) 実験項目と実験手段等

実験項目	実験手段等
拡散係数	一部小型ロケットでのデータ取得は可能であるが、拡散係数の小さな材料の高精度計測には軌道上実験が必須である。
熱伝導率	地上で測定可能であるが、高精度の実験には落下塔などの短時間微小重力実験が有効である。坩堝を使用できない高温高活性材料に対しては浮遊炉による計測が必要である。
比熱	地上で測定可能であるが、坩堝を使用できないような高温高活性材料に対しては浮遊炉による測定が必要である。
表面張力	地上で測定可能であるが、坩堝を使用できないような高温高活性材料に対しては浮遊炉による測定が必要である。
粘性係数	地上で測定可能であるが、坩堝を使用できないような高温高活性材料に対しては浮遊炉による測定が必要である。
濡れ性	地上で測定可能である。
密度	地上で測定可能であるが、坩堝を使用できないような高温高活性材料に対しては浮遊炉による測定が必要である。
電気抵抗	地上で測定可能であるが、坩堝や電極を使用できないような高温高活性材料に対しては浮遊炉による測定が必要である。
輻射率	地上で測定可能である。
拡散係数(ソーレ効果を含む)	高精度の測定には、軌道上での微小重力環境が必要。
溶解度	地上でも測定可能であるが、高精度測定のためには微小重力環境が必要。

#### (イ) 実験技術開発

技術開発項目	内容等
その場観察による拡散係数測定技術	放射性同位元素やX線散乱強度測定を用いて、拡散中の試料の濃度を計測する。
高蒸気圧シアーセル技術の開発	化合物半導体では、砒素など蒸気圧が高い元素を含むものがあり、このため高蒸気圧下においても、高精度に拡散係数を測定できるシアーセルが必要。
無容器処理による熱物性測定技術	坩堝を使用できないような物質に対する熱物性測定技術の確立が必要。

#### (ウ) 次期実験装置候補

熱物性計測で必須なものとしては、拡散係数があり、2000程度が得られる均熱炉が必要。

- ・均熱炉

最高温度：2000程度

温度安定性： $\pm 0.1$ 以下

#### (2) 流体シミュレーション及び結晶成長と流れの解析

結晶成長に伴う流体シミュレーションは、温度勾配、凝固速度と結晶成長界面における濃度分布、界面の形状、残留重力及び $g$ ジッタによる濃度分布の乱れ、ソーレ効果による濃度分布等の視点から界面の異方性を考慮した安定成長のための最適結晶成長条件を見いだす必要がある。今後のシミュレーションの方向性は、界面異方性を考慮した3次元解析であり、実験とモデルとの比較のためのモデル実験として可視光透明な模擬材料を使用した微小重力実験が有効となるであろう。そのためには、その場観察のための多波長干渉計による濃度場・温度場同時計測と、流れ場の理解のためのトレーサ追尾やPTV等の計測を同時にできるようなJEMの実験装置が必要である。

#### (ア) 実験項目と実験手段等

実験項目	実験手段等
液相中の濃度場・温度場(3次元場の精密測定)と結晶成長挙動(結晶成長界面形状、成長速度)	複数の方向からの多波長干渉縞観察による3次元的な温度場・濃度場の測定実験。界面形状及び成長速度の計測。地上研究による解析技術の蓄積とともに小型ロケットなどの短時間微小重力実験による検証が必要。
流れと結晶成長	計算機シミュレーションの高精度化と従来の流れ場観察技術及び干渉縞観察技術を組み合わせた実験を行う必要がある。地上における技術開発研究と比較的長時間の微小重力実験を組み合わせることが必要。
残留重力及び $g$ ジッタ計測	残留重力による結晶周辺の濃度場及び温度場の擾乱を正確に測定するためには軌道実験が必要であり、また微小な重力の計測技術の確立が必要。実験技術の検証には任意の微小な $g$ を発生できるスペースシャトル実験が有効であろう。

#### (イ) 実験技術開発

技術開発項目	内容等
残留重力センサ	信頼性を持って $10^{-6} g$ 以下の定常 $g$ を測定できるセンサは限定されている。欧米との国際協力を視野に入れる必要がある。
流速挙動の3次元超音波計測	現状では、一次元観察となっているため、任意の位置の流速を計測できるような自由度を持った計測方法が望ましい。

微粒子追尾技術及び流速、流れ場解析技術	トレーサ粒子が結晶周辺の濃度場及び温度場に与える影響について明らかにし、擾乱を極力与えないトレーサの開発が必要である。また実験データ解析の高速化（ソフトウェア及びハードウェア的な開発）が必要。
3次元拡散場解析技術	結晶成長に伴う溶液中の拡散場を3次元的に観察する。

#### （ウ） 次期実験装置候補

- ・ 流れ場結晶成長観察実験装置  
液相中の濃度場・温度場(3次元場の精密測定)と結晶成長挙動(結晶成長界面形状、成長速度)の観察  
流れと結晶成長観察  
半導体試料における赤外線による界面形状観察
- ・ 定常重力測定装置、gジッタ測定装置

#### （3） 結晶成長のモデル化

結晶成長は、界面遠方からの物質輸送と界面での物質の取り込みによる。特に、界面での物質の取り込みについては、理解が不十分である。このためには、界面近傍での濃度勾配、凝固速度に関連する濃度勾配、界面形状、残留重力及びgジッタ等に関する理解のための実験が必要である。結晶成長界面の安定性の直接観察にはX線や赤外線による直接透過観察あるいは間接的な観察には、欧米の実験装置で開発されているようにゼーベック電位の測定や電気抵抗の測定による観察が必要である。凝固界面近傍の融液中の組成分布と残留重力やgジッタの寄与を実験的に決めるために温度勾配炉による一方向凝固とシアーセルを組み合わせた微小実験が有効であろう。

可視光を透過するような物質の溶液成長における界面の安定性の観察には、実体の顕微鏡観察や干渉計による観察が有効である。蛋白質などの結晶成長を理解するために結晶表面近傍の分子配向や表面拡散の測定手法を開発する必要がある。また、結晶周辺の濃度場を破壊するが、原子間力顕微鏡による結晶表面の原子の観察は有望な観察手段である。これらの観察の汎用的な実験装置の構成は困難であることから、実験毎に研究者が観察手段を準備するような装置構成が適当であろう。

#### （ア） 実験項目と実験手段等

実験項目	実験手段等
液相中の濃度場・温度場と結晶成長挙動(3次元場の精密測定)	複数の干渉顕微鏡による濃度場及び温度場の3次元観察と複数方向からの高画質ビデオカメラによる実体観察。長時間の微小重力実験が必要。
結晶成長速度の精密測定	結晶のファセット面等の成長速度の精密測定。原子間力顕微鏡や位相シフト法によるその場観察。
残留重力及びgジッタ計測	残留重力による結晶周辺の濃度場及び温度場の擾乱を正確に測定するためには軌道上実験が必要であり、また微小な重力の計測技術の確立が必要。実験技術の検証には任意の微小なgを発生できるスペースシャトル実験が有効であろう。

凝固界面形状のその場観察	X線透過画像やゼーベック電位計測・電気抵抗計測による金属・半導体材料の凝固界面及び凝固速度のその場観察。半導体材料における赤外線による凝固界面形状観察。 欧米において技術の開発が進んでおり、国際協力を考慮する必要がある。結晶面に依存した成長速度の差と結晶成長条件を明らかにする。長時間の微小重力実験を必要とする。
凝固界面近傍の濃度場計測	温度勾配型シアーセルによる濃度場計測、技術の確立及び検証は地上研究や小型ロケットなど短時間微小重力を利用し、本格的な実験にはJEMを利用する。

#### (イ) 実験技術開発

技術開発項目	内容等
残留重力センサ	信頼性を持って $10^{-6} g$ 以下の定常 $g$ を測定できるセンサは限定されている。欧米との国際協力を考慮に入れる必要がある。
高解像度X線イメージング	金属・半導体の凝固界面を高精度に観察するために、高出力のX線源を用いた高解像度のX線イメージングが必要である。試料を複数方向から観察できるような観察系の回転機構を有することが望ましい。
温度勾配型シアーセル	一方向凝固中に試料の分割ができるようなシアーセルを開発し、一方向凝固界面近傍の濃度場を測定する。
ゼーベック電位・電気抵抗計測	金属・半導体の微弱な電位の計測技術
種結晶の導入技術	JEMのような長時間の実験のための種結晶導入技術を開発する。
結晶表面の微視的観察	原子間力顕微鏡、位相シフト干渉計の高精度化

#### (ウ) 次期実験装置候補

- ・ 結晶成長観察装置  
3次元的に温度場・濃度場を観察できる  
原子間力顕微鏡による成長界面観察
- ・ 温度勾配炉  
界面形状観察機構  
ゼーベック電位による凝固速度測定機構

#### (4) 高品質結晶成長

高品質（均一濃度分布や低欠陥）結晶を得るために、融体試料内部にその物性に依存した温度分布を設定できることが必要である。また、結晶成長界面の形状安定性の観点からは高温度勾配が必要となる。成長界面での温度安定性は均一濃度分布半導体の製造にとって重要であることから、高精度の安定性が必要となる。残留重力或いはgジッタによる融液の流れを極小化するために、磁場の利用は有効であろう。さらに応用性の高い研究を担保するとの観点からは、2～3インチ程度の大口径化が可能な一方向凝固が必要である。

蛋白質の高品質結晶を成長させるための実験装置としては、結晶成長条件（特に過飽和度）を任意に制御できるような実験装置が必要である。パラメータ制御の容易さ・精度、試料の気密性、試料サイズ、観察機能の付加などを考慮して、主として温度差法を採用する。温度差法の利用にあたっては各セル独自に温度コントロールが可能であり、自由な温度プロファイルを設定できること、均熱性に優れること、光学観察軸を持つことなどが要求される。また、シーディングが可能な構造を有することが望ましい。

干渉計による濃度場・温度場観察結果をフィードバックし、常に最適な結晶育成条件が達成されるようなシステムを構築することが必要である。

電場や磁場などを利用した積極的な流体制御や輸送の制御も今後の実験技術課題であると考えられる。

育成結晶の長期保存方法を開発するとともに、壊れやすく地上へ持ち帰ることが困難な試料に関しては、微小重力環境下での構造解析も視野に入れる必要がある。

#### (ア) 実験項目と実験手段等

実験項目	実験手段等
高精度結晶成長実験	結晶界面近傍の温度勾配や融液の温度場を高精度に制御し、結晶成長実験を行う。gジッタや残留重力の影響を極力小さくするために磁場や電場を試料に印加する。また結晶成長のリアルタイム評価のためゼーベック電位計測など擾乱の少ない評価法を利用する。
能動的環境場制御結晶成長実験	生体高分子の結晶成長において、干渉計による濃度場・温度場計測の結果をリアルタイムで温度制御・圧力制御にフィードバックさせ最適な条件で結晶成長を行う。

#### (イ) 実験技術開発

技術開発項目	内容等
ゼーベック電位・電気抵抗計測	金属・半導体の微弱な電位の計測技術
温度場精密制御	セラミックヒータによる局所的な加熱を利用した温度場制御など
能動的育成条件制御	干渉顕微鏡による温度場・濃度場観察と実験系の温度制御を連動させ、結晶成長に最適な育成条件を達成する。
電磁場による流体制御	磁場や電場により金属・半導体融液内の対流を抑制する。電磁流体力学的なシミュレーション技術が併せて必要。

#### (ウ) 次期実験装置候補の機能

- ・ 温度勾配炉

温度安定性：0.1 以下

磁場・電場による流れの極小化機能

残留重力の方向制御

- ・ 生体高分子単結晶作製装置

濃度場・温度場自動計測

制御パラメータ（温度・圧力）の自動設定（濃度場・温度からのフィードバック）

## 6.3.2 過冷凝固と準安定相研究

### (1) 热物性

過冷却状態からの凝固現象を解明するには相転移温度、比熱、粘性係数及び自由エネルギー等の系の熱的な状態変化を記述する熱物性値の取得は必要不可欠である。

液体中の原子拡散係数については、すでに記述されている。比熱や自由エネルギーは、高精度の熱量計等を使用し高温域( ~1500 )での測定は一般的に行われているが、工業上重要である酸化物や金属間化合物など超高温領域に溶融点を持つ物質において高精度の計測を行うには浮遊炉が非常に効果的である。このためには、高周波数を持つ放射温度計と放射率計測が必要である。また過冷却状態の液滴に物理的な“刺激”を与えて、積極的に凝固させ、核発生現象に関する研究を進めることも必要である。

### (ア) 実験項目と実験手段等

実験項目	実験手段等
熱伝導率	地上で測定可能であるが、高精度の実験には落下塔などの短時間微小重力実験が有効である。坩堝を使用できない高温高活性材料や大きな過冷却状態の試料に対しては浮遊炉による計測が可能である。
比熱	地上で測定可能であるが、坩堝を使用できないような高温高活性材料や大きな過冷却状態の試料に対しては浮遊炉による測定が可能である。
表面張力	地上で測定可能であるが、坩堝を使用できないような高温高活性材料や大きな過冷却状態の試料に対しては浮遊炉による測定が可能である。
粘性係数	地上で測定可能であるが、坩堝を使用できないような高温高活性材料や大きな過冷却状態の試料に対しては浮遊炉による測定が可能である。
濡れ性	地上で測定可能である。
密度	地上で測定可能であるが、坩堝を使用できないような高温高活性材料や大きな過冷却状態の試料に対しては浮遊炉による測定が可能である。
電気抵抗	地上で測定可能であるが、坩堝や電極を使用できないような高温高活性材料や大きな過冷却状態の材料に対しては浮遊炉による測定が可能である。
輻射率	地上で測定可能である。
拡散係数(ソーレ効果を含む)	高精度な測定には、軌道上での微小重力環境( 小型ロケットを含む )が必要。

## (イ) 実験技術開発

技術開発項目	内容等
非接触温度測定技術	試料の特定波長の輻射率の変化から試料温度を測定する。温度測定サイクルの高速化（現状30 Hz）を図るとともに複数の波長の同時計測を行い、温度測定精度を向上させる。
搭載用高真空装置( $10^{-9}$ Torr以下)	JEMの真空排気能力に限界があることから、小型のターボ分子ポンプなどの付加的な排気設備を開発する。その際、gジッタの発生を検討する必要がある。
小型放射率測定装置	試料の凝固時の放射率変化を高速測定する。赤外線イメージなどの画像処理とともに、複数の波長の同時計測技術を開発する。
高画質ビデオカメラ	試料形状に基づく密度や粘性などの熱物性計測では精密な画像計測が不可欠である。
試料雰囲気制御技術	酸化物セラミックなどの高温融体の実験では、試料からの蒸発を防ぐために酸素濃度や圧力を制御した試料雰囲気が不可欠である。
シーディング技術	過冷却状態の液滴に針や種結晶を接触させ、核発生させる。
非接触試料溶融技術	非接触で2100を越える試料加熱技術を開発する。特に光学用セラミックスなど通常のレーザ光を透過するような材料の場合には炭酸ガスレーザや電子ビームなどの利用が不可欠である。

## (ウ) 次期実験装置候補

- ・ 浮遊炉
- 電磁場印加装置
- 高速観察装置機能

## (2) 液体構造の理解と核発生のモデル化

局所的領域である原子レベルにおいては、液体の構造には重力の影響はないと考えられる。しかし拡散現象を例とすると、原子の拡散に寄与する原子jump運動等は隣接原子との相互作用に大きく依存していると考えられることから、液体中の原子ダイナミクスを詳細に記述するには、原子の静的・動的な構造の両面について包括的に研究することが重要である。地上における放射線、粒子線散乱装置（X線、中性子散乱実験装置等）を利用し、静的な物性として液体中の光・電子物性に強く影響する原子間相互作用及び組成・濃度の揺らぎといった熱力学的量を反映する中距離相互作用の描像を得ることが必要である。更に、各種非弾性散乱過程から原子の動的挙動についても実験データの充実を図るべきである。

融点近傍及び融点以下の温度領域である過冷却状態の融液構造は、固相と液相の境界領域であり、この領域における原子の動的性質や構造の秩序化過程は物性研究のトピックス的なテーマの一つである。融液からの結晶核発生は不純物、接触刺激に非常に敏感であるから、地上における浮遊炉と中性子散乱を組み合わせることが有効であろう。

### (ア) 実験項目と実験手段等

実験項目	実験手段等
静的短範囲液体構造	浮遊炉を用いた大きな過冷却状態にある試料に対して、各種X線散乱や中性子散乱による液体構造の解明を行う。散乱実験に要する装置の規模が大きいことから、地上研究として国内の関連研究機関との協力体制を構築する必要がある。
静的長距離液体構造	過冷却状態の液体中に発生すると考えられている長距離の揺らぎをX線小角散乱や、光散乱実験で計測する。長距離の揺らぎは重力の影響を受ける可能性があり、将来的には微小重力環境での実験が望ましい。
動的原子拳動	過冷却状態のガラス化点近傍では粘性が指標となることから、原子の運動を直接観察できる中性子非弾性散乱が効果的である。中性子散乱の実験装置の規模が大きいことから、地上研究として、国内の関連研究機関との協力体制を構築する必要がある。

### (イ) 実験技術開発

技術開発項目	内容など
X線散乱実験用簡易型電気炉	X線散乱実験による小規模な構造解析は各研究室で実施可能である。浮遊炉の利用を広げるため簡易型の浮遊炉を開発する。
浮遊炉	中性子散乱測定やX線散乱測定では直径数mm、またはそれ以上の大きさの試料を必要とし、極めて高精度に安定した試料の位置制御が必要である。

### (ウ) 次期実験装置候補

地上研究として実施するためJEMの次期実験装置としては設定しない。

### (3) 熱力学的・量子力学的解析による準安定相の予測

合金系状態図の理論計算による予測には、活量係数などの熱力学的なパラメータやバンド構造などの量子力学的なパラメータが必要である。これらは地上実験による実験データの充実を図るべきである。過冷却状態の各種パラメータについては6.3.2(1)及び(2)等の研究を基に今後展開が図られるべきである。

#### (ア) 実験項目と実験手段等

実験項目	実験手段等
活量係数測定	熱力学的な状態図の予測には活量係数の詳細なデータが不可欠である。高温高活性なセラミックス融体等の活量係数測定方法を地上研究として進める必要がある。過冷却状態の“活量”的測定は今後の課題である。
原子間ポテンシャルや電子状態の把握	融液の微視的な状態は、第一原理的な計算と構造研究、熱物性研究を比較することで推測する。このような研究分野の研究者との積極的な交流を図るべきである。

#### (イ) 実験技術開発

技術開発項目	内容等
高温融体の物性計測技術	高温高活性の物質の物性を計測するための技術を蓄積する。

#### (ウ) 次期実験装置候補

地上研究としての実施が主体となるため、微小重力実験装置は設定しない。

#### (4) 準安定相物質の製造

準安定相の創出には大きな過冷却からの急冷凝固が必要であり、とくにセラミックスなどの非導電性材料実験には、我が国の独自の実験装置である静電浮遊炉が不可欠である。またロール法等の急冷技術による研究と無容器処理である浮遊炉の研究を組み合わせることで、地上では不可能な“急速冷却”を行うことができ、新たな準安定相の創出が期待できる。

#### (ア) 実験項目と実験手段等

実験項目	実験手段等
浮遊試料の急冷凝固	浮遊試料とロール法による急速冷却を組み合わせて、大きな過冷却状態からの急冷を行い、ガラス状態や準安定状態の試料の作成を試みる。地上研究としても新規性の高い研究であり、実験技術の開発研究とともにJEM利用を目指す。

### (イ) 実験技術開発

技術開発項目	内容等
急速加熱冷却技術	浮遊した試料に対して、ロール法などによる急冷やパルスレーザによる局所的な加熱を行う技術を開発する。ロール法などの適用には試料を任意の位置に制御できるような機構が必要である。
試料回収技術	ロール法では粉末状やリボン状の試料が得られる。このような不定形の試料を回収する技術を開発する。

### (ウ) 次期実験装置候補

- ・ 静電浮遊炉

最高温度 2100 以上

真空度  $\sim 10^{-8}$ Torr 以下

高速観察装置：凝固速度 20 m/秒程度を観察可能(数 kHz)

試料直径：20 mm程度

電磁場による試料の回転・振動機能

高周波非接触温度測定：1 kHz 以上

### 6.3.3 次期実験装置の要求機能・性能

これまでの各要素研究領域での検討結果に基づき次期実験装置の機能・性能要求をまとめる。次期実験装置のJEM利用時期の目標は、現在開発中の共通実験装置（第1世代）の設計寿命がおよそ3年程度であることから、2005年以降の利用開始を想定する。

なお、今後の具体的な作業の進め方としては、宇宙開発事業団において機能・性能の詳細化を公募地上研究等の関連する専門家の意見聴取を踏まえて行い、この結果を基に技術的フィジビリティ検討を平成11年度末頃まで実施する。その後微小重力科学専門委員会でその検討結果を基に科学的な要求の実現性を踏まえて次期共通実験装置候補最終案を設定し、宇宙環境利用研究委員会において審議・決定される。

#### (1) 均熱炉

重点研究領域においては、シアーセル技術を併用し、半導体等の材料の拡散係数を高精度に計測し、結晶成長条件設定などに資する。重点研究領域以外でも材料プロセッシングでは汎用的な装置であり、複合材料製造、金属・合金の凝固等広範囲な利用が可能である。

装置名	機能・性能など
均熱炉	X線、放射性同位元素によるリアルタイム計測機能。 最高温度：2000、試料直径：30mm、 均熱域：100mm、温度安定性±0.1以内。 10点の試料直接温度計測。シアーセルモータの回転或いはその他の計測装置（電位差計等）のための電力インターフェースを有する。 なお、ヒータは試料容器を兼ねていることから、温度勾配炉としても利用可能としてもよい。  (参考) 現状のJEM共通実験装置（均熱炉）の仕様 最高温度：1600 温度均一性：±0.2 (40mmL) 温度安定性：±0.4 % 温度計測点：6点

## (2) 流れ場結晶成長観察実験装置

重点研究領域においては、制御された流れ場中の結晶成長挙動を理解するために用いられる。なお、透明液体材料においては、結晶成長観察装置と機能を合体することを技術検討の中で行う事が適当と思われる。

装置名	機能・性能等
流れ場結晶成長観察実験装置	<p>可視光を透過する物質では、流れ場計測と結晶周辺の濃度場及び温度場の観察を行う。実験系の構成により、供試体や観察系が多岐にわたるため、軌道上で観察系を変更できるような自由度を持った装置構成とする。実験に必要な新規の観察系を供試体とともに研究者が準備できるようにし、観察技術開発研究を研究者が行える様にする。</p> <p>また、半導体においては、赤外線により結晶成長界面と流れの関係を観察する。</p> <p>選択可能な観察系</p> <ul style="list-style-type: none"><li>・干渉顕微鏡等の結晶環境場の観察装置（複数方向から観察可）</li><li>・超音波流速計等の流れ場計測計</li><li>・高画質ビデオカメラ</li></ul> <p>（参考）</p> <p>現状のJEM共通実験装置（流体物理実験装置）の観察系</p> <ul style="list-style-type: none"><li>・3次元及び2次元流速観察</li><li>・表面温度分布</li><li>・超音波流速計</li><li>・表面流速計（フォトクロミック）</li></ul> <p>現状のJEM共通実験装置（溶液／蛋白質結晶成長実験装置）の観察系</p> <ul style="list-style-type: none"><li>・振幅変調顕微鏡</li><li>・マッハツエンダーニ波長干渉顕微鏡</li><li>・位相シフト型マイケルソン干渉顕微鏡</li><li>・動的光散乱測定装置</li></ul>

### ( 3 ) 結晶成長観察装置

主として蛋白質結晶成長の観察に用いるが、溶液成長の観察にも利用可能である。第1世代の結晶成長装置に比較して温度場・濃度場を3次元的に観察可能である。

装置名	機能・性能等
結晶成長観察装置	<p>蛋白質結晶周辺の濃度場・温度場の計測データをもとに結晶成長の制御パラメータ（温度・圧力）をリアルタイムで変化させ、最適な結晶成長条件で高品質単結晶を作製する。同時に複数の試料の結晶成長実験を行えることが望ましい。</p> <p>複数方向から干渉計や高画質ビデオカメラによる観察が可能。実験に応じて観察系を変更できるような構成が望ましい。温度制御・圧力制御系や原子間力顕微鏡など新規の実験手段については、供試体の一部として準備し、新規の実験技術を短期間で利用できるようにする。</p> <p>（参考）</p> <p>現状のJEM共通実験装置（溶液 / 蛋白質結晶成長実験装置）の仕様</p> <ul style="list-style-type: none"><li>・振幅変調顕微鏡</li><li>・マッハツエンダーニ波長干渉顕微鏡</li><li>・位相シフト型マイケルソン干渉顕微鏡</li></ul> <p>温度制御（例）：</p> <p>3 ~ 220 (coarse) 20 ~ 70 (fine)</p> <p>温度制御精度：± 1 % (coarse) ± 0.1 (fine)</p> <p>圧力制御：1 ~ 2000 気圧</p> <p>圧力制御精度：± 1 %</p>

#### ( 4 ) 温度勾配炉

磁場印加による残留重力による流れの抑制機能、化合物半導体の結晶成長のための様な高い温度安定性を有する。重点研究領域以外では、共晶複合材料、ソーレ効果、偏晶合金の一方方向凝固或いはオストワルドライブニング等の広範な材料実験に利用可能である。

装置名	機能・性能等
温度勾配炉	<p>1インチ以上の試料作製が可能な温度勾配炉。 温度勾配: 150 / cm以上、凝固速度測定機能、温度勾配一定機能、防震機能、回転磁場・電場による流れの極小化機能。 残留重力の方向に対して、試料の方向を任意に変えられることが望ましい。 最高温度: 1600 高蒸気圧対応: 10気圧程度 温度安定性: ±0.1 以内</p> <p>(参考) 現状のJEM共通実験装置(温度勾配炉)の仕様 加熱温度範囲: 500 ~ 1600 温度勾配: ~150 / cm 試料寸法: 20mm × L150mm 温度計測点: 10点</p>

## ( 5 ) 静電浮遊炉

無容器処理による大過冷の達成から、準安定相研究を行う。重点研究領域以外では、無容器処理のため高純度物質製造に利用できる。

装置名	機能・性能等
浮遊炉	<p>浮遊位置制御させた試料に対して複数の観察装置を選択して使用する。粘性測定や電気抵抗測定のための電磁場印加装置などは供試体として研究テーマ毎に開発を行う。雰囲気制御、高真空、炭酸ガスレーザによるセラミックス試料の溶解が可能である。</p> <p>最高温度2100 以上 ; 雰囲気置換(不活性ガス入 分圧制御) ; 高真圧度(<math>\sim 10^{-8}</math>Torr) ; 試料回転制御機構 ; 冷却ガス入 ; 冷却針 ; ファイバ-引き出し用needle ; 放射率計測 ; 2波長放射温度計</p> <p>(参考) 現状のJEM共通実験装置(静電浮遊炉)の仕様 最高温度 2100 以内 試料直径 10mm 放射温度計 熱画像温度計 ビデオカメラ</p>

## 7. 研究シナリオの具体的な進め方

微小重力科学研究シナリオの具体的な進め方について記す。なお、微小重力物理学分野については、分冊「微小重力物理学研究シナリオ」を参照されたい。

### (1) 研究シナリオの利用方法の考え方

研究シナリオで定義された研究領域には多様な研究テーマが存在すると考えられ、研究者の新たな視点や独創性が重要である。種々の要素レベルの研究における新たな視点が集積した結果、研究シナリオが完備しその体系化が図られることが期待される。宇宙環境利用研究委員会で今後行われる次期共通実験装置候補案の検討に当たっては、本研究シナリオを参考しつつ、シナリオ実現のための研究テーマ群に必要な実験装置候補を明確化して行くことが適当である。

本研究シナリオに含まれていない研究領域については、これに関連する研究を制約するものではないが、4章に記載した「分野の方向性」を参照してこれらの研究が進められることを期待する。一方、本研究シナリオで定義された研究領域を重点的に進めるためには、当該領域とそれ以外の研究領域（公募地上研究、国際公募、JEM利用募集の採択研究、技術開発ミッション）に対する実験機会等のリソース配分（採択数を例えば7：3にするなど）を行うことで、我が国としての重点化の考え方を担保することが適当である。

尚、今後、公募地上研究の中から新たに独創的な研究成果の獲得が期待できるテーマが発掘された場合には、これを取り込んで研究シナリオの充実を図って行くことが必要である。また、研究シナリオに含まれていない研究領域についても、体系化が公募地上研究等から期待できる場合には、研究シナリオへの組み込みの検討が必要になる。

### (2) 微小重力科学研究の進め方

#### (2-1) 公募地上研究における重点研究領域の進め方

公募地上研究における重点研究領域の設定については、公募地上研究の研究推進委員会において決定されるものであるが、本微小重力科学専門委員会としては以下のことを提案したい。

ア) 公募に当たっては、「各分野の方向性」及び「重点研究領域」の説明を募集案内に明示し、また、選定数に対して重点配分を行う事を明示する。但し、最終配分は、実際の提案領域の分布を基に、微小重力科学専門パネルにて決定して研究推進委員会の了承を得る。微小重力科学専門パネルでは、これまでの採択研究の内容を考慮し、有機的連続性（研究目的、実験手法、試料、予想される成果等）及び期待される成果の体系化に配慮した選定を行い、効率的な成果の達成を図ることが重要である。尚、選定に当たっては、過去の宇宙実験成果についても考慮することが必要になる。

研究公募テーマについては、基本的に国際宇宙ステーション利用実験へと発展させるため、国際公募等フライト実験機会への提案を念頭に置いた研究が行われる必要がある。従って、選定に当たっては、微小重力利用の必要性について十分な評価を行うとともに、我が国を含む各宇宙機関の装置開発計画との整合性を考慮する必要がある。

イ) 公募地上研究で要素研究を継続テーマとして実施している研究者に対しては、研究シナリオの体系化の視点から調整を行い、研究シナリオへの組み込みなど、研究の体系化を図る努力が重要である。

## (2-2) 国際公募における重点研究領域の進め方

国際公募における重点研究領域の設定の考え方について述べる。

ア) 国際公募の実施に当たっては、日本の微小重力科学研究プログラム（重点研究課題）の記述を公募書類に含めることが想定される。このため、我が国の重点研究課題については、その実施のために、あらかじめリソース配分を確保する旨を募集案内に記述する。国際公募の選定に当たっては、我が国の微小重力科学研究プログラムとの整合性が必要になり、その際に、重点課題に関連する提案に対して採択数の重点配分を行う。

イ) 選定に当たっては、期待される成果の有機的な連続性にも配慮する必要がある。特に、他国の提案にも配慮し、期待される成果も関連させた連続性（研究目的、実験手法、試料、予想される成果等）及び体系化の視点から選定を行うことが重要である。

## (2-3) 宇宙実験提案の立案における考え方

宇宙ステーションやスペースシャトル等の長時間微小重力を利用した微小重力実験計画の立案においては、実験機会が限られること、宇宙実験の実施に多くの費用が必要となること等から、実験の有効性について充分な見通しが得られることが必要となる。このため、地上での予備実験の結果や数値シミュレーションの結果を基に充分な予備検討を行い、理論モデルを構築する事が重要となる。理論モデル検証の際には、測定誤差も検証の成否を左右する重要な要因となるため、使用する実験装置の情報について、開発機関はテーマ提案者に判りやすい情報提供を行い、テーマ提案者もこれを積極的に取り込む必要がある。

## (4) 共通実験装置の利用

実験装置は、本来、研究目的に適合するように開発されるべきである。しかし、宇宙用の実験装置開発には地上装置の開発に比べて巨額な資金投下が必要なことから、研究目的毎の実験装置開発にはその研究が資金投下に見合う科学的価値を有することのコンセンサスが必要である。しかし、現状では科学的価値を資金に換算する明確な基準が無い。このため、このような価値基準に係る議論がなされ、それが明確になるまでの間は、共通的に利用可能な実験装置（共通実験装置）の利用を進めることが適当と考える。このよ

うな共通実験装置においては、可能な限り広い研究領域をカバーするとの視点が基本であり、実験目的に合わせた試料容器の開発によって実験目的との適合を図れるような設計（本体部と実験部の分離による多目的化・多機能化）とすることが重要である。なお、簡易な実験装置（少額の費用で開発可能な装置）であれば個々の研究目的に応じて開発することは可能であると思われることから、実施方法の検討を進める必要がある。また、一定の目的が達成された共通実験装置については、特定の実験テーマに対応するように改修する等の方策についても検討する必要がある。

### （5）次期共通実験装置の候補

次期共通実験装置候補は、重点研究領域の研究テーマ群を効果的に実施できるものと定義する。これまでの共通実験装置の開発は、特定の研究課題との対応付けなしに行われてきたため機能・性能の設定が広範となり、特色ある装置となっていないとの指摘もある。従って、次期共通実験装置の開発に当たっては、あらかじめ各装置の研究課題を設定し、その研究に必要な機能・性能を中心にして仕様のエンベロープを拡大し、共通実験装置としての機能・性能を確定していくという方法が望まれる。

また、宇宙環境利用研究システムで行う課題研究が重点研究領域に該当する場合には、これを次期共通実験装置の研究課題とすることが、宇宙環境利用研究システムの位置づけ、宇宙環境利用研究センタ - のこれまでの人的リソース、科学技術的知見の活用、効率的な装置開発等の点から有効である。尚、実施に当たっては、公募地上研究のフェーズ2研究者との協力や意見交換が重要である。

一方、重点研究領域を宇宙環境利用研究システムにおいて実施していない場合には、公募地上研究等における研究提案の募集・選定などの方策により、装置開発に最適な研究機関を設定し、当該機関・研究者と宇宙環境利用研究センタ -との協力連携の下に装置開発を進めることが適当である。

### （6）微小重力科学研究の質的向上

F M P T、I M L、小型ロケット実験などこれまでの我が国の微小重力実験計画では、宇宙実験の経験の蓄積を図るとの観点から、限定された実験リソースの中で数多くの実験テーマの実施等、量的拡大が強調されてきた。この事は、限られた実験回数で多種多様な試料や種々の実験条件を扱うことに繋がり、このため個々の結果の信頼性よりもむしろ多種多様な結果の取得に力点が置かれてきた。この様な経験を通じて、これまでに微小重力利用として有効な研究領域などの知識の集積が図られてきたが、現在の宇宙実験結果の状況を踏まえ、今後の微小重力科学の方向性としては、地上研究成果と比較して十分引けを取らない信頼性の高い実験結果の取得など、質的な向上が望まれる。具体的には、実験計画の立案に当たり地上実験を含めた充分な準備はもとより、実験結果に対する精度、信頼性の向上の検討に重点を置く計画立案が必要である。特に拡散係数などの熱物性値の測定に当たっては、データの確度の向上及び誤差に関する因子の排除を事前に十分検討することが必要であり、例えば電気炉などの温度分布を考慮し、質の高いデータを取得するため多数のサンプルを用いた実験よりは少数であっても精度良い測定結果の取得を目指す事

が今後の方向である。

### (7) 微小重力研究成果の公表

これまでの微小重力実験成果の発表はどちらかと言えば微小重力関連の学会に重点が置かれ、その研究が本来属する学会への発表は少なかった傾向にあると言える。微小重力実験の成果が地上の研究へインパクトを与えるには、得られた成果について科学的目的に関連する多くの学会において他の地上研究と並び評価されることが必要である。このため微小重力研究の成果について、国際的な学術雑誌への投稿及び地上研究関連学会への積極的な発表等が今後の方向である。この様な努力を通じて、微小重力がツールとして有効であることの認知及び新たな研究目的からの利用の拡大が期待される。

また、微小重力実験において技術的な問題に起因するものも含め科学的な目的を達成出来なかった研究についても、実験目的を達成できなかった原因を十分に解析し学会発表などを通じて公表することは、微小重力利用の高度化の観点から必要である。特に、微小重力科学に関連する学会においては、微小重力利用に興味ある研究者のコミュニティであるため、このような結果の公表は今後の実験計画に反映されるばかりでなく、それらの蓄積を通じて微小重力の有効性についての体系的な整理が可能となり、今後の微小重力科学の高度化に貢献できると考えられる。

### (8) 蛋白質結晶成長研究の公募について

微小重力実験を通じて高品質蛋白質を得て構造解析を行い、新薬品の開発、生命現象の解明などに資する研究が、これまで主体的に行われてきた。しかしながら、微小重力利用における高品質蛋白質結晶成長は試行錯誤の段階に止まり、微小重力利用がどの様な蛋白質結晶に有効であるかの体系的な知識は存在しないのが現状であり、これを明確にするためには蛋白質結晶成長メカニズムの解明を優先的に行う必要がある。このため、蛋白質結晶成長テーマの公募に当たっては、結晶成長メカニズムの解明を主として行うことが適当である。なお、構造解析を目指すテーマについては、取り扱う材料自体の意義について多種多様な価値観が存在することから、その価値を一義的に判断することが困難である。新薬開発を目的とする研究に関してはその価値が実用化との観点から比較的明白であり、このため、応用化研究プログラムで行われることが適当である。また、生命現象あるいは触媒機能等の解明を目的とする研究については、公募に当たり蛋白質の機能別重点対象を設定して募集する、或いは結晶成長メカニズム解明のためのリファレンス試料として募集する等、視点を明確にして行われることが適当である。

### (9) フライト提案のための情報提供（学会の活用）

国際公募などフライト提案に当たっては、実験内容そのものだけでなく、実験コンフィギュレーションにおける対流の評価など研究目的の達成に必要な知識を持つ専門家を集めてサイエンスチームを結成し、多面的な検討を行う必要がある。また、公募地上研究などの新規のフライト提案者にとっては、微小重力実験経験者から微小重力実験計画立案の際に考慮すべき点などの情報を受ける場が必要である。我が国の宇宙実験に関しては、微小重力関連学会に参加している多分野の専門家により多様な経験と知識が集積されてい

るので、当該学会の活動を通じて、研究者相互の情報交換・情報提供を進めることが望ましい。

#### (10) 研究コミュニティの構築について

微小重力科学分野における研究者間の情報交換を同一分野内のコミュニティで行うだけでなく、他分野との交流も視点に入れた研究コミュニティの構築が必要である。同一分野内での交流は、研究の質的向上を促すために役立つ。また他分野との交流では、他分野の研究手法を取り込み自分分野の研究に役立てると共に、自らの研究手法を他分野に展開し新たなテーマの構築を促し、他分野の活性化に貢献できる可能性がある。この様なコミュニティ構築の際、微小重力科学全体をカバーする学会は大きな役割を果たすと思われ、今後はそのような学会と協調して活動を進めてゆくことが、日本の微小重力科学研究の向上に必要である。

#### (11) 小型ロケット実験機会の確保

日本の微小重力環境利用研究の質的向上のため、国際公募とは別の日本独自の実験機会が必要である。TR-1Aロケット実験は微小重力実験技術の向上と、微小重力科学分野における科学的成果の創出及び優秀な微小重力関連研究者、技術者の育成に多大な貢献を果たしたが、予算的制約から7号機で終了した。小型ロケット実験手段は、宇宙ステーション時代に於いても、宇宙ステーション実験の予備実験手段としてのみならず、それ自身で十分に科学的成果の創出が可能な我が国独自の実験手段であり、この機会を確保することは、我が国の微小重力科学の質的向上に不可欠である。

#### (12) 研究者が主体となった供試体開発

わが国の宇宙実験は、これまで宇宙機関による技術開発を中心として進められてきた。国際公募への参加は、優れた科学的成果の創出を目的とすることへの移行である。これまで供試体開発は宇宙機関が主体となって進めてきたが、供試体開発は科学的目的に最適化することが最も重要であることから、今後は研究者が主体となって進めることができることの達成のためには適切である。供試体開発は多くの試行錯誤的作業を伴うことから、予算膨張の一因ともなってきた。これを研究者主体で行なうことにより最適化への試行錯誤を効率的に実施することができ、予算低減も可能となると期待出来る。

また、供試体開発にあたり、安全性等の供試体設計に係る情報を適宜・的確に研究者に提供することが重要である。

## 付録 1

### 微小重力科学専門委員会構成員

氏名	現職	任期
澤岡 昭	大同工業大学 学長 先導的応用化研究 研究統括リーダー	平成10年1月～ 平成11年3月 (前専門委員長)
竹内 伸	東京理科大学 基礎工学部 材料工学科 教授 (宇宙環境利用研究委員会委員、専門委員長)	平成10年1月～ 現在
東 久雄	大阪府立大学 工学部 航空宇宙工学科 教授 (宇宙環境利用研究委員会専門委員)	平成10年1月～ 現在
朽津耕三	城西大学 理学部 教授 (宇宙環境利用研究委員会委員、専門委員)	平成10年1月～ 現在
栗林一彦	宇宙科学研究所 宇宙基地利用研究センター長 (宇宙環境利用研究委員会専門委員)	平成10年1月～ 現在
京極好正	産業技術総合研究所 生物情報解析研究センター長 (宇宙環境利用研究委員会委員、専門委員)	平成11年4月～ 現在
鈴木増雄	東京理科大学 理学部第一部 応用物理学 教授 (宇宙環境利用研究委員会専門委員)	平成13年4月～ 現在
依田真一	宇宙開発事業団 宇宙環境利用研究システム 主任研究員	平成10年1月～ 現在