

2020 年までの物質・物理科学分野の ISS/きぼう利用シナリオ

平成 24(2012)年 3 月

国際宇宙ステーション・きぼう利用推進委員会  
物質科学分野研究シナリオ WG

## 目次

|   |    |
|---|----|
| 1. 基本的な考え方 .....                                    | 1  |
| 1.1. 物質・物理科学分野の研究シナリオの目的 .....                      | 1  |
| 1.2. 宇宙環境を利用した物質・物理科学研究の重点領域 .....                  | 2  |
| 2. 物質・物理科学分野における宇宙実験の現状・実績、方向性 .....                | 4  |
| 2.1 これまでのシナリオの総括と第2期利用までの目標 .....                   | 4  |
| 2.2 国内外の宇宙実験の実施状況、動向 .....                          | 6  |
| 2.2.1 流体科学の分野 .....                                 | 6  |
| 2.2.2 燃焼科学の分野 .....                                 | 8  |
| 2.2.3 結晶成長を中心とした物質・材料科学分野 .....                     | 10 |
| 2.2.4 基礎科学の分野 .....                                 | 13 |
| 2.2.5 応用利用研究制度における物質・材料の宇宙実験 .....                  | 16 |
| 3. 物質・物理科学分野が目指すべき方向性と研究課題 .....                    | 19 |
| 3.1 重点領域(長期的課題) .....                               | 20 |
| 3.1.1 重点領域1:「環境負荷低減のための新規燃焼システムに貢献する燃焼素過程の科学」 ..... | 20 |
| 3.1.2 重点領域2:「気泡・液滴・液膜の科学と制御—宇宙システムへの展開—」 .....      | 23 |
| 3.2 重点領域(短期的課題) .....                               | 26 |
| 3.2.1 重点領域3:「無容器大過冷却状態からの新規物質創成」 .....              | 26 |
| 3.2.2 重点領域4:「宇宙環境を利用した社会に有益なソフトマターの探索」 .....        | 29 |
| 3.3 重点領域(宇宙活動のための基盤的な研究開発) .....                    | 33 |
| 3.3.1 重点領域5:「宇宙火災安全の国際基準設定—有人活動の安全基盤構築—」 .....      | 33 |
| 3.4 重点領域(国際協力による長期的課題) .....                        | 35 |
| 3.4.1 重点領域6:「極限環境・プラズマ環境における平衡・非平衡現象」 .....         | 35 |
| 4. 重点領域の研究推進の方策について .....                           | 41 |
| 4.1 重点課題の選定について .....                               | 41 |
| 4.2 重点課題に選定における留意事項 .....                           | 41 |
| 4.3 評価システム .....                                    | 41 |
| 4.4 実験支援技術および研究プロジェクトチームに対する留意事項 .....              | 41 |
| 4.5 その他、成果の取扱い、国際協力の在り方 .....                       | 42 |
| 5. 公募によるボトムアップ方式により研究領域の開拓を目指すべき課題 .....            | 44 |

## 1. 基本的な考え方

### 1.1. 物質・物理科学分野の研究シナリオの目的

微小重力環境の物理的な効果は、液体・気体状態における対流・浮力・沈降等の抑制や試料の無容器保持(浮遊性)など、その影響は、物質・材料科学分野は勿論、基礎物理学・化学、流体科学、燃焼科学等広い分野に及んでおり、従来、「物質科学」としていた本分野は、広く物理的現象を包含する研究分野と捉え、本シナリオ WG では、「物質・物理科学分野」として検討を行った。

物質・物理科学分野における我が国の宇宙環境利用実験は、1992 年のスペースシャトルによる第 1 次材料実験(FMPT)ミッション(「ふわっと'92」)以降、小型ロケット実験などの短時間微小重力実験を実施し、高品質半導体や新規機能材料研究において先駆的な成果を出してきた。これらの成果を基盤に「きぼう」での実験テーマが計画され、現在、第 1 期利用(2008-2011)に続き、第 2 期利用(2011-2013)の実験が実施されており、第 3 期利用(2013-2015)についても課題募集の準備が進められている。

一方、ISS 計画への我が国の参加については、2010 年 8 月の宇宙開発戦略本部決定により、2016 年以降も ISS 計画に参加していくことを基本として必要な取組を推進することとされている。2011 年 8 月の宇宙開発戦略専門調査会の報告では、生命科学や観測等の分野では成果が得られつつあり、今後、有人の特徴を活かすなど更に研究内容を充実させて具体的な成果を出す工夫が不可欠である、とされている。加えて、我が国の財政状況や第 4 期科学技術基本計画などの政策的な状況を踏まえ、JAXA 理事長の外部諮問機関である ISS・きぼう利用推進委員会(浅島誠委員長)に対し、JAXA 理事長より、今後 2020 年までのきぼう利用における利用シナリオにおいて重点的に取り組む課題の設定が諮問され、2010 年 10 月より検討が開始された。

きぼう利用推進委員会では、この 2020 年までのきぼう利用シナリオの検討の指針として、以下の重点化の方向性が示された。

#### 【方向性①】「ISS／きぼう」でしか出来ない最先端の科学研究

- (1) 長期的な視点(5年以上)で生命科学分野、物質科学分野などでの科学的知見の獲得を目指す。
- (2) 短期的な視点(3年程度)で以下の視点におけるブレイクスルーとなる技術・知見の創出を目指す。
  - ・地上における社会問題解決、災害復興への貢献など
  - ・グリーン／ライフイノベーションへの貢献、新産業創生、教育・一般利用

など

## 【方向性②】 宇宙活動のための基盤的な研究開発

我が国の月惑星探査、有人開発にむけ、生命科学、宇宙医学、技術開発分野などでの基盤的な技術・知見を蓄積する。

このようなきぼう利用推進委員会での議論での上記の方向性を踏まえ、物質・物理科学分野において、どのようなアプローチを行なうべきかを検討するため、きぼう利用推進委員会の下部ワーキンググループとして、シナリオ検討ワーキンググループを設置した。委員は物質科学、物理科学分野の専門家および ISAS 宇宙環境利用科学委員会委員から構成される。本シナリオは、2020 年以降の宇宙における物質・物理科学研究のあるべき方向性を見通した上で、2020 年までの ISS/きぼう利用により、この分野は何を目指すべきか、またその実現に必要な実験装置や推進体制について研究コミュニティからの意見を踏まえて本ワーキンググループがとりまとめたものである。

### 1.2. 宇宙環境を利用した物質・物理科学研究の重点領域

物質・物理科学分野の利用シナリオは、既に物質科学、基礎物理学、基礎化学分野で提案されてきたが、これらのシナリオに沿った形での「きぼう」利用研究は十分に推進されてきたとは言えない。また、従来の研究者個別の研究計画に基づく研究プログラムのみでは、利用シナリオを実現することは困難であることも明らかになってきた。宇宙実験に関わるリソースと研究開発予算の制約の中で世界トップレベルの研究を推進するためには、組織化された研究グループによる戦略的な研究推進が必要となる。このため、従来のボトムアップ的研究プログラムは維持した上で、本報告書で提言する重点研究領域を設定し、組織的な研究体制によるシナリオの実現が必要である。

一方、国民に分かりやすい科学的アウトプットを発信し、宇宙実験の有効性を訴求するという観点からは、産業界の発展に大きく寄与する、または国際的競争で優位に立つような即時性、即効性が求められるテーマを推進すべきであり、同時に研究者コミュニティからも積極的な協力が得られる研究領域を設定すべきである。

本WGでは、以上の認識に立って、これまでの物質・物理科学分野における国内外の研究動向および成果を踏まえ、以下の 5 つの領域について分析を行い、今後の重点研究領域について検討を行なった。

- ・ 流体科学の分野

- ・ 燃焼科学の分野
- ・ 結晶成長を中心とした物質・材料科学分野
- ・ 基礎科学の分野
- ・ 応用利用の分野

これら広範にわたる研究分野から、2020 年までに実施すべき重点領域を絞り込むにあたっては、以下の視点で検討を行った。具体的な重点領域の提案は第 3 章に記述する。

**(1) 重力の影響が最も大きく顕著なシステムで、学術的意義 / 社会的波及効果の大きい科学領域であること。**

物質・物理科学分野の重点領域は、重力効果の著しい、即ち、重力効果が最も重要な研究課題を優先する。なお、本シナリオでは、「物質・物理科学分野」を、海外での認識と同様に、物理および化学の理学および工学 (Physical and Chemical Sciences) と捉える。また、基礎科学か応用科学などのように領域を前もって区分して議論することは、「重力効果が最も重要な」課題の選択を誤らせる可能性があるため、本シナリオでは特にこのような前提は置かず広く検討を行った。

**(2) これまで宇宙実験が十分が行われていない新規研究分野を優先する。**

「きぼう」は極めて得難い国家的な共用施設であり、広い分野に開かれるべきであることから、3.1.1 項の価値が認められれば、2020 年までに重点化すべき領域としては、可能な限り新規の分野に優先的な利用機会を提供する。

一方、萌芽的課題や未成熟な課題、また、これまでの実績から研究コミュニティが主体的かつ系統的に実験課題の提案が行えると思われる領域は、ボトムアップ課題として第 5 章に提示した。

**(3) 重点領域の設定にあたっては、「きぼう」の既存の実験装置を利用したテーマだけに制限しない。**

今後の研究課題募集において、「きぼう」の既設実験装置利用課題に限定すると、研究の構想・発想が限定され、優れた先端的な研究成果が期待できなくなる恐れがある。このため、本シナリオでは新規装置の搭載が財政上困難であることに一定の配慮をしつつも、魅力的でかつ、真に重要な研究成果の創出に向けて意義のある領域の検討を行った。

## 2. 物質・物理科学分野における宇宙実験の現状・実績、方向性

### 2.1 これまでのシナリオの総括と第2期利用までの目標

物質・物理科学分野における我が国の宇宙環境利用実験は、1990年代には比較的頻繁に行われた。即ち、1992年の「ふわっと'92」第1次材料実験ミッション(FMPT)で22実験、1994年第2次国際微小重力実験室(IML-2)の14実験、1997年の第1次微小重力科学実験室(MSL-1)の4実験、1996年の宇宙実験・観測フリーフライヤ(SFU)での4実験、2003年の次世代型無人宇宙実験システム(USERS)での1実験等が実施されてきた。しかし、その後、微小重力環境を利用した長時間の本格的な実験は、2008年の「きぼう」実験まで行われなかった。この間、小型ロケット(TR-IA)や航空機、落下施設等を利用して、ISS・「きぼう」に向けた実験技術の確立や予備実験を進めてきた。日本の研究者はこれらの短時間微小重力利用を積極的に活用して、高度な実験装置の開発を行い、「きぼう」科学利用の研究・開発につなげたことは特筆に値する。

物質・物理科学における顕著な微小重力効果は、液体・気体状態における対流の抑制、および試料の浮遊である。これらの効果を利用した高品質半導体や新規機能材料の創製は、「ふわっと'92」(FMPT)で先駆的な実験がなされたが、新たな研究領域として確立するには更なる地上研究と限られたリソースの活用を意識した搭載機器開発、そして実験支援・運用のノウハウの蓄積が必要であることが明らかになった。このため、平成14年に設定された物質・物理科学分野の利用シナリオにおける基本的な考え方は、一足飛びに高品質材料創製を目指すのではなく、対流が抑制されて拡散のみで物質や熱の輸送が行われる単純な実験環境を用い、結晶成長の素過程の精緻な観測と現象の理解を進めることとした。また、宇宙への輸送コストは依然として高額であり、宇宙工場の構想が現実的ではないことから、宇宙から持ち帰るのは「もの」ではなく「知的財産」とした。こうして、平成14年には、以下の2重点項目が設定された。

- ・その場観察による結晶成長素過程の理解
- ・微小重力下で顕在化する表面張力対流の体系的理解

「きぼう」第1期利用(2008～2011)では、物質・物理科学分野の装置として、1996年のSFU実験以降、世界で最初の流体物理および溶液結晶化観測の2つの“その場”観察実験装置と、高温での結晶製造装置として温度勾配炉が搭載された。これらの装置に向け、干渉計による溶液相の温度・濃度分布観察機能など、外国にない我が国

独自の“その場”観察技術の開発が進められた。

「きぼう」第2期利用(2011年～2013年)では、第1期での成果を踏まえ、微小重力という特性を利用し、重力に起因するかく乱の除去、あるいは制御することにより初めて顕在化する諸現象を実現し、物質・物理科学の根源的原理の確認を通じて、さらなる新物質創成と新機能発現の設計原理に対する指針を得ることとし、平成18年に設定されたシナリオでは以下の研究項目が設定された。

(a) 結晶成長機構の解明

「界面での微視的な原子・分子の振る舞いの極限現象に基づく系全体の巨視的現象の解明及びこの成果を踏まえた高品質結晶成長機構の解明」を目指す。

(b) 高機能材料創生

「非平衡極限物質科学の解明とその応用としての新物質の創成」を目指す。

(c) 高温融体熱物性

「物質の特性を決める法則の解明及び有用材料の融体熱物性の高精度計測」を目指す。

(d) 流体科学・熱流体現象解明および制御

「マクロおよびメゾスコピック界面熱流体科学の構築」と「人の宇宙活動を支える熱流体の科学と制御」の発展を目指す。

(e) 基礎物理・基礎化学

「微小重力を利用することにより顕在化する非平衡の解明」を目指す。

(e) 燃焼科学

「高速化学反応と流れの相互作用の解明」を目指す。

(f) 宇宙利用工学

「宇宙空間に進出するための新規技術開発」を目指す。

## 2.2 国内外の宇宙実験の実施状況、動向

我が国の物質・物理科学分野における宇宙実験は、「きぼう」の完成により、平成20年年以降、平成18年のシナリオに基づく実験がようやく開始された段階であると言える。ここでは、第1期利用までの我が国の主な達成状況、および海外の実施状況、動向等について、各分野ごとにまとめる。

なお、参考として、我が国の第1期、第2期の物質・物理科学分野の「きぼう」搭載テーマを巻末の別表3、別表4に、平成18年の我が国の利用シナリオとの対比・実施状況を別表2に示す。また、別表5に宇宙科学研究所における研究班ワーキンググループの研究活動課題一覧を示す。

### 2.2.1 流体科学の分野

従来の地上での実験や研究成果を見れば、我が国の研究レベルは非常に高く、欧米を凌駕するだけの実績とポテンシャルが備わっている。また微小重力実験に限定しても、数多くの斬新なアイデアとそれをサポートする技術力により構築された実験技術が蓄積されている。すでにISSでの実験が継続中である液柱マランゴニ対流では、振動流の発生条件に関して、きわめて精度の高い実験がはじめて実現され、従来とは異なる結果を得ている。さらに沸騰二相流では、独自の発熱体構造を用いた地上ベース実験により、他に先駆けて重力の影響に関する予測を明らかにし、また自己浸潤性媒体を用いたヒートパイプを新たに開発して、除熱限界の飛躍的向上を実現するなど、数多くの実績がある。さらに気泡、液滴、液膜などを対象とした研究についても同様に優れた実績やポテンシャルを有している。

#### 2.2.1.1 我が国の宇宙実験の実施状況、動向

「きぼう」における流体科学分野の宇宙実験はマランゴニ対流実験を中心にした実験が行われており、第一期では平成5年に選定された3テーマと、国際研究チームから提案されたテーマから構成されている。これらのマランゴニ対流現象に関する4つのテーマを実施することで、マランゴニ対流現象を体系的に理解することを目指している。2011年までに、上記テーマのうち以下の2テーマの実験が実施された。

##### ① マランゴニ対流におけるカオス・乱流とその遷移過程 (Marangoni Exp./MEIS)

微小重力下で顕在化する表面張力対流(マランゴニ対流)を流体力学的に検討する実験である。液柱の温度差を大きくすると定常流(層流)から振動流へ遷移するが、その臨界値(条件)はマランゴニ数で整理されると考えられていた。しかし、過去の航空



機などによる実験では臨界値が液柱長さに依存し大きく変動し、理論との整合性が得られていなかった。このため、きぼうでの微小重力実験により長時間、安定した液柱を形成し、精度の高い実験を行った結果、臨界マランゴニ数は、基本的に液柱の長さに関係なく一定となり、マランゴニ数で整理出来るとする理論が正しいことが実験により明らかとなった。

## ② マランゴニ対流における時空間構造 (Marangoni UVP)

マランゴニ対流の層流から振動流、カオス流、乱流に至る遷移過程を明らかにする。工学的な流動可視化やサーモビューアによる表面温度分布計測に加え、超音波ドップラー効果流速分布測定法 (UVP: Ultrasonic Velocity Profile) により計測を用いる。この UVP で非定常流れ場を測定することにより、流れの安定限界、流動特性、さらには平均流速分布などを定量的に求め、3 次元的流れの発生、成長のメカニズムを解明する。

上記のほか、2012 年以降の宇宙実験の実施に向けて以下の以下の実験の準備が進められている。

## ③ 高プラントル数流体の液柱マランゴニ振動遷移流における表面変形効果の実験的評価 (Dynamic Surf)

マランゴニ対流が振動流状態に移行すると液体の表面が微小に波打つ動的表面変形 (DSD: Dynamic Surface Deformation) が起こり流れと密接に関係している。DSD は振動流への遷移のメカニズムに密接に関係し、振動流を継続させるために重要な役割を担っているとの仮説により、新しいマランゴニ対流遷移モデルが構築された。この仮説を検証するために DSD を精密に測ると同時に、発生する流れを詳細に観察する。

## ④ 温度差表面張力流における不安定性の界面鋭敏性と制御 (JEREMI)

表面に流れの駆動力が存在する特異な対流である表面張力流について、気液界面の熱的・機械的状态が鋭敏に流れに影響する現象を解明し、表面張力流における界面鋭敏性の役割を流体力学的に正しく理解すること、更に、表面張力流が関与する応用分野について新たなアプローチを示唆することを目的とし、地上実験および宇宙実験により系統的データを取得する。

## ⑤ 落下実験から生まれた新しい微粒化概念の詳細検証～乱流微粒化シミュレータの構築をめざして～

これまでの落下実験による研究を通して生み出された新しい微粒化概念 (液柱の端

の存在によって自励的に液柱が不安定化し分断を繰り返す仕組みの存在)の妥当性を、大口径のノズルから液体を空気中に低速噴射する宇宙実験での表面張力波の詳細観察によって検証し、普遍的な微粒化理論へと発展させる。この微粒化概念に基づいて乱流微粒化過程を記述するサブグリッドモデルを開発し、我が国の本格的な噴霧燃焼シミュレータの創出を目指す。

#### ⑥ 宇宙開発の新展開に不可欠な沸騰・二相流を用いた高効率排熱技術のデータベース確立 (Two-Phase-Flow)

高効率熱交換や熱輸送が可能な沸騰・二相流の実験を微小重力環境下で系統的に行い、気液界面挙動の詳細とそれに付随する圧力損失や熱伝達などの輸送現象について信頼性の高いデータを蓄積し、高出力化・高発熱密度化に対応可能な次世代宇宙用排熱システムの設計に使用可能なデータベースを構築する。

### 2.2.1.2 海外の宇宙実験の実施状況、動向

科学的成果に重点を置いた研究では、ESA が最も活発に取り組んでいる。日本で現在までに実施あるいは実施予定の実験が、現段階ではマランゴニ対流および沸騰二相流に重点が置かれているのに対し、ESA では気泡・液滴・液膜などの気液界面を有する広範囲な系を対象としている。前段階としての航空機実験を数多く実施しており、一方ではISSでの流体実験のための汎用実験装置の開発が計画されているので、これにより比較的多くの課題に対してISSでの実験実施が実現する見込みである。これとは対照的に本分野におけるNASAのアクティビティは公表されている範囲を見る限りやや低く感じられるが、例えば沸騰二相流の分野では研究者を中心とした基礎現象に関する実験以外に、別組織で二相流体排熱ループの実証試験を実施した実績があり、この意味では先進的な要素を含んでいる。

### 2.2.2 燃焼科学の分野

燃焼科学分野における世界最初の微小重力実験は、東京大学の熊谷清一郎(?)教授によって行われた液滴の燃焼実験である。以来、我が国では多くの研究者が液滴燃焼の研究を継続しており、世界のこの分野を常にリードしてきた。また、我が国では、1990年代に相次いで大型落下塔(JAMIC, MGLAB)が建設されたこともあり、気体燃焼(消炎限界、すす生成過程等)や固体燃焼(着火、燃え広がり)においても多くの成果が得られており、最も困難とされている燃焼国際シンポジウムでの発表機会を毎

年獲得するなど国際的にも高く評価されている。また、微小重力燃焼研究プロジェクトには、国際共同研究として進められているものも多く、当該分野における国際競争力は高いと言える。

これまで、我が国は軌道上での燃焼実験装置を有していなかったが、第2期利用テーマ選定において、液滴燃焼、気体燃焼、固体燃焼に関する課題が採択されており、これらを実施するための多目的ラックを利用した複数の燃焼実験装置が開発されつつある。固体燃焼に関しては、米国が CIR/ISS へ搭載予定だった固体燃焼実験装置の開発を中断していることもあり、流速や雰囲気組成の精密な制御が可能な軌道実験手段は我が国の Solid Combustion 実験装置のみとなっている。

### 2.2.2.1 我が国の宇宙実験の実施状況、動向

燃焼科学分野の研究は、第2期利用テーマとして以下のテーマが選定された。現在、2014年度以降の宇宙実験に向けて準備中である。

#### ① ランダム分散液滴群の燃え広がりや群燃焼発現メカニズムの解明 (Group Combustion)

燃焼の素過程現象の解明のため、格子上に配置した液滴がどのように燃焼・伝播するかを明らかにし、その実験結果を「浸透理論」および落下塔実験等で得られたランダム分散液滴群に関する仮説と比較・検証し、燃え広がりによる群燃焼の発現を正確に記述するモデルを構築することを目的とする。

#### ② 燃焼の限界に関する統一理論構築のための極低速対向流実験

極低速の対向流火炎法によって、通常の「伝播火炎 (Deflagration wave)」と微小重力環境下で初めて発見された「Flame ball 現象」との関係を見だし、燃焼限界の機構を統一して記述する理論を構築することを目標とする。さらに、酸素燃焼条件の燃焼限界に関して、シミュレーションの検証に利用可能な世界初の基準データを取得することも目的とする。

#### ③ 宇宙火災安全性評価の基礎となる重力条件による固体材料燃焼性変化の定量的把握 (Solid Combustion, Firewire)

宇宙船内での火災安全性向上のために、通常重力場と微小重力場での材料燃焼性の違いを明らかにすることを目的とする。NASAが定める宇宙船内材料の火災安全性判定試験は、通常重力場での実施が前提となってきた。しかし、提案者らの研究では、材料の燃焼性は微小重力場の方が高くなり得ることが判明し、宇宙安全評価システムの構築が必要である。

#### 2.2.2.2 海外の宇宙実験の実施状況、動向

燃焼現象は、重力の影響を強く受ける現象であることから、国内外を問わず微小重力場利用した研究が盛んに行われてきた。なかでも、米国では、ISS米国モジュールにCIR (Combustion Integration Rack)を有しており、これを利用した研究が行われてきた。また、スペースシャトルによる実験も実施されている。代表的な研究としては、低レイス数の希薄限界以下の予混合気中に安定な球状火炎を形成するFlame ballの研究、燃料液滴周りのすす生成(Sooting effects of droplet combustion)、発泡ウレタン内部でのSmoldering 燃焼など、気体燃料、液体燃料、固体燃料の各分野にわたって複数の軌道上実験が実施されている。しかし、2004年に当時のブッシュ大統領により提示された新宇宙政策以来、科学研究としての燃焼研究は少なくなっており、技術開発として位置づけられる研究(例えば火災検知や消火技術等)が主に継続されている。欧州は、軌道上の実験手段を有しておらず、大型落下塔、航空機によるパラボリック飛行、TEXUS ロケットによる燃焼実験が行われている。

#### 2.2.3 結晶成長を中心とした物質・材料科学分野

宇宙での結晶成長の育成・評価法は日本が世界に誇れる技術である。特に“その場”観察法は宇宙実験での限られたリソースを最大限に活かし、かつ、すべく日本が先導的に育成し実践して来た経緯がある。例えば、顕微干涉法による温度、濃度分布の同時測定、結晶成長速度の精密測定、結晶形態や表面構造変化の観測、が挙げられる。またこれらの実験では、高精度温度制御、核生成制御などの技術が実験の再現性や信頼性を高める上で必要不可欠であり、日本の得意とするところである。

日本は静電浮遊法の技術開発を地道に進め、既に 3,000℃を越える温度の超高温融体を地上でも浮遊させる技術を獲得している。静電浮遊技術及びこれを利用した高温融体熱物性計測(密度、表面張力、粘性係数等)に関して、金属中最高の融点を持つタンゲステンを初めとする多くの高融点金属の粘性係数を世界に先駆けて測定するなどの成果を上げている。静電浮遊法は、電磁浮遊炉では取り扱いが困難な酸化物のプロセスも可能であり、ISS に向けて酸化物試料を主対象とした装置開発が開始されている。

無容器プロセッシングは、過冷却状態を通した新規機能材料創製と言う未踏領域の開拓に有効なツールである。既にJAXAの研究において通常の100倍の誘電率を持

つ BaTiO<sub>3</sub> やダイヤモンド並の屈折率を持つ新規ガラスが得られており、酸化物融体の無容器プロセッシングは新規機能材料の宝庫である。一方、こうした新規機能材料は、試行錯誤の中から偶然得られるのが現状であり、創製メカニズムの構築も今後の大きな研究領域である。

### 2.2.3.1 我が国の宇宙実験の実施状況、動向

#### ① 実験名：結晶成長その場観察(ICE)

異方性の高い氷を対象とした樹枝状結晶の実験である。円盤状の結晶から界面不安定が起これば樹枝状結晶に遷移する際の「臨界厚み」の詳細観察を第一目的としたが、微小重力環境下では、円盤成長から樹枝状成長への遷移は地上と異なり極めて限られた過冷却の範囲でのみ観察されること、結晶の安定化はエッジ部の形状により決まること、樹枝状結晶の先端曲率半径と成長速度は、等方的な材料であるサクシノニトリル等と同様の理論で過冷却度によって一義的に決まることなどが明らかになってきた。

#### ② 実験名：結晶成長その場観察(FACET)

半導体やセラミックスの融液成長で観察されるファセット的セル状組織は、金属の凝固におけるセル(細胞)状組織に比べて研究が遅れており、かつ理論検討に必要な実験データも不足している。そのため、ファセット的セル状組織の形成メカニズムを明らかにするために、同様の成長組織を示すモデル物質であるザロール／ブタノール混合物の結晶成長過程をその場観察した。その結果、成長界面での過冷却度分布が従来のセル状成長モデルから予測される値と実測値で大きく異なることを見出し、界面過冷却およびその勾配が新たなセル境界の発生を支配することを明らかにした。

上記のほか、この分野では 2012 年以降の宇宙実験実施に向けて、以下のテーマについて実験準備が進められている。

#### ③ 半導体結晶成長(微小重力下における TLZ 法による均一組成 SiGe 結晶育成の研究(Hicari))

FMPT では温度勾配炉を用いて成長軸方向の濃度均一性を狙った実験が2実験行われたが、いずれも均一濃度分布は得られなかった。このため、JAXA は地上研究を進めて、TLZ(Travelling Liquidus Zone)法を開発した。この方法では、飽和溶融帯を用いることにより、制御しにくい軸方向の濃度勾配を制御可能な温度勾配に変換して均一濃度を達成することを目標とした。この方法を用いると対流が起きにくい小径(φ 2mm 程度)の試料では地上においても軸方向の均一性が得られている。「きぼう」での

実験ではφ10mmの結晶を用いて、大口径試料への適用を図る。

④ 微小重力環境下における混晶半導体結晶成長(Alloy Semiconductor)

高品質な均一組成混晶半導体バルク結晶成長のための因子を明らかにすることを目的し、宇宙と地上において三元混晶半導体結晶成長に及ぼす(1)溶液輸送過程と(2)結晶面方位依存性の影響を定量的に調べる。

⑤ 静電浮遊炉を利用した高温酸化物融体の熱物性計測

地上では溶融浮遊することができない酸化物(特に融点 2000℃以上の酸化物を対象)を微小重力環境下で浮遊溶融し、溶融状態における粘性、表面張力、密度を世界で初めて測定する。また、過冷度の高い状態で凝固した酸化物を地上に回収し、試料の組織を詳細に分析することにより、新機能物質発現の可能性を探る。

⑥ 微小重力における溶液からのタンパク質結晶の成長機構と完全性に関するその場観察による研究(Nano Step)

微小重力で育成したタンパク質結晶の完全性は向上することが報告されている。この完全性向上の原因を明らかにするために、タンパク質結晶の成長メカニズムと、成長時に導入される欠陥、特に、完全性を低下させる微細欠陥との関連を明らかにすることを目的とする。

⑦ 生体高分子の関与する氷結晶成長—自励振動成長機構の解明(Ice Crystal2)

凍結抑制タンパク質のようなマクロ分子が作用する氷の結晶成長機構を説明するために、新たな結晶成長カインेटクスモデル／二段階可逆吸着モデルを提案し、これを実験的に検証することを目的とする。

⑧ レーザー光回折による微小重力下でのコロイド結晶の構造解析と粒子間相互作用の研究

「水を溶媒とし静電的に安定化したコロイド分散系の構造」を宇宙実験として世界で初めて精密に観測することにより、コロイド結晶に関する詳しい情報を取得し、コロイド粒子の相互作用を詳細に研究する。

### 2.2.3.2 海外の宇宙実験の実施状況、動向

ISS 利用に関して、米国では 2005 年度以降、微小重力科学実験は減少傾向にある。欧州は 2008 年度実験棟打ち上げ以降、ライフサイエンスや宇宙医学実験が中心であり微小重力科学の実験は 10%程度である。しかし今後は流体物理、先端高機能材料、

産業関連プロセスなどにも重点が置かれる模様である。しかしヨーロッパの研究チームが我が国の半導体結晶成長実験およびタンパク質結晶成長“その場”観察実験に強く関心を持っており、それぞれ日本の研究チームとの共同研究を希望している。この国際共同にもとづく宇宙実験の推進が、リソースの最大活用だけでなく、研究レベルの向上にとっても不可欠であろう。

ESA は、電磁浮遊炉を 1980 年代から開発を進めてきた。1994 年及び 1997 年に実施されたスペースシャトルミッションでは、金属・合金を用いて、高温融体熱物性計測実験や準安定相創製の実験が行われている。1 回目のフライトでは試料の位置安定性に問題があったが、2 回目では改善し、Pd-Co 合金融体の熱物性計測等で成果を挙げている。現在 ESA は ISS 搭載にむけた電磁浮遊炉を開発中であり、2012 年頃には打ち上げられる予定である。電磁浮遊炉は、原理的に導電性の試料のみ取り扱いが可能である。NASA は既に音波を利用した浮遊装置 (SDRM) を ISS に搭載しているが、加熱機構がないため、燃焼合成など比較的低温の実験のみが計画されている。

## 2.2.4 基礎科学の分野

基礎科学の分野には、宇宙環境を利用して研究を行う基礎物理学や基礎化学の分野が含まれる。これらの分野については、微小重力物理学分野研究シナリオ (平成 13 年) と基礎化学研究シナリオ (平成 16 年) が JAXA で制定され、主として公募型地上研究と ISAS 宇宙環境利用科学委員会研究班 WG における地上研究が進められているが、現在のところ「きぼう」における具体的な宇宙実験が採択されたことはない。

欧州・ロシアでは、ISS に搭載されたプラズマ結晶実験装置 (独) によるダストプラズマの研究が成果を上げており、日本からのチームも実験に参加して理論あるいはプラズマ計測の分野で実績を上ている。

航空機実験などの地上研究では、日本では、巨視的量子現象の観察にむけて固体  $^4\text{He}$  を 60mK ~ 100mK まで冷却するための連続型断熱消磁冷凍機 (連続型 ADR) の開発が進められており、地上実験だけでなく航空機を利用して固体 He の結晶成長に関する短時間微小重力実験のデータ、経験の蓄積が進められている。欧州では、ICAPS (Interactions in Cosmic and Atmospheric Particle Systems) と呼ばれる粒子挙動研究のための装置開発が進められている。これに関連する日本の研究者としては、例えば原始惑星系円盤中の粒子凝集における電荷の影響などの研究などが挙げられる。微小重力環境における臨界点・超臨界での現象の研究 (ピストン効果による異常熱輸送現象) に関しては日本人研究者が構築したモデルが基になっており世界をリードしていたが、現在は微小重力実験を目指す研究者は存在しない。

一方、基礎化学の分野では、他国では計画・実績は無いのに対し、我が国では、光不斉反応、コロイド、ハニカムポーラス膜等の研究が、宇宙環境利用科学委員会研究班 WG 活動として地上あるいは短時間微小重力実験により進められており、徐々に重力の影響が明らかになりつつある。コロイドに関しては、ISS 利用の第二期後期の候補テーマとして選定され、準備が進められている。

#### 2.2.4.1 我が国の宇宙実験の実施状況、動向

これまで我が国主導による長時間の微小重力実験は行なわれていない。しかし、国際研究協力により、ISS に搭載されているドイツのプラズマ結晶実験装置 (PK-3Plus) によるダストプラズマ実験に参加している。ダストプラズマとは、イオン、電子、微粒子が混在する系のことであり、それら全体で電氣的に中性なプラズマである。自然界では、星間分子雲や原始惑星系円盤などにダストプラズマが存在する。日本の提案に基づき、大型粒子を用いたクーロン結晶の形成、プラズマ消失後の粒子の凝集といった、ダストプラズマ微小重力実験では初となる現象の観察にも成功している。

一方、我が国における航空機を利用した短時間微小重力実験では、 $4\text{He}$  結晶実験、臨界点近傍での光不斉反応、自己組織化によるハニカムポーラス膜形成反応等の実験が実施されてきた。 $4\text{He}$  結晶実験では、新型冷凍機により固体  $4\text{He}$  を  $0.6\text{ K}$  の超低温まで冷却することに成功し、 $4\text{He}$  結晶が微小重力では地上とは大きく形を変えることが判明する等の成果を上げている。また、化学が主として扱う分子／原子レベルの現象は、重力の影響を受けないと考えられてきたが、光不斉反応の生成物が重力の有無で変化すること、分子の自己組織化で形成されるメゾスコピックスケールの構造を重力によって制御できうることなど、「重力」をキーワードとした新しい化学分野の創成につながる知見が蓄積されつつある。

#### 2.2.4.2 海外の宇宙実験の実施状況、動向

##### ①ダストプラズマ研究

微粒子が混在したプラズマであるダストプラズマでは、微粒子が、クーロン結晶、プラズマ結晶等と呼ばれる規則的な配列を取る。これは 1994 年に、初めて実験的に確認された新しい現象である。理論的な相図が作成されているが、その実験的な検証は地上では重力の影響によりほぼ不可能と考えられている。ところが、ドイツとロシアが共同で実施したダストプラズマ宇宙実験 (装置名: PKE、2001 年 2 月～2005 年 7 月) では、粒子が存在しない領域 (ボイド) が形成されたため、相図の検証には至らなかった。そのため改良型である PK-3 Plus が 2005 年 12 月に打ち上げられ、現在も運用中である。研究チームは多国籍 (日本も含む) であり、総勢 30～40 名である。日本は主



として荷電粒子系における臨界点の研究を行っている。ボイドは PK-3 Plus では改善されたものの、ハイパワーでは依然として課題が残る。このため、Plasma Lab.と呼ばれる改良型の開発が進行中である。また、PK-4 と呼ばれる PK-3 Plus とは異なる方式の実験装置が 2013～14 年に打ち上げられる予定である。

海外の研究の特徴として、地上の研究と同じように、継続して研究を行うということが挙げられる。このためもあって、PK-3 Plus では、著名な学術誌を中心に 50 本以上の成果がこれまでに発表されている。海外におけるダストプラズマ研究の主要目標は、ボイドの消滅に集約される。Plasma Lab.では振動電場が採用される可能性があり、いくつかの弊害が懸念される。また、計測系が弱い可能性もある。このため、データを互いに補完できる日本独自の装置が望まれる。

## ② 固体 He 研究

巨視的固体の結晶形の基底状態については、具体的な実験が不可能であるため理論の検証が行えない。微小重力下かつ極低温における固体 He のラフニング転移(温度の低下とともに特定の結晶面が原子レベルで揺らいでいる状態から整列して平坦になる結晶表面の相転移)、結晶形の観察は、基底状態に実験的に迫ることができるほぼ唯一の方法である。極低温における  $4\text{He}$  液相は超流動となり、さらに 25 気圧以上の圧力をかけることにより、最密六方構造の  $4\text{He}$  固相となる。この時、固体・液体間の相転移に潜熱をほとんど伴わないため、結晶成長速度が極めて大きくなる。この固体  $4\text{He}$  は、原子の波動関数の重なり合いが無視できない量子固体であり、かつボーズ粒子固体である。

微小重力下における固体  $4\text{He}$  の研究は、2000 年頃に NASA の基礎物理全体のプロジェクトがシャットダウンされたため、固体  $4\text{He}$  の宇宙実験への試みを検討している国は我が国以外に無い。

## ③ ICAPS (Interactions in Cosmic and Atmospheric Particle Systems)

ESA が開発を進めている ISS 用実験装置で、現在搭載実験装置の製造段階である。研究対象は大きく分けて 3 つあり、(1) 粒子と液滴との相互作用、(2) 粒子もしくは液滴と環境ガスとの相互作用、(3) 粒子もしくは液滴と電磁放射との相互作用である。より具体的には、エアロゾル、音波の影響、粒子相互作用と凝集、レゴリスの物理的特性、凝集体の光学的・構造的特性、古典放射伝達理論の検証と光散乱法の研究となっている。粒子の凝集では対象となっている粒子の大きさが mm クラスであるので、ダストプラズマ研究が対象としている  $\mu\text{m}$  クラスの粒子の凝集の研究と将来相互に補完し合える可能性がある。ICAPS への参加者は日本人を含む国際研究チームで構成されている。

#### ④ ACES (Atomic Clock Ensemble in Space)

ESA が開発を進めている ISS 用原子時計である。現在の GPS 衛星に搭載される時計よりもはるかに高精度な時計であることを利用し、(1) アインシュタインが予測した重力赤方偏移の高精度の検証、(2) 微細構造定数等、我々の宇宙の性質を決める基礎的な定数の時間変化の計測、(3) 光速の高精度測定を通じてローレンツ不変量の研究等が行われる予定である。同様の相対論に関係する研究として、Q-WEP (Quantum Test of the Weak-Equivalence Principle) も計画されている。本計画は、重力環境が時間の進み具合に及ぼす影響を利用するという観点では、これまでにない微小重力実験である。ACES 実験では受信のための地上局が必要なことから、世界的規模で準備が進められており、日本からは複数の研究機関、大学等が参加が決定している。

#### ⑤ 臨界点・超臨界での研究

この分野では、ドイツのスペースシャトルによる微小重力実験において発見された異常に高速な熱輸送現象が有名である。今日では、この現象はピストン効果と呼ばれている。メカニズム解明に日本人研究者が大きく貢献している。

現在は、フランスの CNES が開発した実験装置 DECLIC の利用が始まっている。DECLIC には 3 種類のインサートモジュールと呼ばれる供試体があり、うち 2 種類が臨界点近傍および超臨界のためのインサートモジュールである。

#### ⑥ 基礎化学

臨界点・超臨界以外の分野においても、基礎化学の分野として、これまで本格的な長時間微小重力実験が他国において実施された例は無い。しかし、例えばゼオライトの合成といった結晶成長と化学(基礎化学ではない)との中間的な宇宙実験は、米国のスペースシャトル実験 (USML-1、2) で実施された。また、現在 ESA では“Zeolite Synthesis”トピカルチームが活動を継続している。

### 2.2.5 応用利用研究制度における物質・材料の宇宙実験

JAXA の国際宇宙ステーション(ISS)応用利用研究拠点制度は平成16年度に発足し、ISS 応用利用研究拠点推進委員会により、これまで 3 つの機関を応用利用研究推進拠点として選考、「きぼう」での実験を行なっている。

応用利用研究制度は、基礎研究とプロダクト開発の橋渡しをする研究活動を標榜しており、基礎とプロダクトの両者にあるギャップを繋ぐ取り組みである。そのため具体的な出口(産業への還元)が明確な目標の研究を対象としている。

そのため、大学・研究リーダーを核として、製品化応用を担う企業・複数の大学研究

者の共同研究体制を構築し JAXA との共同研究プロジェクトとして推進している。地上での準備段階から得られる成果も全て拠点成果として企業は応用に取り組み、大学は新たな企業ニーズを探索して連携を常に図る体制を目指している。

「きぼう」での 3 つの研究領域の研究対象は、いずれもそのサイズが 10nm より大きく  $1\mu\text{m}$  より小さいこと、及びブラウン運動の下で秩序ある自己組織化による構造形成に影響するクーロン力、分子間・物質間引力などの相互間力が、重力により生じる浮力や濃度勾配に敏感に反応する現象に着目し、それを利用している点が特徴である。

#### ① 高分解能結晶を利用したサブ Å レベルの蛋白質構造・機能解析とその応用

ISS の長期間の  $\mu\text{G}$  下での高品質なタンパク質結晶生成に基づく超高精密な構造解析とその応用を目指す研究領域である。

既に4回の宇宙実験を終了しておりその応用成果例として、先天代謝異常症関連タンパク質やナイロン分解関連タンパク質の超高精密結晶構造解析を実施し、分解能 0.88~1.1 Å で精密構造を決定することができた。このデータを利用して、医薬品開発や新規酵素開発が進められている。

本研究拠点の研究成果として、拡散係数と蛋白質取り込み係数の比が一定の数値(指標)より小さい場合には、結晶の高分解能化に対して微小重力効果が有効に働くことを見出し、タンパク質溶液の高純度な精製や溶液の高粘度化により宇宙実験による有効な成果を創出する確率を高めた。これらの技術は「きぼう」での実験に必須な技術として活用され、さらに改良が加えられつつある。

#### ② 微小重力環境を利用した 2 次元ナノテンプレートの作成

平面基盤上にペプチド分子が規則正しく帯状に自己配列する現象を利用した新材料創成を目指す研究領域である。炭化ケイ素(SiC)を超精密切削加工した炭素原子面層がステップ状に並ぶ基板面に、帯状に自己配列するペプチド高分子をマス킹材として軌道上で大面積で規則的に配列させる。それを地上に持ち帰りこのマス킹材を利用してイオンビーム照射により数ナノレベルの凹凸状の基板を作成し、それを近年の通信の大容量化に必要な増幅素子としての利用が期待されている窒化ガリウム(GaN)半導体の高品質単結晶生成のための金型として製造に応用するまでの一連の開発に取り組んでいる。1 回目の宇宙実験結果より、微小重力が有効に作用する部分が少ないことが確認できたため、微小重力の効果について理論解析を実施し、これに基づく実験条件を検討中である。

#### ③ 微小重力環境でのナノスケルトンの作成

疎水性-親水性の機能を有する界面活性剤のナノレベルの自己組織化現象を利用した新しい機能性材料生成を目指す研究領域である。界面活性剤の濃度を調整する

ことにより、球状や棒状や層状、さらにはハニカム状の細孔構造のパターンが形成できることが知られている。その応用例としては、ナノレベルで穴径の揃ったハニカム構造を活用し、気化しやすい化合物の同定・定量に用いられるガスクロマトグラフ機器分析に使用することや、その広い表面積を活用し触媒粒子をより多く保持し、汚染空気等の効率的な浄化を行うことなど、応用の範囲は生活から工業界まで幅広い。

現在、宇宙実験により高品質の酸化チタン結晶を表壁面に持つ大口径(7~15nm)の新しい機能性骨格構造体「ナノスケルトン(登録商標名称)」の創製に取り組んでいる。これは、通常触媒活性の低いハニカムの壁を高活性化することや、油を利用してナノ孔径の調整を行う新材料である。その実現のため、生成粒子が沈降せず、水と油が均一に長時間混ざり合う現象が維持できることが必要であり、微小重力環境の無沈降・浮上の活用により、より高性能の触媒の誕生が期待できる。1 回目の宇宙実験結果より、油や粒子が均一に分散することが細孔径拡大に寄与することを確認できた。また、微小重力が有効に作用する部分としない部分を確認できたため、微小重力の効果について理論解析を実施し、これに基づく実験条件を検討中である。

### 3. 物質・物理科学分野が目指すべき方向性と研究課題

ISS・きぼうにおける物質・物理科学分野の研究を戦略的に推進するため、2章で示したこれまでの微小重力環境下の実験の成果と動向を踏まえた上で、1章で示した「きぼう」利用の方向性と重点化の考え方に照らし合わせ、本ワーキンググループとしては、2020年までの重点化の目標を以下のとおり設定する。

1.1 項で示された3つの方向性、即ち、

#### ① 重点領域(長期的課題)

「きぼう」利用の【方向性①】『ISS・「きぼう」でしか出来ない最先端の科学研究』のうち、(1)長期的な視点(5年以上)で科学的知見の獲得を目指すべき領域

#### ② 重点領域(短期的課題)

「きぼう」利用の【方向性①】『ISS・「きぼう」でしか出来ない最先端の科学研究』のうち、(2)短期的な視点(3年程度)で科学的知見の獲得を目指すべき領域

#### ③ 重点領域(宇宙活動のための基盤的な研究開発)

「きぼう」利用の【方向性②】『宇宙活動のための基盤的な研究開発』で科学的知見の獲得を目指すべき領域

に加えて、上記①のうち、当面、国際協力により海外の実験装置の使用も念頭においた領域については、

#### ④ 重点領域(国際協力による長期的課題)

として、整理した。これら重点領域と1.1章の「きぼう」利用の方向性との対応を巻末の別表－1に示す。

### 3.1 重点領域(長期的課題)

1.1 項で示された「きぼう」利用の【方向性①】『「ISS・「きぼう」でしか出来ない最先端の科学研究』のうち、(1)長期的な視点(5年以上)で科学的知見の獲得を目指すべき領域として以下の2領域を設定する。

#### 3.1.1 重点領域1:「環境負荷低減のための新規燃焼システムに貢献する燃焼素過程の科学」

わが国のエネルギー政策に関して、従前の原子力に頼るCO<sub>2</sub>削減施策に替わるシナリオは容易には描けない状況にある。そのような中、現時点でも一次エネルギー源の80%以上を占める燃焼からのCO<sub>2</sub>排出削減を可能とする新規燃焼システム開発が必要不可欠の課題である。本領域では、その基盤をなす燃焼科学の構築(新規「酸素燃焼」など)を行う。

##### ① 科学的な重要性

東日本大震災を契機に我が国のエネルギー体系が変わろうとしている。将来の原子力依存増加を前提とした電力の永続的確保やCO<sub>2</sub>排出低減計画は極めて不透明な状況である。このような状況において、例えば、震災前でも発電の60%を占めていた火力発電の重要性はますます高まる一方で、燃焼(既存の天然ガスや燃料噴霧の燃焼)に伴うCO<sub>2</sub>の削減への要求はますます厳しくならざるを得ない。

このような従来のエネルギー体系に対する状況変化に対応するためには、燃焼科学に関する深い知見に基づいた燃焼機器のもう一段のブレークスルーが不可欠である。この新規燃焼システムの開発には、基本となる物理・化学過程の解明が不可欠であり、このためには、重力の影響のない環境での現象解明が必須である。この高度な実験技術と微小重力環境を組み合わせることにより新規燃焼研究に飛躍的な進展が期待される。

ここでは、重点領域①の科学的重要性を「酸素燃焼の基礎科学」を例として述べる。酸素燃焼とは、燃料の酸化剤として空気ではなく純酸素を使用するものである。ただし、実際の燃焼時には、燃料と酸素に加え再循環させた大量の排ガスを混合して燃焼させる。この方式により、排ガスのエネルギーを回収でき熱効率が向上すると同時に、排ガスの成分はほとんどがCO<sub>2</sub>となり、これを回収貯蔵することも可能となる。ここで重要となる知見は、排ガス等不活性成分(CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O)中での燃焼科学である。従来の燃焼科学は、“空気中での燃焼”を前提としたも

のであり、このような燃焼の前提条件の変化にともない、新たな燃焼学の体系が必要となる。これに関する研究は、近年 Oxy-Fuel Combustion と呼ばれ国内外で研究が活発になっている。しかし、ここで最も重要な燃焼限界に関する研究は、通常重力場で調べることが極めて難しく、従来の研究は不十分と言わざるを得ない。なぜなら、消炎限界は、観察領域における化学反応速度と流れ場による決まる物理特性時間の競合により決定されるものであり、極めて低速の流れ場まで制御できる環境でなければ、本質的な消炎現象の研究は難しいからである。

## ② ISS・きぼうでしか実施することができない理由

以上述べたように、新規「酸素燃焼」システムで最も重要な研究課題は、“燃焼限界”である。すなわち、循環排ガス中で燃焼を行う場合、どこまで CO<sub>2</sub> で希釈しても燃焼を維持できるのか、どこまで発熱量の低い燃料を継続燃焼できるのか、さらには、高速の燃焼器ではどこまでの速度でバーナ基部の火炎を維持できるのか、といった基礎データが必要となる。

燃焼限界を議論する場合に、最も基本的な概念として、反応特性時間と燃焼場におけるガスの滞留時間の比(ダムケラー数と呼ぶ)が重要である。燃焼限界を学問的に定義するには、この物理特性時間をしっかり固定した上で、反応特性時間(およびこれに影響を与える諸因子)の影響を明らかにして行く必要がある。このために、微小重力の利用が本質的な意義を持つ。つまり、物理特性時間を固定するためには、観察している場から制御できない流れを完全に排除することが要求され、これを唯一実現できるのが微小重力環境だからである。

特に、燃焼現象では僅かな重力変動でも現象が敏感に反応するため、科学的議論に耐えうるデータを取得するには、地上施設では落下塔を利用するしかなく、それ以外では宇宙実験を実施するしかない。地上落下塔では微小重力時間が限定され、ある一定の範囲をこえると実験自体が実施できなくなる。それ以上の実験はサウンディングロケットあるいは軌道上実験に頼るしかないが、繰り返し実験や長時間の実験は、現状、ISS・きぼうでしか実施することができない。

## ③ 国際的な研究動向

上述した、Oxy-Fuel Combustion の研究は、国内外で盛んに研究され始めているが、しかし、微小重力における研究は殆どなされていない。特に、最も基本的な“燃焼限界”については、未知の状況にあると言わざるを得ない。一方、ガス燃料の燃焼に関しては、対向流を用いた微小重力実験で我が国が世界をリードしている状況である。

#### ④ 研究の新規性、先端性、挑戦性

通常重力場では流れ場の制御が難しいが故に、本質的な消炎現象の観察は難しい。また、反応速度が極めて小さくなるような場合(多量の CO<sub>2</sub> 希釈や低質燃料の消炎)には、短時間微小重力実験では結論を得ることは難しく、高質の長時間微小重力環境(ISS での実験)が必要である。

#### ⑤ これまでの宇宙実験とのつながり

我が国においては、これまで軌道上で燃焼実験が実施されたことはない。ガス燃料に関しては、落下塔を用いた対向流火炎による消炎研究は多くの実施例があるが、長時間微小重力時間が必要な反応特性時間が長い系の実験は実施自体が難しく、当然実施例はない。第2期利用後期テーマでは、気体燃料の消炎研究および固体燃焼の消炎研究が計画されているが、実験変数が限定的であり、排ガス不活性ガス成分中での燃焼に関しては計画されてず、新規の研究が必要である。

#### ⑥ 10～15 年後に新たな科学技術分野への展開や新産業の創出発展性

新たな境界条件を設定して、これに応える燃焼学の体系を構築することが、新たなエネルギー機器やエネルギー産業創出へ繋がる。例えば、ここで例として挙げた酸素燃焼は、まだ本格的な産業利用がなされているとは言えない。しかし、この技術は、CO<sub>2</sub> 排出抑制に対し根本的な解を与えうるものであり、今後新たな産業創出につながる可能性がある。

#### ⑦ 2020 年までにおける達成目標とアプローチ

- 2015 年ごろまで : 輻射や化学反応を含めた燃焼限界に関する理論的背景の提示を行う。
- 2020 年ごろまでに: 超高効率燃焼技術、CO<sub>2</sub> 回収燃焼の実現にむけた新たな燃焼学の体系構築に貢献する。



### 3.1.2 重点領域 2 : 「気泡・液滴・液膜の科学と制御—宇宙システムへの展開—」

気液界面は大きな密度ジャンプがあり、重力効果に極めて敏感である。沸騰気泡、燃料液滴、ヒートパイプ内部液膜、燃料電池など電極における気泡、シャワー液滴、結露液膜、生体内液膜など、多くの分野で重要であり、宇宙システムにおける重要な要素技術である。これらの気液界面現象、気泡・液滴・液膜の基礎現象を解明するため、対流のない微小重力環境における理想的流体実験を展開する。

#### ① 科学的な重要性

流体現象は、工学、理学(物理学・化学・生物学)、医学の多分野で見られ、その特性を明らかにし、積極的に利用してゆくことは、地上・宇宙を問わず、人類が幸福に生きて行くために必須である。人類が水の惑星と呼ばれる地球において、大気に覆われた地表面で活動している範囲においては、これまでに蓄積してきた知見によって、千変万化の多様性を示す流体現象を理解し、利用することが、かなり進んできていると言える。

幅広い多様性を示す流体現象について、リソースの限られているISSでの研究対象としては、「気泡・液滴・液膜の科学と制御」が最重要課題である。これは、相界面や密度差を有する流体現象が重力の影響を顕著に受けるため、宇宙環境におけるこれらの解明と利用がこれからの宇宙活動の進展にとって不可欠であるほか、地上での基礎・応用科学研究の発展に対しても重要となるからである。

#### ② ISS・きぼうでしか実施することができない理由

前節で述べたとおり、相界面や密度差を有する流体現象は重力の影響を顕著に受ける。またマランゴニ実験の例からもわかるとおり、長時間の観察より初めて明らかになる現象がある。以上より、「界面や密度差を有する多相系流体挙動とその制御」に関する研究は“ISSでしか出来ない最先端の科学研究”の宝庫である。

#### ③ 国際的な研究動向

液膜流や付着液滴では三相界面での薄膜蒸発を制御することにより、高効率熱交換が可能となるという技術開発的な目標がある一方で、三相界面挙動に関しては濡れ性の違いや蒸発による動的効果など未知な内容を多く含んでおり、これらの解明に対する科学的価値は高い。

これらの研究は世界的に見てもまだ初期段階にあり、長期的な課題となる。一

方、表面張力を制御することによりヒートパイプの飛躍的高性能化を目指す試みに関しては、地上現象に関しては日本が世界をリードしており、最近ではESAもこれに関心を寄せている。混合媒体の蒸発に伴って気液界面に生じる濃度勾配・温度勾配のいずれもが蒸発を促進する方向にマランゴニ対流を誘起させることが可能となり、ヒートパイプの除熱限界のみならず、熱抵抗の低減がどこまで可能となるかがこれからの課題である。

すでに研究者レベルでは日欧の協力関係が確立されており、短期的課題となる。早急な日本側のサポート体制の確立が望まれている。

#### ④ 研究の新規性、先端性、挑戦性

無重力、高真空という地上とは異なる条件を有する宇宙環境においては、そこでの流体现象の理解と利用とは未だ不十分であって、今後の人類の宇宙空間への進出を目指すにあたり、継続的な研究活動によって知見を蓄積して行くことが不可欠である。

#### ⑤ これまでの宇宙実験とのつながり

候補となるISSでの実験装置として、現在すでに液柱マランゴニ対流の実験を行っており、一連の支援システムを備えた流体物理実験装置(FPEF)がある。FPEFでは交換型装置部品である「ミッション部」のみを、各研究課題に適した仕様として設計製作可能である。一方、支援機器は少ないがユーザー側で使用可能な大きなワークボリュームが確保された多目的実験装置(MSPR)もすでに軌道上にあり、比較的制約が少ないので比較的短期間での装置開発が可能と考えられる。またESA(ヨーロッパ宇宙機関)が最近開発を計画している汎用流体実験装置では小型ながら、装置構成パーツの交換が可能であり、界面現象に関する一部の課題についてはヨーロッパ側の研究者との協力による実験が可能と考えられる。

#### ⑥ 10～15年後に新たな科学技術分野への展開や新産業の創出発展性

ヒートパイプをはじめとする熱交換技術の高度化など工学分野への展開に加えて、流体现象は、理学(物理学、化学、生物学)、医学の多分野で見られることからその展開の可能性は基礎科学から応用化学まで非常に広い。例えば、気体中の噴霧液滴、沸騰における蒸気気泡、溶液中の結晶核や凝固粒子、血流中の血球などの挙動が、ISSの微小重力環境において、通常重力場における挙動に対してどのように変化するか等、上述した多分野に関連する横断的な研究対象であり、新たな産業の創出に寄与できる可能性がある。

**⑦ 2020 年までにおける達成目標とアプローチ**

本領域の研究課題については、先駆的研究内容であることから予備研究や実験装置の開発のためにISS実験までに5年程度の時間を有する長期的研究課題と、すでに海外では研究が行われているが、新たな視点や実験の工夫を盛り込むことによりISS実験が3年程度で実現する短期的研究課題とに分けて行うのが適切である。

- 2015 年ごろまで : 気泡・液滴・液膜について基礎的な現象の把握と科学的な理解を目指す。
- 2020 年ごろまでに: 気泡・液滴・液膜挙動の制御による革新的な熱制御技術の獲得(軌道上実証)を目指す。

### 3.2 重点領域(短期的課題)

1.1 項で示された「きぼう」利用の【方向性①】『「ISS・「きぼう」でしか出来ない最先端の科学研究』のうち、(2)短期的な視点(3 年程度)で科学的知見の獲得を目指すべき領域として以下の 2 領域を設定する。

#### 3.2.1 重点領域 3 : 「無容器大過冷却状態からの新規物質創成」

高温熔融物質を無容器で浮遊させ、大過冷却状態からの凝固により、優れた機能性を持つ新たな準安定物質の探索を行う。また、地上では測定が困難であった、高温熔融物質の物性値(粘性、表面張力、密度など)の系統的高精度測定により、物性科学に貢献するとともに、産業的ニーズが高い高融点材料(高硬度材料として使われる合金や、光学材料や耐熱コーティング材として使われる酸化物など)について、物性値を体系的に計測する。

無容器浮遊実験は、地上でも電磁浮遊、音波浮遊、磁場浮遊などの方法を用いて行われてきたが、酸化物などの絶縁体試料では浮遊実験が困難であった。これに対して、静電浮遊炉では他の方法では浮遊が困難な物質も対象とすることができ、地上に比べて擾乱が格段に小さく大過冷却状態を実現することができ、新規な準安定物質の探索を行うことが可能である。わが国では、既に、無容器プロセッシングによる  $\text{BaTi}_2\text{O}_5$  等準安定相酸化物の探索と構造計測が進められていること、また ISS 搭載の静電浮遊炉が酸化物融体を中心として開発されることから、酸化物を中心とした準安定相の研究を進めることが有効である。この方法では、超急冷法では得られないバルク試料や新規の準安定中間相が形成される可能性がある。優れた機能性を持つ準安定物質の創成のためには、単に試行錯誤に頼るのではなく、用いる試料の組成を第一原理計算からの予測の基に選択することが望まれる。

なお、静電浮遊炉を用いた研究には、X 線による構造のその場観察や、生成過程のその場観察の手法が有用であり、ISS に搭載可能な小型装置の開発が強く望まれる。

#### ① 科学的な重要性

2011年ノーベル化学賞が与えられた準結晶や、金属ガラスなどに代表される準安定相は、これまでスプラットクエンチ等、超高速急冷法を用いて研究が行われてきた。このため、得られる試料は微細または薄いリボン状であり、また冷却過程が非常に短時間であり準安定相の選択過程の観察が困難である等の課題があった。無容器プロセッシングは、超急冷法とは異なり、擾乱のより少ない大過冷却状態からの凝固であり、新規な準安定相の創製が期待できる。さらに、この方法では超急冷法

では得られない深い過冷却状態を長時間に亘って保持することが可能であり、準安定相創製のメカニズムについて研究も併せて進めることが可能となる。

本研究は、(1)準安定相物質の探索、(2)当該準安定相物質の融体における構造及び物性計測を系統的に進め、「準安定相が得られる組成」「得られる準安定相が持つ特性」「準安定相を得るプロセス(冷却速度／過冷却度など)」等を明らかにし、準安定相材料の設計を可能にすることである。

また、高融点金属の融液物性(密度、粘性、表面張力)については、わが国は既に地上での系統的測定で多くの実績を挙げており、技術的課題はほぼ克服されているが、酸化物などでは浮遊させることが困難であり、微小重力環境が必須であり、宇宙環境利用実験の重要性がある。

## ② ISS・きぼうでしか実施することができない理由

物質の無容器浮遊実験は、地上でも電磁浮遊、音波浮遊、磁場浮遊などの方法を用いて行われてきたが、ISSでは地上では浮遊が困難な物質も対象とすることができ、地上に比べて擾乱が格段に小さい条件下で信頼性の高い実験を実施できる。

## ③ 国際的な研究動向

無容器プロセッシングを用いた準安定相研究は、欧米においても行われてきている。既にスペースシャトル実験において準結晶合金融体の研究が電磁浮遊炉を用いて実施されている。また、地上研究においても静電浮遊炉を用いた準結晶融体(TiNiZr)の放射光を用いた構造測定が行われている。ESA は電磁浮遊炉を ISS に搭載予定であり、合金系を対象として日本同様の準安定相研究が電磁浮遊炉利用を中心として推進される予定であり、日本人研究者の参入も多い。一方、酸化物融体に関しては、欧米での組織的な取り組みはなく、日本がリードできる。

## ④ 研究の新規性、先端性、挑戦性

準結晶や金属ガラスの発見は1980年代と材料科学においては非常に新しく、研究領域として新規性・先端性、挑戦性に満ちている。上述の通り、未だ準安定相創製メカニズムは確立されていない。特に酸化物に関しては、系統的な研究はあまり進められていない。

## ⑤ これまでの宇宙実験とのつながり

宇宙実験と準安定相研究との繋がり、無容器プロセッシングによる過冷却状態の利用である。1990年代は浮遊技術の未熟さから、微小重力実験の貢献は芳しいものではなかった。しかし、技術研究が宇宙機関を中心に精力的に行われ、地上に

においても安定した浮遊が達成されるなど、技術進展は著しい。

#### ⑥ 10～15 年後に新たな科学技術分野への展開や新産業の創出発展性

既に JAXA での研究で見いだされた強誘電  $\text{BaTiO}_3$  (超小型コンデンサ) や  $\text{BaTi}_2\text{O}_5$  ガラス (高屈折率光学材料) は特許を取得し、企業において実用化研究が進められている。これらの例は、浮遊法によって得られる試料サイズは直径 2mm 程度であるが、(これらの新規機能材料の創製プロセス) が明らかとなれば、地上での大量製造や実用化に道が開けていることを示している。特に、昨今ではデバイスの小型化が進み、より大型の結晶を得ることが目標ではなくなっている。また浮遊凝固により得られる数 mm 直径の球状シリコン単結晶は、新しい太陽光発電素子として既に実用化されている。今後も、このような新しく見出された相の利用、また宇宙実験に由来した新しい材料プロセスは産業界に直接的に貢献出来る。

#### ⑦ 2020 年までににおける達成目標とアプローチ

- 2015 年ごろまで : 準安定相材料の探索と、高融点材料(特に酸化物など)について物性値を体系的に計測する。
- 2020 年ごろまでに: 「準安定相が得られる組成」「得られる準安定相を持つ特性」「準安定相を得るプロセス(冷却速度／過冷却度など)」を明らかにする。

### 3.2.2 重点領域 4 : 「宇宙環境を利用した社会に有益なソフトマターの探索」

実用化を目指した短期的な重点課題として、分子量の大きな分子の集合体からなる材料(巨大分子やソフトマター)を対象に、新たな材料や高品質な結晶の獲得を目指す。これらの分子では、分子間の相互作用が弱く、地上では重力偏析や対流の効果が著しく、結晶化が困難な困難であるのに対し、微小重力下ではこれらの困難を克服し分子を規則的に配列させることが可能となる。特に、創薬につながるタンパク質結晶や新たな機能性材料など社会に有益なソフトマターの探索を行う。

宇宙環境を利用した先導的応用化研究制度では、既に 1999 年から、産業応用可能な幅広い研究領域(高機能材料、高機能半導体、燃焼、タンパク質結晶生成、色材・香料、環境、再生医療、無接触プロセス、気泡成長)において、調査検討を実施した。その結果、タンパク質結晶生成及びフォトニック結晶生成を当面の有効な領域として絞り込み、宇宙実験を実施し、世界最高分解能解析を達成した蛋白質結晶の合成や、世界最大級のコロイド結晶の作製に成功している。

また、この後継制度である ISS 応用利用研究拠点制度の研究領域探索において、タンパク質結晶生成分野及び自己組織化による物質・材料創製分野が有効な領域として絞り込み、産学連携による産業応用に向けた宇宙実験を実施している。

これらの調査検討及び宇宙実験を通じて、比較的弱い分子間相互作用によって支配されている巨大分子から構成される特異な微細構造をもつ物質・材料の創製が、宇宙環境応用利用分野における主要な課題になりうることが明らかになった。自己組織化を利用した物質や材料へのアプローチは、通常地上研究において活発に行われており、従来の技術の延長では考えられなかった革新的な概念や新規現象の発現が見出され、様々な分野での産業応用が期待できる魅力的な領域である。

なお、これらの応用化テーマの選定・実施に当たっては、成果創出に不可欠な地上における準備(実験条件や理論仮説の設定など)を充分行った上で、宇宙実験として実施すべき対象や条件を絞り込むことに留意する必要がある。

#### ① 科学的な重要性

溶液中の巨大分子や物質などの弱い相互間力による自己組織化プロセスでは、地上では重力による沈降や対流によって生成物の完全性が阻害される。一方、ISS や「きぼう」日本実験棟の微小重力環境ではより完全性の高い自己組織化が実現することが検証されつつある。

例えば、コロイドやポリマー、コロイドゲル、巨大タンパク分子結晶、泡沫、乳濁液、石鹼溶液等の物質は、重力下ではその形成、組成に濃度勾配の影響を受ける。従って、微小重力下では、これらの濃度勾配を除くことにより、革新的な新材

料創成や、物質の特性把握などの研究ができる。

## ② ISS・きぼうでしか実施することができない理由

ソフトマターの中では分子同士の間に弱い力が作用しており、微小重力のような極めて静かな場においては、分子が規則的に配列することが期待できる。原料の分子は水のような液体の中で常に不規則な運動(ブラウン運動)をしており、規則配列を乱す要因になっている。さらに地上では重力の影響を受けて液中の分子は浮いたり、沈んだりするため完全性の高い集合体や結晶を合成することができない。宇宙の微小重力状態でも地上と同様のブラウン運動はあるが、原料分子が液体の中に均一に分布する場合には、分子間に働く力が弱くとも徐々に配列の規則性が高まり、完全性の高い素材や結晶を合成することができる。このためには通常数週間の時間が必要であり、これを実現する場として「きぼう」は不可欠である。本研究開発分野は大がかりな特別な実験装置を必要としないため、比較的短期間で成果が期待できる。

## ③ 国際的な研究動向

NASA は、Complex fluids 領域を微小重力研究の重要な分野であると認識していたが、研究の取り組みにおいては ESA が先行していた。NASA は、その重要性を再認識し、ESA との共同研究を通じて、又宇宙実験を実施して、この分野を育成し、今では、主要な大学において先端研究テーマとなっている。米国研究評議会(National Research Council,NRC)は、この分野を NASA が今後 10 年間に行うべき物理科学分野における重点領域の一つに設定した。シャトルなどの宇宙実験、地上研究を含めたインパクトファクタの大きい論文が多く出されてきた。

## ④ 研究の新規制、先端性、挑戦性

地上では取得困難な高品質で大きな単結晶やナノ構造を利用した高効率触媒の創製、及び、その産業応用を目指す。宇宙でないと実施できない先端的課題を取り扱い、世界初、世界最大、もしくは、世界最高品質の新規材料を宇宙で実現する。

## ⑤ これまでの宇宙実験とのつながり

1999 年から開始した先導的応用化研究制度では、幅広い領域(高機能材料、高機能半導体、タンパク質結晶など)において、産業応用可能な宇宙環境を利用した研究領域の調査検討を実施した。その結果、タンパク質結晶生成及びフォトニック結晶生成を当面の有効な領域として絞り込み、宇宙実験を実施し、世界最高分解能のタンパク質結晶や、世界最大級のコロイド結晶の作製に成功した



が、これらの実験を通じて、巨大分子同士の相互作用は通常の原子やイオン間のものに比べて非常に弱く、自己配列による完全性の高い結晶化を促進するためには微小重力環境が必須であり、これを産業応用の手段として利用するためにも微小重力の効果について定量的な研究を地道に積み上げることの重要性が認識された。

また、ISS 応用利用研究拠点制度では、タンパク質結晶生成分野及び自己組織化による物質・材料創製分野が有効な領域として絞り込み、産学連携による産業応用に向けた宇宙実験を実施してきた。特にタンパク質結晶生成実験では、微小重力効果を高める技術が蓄積し、タンパク質試料の高純度生成や拡散速度の調整などが有効であることが解明されており、この技術を分子の拡散場を利用した自己配列による巨大分子集合体生成実験に応用することができることが明らかになりつつある。

これらの調査検討及び宇宙実験を通じて、比較的弱い分子間相互作用によって支配されている巨大分子から構成される特異な微細構造をもつ物質・材料の創製が、宇宙環境応用利用分野における主要な課題になりうるということが明らかになった。自己組織化を利用した物質や材料へのアプローチは、通常の上地研究において活発に行われており、従来の技術の延長では考えられなかった革新的な概念や新規現象の発現が見出され、様々な分野での産業応用が期待できる魅力的な領域である。しかし、地上では対流や沈降により、現象の解明や分子の秩序化が困難な対象が多いため、微小重力での宇宙実験の果たす役割が大きい。

## ⑥ 10～15 年後に新たな科学技術分野への展開や新産業の創出発展性

本領域は、食品、化学物質、石油、化粧品、薬品、液晶デバイス、プラスチック産業等、幅広い産業で研究されており、現在及び将来の技術に不可欠なものとなっている。これらの材料とプロセスの直接の経済効果は、米国においては GDP の5%にのぼり、1 兆ドルになると報告されている。これらはまた、建設、繊維業、印刷、電子業界でも重要な役割を果たす。

例えば、宇宙環境から得られる高機能なパルス遅延素子は10億円規模、色素増感型電池は500億円、光触媒は100億円程度の市場規模を開拓することが期待できる。

また、「相互作用の比較的弱い系での巨大分子の自己組織化による構造形成」分野の実験においては、原料物質の精製・作製手法が極めて重要なカギを握っており、その調製にはマニュアルに表すことができないノウハウ、つまりは職人的勘と技が必要であることが、研究を進めていく中で明らかになった。これらは、わが国が最も得意とする「ものづくり」に基礎をおく分野であることから、その点においても重点化に相応しい分野である。

**⑦ 2020 年までににおける達成目標とアプローチ**

「相互作用の比較的弱い系での巨大分子の自己組織化による構造形成」に分類される物質・材料形成は多く存在する。ISSでの研究対象としては、これらに係わる課題の中から、これまでの宇宙環境利用実験の実績と教訓から、微小重力がより有効に作用するもの、実験系が明確なもの、産業応用に重要性の高いものなどを選択して実施すべきである。しかしながら、宇宙実験の実施において、短期的な研究開発投資の回収を急ぐあまり、十分な裏付けがないまま勘を頼りにトライアンドエラーを繰り返す従来の研究開発方法は好ましいものではなく、徹底した理論的考察と計算科学を駆使しながらのより科学的なアプローチが重要である。

応用利用分野の研究課題は、産業応用への成果の創出とその応用が大切である。具体的な課題を設定の後、3 年程度で、宇宙実験対象の設定及び実現性検討、宇宙実験装置の設計、開発、宇宙実験条件最適化を行う。また、その後 2 年程度で宇宙実験を実施し、地上への成果還元を図る。

○2013 年ごろまでに：構造形成  $\mu - g$  の寄与が有効である巨大分子の探索  
と精製手法・宇宙実験手法の確立

○2016 年ごろまでに：宇宙実験の結果の地上産業への応用を目指す。

### 3.3 重点領域(宇宙活動のための基盤的な研究開発)

1.1 項で示された「きぼう」利用の【方向性②】『宇宙活動のための基盤的な研究開発』で科学的知見の獲得を目指すべき領域として以下の1領域を設定する。

#### 3.3.1 重点領域 5:「宇宙火災安全の国際基準設定－有人活動の安全基盤構築－」

将来の有人活動のキーとなる技術の一つは宇宙における火災安全技術である。これまでの落下実験等から、微小重力場における固体材料の燃焼特性は地上とは大きく異なり、燃焼限界が拡大するなど重要なことが明らかになっている。このため、微小重力下における火災現象－可燃物の着火を与える下限のエネルギーや、継続的燃焼を維持できる下限の酸素濃度はいくらか、といった問いに対する答えが必要となる。これら微小重力下における火災現象を基礎的立場から解明すると同時に、これに基づく国際的な宇宙火災安全基準の設定する必要がある。

##### ① 科学的な重要性

将来の有人宇宙計画に向けて安全性の問題はますます重要となる。とくに、将来各国で有人宇宙船や宇宙基地の構想が進展したときに、材料の火災安全性について国際規格(ISO 規格)が制定されるような状況も想定される。このような場面において、我が国も宇宙開発国の一員として、一定の貢献をなす必要がある。特に固体材料の燃焼性については、第2期利用後半テーマとして、他国に先行してISS実験を実施予定であり、宇宙火災安全基準に関しては燃焼科学の立場から、国際的にもリーダーシップを取るべきである。

##### ② ISS・きぼうでしか実施することができない理由

固体燃焼は燃焼現象の中でも特に、現象の時定数が大きく、長時間かつ質の高い微小重力環境(ISS での実験)が必要となる。

##### ③ 国際的な研究動向

固体材料の燃焼に関しては、これまで NASA がスペースシャトルによる実験などを手がけている。しかし、これまでの研究では極めて限られた実験変数しか扱っておらず、また近年 NASA が基礎科学としての固体燃焼研究を中断していることもあり、近年大きな進展は見られない。一方、我が国では、燃焼場の酸素濃度や空気流速を精密に変化させることができる固体燃焼実験装置を開発中であり、数年後にはISS実験も予定されている。このような状況から、我が国の固体材料の燃焼性に関する基礎研究の面での競争力は極めて高いものと考えられる。

**④ 研究の新規性、先端性、挑戦性**

ISS 実験は、その先にある長期的有人活動の準備研究と考えることが出来る。その代表的な研究の一つが宇宙火災安全性に関するものである。材料の燃焼性は、局所的な反応速度と流れ場により与えられる物理特性時間の相互関係により決まることから、微小重力場における燃焼限界に関する情報を通常重力場で取得することは難しい。したがって、微小重力実験において本質的な材料の燃焼限界を明らかにしたうえで、これと地上の各種規格で与えられる難燃性基準との相互関係を明らかにすることは、極めて重要かつ先端的な研究と言える。

**⑤ これまでの宇宙実験とのつながり**

固体材料の燃焼試験に関し、我が国で軌道上実験を実施した実績はない。現在第2期利用後期課題に関する実験準備を進めている状態である。この課題では、単純な組成をもつ固体材料の燃焼限界を調べることを目的にしており、地上材料難燃性基準の相互関係を与えるには、より広い材料寸法や材質影響の研究が必要と考えられる。

**⑥ 10～15 年後に新たな科学技術分野への展開や新産業の創出発展性**

本領域は産業の創出へ繋がるものではない。しかし、固体材料の宇宙火災安全に関する新たな評価基準を与えることに繋がるもので、新たな科学技術への貢献と言える。

**⑦ 2020 年までににおける達成目標とアプローチ**

- 2015 年ごろまで： 固体材料の火災安全の観点からの燃焼限界取得を行う。
- 2020 年ごろまでに： 将来の有人活動の基盤となる火災安全基準策定へ貢献する。

### 3.4 重点領域(国際協力による長期的課題)

本領域は、1.1 項で示された「きぼう」利用の【方向性①】『「ISS・「きぼう」でしか出来ない最先端の科学研究』のうち、(1)長期的な視点(5 年以上)で科学的知見の獲得を目指すべき領域に位置づけられるものであるが、国際協力により海外のISS 搭載実験装置を利用することで、先端的な知見を得られる可能性がある領域として以下の1領域を設定する。

#### 3.4.1 重点領域 6 : 「極限環境・プラズマ環境における平衡・非平衡現象」

極低温、真空といった極限環境、あるいは電離したイオン・電子の集団であるプラズマ環境における非平衡現象の研究を行う。これまで述べてきたものでは、前者では固体 4He 研究が、後者ではダストプラズマ研究が該当する。固体 4He では、量子的な揺らぎの影響やボース粒子固体の性質を調べる、あるいは未解決の固体 4He の結晶形に関する物理の解明が期待できる。一方、イオン・電子・微粒子が混在し、全体としてプラズマとして振る舞うダストプラズマでは、微粒子が形成する規則的な構造(クーロン結晶)に関する物理(相図・相転移、臨界現象、結晶成長等)の解明が期待できる。この系は、自然界では白色矮星の内部や中性子星の外郭等を構成していると考えられており、さらには微視的結晶成長モデルや、星間分子雲・太陽系形成モデルへの寄与が期待できる。

#### ① 科学的な重要性

極低温における固体 4He は超流動相に 25 気圧以上の圧力をかけることで生成される。十分低温では、結晶成長を律速する凝固潜熱の発生がほぼ消失するため、非常に速く結晶は成長する。固体 4He における He 原子の量子的振動は大きく、通常の固体に比べて波動関数の広がりがとても大きい特徴があり、トンネル効果で原子の位置の交換が生じる。このような固体は量子固体と呼ばれている。低温では固体 4He は最密六方 (hcp) 構造になる。極低温にもかかわらず、固体 4He でもラフニング転移が観測される。特に、basal 面である c-facet のラフニング転移は地上で良く研究されている。また、c-facet に垂直な a-facet の転移も地上で確認されている。こういったラフニング転移は、数学的には 2 次元の Kosterlitz-Thouless (KT) 転移と等価であり、その転移点は界面 stiffness とミラー指数で決められるとされる。ところが 2 mK までの極低温において観測されているラフニング転移は、上述の 2 つとさらに s-facet についてのみであり、KT 転移が予測することと大きく異なっており、謎になっている。固体 4He では量子揺らぎが大きく、結晶面の原子ステップに大きい揺らぎが発現しており、平衡状態でファセットを観測するためには、ファセットの大きさの約 10 倍の結晶が必要になるとされている。ところが、これくらいの大きさになると、地上

では重力によって容易に結晶形を変えてしまい、あたかも液体であるかのように固体を収容している容器の形になってしまう。このため、地上ではラフニング転移そのものがマスクされてしまう。一方、微小重力では結晶形が歪むことを防止でき、長年の謎であるラフニング転位を理解することが可能と期待される。

一方、ダストプラズマは、宇宙において広く観察される自然現象であり、例えば、星間分子雲、原始惑星系円盤、惑星環、彗星の尾などがダストプラズマと言われる。ダストプラズマでは、微粒子間の静電的相互作用を粒子の運動エネルギーよりも容易に大きくすることができる。この状態はクーロン強結合と呼ばれ、強結合の状態が十分に強くなると、粒子が規則的に配列し、一種の固相を示す。これはクーロン結晶、プラズマ結晶等と呼ばれ、1986年に理論的な予測がなされた。その後、半導体等のプラズマプロセスにおける浮遊微粒子集団の発見も契機となり、クーロン強結合荷電粒子系における固相の形成・観察のための研究が開始された。1994年には、ドイツ、アメリカ、台湾、日本等でクーロン結晶の観察に成功した。

自然界では、白色矮星の内部や中性子星の外郭等における裸の原子核の系が強結合と言われているが、直接に観察することはほぼ不可能である。ところが、ダストプラズマでは、この強結合プラズマを比較的容易に実現できることができ、強結合プラズマの物理の理解が進むと期待される。また、クーロン力は長距離力であり、多体間の相互作用が関与するクーロン結晶の形成・成長の機構といった基本的な現象の理解にもダストプラズマの寄与が期待できる。

ダストプラズマの別の特徴として、個々の粒子の座標を直接的に求めることができることが挙げられる。このため、局所的な変動、即ち、数密度の時間変化の場所による違いといった揺らぎを知ることが可能である。これは例えば、荷電粒子系の臨界点といった統計力学上の古くからの未解決の問題において、十分広い観察領域が得られれば、臨界点からある程度遠い条件であっても、その理解が増すことを意味する。さらには、クーロン結晶と実在結晶との類似性といった固体物理的な観点からの研究や、電荷を帯びた粒子の凝集といった近年新しく発見された現象も興味深い。特に、原始惑星系円盤において重力が作用し始める前段階での粒子凝集モデルや太陽系形成モデルの構築に資するといったことが期待される。

## ② ISS・きぼうでしか実施することができない理由

これまで述べてきたように、 $4\text{He}$  結晶のラフニング転移を観察しようとするれば、地上では自重で変形してしまい、観察がほぼ不可能である。このため、微小重力下での実験が必要である。また冷媒を使用せず、長期にわたって使用可能な冷凍機として連続型 ADR が望ましいが、大きさ、重量的には曝露部への搭載が適している。さらに、所定の温度に到達するまでの時間は長時間が必要であり、ISS・きぼうでの実施が必須となる。

一方、ダストプラズマでは、三次元等方なクーロン結晶を形成することが長年の課題である。地上では、二次元的構造もしくは非等方な単純六方構造といった三次元構造が得られることが多い。これは、地上では粒子を浮かせる必要があり、浮かせるために電極付近の電場を利用するためである。電場により発生するイオン流により結晶構造が大きく歪むとされている。理論的には、面心立方や体心立方といった等方の結晶構造が予測され相図が描かれているものの、歪みにより、検証は地上では非常に困難である。

三次元等方のクーロン結晶の実現には、微小重力環境の利用が極めて有効である。ダストプラズマの実験に用いられる微粒子は、通常、直径が $1\text{ }\mu\text{m}$ ～数十 $\mu\text{m}$ 程度であるが、地上では電極付近の電場を利用したとしても、せいぜい直径 $10\text{ }\mu\text{m}$ 程度までが粒子を浮遊させられる限界である。粒子の電荷は粒子の直径に比例すると考えられており、臨界点等の強結合の度合いを大きくしたい場合には $20\text{ }\mu\text{m}$ 以上の粒子径が必要と予想されるため、微小重力の利用が必須である。

### ③ 国際的な研究動向

微小重力下における固体 $4\text{He}$ の研究は、2000年頃にProf. A. BabkinによってNASAに提案されたが、採択される前にNASAの基礎物理全体のプロジェクトがシャットダウンされてしまった。その後、固体 $4\text{He}$ の宇宙実験への試みを検討している国は日本を除いて存在しない。一方、ダストプラズマの研究においては、現状では欧州（ドイツ、ロシア）での研究が盛んである。これまで、小型ロケット・航空機やISSでの実験が実施されており、多数の論文が出されている。しかしながら、ボイド（粒子のない空間）が形成されてしまうため、ハイパワー（ $1\text{ W}$ 以上）では観察可能な領域が減少してしまう。このため、次々世代装置（Plasma Lab.）では振動電場を用いるといった方法によりボイド形成を抑制しようとしている。一方、我が国の研究者は、荷電粒子系における臨界点研究の提案から始まり、現在ではより幅広くオリジナリティある研究を進めている。我が国の最近の進展としては、ボイドの無い、あるいは非常に小さいクーロン結晶ができる目途が立ちつつある。

### ④ 研究の新規性、先端性、挑戦性

固体 $4\text{He}$ については、地上ではわずか3種類の平坦な結晶面（ファセット面）しか確認されていないが、理論的にはもっと多種類あってもおかしくなく、全ての有理指数面にファセットが生じるとの予測もある。その一方で量子ラフニングといって平坦面が出ない可能性も予測されている。このように固体 $4\text{He}$ の真の姿がどのようなものであるかは長年の謎である。一方地上での実験技術の進歩により、多数のファセット面が観察されたとの報告例も出始めているが、実験自体が非常に困難を伴うため、まだまだ多くの研究の蓄積が必要な段階である。この問題に対して最も的確に

答えを得る方法は、平衡状態で観察することである。その際、予想されるファセットの大きさの 10 倍程度の大きさの結晶が必要になり、十分な観察時間と微小重力が必要になる。連続型 ADR の完成、平衡状態に到達するための安定冷却、極低温での高解像での観察といった技術的課題は高いが、将来のきぼう曝露部での実験の実現を期待する。

一方、クーロン強結合プラズマ、なかでもクーロン結晶と呼ばれる固相は 1994 年に初めて形成に成功した比較的新しい現象であり、未解決の課題が数多く残されている。例えば、(1) クーロン結晶の形成機構（斥力等の相互作用）および成長機構（付着的か別の機構か等）、(2) クーロン結晶の真の結晶構造、相図および固相相転移の検証、(3) 荷電粒子系における臨界点、(4) 実在結晶との類似性、(5) パワーバランス・パーティクルバランス、(6) 粒子凝集等である。これらはどれも強結合プラズマにおける自己組織化を理解する上で重要な課題である。

これらの実験のため、ハイパワー（少なくとも 10～20 W）においてもボイドが形成されない装置の開発が必要となるが、そのためには、未だ存在しないボイド形成機構の理解に基づいた装置の開発が必要である。

## ⑤ これまでの宇宙実験とのつながり

固体 4He 研究では、当初、連続型 ADR 研究者と共同で航空機を利用した短時間微小重力実験の実施を目指してきた。ところが、連続型 ADR 試作機が航空機の振動等で異常動作を繰り返すことから、近年は通常の冷凍機の使用に移行している。温度が 0.6 K とやや高いものの、固体 4He の観察に成功している。ただし、こういった冷凍機では冷媒を徐々に失うため、長期間宇宙空間で運転を維持することは無理である。今後はまず 0.1 K 付近までの冷却を目指すと共に、結晶のデータ蓄積を図ることを期待する。

ダストプラズマ研究では、これまで我が国が装置開発を行って微小重力実験の実績は無いが、国際研究チームにおいて多くの理論的な貢献をしている。中でも斥力系では出現し得ない臨界点の可能性及び微小重力下でのその観測可能性を提案している点は注目すべきである。また、国際協力に基づく欧州の実験装置 (PK-3 Plus) の利用においても、日本人研究者による新しい成果(プラズマパラメータ計測等)が出始めており、今後一層の貢献と成果が期待される。

## ⑥ 10～15 年後に新たな科学技術分野への展開や新産業の創出発展性

固体 4He 研究もダストプラズマ研究も現段階は基礎的な知見を蓄え、現象の理解を深める段階であり、10～15 年のレンジで新産業に結びつく可能性は低いと言える。その代り、これらの分野において、著名な学術誌への学術的な成果の公表は大いに期待できる。ISS の科学的利用を謳う限りは、十分な学術的成果を得ることが



第一優先であることは言うまでも無い。

しかし、固体 4He での使用が想定される連続型 ADR が完成すれば、科学衛星に搭載し、長期間安定にセンサーを冷却することが可能になるであろう。それにより、より多くの宇宙に関する知見が蓄積できると期待される。また、ダストプラズマ研究におけるボイドフリープラズマが達成できれば、バルクのプラズマの領域において平坦な電位分布が実現できることを意味する。即ち均一性の高いプラズマであることから、プラズマプロセスにおいて、大面積の均一なプロセスの開発に貢献できるであろう。また、現在研究が進められているいくつかの計測技術が完成すれば、プラズマ密度が低くかつ中性ガス密度が高いプロセス用プラズマの計測に応用することが可能と期待される。さらに、クーロン結晶形成機構が明らかになれば、実在の結晶界面での原子・分子の取り込みを模擬した観察および微視的結晶成長モデル構築への応用、あるいは粒子凝集といった新しい発見が更に発展すれば、惑星形成過程のモデル構築等への応用等が期待される。

#### ⑦ 2020 年までににおける達成目標とアプローチ

固体 4He 研究では、装置規模が大きく、与圧部での実験が難しいと想定されることから、曝露部利用を目指した活動を進めることが適切と考えられる。

ダストプラズマ研究では、短期的には、「きぼう」に搭載されている多目的ラック用の実験装置開発に向けた基礎的な知見および技術を蓄積する。装置としては多目的ラックに搭載できる規模であると期待される。その際、クーロン強結合状態での液相・固相において、ボイド領域の形成機構の理解とプラズマパラメータ計測技術の確立に注力する。ボイド形成機構を理解した後、ボイドの形成されない装置の開発に取り組み、軌道上実験に臨む。軌道上実験では、(1) ボイドフリープラズマ生成の確認、(2) 固相の結晶構造の確認、固相相転移の確認、固相・液相の相図の検証、(3) 荷電粒子系における臨界点への到達、(4) 固相の形成機構と結晶成長機構の解明、(5) パワーバランス・パーティクルバランス、(6) 微粒子凝集機構の解明等が主たる研究課題になるものと予想される。ダストプラズマでは、電子密度・温度、イオン密度・温度、粒子数密度における粒子の三次元座標が基本的なデータである。これらのデータを用いて、固相の構造や平均粒子間距離、二体分布関数、粒子の速度分布関数等といった荷電粒子系の液相・固相を特徴付けるデータを求める。これらのデータと理論やモデルとの比較から、これらの研究課題の解決を図る。

- 2015 年ごろまでに： 2015 年以降のフライト実験を目指した基礎的な知見・技術の蓄積と、特定の重要課題（ボイドフリー）についての解決の目処を得る。

- 2020 年ごろまでに： クーロン結晶および液相の間の相転移、結晶成長、臨界点といった諸課題に関し理解する。

#### 4. 重点領域の研究推進の方策について

本物質科学分野シナリオWGは、宇宙環境利用科学の物質・物理科学分野における重点領域を以上に設定したが、その効率的推進を図り、優れた研究成果を得るためには、以下の諸点について考慮・実行されるべきであると考えます。

##### 4.1 重点課題の選定について

本WGでは、現在の研究動向と将来の発展を考え、物質・物理科学分野の重点領域を提案したが、重点課題を特定するには至っていない。個別の重点課題の設定には、適切な研究代表者の下にプロジェクトを企画し実際に実行可能な研究機関・研究組織が推進する課題を選定することが、妥当であると考えたからである。即ち、重点課題の選定には、本シナリオで提案する重点領域を参考にし、公募による課題提案を受け、きぼう利用推進委員会で選考・選定されるプロセスが妥当であると考えます。これは、プロジェクトの目的と達成目標を規定すると同時に、実施する研究代表者並びに研究組織を明確にし、責任所在を明確にする必要があると考えたからである。

##### 4.2 重点課題に選定における留意事項

- (1) 公募提案から課題を選定するに当たっては、研究目標と達成目標の独創性・卓越性は勿論、研究組織、研究期間、研究計画、研究経費等の妥当性も重要な観点として評価されるべきである。また、
- (2) 当該研究組織については、プロジェクト期間は勿論、研究成果を纏めあげ科学・技術的評価が完了するまで、専従的研究組織として継続・維持できるものとするなどの条件を課すことも必要である。
- (3) 本重点課題の研究は、世界唯一の研究リソースを利用するものであり、その選定と評価には、国際的な視点が不可欠である。即ち、ISSでの重点課題研究は国際基準を満たされなければならない、内外にその活動を広報されるべきだからである。このため、課題選定に当たっては、国外の研究者の意見・評価も参考にすべきである。例えば、欧米の指導的研究者による書類選考/評価を取り入れるべきである。

##### 4.3 評価システム

選定された重点課題・プロジェクトの遂行に当たっては、定期的に外部委員による評価を実施し、達成目標等の進捗状況のチェックと研究成果の評価を行い、実施計画の見直しや中止措置等を含む事後の効率的運営を図ることが必要である。

##### 4.4 実験支援技術および研究プロジェクトチームに対する留意事項

- (1) 搭載する実験装置については、既存(または計画済)の汎用的設備に強く制限することなく、課題の遂行に最適化された装置の搭載を検討すべきである。優れた

独創的研究成果を得るには、独自の実験装置が必要となる場合が多く、技術的な解決が可能な限り、装置開発が制限されるべきではない。

従来、物質・物理科学分野では既存装置に実験特有の仕様を盛り込んだ供試体を組み込むことで、多種多様な実験に対応してきた。しかし既存装置は開発当初の10数年前の仕様となっており、現在の最先端技術を最大限に活かせるシステムを検討すべきであろう。例えばラック自体の交換ではなく要素単位の交換や機能付加を行うことで、研究者にとってより魅力的な共通機器とするべきであろう。多目的ラックを利用した実験装置の新規開発については、開発期間・コストの面から重点課題テーマに特化するのが現実的である。

- (2) 重点課題の実施に当たっては、JAXA にプロジェクト実施を目指した研究協力体制の構築が必須である。供試体などの装置開発、プロジェクトマネジメントといった宇宙実験特有の作業を伴うので、研究者チームに JAXA 内の宇宙実験経験のあるメンバーを加える必要がある。従来の搭載実験装置には、当初の性能が得られなかったり、実験期間中に不都合を起こす例が少なからずあり、搭載技術の高い信頼性が求められる。これには、JAXA 搭載技術チームと当該研究チームとの緊密な共同体制が組織されなければならない、重点課題の選定に当たっては、これら共同推進研究体制の適合性についても評価されるべきであろう。
- (3) ISS実験では、クルーの関与を削減、必要な場合でも極力軽減すべきである。特に、物質・物理科学の実験では、実験試料の装着・取り替え、実験装置の制御、データ取得と地上への伝送等、すべての作業を地上で操作できるテレメーターシステムとすべきである。さらに、実験試料の地上への回収を必要としない実験計画を立てるべきである。
- (4) ISSは世界唯一のグローバルな共同利用研究施設であり、その利用には国際的な評価基準で運営されるべきであり、各研究プロジェクトは、国際的評価を経ると同時に常に国際的協力・共同研究体制の構築に努力されるべきである。

#### 4.5 その他、成果の取扱い、国際協力の在り方

##### (1) 研究成果の公開・広報とデータベースの構築

研究者および研究代表者は、宇宙環境研究が国民の広い支持・支援によって成り立っていることを認識し、「きぼう」で得られた研究成果やデータは、国民共有の知的財産であることを強く意識し、その公開と広報に努めるべきである。具体的には、実験の生データを含め、全てデータベース化する。実験データは、実験終了後1年間は代表研究者に優先権が生ずるが、その場合であっても、実験の進捗状況や公開できるデータや資料は逐次、公開されるべきである。この際、海外宇宙機関と共有可能なデータベース(英文でのデータベース作成)とすべきである。

データベース化にあたっては、JAXA による一元的管理が必要であるが、データへのアクセス権の制御、国際間でのデータ共有システムの構築、実験実施者(PI、や CI) でないと解析出来ないデータなどの扱いについては検討が必要である。

## **(2) 宇宙実験から得られる成果の考え方について**

JAXA 選定の「きぼう」での宇宙実験については、その直接的成果および派生した研究成果については、「きぼう」利用により得られた成果であること、データの出自については JAXA または PI、CI の寄与があったこと、を明記する。

## **(3) 海外の ISS 搭載実験装置の利用について**

国際的な協力関係を構築し研究協力を進めるとともに、実験装置、リソース、利用手段等の多様化を図り、効果的に成果を創出することを目指す。

## 5. 公募によるボトムアップ方式により研究領域の開拓を目指すべき課題

上述した重点領域研究課題の推進は、優れた研究成果の達成および資源の効率的な配分のために重要な方策であるが、一方、ボトムアップによる課題提案についても、独創的な研究課題の発掘と広く研究分野の参入・拡大を目指して、引き続き実施していくことが重要である。これらのボトムアップ課題は、各研究者の創意に基づくものであり、公募により広く課題を募集し選定されるべきものである。

この分野には、これまで宇宙実験の実績が少なく、JAXA における重点課題領域としての設定の段階にないものの科学的・技術的に有望であると考えら得る分野や萌芽的課題や未成熟な課題、また、「きぼう」の資産(実験装置)を広く活用することで新たな知見の獲得が期待できる分野であり、以下にその一例を紹介する。


結晶成長を中心とした物質・材料科学の分野は、2.2.3 章に述べたとおり我が国が世界的に実績のある分野であり、SCOF や GHF など最先端の実験装置が既に軌道上に整備されている。特に“その場”観察による精密な結晶成長・評価方法の実現は日本が世界に誇れる技術である。これらの装置を使用した実験テーマについては、多様なテーマが想定され、ボトムアップ提案によりテーマの選定を実施することが適当である。例えば、温度勾配炉(GHF)を用いた高品位の混晶半導体等結晶の育成で、バンドギャップ等を制御した均一組成混晶など電子デバイス等に有用な材料開発や、その結晶成長のモデル解析研究などが考えられる。また、SCOF を用いた実験では、混晶系や多成分熔融系でのソーレ効果による拡散現象の解明や結晶成長機構への影響、結晶核形成メカニズムの研究なども考えられる。

基礎物理学および化学分野については、特に、自由な発想に基づく提案を期待したい。例えば、航空機実験では既に始められているが、固体ヘリウムにおける量子固体の結晶成長など、物理学の基本問題を明らかにすると同時に量子現象を可視化できるユニークな課題であると考えられる。化学分野では、重力効果は一般に個々の分子間の相互作用より遥かに小さいため、顕著な現象として現れることはないが、コロイドやタンパクなどの巨大分子集合体などメゾスコピックな系では重力効果は著しく、微小重力環境を有効に利用した研究が考えられる。この分野は、実利用分野とも深く結びついており、化学産業にも寄与できる可能性が高いが、宇宙実験に向けた取り組みが十分ではない。これらの分野に対しては、次回以降の募集での重点化を目指して、地上における研究を推進すべきである。

平成 23 年度 国際宇宙ステーション・きぼう利用推進委員会  
物質科学シナリオ WG 委員リスト

| 役職     | 氏名      | 所属・役職                       |
|--------|---------|-----------------------------|
| WG 長   | 壽榮松宏仁   | 東京大学 名誉教授                   |
| 副 WG 長 | 大田 治彦   | 九州大学大学院工学研究院 航空宇宙工学部門 教授    |
| 委員     | 依田 真一   | 宇宙科学研究所 学際科学研究系 教授          |
| 委員     | 塚本 勝男   | 東北大学大学院理学研究科 教授             |
| 委員     | 西野 耕一   | 横浜国立大学 大学院工学研究院 教授          |
| 委員     | 藤田 修    | 北海道大学大学院工学研究院 教授            |
| 委員     | 奥田 雄一   | 東京工業大学 理工学研究科 教授            |
| 委員     | 出口 茂(独) | 海洋研究開発機構海洋・極限環境生物圏領域チームリーダー |
| 委員     | 竹内 伸    | 東京理科大学近代科学資料館 館長            |
| 委員     | 佐藤 武郎   | 東北大学 名誉教授                   |
| 委員     | 石川 毅彦   | 宇宙科学研究所 学際科学研究系 教授          |
| 委員     | 吉田 哲也   | 宇宙科学研究所 学際科学研究系 教授          |
| 委員     | 足立 聡    | 宇宙科学研究所 学際科学研究系 准教授         |
| 委員     | 稲富 裕光   | 宇宙科学研究所 学際科学研究系 准教授         |

別表1 物質・物理科学分野における重点領域と「きぼう」利用の方向性との対応

| 重点化の方向性<br>(きぼう利用推進委員会設定)   | 重点領域1<br>「気泡・液滴・液膜の科学と制御」 | 重点領域2<br>「環境負荷低減のための新規燃焼システムの科学」 | 重点領域3<br>「無容器大過冷却状態からの新規物質創成」 | 重点領域4<br>「社会に有益なソフトマターの探索」 | 重点領域5<br>「極限環境・プラズマ環境における平衡・非平衡現象」 | 重点領域6<br>「宇宙火災安全の国際基準設定」 |
|---|---------------------------|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------|------------------------------------|--------------------------|
|  |                           |                                  |                               |                            |                                    |                          |
| <b>方向性① ISSでしか出来ない最先端の科学研究</b>  |                           |                                  |                               |                            |                                    |                          |
| (1) 長期的な視点で成果の創出を目指す分野  | ◎                         | ◎                                | ○                             |                            | ◎                                  |                          |
| (2) 短期間でブレイクスルーとなる技術・知見の創出を目指す分野  |                           |                                  |                               |                            |                                    |                          |
| ・地上における社会問題解決<br>(高齢化社会、慢性疾患など)   |                           |                                  |                               | ◎                          |                                    |                          |
| ・グリーン/ライフイノベーションへの貢献(エネルギー、環境など)  | ○                         | ○                                | ◎                             | ◎                          |                                    |                          |
| ・災害復興への貢献   |                           |                                  |                               |                            |                                    |                          |
| <b>方向性② 宇宙活動のための基盤的な研究開発</b>  |                           |                                  |                               |                            |                                    |                          |
|   | ○                         | ○                                |                               |                            |                                    | ◎                        |



## 別表2(1/2): 物質科学・基礎科学 平成 18 年度版利用シナリオの実施状況

宇宙利用科学分野報告書ー生命科学・物質科学・基礎科学ー  
宇宙環境利用科学委員会 物質・基礎科学作業部会(平成 18 年 9 月)

| 大項目      | 中項目   | 小項目          | ISS 利用計画の現状   |                    |
|----------|---|--------------|---|--------------------|
|          |   |              | 想定される ISS での実験  | 実施時期               |
| 結晶成長機構解明 | ・均一組成結晶成長のモデル化                                    | ・均一組成結晶成長実験  | 温度勾配炉を用いた結晶成長実験<br>(Hicari, Alloy Semiconductor)            | 2011～2012<br>実施予定  |
|          | ・結晶形態不安定化クライテリアと界面形態変化挙動の解明<br>・成長界面現象モデル化        | ・結晶成長その場観察実験 | 溶液結晶成長観察装置(SCOF)を用いたその場観察実験<br>(ICE, FACET, NanoStep, ICE2) | 2008 ～ 2012<br>実施中 |
| 高機能材料創製  | ・核生成制御に関する理解<br>・準安定相予測に関する理解<br>・準安定相の物性予測に関する理解 | ・無容器プロセッシング  | 静電浮遊炉利用   | 2014 ～ 実施<br>予定    |
| 高温融体熱物性  | ・液体構造モデル化<br>・高精度熱物性データ                           | ・無容器プロセッシング  | 静電浮遊炉利用   | 2014 ～ 実施<br>予定    |
|          | ・拡散現象モデル化   | ・拡散係数測定実験    | 現在計画なし(過去 1997MSL-1 等で実施)                                   | —                  |

別表2(2/2): 物質科学・基礎科学 平成 18 年度版利用シナリオの実施状況

| 大項目              | 中項目  | 小項目                                      | ISS 利用計画の現状                                      |                       |
|------------------|--|--|--|-----------------------|
|                  |  |  | 想定される ISS での実験                                   | 実施時期                  |
| 流体科学・熱流体現象解明及び制御 | ・界面駆動熱流体における不安定現象と内部構造組織化ダイナミクス<br>・界面変形を伴う流体数値シミュレーションの構築 | ・マランゴニ対流実験                               | 流体物理実験装置(FPEF)利用<br>(MEIS,UVP,DynamicSurf,JERMI) | 2008～2014<br>実施中      |
|                  | ・メゾスコピック界面流体力学   | ・(接触角,コンタクトライン)                          | 現在計画無し   | —                     |
|                  | ・沸騰二相流における微小重力効果の解明  | ・沸騰・二相流実験                                | 多目的ラック利用<br>(TwoPhaseFlow)                       | 2014 ～ 実施<br>予定       |
|                  | ・重力異存生体流体力学  | —  | 現在計画なし   | —                     |
| 基礎物理・基礎科学        | ・微小重力で顕在化する非平衡の解明  | ・微粒子プラズマ                                 | 海外装置利用(PK-3+)                                    | 調整中                   |
|                  |  | ・臨界点ダイナミクス                               | 現在計画なし   | —                     |
|                  |  | ・ヘリウム結晶成長                                | 航空機実験  | —                     |
| 燃焼科学             | 高速化学反応と流れの相互作用の解明  | ・噴霧燃焼メカニズムのモデル化<br>・火炎伝播挙動の数値シミュレーションの構築 | 多目的ラック利用<br>(GroupCombustion)                    | 2014 ～ 実施<br>予定       |
| 宇宙利用工学           | ・宇宙科学研究を可能にする新規技術開発  | ・冷凍機                                     | SMILES 冷凍機<br><br>航空機(ADR)                       | 2009～2011<br>実施中<br>— |
|                  |  | ・流体・熱制御(沸騰二相流)                           | 多目的ラック利用<br>(TwoPhaseFlow)                       | 2014 ～ 実施<br>予定       |
|                  | ・宇宙空間に進出するための新規技術開発  | ・月探査・利用のための工学研究                          | 現在計画なし   | —                     |

別表3.「きぼう」第1期利用期間(2008～2010)に実施した物質科学分野フライトテーマ

| 分野               | テーマ名                                   |                                | 代表研究者                     | 実験実施状況                |
|------------------|--|--------------------------------|---------------------------|-----------------------|
| 流体科学             | マランゴニ対流におけるカオス・乱流とその遷移過程               | MarangoniExp.<br>/MEIS         | 東京理科大学<br>河村洋             | 実施中<br>(fy2008～)      |
| 流体科学             | マランゴニ対流における時空間構造                       | Marangogni<br>UVP/MaranGogniat | JAXA/ISAS<br>依田真一         | 実施中<br>(fy2009～)      |
| 流体科学             | 高プラントル数流体の液柱マランゴニ振動流遷移における表面変形効果の実験的評価 | Dynamic Surf                   | JAXA/ISAS<br>鴨谷康弘<br>/松本聡 | 第2期で<br>実施予定          |
| 結晶成長科学           | ファセット的セル状結晶成長機構の研究                     | Facet                          | JAXA/ISAS<br>稲富裕光         | 実施済み<br>(fy2008)      |
| 結晶成長科学           | 氷結晶成長におけるパターン形成                        | Ice Crystal                    | 北海道大学<br>古川義純             | 実施済み<br>(fy2009-2010) |
| 結晶成長科学           | 微小重力下での均一組成 SiGe 結晶育成                  | Hicari                         | JAXA科学本部<br>木下恭一          | 準備中<br>(fy2011 末～)    |
| 応用利用<br>(ソフトマター) | 高品質蛋白質結晶成長(年2回、計6回)                    | JAXA PCG                       | JAXA、大学、民間企業ほか            | 実施中<br>(fy2008～)      |
| 応用利用<br>(ソフトマター) | 微小重力環境を利用した2次元ナノテンプレートの作製              | 2D Nano Template               | 名古屋工業大学<br>木下隆利           | 実施中<br>(fy2011～)      |
| 応用利用<br>(ソフトマター) | 微小重力環境でのナノスケルトン作成                      | Nanoskelton                    | 東京理科大学<br>阿部正彦            | 実施済み<br>(fy2011)      |

別表4. 第2期(2011～2013年頃)実施予定の物質科学分野2期利用テーマ(候補テーマを含む)

| 分野   | テーマ名  |                    | 代表研究者          |
|------|---|--------------------|----------------|
| 燃焼科学 | 宇宙船内低速空気流中における電線の燃焼特性におよぼす材料諸特性の影響          | Firewire           | 北海道大学 藤田修      |
| 結晶成長 | 微小重力における溶液からのタンパク質結晶の成長機構と完全性に関するその場観察による研究 | Nano Step          | 東北大学 塚本勝男      |
| 結晶成長 | 生体高分子の関与する氷結晶成長－自励振動成長機構の解明                 | Ice Crystal2       | 北海道大学 古川義純     |
| 流体科学 | 温度差表面張力流における不安定性の界面鋭敏性と制御                   | JEREMI             | JAXA/ISAS 松本聡  |
| 結晶成長 | 微小重力環境下における混晶半導体結晶成長                        | Alloy Semiconducor | JAXA/ISAS 稲富裕光 |
| 燃焼科学 | ランダム分散液滴群の燃え広がり と群燃焼発現メカニズムの解明              | Group Combustion   | 山口大学 三上真人      |
| 流体科学 | 宇宙開発の新展開に不可欠な沸騰・二相流を用いた高効率排熱技術のデータベース確立     | Two-Phase-Flow     | 九州大学 大田治彦      |
| 流体科学 | 落下実験から生まれた新しい微粒化概念の詳細検証～乱流微粒化シミュレータの構築を目指し～ |                    | 名古屋大学 梅村 章     |
| 結晶成長 | レーザー光回折による微小重力下でのコロイド結晶の構造解析と粒子間相互作用の研究     |                    | 京都産業大学 曾我見郁夫   |
| 燃焼科学 | 酸素燃焼の燃焼限界に関する統一理論構築のための極低速対向流実験             |                    | 東北大学 丸田 薫      |
| 燃焼科学 | 宇宙火災安全性評価の基礎となる重力条件による固体材料燃焼性変化の定量的把握       | Solid Combustion   | 北海道大学 藤田 修     |

別表5. JAXA 宇宙環境利用科学委員会 FY23 年度選定研究チーム一覧(航空機実験を含む地上研究テーマ)

| 分野                | テーマ名                                 | 代表研究者        |       |
|-------------------|--------------------------------------|--------------|-------|
| 高機能材料創成<br>/高温熱物性 | 静電浮遊炉研究 WG                           | JAXA         | 石川 毅彦 |
| 高温熱物性             | 微小重力下での酸素分圧制御による金属性融体の表面張力測定         | 学習院大学        | 渡邊 匡人 |
| 流体科学              | 微小重力沸騰・二相流研究会                        | 九州大学         | 大田 治彦 |
| 燃焼科学              | 液滴群燃焼ダイナミクス研究チーム                     | JAXA         | 菊池 政雄 |
| 燃焼科学              | 微小重力環境を利用した固体燃焼現象検討WG                | 北海道大学        | 藤田 修  |
| 基礎物理              | 次期実験装置 PK-4 を利用した微小重力実験計画検討          | 岡山大学         | 東辻 浩夫 |
| 結晶成長              | 成長メカニズムに依存するタンパク質結晶の完全性              | 東北大学         | 塚本 勝男 |
| 基礎化学              | 臨界密度ゆらぎ中での化学過程                       | (独)海洋研究開発機構  | 出口 茂  |
| 基礎物理              | 液体・固体ヘリウム WG                         | 東京工業大学       | 奥田 雄一 |
| 燃焼科学              | 共通微小重力実験装置を用いる高圧環境下における点火・燃焼研究チーム    | 日本大学         | 野村 浩司 |
| 結晶成長              | メゾスコピック系の微小重力化学                      | 北海道大学        | 辻井 薫  |
| 結晶成長              | 気相からの核形成と宇宙ダスト                       | 東北大学         | 木村勇氣  |
| 結晶成長              | バルク結晶成長機構                            | JAXA         | 稲富 裕光 |
| 高温熱物性             | 拡散問題研究会                              | 芝浦工業大学       | 正木 匡彦 |
| 結晶成長              | 大型・高品質 SiGe 結晶成長研究チーム                | JAXA         | 木下 恭一 |
| 結晶成長              | 微小重力環境下でのエマルションの安定性機能解明              | 千葉科学大学       | 坂本 一民 |
| 流体科学              | 微小重力環境下でのバブル・滴・フォームの印象派物理学           | お茶の水女子大学     | 奥村 剛  |
| 流体科学              | 界面現象と流体不安定性研究                        | JAXA         | 松本 聡  |
| 流体科学              | 界面熱流体システムにおける熱物質輸送現象とその制御 WG         | 東京理科大学       | 上野 一郎 |
| 基礎物理              | 多目的実験ラック利用を目指したプラズマ発生装置の開発           | 京都工芸繊維大学     | 高橋 和生 |
| 基礎物理              | 宇宙環境に適合する極低温冷凍技術の開発                  | 物質材料研究機構     | 沼澤 健則 |
| 結晶成長              | ナノ構造半導体デバイスの電気化学プロセッシング研究チーム         | 早稲田大学        | 本間 敬之 |
| 結晶成長              | 凝固研究チーム                              | (独)産業技術総合研究所 | 永井 秀明 |
| 流体科学              | 表面張力流利用デバイス研究会                       | 芝浦工業大学       | 田中耕太郎 |
| 基礎化学              | エンケラドゥスのブルーム探査に関わる国際連携および科学立案の FS 調査 | (独)海洋研究開発機構  | 高野 淑識 |