

**微 小 重 力 物 理 学 分 野  
研 究 シ ナ リ オ  
(微小重力科学分野研究シナリオ分冊)**

**初 版： 平成13年10月**

**宇 宙 環 境 利 用 研 究 委 員 会  
微 小 重 力 科 学 専 門 委 員 会  
微小重力物理学ワーキンググループ**

## 目 次

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| はじめに .....                    | 1  |
| 1. 微小重力物理学の特徴 .....           | 3  |
| 2. 微小重力物理学の研究の方向性 .....       | 4  |
| (1) 巨視的量子現象の原理的考察 .....       | 5  |
| (2) 臨界点近傍ダイナミクスの多様性と普遍性 ..... | 7  |
| (3) 複雑性をもたらす非平衡系の科学原理 .....   | 8  |
| (4) 巨視的スケールのゆらぎと関連の数理法則 ..... | 9  |
| 3. 研究領域および研究課題 .....          | 11 |
| 3. 1 巨視的量子現象 .....            | 11 |
| 3. 1. 1 概要 .....              | 11 |
| 3. 1. 2 微小重力の効果 .....         | 11 |
| 3. 1. 3 ボース-アインシュタイン凝縮 .....  | 11 |
| 3. 1. 4 量子核形成 .....           | 12 |
| 3. 1. 5 ヘリウムの結晶成長 .....       | 13 |
| 3. 1. 6 量子液体の流体现象 .....       | 15 |
| 3. 1. 7 量子干渉効果と重力理論 .....     | 16 |
| 3. 2 臨界点近傍の流体ダイナミクス .....     | 16 |
| 3. 2. 1 概要 .....              | 17 |
| 3. 2. 2 微小重力の効果 .....         | 17 |
| 3. 2. 3 臨界点近傍の緩和現象 .....      | 18 |
| 3. 2. 4 臨界点近傍での核形成 .....      | 19 |
| 3. 2. 5 濡れ層のダイナミクス .....      | 19 |
| 3. 2. 6 理論研究の課題 .....         | 19 |
| 3. 3 非線形現象と非平衡熱力学過程 .....     | 20 |
| 3. 3. 1 概要 .....              | 20 |
| 3. 3. 2 微小重力の効果 .....         | 20 |
| 3. 3. 3 反応拡散系の重力不安定性 .....    | 21 |
| 3. 3. 4 化学反応における重力相関 .....    | 23 |
| 3. 3. 5 非線形移流によるパターン形成 .....  | 25 |
| 3. 3. 6 複雑液体系のダイナミクス .....    | 25 |
| 3. 3. 7 無容器・無界面反応化学 .....     | 27 |

|                            |           |
|----------------------------|-----------|
| <b>4. 微小重力物理学に関連する宇宙実験</b> | <b>29</b> |
| 4. 1 米国 (NASA) の宇宙実験       | 29        |
| 4. 1. 1 低温および凝縮系物理         | 30        |
| 4. 1. 2 レーザー冷却および原子物理      | 34        |
| 4. 1. 3 重力および相対論の物理        | 36        |
| 4. 1. 4 生物物理               | 38        |
| 4. 2 欧州 (ESA など) の宇宙実験     | 39        |
| <b>5. 利用可能な実験装置</b>        | <b>43</b> |
| 5. 1 国際宇宙ステーションに搭載される実験装置  | 43        |
| 5. 2 低温物理関連の実験装置           | 43        |
| 5. 3 臨界点物理関連の実験装置          | 47        |
| 5. 4 複雑系流体物理関連の実験装置        | 49        |
| 5. 5 温度制御装置                | 52        |
| <b>6. 研究シナリオの具体的な進め方</b>   | <b>54</b> |
| 6. 1 研究シナリオ作成にあたっての視点      | 54        |
| 6. 2 研究シナリオの具体的な進め方        | 55        |
| <b>参考文献</b>                | <b>57</b> |
| <b>関連機関アドレス</b>            | <b>64</b> |

## はじめに

ニュートンは重力場における物体の運動に着目し、古典力学を構築した。一方、20世紀の物理学では、物質の微視的な構造に着目した物性の研究が中心課題であったために、重力は表舞台から長らく姿を消していた。近年、低温技術やレーザー冷却技術などの技術革新により「原子を制御すること」が可能になり、集団的相関が重要な相転移や界面現象などを支配する基本法則の検証を行うために、高精度な環境設定を実現する重要な要素として、「重力の制御」が注目されるようになってきた。また、非平衡状態の熱力学、地球科学、宇宙物理学では、重力が関係する非平衡の熱流体現象が支配的な役割を果たしており、コンピュータシミュレーションによる非線形ダイナミクスの理解が進むのに従い、それぞれの現象を実験的に検証するために、「重力の制御」が可能な実験環境が有効と考えられるようになってきた。

欧米などの海外宇宙機関では、低温物理学、凝縮系物理学、原子物理学、重力及び一般相対性理論などの基礎物理学の分野で、基礎理論を検証するための実験環境として微小重力環境を利用する試みが最近10数年の間に進められてきた。その対象は、「電磁氣的相互作用が非常に弱い系」、「静水圧による圧縮を抑制した一様な実験試料が必要な系」、「観測対象を特定の空間領域に浮遊させることが必要な系」、または、「微弱な力学的擾乱が存在しても高精度な観測が不可能になる系」などである。特に、米国NASAでは、微小重力環境を利用する基礎物理学における科学的探究の目標として、「物質、空間及び時間を支配する基本的な物理法則の探求と発見」及び「構造や複雑性を発現させる自然原理の仕組みの発見と理解」を掲げ、国際宇宙ステーションの科学的利用に向けた実験の準備が進められている。

これまで日本では、微小重力環境を利用する基礎物理学の分野を微小重力科学の1研究領域として取り扱ってきた。しかし、日本の物理学研究の方向性や特徴を踏まえ、多くの研究者の関心を喚起し、微小重力環境を利用する基礎物理学研究の積極的な推進を図るために、当該研究領域を「微小重力物理学分野」と定義した。そして、物理学研究における日本の実績と特徴に配慮しつつ、微小重力物理学として適切な研究領域を抽出し、この情報を研究者に広く提供することによって、基礎科学における微小重力利用の推進を図ることとした。この目的を達成するため、宇宙環境利用研究委員会微小重力科学専門委員会のもとに設置された「微小重力物理学ワーキンググループ」によって、本分冊「微小重力物理学研究シナリオ」が編集された。

本分冊をまとめるにあたり、基礎物理学や基礎化学分野の日本の多くの研究者にとって新たな実験環境である微小重力環境の様々な利用方法やその背景にある考え方について、多角的な観点からの検討が加えられた。そして、微小重力物理学の当面の研究領域として、①「巨視的量子現象の原理的な探求」、②「臨界点近傍のダイナミクスの多様性と普遍性の探求」、③「複雑性をもたら

す非平衡系現象の探求」が提案されている。また、共通的に関係する領域として、「巨視的なゆらぎに対する数理法則の探求」が推奨されている。これらのすべてが宇宙実験を組み込んで探求すべき課題とは限らないが、数理科学としての理論面の考察を重視し、また、それぞれの現象と重力との相関に着目して探求を進める考え方が根底に流れている。

本分冊は、当面の目的として“微小重力物理学分野の研究の視点”及び“宇宙環境利用に関する地上研究公募（微小重力物理学分野）で推奨されるべき研究の領域と具体的な課題例”を知るために利用されることを想定している。また、国際宇宙ステーションにおける宇宙実験テーマの国際公募に対して、“微小重力物理学分野として利用可能な実験機会と実験装置の概要”を知るためにも利用できるよう配慮されている。

微小重力物理学ワーキンググループでは、今後、本分冊の充実を図っていく予定であり、将来的には、「地上研究公募」と「国際公募」での研究課題の重点化も視野に入れた検討を進めることとしている。そして、微小重力物理学研究の進展に合わせ、本分冊を逐次改訂する予定である。また、その間、本分冊をNASA公開ホームページに掲載し、関連する研究者や一般読者の意見を求め、改訂に反映させていくものとしている。

#### [研究シナリオの目的]

研究シナリオ制定の目的を、以下にまとめる。

#### 微小重力物理学研究シナリオの目的

- ・ 微小重力物理学の目標と当面の研究の視点の提示
- ・ 公募地上研究で推奨されるべき当面の研究領域と具体的な課題例の提示
- ・ これまでの基礎物理分野の宇宙実験概要、利用可能な実験装置などの情報提供
- ・ 微小重力利用の有効性に関する判断材料の提示
- ・ 日本の微小重力物理学研究の関心領域・方向性の集約

研究シナリオ作成のための視点及び進め方について、詳しくは、「6. 研究シナリオの具体的な進め方」を参照されたい。

## 1. 微小重力物理学の特徴

コップの中の水が、表面に波が立たず、安定に見えるのは重力のためである。無重力環境では、水滴は自由浮遊し、その表面は振動するなど、地上とは大きく異なった振る舞いをみせる。一般に基礎物理分野における理論では、重力が考慮されていない場合が多い。このため、重力の影響を組み込んでいない物理理論の検証を、重力を伴う地上の実験環境で行うには一定の限界がある。例えば、物理学で重要な概念の一つである対称性は、重力によって破られている。浮遊した水が表面張力により振動する現象も、重力の存在する環境では顕在化しない。このような場合、それぞれの現象の本質を理解するには、重力のない環境における実験が必須になる。

重力を、長時間安定的に著しく減少させた環境、「微小重力環境」は、地上では実現し難い実験環境であり、これらは国際宇宙ステーションなど、地球を周回する宇宙機の内部で実現できる。流れや物質輸送を伴う系の力学的振る舞いは、重力の有無によって大きく異なるので、流体物理・結晶成長・燃焼科学などの分野では、微小重力環境を実験のツールとして利用し、様々な実験を行うための利用概念が既に確立している。

基礎物理分野における微小重力利用は、まず、「対称性の維持」に実験環境としての有意性を見出すことができる。即ち、「空間の等方性を維持した状態で、実験試料を特定の空間領域に自由浮遊させる必要がある場合」、「実験試料の圧力・密度を、試料全体で一様に保つ必要がある場合」に対して、微小重力利用が物理現象の把握を極めて容易にする。また、「平衡から遠く離れた非平衡の状態で生起する空間的・時間的な構造を、対流を排除して維持することが必要な場合」にも効果的である。このような実験条件が重要になる研究領域として、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）などがあり、統計物理学・凝縮系物理学・化学物理学に関連する課題を列挙することができ、NASA のジェット推進研究所（JPL）を中心に精力的な研究活動が進められている。

地上研究として、この分野では、我が国でも統計物理学・凝縮系物理学・化学物理学の研究者が多数存在し、これまで学術的に大きな貢献が為されて来た。しかしながら、微小重力環境を利用する基礎物理・化学の分野が、微小重力科学分野の研究シナリオにおける一研究領域として紹介されて来たために、その内容が十分に周知されて来たとは言い難く、国際宇宙ステーションの利用に向けた研究提案は殆どなされていない。そこで、微小重力環境を利用した基礎物理・化学物理の領域を新たに「微小重力物理学」と定義し、この分野の研究者に微小重力環境利用の情報を十分に提供する必要が認識されてきた。

基礎物理学を中心とした基礎科学の大きな目標は、必ずしも理論の応用にとらわれず、基本的な法則の探求と自然原理の理解を進め、包括的な理論を構築

することにある。基礎物理・化学物理分野における微小重力環境の利用は、新たな実験環境の獲得を通して、自然現象の把握に新たな視点を加えるという大きな意味をもっている。17 世紀に飛躍的に発展した古典物理学は、リンゴの落下に象徴されている。21 世紀、国際宇宙ステーションという人類の新たなフロンティアが現実のものとなった今、リンゴが浮遊する宇宙実験室の中で、革新的な自然原理の探求されることが期待される。

## 2. 微小重力物理学の研究の方向性

重力が減少した安定な環境が、宇宙環境の利用によって実現できる。宇宙環境の利用で達成できる重力場は、 $10^{-6}g \sim 10^{-4}g$  の範囲であり、これを「微小重力環境」と呼んでいる。微小重力環境の特徴は、自重による変形や静水圧による圧縮が抑制される、熱対流や密度対流による熱輸送・物質輸送が抑制される、密度の差による相分離が抑制される、物質を自由に浮遊させることができる、などにある。流れ、熱輸送、物質輸送が関係する流体科学、物質科学、材料科学、燃焼科学の分野では、微小重力環境を実験ツールとして利用する概念や方法論は既に確立している。

一方、統計物理学、凝縮系物理学、化学物理など基礎物理学に関連する研究分野では、上記の特徴を利用する考え方に加えて、特に、対称性の維持、静水圧の排除や自由浮遊の実現などに着目し、自然現象を理解するための基礎理論の検証や重力に鋭敏な現象の解析に適した実験環境を構築する視点から興味を持たれている。統計物理学、凝縮系物理学、化学物理の研究分野のうち、対称性の維持、無対流、静水圧の排除、自由浮遊の実現など、微小重力環境の特徴を利用して、基礎理論の検証や重力に鋭敏な物理現象の解析を目標とする基礎物理学関連の研究分野として「微小重力物理学分野」が定義されている。この分野における微小重力利用の価値は、主として次の考え方に代表される。

### ①実験試料を特定の空間領域に自由浮遊状態で長時間保持できる

原子集団を、高い対称性を維持して自由浮遊の状態で保持し、特定の空間領域に長い時間閉じ込めて繰り返し分光学的な計測を行うための環境場として微小重力環境が注目されている。レーザートラップ技術（レーザー冷却技術）の開発によって、中性原子気体の温度を  $mK \sim nK$  にまで冷却して原子の凝縮相（ボース-アインシュタイン凝縮）を実験的に作り出すことが可能となった。この凝縮現象は、超流動や超伝導と同様の巨視的量子現象であり、その本質を理解するための様々な研究が世界的規模で急速に進展している。このような極低温の世界では、重力のポテンシャルエネルギーが熱運動による原子の平均エネルギーを遙かに凌駕し、原子といえどもその運動は重力に

よる影響を大きく受ける。この結果地上では、冷却原子が自由落下によって、保持領域から逸脱することによって限られた観測時間（たかだか数分間）しか保持できないという問題が生じている。このような問題を解決する手法として、微小重力利用の検討が進められている。

### ②流体試料の圧力・密度を実験試料の全領域で一様に保持できる

二次相転移点（臨界点）の近傍で物理量にどのような異常性が現れるかを調べることは、臨界現象の統計力学にとって大きな課題となっている。このような実験研究には、臨界条件（温度、圧力、密度条件）を満たす精密な実験が不可欠となっている。地上では、静水圧のため実験試料に圧力勾配が発生する。一方、臨界点近傍では圧縮率などが発散し、わずかな圧力勾配によっても試料内部での一様な臨界条件を達成することが不可能となる。従って、流体相を伴う臨界現象の研究には、微小重力利用が必須と考えられている。

### ③非平衡相分離、化学反応系において拡散支配条件を実験試料の全領域にわたって保持できる

非平衡系の本質は、系の不安定性のゆえに微小なゆらぎが成長し、巨視的なスケールでの時空構造を形成することにある。これが目に見えるスケールにまで発達した空間パターンは特に散逸構造と呼ばれている。散逸構造の維持のためには、温度差や密度差が必要であるが、そのため重力下では対流が生じることから、これを維持することが困難になる場合がある。一方、微小重力下では、重力による密度対流が抑制され、散逸構造の発達が完全な拡散条件に支配されることになる。微小重力環境は、ある種の非平衡現象の観測に適した環境といえる。

これら微小重力の有効性を効果的に適用しうる研究の方向性として、以下を設定する。

#### （１）巨視的量子現象の原理的考察

通常、量子力学を用いて記述されるのは微視的な粒子の性質である。しかしながら、それぞれの粒子がコヒーレントな位相を持ち、相互の関係が巨視的なスケールにまで発達すると、巨視的な現象として量子効果が現れる場合がある。微視的な量子現象に対しては、多くの場合、重力効果は無視できるほど小さいが、このような巨視的な量子現象に対しては、重力効果が無視できなくなると考えられる。図 2-1 で概念的に示すように、巨視的量子現象を詳細に調べるためには、低温にすることによる熱ゆらぎの抑制のほか、微小重力環境を活用することによる自由落下・静水圧・対流の抑制が望まれる。微小重力環境を有効利用することにより、巨視的量子現象に関するより基本的・原理的な側面の理解を深め、量子力学のフロン



ティアを拡大することが期待される。巨視的量子現象の研究領域としては、「ボース-アインシュタイン凝縮」、「量子核形成」、「ヘリウムの結晶成長」、「量子液体の流体现象」などが考えられる。

巨視的量子現象の最も典型的な例であるボース-アインシュタイン凝縮は、相互作用のないボース粒子系（理想量子気体）を極低温に冷却することにより得られると予想された。最近のレーザートラップ技術の進展により、原子ガスの閉じ込めが可能となり、相互作用の弱い系でのボース-アインシュタイン凝縮を実験的に実現することができるようになった。微小重力環境を利用すれば、ボース-アインシュタイン凝縮体を長時間浮遊・保持させることができるので、ボース-アインシュタイン凝縮の安定性などを長時間にわたり詳細に調べることができる。

巨視的な量子トンネル現象の候補としては、量子核形成が考えられている。通常の核形成が熱ゆらぎにより誘起されるのに対し、量子核形成は量子トンネル効果によって核形成が起こる現象である。量子核形成の実証実験においては、壁からの不均一核形成や量子液滴の重力分別などを如何に抑制するかが課題となっている。微小重力環境の利用により、こうした困難を克服することができると期待されている。

巨視的な量子流体现象である超流動現象では、粘性がなく、高い熱輸送性を示すなど、通常の液体とは大きく異なる性質が現れる。ヘリウムの結晶成長では、このような超流動体の特性により、物質本来の結晶成長プロセスを詳細に調べることができる。また、臨界点近傍の量子液体においては、臨界異常と量子液体の特異性を反映した非平衡現象が現れると考えられる。このような臨界点近傍の量子流体の挙動や、超流動性が関係した結晶成長過程での重力効果などを明らかにするためには、等方的で均質な系を実現し得る微小重力環境の利用が有効であると考えられる。

その他、重力効果を直接量子力学的に観測する方法として、物質波の干渉実験がある。重力場中では重力ポテンシャルの影響で位相にずれを生じることが知られているが、このことを利用して、アインシュタインの等価原理の検証や重力の精密測定などを行うことができると考えられる。こうした研究に対しても、微小重力環境は有効な実験環境になると期待される。

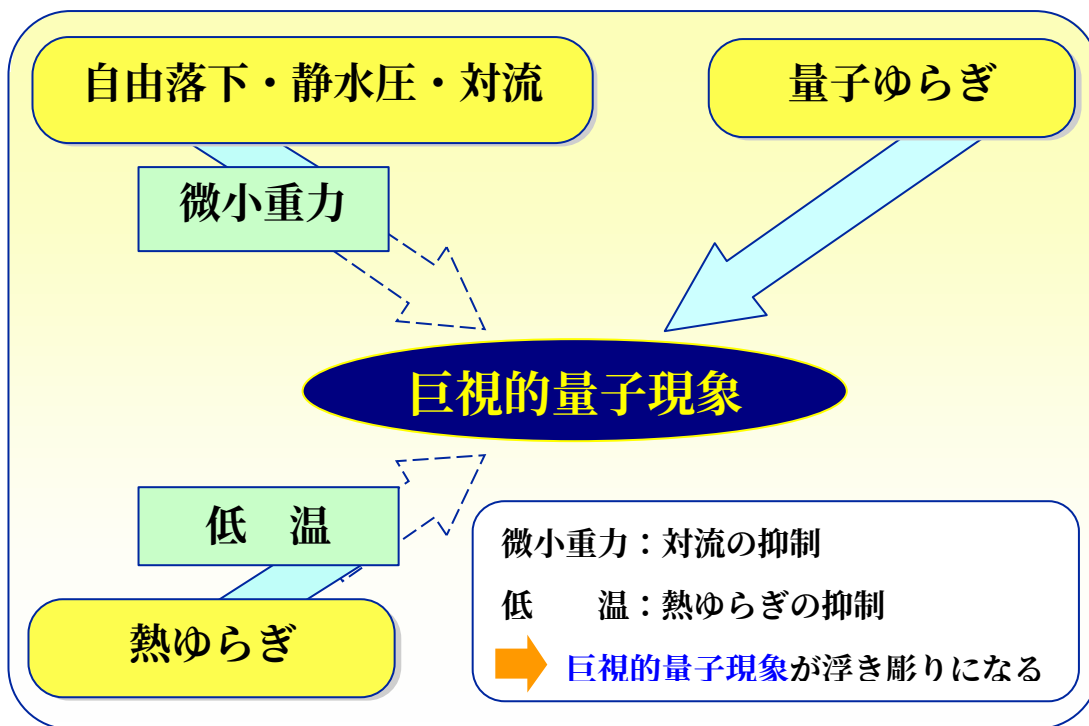


図 2 - 1 低温微小重力実験による巨視的量子現象の顕在化

## (2) 臨界点近傍ダイナミクスの多様性と普遍性

物質は、与えられた温度、圧力、組成などの条件のもとで、様々な平衡状態（相）をとる。これら諸相間の遷移を相転移と呼ぶ。また、特別な条件のもとでは二つの相の違いが無限小になる臨界状態が実現される。臨界状態が現れる条件は、臨界点と呼ばれる。物質は、その固有の臨界点に近づくと、圧縮率や比熱が発散するという物性値の異常現象を示す。例えば、気液相転移点の近傍（臨界点や気液共存領域）では、圧縮率、比熱、体積膨張率が発散するために、系の僅かな温度ゆらぎや圧力ゆらぎが、系の大きな密度ゆらぎの原因を作り出す。このため、静水圧が作用する地上では、臨界状態への接近に伴って系の密度が極めて不均一になり、臨界状態を系全体で一定値に維持できないことになる。この理由から、臨界点の物性研究では、静水圧を抑制できる微小重力環境の利用が本質的な役割を果たすものと期待されている。

臨界点では、いくつかの熱力学量は発散し、秩序変数は、ゼロに近づく。このため、臨界点の近傍で重要となる熱力学量（密度、比熱、圧縮率など）を温度の関数として近似し、系の振る舞いをより定量的に把握することが求められている。このような状況に対して、繰り込み群の考え方が適用され、熱力学量の発散を隔離して普遍的な関係や法則を取り出し、普遍クラス（普遍的な関係を満たす系の集合）を同定する試みがなされてきた。また、このような近似則の妥当性が、微小重力環境を利用して段階的に検

証されてきた。

一方、ピストン効果のような特異な効果の発見は、臨界現象における新たな普遍性を先導することになるといえる。このような視点から、今後の臨界現象研究で重視すべき対象は、臨界現象の動的側面に注目した、臨界点近傍の動的な非平衡現象の研究であると考えられている。具体的には、温度や圧力の僅かな変化に対しても相転移が起こり、新たな秩序が形成される系、僅かな流動場や熱流に対して著しく平衡状態から外れてしまい、特異な非平衡状態が実現される系について、臨界点近傍の緩和現象、核形成、濡れ層のダイナミクスを対象にするものである。

### (3) 複雑性をもたらす非平衡系の科学原理

散逸構造は、自然界のパターンをつくる科学的な仕組みと考えられている。雲の形、雪の結晶、ロウソクの燃焼、稲妻、生物の形態など、非平衡現象は、生物と無生物とを問わず、自然界の隅々にまで及んでいる。散逸構造の特徴は、微視的なスケールのゆらぎが系の不安定性の故に巨視的なスケールにまで成長し、それが時間とともに刻々と変化していくことにある。特に化学反応を伴う代表的な散逸構造は、反応拡散系で現れ、化学反応が物質の拡散と結合して、様々なダイナミクスを示すことが知られている。このような系では、温度勾配あるいは濃度勾配が、異方性をもつ空間構造の時間発展を決定する重要なパラメータとなる。図2-2に示すように、重力は、このような巨視的に発達したゆらぎに強く作用し、物理現象の固有な特性を変化させるなど、ダイナミクスとの強い相関を示すことになる。

非平衡熱力学系の安定性において重力を考慮した研究は、プリゴジンらのレイリー-ベナール対流におけるエントロピー生成の定式化に始まる。重力および流れを含む反応拡散系にまでこれを拡張し、系の非線形特性を理論的に予測することによって、自然現象に現れる複雑なパターンをより本質的に解明することが期待されている。

一方、微小重力環境を利用して重力を取り除くことができれば、対流および重力によるドリフトをなくし、拡散支配のもとに反応拡散系の本質を明らかにできる。熱ゆらぎ、密度ゆらぎの重力による緩和を抑制することができるため、微弱な相互作用に基づく新奇な相関現象を観測できる。空間に巨視的なスケールの物質を保持することによって、対称性が高く、非接触で理想的な境界条件をもつ反応場が実現できるなど、散逸構造の研究に本質的な寄与が可能となる。この他、準安定液体、コロイド分散系など流れが重要な役割を演じる複雑液体系の研究にも興味を持たれている。

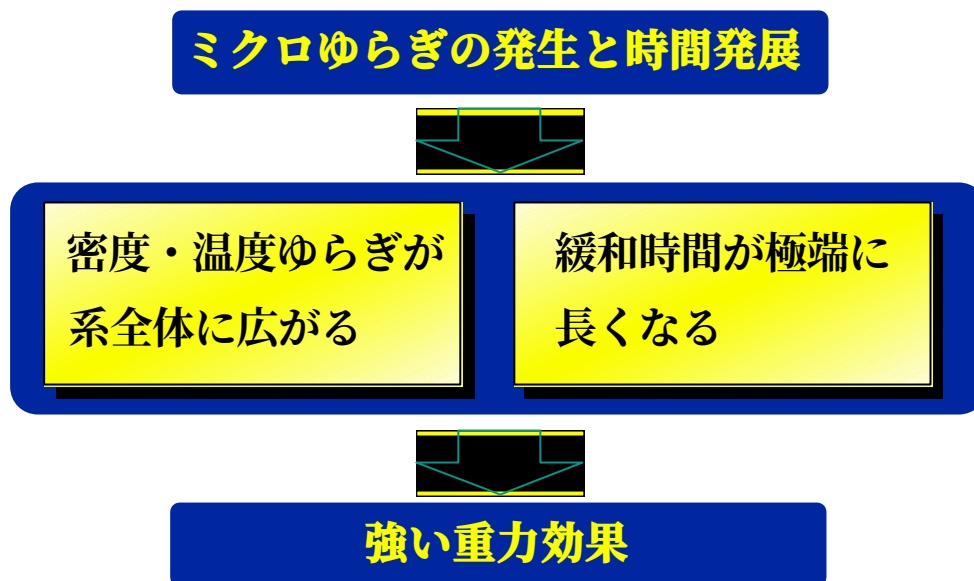


図2-2 ゆらぎの発達と重力効果の顕在化

#### (4) 巨視的スケールのゆらぎと関連の数理法則

これまで述べてきた、巨視的量子現象、臨界点近傍のダイナミクス、複雑性をもたらす非平衡系科学の領域には、対象となる物理現象が異なっているにもかかわらず、共通した数理法則が内在している。これは、「多体系に見られるゆらぎと関連の法則」と言えるであろう。例えば、対流パターン、化学反応パターンなどのように、非平衡系では微小なゆらぎが不安定化して巨大スケールでの時空間構造が形成される。対流におけるレイリー数など系を支配するコントロールパラメータを連続的に変化させたとき散逸構造が発生する点は分岐点と呼ばれ、パラメータをさらに変化させると散逸構造が変化する。分岐点においては不安定化しつつあるごく一部の自由度のみが重要であり、大多数の安定な自由度は分岐に寄与しない。このような自由度縮約のメカニズムは隷属原理と呼ばれている。自由度の縮約は分岐点近傍でしか成立しないが、分岐点でのダイナミクスは異なった系においても普遍的に成り立つことが知られている。この他、多体系のゆらぎを記述する数理モデルとして、繰り込み群によるスケーリング理論、素励起とモード結合理論、自発的対称性の破れによるゴールドストーンモード理論などがある。微小重力物理学は、普遍的に成り立つこれらの数理法則を微小重力実験によって実証し、自然界に成り立つ法則を深く理解することを目的としている。

以上のような方向性をもとに設定した研究領域を、図2-3にまとめて示した。

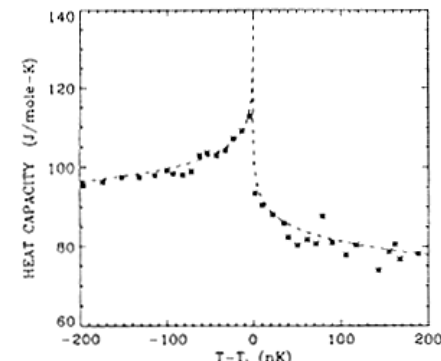
## 非線形現象と 非平衡熱力学過程

- ・ 反応拡散系
- ・ 化学反応における重力相関
- ・ パターン形成
- ・ 複雑液体系のダイナミクス
- ・ 無容器・無界面化学反応



## 臨界点近傍の流体ダイナミクス

- ・ 臨界点近傍の緩和現象
- ・ 臨界点近傍での核形成  
(沸騰および濡れ転移)

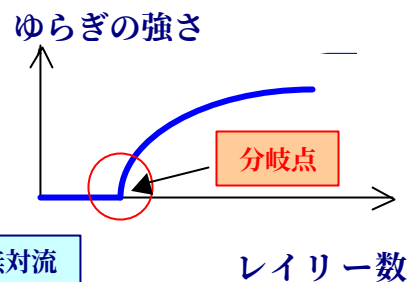


## 微小重力物理学

多体系のゆらぎと相関

## 巨視的量子現象

- ・ ボース-アインシュタイン凝縮
- ・ 量子核形成
- ・ ヘリウムの結晶成長
- ・ 量子液体の流体现象
- ・ 量子干渉効果



## ゆらぎと相関の数理

- ・ 自発的対称性の破れと分岐の理論
- ・ 繰り込み群 (RG) とユニバーサリティ
- ・ 素励起とモード結合理論
- ・ 非線形移流項の数理

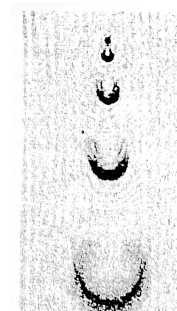


図2-3 微小重力物理学の研究領域

### 3. 研究領域および研究課題

#### 3. 1 巨視的量子現象

##### 3. 1. 1 概要

量子力学は自然現象を記述する最も基本的な理論体系であり、素粒子、原子核、原子、分子、固体、さらには宇宙に至るまで、様々な自然現象に対して適用され、その妥当性が検証されてきた。通常、量子力学は微視的な粒子の挙動をよく記述するが、相関が長距離にまで及ぶ場合は巨視的なスケールの量子現象が実現する。その典型的な現象として、ボース-アインシュタイン凝縮がある。ボース-アインシュタイン凝縮は、巨視的な数の粒子が同一の量子状態を占有し、巨視的なスケールにわたって量子力学的に位相を揃えた状態である。超伝導現象や液体ヘリウムの超流動現象などは、ボース-アインシュタイン凝縮の結果として理解することができる。こうした現象の発見は、量子力学の基礎的な理解と新たな概念の創出を促した。その他の巨視的な量子現象としては、巨視的トンネル現象が考えられる。これは、巨視的な自由度をもつ集団がポテンシャル障壁を量子力学的なトンネル効果によって透過する現象である。量子核形成は、その候補と考えられている。巨視的トンネル現象に関しては、実験的検証がなされつつあり、量子力学の基礎や観測問題とも関連した重要な研究テーマである。

##### 3. 1. 2 微小重力の効果

量子力学でよく記述される微視的な粒子に対しては、通常、粒子間相互作用などが支配的であり、重力の影響は無視できるほど小さい。しかしながら、ゆらぎが巨視的なスケールにまで発達した系においては、重力の効果が顕在化し、現象の本質が覆い隠されてしまうことがある。巨視的な量子現象に対しては、次のような微小重力環境の利用の利点があると考えられる。

- ① 液滴の重力分別を抑制し、凝縮体を長時間浮遊・保持することができるので、その形成・成長過程を詳細に観察することができる。(例：量子核形成やボース-アインシュタイン凝縮など)
- ② よく制御された環境で極低温における量子効果を観測することができる。(例：ヘリウム結晶成長における結晶面の性質など)
- ③ 相転移点近傍の精密測定が可能となる。(例：ラフニング転移や臨界点近傍の量子流体の挙動など)
- ④ 対称性の高い境界条件のもとで系の性質を調べることができる。(例：原子ガスのボース-アインシュタイン凝縮の閉じ込めなど)

### 3. 1. 3 ボース-アインシュタイン凝縮

レーザートラップ技術の進歩により、中性原子 (Rb, Na, Li, H) ガスを凝集させることができるようになった。これらの系では、粒子間相互作用が非常に弱く、粒子の挙動は理想ボース気体に近いという特徴がある。また、外場ポテンシャルで試料を保持することができるので、壁のない状態でのボース-アインシュタイン凝縮の性質を調べることができる。

#### (1) 相互作用するボース粒子系の安定性

ボース-アインシュタイン凝縮に関して、粒子間相互作用の効果による安定性の研究が行われている。引力的に相互作用するボース粒子系では、一般的には気相が安定に存在せず、高密度液体か固体に転移すると考えられていたが、 $^7\text{Li}$  原子気体のように引力相互作用をしている系においても、ボース-アインシュタイン凝縮が実現することが実験的に示された。このような実験結果を受けて、引力相互作用をするボース粒子系における準安定なボース-アインシュタイン凝縮およびその崩壊メカニズムなどが注目されるようになった。微小重力環境を利用して、凝縮体を長時間浮遊させれば、このようなボース-アインシュタイン凝縮の安定性を長時間に渡って調べることができる。また、微小重力下では等方的な境界条件が得られるので、そこでの実験結果と、等方的なポテンシャルを仮定した理論解析の結果とを直接比較することができる。

#### (2) 多成分量子液体の性質

原子ガスのレーザートラップ技術の進歩により、多成分系の凝縮も可能となった。特に  $^6\text{Li}$ - $^7\text{Li}$  系のようなフェルミオンとボゾンが混合した系においても凝縮相を実現することができるようになり、多成分系の凝縮に関する研究が様々な方面から行われるようになった。具体的には、フェルミオン-ボゾン間の相互作用の大きさや符号による相の安定性、密度分布などの静的な性質、集団モードなどの動的性質などが調べられている。また、相分離過程における量子核形成の可能性などについても議論されている。微小重力環境を利用すれば、多成分系における重力分別を抑制することができ、理論との詳細な比較が可能になる。

### 3. 1. 4 量子核形成

量子力学では、エネルギー障壁が存在していても、それを或る確率で透過することができる。それでは、どのくらいの大きさの粒子がトンネル効果によってエネルギー障壁を透過することができるのだろうか。高分子やもっと大きな集合体でも、量子効果によって透過することができるのであろうか。このような興味から、巨視的な集合体のトンネル効果を観測する試みが古く



からなされてきた。量子核形成は、こうした巨視的トンネル現象の一つの候補と考えられており、物性物理をはじめとして、宇宙物理、素粒子物理など様々な分野で研究されている。通常の古典的核形成は、熱ゆらぎによって誘起されるが、量子核形成は、量子トンネル効果によって引き起こされる。したがって、通常の古典的核形成が生じ得ない非常に低い温度領域において、純粋に量子力学的な効果によって核形成が起こる可能性がある。

#### (1) $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ 混合系における量子核形成

量子核形成に関連して、 $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  混合系について興味深い実験結果が報告された。それは  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  混合系の  $^3\text{He}$  希薄相の過飽和度が低温で温度に依存しなくなるというものである。このことは、熱ゆらぎによる通常の核形成とは異なり、量子トンネル効果による核形成が起きることを示唆している。また、核の有効質量のサイズ依存性を考慮することによって、実験結果を量子核形成と考えて妥当であることが理論的に示されている。

このような  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  混合系に対して、微小重力下で実験を行えば、重力分別を抑制することができるので、相分離後の  $^3\text{He}$  濃厚相の集積が抑制され、核形成や成長の初期段階における核（液滴）の観察が容易になる。また、微小重力下では、液滴を浮遊させたまま圧力や温度のコントロールできるという利点も考えられる。なお、微小重力下では、重力分別が抑制されるために、通常の希釈冷凍機の原理が使えなくなり、冷却装置に工夫が必要となる。

#### (2) $^4\text{He}$ を用いた量子核形成の実験

$^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  混合系以外のヘリウムを用いた核形成の実験としては、①液体ヘリウム中での固体ヘリウムの核形成、②液体ヘリウム中での気泡の核形成、③超流動ヘリウムでの量子渦糸の核形成などの実験が行われている。液体ヘリウムを用いた核形成の実験では、壁面からの不均一核形成を抑制することが課題である。微小重力下を利用して、試料を浮遊させることができれば、無容器実験が可能となり、不均一核形成を抑制することができると期待される。この場合、音波などにより、試料中央に核形成を起こさせる手段が有効になると考えられる。

### 3. 1. 5 ヘリウムの結晶成長

液体ヘリウムの研究は、ボース粒子系の性質、特に超流動現象の基礎的な理解に対して、実験と理論の両面から重要な役割を果たしてきた。超流動体では、量子コヒーレンスのために粘性が生じないなど通常の液体では見られない特異な性質を示すことが知られている。極低温領域におけるヘリウムの相転移や結晶成長・融解過程においては、このような超流動現象の特異性と種々の素励起が関与した興味深い現象が見出されている。



### (1) $^4\text{He}$ の結晶成長の特徴

超流動  $^4\text{He}$  の物性は通常の液体とは大きく異なるので、 $^4\text{He}$  は結晶成長の実験系として様々な利点がある。主な利点は以下のとおりである。

- ①熱輸送が非常に良く、質量輸送が速やかに行われる。(非散逸的に輸送される。)
- ②不純物をほとんど含まない。
- ③潜熱が非常に小さい。(融解圧がほとんど温度によらない。)

古典的な結晶成長では熱的な過程が支配的であるのに対し、 $^4\text{He}$  の結晶成長では、上記の性質のために力学的な過程が支配的になる。つまり、散逸機構としては、界面での素励起による散乱が支配的となり、系本来がもつ成長過程を観測することができる。また、 $^4\text{He}$  の結晶化では潜熱をすばやく奪うことができるので平衡系になりやすいという特徴がある。ラムダ転移温度よりも低温領域では、非常に速く結晶が成長することが知られており、そのカイネティック係数は、典型的な金属のものよりも約 10 桁大きい。

このように巨視的量子液体の特異な性質のために、 $^4\text{He}$  では非常に純粋で良く制御された環境での精密な結晶成長実験を行うことができる。

### (2) $^4\text{He}$ の結晶成長におけるラフニング転移と量子効果

結晶成長の過程において、その成長面の性質は結晶形状や成長速度などを決めるうえで重要となる。低温の  $^4\text{He}$  の結晶面では、量子ゆらぎが支配的になる。この結晶面では、結晶化波と呼ばれる素励起が生じ微斜面になっている。極低温での  $^4\text{He}$  の結晶面については、現在、hcp 固体では、3 種類のファセットが観測されているが、絶対零度で全ての面がファセットになるのかについては明らかになっていない。地上では重力のために、固体ヘリウムのヒーリング長 (約 1mm) よりも大きな固体表面は微斜面になることが知られている。微小重力環境で実験を行うことにより、絶対零度まで微斜面が残るのかを明らかにすることができれば、結晶成長における結晶面の安定化機構などに関して、より深い理解が得られると期待される。

### (3) $^3\text{He}$ の結晶成長の特徴

$^3\text{He}$  が  $^4\text{He}$  と大きく異なる点は、粒子の統計性とスピン自由度である。 $^3\text{He}$  の原子核は中性子 1 個と陽子 2 個でできているので、 $^3\text{He}$  原子はスピン 1/2 のフェルミ粒子として振る舞う。したがって、 $^3\text{He}$  の常流動相はフェルミ液体であり、そのままではボース-アインシュタイン凝縮を起こさない。しかし、mK 程度の低温では 2 個の  $^3\text{He}$  原子が対を形成し、超流動状態となる。これにより、 $^3\text{He}$  は  $^4\text{He}$  の超流動状態と同様な性質を示す。つまり、 $^3\text{He}$  の超流動相は、 $^4\text{He}$  と同様に熱輸送性が良く、潜熱が小さい。このため結晶成長実験を行うには、 $^3\text{He}$  超流動体も理想的な系である。 $^3\text{He}$  に特徴的な点は、原子核のスピン自由度が結晶成長に影響を及ぼし、核スピン整列固体と呼ばれる結晶に成長することである。この固相のスピン自由度のために、問題となる mK の温度領域では、素励起としては通常のフォノン (格子振動) ではなく、

マグノン（スピン波）が支配的となる。固体  $^3\text{He}$  においても、十分低温（サブ mK 温度域）では、結晶成長が速くなり、 $^4\text{He}$  の場合と同様に結晶化波が存在する。ただし、 $^3\text{He}$  の場合は、スピン流を伴う磁気的な結晶化波が生じ、その成長機構はマグノン散乱であると考えられている。

#### （４）固体ヘリウムの融解と構造相転移

固体ヘリウムは、格子間結合力が零点振動によって弱められているので、外部からの擾乱によって融解または構造相転移を起こしやすい。最近、音波によって、固体ヘリウムの融解や構造相転移を起こさせることが可能になった。ヘリウムの融解過程においては、negative crystal と呼ばれる興味深い現象が見出されている。これは、超流動液体が結晶中を移動するという、あたかも液体と固体の立場が入れ替わったように見える現象であり、固相の強い量子ゆらぎと超流動性が関係した現象である。構造相転移については、hcp と bcc の間の転移が観察されており、核形成と濡れが関連した興味深い振る舞いを示すことがわかってきた。微小重力環境を利用すれば、こうした系において、重力分別や壁からの影響を排除した環境で実験を行うことができる。

### 3. 1. 6 量子液体の流体现象

#### （１）超流動転移点近くの量子流体

重力下では、超流動転移点付近で超流動体と常流動体の二相が共存し、その移り変わりの厚みは  $1g$  で  $10^{-3}\text{cm}$  程度になる。熱流下では無重力でも超流動体と常流動体が共存することが理論的に予測されている。熱流が大きいと量子渦の熱抵抗などのために、実験に困難が伴うので、小さい熱流下での実験を行うことが望まれる。しかしながら、小さい熱流下では界面の厚みが増すために、重力による転移温度の空間不均一性が問題になる。微小重力環境を利用した高精度実験により、このような理論的な予測が検証されれば、量子液体の臨界点近傍における流体挙動に関する理解が深められると期待される。

この他にも、超流動相と常流動相の性質を利用した現象に関して興味深い予測がなされている。超流動転移点近傍の常流動体を冷却すると、超流動相が現れるが、その際、常流動相の余分なエントロピーを差し引かねばならないので、超流動相に最大熱流が流れる。この際、発生する量子渦の線密度は非常に大きいと予想されるが、これを観測するためには、非常に精度良く温度を設定する必要がある。ここでも重力の影響が深刻になり、未だ実験的な検証はなされていない。

微小重力環境は、こうした臨界点近傍での非平衡現象、特に超流動体の特異な物性を反映した興味深い流体现象の研究に対して、有効な実験環境として利用できると考えられる。

#### （２） $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ の混合系における熱流の効果

$^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  の混合系において、三重臨界点以下の温度領域では、二相共存が起こり、重力下では  $^3\text{He}$  濃厚相と  $^3\text{He}$  希薄相が上下に分離する。ここで、上から熱を加えると  $^3\text{He}$  は熱流によって下方に飛ばされるが、ある程度  $^3\text{He}$  が下方にたまと、 $^3\text{He}$  が集団的に上昇するという間歇的な常流動流が見出されている。このように、超流動と常流動の相分離、熱流、重力が複雑に関連した非線形効果は、興味深い現象であるが、ほとんど研究されていないのが現状である。微小重力環境を用いて、より理想的な系で実験を行うことにより、流体現象に現れる量子効果を明らかにすることができれば、量子性の関与する非平衡現象の理解が深められると期待される。

### 3. 1. 7 量子干渉効果と重力理論

#### (1) メゾスコピック粒子の干渉実験

電子などの微視的な粒子に関する干渉実験を通じて、物質に波動性があることが実験的に確かめられている。量子力学は、こうした実験結果に基づき、物質の粒子性と波動性を前提として定式化されている。それでは、どのくらい大きな粒子の集まり（大きな複合粒子）でも波動性を示すのだろうか。最近の実験により、従来の干渉実験で用いられていた粒子（電子、原子、二量体、小さいクラスター、中性子など）よりも 1 桁以上大きい複合粒子であるフラレン ( $\text{C}_{60}$ ) で、干渉性が確認された。

こうした干渉実験に対する重力効果は、従来の軽い粒子（原子・中性子など）を用いた実験では無視できるほど小さいが、重い粒子を取り扱う場合には問題になる。つまり、慣性質量が大きいとド・ブロイ波長が短くなるので、干渉縞の間隔が狭くなる。この干渉縞の間隔を拡げて計測精度を向上させるためには、飛行距離を長くするか飛行速度を小さくする必要がある。このため、重い粒子ほど飛行時間を長くとらなければならない、長時間重力の影響を受けることになる。これにより、重力下での実験では、粒子が重力により落下する距離などを慎重に評価し補正する必要がある。微小重力環境を利用すれば、このようなエラーを小さくすることができ、より精密な測定が可能になると考えられる。

#### (2) 量子コヒーレンスを利用した重力測定器

上記の干渉実験では、重力を排除すべき要因と考えたが、逆に、重力効果を積極的に利用することにより、重力の大きさを精密に測定できる可能性がある。重力場中では、質量をもつ粒子は重力ポテンシャルの影響で位相がずれる。このため重力の方向によって干渉縞がシフトする。この干渉縞から、逆に重力加速度を算出することができる。また、このような方法によって、重力質量と慣性質量を精密に測定することができれば、アインシュタインの等価原理の検証など、慣性系に対する理解も深められると期待される。

### 3. 2 臨界点近傍の流体ダイナミクス

#### 3. 2. 1 概要

物質は与えられた温度、圧力、組成などの環境のもとで、様々な平衡状態をとっている。例えば、水の気体、液体、固体の三相は、日常的にも見られる。これら物質の諸相間の移り変わりは、相転移と呼ばれる。相転移は、核形成、スピノーダル分解と呼ばれる不可逆過程によって進行し、しばしば多様な空間パターンの形成を伴う。また、特別な条件のもとでは、二相間の違いが無限小となる臨界状態が実現され、このような状況が出現する条件は臨界点と呼ばれる。臨界点近くの現象については、主だった側面の普遍的記述が可能であり、繰り込み群を始めとする理論と精密な実験との一致が知られている。複雑多岐な現象を理解するためには、普遍的な法則を見いだすことが本質的な進歩に結びつく。また、一方ユニークなあるいは特異な効果の発見は、新たな普遍性を拓きうるものであって、臨界点研究においてもこの両者が相俟って展開することが期待される。特に今後の臨界点研究で強調したいのは動的側面についてである。そこでは体系の様々な個性が現れてきてはるかに多彩な効果が想定される。即ち 1) 温度や圧力のわずかな変化に対し相転移が起こり新たな秩序が形成される。2) わずかの流動場や熱流に対しても体系は著しく平衡状態から外れ特異な非平衡定常状態が実現される。この節では気体液体相転移における臨界点近傍の動的な非平衡現象を考察する。これらの動的物理過程は、体系の詳細に依らない普遍的なものであり、理論および実験ともに、原理的考察に大きな意義がある。

#### 3. 2. 2 微小重力の効果

臨界点近傍では、比熱、圧縮率が発散するなど、物理的性質に異常が現れる。特に地上では、重力によって圧力差ができてしまい、臨界点に近づくに従って密度差が大きくなるために、臨界点は系全体に広がらず、部分的にしか成立しない。このように、臨界点近くの流体は重力に対して大変敏感であり強い空間的不均一性が引き起こされる。また熱膨張が著しいことから加熱に対し対流がすぐに発生する。微小重力下ではこの二つの要素、空間的不均一性と対流、が抑制できる。臨界点の研究では、微小重力環境を利用することが実験を成立させるために本質的に重要となる。

微小重力実験の初期には、単純液体での臨界点近くに、次のような強い重力効果が現れることが問題とされた。すなわち、第一に、ドイツのロケット実験によると微小重力下での臨界流体に異常に速い熱輸送が生じた。臨界点近傍では、いわゆる臨界緩和のため熱緩和が遅くなると思われていた当時の常識との矛盾が問題とされた。第二に、酸素や窒素などの単純液体における定積比熱の臨界ピークが弱い攪拌下で観測されるのはなぜかというものであ

った。地上重力下の静止状態では圧縮性流体の密度は高さに強く依存するため定積比熱の臨界ピークは観測できないのであるから、攪拌は重力効果を抑制することになる（一方では、臨界ゆらぎを破壊する）。この非平衡効果はどのように理解すべきか、という問題である。第一の疑問に対して、断熱的温度上昇の機構が提案され、ピストン効果と名づけられた。その後、数多くの実験が行われたが、実験家の関心は、「圧縮性流体のエネルギー移送は断熱的に即ち音波の形で伝わる部分がある」というピストン効果の特性に集中した。熱膨張係数が大きくなるに従い（即ち臨界点に近づくに従い）、断熱移送が熱拡散を凌駕するというのは十分目新しい考え方であったからである。例えば容器に封入された臨界流体を壁から冷やせば瞬時に全体が冷えるのである。このようなピストン効果を利用して、欧州やロシアで微小重力下での相分離実験がなされた。また第二の疑問については、流れ場中での流体の相転移の問題として一般化され研究が進展した。

この他、 $^4\text{He}$  系の熱流下では、超流動相と常流動相が共存し界面によって分離され、界面の厚みが熱流に依存するという超流動相転移の理論に基づいて、微小重力下での精密な温度の空間プロファイル測定が、NASA の宇宙実験として取り上げられた（DYNAMX 計画）。また、熱流を重力と同方向に流すと奇妙な定常状態が実現される。そこでは、臨界温度の重力による勾配と流体の温度勾配が等しくなり、温度と臨界温度の差が空間的に一様な領域が現れる。このような動的な非平衡定常状態についてもさらに実験が計画されつつあり、その進捗を見逃すことはできない。

### 3. 2. 3 臨界点近傍の緩和現象

ピストン効果関連では  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SF}_6$ ,  $^3\text{He}$  などの流体の臨界点近傍で実験がなされてきた。いわゆる超臨界状態での実験が多い。ここで重要な対象は発熱もしくは冷却された壁の周りにできる熱的拡散層である。この層は大きく膨張収縮し、内部の流体に対しピストンの役割を果たす。その結果、音速程度の速さで熱が伝わる。伝達効率も熱膨張係数が増大するに従い大きくなる。この状況について例をもって示す。体積が一定の二酸化炭素超臨界流体について容器壁の温度を変えると、流体全体の均一化は 1cm 程度のセルに関し  $10^5$  秒程度の時間で起こる。このように超臨界状態の流体力学は通常の下臨界流体と異なり熱拡散が遅いなど特徴的なものとなる。しかし、流体は圧縮率が高いので「断熱過程」が重要である。即ち、熱拡散は遅いが圧力伝播によるエネルギー移送は速く、いわゆるピストン効果により、等温化時間は 0.1 秒にまで短くなる。

超臨界流体の流体现象は、理論的には殆ど調べられていない。計算機実験によると、容器の下面が僅かに温められるとエントロピー過剰の部分「熱塊」が膨張して断熱的に上昇していく。また、容器の上面が僅かに冷やされ

れば「冷塊」が収縮して断熱的に下降する。さらに最近では臨界点より僅かに上（～mK から K）の  $^3\text{He}$  を重力下で下から熱すると熱塊による Schwartzchild 型の対流不安定性が起こることが報告されている。一方、微小重力では対流は起こりにくいが、条件次第ではジェット流れが起こることが示されている。このような実験事実に基づいて、新たな実験の実施と理論的解析が望まれる。

### 3. 2. 4 臨界点近傍での核形成

金属壁から流体への熱移動における沸騰は重要な工学的問題である（例えば原子力発電の熱交換における場合など）。熱流をふやしていくと、気体の泡が重力によって壁から離れる泡沸騰の状態から、泡が固体面を覆う膜沸騰の状態への転移が起こる。臨界点より離れていれば、気体は液体より密度が低く熱伝導ははるかに小さいので、膜沸騰の状態では流体と固体は熱的に遮断され、いわゆる“boiling crisis”が起こる。流体全体が静止した場合（プール沸騰と呼ばれる）とともに、より実用的な熱せられた管に流体を流す（シェア流・ポアズイエ流）場合の沸騰現象（flow boiling）も重要である。壁近くのせん断流が重要な制御パラメーターとなる。これらの現象では、

- ①一次転移（液→気）とそれに伴う潜熱の発生
- ②流動場の発生と泡の重力による上昇
- ③固体面が通常液体を濡らし気体をはじく濡れの問題
- ④臨界点より離れているとき泡の発生の初期に固体の凸凹によって支配されること

など、によって大きな影響を受ける。いずれにしる高度な非線形非平衡の現象であって深い物理的な考察はなされておらず理解は充分でない。

臨界点に近い場合の沸騰現象は、離れた場合と比べ、非常に異なる現象が考えられる。沸騰の初期過程では相関距離程度のスケールで相分離が進行する。また、臨界点に近づくに従って相関距離は指数関数的に増加する。このため、気泡の臨界半径はマイクロなサイズよりずっと長くなり、壁のマイクロな凸凹に支配されない現象となる。ここに系統の実験および普遍的理論の可能性がある。しかし気泡核の臨界半径の値は固体壁の濡れにも関係している。微小重力下で小さな泡の粗大化の時間発展を光学的に観察できれば非常に重要な知見となる。

### 3. 2. 5 濡れ層のダイナミクス

臨界点近くでは、いわゆる濡れ転移が起こる。即ち、気体を冷やしていくと固体壁に液体相の薄膜ができる。この様な場合の非平衡現象は殆ど調べられていない。臨界点に近い気体を共存線より下に僅かに冷やしたとき、沸騰と逆の凝縮（液化）現象が極めて起こり易いと思われる。

### 3. 2. 6 理論研究の課題

理論的研究においては、具体的実験状況に応じた考察とともに、圧縮性流体に対する動的 Ginzburg–Landau 理論に基づいた沸騰や濡れダイナミクスについての数値解析が有望である。仏のグループが超臨界流体に関して示唆に富む数値結果を精力的に生み出してきている。彼らは密度と内部エネルギー（温度もしくはエントロピー）を変数に入れた流体力学方程式を構成し、大きなスケールの流体運動に注目している。そのため気液界面や潜熱などが関与した沸騰現象や濡れのダイナミクスの数値解析は将来の問題となっている。相関距離と程度のスケールの小さな現象も視野にいった動的 Ginzburg–Landau 理論が必要になると考えられる。圧力変化、温度の断熱変化、重力効果をうまく方程式に取り入れる工夫が求められている。

### 3. 3 非線形現象と非平衡熱力学過程

#### 3. 3. 1 概要

対流パターン、化学反応パターンなど、非平衡系では微小なゆらぎが不安定化して巨大スケールのゆらぎを形成する。このゆらぎの時空間分布が、散逸構造である。対流におけるレイリー数など系を支配するコントロールパラメータを連続的に変化させたとき散逸構造が発生する点は分岐点と呼ばれ、さらにパラメータを変化させると散逸構造が変化する。複雑性をもたらす非平衡の科学原理において、分岐点の果たす役割は重要である。分岐点においては、不安定化しつつあるごく一部の自由度のみが重要であり、大多数の安定な自由度は分岐に寄与しない。このような自由度縮約のメカニズムは隷属原理とも呼ばれている。自由度の縮約は分岐点近傍でしか成立しないが、分岐点でのダイナミクスは異なった系においても普遍的に成り立つことが知られている。非線形ダイナミクスの自由度は、隷属原理によって低下する。このことは、式の単純化にとどまらない。縮約された方程式が普遍的であるということは、それを解析することによって、普遍性の高い法則の解明につながるという点で重要である。分岐点におけるダイナミクスの普遍性を整理すると次のようになる。

- ① 解の対称性が破れる。
- ② 巨大ゆらぎが発達し、散逸構造を形成する。
- ③ 重力、電場などの外場およびノイズに対する敏感性が生じる。
- ④ 自由度の縮約が生じ、縮約方程式と呼ばれるいくつかの基本方程式で記述される。

### 3. 3. 2 微小重力の効果

非平衡熱力学過程では、状態のゆらぎが時空間に発展し散逸構造が出現するなど、分岐点におけるゆらぎの挙動が重要な役割を果たす。重力は、巨視的なスケール（一般の流体系では $\mu\text{m}$  から  $\text{mm}$  のサイズ）に発達したゆらぎに強く作用し、現象固有の特性を変化させるなど、観測される物理現象の本質に関わるダイナミクスと強い相関をもつ。このような観点から、複雑性をもたらす非平衡系の科学原理を明らかにするために、次のような微小重力環境の利点が注目される。

- ①対流および重力によるドリフトをなくすことによって、拡散支配のもとに、反応拡散系の非線形現象の本質を明らかにできる。
- ②熱ゆらぎ、密度ゆらぎの重力による緩和を抑制することができるため、微弱な相互作用に基づく新規な現象を観測できる。
- ③空間に巨視的なスケールの物質を保持することによって、対称性が高く理想的な境界条件をもつ反応場が実現できる。

### 3. 3. 3 反応拡散系の重力不安定性

散逸構造形成の理論的研究は、非平衡熱力学の進展とともに線形非平衡領域から、さらに平衡から遠く離れた領域へと拡張されている。非平衡熱力学系の安定性において重力を考慮した研究は、プリゴジンらによるレイリー-ベナール対流におけるエントロピー生成の定式化に始まる。ここでは、重力項を含むリアプノフ関数をもつ反応拡散系にまで発展することができ、そのような反応拡散系では非平衡系の安定性がエントロピー生成によって維持されることが示された。一般の非平衡熱力学系では、必ずしもリアプノフ関数が定義できるものではないが、関数が知られる限りにおいて、系の定常解の安定性を評価することが可能となる。さらに、興味深い拡張は、これを反応拡散系において重力を含むリアプノフ関数にまで発展させることである。反応拡散方程式は、リアプノフ関数を極小にするように安定化する。重力項を含む反応拡散方程式を記述するリアプノフ関数を用いれば、重力項が定常解の安定化にどのように作用するか、あるいは、重力があることによって異なった反応ダイナミクスに分岐するかどうかを評価することができる。これまでの反応拡散系の研究では、本来含まれているべき重力項が無視されてきた。また、拡散が外場によって強くドリフトされる場合には、非線形な移流項も考慮する必要がある。重力と密度差が強い相関をもつ反応性流体（超臨界流体など）において、ここで議論した事柄は特に重要になる。

#### (1) ベナール-マランゴニ対流

平衡系においては、外部からの擾乱は系の安定性のために消失し、その痕跡を残さない。一方、非平衡系においては微小なゆらぎ、例えば、温度差や密度差などのゆらぎが不安定化して、巨大なスケールのゆらぎを生じる。非



平衡系では熱力学的ポテンシャルの勾配が生じており、その勾配が維持される限り散逸構造は安定である。ポテンシャルの勾配は、温度差、濃度差を伴うことから、重力場中では流れが生じる。特に、散逸構造そのものが重力の作用によって生じる場合もあり、最もよく知られた現象はレイリー-ベナール対流であろう。近年、重力対流とマランゴニ対流が複合した系における対流パターンの形成研究が多くみられるようになった。マランゴニ対流の微小重力実験が進展し、そのダイナミクスが解明されてきたために、改めてレイリー-ベナール対流が見直されてきた。

## (2) Belousov-Zhabotinsky (BZ) 反応

BZ反応に代表される反応拡散系においても、平衡から遠く離れた条件のもとで種々のパターンが形成されることが知られている。反応拡散パターンは、生物の形態形成のモデル系と考えられている。最近、チューリングパターン、自己複製パターンなど、新たな実験手法の進展があり、実験的研究も多様化している。化学反応する物質を運ぶ手段として対流と拡散が主に考えられるが、微小重力場では対流による部分がなくなり、化学反応に関わる物質の供給が減少する。プリゴジンらも、反応拡散系が重力・電場などの外場に敏感であることを理論的に予測している。我が国の研究者によって、BZ反応系において化学波の進行速度が重力ベクトルに対して変化することが見出されるとともに、微小重力実験によって拡散支配下での反応フロントの進行速度が定量的に求められた。

BZ反応に伴う対流現象として、ビッグウェーブとラセン化学反応波に伴う振動流、フローウェーブが知られている。ビッグウェーブは、空間的に孤立した化学波が表面張力の不均一に基づくマランゴニ不安定を引き起こすソリトンの波動である。この波動は、大きな伝搬速度と加速性、それに対流構造と表面波動を有し、その形成には流体運動が重要な役割を果たしていることが推測される。しかしながら、その詳細は不明とされており、重力対流の効果を除いたダイナミクスの評価が重要である。

## (3) 燃焼反応

スペースシャトルでの燃焼実験によると、水素と酸素をあらかじめ混合した予混合燃焼では、一つの炎が分離し、スポット状の炎を作り、それらが次々と、分裂し（それぞれの炎は同じサイズと形状に成長する）、やがては消えていくという、あたかも「花火」のようなパターンを形成する。これは自己触媒化学反応系において観察される自己複製パターンと非常に良く似ている。また、通常の重力場において各々が安定した炎の状態にあるロウソクをお互いに近づけると、ある距離内で炎が振動することが観測できる。微小重力下で同じような実験をした場合、振動あるいは同期現象があらわれるだろうか。固体燃料を空中に浮遊させて、燃焼させると自発的に炎の振動が起こる可能性がある。反応によって熱が発生し、対流と結合して反応速度が上昇する。一方、燃料近傍では、酸欠が起きて燃焼を阻害する。このような正

のフィードバックプロセスによって、炎の振動が起こる可能性がある。実際、発熱反応モデルにおいて、ルイス数が1より大きい場合（例えば、固体燃料）では燃焼波が振動しながら進行することが示され、状況によってはカオス的な振る舞いをすることも報告されている。この他、導火線のような一次元的な物や、紙のような二次元的な物を燃やした場合、格子状に燃料が離散配置している場合など、燃焼点あるいは燃焼面は一定の速度で進行することが観察される。反応拡散モデルの研究は、この方面での理論的研究に大いに貢献している。燃焼におけるこれらの不安定性ダイナミクスを微小重力下ではより定量的に研究できる。

#### （4）デンドライト成長

Mullins-Sekerka 不安定性の発見以来、デンドライト成長はパターン形成の代表的なテーマとして取り組まれてきた。既にスペースシャトルを用いた実験によって、地上では測定が困難な精度で不安定性パラメータが求められている。一方、フェーズ・フィールドモデルによる数値解析の発展によって、デンドライト成長が反応拡散系と同一のメカニズムによって生じることが示された。デンドライトの成長は、熱・物質輸送係数と界面成長カイネティクスが複合して生じるものであり、重力効果を排除することによってパターン形成の普遍性に関する考察が可能となる。

#### （5）リーゼガング反応

リーゼガング環の形成において、結晶核が周期的に出現する際に重力がそのスペーシングを変化するように作用する。重力は、核形成後に作用するのは自明であるが、問題は、スペース則が生まれるダイナミクスが核形成前なのか、後なのかは確立していない。同時に、現在のオストワルド不安定性に基づくリーゼガング環の形成理論では、重力効果が現れる大きな粒子が存在していながら重力の影響が考慮されていない。重力場中でのオストワルドライプニングは、理論的修正が加えられなければならない。このような理論の修正と検証に微小重力実験が有効である。

### 3. 3. 4 化学反応における重力相関

空間パターンの存在によってどのような物性が変わり、どのような性質を示すのかということを考える。粘性、電気伝導度などの輸送係数は、非平衡状態においても測定でき、散逸を特徴づける物性値といえる。また、化学反応速度定数は物理化学的な輸送係数である。一般には化学反応は位置エネルギーに比べてエネルギーが高く、重力は作用しないと考えられている。化学反応速度定数の測定において、重力は輸送速度を変えるだけであり、反応定数を変えるものではないとされている。しかし、反応物質の濃度変数をどうとらえるかによってこの考えは変わってくる。重力の効果をもたないミクロな反応分子のみを考える場合には正しいが、巨視的なスケールで不均一な密

度のゆらぎがある場合には、空間的なかたまりで反応が進行するために分子の配向などに重力が効き、化学反応速度定数が変わることもある。

#### (1) マクロ構造に依存する化学反応速度定数

一般にミクロスケールを考える限り重力が化学反応速度定数に作用することはない。しかしながら、上で述べたように、反応物質に階層構造があれば、マクロな体系で重力の効果が重要になってくる。化学反応過程にミクロな階層とマクロな階層の化学反応が存在するとしよう。ミクロに起因する化学反応速度定数（狭い意味の輸送係数、反応律速で定義された反応定数）は一定であるが、マクロ構造をもつ化学反応ではマクロ構造のゆらぎに由来する化学反応速度定数が構造の変化を通して外力（重力）の影響を受けると考えられる。この場合のマクロ反応過程は、有効反応定数で与えられ、定数は広い意味の輸送係数として考えることもできる。従って、例えば、巨大分子からなる酵素反応やマクロ構造を形成するBZ反応の反応定数も重力の影響を受けやすいと考えられる。このような例として、液晶系で知られている長波長のゴールドストーンモードが、短波長のモードと結合し、非線形相互作用によってソフトモード乱流を発生する場合を挙げることができる。これに磁場を印加すると、液晶ブラウン運動の回転自由度が凍結されることによりゴールドストーンモードの形成が妨げられ、ソフトモード乱流の形成を阻害する。磁場と分子との関係は、重力と密度との関係に類似しており、重力と共役な秩序、密度ディレクターの関与を強く示唆する。この考え方を化学反応に適用すると、次の二つの異なった状態の存在が予想される。すなわち、1) ゴールドストーンモードが関与する場合には、微小重力下でソフトモード乱流が発生し、反応係数が大きくなる、2) ゴールドストーンモードが存在しない系では、重力下で反応係数が大きくなる。BZ反応のリミットサイクルにおいて、攪拌の程度によって特性時間が変化するという経験からもゆらぎが化学反応と強く相関することが支持される。興味があるのは重力によって輸送係数が如何に変わるかであり、もし変われば重力が散逸に関与しエントロピー生成に寄与することになる。

#### (2) プラズマ自己組織化

数 $10 \sim$ 数 $100$  Torr の圧力領域にある低圧力プラズマについて、重力によってプラズマが不安定化する効果が知られている。このような領域にあるプラズマは、非平衡プラズマと呼ばれており、プラズマ気体中でのイオン化率が、 $10^{-8}$ 程度と低い。また、プラズマ状態は、電子衝突によって支配されるが、電子の運動エネルギー（電子温度）と中性気体の運動エネルギー（気体温度）が著しく異なっており、プラズマ中の温度ゆらぎがプラズマの安定性を大きく変化させる。このような系においては、プラズマの着火現象、プラズマ発光の自己組織化、およびプラズマ電子温度に重力が強く作用する。しかし、このような現象がどのように重力と相関をもっているか不明な点が多い。

### (3) 高分子重合反応

重合反応では、反応の進行とともに生成する分子は巨大になり、密度差の増大を伴って強く重力の作用を受ける。重力下では密度分布も形成され、これが反応の進行にフィードバックされるので、化学反応に重力が直接関与する系として有望である。特に、生体系超分子のパターン形成では、重力効果が知られており、生体分子の自己組織化や、生命起源に先立つ地表での化学進化との関連においても重合反応に及ぼす重力の効果に興味を持たれる。

### 3. 3. 5 非線形移流によるパターン形成

#### (1) 非線形な移流項が支配するパターン形成

微生物の自己組織化パターン形成において、微生物が分泌する化学物質が関与する走化性 (chemotaxis) が重要な要因になっていることが、大腸菌のコロニーパターン実験から報告されている。走化性とは、生物個体がある種の化学物質の濃度勾配を感知して積極的に移動することである。それを記述する数理モデルは反応拡散方程式に非線形な移流項を付加したものになる。このような関係式の新規性は、物質の流れが拡散項に加えて非線形な移流項に従って輸送される場合には新たなパターン形成のメカニズムが生み出されるという点にある。微小重力場ではマランゴニ対流 (あるいは外場) によって濃度場と流れ場が非線形に結合する系も実現でき、通常の反応拡散系では見いだせないダイナミクスを観測することが可能である。

#### (2) 生物対流

ミドリムシを容器に入れて光をあてると、容器の中で元気に動き回り水面に集合する。このような行動は結果的にトップヘビーの状況を生みだし、ベナール対流を誘起する。このような現象はなぜ生じるか。ミドリムシの正の走光性、負の走地性あるいは重力に逆らう運動が予想される。また、生物の密集によって走化性に近いダイナミクスも予想され、微小重力実験によって3次元的なパターン形成の様式が検証される。

#### (3) 水-油界面相互作用

水と油の界面での濡れ性や二相分離に重力はどのように関与しているのか。また、微小重力下ではどのような速度論に従うのか。さらに、二重円筒中の油-水界面に生じるソリトンのような波の微小重力下での振る舞いが興味深い。力場中では、明白な二相に分かれて現象が生じ、その界面に波 (ソリトン) が生まれる。二相の密度が大きく異なり、上下の関係が明らかたためにこのようなマクロな周期的構造やリズムが生まれるのである。このメカニズムには、対流による物質輸送と二相の密度差、界面張力、化学反応が重要な役割を演じている。密度差がなくなるとこの二相界面の上下関係がなくなり、二相に分かれる必然性がなくなる。この結果生まれるパターンはどのようなも

のになるか興味深い。

### 3. 3. 6 複雑液体系のダイナミクス

近年、高分子や液晶などいわゆる複雑液体 (Complex Fluid) の物理に大きな関心が寄せられている。これらの複雑液体においては、分子間相互作用に基づく特異な空間構造が形成され、現象の緩和時間も比較的長いことから非線形性、非平衡性が顕著に現れる。このため複雑液体は、分子の立体形状、異方性の大きい分子間ポテンシャル、分子間の協同現象など、種々の相互作用のもとに生じる相転移やフラクタル成長現象など、非線形性の強いダイナミクスを解明するうえで重要な寄与を果たすことが期待されている。複雑液体は溶媒との密度差が大きく、相関長も長くなることから、密度ゆらぎが長時間にわたって維持される微小重力環境は、この方面での研究成果に飛躍的な進歩をもたらすものと期待される。

#### (1) 過冷却準安定液体

過冷却液体をさらに冷却すると光散乱強度が強くなる異常光散乱が生じる。異常光散乱は、次のような興味深い特性を持つことが明らかにされた。1) 光散乱強度には方向性があり、空間的に固定された不均一構造の存在を示す。2) 動的な光散乱計測によると過剰散乱に伴うゆらぎは拡散法則に従って減衰する。このような過剰光散乱は、液体内にクラスターなど大規模な密度ゆらぎが生じることを強く示している。液体中での大きな密度ゆらぎは重力による対流を引き起こし、クラスター周辺の流れは、そのサイズおよび寿命に決定的な影響を持つことが予想される。微小重力下で高精度の光散乱計測をおこなうことによって、過冷却液体の構造、さらには、ガラス形成などのダイナミクスに関わる理論の詳細な検証が可能になる。

#### (2) コロイド分散系

一般に粒径が  $10\text{nm}$  から  $10\mu\text{m}$  の粒子をコロイド粒子とよぶ。近年コロイド粒子が液体に分散した状態 (コロイド分散系) が、原子あるいは分子の集団と極めて類似したダイナミクスを示すことが明らかとなってきた。たとえば、コロイド分散系においても固体-液体-ガラス状態などの相分離現象が観察され、相分離現象のモデル系として注目されている。重力下でのコロイド相分離現象においては、過渡的にコロイド粒子間にネットワーク構造が形成され、相互作用が重力に対して脆弱であることから重力崩壊が引き起こされる。このような研究では、微小重力下におけるダイナミクス計測が、相分離現象のモデル化をすすめるうえで極めて有益である。

コロイド分散系においては、その構成粒子が原子、分子と比べて大きいため観測が容易な空間的スケール ( $\text{mm}\sim\text{cm}$ ) で秩序構造が実現し、併せて系の時間的スケールも非常に長く ( $\text{ミリ秒}\sim\text{時間}$ ) なる。一方、原子、分子系では、ナノメートルの空間スケール、フェムト秒の時間スケールで応答する

ため、そのダイナミクスを解析するためには、X線、加速器など、大規模な評価装置が必要であり、実験技術上極めて制約が多い。コロイド分散系を用いれば、光学的な簡易な方法によって、原子、分子系でなされるのと同等の評価が可能であり、粒子間に作用する協奏的なダイナミクス、クラスター形成、成長カインेटィクス、あるいは相分離現象など最新の物質科学理論の検証が可能となる。

### (3) 光による協力現象

光誘起協力現象は、一つの光子で極めて多数の電子や分子が変化し、いわば、微弱な光励起によって相転移（光誘起協力現象、光誘起相転移）を起こしてしまうような現象である。例えて言えば、物質の中でたった一つの分子や電子が変化する微弱な光照射をきっかけとするドミノ倒しを起こすことに相当する。このような物質を探す上では、物質に内在するどのような相互作用（ドミノ倒しでいえば、個々のドミノ同士の重なり方）を利用するかが大切になる。例えば、クーロン相互作用が重要な物質の場合、光による協力的電荷移動反応が発生し、イオン結晶と中性（ファンデルワールス）結晶を入れ替わることになる。最近、共役ポリマーや電荷移動錯体では、密度の微妙なゆらぎが相転移現象に大きく影響を及ぼすことが知られるようになってきた。このような系では、光励起によって、電子状態のエネルギーに多重安定性が生じる、言い換えれば光励起によって非常に微妙なエネルギーバランスを保った状態に変化するとき、通常では効果がないと思われる重力のような微弱な外場にも物質は敏感に応答すると考えられる。このような観点で次のような課題が考えられる。1) 光による協力現象の制御：光誘起相転移のダイナミクス（電荷移動、異性化、磁性等、物質変化のドミノ効果）の研究、フェムト秒領域のエレクトロニクス技術を用いて、局所的励起から巨視的相転移への発展過程に関する知見を得る。2) 新しいプロセス技術の確立：光誘起微小ドメイン形成による強磁性錯体および液晶磁性体の創製。多光子重合によるポリマー核の形成と成長による多光子励起トリガー型結晶成長。

## 3. 3. 7 無容器・無界面反応化学

### (1) 微小重力下でのレーザートラップ、マニピュレーション、化学反応

微小重力下では半径  $10\mu\text{m}$  の液滴を簡単にトラップし、搬送することができる。さらに、紫外線レーザーなどを用いることにより、光化学反応を微小空間で起こすことも可能である。このテーマは将来大きく発展する可能性がある。

### (2) 液体表面上での化学波

反応拡散系で生じる時空間パターンは、生物の自己秩序形成とも関連していると考えられ、興味深い現象である。代表的な実験系として、BZ 反応が知

られており、リミットサイクル・進行波 (traveling wave) ・チューリングパターンなどが実験室レベルで確認されてきている。従来は、時間的・空間的に対称性の高い系が、境界条件の影響を受けずに (或いはそれを無視して)、生成する時空間パターンが興味を中心であった。一方、生命体は自ら特異な境界条件を作り、その中で化学反応を進行させ、境界条件自体も時間的に発展させている。そこで、ある閉じた空間内で生じる時空間パターンの研究が、これからの課題として重要である。イオン交換樹脂を用いたビーズ上で、ラセン波などの発生を観測した研究 (Showalter; 1989 年) はあるが、これは表面波を見ているだけであった。撥水面上、あるいはレーザーによってトラップされた水滴内に生じる、閉じた 3 次元空間上の時空間パターンを観測することは、興味深い実験テーマであると思われる。水滴内 (cm $\sim$  $\mu$ m) に生じる、化学波や化学振動をビデオで観察することを提案したい。水滴のサイズに依存した多彩な時空間パターンの出現が予測される。

### (3) 水滴 (液滴) の振動

地上重力下では、10  $\mu$ m スケールの水滴について、自励振動を引き起こすことができる。具体的には、赤外レーザーを用いて飽和蒸気環境を作り、核形成および液滴成長をさせる。成長する過程で“巨大水滴”と接触すると、0.1s 以下の時間で水滴は急激にサイズを減少させ、そして再び成長過程に移行する。周期は 5 $\sim$ 10s 程度である。同様な実験を微小重力下で行えば、cm サイズの水滴の自励振動を起こすことが可能であると思われる。散逸系でのリミットサイクル振動として興味深い実験系である。

#### 4. 微小重力物理学に関連する宇宙実験

欧米（NASA、及び、ESA など）で実施された微小重力物理学分野の宇宙実験成果の概要、及び、国際宇宙ステーションの初期利用段階に計画されている米国（NASA）の宇宙実験計画の概要について紹介する。

##### 4. 1 米国（NASA）の宇宙実験

これまで、基礎物理学に関する宇宙実験としては、「臨界現象」に関するものが多く行われてきた。臨界現象は「くりこみ群の理論」などによって理論的な説明がなされていたが、地上実験では重力の影響のために、その詳細な検証を行うことが困難であった。そこで、臨界現象に関する深い理解を得るために、微小重力環境を利用した研究が行われるようになった。例として、1992 年に実施された NASA の  $\lambda$  点実験<sup>4-1</sup>を挙げることができる。ヘリウムの超流動転移点では、比熱に異常が現れることが理論的に予測されていたが、地上実験では重力の影響のために臨界点近傍のデータが鈍ってしまい、その予測を確かめることは困難であった（図 4-1（左））。NASA は、微小重力環境を利用した実験を行うことにより、臨界点のごく近傍まで理論で予測された異常を示すことを確認することに成功した（図 4-1（右））。この実験以後、キセノン等を用いた気液臨界点の実験や、閉じ込めヘリウムの実験などが行われ、臨界現象研究のために微小重力環境の利用が極めて有効であることが実証されてきた。

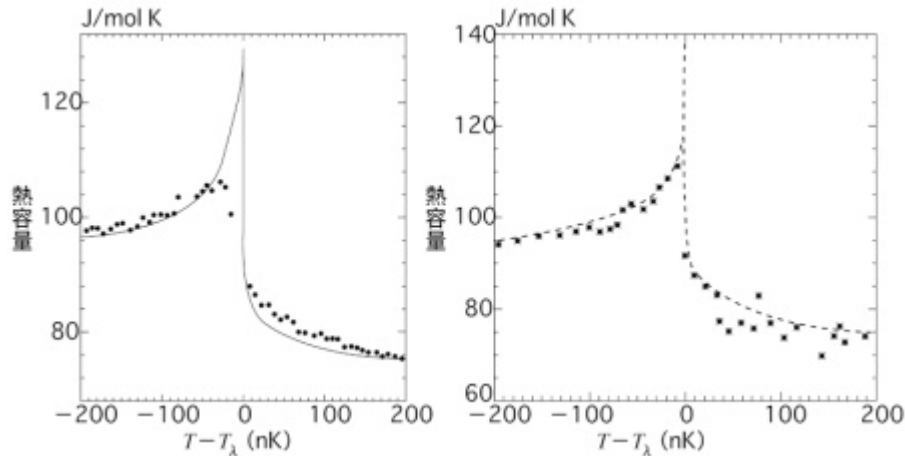


図 4-1  $\lambda$  点実験（LPE）． He の  $\lambda$  点近傍での定圧比熱測定の結果  
左：地上での測定結果（点で示した部分）、右：宇宙環境（微小重力下）での測定結果（\*で示した部分）（右：Physica B 197(1994)239-248）

<sup>4-1</sup> $\lambda$  点実験：液体ヘリウム 4 は、転移温度  $T_\lambda=2.17\text{K}$  で「常流動体」から「超流動体」への 2 次の相転移を起こす。この時、液体ヘリウム 4 の定圧比熱  $C_p$  は、 $\log |T-T_\lambda|$  に比例して転移点で発散することが、くりこみ群の適用で予測されていた。比熱の発散の様相を温度の関数としてプロットすると  $\lambda$  に似た形状になるので、 $\lambda$  転移とも呼ばれている。この発散の様相を確認する宇宙実験を、NASA は「 $\lambda$  点実験」と呼んだ。（図 4-1 参照のこと）



この節では、基礎物理学に関して、NASA がこれまでに実施してきた宇宙環境を利用した研究テーマ、および現在計画されている研究テーマの概要を示す。（詳細は、<http://funphysics.jpl.nasa.gov/>を参照のこと。）

NASA では、基礎物理学を微小重力研究プログラムの5領域<sup>4-2</sup>の1つとして定義しており、次の4分野によって構成するものとしている。

- (1) 低温および凝縮系物理 (Low Temperature and Condensed Matter Physics(LTCMP))
- (2) レーザー冷却および原子物理 (Laser Cooling and Atomic Physics(LCAP))
- (3) 重力および相対論の物理 (Gravitational and Relativistic Physics(GRP))
- (4) 生物物理 (Biological Physics(BP))

以下、NASA の基礎物理学領域における4分野の実験例および検討テーマの概要を示す。

#### 4. 1. 1 低温および凝縮系物理

低温および凝縮系物理の分野では、微小重力環境を利用して、巨視的な物質における多体相互作用を支配する原理を明らかにすることを目的として研究を行っている。また、このような巨視的な物質に関する原理が、ミクロな時間および長さスケールの相互作用を決める基本法則から、どのように構築されるのかについて研究を行っている。

低温および凝縮系物理に関して、これまでに行われた実験、および計画されている実験の概要を表4-1に示す。

表4-1 低温および凝縮系物理に関する宇宙実験

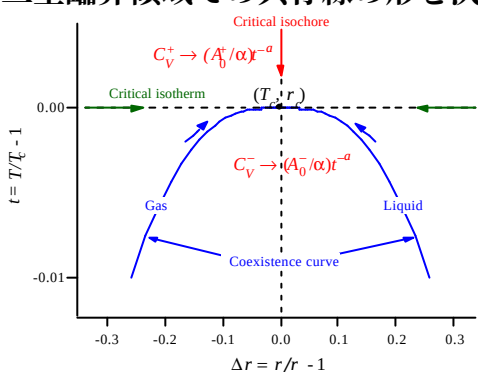
<現在までに行われた実験>

| 宇宙実験名称・日程                                                                  | 宇宙実験の概要                                                                                                        |
|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 入点実験 (Lambda Point Experiment (LPE))<br>1992年10月<br>(スペースシャトル)<br>(期間：9日間) | (1) 相転移近傍における液体ヘリウムの静的特性の測定<br>(2) 重力影響による入点計測データの欠損が、微小重力利用で回避できることを実証<br>(3) 微小重力の利用で、極めて精緻なデータ計測が可能であることを実証 |

<sup>4-2</sup> 他の分野は、バイオテクノロジー、燃焼科学、流体物理、物質科学である。

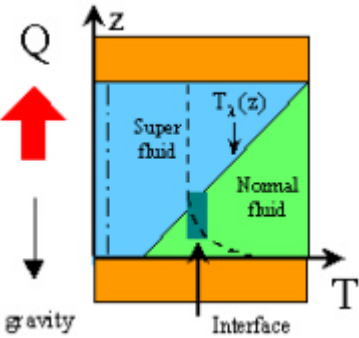
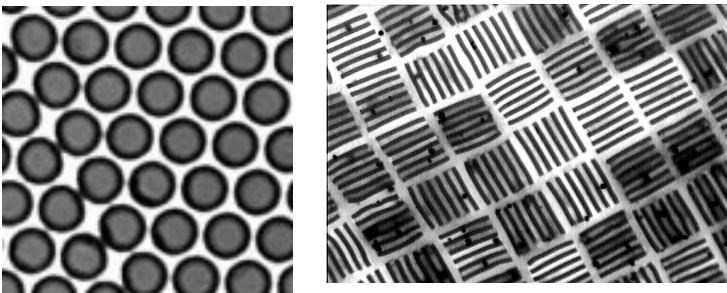
|                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                     | <p>(4) <math>10^{-9}</math>K の精度で、ヘリウム相転移がシャープに確認できることを実証<br/>(図 4 - 1 参照のこと)</p>                                                                                                                                                                                                               |
| <p>臨界流体光散乱実験<br/>(Critical Fluid Light-Scattering Experiment (ZEN0))</p> <p>1991 年と 1994 年<br/>(スペースシャトル)</p>       | <p>(1) 気液臨界点の近傍におけるキセノンの光散乱を計測<br/>(2) 微小重力の利用で、気液臨界点計測が効果的に行えることを実証<br/>(3) 密度ゆらぎの緩和時間の測定<br/>(4) 温度と密度の平衡状態への到達時間を計測</p>                                                                                                                                                                      |
| <p>臨界粘性実験 (Critical Viscosity Experiment (CVX))</p> <p>1997 年 8 月<br/>(スペースシャトルで再度予定されている)<br/>(期間：数日間)</p>         | <p>(1) 気液臨界点の近傍におけるキセノンの粘性を計測 (臨界点近傍における初の粘性計測)<br/>(2) 臨界指数 <math>\gamma</math> の正確な数値の導出</p>                                                                                                                                                                                                  |
| <p>閉じ込めヘリウム実験<br/>(Confined Helium Experiment (CHeX))</p> <p>1997 年 11 月～12 月<br/>(STS-87 コロンビア号)<br/>(期間：2 週間)</p> | <p>(1) 2 枚のプレート間に 2 次元的に閉じ込めたヘリウムの静的特性の計測<br/>(2) 臨界点のごく近傍における閉じ込めた系の有限サイズ効果に関する最も精緻なデータの取得<br/>(3) 有限サイズスケーリング理論の検証<br/>(4) 微小重力環境における温度計測精度の改善を実証</p> <div data-bbox="635 1281 1390 1563"> </div> <p>図 4 - 2 閉じ込めたヘリウムの臨界点近傍における比熱の振る舞い (Physical Review Letters, <b>84</b>, 4894 (200).)</p> |

<計画されている実験>

| 宇宙実験名称・日程                                                                                                                                                        | 宇宙実験の概要                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>微小重力スケーリング理論実験 (Microgravity Scaling Theory Experiment) (MISTE)</p> <p>2005 年 4 月打ち上げ予定<br/>(期間：4.5 ヶ月間 ISS<sup>4-3)</sup>)<br/>(装置：LTMPF<sup>4-4)</sup>)</p> | <p>スケーリング則が有効な範囲に関する理解を深めるために、微小重力のもとで、<sup>3</sup>He の気液臨界点近傍での臨界指数を計測し、スケーリング則の予測に対する最も精緻な検証を行う。</p> <p>具体的には、以下のことを行う。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・<sup>3</sup>He の気液臨界点近傍での定積比熱、等温圧縮率の精密測定を微小重力下で行う。</li> <li>・臨界指数 <math>\alpha</math>、<math>\gamma</math>、<math>\delta</math> の精度を向上する。</li> <li>・臨界指数の間のスケーリング則を検証し、理論的に予測される臨界指数との比較を行う。</li> </ul> <p>(MISTE の地上実験の結果は、Phys. Rev. E 63, 055104 (2001)に掲載された。)</p>                    |
| <p>(COEX)</p> <p>(装置：LTMPF)<br/>(MISTE と統合)</p>                                                                                                                  | <p>三重臨界領域での共存線の形を決定する。</p>  <p>図 4 - 3 ヘリウムの気相-液相共存線</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <p>微小重力実験における臨界ダイナミクス (Critical Dynamics in Microgravity Experiment (DYNAMX))</p> <p>2005 年打ち上げ予定<br/>(期間：4.5 ヶ月間 ISS)<br/>(装置：LTMPF)</p>                        | <p>2 次の相転移近傍での動的特性の計測を行い、非平衡条件でヘリウムの超流動転移に関する動的特性を 10<sup>-9</sup>K レベルの温度分解能で調べる。</p> <p>具体的には、以下のことを行う。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・相転移点近傍で、過熱の影響を調べる。</li> <li>・λ 点の近傍の線形および非線形領域における熱伝導度を計測し、理論と比較する。</li> <li>・熱流量を変えた場合の転移温度の変化を調べる。</li> <li>・界面近くの温度分布を測定し、そのスケーリングの振る舞いを調べる。</li> <li>・非平衡条件下における相転移の性質の変化を調べる。(転移はヒステリシスを示すのかなど)</li> </ul> <p>(DYNAMX の地上実験は、Physical Review Letters, 78, 2421 (1997); 81, 2474 (1998)に掲載された。)</p> |

<sup>4-3</sup> 国際宇宙ステーション (International Space Station)。以下同様。

<sup>4-4</sup> 低温物理実験装置 (LTMPF) は、NASA/JPL が開発を進めている低温物理用の汎用的実験装置であり、「きぼう」船外プラットフォーム (曝露部) に搭載が予定されている。

|                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>超流動普遍性実験 (Heat Capacity of Superfluid He-4 in the Presence of a Heat Flux (CQ))</p> <p>(装置：LTMPF)<br/>(DYNAMX と統合)</p>           | <p>λ 転移近くにおいて、熱流の存在のために生ずる、ヘリウムの比熱の増大を研究する。</p>  <p>図4-4 地上では重力のために、セルの高さに応じて、超流動ヘリウムの転移温度が変化す</p> <p>(CQ の地上実験の結果は、Physical Review Letters, 84, 2195 (2000)に掲載された。)</p>                                                       |
| <p>超流動転移における境界効果 (Boundary Effects on Superfluid Transition (BEST))</p> <p>2006 年末打ち上げ予定<br/>( 期間：6 ～ 14 週間 ISS)<br/>(装置：LTMPF)</p> | <p>自然界における有限サイズの動的なスケーリング理論について、その妥当性を初めて検証する。</p> <p>具体的には、「固体境界」、「有限サイズへの閉じ込め」、「超流動転移近傍での臨界熱輸送における次元の依存性」の影響を定量的に確認し、有限サイズの動的スケール理論との比較検証を行う。</p>  <p>図4-5 ミクロチャンネルプレート光学顕微鏡写真 (左：1 次元円筒 (50 μm)、右：2 次元スロット (5×50 μm))</p> |
| <p>超流動ヘリウム相転移の動力学 (Kinetics of the Superfluid Helium Phase Transition (KISHT))</p> <p>打ち上げ提案中<br/>(期間：4 ヶ月間 ISS)<br/>(装置：LTMPF)</p> | <p>超流動ヘリウムの核形成に特に注目して、1 次転移の過程について理解を深める。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 非平衡相における核形成頻度と寿命を調べる。</li> <li>(2) 重力によって影響を受けない場合の固相の形状を観測する。</li> <li>(3) 様々な温度・圧力条件下における固相の成長速度を測定する。</li> </ol>                                                                                                     |
| <p>超流動流体力学実験 (Superfluid Hydrodynamics)</p>                                                                                         | <p>表面の摂動がない状況における超流動の流体力学について理解を深めるために、孤立した超流動ヘリウムの液滴の運動を詳細に調べる。具体的には、以</p>                                                                                                                                                                                                                                      |

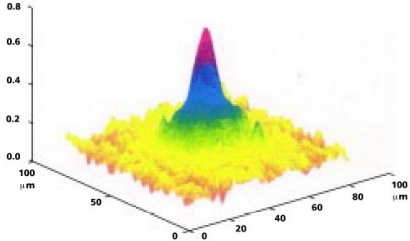
|                                                                  |                                                                                                          |
|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Experiment (SHE))<br><br>打ち上げ提案中<br>(期間：4 ヶ月間 ISS)<br>(装置：LTMPF) | 下のことを行う。<br>(1) 回転させた超流動液滴の形状の測定<br>(2) 回転させた超流動液滴における渦糸形成の研究<br>(3) 液滴振動の減衰の測定<br>(4) 超流動液滴の融合の研究<br>など |
|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|

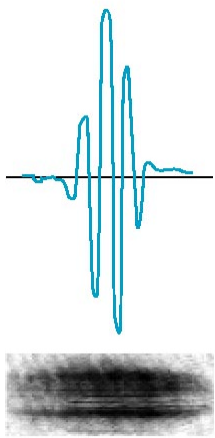
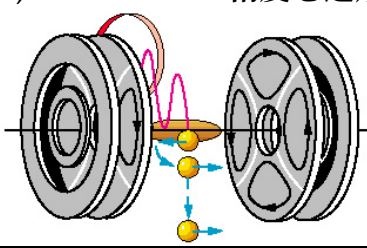
#### 4. 1. 2 レーザー冷却および原子物理

レーザー冷却および原子物理に関する研究を宇宙空間で行うことによって、これまで得られなかった高精度の測定が可能となる。これにより、物理法則の精密な検証を行うことができるようになり、物理の世界に対する我々の理解の範囲を広げることができると考えられる。

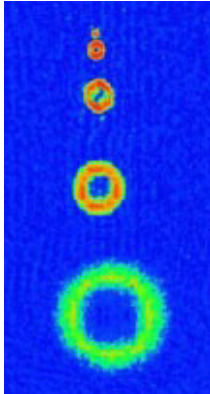
レーザー冷却および原子物理に関して、NASA が計画されている実験の概要を表4-2に示す。

表4-2 レーザー冷却および原子物理に関する検討テーマ

| 宇宙実験名称                                                                                                     | 宇宙実験の概要                                                                                                                                                                                                       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ボースーアインシュタイン凝縮 (Bose-Einstein Condensation (BEC))<br><br>2004 年 末 または<br>2005 年 打ち上げ 予定<br>(期間：1 年間 ISS)   | <p>(1) 宇宙空間でルビジウムを用いてボースーアインシュタイン凝縮を実証する。<br/>(2) 2 成分の凝縮体を用いて物質波の干渉を実証する。</p>  <p>図4-6 ボースーアインシュタイン凝縮したナトリウム原子雲の速度分布</p> |
| 宇宙物質波ジャイロスコープ (Space Matter-Wave Gyroscope (SMW-G))<br><br>2004 年 末 または<br>2005 年 打ち上げ 予定<br>(期間：1 年間 ISS) | <p>レーザー冷却した原子を使って、物質波のジャイロスコープを作り、地上の100倍の精度を実現する。</p>                                                                                                                                                        |

|                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                           |  <p>図4-7 レーザー冷却した原子ビームによって得られた干渉パターン（縦軸：原子数、横軸：回転速度）</p>                                                                                                                                                                                                         |
| <p>宇宙空間における主要原子参照時計<br/>(Primary Atomic Reference Clock in Space (PARCS))</p> <p>2005 年 6 月打ち上げ予定<br/>(期間：半年～1 年 ISS)</p> | <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 宇宙空間で、セシウム原子時計の安定性を測定し、時間の単位を <math>10^{-16}</math> 秒の精度で実現する。</li> <li>(2) 高精度セシウム原子時計を使って、相対性理論の様々な予測を検証する。</li> <li>(3) 時計の安定性を地上のものと比較することによって、重力の赤方偏移を測定する。</li> <li>(4) 異なる原子を使った原子時計の周波数を比較することにより、局所位置不変性を検証する。</li> <li>(5) 地球の周りの精密な周波数分布の測定を行う。</li> </ol>                                  |
| <p>ルビジウム原子時計の実験 (Rubidium Atomic Clock Experiment (RACE))</p> <p>2006 年 12 月打ち上げ予定<br/>(期間：半年～1 年 ISS)</p>                | <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) ルビジウム時計の衝突シフトを測定し、<math>10^{-17}</math> の精度を実証し、相対性理論の検証を行う。</li> <li>(2) 原子時計の周波数を地上のものと比較することにより、重力赤方偏移や 2 次ドップラーシフトを測定する。</li> <li>(3) SUMO (超伝導マイクロ波発振器) と組み合わせて、局所位置不変性や光速の異方性を検証する。</li> <li>(4) 地球の周りの精密な周波数分布の測定を行う。</li> </ol>                                                                |
| <p>電子双極子モーメントの実験 (Electron Dipole Moment Experiment (EDM-X))</p> <p>打ち上げ提案中<br/>(期間：6 ヶ月間 ISS)</p>                        | <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 宇宙空間でレーザー冷却した原子を使って、電子の電気双極子モーメントを探す。</li> <li>(2) 標準モデルの粒子や場を超えた新しい物理学の可能性を探る。</li> <li>(3) <math>10^{-30} \text{ e} \cdot \text{cm}</math> の精度を達成する。</li> </ol>  <p>図4-8 レーザー冷却したセシウム原子を磁気トラップで保持し、強い電場をかけた様子</p> |
| 宇宙原子レーザー                                                                                                                  | <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 宇宙空間における原子レーザーの操作の実証</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                        |



|                                                             |                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (Space Atom Laser<br>(SAL))<br><br>打ち上げ提案中<br>(期間：1 年間 ISS) | (2) 原子ガスのボース–アインシュタイン凝縮のコヒーレントな性質の測定などを行う。<br><br><br>図 4 - 9 ナトリウム原子で作ったボース–アインシュタイン凝縮体を、磁気トラップから開放することにより、4 つの物質波のパルスを放出させた様子 |
|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

#### 4. 1. 3 重力および相対論の物理

重力および相対論の物理の分野は、宇宙空間における重力および相対性理論に関する実験を通じて、重力が宇宙の様態にどのような影響を与えているのかを探ることを目的とする。この研究によって、宇宙の始まり、発展、運命に関する深い理解が得られると期待される。また、現在知られている力を超えた長距離力の発見や、物理法則の統一など、宇宙の核心に係わる成果が得られる可能性があると考えられる。

重力および相対論の物理に関して、NASA がこれまでに行った実験、および計画されている実験の概要を表 4 - 3 に示す。

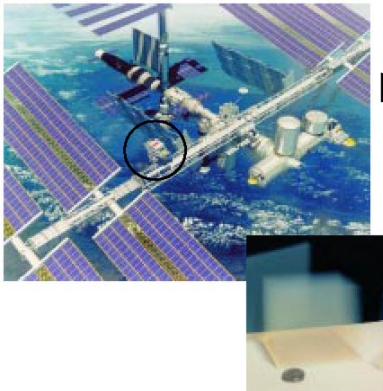
表 4 - 3 重力および相対論の物理に関する宇宙実験

##### <過去の実験>

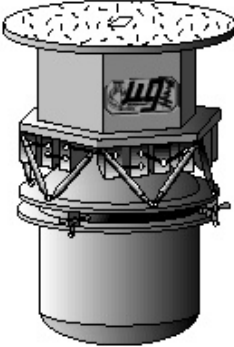
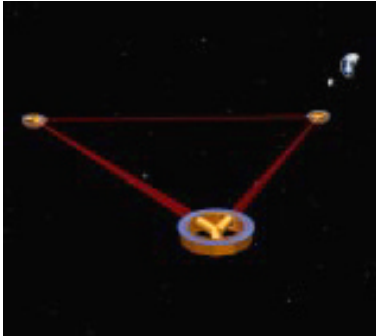
| 宇宙実験名称                                                          | 宇宙実験の概要                                                                                                                                 |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 重力プローブ A<br>(Gravity Probe A)<br><br>1976 年打ち上げ<br>(1 時間 55 分間) | 地球の重力によって誘起される時間の変化を、予測される値の $1.4 \times 10^{-4}$ の精度で測定した。                                                                             |
| ヴァイキング<br>(Viking)<br><br>1975 年打ち上げ<br>(期間：3～7 年間)             | (1) 地球と火星探査機との間の放射線伝播の、太陽の重力による遅れを、予測される値の $10^{-3}$ の精度で測定した。<br>(2) 重力定数 $G$ の時間変化が年間 $10^{-11}$ 以下であることがわかった。                        |
| 月のレーザー測距<br>Lunar Laser Ranging<br><br>1969 年打ち上げ<br>(継続中)      | (1) 地球と月の重力質量と慣性質量の比が $3 \times 10^{-13}$ の精度で一致していることを確かめた。これにより、重力の非線形性の強さを $10^{-4}$ 程度の精度で確認することができた。<br>(2) 局所的慣性空間の測地歳差運動を、予測される値 |

|                                                                                                                                                                             |                                                                                                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                             | <p>の0.5%の精度で測定した。</p> <p>(3) 重力定数 <math>G</math> の時間変化は年間 <math>3 \times 10^{-12}</math> 以下であることがわかった。</p> |
| <p>レーザー地球力学衛星<br/>(Laser Geodynamics<br/>Satellite I &amp; II<br/>(Lageos I &amp; II))</p> <p>打ち上げと期間<br/>LAGEOS-1:1968-1977 年<br/>LAGEOS-2:1988 年-現在<br/>LAGEOS-3:提案段階</p> | <p>地球の回転による慣性系の引き込みによって生ずる宇宙船軌道の歳差運動を検出した。</p>                                                             |

<計画されている実験>

| 宇宙実験名称                                                                                                                 | 宇宙実験の概要                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>重力プローブ B<br/>(Gravity Probe B)</p> <p>2002 年打ち上げ予定<br/>(期間：1 年間)</p>                                                | <p>(1) 地球の重力圏で回転するジャイロスコープを使って、測地歳差運動を約 <math>10^{-5}</math> の精度で測定する。これにより、重力の相対論的構造に関する理解が 2 桁向上する。</p> <p>(2) 地球の回転によるフレームドラッキングを 1%以下の精度で測定する。</p> <div data-bbox="598 1120 973 1451">  <p>図 4 - 1 0 4つのジャイロスコープの配置における小さな変位を検出する低温重力プローブ（液体ヘリウムを使用）</p> </div> |
| <p>アルファ磁気分光計<br/>(Alpha Magnetic<br/>Spectrometer (AMS))</p> <p>2002 年または 2003<br/>年打ち上げ予定<br/>(期間：3～5 年間<br/>ISS)</p> | <p>宇宙の組成や起源を探るために、地球の大気圏外における反物質などの荷電粒子の検出を行う。</p> <div data-bbox="587 1541 970 1930">  <p>図 4 - 1 1 ISS に搭載された AMS (円内) は、1,500 ガウスの磁場をかけた検出器を通過する荷電粒子の経路を追跡することができる。</p> </div>                                                                                   |
| 等価原理の衛星テスト                                                                                                             | (1) 一般相対性理論の基本原則である慣性質量と重力                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |



|                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>(Satellite Test of the Equivalence Principle (STEP))</p> <p>ESA と共同<br/>2004 年打ち上げ提案<br/>(期間：6 ヶ月間)</p>            | <p>質量の等価性を、<math>10^{-18}</math> の精度で検証する。</p> <p>(2) 長距離で弱い新しい力に関して、高精度の測定を行い、その検出または可能性の排除を行う。</p>  <p>図 4 - 1 2 大気抵抗を軽減するように設計された STEP 衛星</p>                                                                                           |
| <p>レーザー干渉計による宇宙アンテナ (Laser Interferometer Space Antenna (Lisa))</p> <p>ESA と共同<br/>2010 年打ち上げ予定<br/>(期間：数年間)</p>      | <p>銀河やブラックホールからの重力波を検出する。</p>  <p>図 4 - 1 3 Lisa の 3 つの宇宙船配置<br/>(百万キロの距離にわたって、レーザービームを使って制御する。)</p>                                                                                                                                      |
| <p>超伝導マイクロ波発振器 (Superconducting Microwave Oscillator (SUMO))</p> <p>2006 年打ち上げ予定<br/>(期間：1 年間 ISS)<br/>(装置：LTMPF)</p> | <p>(1) マイクロ波キャビティ周波数を軌道位置と重力ポテンシャルの関数として計測する。これと原子時計の周波数との相違を <math>10^{-17}</math> の精度で測定する。</p> <p>(2) 原子時計にスレーブできる低フェーズノイズの信号をテ供給する。</p> <p>(3) 別々の宇宙船に搭載した 2 つのマイクロ波発振器を使って、赤方偏移の高精度計測を行う。</p>  <p>図 4 - 1 4 SUMO のニオブマイクロ波キャビティ</p> |

#### 4. 1. 4 生物物理

生物物理の分野は、生物における物理的な相互作用を研究することにより、分子構造がより複雑な構造と結合したときの影響や生物系がどのように動くのかなどを明らかにすることを目的とする。

現在、テーマは検討中である。

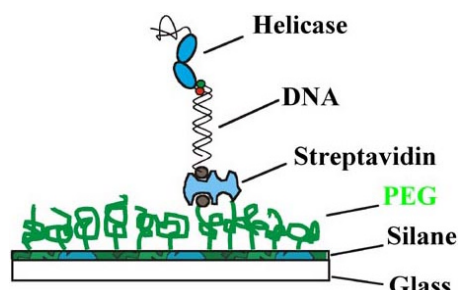


図 4 - 1 5 共鳴エネルギー輸送の概念図

#### 4. 2 欧州 (ESA など) の宇宙実験

欧州では、伝統的に基礎物理学分野の研究に熱心であり、ESA を中心にして、ドイツ (西独)、フランス、ロシア (ソ連) などが早い時期から微小重力利用の実験研究に取り組んでいる。その中でも、ドイツ (西独) がスペースシャトル利用実験として実施した D1 計画及び D2 計画における臨界点実験 (六フッ化硫黄 ( $\text{SF}_6$ ) を用いた臨界現象実験)、IML ミッションや EURECA ミッションで実施された ESA の臨界点実験 (気液臨界点近傍での流体ダイナミクス実験) が代表的な宇宙実験の事例である。

このような臨界点実験に関して、1989 年に記録に留めるべき議論がなされている。それは、欧州の小型ロケット実験で得られた臨界流体実験の実験結果 (臨界流体での異常に速い熱輸送) に対する解釈をめぐっての議論である。臨界点近傍では、「臨界緩和のために熱緩和が遅くなるべきである」と考えられていた当時の常識に矛盾する実験結果が得られていたからである。この「速い熱輸送」はなぜ起こるのか、という疑問に対して、小貫明京都大学教授は「断熱的温度上昇のメカニズム」を提案した。これは、「圧縮性流体のエネルギー輸送は、断熱的、即ち音波の形で伝わる部分がある」という主張である。臨界点に接近し熱膨張係数が大きくなるのに従い、断熱移送が熱拡散を凌駕するというもので、当時としては極めて斬新な考え方であった。例えば、容器に封入された臨界流体を壁から冷やせば、瞬時に全体が冷える。フランスの実験グループは、この現象を「ピストン効果<sup>4-5</sup>」と名付けた。その後、このピストン効果を利用して、欧州やロシアで微小重力環境における相分離実験 (「円形容器の壁を

<sup>4-5</sup> ピストン効果：通常の拡散や対流と異なり、臨界点の近傍では熱膨張係数の発散に伴って高速な熱輸送現象が起こる。体積一定の臨界流体を加熱すると、容器の周辺に熱拡散層が生じ、この層の膨張によって瞬時に全体が等温化される。この現象の理論的予測は、京都大学の小貫明教授による。ピストン効果の実験的検証は、スペースシャトル利用の D2 計画 (1993 年) の実験テーマとして実施されている。

急冷すると、ピストン効果で内部まで瞬時に等温化するため、容器全体で一様に相分離が進行する」という宇宙でのスピノーダル分解の実験）が行われている。また、ピストン効果に関連する実験として、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{SF}_6$ 、 $^3\text{He}$  などを用いた臨界流体のエネルギー輸送に着目した実験がなされている。

表4-4に、欧州の宇宙機関がこれまでに行った臨界現象に関する主な宇宙実験の概要を示す。

表4-4 欧州の宇宙機関が行った臨界現象に関する主要な宇宙実験

| 宇宙実験名称・日程                                                    | 宇宙実験の概要                                                                                                  |
|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| D1 計画<br>(ドイツ、スペースシャトル)<br>1985 年 10 月実施                     | 六フッ化硫黄 ( $\text{SF}_6$ ) の臨界点近傍での定積比熱の計測                                                                 |
| D2 計画<br>(ドイツ、スペースシャトル)<br>1993 年 4 月実施                      | (1) $\text{SF}_6$ の臨界点近傍での定積比熱の計測<br>(D1 計画の継続実験)<br>(2) $\text{SF}_6$ の臨界点近傍でのピストン効果の実証<br>(動的な温度拡散の実証) |
| IML-1 ミッション<br>(国際微小重力実験室)<br>(ESA、スペースシャトル)<br>1992 年 1 月実施 | (1) 気液臨界点の近傍での流体の静的及び動的 特性の観測<br>(2) 気液臨界点の近傍での純粋流体の熱及び物質輸送<br>(3) 気液臨界点の近傍での純粋流体の密度分布の計測                |
| EURECA ミッション<br>(ESA、スペースシャトル)<br>1992 年 8 月実施               | $\text{SF}_6$ の臨界点近傍におけるグラファイト・カーボンへの吸着の計測                                                               |
| IML-2 ミッション<br>(国際微小重力実験室)<br>(ESA、スペースシャトル)<br>1994 年 7 月実施 | 気液臨界点の近傍での流体の静的及び動的 特性の観測                                                                                |
| 独露共同ミッション<br>(ミール利用) 1997 年 2 月実施                            | 臨界点近傍における純粋流体の相転移挙動の観測                                                                                   |

表4-5に、欧州の宇宙機関が基礎物理に関して現在検討を行っている実験テーマの概要を示す。

表4-5 欧州の宇宙機関が検討している基礎物理に関する主な実験テーマ

| 宇宙実験名称・日程                             | 宇宙実験の概要                         |
|---------------------------------------|---------------------------------|
| 宇宙での原子時計集合<br>(Atomic Clock Ensemble) | 微小重力環境を利用した新しいタイプの原子時計の性能を評価する。 |

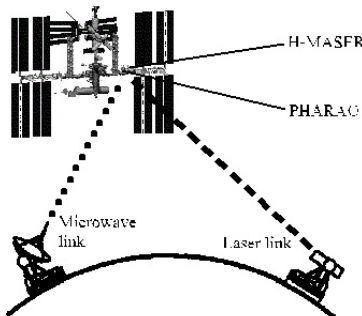
|                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| in Space (ACES))<br><br>(EESA のパイロット研究)<br>(ISS 搭載承認、2002 年以降)<br>(実施期間：1 年半)           | ACES は、以下の要素からなる。<br>・レーザー冷却原子時計 ‘ PHARAO ’ (フランス)<br>・水素メーザー (スイス)<br>・時間・周波数光伝達のレーザーリンク (フランス)<br>・時間・周波数伝達のマイクロ波リンク (ESA)<br> |
| レーザー干渉計による宇宙アンテナ ( Laser Interferometer Space Antenna (Lisa)) (ESA)<br><br>(NASA と共同)   | (NASA の計画プロジェクト参照)                                                                                                                                                                                                 |
| 等価原理の衛星テスト (Satellite Test of the Equivalence Principle (STEP)) (ESA)<br><br>(NASA と共同) | (NASA の計画プロジェクト参照)                                                                                                                                                                                                 |

図 4 - 1 6 ACES の概略図

<F2/F3 mission<sup>4-6</sup> opportunity の基礎物理分野に提案されたテーマ>

|         |                                                                                                                                                        |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| HESS    | 入線近傍のヘリウム第 2 音波を測定する。超流動密度の臨界指数を評価し、繰り込み群の検証を行う。                                                                                                       |
| CASIMIR | カシミア効果を地上実験よりも 5 桁高い精度で測定する。この実験により、2 次の放射補正が明らかになり、100mm もの大きなスケールでのカシミア効果の観測できると期待される。<br>このような実験は、量子力学の真空のゆらぎ、およびそれと巨視的な力との関係を明らかにするために重要であると考えられる。 |
| EUSO    | 大気と高エネルギー宇宙線との相互作用の間に                                                                                                                                  |

<sup>4-6</sup> ESA 科学プログラムが、研究テーマのバランス、継続性および柔軟性を確保するために導入したミッション (Flexi-missions) 。

|                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                       | <p>放出される紫外線を測定する方法を用いて、1019～1020eV の高エネルギー宇宙線の成分を調べる。宇宙で測定することにより、高エネルギー宇宙線に関して地上の 10～20 倍の統計が得られる。</p> <p>この研究は、高エネルギー宇宙線の起源の解明や、地上で検出が困難な高エネルギーニュートリノの検出に寄与すると期待される。</p>                                                                                                          |
| Satelite Search for Pseudoscalar Interactions (SSPIN) | <p>擬スカラー相互作用から生じる新しい力を探することを目的とする。STEP で開発されている技術を用いて、予想されているモノポール-双極子、双極子-双極子間の力を測定する。この研究により、CP 対称性の破れや <math>K_0</math> 緩和の理解が深まると期待される。</p>                                                                                                                                     |
| GP-C                                                  | <p>精密な時計を搭載した 2 つの宇宙船を使って、重力磁場時計効果を測定する。</p>                                                                                                                                                                                                                                        |
| HYPER                                                 | <p>冷却原子の干渉計をドラッグフリーな環境に設置し、ジャイロスコープや加速度計として利用する。</p>                                                                                                                                                                                                                                |
| ASTROD                                                | <p>(1) 一般相対性理論の検証、特に相対論のパラメータ <math>\gamma</math>、<math>\beta</math> の精度を 3～6 桁向上する。</p> <p>(2) 重力定数 <math>G</math> の時間変化を調べる。</p> <p>(3) 太陽系のパラメータ（角運動量、<math>g</math>-モード振動、惑星や小惑星の軌道要素など）を精密に測定する。</p> <p>(4) <math>50 \mu\text{Hz} \sim 5\text{mHz}</math> の低周波数域で重力波を検出する。</p> |
| GG                                                    | <p>宇宙船の回転による高周波数信号を使って、室温で等価原理の高精度な検証を行う。</p>                                                                                                                                                                                                                                       |
| MICROSCOPE<br>(2004 年打ち上げに CNES 承認)                   | <p>600km から 1,200km の軌道上で宇宙船をドラッグフリーにし、等価原理を <math>10^{-15}</math> の精度で検証する。</p>                                                                                                                                                                                                    |
| SPACETIME                                             | <p>太陽に近い軌道上で 3 つのイオントラップ時計 (<math>\text{Hg}^+</math>、<math>\text{Cd}^+</math>、<math>\text{Yb}^+</math>) を使い、等価原理の検証および微細構造定数の時間変化の高精度測定を行う。</p>                                                                                                                                     |
| MOSS                                                  | <p>局所位置不変性と特殊相対性理論を現状よりも数桁高い精度で検証する。国際宇宙ステーションに高安定超伝導キャビティ発振器の対を設置して実験を行う。</p>                                                                                                                                                                                                      |
| OPTIS                                                 | <p>宇宙の等方性を非常に高精度で検証する。具体的には、光学系を用いて、光速の非常に小さな</p>                                                                                                                                                                                                                                   |

|        |                                                                 |
|--------|-----------------------------------------------------------------|
|        | 変化を測定する。                                                        |
| FINEST | 0.1Hz～10Hz の広い周波数領域での重力波検出計を実現する。                               |
| LARS   | 10mHz 以上の周波数域で重力波を検出するために、軌道上に巨大干渉計アンテナを設置し、ブラックホールからの重力波を検出する。 |
| GHOST  | 背景の星のマイクロレンズによって巨大な小型ハローを観測し、その暗黒物質への寄与や、銀河のバリオン密度などを明らかにする。    |
| FELIX  | 重力効果が量子力学の観測問題の精度に重要な役割を果たすというペンローズの示唆を検証する。                    |

## 5. 利用可能な実験装置

### 5. 1 国際宇宙ステーションに搭載される実験装置

微小重力物理学の分野に関して、利用可能な実験装置の概略と特徴を示す。特に、今後、微小重力実験を行う環境として重要となる国際宇宙ステーション（ISS）に搭載される装置<sup>5-1</sup>を中心に説明する。

#### （1）低温物理関連の実験装置

- ・低温微小重力物理実験装置（LTMPF）
- ・レーザー冷却／原子物理ハードウェア（LCAP）

#### （2）臨界点物理関連の実験装置

- ・溶液／蛋白質結晶実験装置（SPCF）
- ・物質成長、臨界点近傍流体実験装置（DECLIC）

#### （3）複雑系流体物理関連の実験装置

- ・流体物理実験装置（FPEF）
- ・コロイド物理宇宙実験装置（PCSA）
- ・国際微小重力プラズマ装置（IMPF）

#### （4）温度制御装置

- ・帯域炉（AFEX）
- ・先進熱環境炉（ATEN）

### 5. 2 低温物理関連の実験装置

#### （1）低温微小重力物理実験装置（LTMPF）<sup>5-2</sup>

---

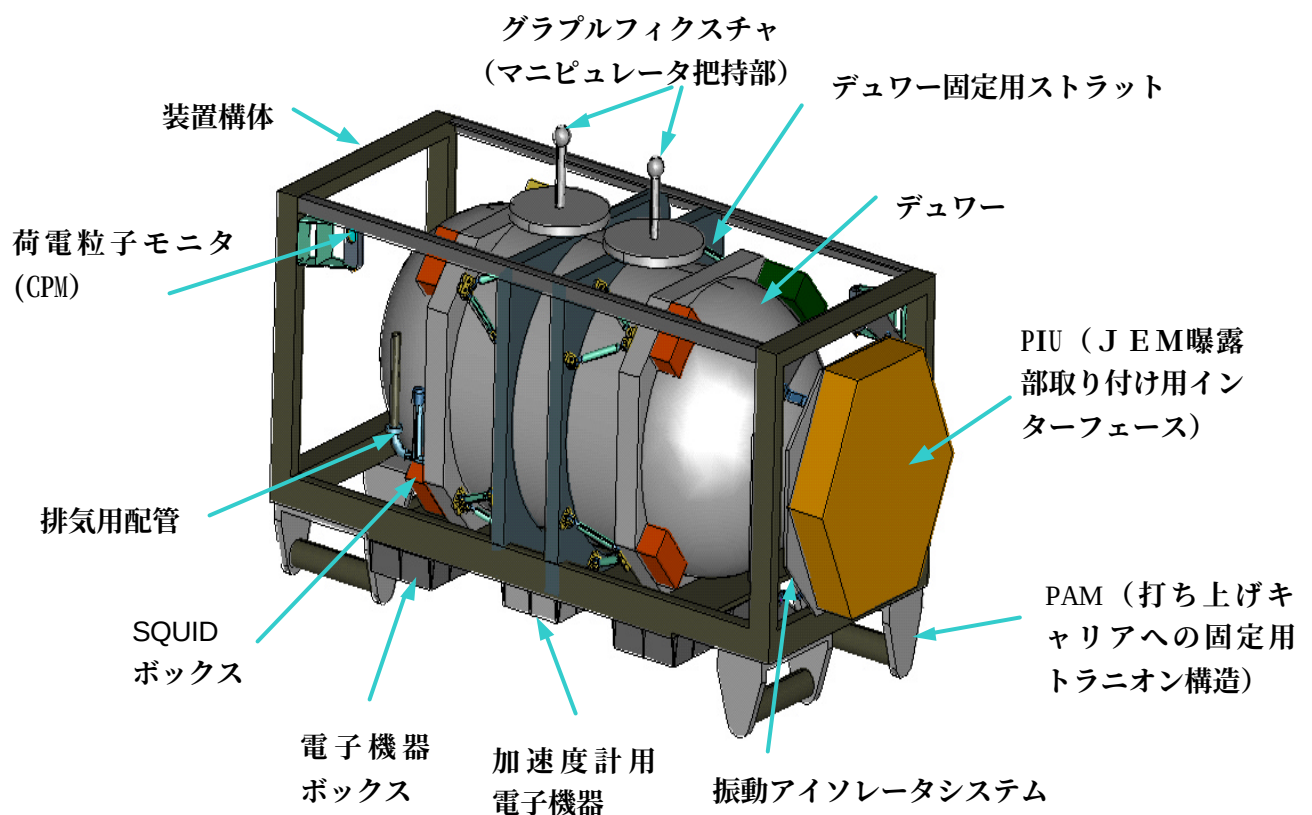
<sup>5-1</sup> 国際宇宙ステーションに搭載される予定の実験装置については、  
<http://www.science.sp-agency.ca:8003/facilities.htm> を参照のこと。

<sup>5-2</sup> LTMPF の詳細については、以下の URL を参照のこと。  
<http://ltmpf.jpl.nasa.gov/>



低温微小重力物理実験装置（LTMPF、Low Temperature Microgravity Physics Facility）は、NASA ジェット推進研究所（JPL、Jet Propulsion Laboratory）が開発を進めている実験装置であり、国際宇宙ステーションの日本実験モジュール「きぼう」の暴露部への搭載が予定されている。微小重力環境かつ極低温下でのみ実施可能な基礎物理学実験を、長期間にわたって実施するために必要な共通の実験環境が提供できるように設計されている。

LTMPF には、SQUID を利用したサブ nK の高分解能を有する温度計が搭載されている。デューワーは、1.4～2K の温度に設定することができる（図 5-1 参照）。



全体寸法： 1850mm×1000mm×800mm  
 (JEM暴露部標準ペイロード)  
 実験装置全体重量： 500kg以下

(注) ラジエータ及び電磁シールドは省略



## 図 5 - 1 低温微小重力物理実験装置 (LTMPF) の概略図

この実験装置を利用した実験として、以下の研究テーマが計画（または検討）されている。

- ・ 微小重力下での臨界ダイナミクスの実験  
(DYNAMX、Critical Dynamics in Microgravity)
- ・ 微小重力スケーリング理論の実験  
(MISTE、Microgravity Scaling Theory Experiment)
- ・ 超流動体のユニバーサリティの実験  
(SUE、Superfluid Universality Experiment)
- ・ 超流動転移の境界効果の実験  
(BEST、Boundary Effects on Superfluid Transition)
- ・ 三重臨界点近傍における共存線上の実験  
(EXACT、Experiments along Co-existence near Tricriticality)
- ・ 超伝導マイクロ波発振器  
(SUMO、Superconducting Microwave Oscillator)
- ・ 超流動流体力学実験  
(SHE、Superfluid Hydrodynamics Experiment)
- ・ 超流動ヘリウム相転移の核形成に関する研究  
(KISHT、Kinetics of Superfluid Helium Phase Transitions)

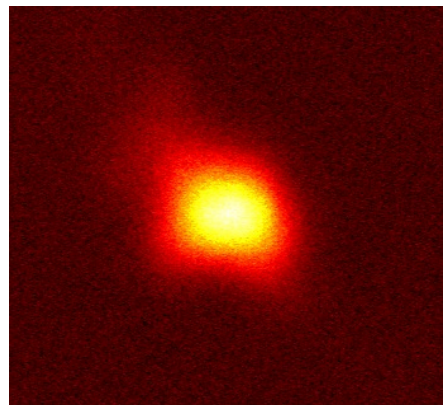
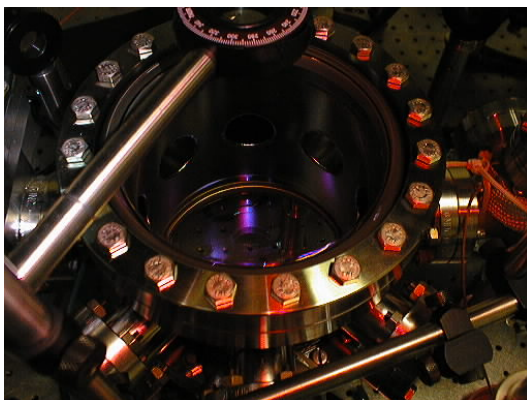
### (2) レーザー冷却／原子物理ハードウェア (LCAP) <sup>5-3</sup>

---

<sup>5-3</sup> LCAP の詳細については、以下の URL を参照のこと。

レーザー冷却／原子物理ハードウェア（LCAP、Laser Cooling and Atomic Physics Hardware）は、NASA ジェット推進研究所（JPL、Jet Propulsion Laboratory）が開発を進めている実験装置である。この装置を利用したレーザー冷却技術により、中性原子およびイオンの超低温状態を実現することができる。 $10^{-6}\text{K}$  もの超低温状態を実現することにより、長時間にわたり、擾乱のない環境で、非常に高精度な分光測定が可能となる。こうしたことから、レーザー冷却技術は、中性原子時計の生成や、光学格子、ボース-アインシュタイン凝縮などの研究に適している。レーザー冷却によるボース-アインシュタイン凝縮の実現は、原子レーザーと呼ばれる新しいデバイスの開発に役立つと期待されている。

LCAP には、磁気光学トラップ<sup>\*1</sup>（Magneto-Optical Trap）、低速強光源（Low-Velocity Intense Source）、線形イオントラップ（Linear Ion Trap）などを組み込んだレーザー冷却装置（図 5-2）や超安定マイクロ波発振器（Ultra-High Stability Microwave Oscillators）、光学電子発振器<sup>\*2</sup>（Opto-Electronic Oscillator）、超伝導キャビティメイザー発振器（Superconducting Cavity Maser Oscillator）などの各種発振器（図 5-3）が含まれる。



---

<http://horology.jpl.nasa.gov/lcap/>

<sup>\*1</sup> ドップラー冷却スキームに不均一磁場を加え、輻射圧を中心へ向かうようにする装置。

図5-2 レーザー冷却装置

レーザー冷却した原子を閉じ込める真空チャンバー（左）  
磁気光学トラップ中のレーザー冷却したセシウムの原子雲（右）

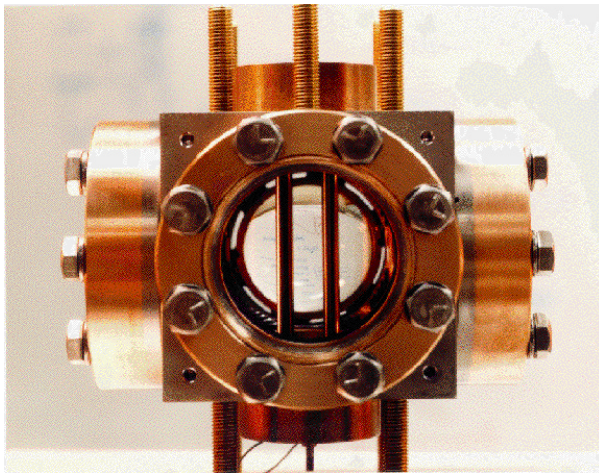


図5-3 超安定周波数標準の発振器

線形イオントラップ周波数標準発振器（左）  
超伝導キャビティメーザー発振器（右）

---

\*2 電氣的フィルターにより、連続光をマイクロ波信号に変換する光学発振器で構成される。

### 5. 3 臨界点物理関連の実験装置

#### (1) 溶液／蛋白質結晶実験装置 (SPCF)<sup>5-4</sup>

溶液／蛋白質結晶実験装置 (SPCF、Solution/Protein Crystal Growth Facility) は、宇宙開発事業団 (NASDA) によって開発された実験装置で、国際宇宙ステーションの日本実験モジュール「きぼう」の内部への搭載が予定されている。微小重力環境での溶液からの結晶成長の基本現象を研究するために装置であるが、温度分布や濃度分布の観察や動的光散乱測定を行うことができるので、臨界点物理に関する研究にも利用することができる。

SPCF の溶液結晶化観察装置 (SCOF、Solution Crystalization Observation Facility) には、振幅変調方式の顕微鏡、リアルタイム位相シフト 2 波長顕微干涉計、2 波長マッハツェンダー型顕微干涉計、動的光散乱測定装置、CCD カメラなどが搭載されており、現象をその場観察することができる (図 5-4)。温度・圧力の制御に関しては、 $-1^{\circ}\text{C}$ ～ $220^{\circ}\text{C}$ の温度域および  $1\text{kgf}/\text{cm}^2$ ～ $2000\text{kgf}/\text{cm}^2$  の圧力域での制御が可能である (表 5-1 参照)。

---

<sup>5-4</sup> SPCF の詳細については、以下の URL を参照のこと。  
<http://jem.tksc.nasda.go.jp/kibo/kibomefc/spcf.html>

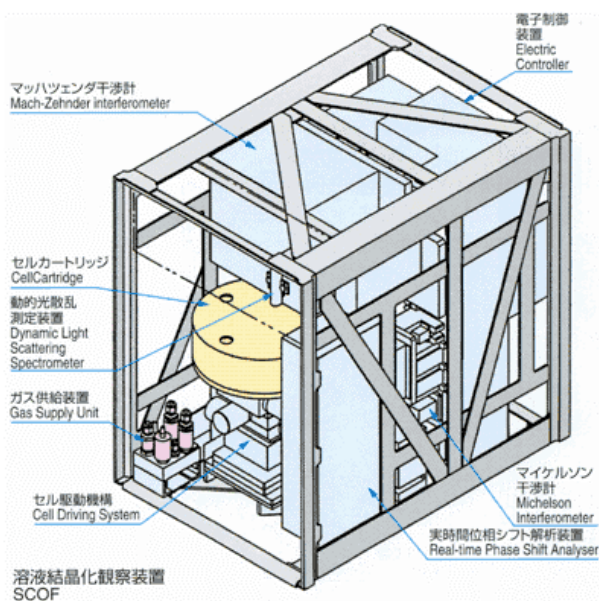


図 5 - 4 SCOF の概略図

- ・振幅変調方式顕微鏡
  - 光源：LED ( $\lambda=660\text{nm}$ )
  - 方向：透過方向／反射方向
  - 倍率： $\times 2$ 、 $\times 4$
  - 分解能： $1\mu\text{m}$  以下
- ・リアルタイム位相シフト 2 波長顕微干涉計
  - 光源：レーザー ( $\lambda=532$ 、 $780\text{nm}$ )
  - 倍率： $\times 3$  (固定)
  - 位相差解像度： $0.02\lambda$  以上
- ・2 波長マッハツェンダ型顕微干涉計
  - 光源：レーザー ( $\lambda=532$ 、 $780\text{nm}$ )
  - 倍率： $\times 2$ 、 $\times 4$
  - 位相差解像度： $0.2\lambda$  以上
- ・動的光散乱測定
  - 光源：LD ( $\lambda=532\text{nm}$ )
  - 最小粒子： $10\text{nm}$  オーダー

表 5 - 1 SCOF の基本仕様

## (2) 物質成長、臨界点近傍流体実験装置 (DECLIC)<sup>5-5</sup>

物質成長、臨界点近傍流体実験装置 (DECLIC、Dispositif pour L'etude de la Croissance et des Liquides Critiques、Facility for the Study of Materials Growth and Liquids near Critical points) は、フランス国立宇宙研究センター (CNES) によって開発された実験装置で、低温および高温の臨界流体の挙動、超臨界水の化学反応、透明合金\* (transparent alloy) の方向性凝固 (directional solidification) などを調べるための装置である。

DECLIC には、マッハツェンダ干渉計、光学顕微鏡、光透過測定装置、小角散乱装置などの光学測定装置や、広い温度領域 (-10°C ~ 600°C) での温度制御装置、温度・圧力計測器、および高速現象の観察用の CCD カメラ (1kHz) などが搭載されている (図 5-5、表 5-2)。

---

<sup>5-5</sup> DECLIC の詳細については、以下の URL を参照のこと。

[http://www.cnes.fr/activites/micropesanteur/sciences\\_materiaux/declic.pdf](http://www.cnes.fr/activites/micropesanteur/sciences_materiaux/declic.pdf)

\* サクシノニトリル／アセトン系など。

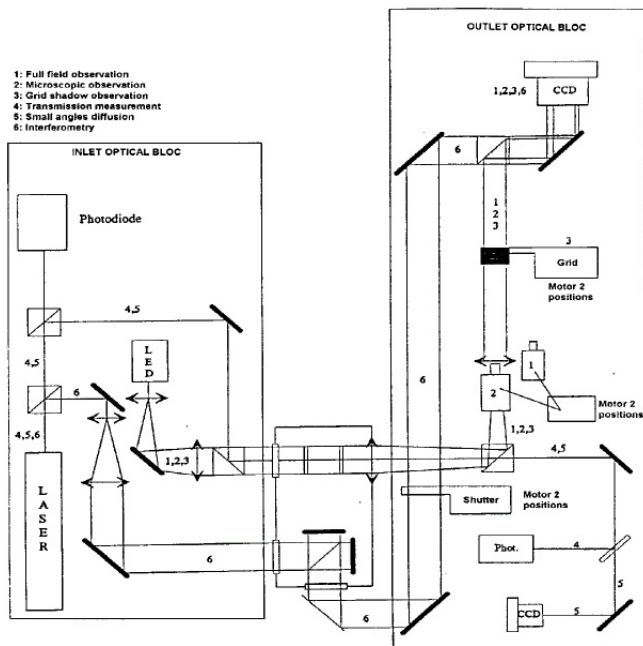


図 5 - 5 DECLIC の臨界流体実験光学系の概略図  
様

- 温度
  - ①温度域 1 :  $-10^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$   
精度 : 10mK
  - ②温度域 1 :  $100^{\circ}\text{C} \sim 600^{\circ}\text{C}$   
精度 : 40mK
- 試料サイズ  
直径 12mm、厚さ 12mm まで
- 光学系 (インコヒーレント光源)  
窓寸法 : 直径 12mm  
顕微鏡 : 直径 1mm、分解能  $1\mu\text{m}$
- 光学系 (コヒーレント光源)  
光透過測定 : 精度 1%  
小角光散乱 : 角度  $0.5^{\circ} \sim 13^{\circ}$   
 $90^{\circ}$  光散乱
- 圧力測定  
分解能  $0.5 \sim 0.6\text{mbar}$

表 5 - 2 DECLIC の基本仕



## 5. 4 複雑系流体物理関連の実験装置

### (1) 流体物理実験装置 (FPEF) <sup>5-6</sup>

流体物理実験装置 (FPEF、Fluid Physics Experiment Facility) は、宇宙開発事業団 (NASDA) によって開発された実験装置であり、国際宇宙ステーションへの搭載が予定されている。FPEF は常温に近い温度環境下で流体物理実験を行うための実験装置である。特に、フローティングゾーン法による半導体結晶成長などに影響するマランゴニ対流の観察を目的として開発された。

FPEF には、CCD カメラ、GN2 レーザーによる光色染色、UVP センサー、赤外放射温度計などが搭載されており、2 次元、3 次元の流速分布計測、表面温度測定、超音波による速度プロファイルの測定および表面流速観察などのその場観察などを行うことができる (図 5-6、表 5-3)。また、液量の制御、加熱・冷却ディスクによる温度制御、雰囲気制御による圧力調節も可能である。

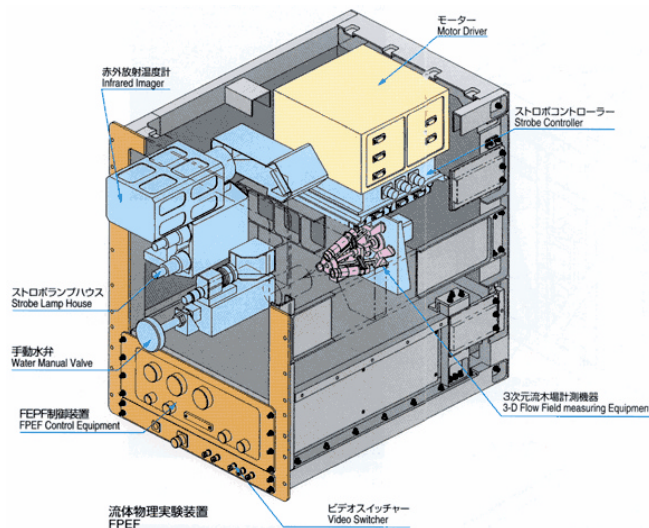


図 5-6 流体物理実験装置 (FPEF) の概略図

|         |                                       |
|---------|---------------------------------------|
| ・液柱     | ：直径 30mm、50mm、長さ 0～80mm               |
| ・温度制御   | ：加熱ディスク (最高温度 100℃)、冷却ディスク (最低温度 5℃)  |
| ・雰囲気制御  | ：圧力 Ar ガス 98kPa                       |
| ・液柱温度測定 | ：表面 (赤外放射温度計) 0～100℃、内部 (熱電対) 精度 0.1℃ |

<sup>5-6</sup> FPEF の詳細については、以下の URL を参照のこと。  
<http://item.kssc.nasda.go.jp/Cibo/kibomefc/fpef.html>



表 5-3 流体物理実験装置 (FPEF) の基本仕様

(2) コロイド物理宇宙実験装置 (PCSA)<sup>5-7</sup>

コロイド物理宇宙実験装置 (PCSA、Physics of Colloids in Space Apparatus) は、アメリカ航空宇宙局 (NASA) によって開発された多目的光散乱装置である。セルに入れられた試料を回転させることにより、レーザー光散乱装置を使って、様々な測定を同時に行うことができる (図 5-7)。光散乱としては、静的・動的散乱、広角・小角散乱、ブラッグ散乱などが可能である。また、光散乱により、力学的測定やレオロジー測定も行うことができる。

PCSA を用いた実験としては、コロイド粒子の結晶成長・核形成や、2 成分コロイド合金などの性質に関する研究、引力相互作用するコロイド粒子の構造、フラクタル集合やゲルの長距離の振る舞いなどに関する研究が行われている。

---

<sup>5-7</sup> PCSA の詳細については、以下の URL を参照のこと。  
<http://www.deas.harvard.edu/projects/weitzlab/research/nasaproj.html>

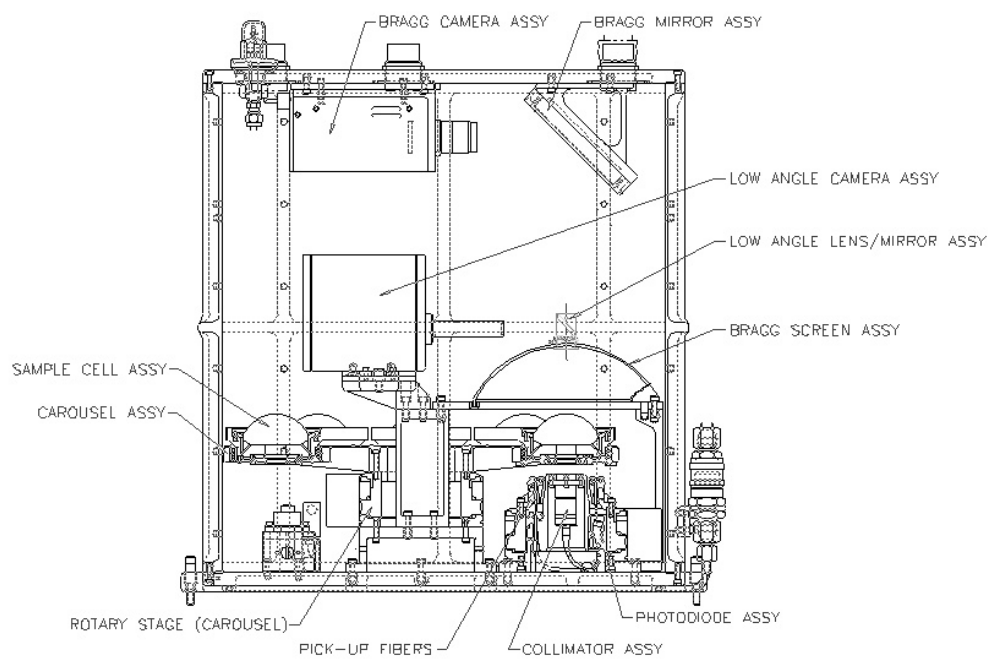


図 5 - 7 PCSA の多目的光散乱装置の概略図

(2) 国際微小重力プラズマ装置 (IMPF) <sup>5-8</sup>

国際微小重力プラズマ装置 (IMPF、International Microgravity Plasma Facility) は、ドイツ航空宇宙センター (DLR) によって開発されたプラズマ実験装置である。IMPF は応用研究のみならず、基礎研究に対応できるように設計されている。IMPF の主な研究領域は、複雑プラズマ (イオン、電子、荷電微粒子、中性ガスを含む多成分プラズマ) である。複雑プラズマの示す現象は、強結合プラズマ、結晶プラズマ、相転移、界面・表面現象、波動・衝撃、均一・不均一系、異方的な系、乱流への遷移など多岐に渡る。

IMPF には、平行電極をもつ高周波のプラズマチャンバー、ディスペンサー、光学装置をはじめとした高性能測定装置が搭載されている (図 5-8、表 5-4)。

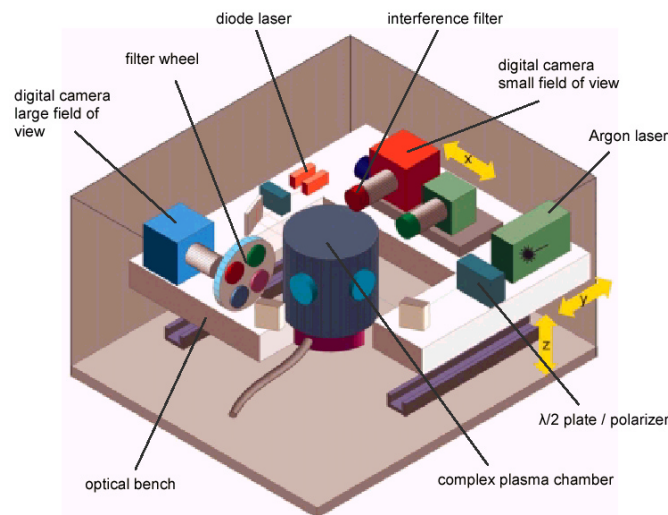


図 5-8 国際微小重力プラズマ装置 (IMPF) の概略図

|            |                                 |
|------------|---------------------------------|
| ・真空        | : 0.01~10mbar、チャンバー容積: 約 1 リットル |
| ・ガス        | : 不活性ガス、酸素                      |
| ・粒子注入      | : 6 粒子まで                        |
| ・粒径        | : 1~20 μm (高分子、ガラス、金属)          |
| ・プラズマ装置    | : ラングミュアプローブ、プラズマグロー検出器         |
| ・刺激 (プラズマ) | : 高周波および直流ポテンシャル                |

<sup>5-8</sup> IMPF の詳細については以下の URL を参照のこと  
<http://www.dlr.de/Microgravity/IAO-2000>

表5-4 国際微小重力プラズマ装置（IMPF）の基本仕様

## 5. 5 温度制御装置

### (1) 帯域炉 (AFEX) <sup>5-9</sup>

帯域炉 (AFEX、Advanced Furnace for Microgravity Experiments with X ray Radiography) は、宇宙開発事業団 (NASDA) によって開発された多目的集光加熱炉である。回転楕円体形状の反射鏡を持ち、その一方の焦点に設置された試料は、他方の焦点に配置されている 1500W のハロゲンランプにより加熱溶融される。試料に対しては、2 軸の X 線観察、可視ビデオ観察、放射温度計測、及び 5ch の熱電対による温度計測が可能である。また、ハロゲンランプを用いる代わりに、試料のまわりにセラミックスヒーターを配置することにより均一加熱実験を行うことも可能である (図 5-9)。

加熱温度範囲は 800°C~1200°Cであり、温度安定性、均一性は約 3°Cである (表 5-5)。

---

<sup>5-9</sup> AFEX の詳細については、以下の URL を参照のこと。  
<http://jem.tksc.nasda.go.jp/kibo/kibomefc/afex.html>

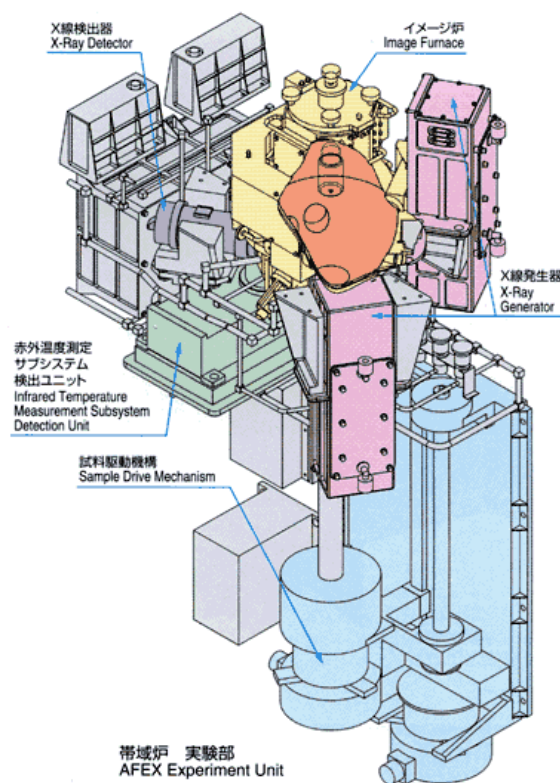


図 5 - 9 帯域炉（AFEX）の概略図

- ・ランプ加熱性能
  - 最大ランプ電力：1500W
  - 加熱温度範囲：最大 1600℃
  - 温度安定性：3℃（1450℃時）
- ・セラミックヒータ加熱性能
  - 最大ヒータ電力：1500W
  - 加熱温度範囲：200～1450℃
  - 温度安定性：3℃（1450℃時）
- ・共通性能
  - 試料移動範囲：25mm
  - 試料移動速度：0.1～1000mm/hr
  - 試料回転速度：0.01～10rpm
- ・観察計測機能
  - X線観察（2軸）
  - 放射温度計
  - 可視ビデオ観察

表 5 - 5 AFEX の基本仕様

## (2) 先進熱環境炉 (ATEN) <sup>5-10</sup>

先進熱環境炉 (ATEN、Advanced Thermal Environment) は、カナダ宇宙庁 (CSA) によって開発されている加熱炉であり、基礎科学や物質合成などの広範な分野の研究に利用できるように設計されている (図 5-10)。

ATEN では、等温、勾配加熱、メルトゾーン加熱など様々な加熱モードを設定することができる。等温モードでは、100℃～1300℃まで制御することができ、勾配モードでは、5℃/cm～50℃/cm まで勾配を変えることができる。温度の制御精度は約 0.25%であり、安定性は 1℃以内である。試料サイズは、長さ 80mm、直径 10mm まで取り扱うことができる。

ATEN は、拡散やオストワルトライプニングなどの基礎的な研究や、良質の半導体やガラスを生成するための技術開発の研究に利用されている。

---

<sup>5-10</sup> ATEN の詳細については、以下の URL を参照のこと。

[http://www.space.gc.ca/csa\\_sectors/space\\_science/microgravity\\_sci/aten.asp](http://www.space.gc.ca/csa_sectors/space_science/microgravity_sci/aten.asp)

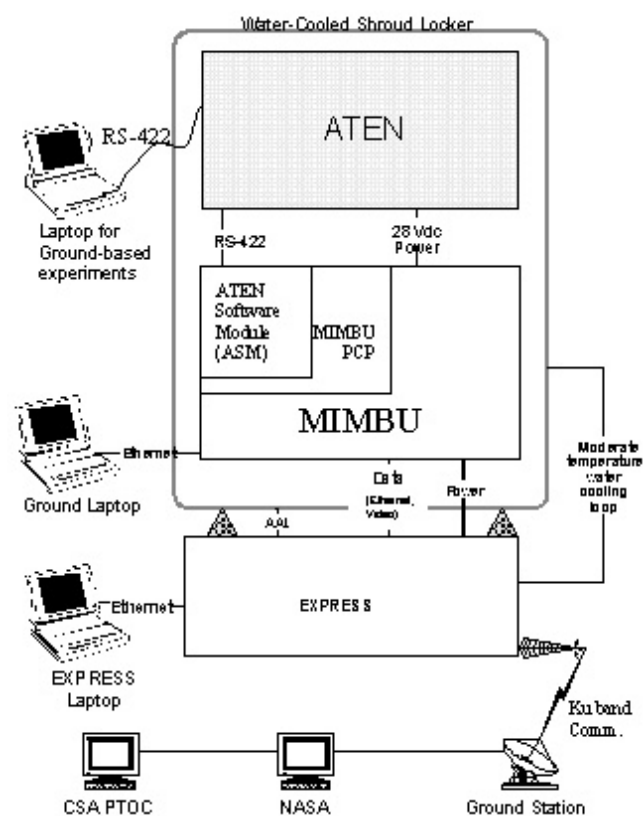


図 5 - 1 0 先進熱環境炉（ATEN）の概略図



## 6. 研究シナリオの具体的な進め方

日本における基礎科学分野の宇宙環境利用研究、特に、国際宇宙ステーションの微小重力環境を利用して行う基礎物理・化学物理分野の利用研究については、利用推進の積極的な取り組みがなされていなかったこともあり、これまで国内では、国際宇宙ステーション利用に向けたこの分野の研究提案が殆どなされていない。しかし、統計物理学・凝縮系物理学・化学物理学などの専門分野における日本の研究水準は極めて高く、その研究者層も厚いことから、日本が微小重力物理学分野の発展に貢献できる可能性が大いに期待される場所である。そこで、日本の物理学研究の特徴や実績、研究者の関心の方向性を踏まえて、新たな実験環境である微小重力環境の利用の意義やその潜在的可能性を広く普及させ、また、そのような実験環境を利用して行える微小重力物理学研究の視点や研究領域・研究課題候補を示すことにより、物理学を中心とした基礎科学分野の研究者の関心を喚起することを目的として、本研究シナリオがまとめられている。

### 6. 1 研究シナリオ作成にあたっての視点

研究シナリオをまとめるにあたって留意した事項を整理する。

#### (1) 微小重力の利用

微小重力環境の特徴として、系の対称性が維持される、自重による変形や静水圧による圧縮が抑制される、熱対流や密度対流による熱輸送・物質輸送が抑制される、密度の差による相分離が抑制される、物質を自由に浮遊させることができるなど、地上では実現困難な性質が挙げられる。微小重力物理学では、「重力の制御」が行える環境の特徴を利用して、基本的な物理法則や自然原理の探究を行う。

#### (2) 我が国の特徴

我が国においては、非平衡系の輸送係数を平衡系のゆらぎを用いて定式化したグリーン―久保の公式、長波長のゆらぎに着目して動的臨界現象を説明したモード結合理論、臨界現象のサイズ依存性を利用して古典的な平均場理論を拡張したコヒーレント異常法等、統計物理学・凝縮系物理学・化学物理学における独創的な研究が展開されている。また、この分野の研究レベルは高く、研究者の層も厚いので、これらの研究分野の特徴、実績、研究者の関心を反映した研究領域および研究課題を設定することが戦略的に有効である。

#### (3) 基礎研究の重視

基礎物理をはじめとした基礎科学は、基本的な法則や自然原理の探究を目的としており、研究成果の応用や波及効果が直ちに明らかとならない場合も多い。このため研究シナリオの作成にあたっては、科学的意義を真摯に吟味するとともに、関連する多くの研究者によるコンセンサスの形成に配慮する必要がある。

## 6. 2 研究シナリオの具体的な進め方

ここでまとめられた研究シナリオについては、次のような考え方にもとづいて適用を図る。

### (1) 研究シナリオの利用方法の考え方

本研究シナリオは、“微小重力物理学分野の研究の視点”および“宇宙環境利用に関する公募地上研究で推奨されるべき研究の領域と具体例”を知るために利用されることが想定されている。また、国際宇宙ステーションにおける宇宙実験テーマの国際公募に対して、“「微小重力物理学分野」として利用可能な実験機会と実験装置の概要”を知るためにも利用できるよう配慮されている。

本研究シナリオは、この分野に関心を寄せる研究者に微小重力利用の様々な情報を提供すること、このような情報を通して多くの研究者が微小重力利用の科学的価値を的確に認識・評価できること、そして、微小重力利用の研究課題が広く認知されること、を“当面の目的”にしている。

本研究シナリオに定義された研究領域および研究課題例は、関連する統計物理学・凝縮系物理学・化学物理学の専門家により組織された委員会（非平衡現象と重力相関調査検討委員会）による議論を踏まえて抽出されたものであり、日本の研究者の実績や関心を反映してまとめられたものである。今後この研究シナリオが指針となって微小重力物理学分野における活発な研究活動が展開されることを期待するものである。さらにその結果、本研究シナリオに含まれていない新たな研究の視点が生まれてきた場合には、適宜、研究シナリオの改訂を行っていく。このように、日本の微小重力物理学研究の関心領域、方向性を集約する研究資料としての利用方法も想定している。

### (2) 研究コミュニティの構築について

これまで、微小重力物理学分野が関連分野の研究者に十分認知されてきたとはいえず、研究者のネットワークも限られた広がりを持つにすぎない。本研究シナリオの普及を通して、微小重力物理学が関連学会や研究者に広く認知され、研究者の公募地上研究への応募、宇宙環境利用に関連したシンポジウムやワークショップへの参画などを通して、活発な研究コミ

コミュニティが構築されることが期待される。

また、研究コミュニティは、日本物理学会、日本化学会、日本マイクログラビティ応用学会など、関連する学会における活動や連携、交流を積極的に行っていくことが望ましい。

### (3) 重点研究領域についての考え方

本研究シナリオは、日本の研究者の実績や関心を反映するよう配慮してまとめられたものであり、公募地上研究および国際公募にあたっては、推奨されるべき研究領域や研究課題の例として本研究シナリオの内容が参考にされることが望ましい。

一方、微小重力物理学分野における研究提案は、現状は未だ萌芽的な段階であり、宇宙実験テーマの創出に向けて研究領域の重点化を図る段階には至っていない。したがって、重点研究領域の設定、およびそれに伴う実験装置利用に関する考え方は、微小重力物理学分野における日本の研究活動の具体的な進展を見据えながら、今後検討を進めていくべき課題である。

## [ 参考文献 ]

### 1. 全般

- [1] 井口洋夫監修：宇宙環境利用のサイエンス、裳華房（2000）。
- [2] Proceedings of Fundamental Physics and Chemical Physics under Microgravity, NASDA Conference Publication (2000).

### 2. 巨視的量子現象

#### (1) ボース-アインシュタイン凝縮

- [1] K. Mendelssohn: The Quest for Absolute Zero, 2<sup>nd</sup> ed (Taylor & Francis, 1977); Z.M. Galasiewicz: Helium 4 (Pergamon Press, 1971); F. London: Superfluids vol. II (John Wiley & Sons, 1954).
- [2] J.M. Kosterlitz and D.J. Thouless, J. Phys. C: Solid St. Phys. 6, 1181 (1973); D.J. Bishop and J.D. Reppy, Phys. Rev. Lett. 40, 1727 (1978).
- [3] S. Chu, L. Hollberg, J.E. Bjorkholm, A. Cable and A. Ashkin: Phys. Rev. Lett. 55,48 (1985); S. Chu: Sci. Am. No.2, 71 (1992); W.Phillips: Sci. Am., 3, 35 (1987).
- [4] 久我隆弘：日本物理学会誌 52, 930 (1997).
- [5] M.H. Anderson et.al., Science 269,198(1995).
- [6] K.B. Davis et.al., Phys.Rev.Lett.75,3969(1995).
- [7] C.C. Bradley et.al., Phys.Rev.Lett.75,1687(1995); ibid. 78, 985 (1997).
- [8] D.G. Fried et.al., Phys.Rev.Lett.81,3811(1998).
- [9] レーザー冷却された中性原子気体の Bose-Einstein 凝縮」上田正仁、日本物理学会誌、53 (1998).
- [10] 清水富士夫, 応用物理 60, 864 (1991).
- [11] P.A. Ruprecht, et al, Phys. Rev. A 51, 4704 (1995); T. Tsurumi and M. Wadati, J. Phys. Soc. Jpn., 66, 3035 (1997).
- [12] R.J. Dodd, et al., Phys. Rev. A 54, 661(1996); F. Dalfovo and S. Stringari, ibid, 53, 2477 (1996).
- [13] Yu. Kagan, G. Shlyapnikov and J. Walraven, Phys. Rev. Lett. 76, 2670 (1996).
- [14] M. Ueda and A. Leggett, Phys. Rev. Lett., 80, 1576 (1998).
- [15] K. Mølmer, Phys. Rev. Lett. 80, 1809 (1998); N. Nygaard and K. Mølmer, Phys. Rev. A 59, 2974 (1999).
- [16] T. Miyakawa, T. Suzuki and H. Yabu, preprint (cond-mat/0002145); M. Amoruso, et al., Eur. Phys. J. D4, 261 (1998); L.

Vichi, et al., J. Phys. B31, L899 (1998); T. Tsurumi and M. Wadati, J. Phys. Soc. Jpn. 69 (2000) in print.

[17] M.-O. Mewes et al., preprint (physics/9909007).

[18] T. Miyakawa, T. Suzuki and H. Yabu, cond-mat/0002048; M. Amoruso, C. Minniti and M. P. Tosi, to be published in Eur. Phys. J. D.

## (2) 量子核形成

[1] K. Iida and K. Sato, Prog. Theor. Phys., 98, 277 (1997); K. Iida, ibid., 98, 739 (1997); K. Iida, Phys. Rev. B, 59, 3798 (1999).

[2] I.M. Lifshitz and Yu. Kagan: Sov. Phys. JETP, 35,206 (1972); I.M. Lifshitz, V.N. Polesskii and V.A. Khokhlov: Sov. Phys. JETP, 47,137 (1978).

[3] T. Satoh, M. Morishita, M. Ogata and S. Katoh, Phys. Rev. Lett., 69, 335 (1992).

[4] 佐藤武郎、高木伸：量子核形成？超低温における多粒子系準安定状態の崩壊、日本物理学会誌、50, 184-192 (1995); 佐藤武郎、森下将史、畠山顕、高島慈： $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  混合液過飽和状態からの相分離-一次相転移における量子効果-、固体物理、29、883 (1994).

[5] T. Nakamura and S. Takagi, Mod. Phys. Lett.B 9,591(1995); T. Nakamura, Y. Kanno and S. Takagi, Phys. Rev. B 51, 8446 (1975).

[6] T.G. Wang, et al., Phys. Rev. Lett., 56, 452 (1986); M.A. Weilert, et al., J. Low Temp. Phys. 106, 101, (1997).

[7] V.L. Tsymbalenko, J. Low Temp. Phys. 88, 55 (1992).

[8] 「微小重力下での希釈冷凍機」 飯田光人, 低温工学 vol. 34, 9 月号 p.483 (1999) .

[9] 奥田雄一、松本宏一：多自由度系としての原子集団及び原子のトンネル現象 平成8年度 第4回研究会特集号 p.12-16 (1999).

## (3) ヘリウムの結晶成長

[1] A.F. Andreev, A.Ya Pashin, Sov. Phys. JETP, 40, 763 (1978).

[2] A.F. Andreev, Czechoslovak. J. Phys., 46, Suppl. S6, 3043 (1997).

[3] 水崎隆雄「結晶化波（液体 $^3\text{He}$  - 固体 $^3\text{He}$ 界面）」多自由度系としての原子集団及び原子のトンネル現象 平成8年度 平成10年2月 p.131-134 (1998).

[4] M. Uwaha, J. Low Temp. Phys. 111, p.37-48 (1998).

## (4) 量子干渉効果と重力理論

[1] C.J. Davisson & L.H. Germer, Nature 119, 558 (1927).

- [2] I. Estermann and O. Stern, Z. Phys. 61, 95-125 (1930).
- [3] W. Schöllkopf and J.P. Toennies, Science 226, 1345-1348 (1994).
- [4] H. v. Jr. Halhan and P. Preiswerk, C.R. Acad. Sci. 203, 73-75 (1936).
- [5] M. Arndt, et al. Nature 401, 680 (1999).
- [6] A.W. Overhauser and R. Colella, Phys. Rev. Lett. 33, 1237 (1974); R. Colella, A.W. Overhauser and S.A. Werner, Phys. Rev. Lett. 34, 1472 (1975).
- [7] J.L. Staudenmann, S.A. Werner, R. Colella and A.W. Overhauser, Phys. Rev. A21, 1419 (1980).
- [8] R. Eötvös, Math. Nat. Ber. Ungarn. 8. 65 (1890); R. Eötvös, D. Pekārand and E. Fekete, Ann. Phys. (N.Y.) 68, 11 (1922); P.G. Roll, R. Krotkov and R.H. Dicke, Ann. Phys. (N.Y.) 26, 442 (1967).

### 3. 臨界点近傍の流体ダイナミクス

- [1] A. Onuki, Phase Transition Dynamics, Cambridge University Press.
- [2] K. Nitsche and J. Straub, Proc. 6th European Symp. on Material Science under Microgravity Conditions (Bordeaux, France, 2-5 December 1986); J. Straub and K. Nitsche, Fluid Phase Equilibria, 88, p183 (1993).
- [3] A.V. Voronel, Yu.R. Chashkin, V.A. Popov and V.G. Simkin, Sov. Phys. JETP, 18, p568 (1964); A.V. Voronel, Physica, 73, p195 (1974).
- [4] A. Onuki and R.A. Ferrell, Physica, A164, p245 (1990).
- [5] As a recent review see, A. Onuki, J. Phys., C9, p6119 (1997).
- [6] A. Onuki, J. Low Temp. Phys., 50, p433 (1983); 55, p309 (1984).
- [7] R.V. Duncan G. Ahlers and V. Steinberg, Phys. Rev. Lett., 60, p1522 (1988).
- [8] A. Onuki, Japanese Journal of Applied Physics, 26, p365 (1987).
- [9] W.A. Moeur, P.K. Day, F-C. Liu, S.T. Boid. M.J. Adriaans and R.V. Duncan, Phys. Rev. Lett., 78, p2421 (1997).
- [10] A. Onuki, Physica, A234, p189 (1996); J. Inter, Thermophysics, p471 (1998).
- [11] A.B. Kogan, D. Murphy and H. Meyer, Phys. Rev. Lett., 82, p4635 (1999).
- [12] D. Dahl and M.R. Moldover, Phys. Rev. Lett., 27, p1421 (1971); J.S. Huang, W.I. Goldburg and M.R. Moldover, Phys. Rev. Lett., 34,

p639 (1975).

#### 4. 非線形現象と非平衡熱力学過程

##### (1) 非平衡熱力学関数による反応拡散系に及ぼす重力効果の定式化

- [1] I. プリゴジン: 存在から発展へ、みすず書房(1984).
- [2] 沢田康次: 非平衡系の秩序と乱れ、朝倉書店 (1993) .
- [3] 森肇、蔵本由紀: 散逸構造とカオス、岩波書店 (1997) .
- [4] D. Kondepudi and I. Prigogine: Modern Thermodynamics - From heat engines to dissipative structures. Wiley (1998).
- [5] 北原和夫: 非平衡系の統計力学、岩波書店 (1997).

##### (2) 非線形移流を伴う微生物コロニーのパターン形成

- [1] 西浦廉政: 非線形問題ーパターン形成の数理、岩波講座現代数学の展開 (1999).
- [2] J.D. Murray: Mathematical Biology. Springer (1989).
- [3] E.O. Budrene and H.C. Berg: Dynamics of formation of symmetrical patterns by chemotactic bacteria. Nature, 376, 49-53 (1995)
- [4] M. Mimura and T. Tsujikawa: Aggregating pattern dynamics in a chemotaxis model including growth. Physica, A230, 499-543 (1996).
- [5] M. Matsushita, J. Wakita, H. Itoh, I. Rafols, T. Matsuyama, H. Sakaguchi and M. Mimura: Interface growth and pattern formation in bacterial colonies. Physica, A249, 517-524 (1998).
- [6] M. Matsushita, J. Wakita, H. Itoh, K. Watanabe, T. Arai, T. Matsuyama, H. Sakaguchi and M. Mimura: Formation of colony patterns by a bacterial cell population. Physica, A274, 19-199 (1999).

##### (3) 微小重力下での燃焼

- [1] 三村昌泰: 燃焼パターンのダイナミクス、数理科学、No.418、48-54 (1998).
- [2] 小林亮、三村昌泰: 燃焼現象におけるパターン形成、非線形現象と大規模科学技術計算、龍谷大学、19-26 (1990).
- [3] J. Warnatz, U. Maas and R.W. Dibble: Combustion-Physical and chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation. Springer (1999).
- [4] S.L. Olson, H.R. Baum and T. Kashiwagi: Finger-like smoldering

over thin cellulosic sheets in microgravity. The 27<sup>th</sup> Symposium on International Combustion, The Combustion Institute, 2525-2533 (1998).

[5] O. Zik and E. Moses: Fingering instability in solid fuel combustion: The characteristic scales of the developed state. The 27<sup>th</sup> Symposium on International Combustion, The Combustion Institute, 2815-2820 (1998).

[6] P.D. Ronney: Understanding combustion processes through microgravity research. The 27<sup>th</sup> Symposium on International Combustion, The Combustion Institute, 2485-2506 (1998).

#### (4) 化学波の進行速度に対する重力効果

[1] Shuko Fujieda, Yoshihiro Mogami, Keiko Moriyasu and Yoshihito Mori: Nonequilibrium / Nonlinear Chemical Oscillation in the Virtual Absence of Gravity: Advances in Space Research, 33, 2057-2063 (1999).

[2] Shuko Fujieda, Yoshihiro Mogami, Wei Zhanag, Hiromi Shinohara and Sayaka Handa: Automated Experimental Assembly for Studying the Reaction-Diffusion Behavior of Belousov-Zhabotinsky Reactions under Microgravity: Anal. Sci., 15, 159-164 (1999).

[3] Shuko Fujieda, Yoshihiro Mogami, Atsuko Furuya, Wei Zhang and Tsunehisa Araiso: Effect of Microgravity on the Spatial Oscillation Behavior of Belousov-Zhabotinsky Reaction Catalyzed by Ferroin: J. Phys. Chem., 101A, 7926-7928 (1997).

[4] Shuko Fujieda, Yoshihiro Mogami, Wei Zhang and Tsunehisa Araiso: Experimental System Assembled for Studying the Chemical Oscillation Behavior of Belousov-Zhabotinskii Reactions in the Microgravity: Anal. Sci., 12, 815-818 (1996).

[5] S. Kai, S.C. Mueller and J. Ross: Measurements of temporal and spatial sequences in periodic precipitation processes. J. Chem. Phys., 76, 1392 (1982).

[6] S. Kai and S.C. Mueller: Spatial and temporal macroscopic structures in chemical reaction systems. Science on Form, 1, 9-39 (1985).

[7] S. Kai, T. Ariyoshi, S. Inenaga and H. Miike: Curious properties of soliton induced by Marangoni instability in shallow BZ reaction. Physica, D84, 269-275 (1995).

#### (5) パターン形成に伴う物性量および反応定数の変化



- [1] S. Kai, K. Hayashi and Y. Hidaka: Pattern forming instability in homeotropically aligned liquid crystal. J. Phys. Chem., 100, 19007-16 (1996).
- [2] Y. Hidaka, J-H. Huh, K. Hayashi, S. Kai and M.I. Tribelsky: Soft-mode turbulence in electrohydrodynamic convection of a homeotropically aligned nematic layer. Phys. Rev., E56, R6256-56 (1997).
- [3] O. Inomoto and S. Kai: Hydrodynamical effects of chemical waves in quasi-two-dimensional solution in BZ reaction. Inter. J. Bif. Chaos. 7, 989-96 (1997).
- [4] H. Okabe, K. Kuboyama, K. Hara and S. Kai: Anomalous velocity change of surface wave near the gelation point. Physics, B263/264, 73-76 (1999).

#### (6) 無容器・無界面反応化学

- [1] J. Maselko and K. Showalter: Chemical Waves on Spherical Surfaces, Nature, 339, 609, (1989).
- [2] K. Yoshikawa, R. Aihara, and K. Agladze: Size-dependent Belousov-Zhabotinsky Oscillation in Small Beads, J. Phys. Chem. A, 102, 7649-7652 (1998).

#### (7) 水-油相互作用実験

- [1] S. Kai, S.C. Mueller, T. Mori and M. Miki: Chemically driven nonlinear waves and oscillations at an oil-water interface. Physics, D50, 412-428 (1991).
- [2] K. Yoshikawa and Y. Matsubara: Spontaneous Oscillation of pH and Electrical Potential in an Oil-Water System, J. Am. Chem. Soc., 105, 5967-5969 (1983).
- [3] K. Toko, K. Yoshikawa, M. Tsukiji, M. Nosaka, and K. Yamafuji: On the Oscillatory Phenomenon in an Oil/Water Interface, Biophys. Chem., 22, 151-158 (1985).
- [4] K. Yoshikawa and M. Makino: Self-pulsing at an Oil/Water Interface in the Presence of Phospholipid, Chem. Phys. Lett., 160, 623-626 (1989).
- [5] K. Yoshikawa and N. Magome: Chemomechanical Transduction in an Oil-Water System. Regulation of the Macroscopic Mechanical Motion, Bull. Chem. Soc. Jpn., 66, 3352-3357 (1993).
- [6] K. Yoshikawa, and N. Magome: A Novel Turbine Driven by Chemical Potential Gradient, Trans. Mat. Res. Soc. Jpn., 19B, 1079-1084

(1994).

- [7] T. Kusumi, K. Yoshikawa, and S. Nakata: Oscillating Chemical Reaction in Oil/Water Systems, Generation of Macroscopic Oscillatory Force, In "Far-From-Equilibrium Dynamics of Chemical Systems", eds. J. Gorecki, A. S. Cukrowski, A. L. Kawczynsky, B. Nowakowski, 87-94 (1994).
- [8] S. Nakata, M. Ukitsu, and K. Yoshikawa: New Chemical Oscillator by Hydrolysis Reaction of Ester in a Water/Oil System, "Dynamical Systems and Chaos" World Scientific (1995).
- [9] N. Magome, and K. Yoshikawa: Nonlinear Oscillation and Ameba-Like Motion in an Oil/Water System, J. Phys. Chem., 100, 19102-19105 (1996).

#### (8) その他

##### ・プラズマ不安定性：

- [1] M. Ishikawa, S. Kamei, Y. Sato, N. Fujomori, N. Koshikawa, K. Murakami and T. Suzuki: A diagnostic study of plasma CVD under microgravity and its application to diamond deposition. Adv. Space Res., 24, 1219-1223 (1999).
- [2] M. Ishikawa, S. Kamei, N. Koshikawa, N. Fujomori and Y. Sato: Diagnostic study of plasma CVD under microgravity. SPIE vol. 3792, 283-291 (1999).

##### ・非線形振動と分子機械：

- [1] K. Yoshikawa and H. Noguchi: A Working Hypothesis on the Mechanism of Molecular Machinery, Chem. Phys. Lett., 303, 10-14 (1999).

##### ・流体の振動：

- [1] M. Okamura, and K. Yoshikawa: Rhythm in a Saline Oscillator, Phys. Rev. E, 61, 2445-2452 (2000).
- [2] 吉川研一：ペットボトルで生物リズムを考える，科学，68(2)，105-109 (1998).
- [3] 野村慎一郎，小平将裕：遊びと非線形物理，大学の物理教育，2，49 (1998).
- [4] 小平将裕，吉川研一：ペットボトルがリズムを刻む？、化学，54(11)，48-49 (1999).

## [ 関連機関アドレス ]

### (1) 我が国の関連機関

| 機関名              | ホームページアドレス                                                                                                              |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 宇宙開発事業団          | <a href="http://www.nasda.go.jp/">http://www.nasda.go.jp/</a>                                                           |
| 宇宙科学研究所          | <a href="http://www.isas.ac.jp/">http://www.isas.ac.jp/</a>                                                             |
| (財) 宇宙環境利用推進センター | <a href="http://www.jsup.or.jp/">http://www.jsup.or.jp/</a>                                                             |
| (財) 日本宇宙フォーラム    | <a href="http://www2.jsforum.or.jp/">http://www2.jsforum.or.jp/</a>                                                     |
| (財) 地下無重力実験センター  | <a href="http://www.jamic.co.jp/">http://www.jamic.co.jp/</a>                                                           |
| (株) 日本無重量総合研究所   | <a href="http://www1.ocn.ne.jp/~mg1ab/">http://www1.ocn.ne.jp/~mg1ab/</a>                                               |
| ダイヤモンドエアサービス株式会社 | <a href="http://www.das.co.jp/">http://www.das.co.jp/</a>                                                               |
| 日本マイクログラビティ応用学会  | <a href="http://moses.agnes.aoyama.ac.jp/~gakkai/shuttle.html">http://moses.agnes.aoyama.ac.jp/~gakkai/shuttle.html</a> |

### (2) アメリカの関連機関

| 機関名                      | ホームページアドレス                                                                                                                              |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| アメリカ航空宇宙局                | <a href="http://www.nasa.gov/">http://www.nasa.gov/</a>                                                                                 |
| NASA ケネディ宇宙センター(KSC)     | <a href="http://www.ksc.nasa.gov/">http://www.ksc.nasa.gov/</a>                                                                         |
| NASA ジョンソン宇宙センター(JSC)    | <a href="http://www.jsc.nasa.gov/">http://www.jsc.nasa.gov/</a>                                                                         |
| NASA マーシャル宇宙飛行センター(MSFC) | <a href="http://www1.msfc.nasa.gov/">http://www1.msfc.nasa.gov/</a>                                                                     |
| NASA ジェット推進研究所(JPL)      | <a href="http://www.jpl.nasa.gov/">http://www.jpl.nasa.gov/</a>                                                                         |
| ミッションコントロールセンター          | <a href="http://spaceflight.nasa.gov/shuttle/reference/mcc/index.html">http://spaceflight.nasa.gov/shuttle/reference/mcc/index.html</a> |

(3) ヨーロッパの関連機関

| 機関名                      | ホームページアドレス                                                          |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 欧州宇宙機構 (ESA)             | <a href="http://www.esa.int/">http://www.esa.int/</a>               |
| 欧州宇宙研究所 (ESRIN)          | <a href="http://www.esa.int/esrin/">http://www.esa.int/esrin/</a>   |
| フランス国立宇宙研究センター (CNES)    | <a href="http://www.cnes.fr/">http://www.cnes.fr/</a>               |
| ドイツ航空宇宙センター (DLR)        | <a href="http://www.gsoc.dlr.de/">http://www.gsoc.dlr.de/</a>       |
| イギリス国立宇宙センター (BNSC)      | <a href="http://www.bnsc.gov.uk/">http://www.bnsc.gov.uk/</a>       |
| イタリア宇宙事業団 (ASI)          | <a href="http://www.asi.it/">http://www.asi.it/</a>                 |
| オーストリア (ASM)             | <a href="http://www.asm.at/">http://www.asm.at/</a>                 |
| オランダ国立航空宇宙研究所 (NLR)      | <a href="http://www.nlr.nl/public/">http://www.nlr.nl/public/</a>   |
| スウェーデン宇宙公社 (SSC)         | <a href="http://www.ssc.se/">http://www.ssc.se/</a>                 |
| スペイン (INTA)              | <a href="http://www.inta.es/">http://www.inta.es/</a>               |
| スペイン (VILSPA)            | <a href="http://www.vilspa.esa.es/">http://www.vilspa.esa.es/</a>   |
| デンマーク宇宙協会 (DSRI)         | <a href="http://www.dsri.dk/">http://www.dsri.dk/</a>               |
| ノルウェー：アンドヤ・ロケットレンジ (ARR) | <a href="http://www.rocketrange.no/">http://www.rocketrange.no/</a> |
| ベルギー宇宙航空学協会              | <a href="http://www.magnet.oma.be/">http://www.magnet.oma.be/</a>   |
| ルーマニア宇宙協会 (ROSA)         | <a href="http://www.rosa.ro/">http://www.rosa.ro/</a>               |

(4) その他の海外の関連機関

| 機関名                       | ホームページアドレス                                                                                                  |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| カナダ宇宙庁 (CSA)              | <a href="http://www.space.gc.ca/">http://www.space.gc.ca/</a>                                               |
| ブラジル国立宇宙研究所 (INPE)        | <a href="http://www.inpe.br/">http://www.inpe.br/</a>                                                       |
| アルゼンチン宇宙機関 (CONAE)        | <a href="http://www.conae.gov.ar/caratula.html">http://www.conae.gov.ar/caratula.html</a>                   |
| オーストラリア連邦科学工業研究機関 (CSIRO) | <a href="http://www.csiro.au/">http://www.csiro.au/</a>                                                     |
| ロシア宇宙庁 (RSA)              | <a href="http://www.rosaviakosmos.ru/english/eindex.htm">http://www.rosaviakosmos.ru/english/eindex.htm</a> |
| ミールステーション                 | <a href="http://liftoff.msfc.nasa.gov/rsa/mir.html">http://liftoff.msfc.nasa.gov/rsa/mir.html</a>           |

(5) 国際宇宙ステーション (ISS) 関連ホームページ

| 機関名                           | ホームページアドレス                                                                                                                              |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 国際宇宙ステーション<br>(NASA 公式ホームページ) | <a href="http://spaceflight.nasa.gov/">http://spaceflight.nasa.gov/</a>                                                                 |
| 国際宇宙ステーション組立シーケンス             | <a href="http://spaceflight.nasa.gov/station/assembly/">http://spaceflight.nasa.gov/station/assembly/</a>                               |
| 欧州宇宙機関 (ESA) の ISS 関連ホームページ   | <a href="http://www.estec.esa.nl/spaceflight/index.htm">http://www.estec.esa.nl/spaceflight/index.htm</a>                               |
| カナダ宇宙機関 (CSA) の ISS 関連ホームページ  | <a href="http://www.space.gc.ca/ENG/About/Space_Systems/station1.html">http://www.space.gc.ca/ENG/About/Space_Systems/station1.html</a> |

(6) スペースシャトル関連ホームページ

| 機関名                    | ホームページアドレス                                                                                                                          |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 最新スペースシャトルミッションのホームページ | <a href="http://spaceflight.nasa.gov/shuttle/">http://spaceflight.nasa.gov/shuttle/</a>                                             |
| スペースシャトル打上げ一覧          | <a href="http://science.ksc.nasa.gov/shuttle/missions/missions.html">http://science.ksc.nasa.gov/shuttle/missions/missions.html</a> |

(7) 国際宇宙ステーションに搭載される予定の実験装置

| 機関名                          | ホームページアドレス                                                                                                                                                          |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 国際宇宙ステーションに搭載される<br>予定の実験装置  | <a href="http://jem.tksc.nasda.go.jp/utiliz/iao_mg_2000/menu/text4.htm">http://jem.tksc.nasda.go.jp/utiliz/iao_mg_2000/menu/text4.htm</a>                           |
| 低温微小重力物理実験装置<br>(LTMPF)      | <a href="http://ltmpf.jpl.nasa.gov/">http://ltmpf.jpl.nasa.gov/</a>                                                                                                 |
| レーザー冷却／原子物理ハードウェア (LCAP)     | <a href="http://horology.jpl.nasa.gov/lcap/">http://horology.jpl.nasa.gov/lcap/</a>                                                                                 |
| 溶液／蛋白質結晶実験装置 (SPCF)          | <a href="http://jem.tksc.nasda.go.jp/kibo/kibomefc/spcf.html">http://jem.tksc.nasda.go.jp/kibo/kibomefc/spcf.html</a>                                               |
| 物質成長、臨界点近傍流体実験装置<br>(DECLIC) | <a href="http://www.cnes.fr/activites/micropesanteur/sciences_materiaux/declic.pdf">http://www.cnes.fr/activites/micropesanteur/sciences_materiaux/declic.pdf</a>   |
| 流体物理実験装置 (FPEF)              | <a href="http://jem.tksc.nasda.go.jp/kibo/kibomefc/fpef.html">http://jem.tksc.nasda.go.jp/kibo/kibomefc/fpef.html</a>                                               |
| コロイド物理宇宙実験装置 (PCSA)          | <a href="http://www.deas.harvard.edu/projects/weitzlab/research/nasaproj.html">http://www.deas.harvard.edu/projects/weitzlab/research/nasaproj.html</a>             |
| 国際微小重力プラズマ装置 (IMPF)          | <a href="http://www.dlr.de/Microgravity/IAO_2000">http://www.dlr.de/Microgravity/IAO_2000</a>                                                                       |
| 帯域炉 (AFEX)                   | <a href="http://jem.tksc.nasda.go.jp/kibo/kibomefc/afex.html">http://jem.tksc.nasda.go.jp/kibo/kibomefc/afex.html</a>                                               |
| 先進熱環境炉 (ATEN)                | <a href="http://www.space.gc.ca/csa_sectors/space_science/microgravity_sci/aten.asp">http://www.space.gc.ca/csa_sectors/space_science/microgravity_sci/aten.asp</a> |

(別表)

微小重力物理学ワーキンググループ委員一覧

| 氏名          | 所属・役職                    |
|-------------|--------------------------|
| (委員長) 鈴木 増雄 | 東京理科大学 理学部 応用物理 教授       |
| (委員) 北原 和夫  | 国際基督教大学 理学科 物理学 教授       |
| (委員) 高木 隆司  | 東京農工大学 工学部 機械システム工学科 教授  |
| (委員) 奥田 雄一  | 東京工業大学 理工学研究科 物性物理学専攻 教授 |