解説

微小重力下における基礎物理学 および基礎化学

Fundamental Physics and Chemistry under Microgravity

執筆者プロフィール

石川 正道
Masamichi ISHIKAWA

◎1955年3月生まれ
東北大学理学部化学科卒業，工学博士。アメリカ物理学会，日本応用物理学会，日本マイクロ重力ティン用学会会員
◎研究・専門テーマは結晶成長，材料化学
◎（株）三菱総合研究所 先端科学研究センター 主席研究員
〒100-8141 東京都千代田区大手町2-3-6/
E-mail: mishikawa@mri.co.jp

1. はじめに

宇宙実験は，新材料創製の場として宇宙の微小重力環境を活用することから始まった。これは，微小重力場では対流や浮遊・沈降による重力分離がなくなることから，流体中の熱や物質の輸送過程が大きく変化し，主として拡散支配によって材料プロセスが制御されるということが強く認識されたことによる。この結果，巨視的な流体現象を取り扱う流体力学が，微小重力実験の基礎にある科学として取り扱われた⁽¹⁾。

しかし，その後の宇宙実験の進展によって流体現象のように巨視的で目に見える現象から，微視的な現象に対する微小重力効果に注目した研究への取組みがなされるようになってきた。この結果，微視的な統計的揺らぎと巨視的な物理現象との間に成り立つ普遍的な物理法則を探索する基礎物理学が微小重力実験の重要な課題として設定されるに至った⁽²⁾。さらに近年ナノサイエンス研究の勃興に伴い，ナノスケールで物質を操作することによって巨視的な構造を生み出すという，時空間発展型の物質操作を中心とした化学研究が，宇宙実験の興味ある課題として認識されるようになった。

最近の宇宙ステーションの運用をとりまく諸環境の変化により，今後新たに取り組まれる宇宙実験に関しては，従

来以上に，宇宙ステーション利用のメリットを明確に打ち出すことがのぞまれるようになってきた⁽³⁾。長期にわたる研究の遂行が必要となる宇宙実験では，地上の研究に比べて多額の資金が必要となるため，実験の実施によって，当該分野の研究を発展できる要因を明確に説明することが求められる。また，宇宙実験はわずかな回数の実験機会しか得られないことが多く，その研究テーマは，実証すべき重要な仮説が認識されており，前もって行われる理論研究およびシミュレーションによって結果が予想されるなど，実験の結果，判定される具体的な目標がはっきりしていることが望ましい。

これらの条件を満たす基礎科学研究として，我が国では統計物理学などを中心とした微小重力物理学（基礎物理学）および化学反応など分子揺らぎが支配する基礎化学の検討が行われている。ここでは，宇宙実験テーマとしては新しい基礎科学分野の研究が，どのような科学的課題のもとに進展しつつあるかを解説する。

2. 微小重力物理学

近年の基礎物理学研究においては，物質を構成する粒子の微視的な振舞いだけではなく，それらが協調的な相互作用の結果として示す巨視的あるいはメソスコピック（0.1～数100ミクロンのサイズ）レベルにある粒子集団の振舞いへと研究の対象を拡大してきている。その背景としては，非平衡相転移，生命現象に深く関わる複雑系，非線形現象など，粒子間の相互作用や非線形性が強い現象に対する理解が深まったことがあげられる。こうした現象を理解するには，物理スケールの階層構造の重要性，特に古典力学的な微視的領域と現象論的な巨視的領域の間を結びつける，メソスコピック領域における統計力学理論の構築が必要である。例えば，臨界流体の揺らぎの相関長は，メソスコピック領域の長さスケールにまで及び，非平衡など系が不安定な状態においては解消されることなくさらに大きなスケールにまで時間発展していく。ここにおいて重力の影響は

本質的に無視し得なくなる。

このように、これまでに主として微視的な粒子の素過程を対象としてきた基礎物理学が、それら要素的な過程が集積されている状態を観測するために物理スケールを拡大させてきた。またそれと並行して多体系における非平衡性や非線形の強い現象が重要な研究課題として認識されてきたことも合わさって、現代の基礎物理学研究において重力が再び重要な因子になりつつある。微小重力物理学では、物理現象の階層構造として微視的領域と巨視的領域を媒介するメソスコピック領域の重要性や、外場に敏感な非平衡・非線形現象に注目し、微小重力を利用する基礎物理学研究の視点を「多体系の揺らぎと相関」として体系化した⁽⁴⁾。そして、当面の研究領域として、極低温での巨視的量子現象の原理的な探究、臨界点近傍のダイナミクスの多様性と普遍性の探究、および複雑性をもたらす非平衡現象の探究の3領域が識別された。

2.1 極低温量子現象

ボース粒子が同一の量子状態（基底状態）に集団となって落ち込む現象は「ボース・アインシュタイン凝縮」として知られている。凝縮した粒子は秩序だって運動しており、その量子力学的性質は系全体の巨視的な現象として観測されることになる。このような系の振舞いは、巨視的量子現象と呼ばれている。超伝導現象や液体ヘリウムの超流動も、ボース・アインシュタイン凝縮の一つの性質として理解されている。ヘリウムの超流動状態からの結晶成長では、超流動体の特性である高い熱輸送・物質輸送のために界面での素励起が支配的となり、また、潜熱がすばやく奪われ直ちに平衡状態に達するため、純粋な成長過程を観測することができる。そのほか、量子核形成に見られるように、巨視的な自由度を持つ集合体が量子トンネル効果でポテンシャル障壁を透過する現象も、巨視的量子現象の一つ（巨視的トンネル現象）である。

巨視的量子現象の研究に対しては、次のような微小重力利用の利点がある。①凝縮体を長時間保持し、形成・成長過程を詳細に観測することができる（例：量子核形成、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精密測定することができる（例：ラフニング転移、臨界点近傍の量子流体の挙動など）、③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こめなど）。

2.2 臨界点ダイナミクス

流体はある条件で気体でも液体でもなくなる異常な挙動を示す。このような気体と液体の区別がなくなる気液臨界点では、系は重力による圧密に極めて敏感に応答し、そこに現れる物理現象は微小重力環境でのみ精密な実験が可能となる。例えば、臨界点およびその近傍において顕著にあら

われる音速で伝ばする熱輸送現象（熱波が容器内を素早く行き来することからピストン効果と呼ばれる）の観測、および揺らぎの長距離化により壁などの偶然の因子を排除して沸騰、液滴形成などの核形成現象を解明するなど、非平衡多体系の揺らぎを支配する普遍的な物理法則を探究することがねらわれている。

臨界点近傍では、比熱が発散するなどの熱物性値の異常により、重力の効果が強く現れる。例えば、気液臨界点では、圧縮率・体積膨張率の発散により、系のわずかな温度揺らぎや圧力揺らぎが大きな密度揺らぎを作り出す。このため、静水圧が作用する地上では、臨界点への接近に伴って系の密度が極めて不均一になり、臨界状態は系の一部分でしか成立しない。また、熱膨張が著しいことから加熱に対して直ちに対流が発生する。微小重力環境では、この二つの要素、すなわち、空間的不均一性と対流が抑制できるため、微小重力環境は臨界点近傍の物性研究に本質的な役割を果たす。

2.3 非平衡複雑系ダイナミクス

非平衡・非線形系では、内部の微小な揺らぎが不安定化して巨視的なスケールの揺らぎが形成される場合がある。揺らぎの時間的・空間的な分布は散逸構造と呼ばれ、雲の形、雪の結晶、炎、稲妻、生物の形態などにおいて、さまざまなパターンや形態を観察することができる。特に、反応拡散系のもとで生起する散逸構造では、物質の拡散現象と反応の非線性が拮抗し、さまざまなダイナミクスを示すことが知られている。系の空間構造の時間発展を決定する重要なパラメータは温度こう配や濃度こう配であり、巨視的なスケール（一般の流体系では $\mu\text{m}\sim\text{mm}$ のサイズ）にまで発達した揺らぎに重力が強く作用し、空間構造の選択や形態そのものに大きく影響を与える。このため、移流項を含めた反応拡散系において非平衡・非線形熱力学系の安定性と重力との相関を考察することで、自然現象に現れる複雑なパターン形成をより本質的に解明することが期待される。

非平衡熱力学過程では、分岐点における揺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にまで発達した揺らぎに強く作用し、観測される物理現象の推移に大きな影響を与える。この観点から、次のような微小重力環境のメリットの活用が注目される。①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熱揺らぎ、密度揺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現象を観測できる、③巨視的なスケールの物質を非接触のまま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を実現できる。

3. 基礎化学

宇宙環境に関わる化学研究は、微小重力場において顕著

となる化学過程にとどまらず、地球の低軌道に豊富に存在する原子状酸素との反応、極低温・真空紫外のもとでの反応など、宇宙空間ならではの環境場における化学現象も対象となる。化学研究において微小重力とその他の宇宙環境に関わる研究を比べた場合、後者のほうが一般の研究者には理解されやすいことが想像されるが、前述した非平衡系を支配する普遍的な物理法則の関わりのもとで、原子・分子が高次の分子階層構造を形成するような化学過程の特性を明らかにできる点が、基礎化学研究の意義であることを強調しておきたい。

一方、化学の研究者コミュニティにおいても宇宙ステーションを利用した研究領域の認識が徐々に高まりつつある。このような状況は、宇宙実験が開始された初期には化学研究に関わるテーマが乏しかったのに比して、近年、宇宙実験の進展によって物理化学分野の研究および軌道上曝露反応実験など化学研究者にとってなじみの深い研究が次第に増えてきたことによる。しかし、依然として化学研究者が宇宙利用に直接関与する機会は乏しいことも事実であり、基礎化学分野の研究者に対して十分な情報の提供とその利用に関する知識を具体的に提供することが重要となっている。宇宙航空研究開発機構（JAXA）は、このような観点から基礎化学分野における研究の方向性を指し示す「基礎化学研究シナリオ」を作成した。この研究シナリオでは、我が国の研究者コミュニティの層が厚く、かつ宇宙空間の特性を活用することによって当該領域の研究を飛躍的に発展させる可能性が高いと判断される「メゾスコピック系の化学」および「宇宙空間での化学反応」の2研究領域が重視されている⁽⁴⁾。

3.1 メゾスコピック系の化学

ミクロな原子・分子で無視できる重力効果は系のサイズとともに増大し、1ミクロンのサイズを越えるメゾスケールにおいては重要な役割を果たす。これに対応する現象として、反応拡散系、コロイド、臨界流体などの重力影響が注目される。メゾスコピック系の化学として微小重力下で顕在化する化学研究を考えた場合、①非平衡を利用した機能構造形成、②自己集合による超分子形成、③高次構造の形成ダイナミクス、④界面現象からみた分子間相互作用、⑤臨界流体中の化学過程、⑥無容器実験の六つのテーマにおいて有望な研究課題がみいだされた。

メゾスコピック系の化学では、分子階層化を引き起こすメカニズムに強い力点がある。階層化構造をもたらし分子間相互作用は、構造スケールが大きくなるに従ってその拘束力は相対的に弱くなる。できあがる高次構造は、重力による変形、沈降や流れなどによって本来あるべき姿から大きく逸脱する。微小重力場が実現する浮遊、無沈降は、集積構造の形成過程に作用するじょう乱を除き、このような構造化プロセスの研究に最適な条件を提供すると考えられる。

3.2 宇宙空間での化学反応

国際宇宙ステーション（ISS）が飛行する低軌道宇宙環境は、地球環境と宇宙環境が共存する領域であり、地球大気から供給される酸素が光化学反応によってラジカル化し原子状酸素として存在する⁽⁵⁾。かつ、宇宙ステーションが高速に飛行することから、ISSに設置、曝露された物質にこの原子状酸素を衝突させることができれば、地球上実験室では容易には実現できない、大フラックスの中性原子ビームによる各種物質との反応素過程の研究の遂行が可能となる。また、宇宙環境および地球環境の両方に起源をもつ未知の粒子状物質が存在し、これを捕捉、化学分析することによって宇宙空間での化学反応についてさまざまな知見を得ることができる。特に宇宙の低温環境では活性化過程がトンネル現象によって進行すること、生命の起源分子が容易に生成する。このような地上環境では従来かえりみられることがなかった宇宙空間での化学反応を研究の対象とすることによって、化学研究のフロンティアを時間および空間のスケールにおいて拡大することができる（このような化学研究の研究領域を「スペースケミストリー」と呼ぶことにしたい）⁽⁴⁾。

4. まとめ

ISS計画の進展によって、微小重力下の科学の領域が大きく拡大することとなった。また、宇宙実験の成果の活用も、初期の新材料創製から、バイオ、医療、ナノテクノロジー研究分野への応用へと変化してきた。本解説では、微小重力実験の基礎にある科学を、微視的なスケールでの統計現象の普遍性に重きを置く物理、非平衡系の揺らぎがつくりだす自然界の複雑性を解明する物理化学、分子レベルでのナノ構造の形成と制御を取り扱うメゾスコピック系の化学、宇宙空間での化学反応として発展的にとらえた。特に、統計物理現象の知見をナノマテリアルの自己集積化に応用する研究領域は、“宇宙空間でのナノプロセッシング”という新たな領域を開拓し、ナノテクノロジーを応用した技術革新を先導するものと期待される。

（原稿受付 2004年1月21日）

●文 献

- (1) 石川正道・日比谷孟俊, マイクログラビティ, (1994), 培風館.
- (2) 石川正道, 化学と工業, 54-5 (2001), 569-574.
- (3) JPL, Fundamental Physics in Space - Roadmap, (1998), NASA.
- (4) 微小重力物理研究シナリオは、次のサイト http://jem.tksj.jaxa.jp/utiliz/jp_senario_pys.html で入手可能. 基礎化学については、日本化学会編, 先端化学シリーズⅣ, 「理論・計算化学, クラスタ, スペースケミストリー」参照.
- (5) 井口洋夫 (監修), 宇宙環境利用のサイエンス, (2000), 裳華房.