

宇宙実験用小型ロケット（TR-I A）5号機 微小重力実験成果報告

平成 9 年 9 月 1 0 日
宇宙開発事業団

1. はじめに

宇宙開発事業団は、宇宙環境利用の促進、宇宙ステーションでの各種実験に必要な宇宙実験技術の高度化、宇宙ステーション用共通実験装置の要素技術の開発に資することを目的として、平成 8 年 9 月 2 5 日に TR-I A 5 号機を打ち上げ、以下の 6 テーマの微小重力実験を実施した。

その後、実験結果の解析作業を行ってきたが、この度、実験成果を報告書として取りまとめたので、その概要を報告する。

2. 5号機微小重力実験結果の概要

5号機においては下記の実験テーマを実施した。各実験の成果の概要については別紙に示す。

分 野	実験テーマ／代表研究者	実験装置
コロイド 結晶実験	分散系の自己組み立て成長 ／石川 正道（(株)三菱総合研究所）	観察技術実験装置Ⅱ型
沸騰実験	微小重力場の核沸騰熱伝達機構に 関する基礎実験 ／大田 治彦（九州大学）	流体物理実験装置Ⅱ型
燃焼実験	均一噴霧の生成及びその燃焼 ／佐藤 順一（石川島播磨重工業(株)）	燃焼現象実験装置
拡散実験	ゲルマニウム半導体融液の自己拡散 の研究 ／伊丹 俊夫（北海道大学）	多目的均熱炉
ろう付け 実験	微小重力環境における融液の間隙 浸透性 ／雀部 謙（金属材料技術研究所）	多目的均熱炉
技術開発 実験	シアーセル法によるゲルマニウム 半導体融液の高精度拡散係数測定 技術の開発 ／依田 真一（宇宙開発事業団）	多目的均熱炉

以上

コロイド結晶実験

(1) 実験テーマ（代表研究者）

分散系の自己組立成長

（株式会社三菱総合研究所 融合科学部 石川正道 部長）

(2) 実験目的

コロイド結晶について、沈降や自重圧の影響を取り除く事ができる微小重力環境下において、その結晶化過程を観察することにより、結晶成長メカニズムの解明に資する。

(3) 実験成果

① 科学的成果

コロイド結晶は、半導体等の結晶と比較して格子単位が大きいこと、透明であることから光学観察が容易で、融液からの結晶成長メカニズムの解明を図るためのモデル材料として最適である。このため、コロイド結晶での成長機構の解明は、一般の高品質結晶成長に寄与することが期待される。

コロイド粒子の結晶成長メカニズムは、現在までのところ不明な点が多く明らかとなっていない。特に、コロイドの結晶成長への重力の効果については、今まで明らかとされていなかった。

初の微小重力実験である本実験の結果、コロイドの結晶成長においては、地上では重力により沈降する結晶粒が合体することにより成長するが、微小重力環境下では、拡散により成長する機構であることが明らかとなった。

また、微小重力環境下で成長した結晶は、地上での結晶と比較して格子間隔が大きいことが明らかとなった。このことは、地上での結晶は、重力により歪みが生じていることを示している。

これらの結果から、コロイド結晶成長への重力の影響は大きく、生成した結晶の格子間隔や成長の様式自体を変化させることがわかり、コロイドの本質を知る上では、微小重力実験が重要であることが示された。

② 技術的成果

結晶粒の成長過程における粒径分布の変化を観察することができる宇宙実験用の光散乱装置を開発し、コロイド結晶等の結晶成長を評価するための技術を取得した。また、本コロイド結晶実験の実施の過程において、実験試料の汚染防止法に関する実験技術の蓄積等が行われた。

沸騰実験

(1) 実験テーマ（代表研究者）

微小重力場の核沸騰熱伝達機構に関する基礎実験
（九州大学 工学部 大田治彦 助教授）

(2) 実験目的

地上での取得が困難である詳細な沸騰熱伝達関連データの取得を微小重力環境下で行い、沸騰気泡底部に形成されるマイクロ液膜を介する熱伝達モデルを作成する。

(3) 実験成果

① 科学的成果

微小重力環境での沸騰現象の定量的な解析は、宇宙での廃熱処理システムや、宇宙用電子機器等の冷却のための熱交換器の開発や、沸騰を伴う地上の熱交換器の効率の向上に寄与するものと考えられる。

これまでに行われてきた微小重力下での沸騰熱伝達の実験では、伝熱面温度や熱流束が伝熱面全体の平均値として評価されており、微小重力場の沸騰現象を詳細にとらえることができなかった。

今回の実験では、薄膜温度センサー及び膜厚センサーの開発を行い、伝熱面での薄液膜厚、伝熱面各所の局所温度を高精度計測に成功した。

その計測結果から、微小重力環境下における沸騰熱伝達機構では、気泡底部に形成されるマイクロ液膜の蒸発が支配的であることがわかった。

さらに、マイクロ液膜の蒸発モデルを組み立て、伝熱面熱流束を予測する方法を考案し、マイクロ液膜厚さおよび伝熱面表面温度の実測値を用いて計算した結果、実験で測定された伝熱面熱流束が極めて良好に再現できることを確認した。

② 技術的成果

熱伝達機構の解明に必要な気泡底部の温度ならびに薄膜の厚さ分布を測定するための、薄膜温度センサーおよび膜厚センサーによる計測技術を確立した。また、伝熱面に透明なヒータを採用することにより、気泡底部の薄液膜挙動観察を可能とした。

更に、発泡開始から発生気泡除去まで、溶液の沸騰状態を制御する実験シーケンスを確立した。

燃 燒 実 験

(1) 実験テーマ（代表研究者）

均一噴霧の生成及びその燃焼

（石川島播磨重工業株式会社 技術研究所 佐藤順一 課長）

(2) 実験目的

重力の影響により地上では困難であった均一に分散した同一径の燃料噴霧の形成を微小重力環境を利用して行い、噴霧粒径等が燃焼過程に及ぼす影響を観察・計測し、噴霧燃焼の解明に資する。

(3) 実験成果

① 科学的成果

重力の影響が抑制される微小重力環境での燃焼の研究は、内燃機関の効率向上に役立つものと考えられる。

地上では観察不可能であった希薄予混合気での非常に弱い燃焼が、本微小重力実験によって世界で初めて観察することができた。

この希薄予混合気の燃焼は、火炎伝播が途中で消失するという極めて特異な挙動を示した。この結果は従来の地上での燃焼限界の考え方を覆し、新たな燃焼限界理論の構築の基となると考えられる。

この成果は、噴霧の点火、および希薄予混合気の点火・燃焼の理論的なモデル化に寄与すると考えられ、燃焼の高効率化への寄与が期待できる。

② 技術的成果

火炎近傍の温度分布計測では、高速度で撮像できるビデオカメラを用いて干渉縞画像を取得し、燃焼時の温度分布を高速度で撮影・計測できる技術を開発した。液滴挙動観察技術では、小型のYAGレーザを用いて、数 μm の解像度で液滴の動きを観察する技術を開発した。

拡散実験

(1) 実験テーマ（代表研究者）

ゲルマニウム半導体融液の自己拡散の研究
（北海道大学 理学部 伊丹俊夫 助教授）

(2) 実験目的

対流の影響を排除したゲルマニウム半導体融液の自己拡散係数を高精度に測定するとともに、拡散係数の温度依存性を明らかにし、ゲルマニウム半導体融液の構造について考察する。

(3) 実験成果

① 科学的成果

拡散実験については、低融点金属や化合物半導体等、様々な試料で実験が行われているが、試料の種類によって融液の構造が異なり、拡散の挙動も異なる。ゲルマニウム半導体はシリコン半導体に比べ低融点であり、半導体拡散のモデル実験の試料として適している。

高精度な拡散係数の測定と半導体等の融液構造の解明は、各種の材料製造プロセスの効率化に寄与するものと考えられる。

本実験では、従来の地上実験の実験値に比べ微小重力環境で測定した拡散係数は約20%程度小さい値が得られ、微小重力下では極めて精度良い実験値が得られた。

拡散係数の温度依存性は温度 T の1乗に比例する値となった。また、拡散係数は非常に大きな温度依存性を持つことがわかった。この結果は液体構造と密接に関連し、ゲルマニウム半導体が融液状態で、原子の集団運動の様相如何の構造を有し、特に融点近くではその傾向が強い事を示唆している。

取得された拡散係数のデータは、ゲルマニウムの液体構造の解明に寄与するとともに、ゲルマニウム半導体製造の基礎データとして使用されることが期待される。

② 技術的成果

試料カートリッジ内に装着できる小型のセラミックヒータを開発し、高温実験試料への適用や高精度加熱、急速加熱に自在に対応できる技術を確立した。また、高温でも融液試料との濡れ性が悪く、反応性も低い気相成長法を用いた窒化硼素るつぼの開発を行った。

ろう付け実験

(1) 実験テーマ（代表研究者）

微小重力環境における融液の間隙浸透性

（金属材料技術研究所 フロンティア構造材料研究センター
雀部 謙 主任研究官）

(2) 実験目的

地上と宇宙とで異なるろう材の浸透挙動を、微小重力環境下において均熱及び温度勾配下で調べ、浸透挙動、温度分布、すき間間隔等とろう材の浸透挙動との関係を明らかにする。

(3) 実験成果

① 科学的成果

宇宙でのろう付けは、宇宙の特殊条件である微小重力や真空環境を積極的に利用できることから、大型構造物の補修から小型機器、電子部品の接合まで、様々な分野に活用できると考えられている。

今回の微小重力環境下での実験結果では、均熱の場合はすき間の狭いほうに、温度勾配下では低温側によりろう材が浸透した。

また、マランゴニ対流によるすき間浸透現象が世界で初めて観察された。

これらの結果は、熱伝導及び表面張力を考慮した解析により理論的に理解できることもわかった。

これにより宇宙空間での接合において、接合材料の表面張力の温度依存性、すき間間隔、温度分布などを考慮することにより、確実な接合を達成する技術の知見が得られた。

これらは、宇宙での建造物の溶接技術等の基礎データとして活用されることが期待され、宇宙でのろう付け技術の確立に向けての足がかりとなった。

② 技術的成果

温度勾配条件を必要とする各種の宇宙実験への対応を可能とするため、カートリッジの一部へのセラミックコーティング、試料へのヒートシンクの取り付け、ヒータの長さ調節、および熱解析を行う事により、温度勾配を発生させる技術を開発した。

技術開発実験

(1) 実験テーマ（代表研究者）

シアーセル法によるゲルマニウム半導体融液の高精度拡散係数測定技術の開発

（宇宙開発事業団 宇宙環境利用研究センター 依田真一
主任開発部員）

(2) 実験目的

昇温・降温および凝固時の非定常な拡散の影響を除くことができ、拡散係数の高精度な測定が可能となるシアーセル法について微小重力実験技術の開発を行う。

(3) 実験成果

① 科学技術的成果

シアーセル法は、理想的な拡散係数の取得方法としてNASA等でも開発を進めている方式であるが、シミュレーションを取り入れ流れの解析を強化した本実験の方法は、今後の宇宙実験での使用も考えられており、様々な物質の拡散係数を高精度に測定することが期待されている。

本実験により、シアーセル法を用いた微小重力環境下での拡散実験が世界で初めて行われた。ロケットの微小重力保持時間のほぼ全てを拡散時間として有効に利用し、熔融試料の拡散対の形成、セグメント化も順調に行うことができた。

得られた1200℃でのゲルマニウム拡散係数は、地上の測定結果と比較して30%程度小さな値が得られた。対流の除去および加熱・冷却の非定常領域の拡散量の除去、凝固の影響等の排除ができ、高精度の測定を行うことができた。

ゲルマニウムの融液構造の評価や拡散機構の解明には、高精度な拡散係数のデータが必要となるため、この結果は拡散メカニズムの解明へ大きな寄与をなすとともに、今まで取得されていなかった液体の拡散係数のデータベース化を通じて、結晶成長、凝固現象の解明等に貢献することが期待される。

< 参考資料 >

TR - I A 5 号機微小重力実験成果報告

実験概要および成果補足説明資料

- (1) コロイド結晶実験
(テーマ名) 分散系の自己組立成長
- (2) 沸騰実験
(テーマ名) 微小重力場の核沸騰熱伝達機構に関する基礎実験
- (3) 燃焼実験
(テーマ名) 均一噴霧の生成及びその燃焼
- (4) 拡散実験
(テーマ名) ゲルマニウム半導体融液の自己拡散の研究
- (5) ろう付け実験
(テーマ名) 微小重力環境における融液の間隙浸透性
- (6) 技術開発実験
(テーマ名) シアーセル法によるゲルマニウム半導体融液の
高精度拡散係数測定技術の開発

コロイド結晶と微小重力

コロイドの結晶成長は、半導体や金属等の融液からの結晶成長とも関連し、光学観察も容易であることから、結晶成長メカニズムの解明を図るためのモデルとして適しています。また、結晶成長メカニズムをモデル化して考える上では、重力の影響のない微小重力下で実験を行うことが非常に有効となります。

コロイドは、牛乳やインクがその例として挙げられます。ラテックス粒子を超純水に分散させたコロイド試料では、流動している状態（図1）ではただの白く濁った液体ですが、静置するとラテックス粒子が規則正しく配列しはじめ（図2）、やがて光を反射して輝く粒（結晶）が現れます。

ラテックス粒子 電気的な層

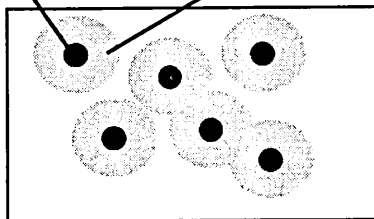


図1 流動中のコロイド

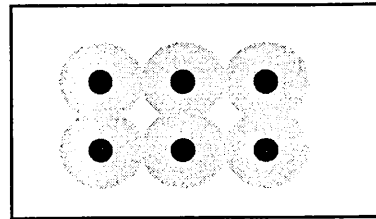


図2 コロイドの結晶化

地上では結晶状となったコロイドは比重の違いから重力によって沈降し、結晶が崩れたり、配列に乱れが生じます（図3）。また、結晶化の後、自重のため粒子の間隔が狭まります。

微小重力下の成長ではこのような影響を除去することができ、コロイドの結晶化メカニズムが地上と比べ変化する可能性があります（図4）。

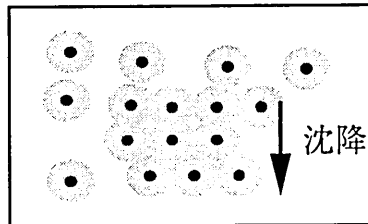


図3 重力による結晶の沈降

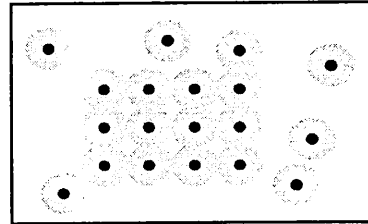


図4 微小重力下での結晶成長

TR-IA 5号機実験での測定法

コロイド結晶成長の詳しい情報を取得するため、CCDカメラによる観察の他、以下のような機器が搭載されています。

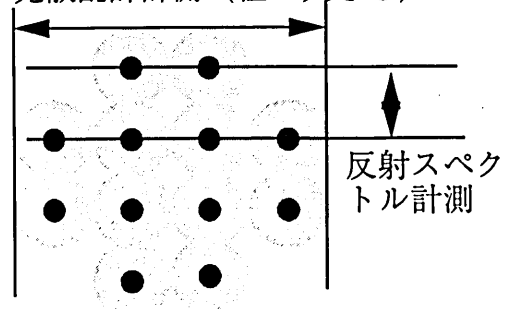
(1) 反射スペクトル計:

コロイドの結晶化の過程では、結晶で反射する光の量や波長の測定から、結晶の成長速度や、結晶の1単位の大きさ等が計測できます。

(2) 低角光散乱計:

結晶成長の初期段階で、コロイド中の各所に結晶の核が発生し、その核は結晶の粒へと成長していきます。その粒の大きさの分布が時間的に変化する様子を観察することができます。

光散乱計計測（粒の大きさ）



<コロイド結晶実験> (2 / 2)

TR-IA 5 号機実験の実験成果

コロイドの結晶成長メカニズムの 違いの観察に成功

粒径分布の経時変化の測定からコロイドの単結晶サイズの時間変化を測定し、成長のメカニズムを評価したところ、以下のことが判りました。

単結晶のサイズは時間 t^n に比例する関数として表されますが、成長メカニズムの違いによってこの n の値が変化します。

合体成長の場合は $n = 1/3$ となり、
拡散成長の場合には $n = 1/2$ となります。

今回の実験の結果から、微小重力実験では n は $1/2$ に近い値が得られ、沈降による合体を伴う成長ではなく、ブラウン運動による拡散が支配する成長に近いことが判りました。

結晶内粒子間距離の拡大を観察

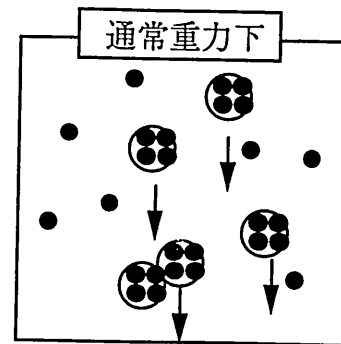
微小重力下で観察されたコロイド結晶の粒子間距離は、地上で観察された距離よりも大きな値となりました。

重力による自重圧の除去が影響しているものと考えられます。

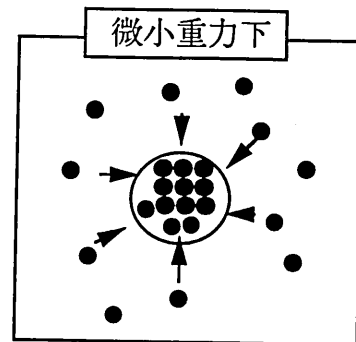
重力による歪みのない正確な格子間距離の計測は、コロイド結晶の性質を考える上でも重要です。

これらの実験で得られたデータは、コロイド結晶メカニズムの解明に役立ちます。

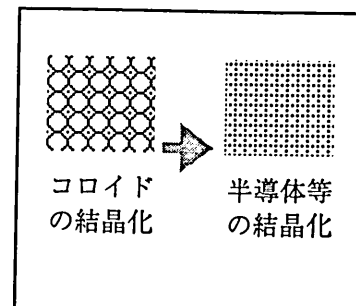
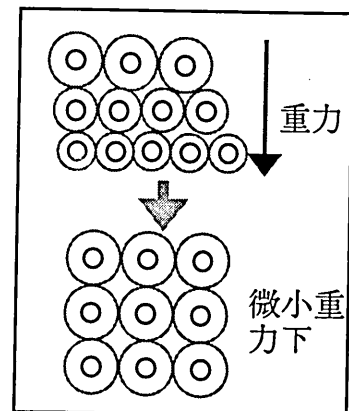
コロイドによる結晶成長メカニズムの解明は、半導体の結晶成長メカニズムへの適用と、成長メカニズムを加味した最適な結晶成長条件の設定を通じて、高品質半導体等の結晶成長に寄与することが期待されます。



合体成長 ($n=1/3$)



拡散成長 ($n=1/2$)



沸騰と微小重力

沸騰による熱伝達は、非常に高い効率で熱交換を行うことができるため、将来宇宙での大型機器の廃熱処理システムや、宇宙用電子機器の冷却などに応用されることが期待されます。

これらの機器の設計を行うにあたっては、微小重力での沸騰熱伝達を把握し、そのモデル化を行うことが重要となります。

沸騰による熱伝達を考える際、伝熱面（熱を流体に伝える面）と気泡との間に生じるマイクロ液膜の蒸発が、熱伝達の重要な要素となります。

地上では気泡のサイズが小さく、また発生した泡もすぐに伝熱面から離れてしまいますが（図1）、微小重力環境下では浮力が働かないために気泡を伝熱面上に保持することができ（図2）、しかもその結果として気泡サイズも大きくなるので、マイクロ液膜挙動の観察や厚さの測定はきわめて容易になります。

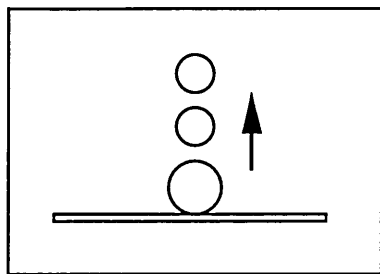


図1 重力下の沸騰

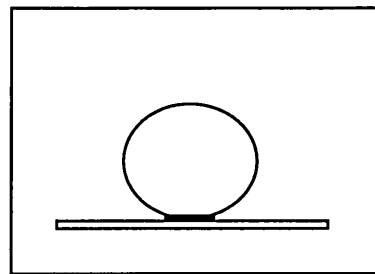


図2 微小重力下の沸騰

TR-IA 5号機での実験

これまでの宇宙での沸騰実験では、伝熱面全体の平均としての温度分布や熱流束（単位面積、単位時間あたりに伝熱される熱量）しか測定していませんでしたが（図3）、今回の実験では伝熱面に小型のセンサを多数配列することにより、温度の局所値の計測を精度良く行うことができ、液膜厚さの局所値を分布の計測を行う事ができるようにしました（図4）。

これによって、薄液膜の厚さや形状と熱伝達の詳細に評価することができました。

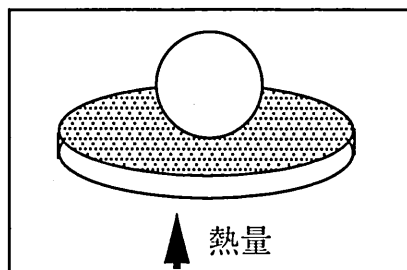


図3 従来の平均温度計測

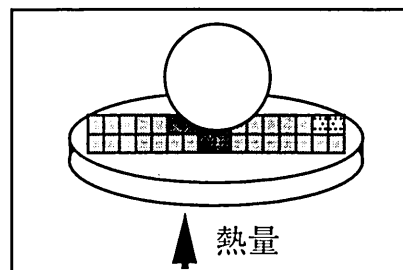


図4 温度分布・膜厚分布の計測

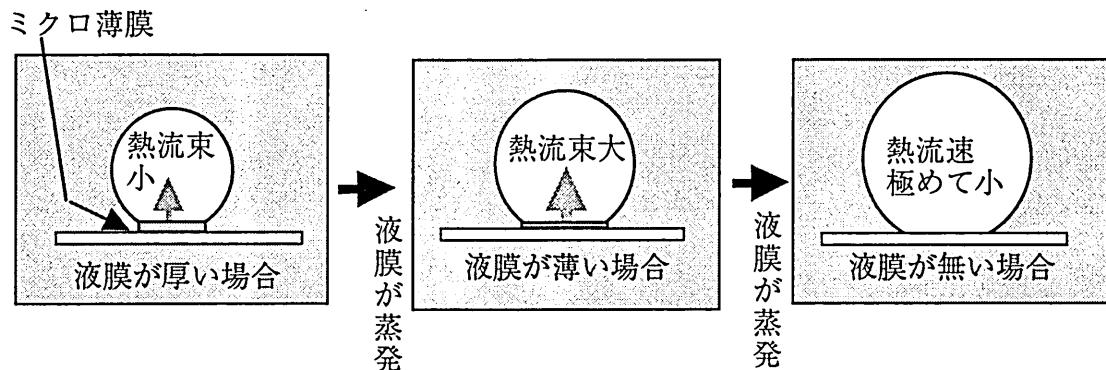
この実験で行われたマイクロ液膜挙動に関する詳細な観察結果をもとに、マイクロ液膜の蒸発モデルを組み立て、微小重力場の核沸騰（気泡発生を伴う通常の沸騰）における熱伝達機構を定量的に検討しました。

TR-IA 5 号機での実験成果

今回の実験は、エタノールを試料として、熱流束の大きさや圧力を変化させて実験を行いました。

今回の実験により、伝熱面表面温度や、気泡底部のマイクロ液膜の厚さ等に関するデータを10万点以上取得しました。熱伝達機構解明に必要な高精度データが多数得られたことは、従来にない大きな成果です。

解析の結果、微小重力下における核沸騰熱伝達が、伝熱面と付着気泡との間に介在するマイクロ薄膜の蒸発挙動に大きく依存することが判りました。



一方、熱伝達機構を定量的に検証する目的で、マイクロ液膜の蒸発モデルを考案しました。

気泡成長期間において、マイクロ液膜の蒸発とともに伝熱面熱流束が増加しますが、完全に蒸発すると逆に伝熱面熱流束が急落します。

このモデルの予測結果を実験結果と比較したところ、両者は極めて良く一致しており、微小重力場の核沸騰においては、マイクロ液膜の蒸発が主たる伝熱機構であることが確認されました。

またこの結果は、本実験のマイクロ液膜の厚さや伝熱面表面温度の実測値の精度が高いことを示しております。

今回の実験では、約6分間の限られた時間を有効に活用し、伝熱機構を定量的にも明らかにすることができました。

これにより、これまでに実験が行われていない条件下での核沸騰における気液挙動気液挙動と熱伝達に関して、かなりの予測ができるようになりました。

今後も、宇宙用熱交換器の高効率化と安全作動確保の二つの観点から、マイクロ液膜の薄膜化に伴う伝熱促進効果や、完全蒸発による伝熱劣化から生じる機器破損等の危険性評価等、沸騰熱伝達研究のさらなる進展が期待されます。

噴霧燃焼と微小重力

本実験の当初の目的である噴霧燃焼実験と微小重力との関係を以下に示します。

噴霧燃焼は、数 μm から数十 μm 程度の小さな燃料の液滴を消費しながら、火炎が広がってゆく燃焼の形態で、内燃機関に広く用いられています。

その現象を詳しく解析することは噴霧燃焼の効率化に寄与すると考えられることから、その燃焼の詳細な観察・計測と、理論的なモデル化が望まれます。

均一な条件での燃焼が期待できる微小重力環境で行う実験は、この噴霧燃焼のモデル化を行う上で、非常に有効なものとなります。

燃焼の広がり方を観察する実験を行う際、重力下では生成した液滴が落下するため、液滴径の大きな燃料が均一に分散した状態での燃焼は期待できません(図1および図2)。

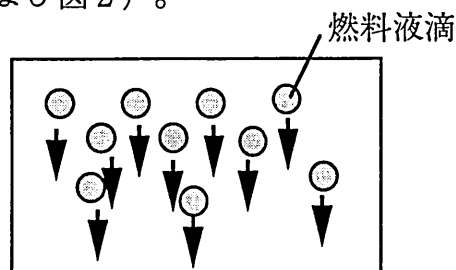


図1 重力による燃料液滴の落下

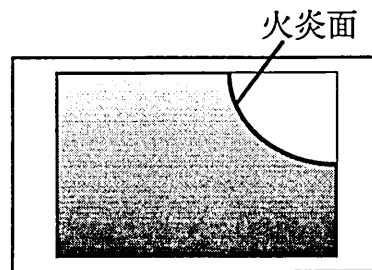


図2 重力下で噴霧の分布が偏った状態での燃焼

しかし、微小重力下では重力によって液滴が落下することがないため、燃焼現象の観察を行う上で理想的な状態を得ることができます(図3および図4)。

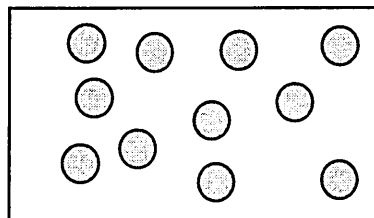


図3 宇宙では重力による落下がないため、大きな液滴が生成できる。

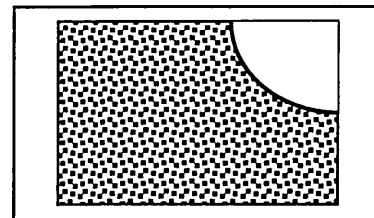
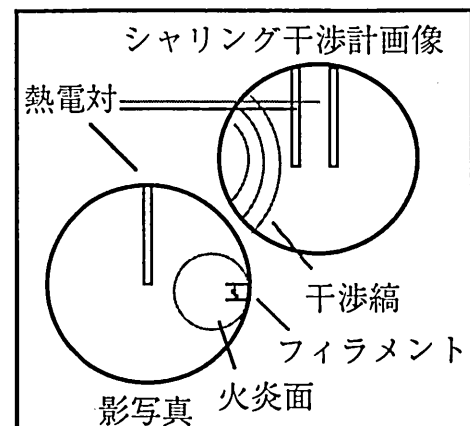


図4 微小重力下での均一噴霧の燃焼

TR-IA 5号機実験の観察装置

< 多彩な観察・計測機器を搭載 >

- ・ 液滴の径や分布、またその動きを探る噴霧液滴挙動観察装置、火炎の広がり方を観察する高速度影写真観察カメラ、燃焼時の温度分布の変化を計測できるシャリング干渉計など、燃焼観察実験に必要な観察を行うことができます。

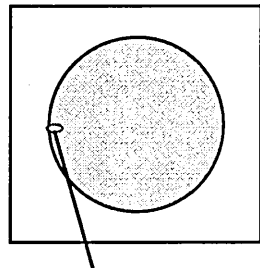


TR-IA 5 号機実験の成果

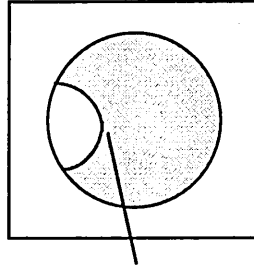
5 号機実験では、燃料注入量が不足し予定した径の燃料噴霧は生成しませんでした。地上では観察されたことのない、希薄燃焼混合気の極めて弱い燃焼が世界で始めて観察されました。

- (a) 点火用フィラメントの加熱により、希薄混合気中に弱い火炎が発生しました。
- (b) 発生した火炎は初め急速に成長し、その後成長が遅くなり、
- (c) 約60msec後に火炎は途中で消失しました。この火炎は自立して燃焼できない非常に弱い火炎であると考えられます。

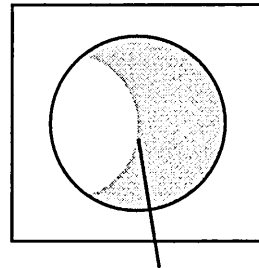
(影写真による火炎の観察)



(a) 火炎の点火



(b) 火炎の拡がり
(点火後30msec)



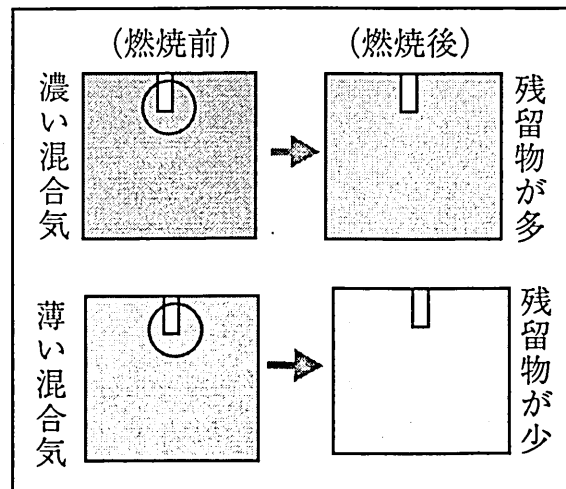
(c) 火炎面の消失
(点火後60msec)

本実験で得られた結果は、混合気の燃料濃度に燃焼するための限界量が存在するというこれまでの考え方を覆すもので、希薄領域での燃焼の研究に新たな事実を加えるものです。

実験成果の今後の展望

希薄領域での燃焼の研究は、効率的な燃焼システムの構築につながります。

希薄な燃料蒸気濃度の条件で燃焼を行うことにより、燃焼後の残留物を減らすことができ、燃料消費効率を向上し、地球環境の保護にも役立ちます。



拡散実験と微小重力

拡散係数は、結晶成長等のシミュレーションを行う際に不可欠なパラメータで、高品質半導体の最適な作製条件を理論的に考える上でも非常に重要なものです。

その拡散係数とは、基本的には物質中の原子あるいは分子が散らばっていく速さ、混ざり易さを示すものです（図1）。但し、その際には物の流れによる移動は除外されます。

融液の拡散実験を行う場合、地上では熱対流による移動が生じるため、正確な値の測定が難しいものとなります（図2）。その対流の影響を少しでも減らし精度の高いデータを得るため、細長い円柱状の試料を用いた方法（ロングキャピラリー法）が実験に用いられています（図3）。

溶融・実験温度での保持・凝固の後、拡散面からの距離と、そこで測定した濃度との関係をグラフ化し（図4）そのグラフから拡散係数を算出します。

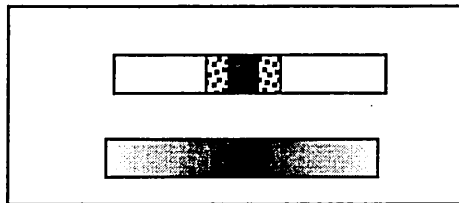


図1 物質の散らばってゆく様子(上)と混合が生じている様子(下)の図

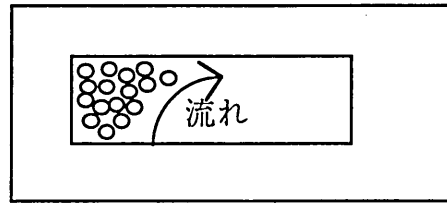


図2 熱対流による流れと拡散

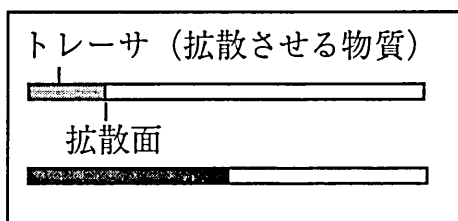


図3 ロングキャピラリー法の試料の例

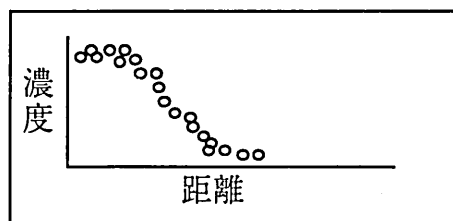


図4 拡散による濃度プロファイル

TR-IA 5号機実験の特徴

＜高い温度領域での拡散実験＞

- ・ルツボやヒーターの工夫により、実験の温度範囲の上限を1500℃まで上げることができ、ゲルマニウムのような比較的高融点の試料の拡散係数の温度依存性を測定する実験を行うことができるようになりました。

＜非定常状態での拡散を解析的に求める＞

- ・昇温／降温時の拡散の影響を定量的に評価し、解析に盛り込むことにより、拡散係数測定精度の向上を図りました。

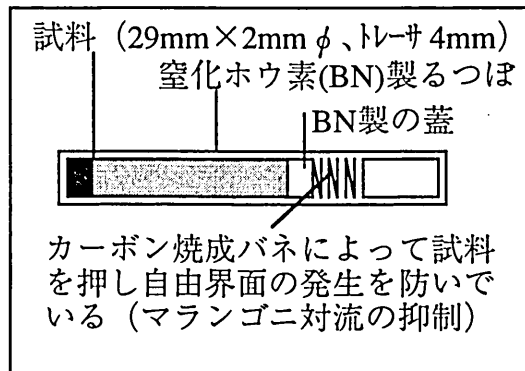


図5 拡散試料カートリッジ

TR-IA 5 号機実験の成果

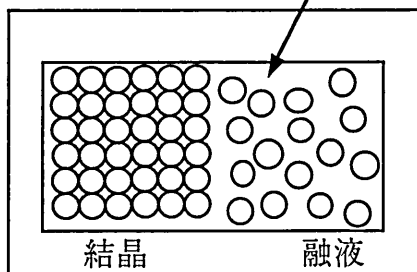
拡散は、ゲルマニウムやシリコン半導体、スズ等の金属、化合物半導体のそれぞれで、その挙動が少しずつ異なります。今回の実験では、ゲルマニウム半導体を試料として、融液の自己拡散係数を3種類の温度で測定しました。

半導体の結晶成長では融液内の構造が成長のメカニズムに大きく関連してきます。

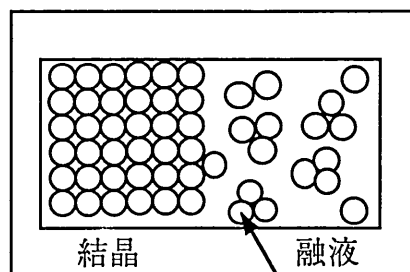
ゲルマニウム半導体は、剛体球モデルによって表されるような単純な原子のランダムな動きだけでなく、融液内の状態でもある種の構造を有している可能性が示唆されています。

拡散係数を測定することによって、この融液内の構造について情報を得ることが出来ます。

剛体球モデル：融液中の原子がランダムに動き回る状態



構造を有している融液からの結晶成長の例



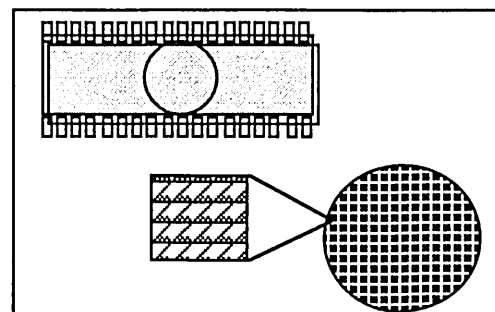
正四面体等のクラスター

本実験の結果、ゲルマニウム半導体融液の拡散係数の温度依存性は剛体球モデルから導き出されるような、ほぼ温度 T の2乗に比例するような傾向ではなく、 T の1乗に比例する値となり、また非常に大きな温度依存性を持つことが判りました。

この結果は、ゲルマニウム半導体が特に融点近くで何らかの構造を有していることを示しており、ゲルマニウム融液の構造に対する大きな知見を得ることができました。

また、このようなゲルマニウムの拡散に関する基礎的なデータは、半導体の不純物の拡散を考える際の補足的なデータとして活用されることが考えられます。

本実験の成果は、ゲルマニウムの液体構造の解明に寄与するとともに、ゲルマニウム半導体製造の基礎データとして使用されることが期待されます。



ろう付けと微小重力

2つの部品の間を融けた金属（ろう材）で満たし、その金属が固まることにより部品同士の接合を行う方法をろう付けといい、接合法の一つとして金属やセラミックスの精密接合に広く利用されています。

ろう付けは宇宙での接合技術として、様々な分野に活躍できると考えられていますが、ろう材の浸透挙動は地上と異なることが予想されるため、その理論的な予測を行うことが必要と考えられます。

今回の実験は、宇宙の微小重力下でのろう付けについて、そのろう材の流れ方、広がり方を調べる実験です。

ある一カ所に設置されたろう材は（図1）、地上では毛細管現象による力と重力とのつり合いによって流れ方が異なります（図2）。

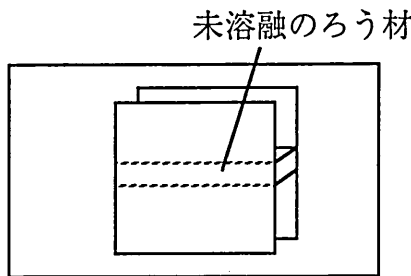


図1 2つの板中に設置されたろう材

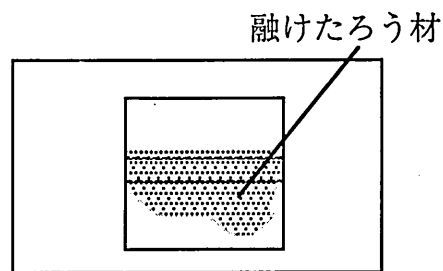


図2 重力下での溶融ろう材の挙動

微小重力下では、ろう材は毛細管現象とマランゴニ対流によって板の間を広がってゆきます（図3）。

また、ろう材は一般的な液体と同様に隙間の広い方よりも狭い方へ流れ込む傾向があります（図4）。

しかし微小重力下での円筒の隙間では、試料の温度差により広い方に流れ込むこともあります。毛細管現象による力は、温度によって異なるため、ろう材は温度差によって流れの方向性が生じ、高温側から低温側へと浸透してゆきます（図5）。

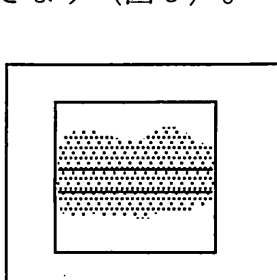


図3 微小重力下でのろう材の挙動

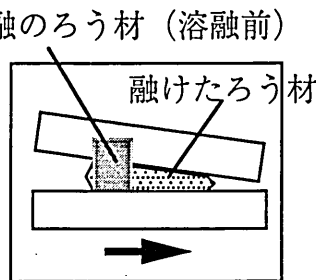


図4 隙間の幅とろう材の広がり方

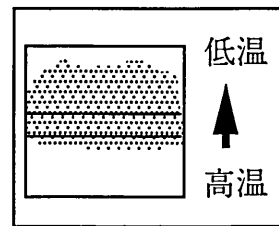


図5 温度差とろう材の浸透の仕方

今回の微小重力実験では、図6のような配管継ぎ手を試料として外筒と内筒の隙間の幅や温度分布を変化させ実験を行いました。

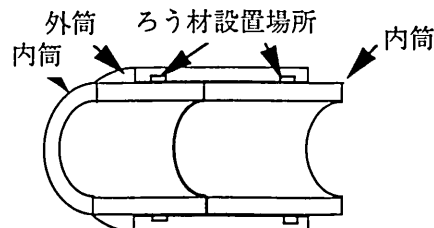


図6 実験試料の配管継手

＜ろう付け実験＞（2／2）

TR-IA 5号機実験の成果

＜温度分布を解析＞

・微小重力下でのろうの流れ方の把握及びろう付け方法の確立を目指して、温度分布とろう材の浸透の仕方の関係をつかみました。

＜隙間の幅とろう材の浸透の仕方の関係を調べる＞

・ろう材の浸透の仕方について、ろう材を設置した溝の左右で円筒の隙間の幅が異なる配管試料での実験を行い、ろう材の浸透挙動をつかみました。

（実験成果の例）

均熱条件の場合でも、左右の隙間の幅の差によって、ろう材の浸透に偏りが生じることが理論的に予測されました。

幅広側の隙間(D)が狭い側の隙間(d)の2倍より小さい場合、ろう材は幅広側に浸透しますが、Dが2倍より大きい場合には、狭い側に浸透します。

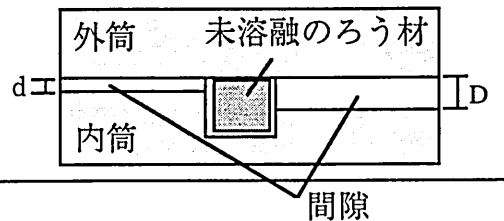
本実験の結果では、試料にわずかな温度差がついた事により、 $D < 2d$ の隙間の条件でも、幅の狭い側にも若干の浸透が生じましたが、全体としてこの理論を支持する結果が得られました。

隙間の幅や接合材の温度分布から、ろう材の浸透挙動が推定できるようになれば、例えば配管の接合の際にも、右図上のようなろう材の偏りが生じることなく、右図下のような均等なろう付けが行えるようになり、接合の信頼性が格段に向上します。

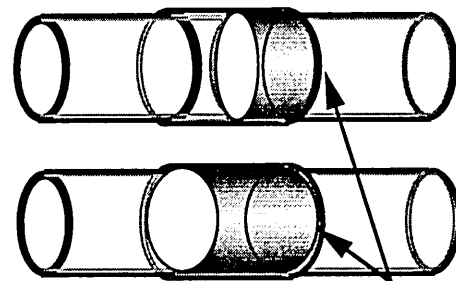
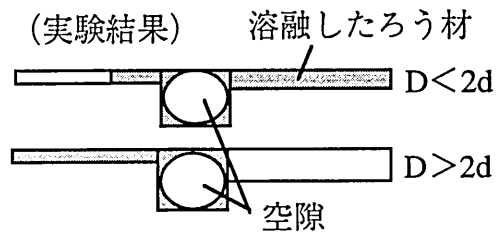
ろう付けによる接合は、宇宙の微小重力や真空空間の積極的な利用が可能であり、また接合作業の簡便さや接合強度の観点から、宇宙での接合技術として期待されております。

本実験の成果は宇宙における大型構造物から、小型装置や電子部品まで、様々な組立技術に役立つものとなります。

（配管継ぎ手の断面）

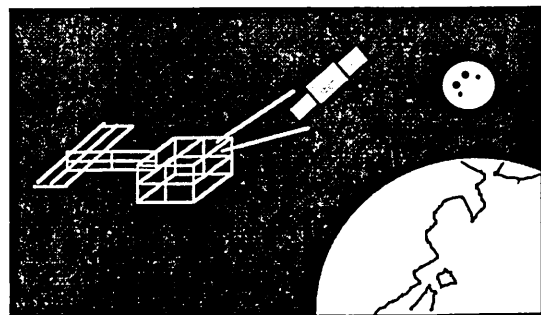


（実験結果）



（配管継ぎ手）

ろう材



シアーセル実験と微小重力

シアーセル法は、

- (1) 拡散試料がその融点から実験温度（一定時間保持する温度）に到達するまでの昇温中、
- (2) 一定温度での拡散の後、試料温度が融点以下まで冷却されるまでの拡散

これらの、一定でない温度での拡散の進行を除外することができ、このため拡散係数を高い精度で測定できる方法です。

その測定原理は以下の通りです。

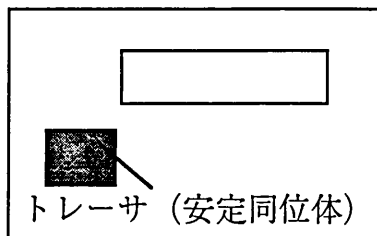


図1 試料の初期状態
(この状態で溶融)

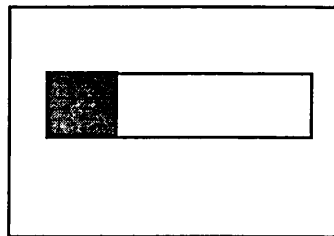


図2 微小重力下で
接合する

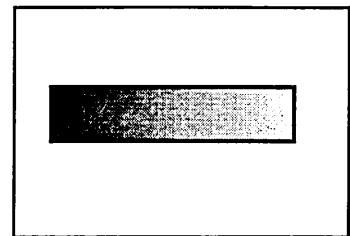


図3 均熱温度条件下
での拡散

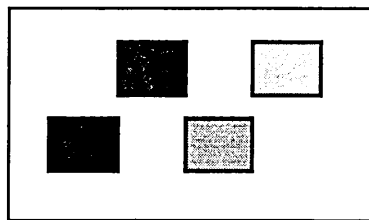


図4 冷却前に再分離、地上で
再溶融しセル内の濃度を
均一化した後評価

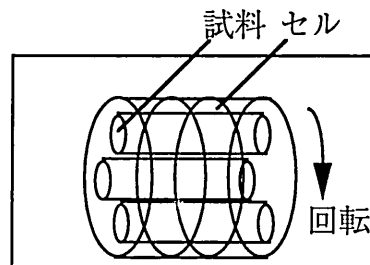


図5 シアーセルの概念図。
棒状の試料が円盤状の
セルごとに分割される。

このシアーセルの手法を微小重力実験に適用することにより、拡散係数を高精度に測定することが可能となります。

TR-IA 5号機実験の特徴

＜高精度拡散係数の取得が可能なシアーセルの初実験＞

シアーセルは、これまで拡散係数の高精度測定法として注目されてきたにも関わらず、複雑な構造であるため耐振性や漏れの問題があり、宇宙実験での使用は技術的に困難でした。本実験では、これらの技術的な課題を乗り越え、シアーセルを用いた拡散実験が、世界に先駆けて実施されました。

5号機でのシアーセル実験では、拡散実験と同様にゲルマニウム半導体を試料としております。拡散実験でのロングキャピラリー法でのデータと比較評価を行うことにより、シアーセルの有効性評価、昇温時／降温時の拡散の影響評価等、拡散係数測定技術に関する様々な評価を行うことができます。

TR-IA 5 号機実験の実験成果

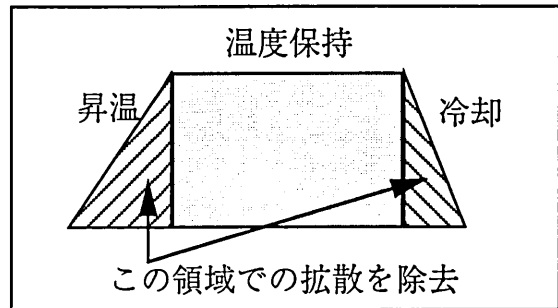
今回の実験で取得したゲルマニウム半導体融液の拡散係数の値は、これまでの地上実験から得られていた値よりも小さく、以下に示すような昇温・降温時の影響や、ゲルマニウムの凝固膨張による濃度プロファイルの乱れのない、高精度の拡散係数が取得できたことを意味しております。

（１）昇温・降温時の拡散の除去

融点温度以上の昇温中や冷却中に生じる拡散は、実験の精度に大きな影響を及ぼします。

シアーセル実験では、試料を温度保持中に結合・分離することにより、その影響を除きました。

なお、「拡散実験」では各温度での拡散を解析により求め誤差を小さくしました。



昇温・降温時の拡散の除去

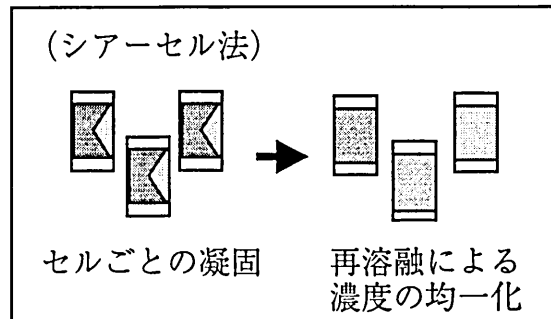
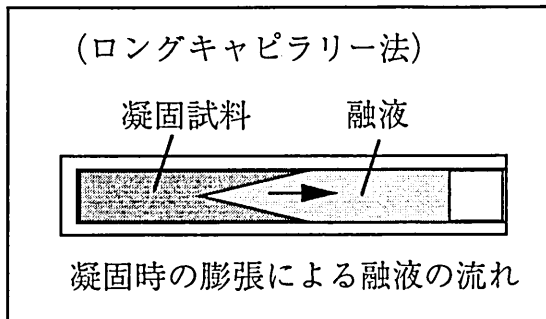
（２）凝固時の体積膨張の影響の除去

実験試料の凝固の際には、膨張や収縮が生じるため、残る融液中に流れが生じ、濃度プロファイルにも乱れが生じます。

シアーセルではセルごとで凝固が行われ、セルの平均で濃度を算出するため、凝固時の凝固時の膨張による融液の流れの影響を除外することができます。

今回の実験では、地上実験の測定結果に比べ約30%も小さな拡散係数が得られ、高精度に測定を行うことができました。

なお、「拡散実験」では、試料のできるかぎり表面部分の濃度分布を評価することにより、この凝固時の擾乱による誤差を小さくしております。



本実験で取得したシアーセルの技術開発成果は、温度保持時間が短い小型ロケットを利用した微小重力実験での高精度拡散係数の取得を可能にするものです。

本実験のシアーセル法は、MSL-1スペースシャトルミッションでも用いられ、金属や化合物半導体の拡散係数の測定が行われております。

※代表研究者連絡先一覧

(1) コロイド結晶実験

(代表研究者) 石川正道 ((株)三菱総合研究所、tel:03-3277-0898)

(2) 沸騰実験

(代表研究者) 大田治彦 (九州大学、tel:092-642-3489)

(3) 燃焼実験

(代表研究者) 佐藤順一 (石川島播磨重工業(株)、tel:03-3534-3315)

(4) 拡散実験

(代表研究者) 伊丹俊夫 (北海道大学、tel:011-706-3532)

(5) ろう付け実験

(代表研究者) 霍部 謙 (金属材料技術研究所、tel:0298-59-2113)

(6) 技術開発実験

(代表研究者) 依田真一 (宇宙開発事業団、tel:0298-52-2439)