

航空機による微小重力実験
物理現象シミュレーション技術検証のための
対流－凝固実験

Effect of convection on unidirectional
solidification of succinonitrile under
microgravity

清水盛生 ⁽¹⁾	楠瀬智宏 ⁽²⁾	加藤充康 ⁽²⁾	井村貞治 ⁽³⁾
Morio Shimizu	Tomohiro Kusunose	Mitsuyasu Kato	Sadaji Imura
中村裕彦 ⁽⁴⁾	羽生哲也 ⁽⁴⁾	亀井信一 ⁽⁴⁾	石川正道 ⁽⁴⁾
Hirohiko Nakamura	Tetsuya Hanyu	Shin-ichi Kamei	Masamichi Ishikawa

- (1) 航空宇宙技術研究所
National Aerospace Laboratory
- (2) 宇宙開発事業団
National Space Development Agency of Japan
- (3) (財) 宇宙環境利用推進センター
Japan Space Utilization Promotion Center
- (4) (株) 三菱総合研究所
Mitsubishi Research Institute, Inc.

ABSTRACT

National Space Development Agency of Japan (NASDA) carries on the development work of computer simulation software which simulates solidification under microgravity condition. To evaluate the numerical solution of moving interface, unidirectional solidification experiments of succinonitrile under variable gravity (0.01~2g) were performed by MU-300 aircraft. The effects of convection on the solidification sequences were discussed using velocity-growth length value.

1. 緒言

宇宙開発事業団では、共通実験技術開発の一環として、宇宙の微小重力環境下での流体の挙動や材料の凝固過程を、シミュレートするソフトウェア（以下、物理現象シミュレーションソフトウェア）の開発を行っている。

このソフトウェアの信頼性を高めるためには、ソフトウェア開発段階において実際の微小重力環境下で観察される現象との比較を行い、予測精度、適用限界等の評価を行っておく必要がある。

今回、シミュレーションで計算可能な幾何学的条件、初期条件、境界条件を実験的に可能なかぎり再現することを主眼において開発した物理現象シミュレーションソフトウェア検証用航空機実験装置を用いて、微小重力環境下での対流-凝固過程にかかわるモデル実験を実施した。

2. 実験

2. 1 実験装置

実験装置は、対流-凝固過程その場観察装置の一種であり、主な特徴は以下のとおりである。

①縦13mm, 横13mm, 厚さ2mmの亚克力製透明セル内にサクシノニトリル試料を封入する。亚克力の熱伝導率はサクシノニトリルのものと類似しており、シミュレーションとの比較時には断熱壁として取り扱うことができる。なお、亚克力セルの内外面を SiO_2 でコートしたものをを用いている。

②結晶が凝固する様子をLEDを光源とした透過光で実体観察する。試料の上下面の温度制御は、これと接した上下の銅ブロックの温度を制御することにより行う。銅ブロックの温度制御素子として、加熱・冷却が可能なペルチェ素子を採用している。シミュレーションとの比較時には上下面は、等温壁として取り扱う。

③観察面を通しての熱の流出を抑制し、試料中央部付近の温度低下を防ぐため、亚克力セルと接触する空気の温度を加熱するためのサブヒータ機構を設けている。

④一般的には融液を冷却しただけでは結晶の核形成がおこりにくく、また、結晶核が出現する位置にも不確実性が残る。核形成過程の影響を抑制し、シミュレーションで計算可能な凝固過程のみを計測すること、また結晶の出現位置を特定することを目的とした選択的微小領域冷却機構（核形成トリガー機構）を備えている。

図1に実験装置中枢部の断面図をまた、図2に実験装置のブロックダイアグラムを示す。詳細については文献^{(1)~(3)}参照。

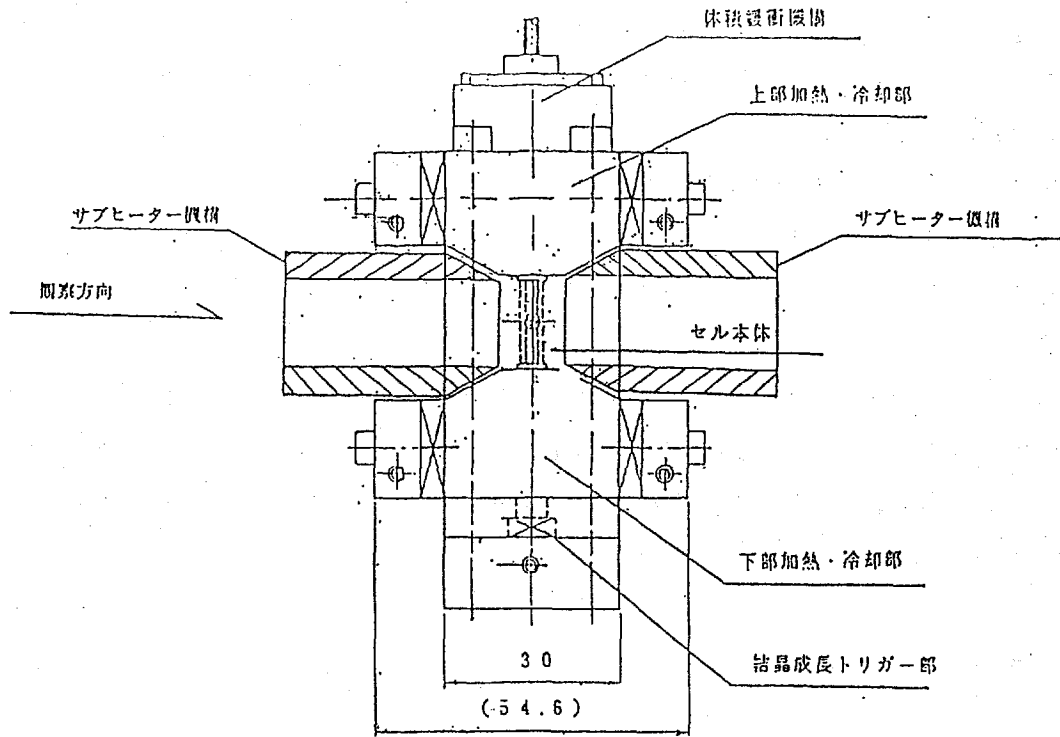


図1 実験装置中枢部断面図

Fig.1 Central part of experimental apparatus

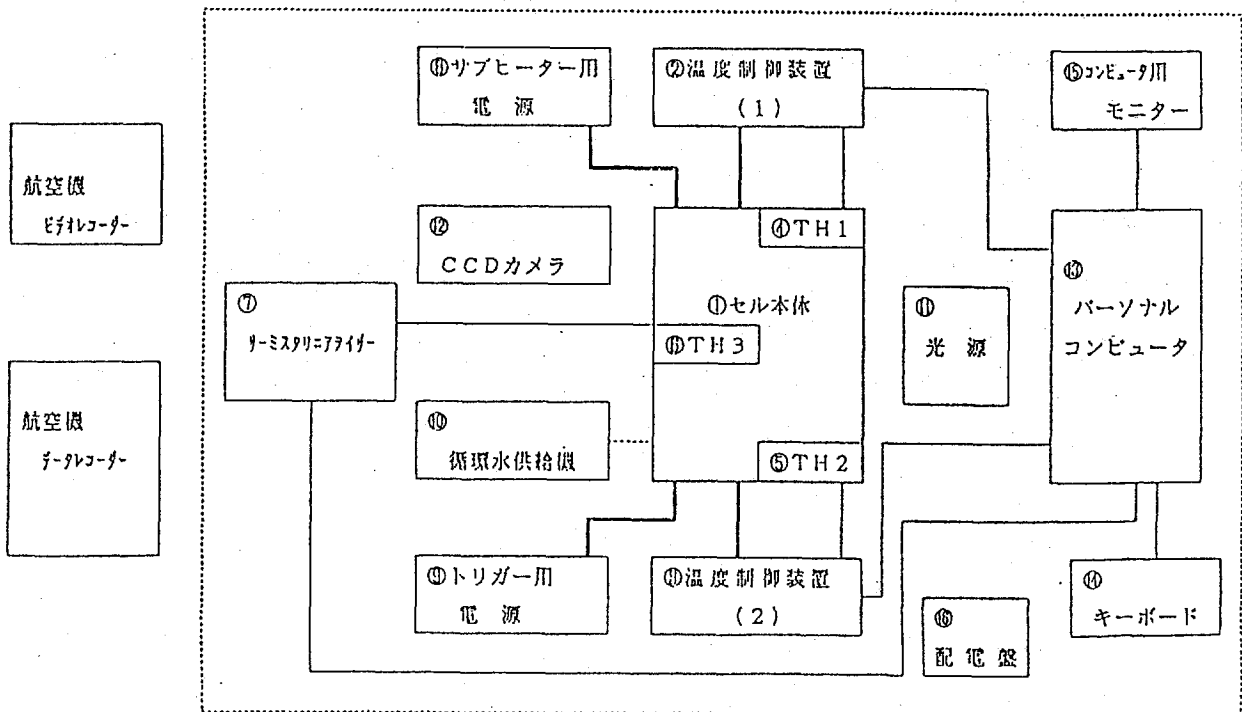


図2 実験装置のブロックダイアグラム

Fig.2 Schematic drawing of experimental apparatus

2. 2 試料

微小重力下での対流-凝固過程の観察実験用モデル物質としてサクシノニトリル (Succinonitrile) を用いた。サクシノニトリルは金属のモデル物質としてしばしば用いられており、通常の結晶のように結合力の方位依存性が顕著に現れないため、シミュレーションと比較するためのモデル物質として適している。しかしながら、①アセトン等の有機溶媒と溶液系をつくること、②加水分解をおこし、コハク酸とアンモニアに分解してしまうこと等から、市販の試薬を精製する必要がある。精製は、サブリメーション⁽⁵⁾により行った。

2. 3 実験方法

以下の手順で実験を実施した。

- ①最初、試料全体の温度を均一にする。
- ②微小重力時に冷却端温度が所定の温度になるよう、微小重力前の特定の時期に上部もしくは下部の銅ブロックの冷却を開始する。
- ③ μg 中および μg の前後の強重力期に結晶が凝固する様子を透過光で観察し、また、ビデオレコーダに記録する。

なお、冷却開始、温度制御、温度データ記録用としてパーソナルコンピュータを用いた。測定項目を表1にまとめる。

表1 測定項目

Table 1. Measuring Parameters

項目	概要
温度	上部ブロック温度, 下部ブロック温度, セル中央部温度
成長量	成長距離としてビデオ画像をもとに数値化
重力レベル	機体 g センサーの値を利用する g_x, g_y, g_z

2. 4 実験条件

表2に実験条件を示す。初期温度は冷却開始前の試料温度を、上部および下部ブロック温度は実験時の各ブロックの温度を示す。全10実験を行った。実験の大部分は下部ブロックを冷却し、上部ブロックは初期温度に保つ、いわゆる安定配置条件（自然対流がおこりにくい条件）のものであるが、実験ID#SⅢ-1および#SⅢ-2の2例のみ、上部ブロックの温度を下げる不安定配置条件（自然対流がおきやすい条件）で実験を実施した。

表2 実験条件

Table 2. Experimental Conditions

実験日時	実験ID	上部ブロック温度 (°C)	下部ブロック温度 (°C)	初期温度 (°C)
9/27	#SⅠ-1	60.0	45.0	60.0
9/27	#SⅠ-2	60.0	47.0	60.0
9/27	#SⅠ-3	60.0	49.0	60.0
9/30	#SⅡ-1	60.0	43.0	60.0
9/30	#SⅡ-2	60.0	41.0	60.0
9/30	#SⅡ-3	60.0	45.0	60.0
10/2	#SⅢ-1	41.0	60.0	60.0
10/2	#SⅢ-2	41.0	65.0	65.0
10/2	#SⅢ-3	65.0	41.0	65.0
10/2	#SⅢ-4	60.0	45.0	60.0

3. 結果および考察

パラボリックフライト2回につき1回の実験を行った。フライト時間の制約のため、地上実験のように試料温度は完全に均一にはならなかったが、上下端温度とセル中央部温度との差は冷却開始前で±0.5°C以内におさまっている。

安定配置と不安定配置の差異を中心に記述する。

3. 1 固液界面形状

(1) 安定配置

安定配置条件での凝固においては、重力下においても熱輸送の主体は熱伝導である。この場合、固液界面形状は、全体としてフラットであり、かつ、冷却端と平行な状態のまま凝固が進行してゆく。図3(a)、(b)に、安定配置条件における航空機実験結果例（実験ID#SⅢ-3）を示す。

(a) μg 到達後

約 0.5 秒經過

0.00 g

上部温度 65.0°C

下部温度 41.0°C



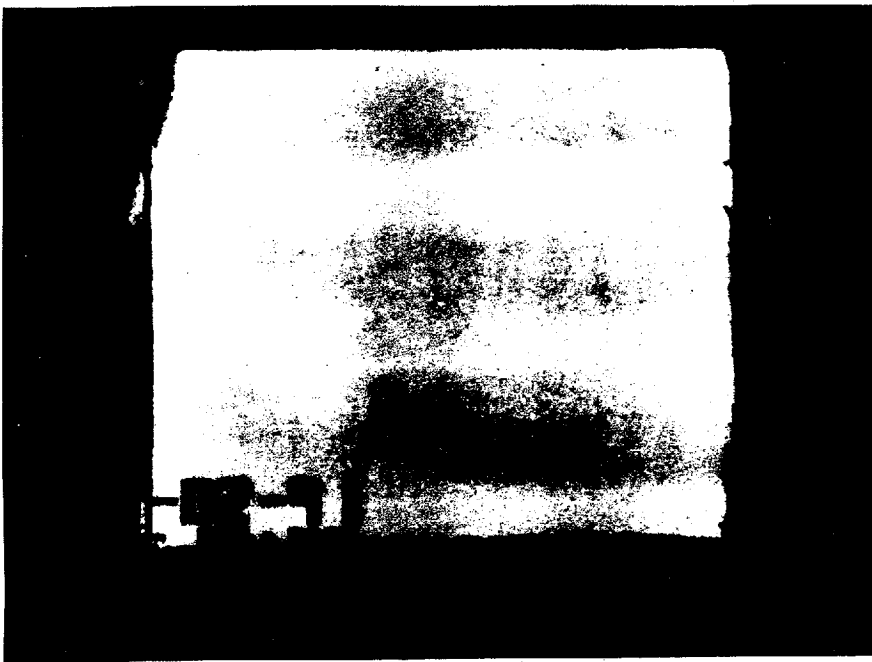
(b) μg 到達後

約 1.8 秒經過

0.03 g

上部温度 65.0°C

下部温度 41.0°C



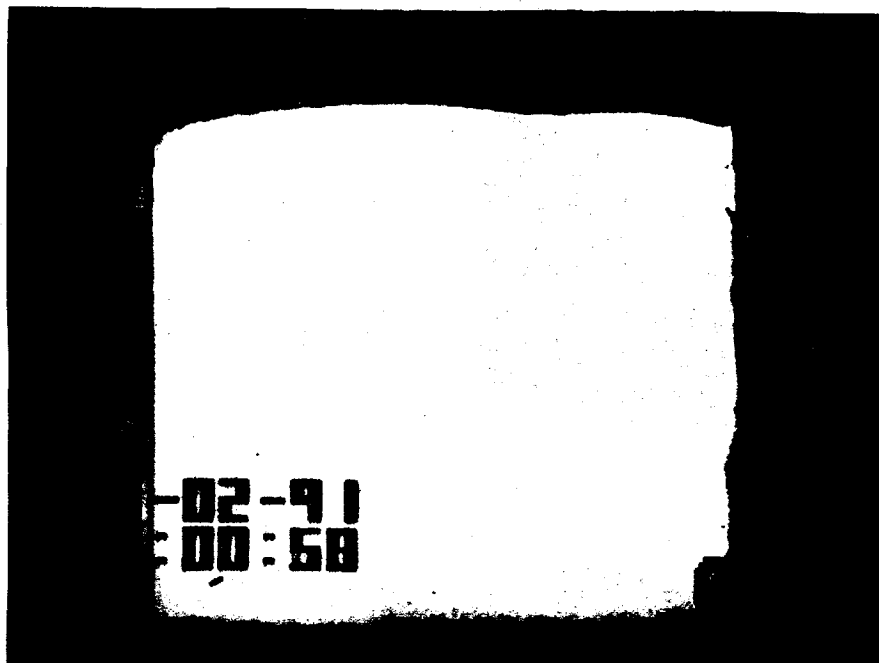
1.3 mm

図3 観察画像例 (安定配置条件: 実験 I D#SII-3)

Fig.3 Succinonitrile growth under microgravity (stable setting)

(2) 不安定配置

不安定配置条件では、図4(a)(b)に不安定配置条件における航空機実験結果例(実験ID#SIII-2)を示す。上下ブロック温度はちょうど図4の天地を逆にしたものに相当する。微小重力到達直前に顕在化していた固液界面の湾曲が、微小重力中に消失することを確認した。



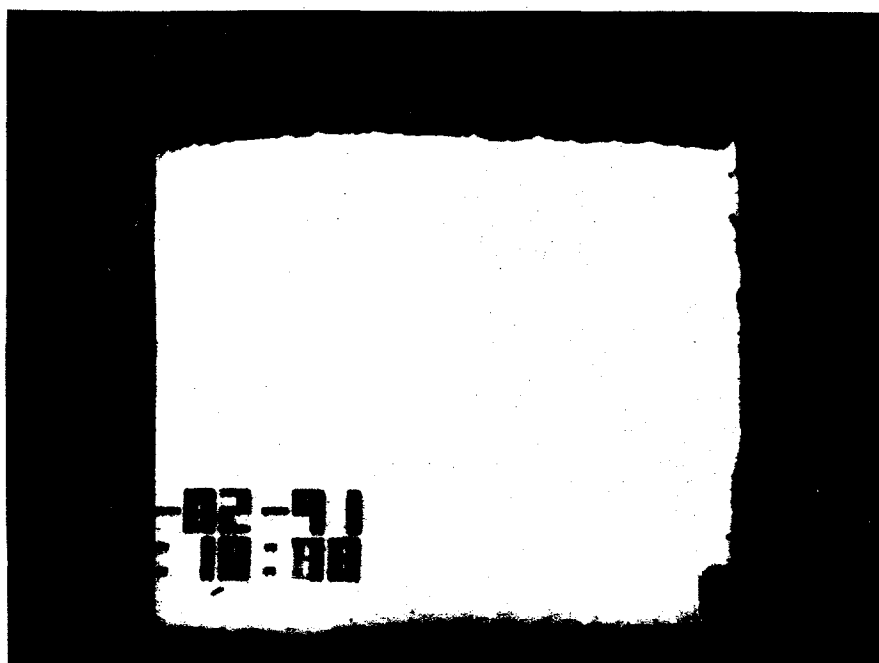
(a) μg 到達後

約0.5秒経過

0.05g

上部温度41.0°C

下部温度65.0°C



(b) μg 到達後

約1.8秒経過

0.03g

上部温度41.0°C

下部温度65.0°C

1.3mm

図4 観察画像例(不安定配置条件:実験ID#SIII-2)

Fig.4 Succinonitrile growth under microgravity (stable setting)

3. 2 温度履歴

図5に安定配置条件での温度履歴を示す。また図6に、不安定配置条件での温度履歴を示す。図7において、aは上部ブロック温度、bはセル中央部温度、cは下部ブロック温度を意味する。なお、①、②は、それぞれ図3、4の(a)、(b)の時点に対応する。初期温度の均一性は $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内であり、また、微小重力期間中の冷却端温度の測定値と設定値との差は $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内である。

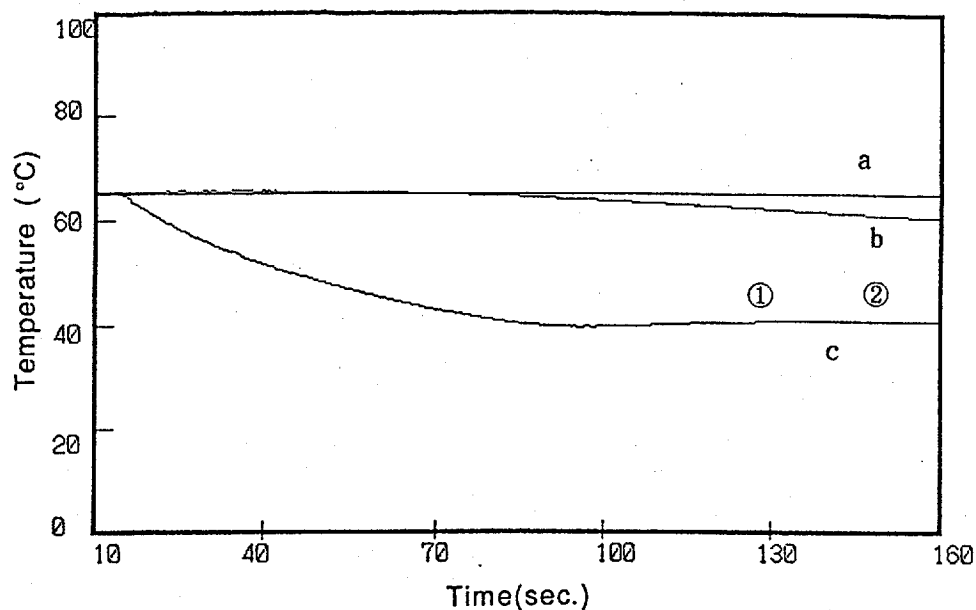


図5 安定配置実験時（実験 I D #SI-3）の温度履歴

Fig.5 Time-Temperature plot for the experiment #SI-3

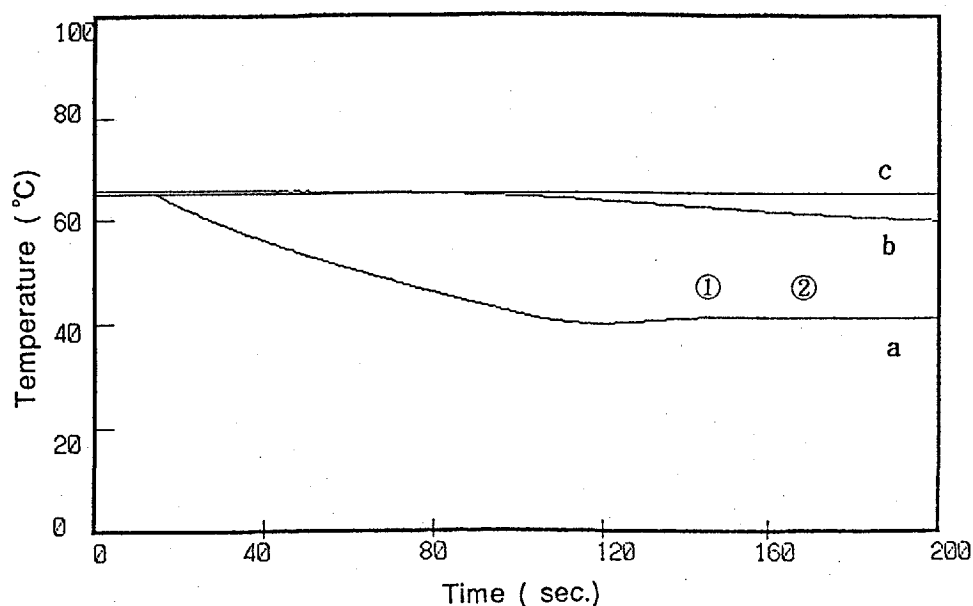


図6 安定配置実験時（実験 I D #SI-2）の温度履歴

Fig.6 Time-Temperature plot for the experiment #SI-2

3. 3 成長距離の時間依存性

(1) 安定配置条件

冷却端から、固液界面までの垂直距離を経過時間に対してプロットした(図7)。この図には各時点での加速度データもプロットしてある。安定配置条件では、セルの中央およびセルの左から3/4の点の2点についてデータを取得したがこの両者はほぼ一致している事が解る。

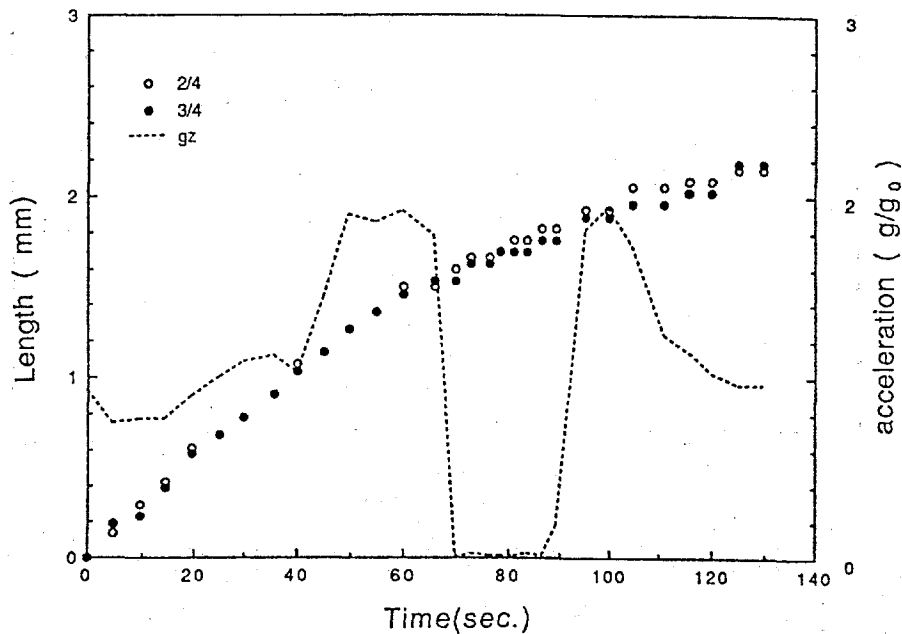


図7 経過時間-成長距離プロット (実験 I D#SI-3)

Fig.7 Time-Growth length plot for the experiment #SI-3

(2) 不安定配置条件

冷却端からの成長距離(垂直距離)を計測した。不安定配置条件においては固液界面形状がフラットではないため、計4つのポイント(視野の左から1/4、1/2、3/4および右端)について計測した。成長距離及び加速度について、経過時間に対してプロットして示す(図8)。

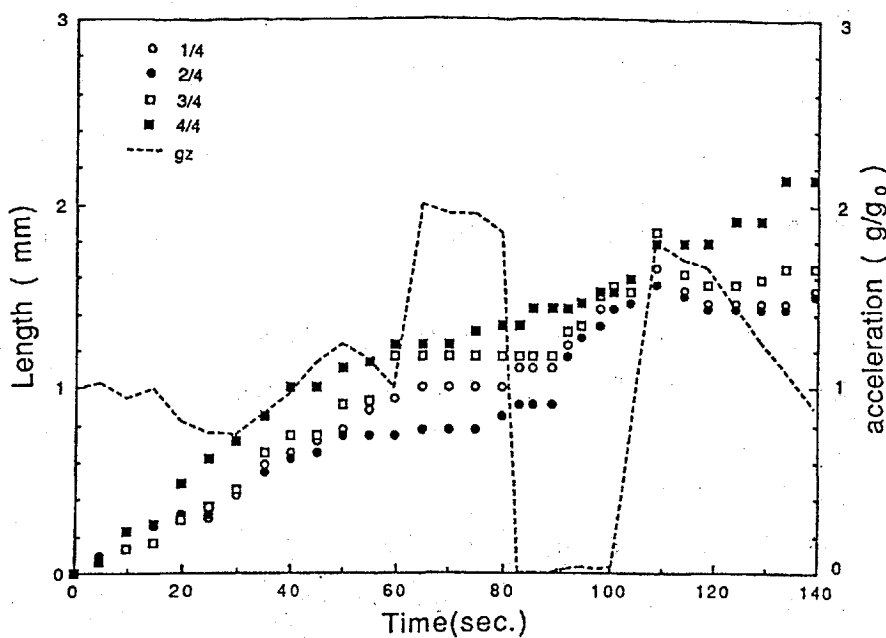


図8 経過時間-成長距離プロット (実験 I D #SI-2)

Fig. 8 Time-Growth length plot for the experiment #SI-2

3. 4 考察

(1) 凝固の駆動力評価パラメータの導入

今回の実験の対象とする凝固はステファン問題として知られているものの一種である。液相部分が十分にあり、半無限境界と見なせる場合、固液界面の位置は経過時間の $1/2$ 乗に比例して変化する。すなわち凝固速度が時間とともに変化する。全プロセスを通じての凝固の駆動力を評価するために、以下の検討を行った。

単純化のため、1次元の系を考えることにする。サクシノニトリルの場合、凝固に伴う潜熱の発生量 (Q_1) は、温度勾配に沿って、液相部分から固相部分に流入する熱量 (Q_1 , Q_2) よりも圧倒的に小さいことが解っている⁽¹⁾ ので固液界面の移動速度すなわち凝固速度は固相中および液相中の温度勾配で規定されることになる。1次元の場合、熱量の保存則から固相中の温度勾配は一定であり、また固液界面温度は試料の融点であることから、固相中の温度勾配は容易に求めることができる。

$$\frac{\partial T_s}{\partial x} = \frac{(T_m - T_0)}{\ell}$$

ここで T_s は固相温度、 T_m は試料融点、 T_c は冷却端温度、 l は成長距離である。さらに固相中の温度勾配とその時点での成長速度 v が0次近似的には比例関係にあるとみなせるので、以下の関係が成立する。

$$v \times l = \text{const}$$

すなわち $v \times l$ 値は一次元を仮定する限り、凝固の全ステージを通じて一定であるとみなすことができる。

$v \times l$ は (m^2/s) の次元をもつパラメータである。このパラメータを用いて安定配置、不安定配置双方における成長の駆動力を評価することができる。

(2) 安定配置の $v \times l$ 値

図9に安定配置の例として、セル中央位置での凝固データについて $v \times l$ 値を計算し、その経時変化を示す。この図には同時に垂直方向加速度も示してある。凝固の初期～後期を通じて $v \times l$ 値はほぼ一定であること、微小重力期間中はこの値の分散が小さくなることが見いだされた。このことから、今回のような疑似2次元安定配置での凝固においては少なくとも近似的には(1)の議論が成立していると思われる。

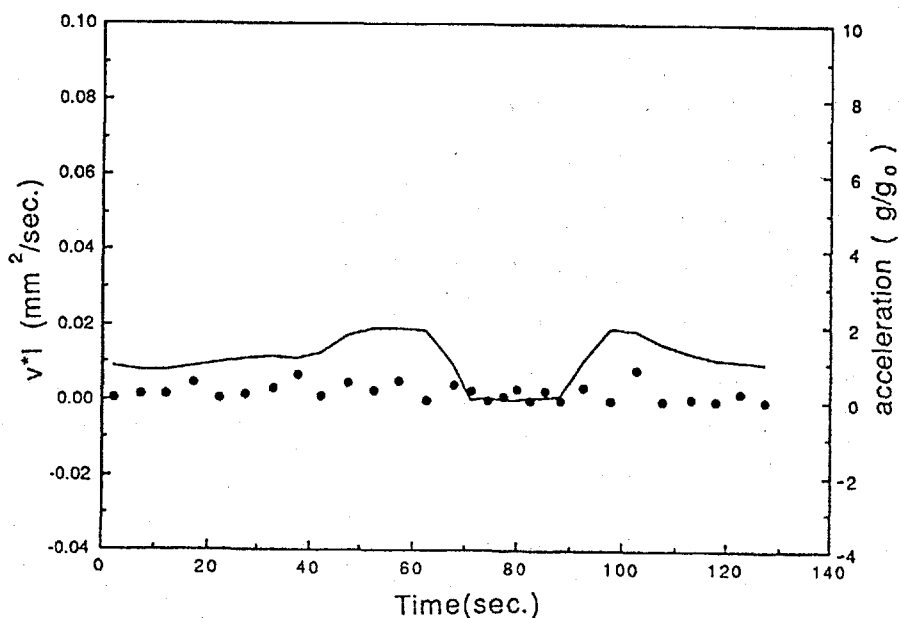


図9 経過時間- $v \times l$ プロット (実験 I D #SII-3)

Fig. 9 Time- $v \times l$ plot for the experiment #SII-3

(3) 不安定配置の $v \times \ell$ 値

図10はセル中央位置での凝固データについて $v \times \ell$ 値を計算し、垂直方向加速度と共に経過時間に対してプロットしたものである。この図より明らかなように不安定配置の場合は安定配置の場合と様相が大きく異なる。通常のフライト期においても $v \times \ell$ 値の分散はかなり大きい。微小重力期になると $v \times \ell$ 値は非常に大きく変動する。これは、熱伝導+熱対流による熱輸送が、熱伝導のみの熱輸送に急変した際の過渡的な変動を表していると思われる。

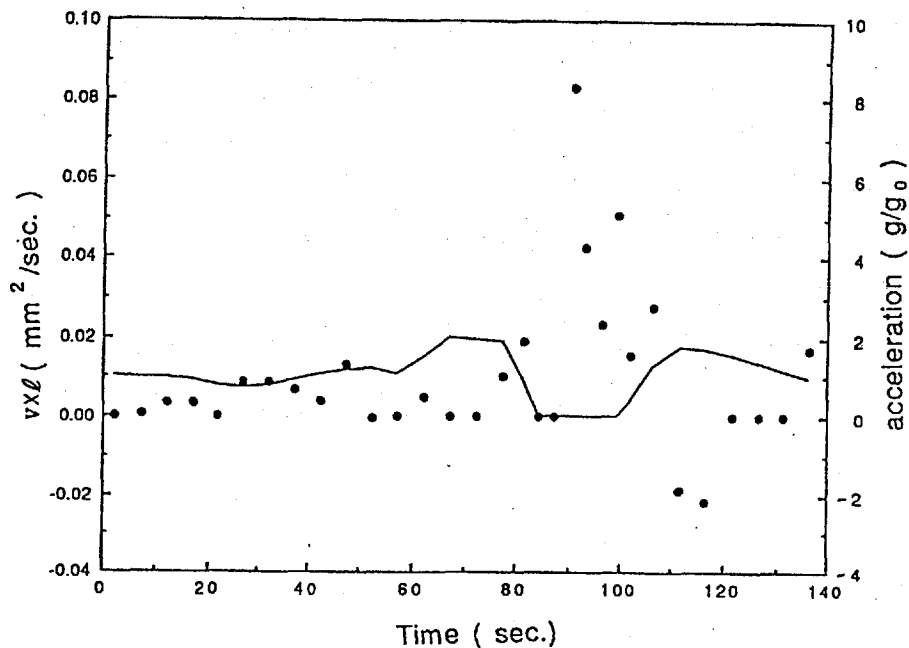


図10 経過時間- $v \times \ell$ プロット (実験ID#SI-2)

Fig.10 Time- $v \times \ell$ plot for the experiment #SI-2

4. 結言

航空機による微小重力環境を利用して、サクシノニトリルをモデル物質とした安定一方
向凝固実験を安定配置/不安定配置双方について実施した。また、安定凝固の全過程を評
価するためのパラメータとして $v \times \ell$ 値を導入し、その経時変化を評価した。

安定配置では、凝固速度を規定する主要因子が熱伝導であるため、重力が変動しても $v \times \ell$ 値に大きな変化は見られなかった。

不安定配置では熱伝導、熱対流の両者が凝固を規定しており、熱対流効果が微小重力下
で消失することに伴い $v \times \ell$ 値の大きな変動が見られた。

<謝辞>

物理現象シミュレーション技術開発に際し、助言戴いた東京大学工学部西永教授に感謝いたします。

参考文献

- (1)清水盛生, 木村秀夫, 楠瀬智宏, 石倉精三, 井村貞治, 大山勝, 中村裕彦, 亀井信一, 石川正道, パラボリックフライト, 1[1] (1991) pp. 28
- (2)清水盛生, 楠瀬智宏, 加藤充康, 石倉精三, 中村裕彦, 石川正道, 日本マイクログラビティ-応用学会誌, 8[4] (1991) pp. 222
- (3)清水盛生, 木村秀夫, 西永 頌, 井村貞治, 中村裕彦, 石川正道, 第35回宇宙科学技術連合公演会講演集, (1991) pp. 243
- (4)茂木徹一, 平成元年度科学研究費補助金 総合研究 (A) 研究成果報告書 (研究課題番号 63302058), (1990) pp. 41
- (5)梅田高照, 鈴木俊夫, 坂本敏夫, 平成元年度科学研究費補助金 総合研究 (A) 研究成果報告書 (研究課題番号 63302058), (1990) pp. 31