

過熱液体のフラッシングによる沸騰様相の観察

建設，機械系 小川 徳哉

(機械システム工学科 流体エネルギー工学研究室)

1. まえがき

近年，宇宙開発はめざましい発展をみせている．スペースシャトルによる各種宇宙実験やフリーフライヤー計画，宇宙ステーション計画の本格化によって宇宙空間の持つ特殊環境を利用した研究活動への関心が一段と高まっている．特に微小重力環境は，無静圧，無対流，無沈降，無浮力など，重力支配の地上では得られない場を提供するため，特殊な現象や特性が現われ易く，これらの特性を有効に利用できれば，従来の概念を越えた様々な実験研究成果が期待できる．現在，微小重力環境下で実験を行なう手段としては，航空機・ロケットによる慣性飛行，スペースシャトル等による宇宙飛行などの方法があるが，いずれも利用コスト，実験準備，実験方法等種々の制約条件があるため，地上でかつ頻繁に実験が可能な，落下塔方式の微小重力実験施設の整備が期待されてきた．

日本のみならず，世界には，落下塔方式の実験施設がいくつもある．その中でも，(株)地下無重力実験センター (Japan Microgravity Center : JAMIC ; 北海道空知郡上砂川町) の実験施設は，微小重力環境の時間が10秒であり，この種の落下実験施設としては世界最大規模で，約 1×10^{-4} G以下の微小重力環境を得ることができる⁽¹⁾．

一方，当研究室においては，フロン系液体の急減圧沸騰の研究が行なわれてきた．これらの研究は，原子炉での一次冷却系配管の破断によって生ずる冷却材喪失事故を想定して行われたものである．微小重力下では，沸騰により発生した気泡そのものの，浮力による空間的移動がなくなり，気泡挙動の把握や沸騰開始条件の基本的なメカニズムを理解する上で，有効な手段を与えると思われる．そこで，試験媒体としてフロンR-113を用い，微小重力下における急減圧沸騰の観察を試みた．さらに同一条件下の地上実験と比較した結果について述べる⁽²⁾．

2. 実験装置および方法

図1に実験装置の概略図を示す．圧力容器はパイレックスガラス製縦型円筒容器 (内径 ϕ 50 mm，肉厚5 mm，長さ290 mm) であり，頂部にはベークライト製フランジが取り付けられている．フランジには気体放出用の孔があり，上流部に減圧速度調整用としてオリフィス ($d = 3$ mm，10 mm) が取り付けられる．またフランジを介して，容器内の圧力測定用に圧力変換器が，液温測定用には銅-コンスタンタンシース熱電対 (直径 1.0 mm，シース材質 SUS-316) が3本 (ガラス頂部より90 mmの位置に T_1 ，160 mmの位置に T_2 ，250 mm

の位置に T_3) おおの配置されている。電磁弁開放による沸騰の気泡発生状況や成長観察のため、搭載された8mmVTRに収録される。

実験方法は、まず圧力容器に試験液体が充填される。容器加熱のため、ヒータに通電を開始し、目標初期液温に対し約10K程度まで加熱した時点で通電を止める。落下コマンド信号をタイマー用トリガとし、落下開始から約1.5秒後に電磁弁が開放され急減圧が始まる。なお、容器にヒータを巻き付ける方法により、同一加熱初期液温でも容器内液体の垂直方向の温度分布が異なることが判明した。すなわち、容器下部にヒータを巻き付けると上下温度差は減少し、ガラス管軸方向に巻き付けると大きな温度勾配が形成され(以下、前者を温度成層なし、後者を温度成層ありとして区別する)。本実験では温度成層の有無、初期液温(343K, 353K, 363K)、オリフィス口径(3mm, 10mm)の条件を変えて、それぞれ微小重力実験と地上実験との対比をおこなった。

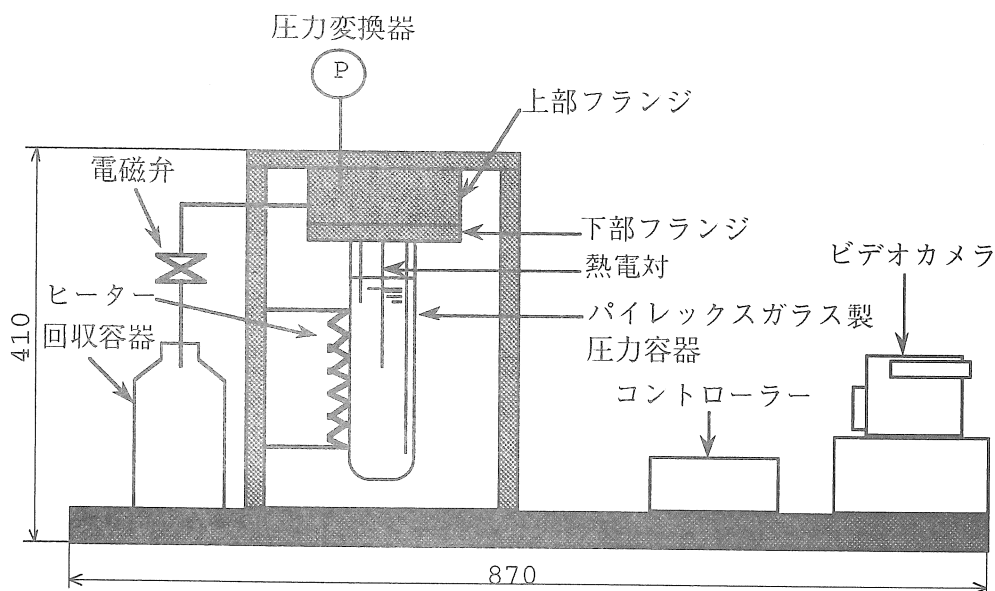


図1 実験装置概略

3. 実験結果および考察

3-1. 沸騰様相について

微小重力実験の沸騰様相を述べる前に、同一条件で行った地上実験結果についてまとめておく。地上実験の場合、可視化により分類した結果、以下の4つのタイプが観察された。すなわち、全体沸騰型、再沸騰型、順次沸騰型、および上部沸騰型である。これらのタイプの出現は、温度成層の有無、初期設定温度、オリフィス口径など実験条件により相当な違いが見られる。温度成層がある場合には、初期減圧後、液層上部に気泡が発生し、上部沸騰または順次沸騰が見られる。それに対し、

温度成層がない場合、液層全体にわたり気泡が発生することが多く、全体沸騰や再沸騰型となる例が多い。すなわち、温度成層がある場合の T_3 における液温は、 T_1 より20～30 Kほど低い飽和温度以下であり、その結果、過熱度は負の値（サブクール状態）となり、液層下部における沸騰要因が消滅する。このことから全体沸騰や再沸騰の発生は、下部の過熱度が支配的になっているといえる。図2は、温度成層があり、目標初期液温353 K、オリフィス口径10 mmの場合に観察された可視化写真であり、順次沸騰型のタイプである。

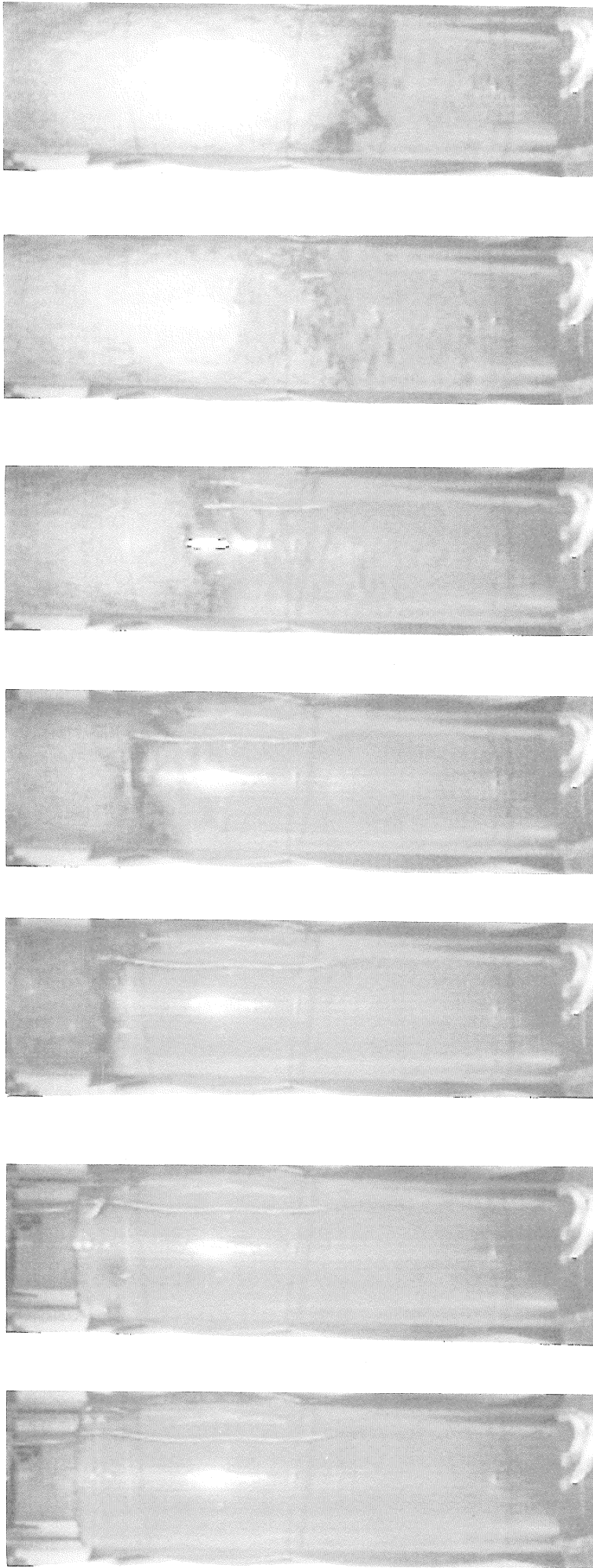
一方、微小重力実験の場合には、電磁弁開放直後、気液界面より沸騰が開始され、熱電対シース壁を伝わって液層上部から下部へ沸騰が進行する。熱電対壁から発生した気泡は、急激に成長し他の気泡と衝突・合体し巨大化する。この挙動は、微小重力実験特有の現象である。微小重力実験において、沸騰のタイプは、全ての条件において熱電対壁に沿う順次沸騰型（ただし、減圧開始前に気泡が存在している場合を除く。）であった。これを確認するため、液中から熱電対を取り除いた実験を試みた結果、沸騰は気液界面および容器壁面からのみで、熱電対を入れた場合のような下部までの沸騰は生じなかった。このことから熱電対シース壁がとりわけ気泡核の発生源となっていることがわかる。しかしビニール被覆の熱電対を使用した過去の同条件の実験においては必ずしも沸騰が熱電対壁を伝わらないことから、固体表面材質や性状が気泡発生に大きく関与することがわかった。図3は、地上実験と同一条件で観察された微小重力実験の可視化写真である。

3-2. 容器内圧力・温度・過熱度変動について

前述した沸騰様相の実験条件に対応し、容器内の圧力（a）、温度（b）およびそれらの値から算出された過熱度変動（c）を図4および図5に示す。両図とも

（a）は、それぞれの場合の圧力変動波形である。微小重力実験の方は初期減圧後、沸騰による圧力上昇を経て、その後は比較的大きな圧力の不規則変動を示しながら最終的な減速による圧力増大が観察される。これは、微小重力実験の多くの圧力波形に現れた特徴といえる。それに対し、地上実験は、極大をとる圧力回復は1回のみである。これは明らかに急激な沸騰によって圧力回復したものであり、可視化画像からも確認できる。また圧力回復値に差が見られるが、微小重力実験の方は、気液および固液界面付近しか沸騰が起きないのに対し、地上実験の方は、液層上部や中央部にほぼ同時に小気泡が発生し、浮力によりこれらが液内を急上昇し、液そのものの激しい攪拌効果と共に体積が急膨張（蒸気部は圧縮）により、系の圧力を大きく回復させた結果である。

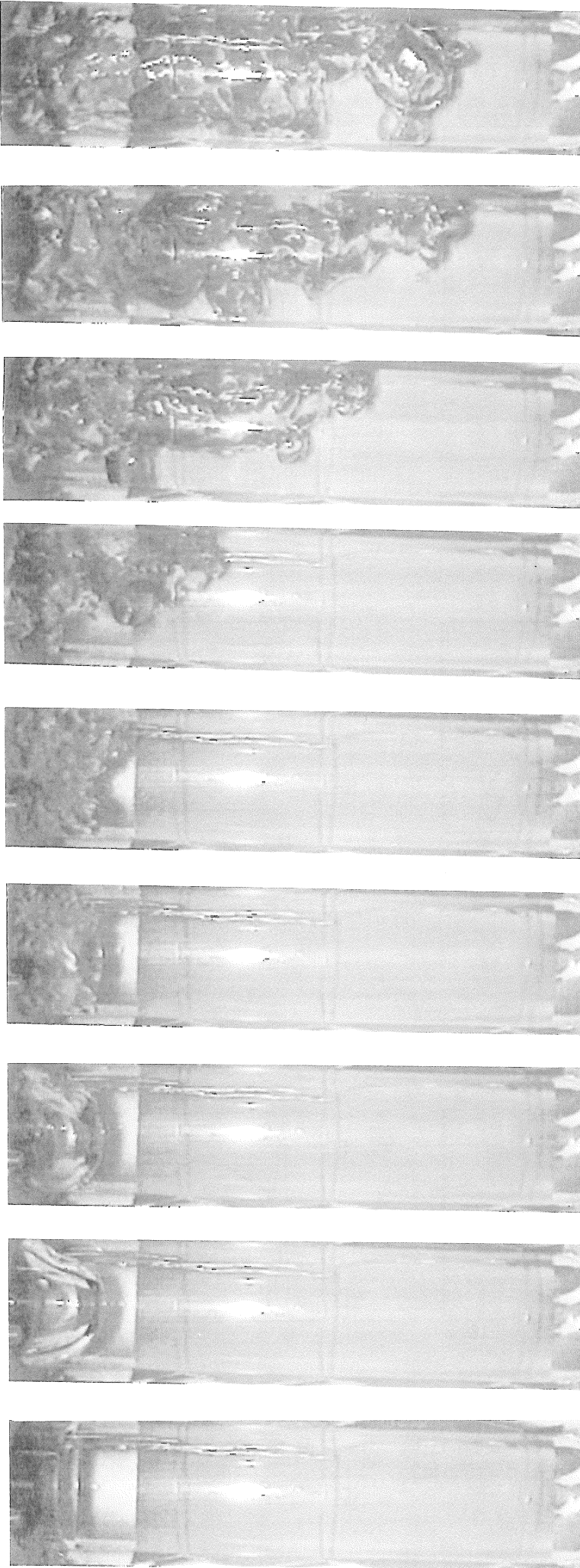
図4、図5の（b）にそれぞれ同一条件下の温度変動波形を示す。いずれの場合も上下方向に大きな液温度差があるため、下部の液温がほとんど変動していない。一方、上部や中央部については、それぞれ時間遅れを伴いながら微小重力実験の場合には急激に温度低下し早い段階で気液平衡状態に達するのに対し、地上の場合、



$t=0.00$ $t=0.09$ $t=0.33$ $t=1.00$ $t=3.00$ $t=5.00$ $t=7.00$ [sec]

実験条件：温度成層あり，目標初期液温 353 K，オリフィス口径 $d = 1.0$ mm

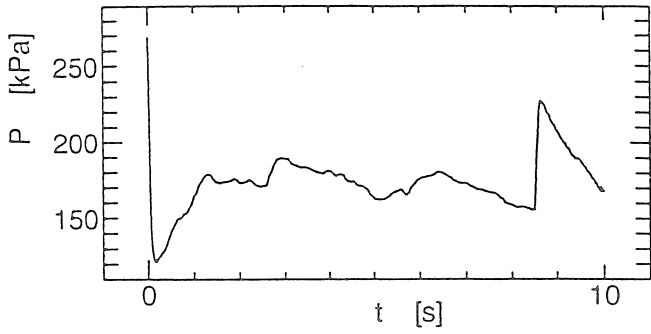
図 2 過熱液体の急減圧に伴う沸騰様相（地上実験，順次沸騰タイプ）



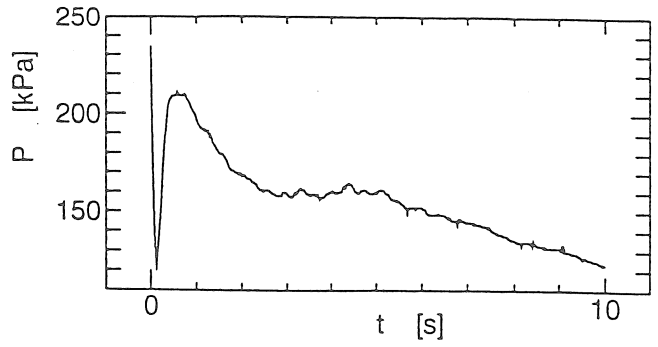
$t = -2.00$ $t = 0.00$ $t = 0.09$ $t = 0.16$ $t = 0.33$ $t = 1.00$ $t = 3.00$ $t = 5.00$ $t = 7.00$ [sec]

実験条件：温度成層あり，目標初期液温 353 K，オリフイス口径 $d = 1.0$ mm

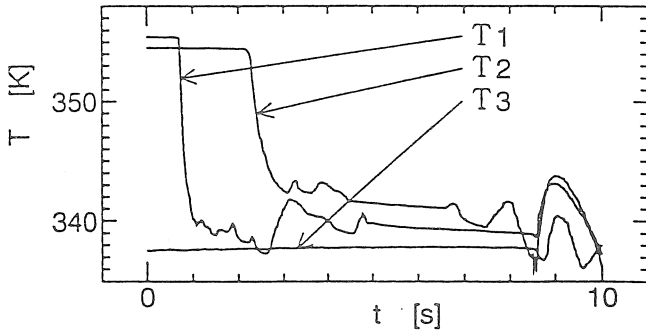
図 3 過熱液体の急減圧に伴う沸騰様相（微小重力実験，順次沸騰タイプ）



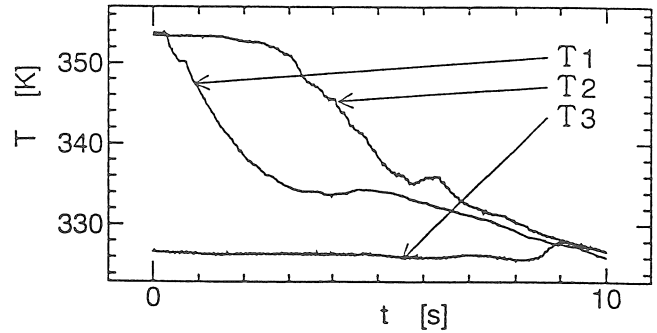
(a) 圧力変動波形



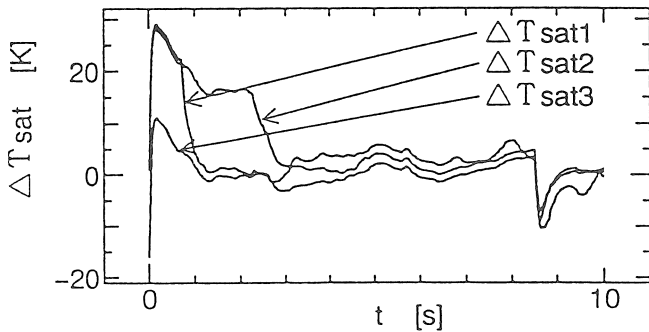
(a) 圧力変動波形



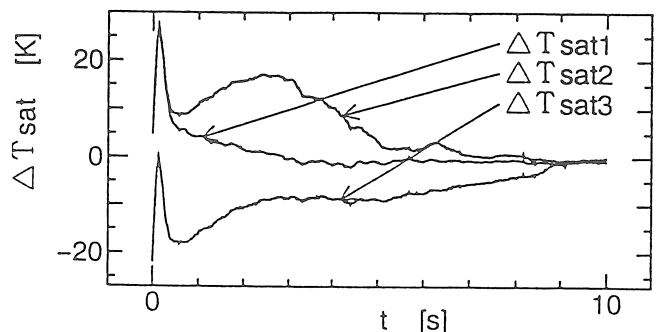
(b) 温度変動波形



(b) 温度変動波形



(c) 過熱度変動波形



(c) 過熱度変動波形

図 4 微小重力実験における各変動波形
(温度成層あり, $T_i = 355\text{K}$, $d = 10\text{mm}$)

図 5 地上実験における各変動波形
(温度成層あり, $T_i = 353\text{K}$, $d = 10\text{mm}$)

温度降下はむしろ緩やかに減衰する。これは地上の場合、管中央部の沸騰により激しく液体が攪拌・混合された結果を反映したものである。

図の(c)はそれぞれの過熱度変動波形である。図から明らかなように、各最大過熱度は圧力極小値をとる時点でピーク値を示している。上部、中部とも過熱度最大値は、それぞれ微小重力の場合も地上も27~29Kとほぼ同じ値である。沸騰の開始はこの過熱度最大値到達直前の状態で起こることが可視化写真より確認される。その後、それぞれ時間の経過とともに過熱度は0に向かう傾向を示し、沸騰の原動力は失なわれる。

4. あとがき

本報告では、微小重力実験と地上実験との比較を中心に、フロン系液体の急減圧沸騰様相観察ならびに容器内状態変動の測定結果について考察したものである。これらを要約すると、以下のようなになる。

- (1) 地上実験においては、温度成層の有無によって沸騰様相のタイプに大きな差異が見られた。
- (2) 微小重力実験において、沸騰様相のタイプは熱電対壁を伝わる順次沸騰のみが観察された。
- (3) 沸騰の要因は、微小重力場においてはとりわけ気液あるいは固液界面などの表面材質や性状が、通常重力場では液体の過熱度が支配的であると考えられる。

5. 参考文献

- (1) (株) 地下無重力実験センター編：地下無重力実験センターユーザガイド (平成5年3月)。
- (2) 小川ほか：第3回短時間無重力利用に関する講演会講演集 (1994.3)