

# 長時間微小重力実験時間を生かした沸騰・二相流に関する実験の提案

九州大学 大田治彦

## A Proposal of Boiling and Two-phase Flow Experiments Utilizing a Long-term Microgravity Environment

Haruhiko Ohta

Department of Aeronautics and Astronautics,  
Kyushu University, 744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan  
E-Mail: ohta@aero.kyushu-u.ac.jp

**Abstract:** Development of thermal management systems handling a large amount of waste heat and its long distance transportation becomes a key technology required for the long-term operation of large space platforms and of manned spacecraft systems. Boiling and liquid-vapor two-phase systems are powerful means for the present objectives and both of fundamental and applied experiments utilizing long-term microgravity opportunity are required. In the present paper, a concept for the proposal of systematic experiments is described.

**Key words:** Boiling, Two-phase flow, microgravity, ISS

### 1. 研究背景

最近の宇宙開発の流れが、月や火星の開拓を目標とするに至り、国際宇宙ステーションの利用形態も科学実験はもとより、技術開発への重みも増してきた。大型化・多機能化が見込まれるプラットフォームでは、排熱量の増大やラジエータまでの熱輸送距離の増大に対応する必要があり、すでに米国では蒸発熱輸送利用の高効率コールドプレートおよび二相流排熱ループの開発が必須との認識である。しかし微小重力下沸騰、二相流挙動の多くの実験にもかかわらず微小重力時間の制限や重力ゆらぎのために、宇宙用排熱システムの設計に使用可能なデータは皆無である。そこで日本の透明伝熱管などの画期的実験技術を駆使して、宇宙ステーションで長時間実験を実現させ、一つの試験ループに、多くの実験条件を包含すべく開発された複数のテストセクションを接続・交換し、世界で唯一かつ系統的な沸騰二相流データベースの構築を行うことを提案する。これにより実験成果の科学的・技術的な有用性のみならず、宇宙技術開発への国際貢献や、宇宙環境利用分野での日本の先導性を示す機会を期待できる。知見は宇宙開発にとどまらず、自動車など重力ベクトルが変化を伴う冷却システムなどへも生かし、宇宙技術の民生転用も実現できる。

### 2. 宇宙用大型排熱システムの概要

近年、大容量化する宇宙機やプラットフォームでの排熱量の増大、それに伴うラジエータまでの熱輸送距離の増大、搭載電子機器の集積化に伴うコールドプレート部の高発熱密度対応、が従来の单相流排熱方式や従来方式ヒートパイプの単独適用などの小容量の受動廃熱方式では大きく異なる排熱システムの

構築を要求している。大型排熱システム概念を Fig.1 に示す。

沸騰・二相流は微小重力下に限らず、原子炉の炉心冷却部や発電用水管ボイラ内の支配現象であり、高発熱密度系に対応し得る除熱過程で不可避な現象として、特徴の一つである高効率熱伝達が熱エネルギー伝達および熱輸送機器に適用されてきた。二相流体ループでは能動・受動のいずれの方式においても潜熱輸送が主体となり、单相流体ループに比して、コールドプレートの小型化、液体循環量すなわちポンプ駆動力の低減、保有液体質量の低減が大きく見込まれる。さらに蒸気圧曲線に沿って飽和温度が圧力に依存することから、アキュムレータによる流体温度制御が一定範囲で可能となり、負荷変動への追従性においても利点を持つ。

### 3. 沸騰・二相流適用と長時間実験の必要性

沸騰系の適用の有用性の反面、コールドプレートでの液体枯渇によるバーンアウト（ドライアウト）現象が除熱限界を与えることも事実であり、限界熱流束状態を回避するために、作動条件の規定や回避

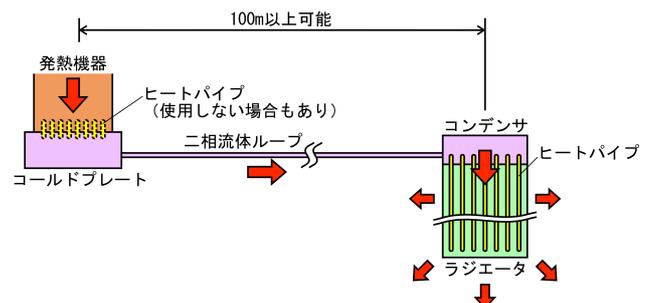


Fig. 1 Application of boiling and two-phase flow for a thermal management system of a large scale

方法の考案が安全作動上の最重要課題となる。さらに廃熱システム全体を考えた場合、コールドプレートでの除熱のみならず、熱輸送、凝縮、気液分離などの各過程において重力依存の二相流体现象が問題となり、各要素機器の設計のためには関連する現象について、微小重力下での挙動や熱流動特性に関する知見が不可欠である。一方、廃熱システムのみならず、軌道上での燃料移送などを実現するための液体ハンドリングに関する技術開発も重要な課題であり、タンク内の相分散状態の制御なども気液二相流の支配現象が大きく関連する。

沸騰・二相流では浮力などを通じて、重力が現象に与える効果も大きく、除熱過程や熱輸送過程における気液界面分散の複雑性や相変化に伴う両相比率の時間的変化などの要因により、地上ベース実験での予測は基本的に不可能である。また短時間の実験機会では以上の諸課題に関する実験範囲の設定による系統的データの取得やその信頼性の確保のためには ISS（国際宇宙ステーション）実験による長時間（100～200 時間程度）の実験機会が不可避であると考えられる。

#### 4. 従来の研究状況

微小重力下の沸騰・二相流現象に関しては 1960 年代のはじめには実験室規模落下塔や航空機を用いて米国で実験が開始され、アポロ計画の終了とともに研究数も激減していたが、1980 年代以降に大規模落下塔、ロケット、スペースシャトル等の新たな設備が導入されると、欧州や日本も含めて、広範囲に実験が行われるようになった。

しかしたとえば微小重力下では通常重力下と比較して熱伝達係数が増大するのか減少するのか、あるいは外部流のないプール沸騰状態で沸騰気泡は加熱面から離脱するのか離脱しないのかというような最

も基本的な質問に対しても、実験結果はそれぞれ両方の場合があることを示しており、統一的な結論は得られていない。

通常重力場の沸騰に関しては、従来より多くの理論があり、熱伝達係数の整理式が数多く作られてきた。いくつかの例について、これを重力レベルに対してプロットしたものを Fig.2<sup>[1]</sup>に示す。通常重力場が現象に対して特定の重力場でないことを考えれば、式ごとに定性的傾向が大きく異なる状況は、いかに沸騰現象の理解が十分でないかを傍証するものであり、これまで地上で行われてきた膨大な当該研究にいかにか本質に迫ってない部分があるかを語るものである。

#### 5. 実験課題と実験装置

実験課題と予測される成果は以下とおりである。排熱システム全体像との関係を Fig.3 に示す。

##### (1) 強制流動沸騰熱伝達<sup>[2,3]</sup>

1. 微小重力下の強制流動沸騰におけるダクト形状・寸法、質量速度、乾き度（またはサブクール度）、熱流束、系圧力の影響に関する熱伝達係数の系統的データベース。単一円管と平行平板間狭隘流路を対象とする。
2. 円管については限界熱流束のデータベース（解釈・換算により矩形ダクトにも応用可能）パラメータは質量速度、乾き度（またはサブクール度）、系圧力。
3. 熱伝達への重力の影響が見られる条件範囲。慣性力や表面張力の影響の存在下における重力の影響を明らかにする。表示方法に関しては既存の Fr 数、Bo 数、We 数の使用やこれらの定義方法にとらわれない。
4. 1 および 2 の各条件下での気液挙動の詳細映像

##### (2) 気液二相流動のメカニズムに関する計測<sup>[4,5]</sup>

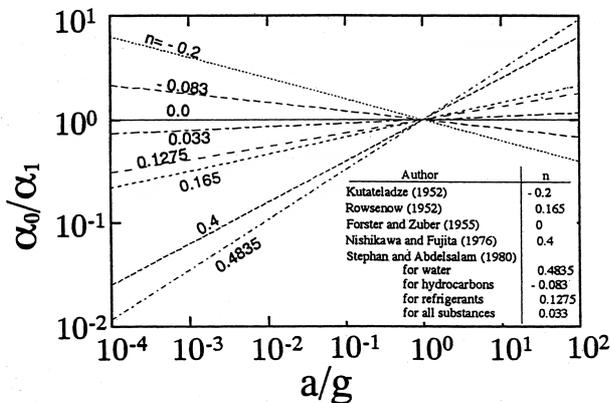


Fig.2 No consistent trends of gravity effect on the heat transfer coefficient observed in the existing correlation for terrestrial nucleate boiling

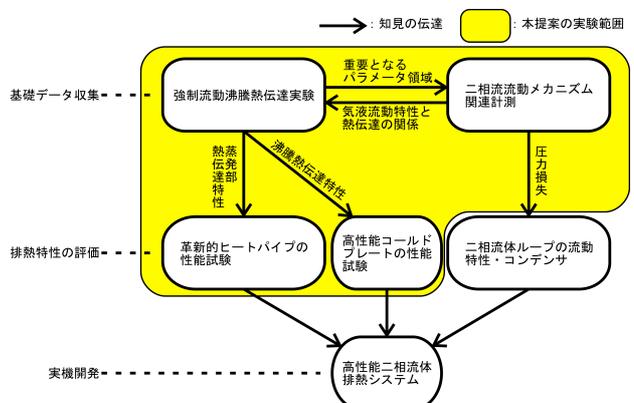


Fig.3 Relation between thermal management system and experimental subjects

1. 微小重力下の強制流動沸騰におけるダクト形状・寸法、質量速度、乾き度（またはサブクール度）、熱流束、系圧力の影響に関する摩擦圧力損失、ボイド率の系統的データベース
  2. 摩擦圧力損失への重力の影響が見られる条件範囲
  3. 環状流域における液膜厚さの変動に関する詳細データ
- (3) 高性能コールドプレートの性能試験
1. 微小重力下の強制流動沸騰において除熱限界となる最大付与熱流束の値
  2. 地上での除熱限界と比較することによる重力の影響と、重力の影響をなくす工夫の効果
  3. 微小重力用、大発熱面積・超高熱流束対応のコールドプレート構造の設計に対する指針
- (4) 革新的ヒートパイプの性能試験<sup>[6, 7]</sup>
1. 自己浸潤作用のある特定混合冷媒の対する微小重力下での除熱限界熱量の増大割合
  2. 自己浸潤作用のある特定混合冷媒の対する微小重力下での熱抵抗低減への効果の有無
  3. 上記1および2にパイプ内径およびパイプ長さが与える影響
  4. 微小重力下で作用するヒートパイプの内部構造

とその適用方法に対する指針

ヒートパイプの実験以外の一連の実験を行うために、一つの共通ループに交換可能なテストセクションを接続する方法を提案する。その概念図を Fig. 4 に示す。これは船内のクルーによりテストセクションのみを交換して順次実験を行うもので、交換に際して不凝縮ガス（空気）の混入を避けることが前提となる。

## 6. 結論

実験提案の目的は宇宙用二相流体排熱システムを設計するために必要なデータベースを構築することである。しかしこれにはそれは重力の影響が現れる範囲を明確化するというもう一つの重要な目的が加わる。高質量速度、小流路（等価）直径の場合には重力の影響は消滅する。すなわち慣性力支配域や表面張力支配域で体積力の影響は現れないので、この領域であることが確定されれば、実機開発に際して地上での試験のみにより、宇宙での正常作動が保障されることになり、飛躍的な信頼性の向上や、排熱システム構成機器の生産性の向上が期待できる。このためにはたとえば適切に定義された無次元パラメータ  $Fr$  数、 $Bo$  数、 $We$  数などにより、信頼性のある

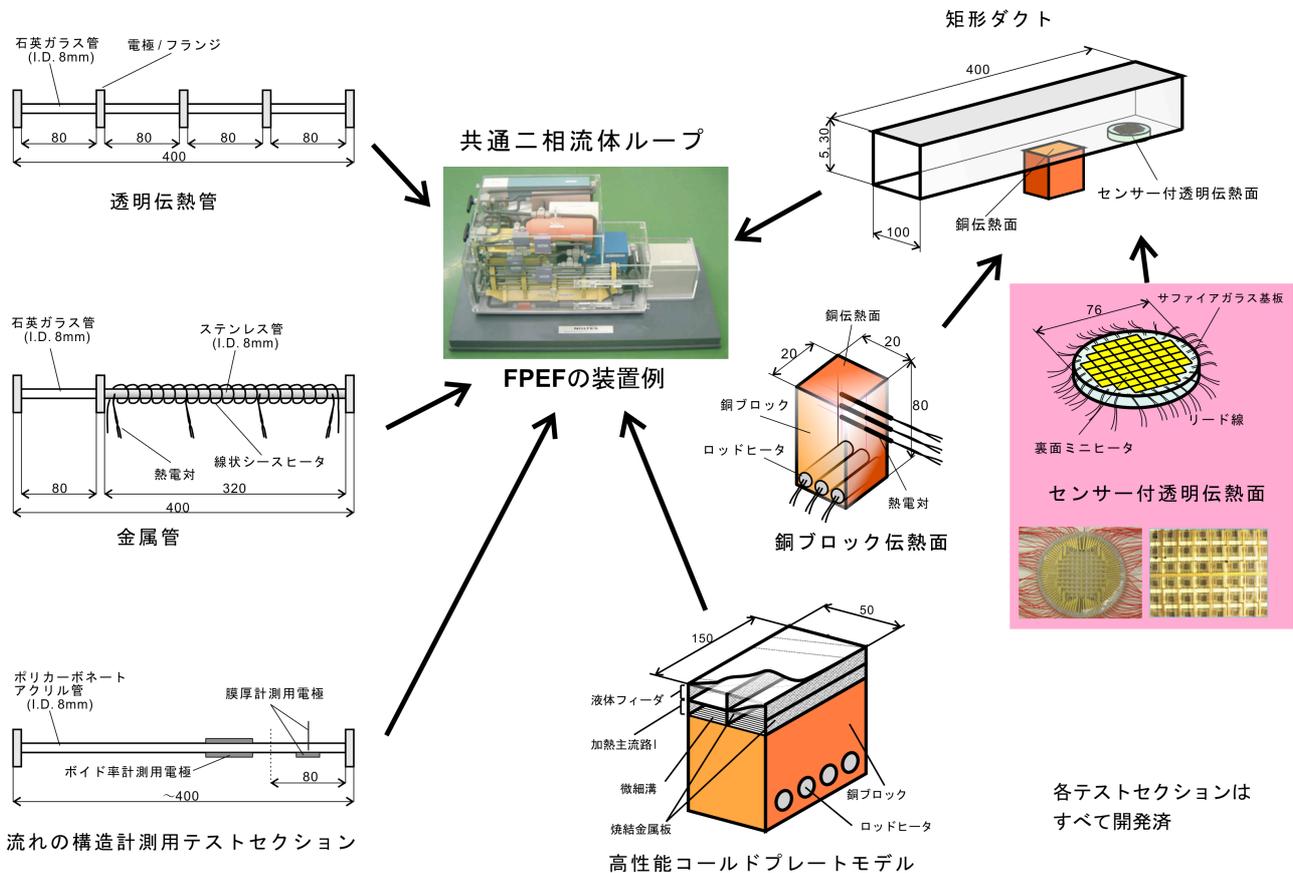


Fig.4 A concept of one common test loop and interchangeable test sections

支配領域マップ (regime map) を作成することが必要であり、各領域の境界確定にはその基礎となる系統的实验データの収集が前提である。それに必要な長時間実験期間を利用した沸騰・二相流の実験について概要をここに示した。

#### 参考文献

- [1] 大田治彦・井上浩一・山田善照・吉田 駿, 「微小重力場の沸騰熱伝達に関する研究の問題点について」, 日本機械学会講演論文集, No.944-4, pp.69-71, 1994.
- [2] H. Ohta, K. Inoue, H. Fujiyama, "Analysis of Gravity Effect on Two-phase Forced Convective Heat Transfer in Annular Flow Regime", Proc. 3rd Int. Conference on Multiphase Flow, CD Rom, No.389, 8 pages, 1998.
- [3] H. Ohta, Y. Shinmoto and K. Matsunaga, "Effect of Gravity on Flow Boiling in Narrow Ducts and Enhancement of CHF Values", Heat Transfer 2002, Proceedings 12th International Heat Transfer Conference, Vol.3, pp.725-730, 2002.
- [4] 崔英洪, 藤井照重, 浅野等, 杉本勝美, “微小重力場における空気-水二成分二相流の流動特性に関する研究 (航空機実験の結果)”, 日本機械学会論文集(B編), 68(672), pp.2247-2252, 2002.
- [5] 藤井照重, 浅野等, 小倉明雄, 山岡玄博, 山田浩之, “微小重力場における気液二相環状流の流動特性に関する実験的研究 (液膜構造に及ぼす重力及び表面張力の影響)”, 日本機械学会論文集(B編), 66(652), pp.3085-3091, 2000.
- [6] H. Ohta, T. Sakai, S. Yamaguchi, Y. Ito, Y. Shinmoto and Y. Abe, "Nucleate Boiling of Low-concentration Alcohol Aqueous Solutions for the Development of Thermal Management Systems in Space", Second International Topical Team Workshop on Two-phase Systems for Ground and Space Applications, 2007. (to be published)
- [7] R. Vochten and G. Petre, "Study of the heat of reversible adsorption at the air-solution interface", J. Colloid and Interface Sci., vol 42, 320-327, 1973.