

||||| 特集 2 : 沸騰・二相流 |||||
(解説)

微小重力下の強制流動沸騰熱伝達に関する軌道上実験の提案

大田 治彦¹・浅野 等²・河南 治³・今井 良二⁴・鈴木 康一⁵・新本 康久¹
阿部 宜之⁶・田中 耕太郎⁷・サヴィーノ ラファエロ⁸・依田 眞一⁹・松本 聡⁹
藤井 清澄⁹・川崎 春夫⁹・石塚 博弥⁹・岡本 篤⁹・村上 敬司⁹・内田 隆⁹
小林 俊一⁹・小林 亮二⁹・大久保 堅剛⁹・篠崎 紳一¹⁰
木暮 和美¹⁰・村上 淳¹¹・上田 幸寛¹¹・中川 陽子¹¹

Proposal of Microgravity Experiments on Forced Convection Boiling in Orbit

Haruhiko OHTA¹, Hitoshi ASANO², Osamu KAWANAMI³, Ryoji IMAI⁴,
Koichi SUZUKI⁵, Yasuhisa SHINMOTO¹, Yoshiyuki ABE⁶, Koutaro TANAKA⁷,
Raffaele SAVINO⁸, Shinichi YODA⁹, Satoshi MATSUMOTO⁹, Kiyosumi FUJII⁹,
Haruo KAWASAKI⁹, Hiroya ISHIZUKA⁹, Atsushi OKAMOTO⁹, Keiji MURAKAMI⁹,
Takashi UCHIDA⁹, Toshikazu KOBAYASHI⁹, Ryoji KOBAYASHI⁹,
Kengoh OHKUBO⁹, Shinichi SHINOZAKI¹⁰, Kazumi KOGURE¹⁰,
Atsushi MURAKAMI¹¹, Yukihiro UEDA¹¹ and Yoko NAKAGAWA¹¹

Abstract

Increase in the satellite size and corresponding power consumption requires the development of thermal management system handling a large amount of waste heat and its transportation along a long distance to the radiators. Boiling and two-phase flow becomes a powerful means for this purpose because it transports latent heat of vaporization. It minimizes the size of cold plates, liquid flow rate, i.e. pump power, and launch mass. In the present paper, ISS experiment on forced convection boiling is proposed to obtain the data for the design of the high performance space thermal management systems based on the analysis of liquid-vapor flow structures and heat transfer characteristics under microgravity conditions. Subjects to be investigated in the proposed experiment and the outline of experimental setup are clarified.

Key Words: flow boiling, two-phase flow, microgravity, reduced gravity, ISS

-
- 1 国立大学法人九州大学 〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744番地
Kyushu University, 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan
 - 2 国立大学法人神戸大学 〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1
Kobe University, 1-1 Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe, Hyogo 657-8501, Japan
 - 3 兵庫県立大学 〒671-2201 兵庫県姫路市書写2167
University of Hyogo, 2167 Shosha, Himeji, Hyogo 671-2201, Japan
 - 4 株式会社 IHI 〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町 1
IHI Corporation, 1 Shin-Nakahara-cho, Isogo-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 235-8501, Japan
 - 5 学校法人東京理科大学 〒278-8510 千葉県野田市山崎2641
Tokyo University of Science, 2641 Yamazaki, Noda-shi, Chiba 278-8510, Japan
 - 6 独立行政法人産業技術総合研究所 〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 1-1-1 Umezono Tsukuba, Ibaraki 305-8568, Japan
 - 7 学校法人芝浦工業大学 〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5
Shibaura Institute of Technology, 3-7-5 Toyosu, Koto-ku, Tokyo 135-8548, Japan
 - 8 ナポリ大学 Via S. Nullo 179, 80014 Giugliano in Campania (NA), イタリア
University of Naples, Via S. Nullo 179, 80014 Giugliano in Campania (NA), Italy
 - 9 独立行政法人宇宙航空研究開発機構 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1
Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), 2-1-1 Sengen, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8505, Japan
 - 10 財団法人日本宇宙フォーラム 〒100-0004 東京都千代田区大手町 2-2-1
Japan Space Forum, 2-2-1 Ohtemachi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-0004, Japan
 - 11 株式会社 IHI エアロスペース 〒370-2398 群馬県富岡市藤木900番地
IHI Aerospace Co., Ltd., 900 Fujiki, Tomioka, Gunma 370-2398, Japan

1. 緒 言

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への対応などが、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受動廃熱方式とは大きく異なる排熱システムの構築を要求している。

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、その特徴である高効率熱伝達が熱エネルギー伝達機器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。

しかし一方では、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方法の考案が安全作動上の最重要課題となる。さらに排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現象が問題となり、各要素機器の設計のためには関連する現象について、微小重力下での気液挙動や、伝熱および熱輸送特性に関する知見が不可欠となる。

本研究は、高効率熱交換や熱輸送が可能な沸騰・二相流の実験を微小重力下で系統的に行い、気液界面挙動の詳細とそれに付随する圧力損失や熱伝達などの輸送現象について信頼性の高いデータを蓄積し、高出力化・高発熱密度化に対応可能な次世代宇宙用排熱システムの設計に使用可能なデータベースを構築することを出発点としたものである。排熱システムの概念図とエネルギーの流れをそれぞれ Fig. 1 および Fig. 2 に示す。

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な変化などの要因により、地上実験での予測は基本的に不可能である。

- i) 定常データの取得によるデータの信頼性確保
- ii) 広範な実験条件での系統的なデータの取得
- iii) 短時間微小重力環境では不可能である限界熱流束の測定

の3理由により、ISSによる長時間（100～200時間程度）の実験機会が必要となる。

さらに宇宙実験の波及効果として、以下の4項目が挙げ

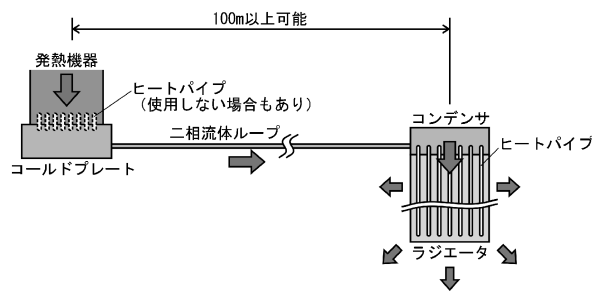


Fig. 1 宇宙用大容量排熱システムの概念図



Fig. 2 沸騰・二相流を用いた排熱システムにおけるエネルギーの流れ

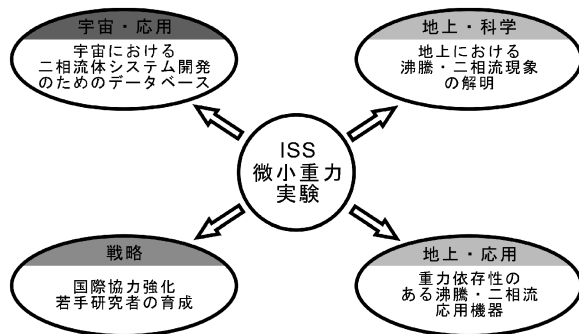


Fig. 3 ISSでの沸騰・二相流実験の4つの目的

られる (Fig. 3)。

i) 宇宙での応用

微小重力下の強制流動沸騰の系統的データベースは宇宙排熱システム等の設計のための基礎となる。

ii) 地上現象への科学

重力の存在により複雑化した地上の沸騰・二相流現象を単純化できるので、地上現象の解明に非常に有益な指針を与え得る。

iii) 地上機器への応用

重力依存のある沸騰・二相流応用機器の設計に有益な情報を与え得る。例えばハイブリッド自動車のインバータ冷却システムへの適用などがこれに相当する。

iv) 戦略上の効果

得られた実験結果の一部を実験チーム以外の研究者や開発者と共有することにより、より多くの成果が引き出せるのみならず、当該分野での国際協力の強化、若手人材育成、国際トピカルチームでの活動強化などが期待できる。

2. 科学目標

現在までに ISS を利用した沸騰実験は実験装置単位で見れば、NASA 側で2件、ESA 側で1件程度の具体的な実

施計画があるものと認識している。いずれも実験装置のサイズや供給電力において、小規模なりソースを利用したプール沸騰実験であり、気泡底部の気液挙動とそれに伴う局所熱伝達係数の分布、気泡合体メカニズムに関するものであり、科学的目標に重点を置いたものである。これに対して本実験は強制流動沸騰を取り扱い、科学的目標に加えて、宇宙・地上の両方への応用を踏まえた技術的貢献をも念頭に置いている点に大きな特徴がある。

さて微小重力下の沸騰・二相流現象に関しては、これまで多くの実験が行われているにもかかわらず、プール沸騰に関しては、例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¹⁻³⁾、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^{4,5)}、統一的な結論は得られていない。強制流動沸騰に関しては実験実施がきわめて限られており、これまでにいくつかの実験傾向が得られているに過ぎない⁶⁾。

このような状況下において、本実験では、a)熱伝達の説明、b)力の支配領域図の検証、c)気液流動の詳細説明という3つの科学目標の柱を設定しており、各検証項目は以下のように要約される。

a) 熱伝達の説明

熱伝達係数 h は熱流束 q を管内面温度 T_w と流体温度 T_b との差で除したものとして $q = Q/A = h\Delta T = h(T_w - T_b)$ の関係で表される。強制流動沸騰熱伝達においては蒸発熱輸送が行われるために、同一流量では単相強制対流熱伝達に比べて h の値が非常に大きい。 h を知ることは伝熱量 Q や必要伝熱面積 A の予測が可能となるので、大容量化が求められる宇宙用排熱システムの構築には不可欠である。蒸発過程においては気液両相の分布や気液界面の時間的変化に対して、作動条件ごとに非常に多くのパターンがあり、複数の熱伝達機構を介して直接的あるいは間接的に熱伝達係数 h の差となって現れる。各条件下での h の計測とそれに付随した熱伝達メカニズムの解析は本実験の核である。

沸騰熱伝達は液体の蒸発により高い熱伝達係数を維持するが、熱流束を増加させてゆくと、ある熱流束値（限界熱流束）において管内面が乾く。この場合、直接気相への熱伝達となるので h は急激に低下し、熱流束 q を保持し続けると温度差 ΔT が急激に増大、すなわち管内面温度 T_w の急上昇（バーンアウト）を生じる。実際の適用ではこの状況を回避しなければならず、限界熱流束の把握はきわめて重要である。強制流動沸騰における限界熱流束には大別して2種類があり、低乾き度（管中心には液体、管内面には気泡が存在）で熱流束の増大とともに気泡合体が生じ、管内面が蒸気膜に覆われていわゆる膜沸騰に移行する場合、他の一つは高乾き度（管中心は蒸気、管内面には環状液膜が存在）で管内面に付着して流れる液膜流が蒸発により部分的に消滅し、管内面温度が上昇する場合とがある。各条

件下での限界熱流束の値はもとより、バーンアウトに到るまでのメカニズムに関して解析の対象となる多くの疑問点がある。これまで微小重力下の強制流動沸騰で限界熱流束を測定した例は皆無に等しく、本実験が実現すれば非常に貴重なデータとなる。

b) 力の支配領域図の検証

重力の影響が現れる範囲を明確化することは、実際への応用に際して、微小重力下で検証するの必要の有無を事前に知ることが可能となる。さらに重力の影響が消滅する条件下で作動させれば、地上での検証を主体としてきわめて信頼性のある宇宙用排熱システムなどを製作することが可能となる。

重力の影響が現れる範囲を明確にするには、慣性力や表面張力などの影響を同時に考えながら領域図を作成する必要がある。領域図のパラメータは重力、慣性力、表面張力の順に2つの力の比を表すパラメータとしてフルード数、ウェーバ数、ポンド数をとるのが普通である。しかしながら慣性力ひとつを考えてみても、平均密度と質量速度の両方に依存しており、地上の沸騰二相流においてさえ乾き度をどのように反映させるかについては十分に検討されていない。さらに熱伝達係数、限界熱流束、圧力損失などの対象によっても領域図の内容は一般に変化するものと考えるのが基本である。力の支配領域図の作成に際しては、微小重力下での実験により体積力支配域から表面張力支配域への移行に対する境界の検証を行うとともに、地上で細管を用いた実験をあわせて行い、ポンド数の定義の妥当性に関する検証も同時に行う必要がある。また体積力支配域から慣性力支配域、表面張力支配域から慣性力支配域の境界についても、質量速度および乾き度の両方を変化させて、これらを検証するとともにフルード数やウェーバ数の定義を検討してゆく必要がある。

c) 気液流動の詳細説明

気液挙動の詳細を把握することは、熱伝達や圧力損失のメカニズムを把握するための基礎となる。圧力損失、ポイド率および管断面ポイド率分布、液膜厚さ、擾乱波挙動、界面密度などが計測および観察対象となるパラメータとなる。これまで比較的多くの微小重力実験が行われてきたが⁷⁻⁹⁾、その大部分は空気-水などのいわゆる二成分系を用いた非加熱系を対象としたものであり、実際の応用が見込まれる強制流動沸騰系に対して測定された例は非常に少ない。とくに実際の強制流動沸騰系における圧力損失データは排熱システムの開発のためにとくに重要な計測対象である。また例えば、管断面ポイド分布に関して、重力変化により半径方向にポイド分布が変化する報告があるが、管内面からポイド（気泡）が発生する沸騰系に対してはほとんど検証されていない。さらに中乾き度から高乾き度の環状流域においては、基底液膜と擾乱波から構成される環状液膜について、その挙動を詳細に把握することは熱伝達およびドライアウト機構説明に不可欠である。

3. 実験装置

本実験計画では、新規開発される予定の「多目的実験ラック (MPSR)」のワークボリュームを利用して、1つの共通ループに、透明伝熱管と金属管の2つの異なるテストセクションを併置して強制流動沸騰熱伝達の実験を実施する。透明伝熱管ではガラス管の内面に金属膜を非常に薄くコーティングし、これに直接通電させることにより、加熱・気液挙動観察・管内面温度の測定を同時に行う。Fig. 4に示すように、透明伝熱管は3つの加熱セグメントにより構成され、CCDカメラによる気液挙動の観察とともに熱伝達係数の測定を行う。一方、金属円管は、ドライアウト時の管壁温度の上昇に備えて破損を防止するために採用したものであり、限界熱流束の実験を主として行う。加熱は外部に巻き付けられたシースヒータにより行うシンプルな構造であり、限界熱流束測定時の長時間ステップ加熱に耐えられるようになっている。さらに気液二相流動のメカニズムに関する計測を行うために、透明伝熱管および金属

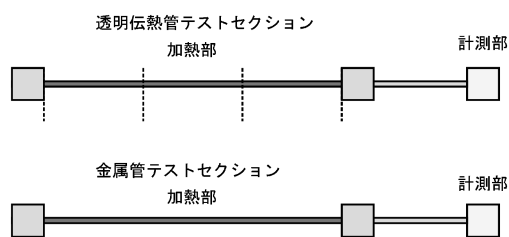


Fig. 4 実験に使用される2種類のテストセクション

管の下流に観察部を設け、高速度ビデオを導入して、各条件ごとの気液挙動の詳細観察とこれに関する各パラメータの計測を行う。

各テストセクションの加熱部仕様の概要と実験条件を以下に示す。さらに科学目標ごとの各検証項目をテストセクションと対応させて Table 1 に纏めた。

透明伝熱管

基材材質：石英ガラス

基材寸法：内径 4 mm

構成：加熱セグメントの直列配置，1セグメント加熱長さ50 mm

加熱方法：金薄膜内面コートに直接通電

温度計測：金薄膜を抵抗温度計として使用

金属管

基材材質：SUS 管

基材寸法：内径 4 mm

構成：1セグメントで構成，加熱長さ：約360 mm

加熱方法：電気絶縁済シースヒータの巻きつけによる

温度計測：管外表面に熱電対を一定間隔でロウ付け，円筒座標系熱伝導式により管内面温度を算出

実験パラメータ範囲 (最大範囲)

質量速度：10-800 kg/m²s

サブクール度：0-30 K

乾き度：0-1

熱流束：1×10³ W/m²-1×10⁶ W/m²

Table 1 科学目標ごとの検証項目のまとめ

| 目 標 | 使用するテストセクション | 実施の方法 | 既存の研究の問題点 | 新規に得られる結果 | 解析・検討対象 |
|---------------|----------------------------------|--------------|--|---|--|
| a) 熱伝達の解明 | a-1) 熱伝達係数 透明伝熱管加熱部 金属管加熱部 | 実験条件設定 | <ul style="list-style-type: none"> 重力の影響が明確でない。 乾き度範囲に系統性がない。 極低流量域での実験データがない | <ul style="list-style-type: none"> 各条件ごとの熱伝達係数データ 重力の影響が定量的に明確化 低乾き度域および高乾き度域における熱伝達モデル | <ul style="list-style-type: none"> 環状流域の熱伝達 スラグ流域の熱伝達 気泡流域の熱伝達 |
| | a-2) 限界熱流束 金属管加熱部 | 実験条件設定 | <ul style="list-style-type: none"> 研究自体が皆無状態 | <ul style="list-style-type: none"> 各条件ごとの限界熱流束データ バーンアウトのメカニズム | <ul style="list-style-type: none"> 壁面温度変化 中高乾き度域でのドライアウトによる限界熱流束値 低乾き度域での膜沸騰遷移による限界熱流束値 |
| b) 力の支配領域図の検証 | 透明伝熱管加熱部 金属管加熱部 計測部 | a)の実験に付随して計測 | <ul style="list-style-type: none"> 沸騰二相流に対してほとんど検証されず。 | <ul style="list-style-type: none"> 新たなパラメータの定義 各支配領域境界の特定 | <ul style="list-style-type: none"> 熱伝達係数に対する領域図 限界熱流束に対する領域図 圧力損失に対する領域図 |
| c) 気液流動の詳細解明 | 透明伝熱管加熱部 計測部 | a)の実験に付随して計測 | <ul style="list-style-type: none"> 沸騰二相流(加熱系)に対してほとんど検証されず。 | <ul style="list-style-type: none"> 流動様式線図 各条件ごとの圧力損失データ 各条件ごとのポイド率データ 各条件ごとの液膜厚さデータ など | <ul style="list-style-type: none"> 流動様式および遷移条件 圧力損失 ポイド率，管断面ポイド分布，界面密度分布，気液速度差 環状液膜厚さ分布 (擾乱波・基底液膜挙動) |

4. 結 言

微小重力下の沸騰・二相流の実験に関して、ISS利用を想定した実験計画を纏め、以下の結論を得た。

- i) 沸騰・二相流実験の成果により、宇宙用二相流体ループの開発に必要な基礎データが得られる。
- ii) 気液流動挙動や熱伝達機構などに関する解析を行うことにより、大きな科学的成果が期待できる。科学目標の柱として、a)熱伝達の解明、b)力の支配領域図の検証、c)気液流動の詳細解明の3つを設定し、各検証項目を明かにした。
- iii) 上記の科学目標達成のために、テストセクションの加熱部形態として、透明伝熱管および金属管の2種類が必要であり、さらに気液挙動の詳細観察を行うための非加熱部が必要となる。

今後、テストループを含めた具体的な実験装置各部の構造、テストセクションごとの実験条件の詳細を明確にしてゆく。

謝辞

本実験計画は国際宇宙ステーション第二期利用候補テーマとしての採択に基づくものであり、平成20年度に行われた各議論や要素試験に関して、JAXA および関係機関、メーカーの各担当者の方々からの多大な御協力に謝意を表す。また本実験計画の進行に関して、ESA 各位およびULB の Oleg A. Kabov 教授、ミュンヘン工科大学の Jo-

hannes Straub 名誉教授をはじめとして欧州各機関の研究者から多くのアドバイスと協力が得られたことに御礼申し上げます。

参考文献

- 1) J. Straub, M. Zell and B. Vogel: "Pool Boiling in a Reduced Gravity Field", Heat Transfer 1990, Proc. Int. Conf. Heat Transfer, **1** (1990) 91-112.
- 2) H. Merte, Jr.: "Nucleate Pool Boiling in Variable Gravity", Progress in Astronautics and Aeronautics, **130** (1990) 15-69.
- 3) J. Straub: "Boiling Heat Transfer and Bubble Dynamics in Microgravity", Advances in Heat Transfer, **35** (2001) 57-172.
- 4) T. Oka, Y. Abe, Y. H. Mori and A. Nagashima: "Pool Boiling of n-pentane, CFC-113 and Water under Reduced Gravity: Parabolic Flight Experiments with a Transparent Heater", J. Heat Transfer, Trans. ASME, **117** (1995) 408-417.
- 5) H. Ohta: "Experiments on Microgravity Boiling Heat Transfer by Using Transparent Heaters", Nuclear Engineering and Design, **175** (1997) 167-180.
- 6) H. Ohta: "Microgravity Heat Transfer in Flow Boiling", Advances in Heat Transfer, **37** (2003) 1-76.
- 7) K. S. Gabriel: "Microgravity Two-phase Flow and Heat Transfer", Springer, 2007.
- 8) 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 (2000) 3085-3091.
- 9) 崔美洪, 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 (2002) 2247-2252.

(2009年6月10日受理)