

「きぼう」における強制流動沸騰実験に使用する実験装置について

九州大学 廣川智己、馬場宗明、大谷伸生、新本康久、大田治彦

神戸大学 浅野等

兵庫県立大学 河南治

山口東京理科大学 鈴木康一

IHI 技術開発本部基盤技術研究所 今井良二

宇宙航空研究開発機構 川崎春夫、藤井清澄

Apparatus for Flow Boiling Experiments to be Performed onboard “KIBO”

Tomoki Hirokawa¹, Soumei Baba¹, Nobuo Ohtani¹, Hitoshi Asano², Osamu Kawanami³,
Koichi Suzuki⁴, Ryoji Imai⁵, Haruo Kawasaki⁶, Kiyosumi Fujii⁶, Yasuhisa Shinmoto¹,
and Haruhiko Ohta¹

¹Kyushu University, Motooka 744, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395

²Kobe University, 1-1 Rokkoudai-chou, Nada-ku, Kobe, Hyogo, 657-8501

³University of Hyogo, 2167 Shosha, Himeji, Hyogo, 671-2201

⁴Tokyo University of Science, Yamaguchi, 1-1-1 Daigakudori, Sanyo-Onoda, Yamaguchi 756-0884

⁵IHI Corporation, 1 Shinnakahara-chou, Isogo-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 235-8501

⁶Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1 Sengen, Tsukuba-shi Ibaraki, 305-8505
E-Mail: hirokawa@aero.kyushu-u.ac.jp

Abstract: Boiling heat transfer is one of promising means to be applied for the thermal management systems handling a large amount of heat in space. However, gravity effects on the two-phase flow phenomena and corresponding heat transfer characteristics have not been clarified in detail. Experiments on flow boiling heat transfer onboard “KIBO” in International Space Station are proposed to clarify the flow boiling heat transfer phenomena under microgravity conditions. Ground tests by using a Ground Model (GM) are conducted to verify the performance of heated test sections.

Key words; Flow Boiling, Two-phase Flow, Heat Transfer, Microgravity, International Space Station

1. はじめに

近年、宇宙機の大型化・大容量化による排熱量の増大と熱輸送距離の増大、電子機器の集積化による発熱密度の上昇といった問題が深刻化しており、従来の単相強制対流やヒートパイプと比較して高効率かつ大容量の排熱に対応可能な排熱システムが要求されている。このような要求に対して、相変化による高効率熱伝達および熱輸送能力を有する沸騰現象に注目が集まっている。強制流動沸騰を用いた排熱システムと比較してコールドプレートの小型化、ポンプ駆動力の低減、液体充填量の低減が見込まれる。しかし、コールドプレート内での液体枯渇によるドライアウトが除熱限界を与えるという問題点があり、システムの安全動作にはこの除熱限界を知り、それを回避することが必要となる。このためには沸騰二相流の気液界面挙動および熱伝達特性に対して重力が及ぼす影響について把握する必要がある。しかし例えば通常

重力下における核沸騰熱伝達係数の予測式は多数存在するものの、予測式の示す重力の影響は式によって定性的傾向が大きく異なっており、通常重力下における実験から沸騰二相流に及ぼす重力の影響を予測することは不可能である¹⁾。これまで多くの微小重力実験が実施されてきたが、過去に報告された実験結果はそれぞれ異なる傾向を示しており^{2), 3)}、未だ統一的な見解は得られておらず、重力の影響に関する明確な知見が得られていない。

そこで、沸騰二相流の現象解明、および宇宙すなわち微小重力環境での強制流動沸騰排熱システムの開発を行うための熱・流動特性に関するデータベースの構築を目的として、国際宇宙ステーション「きぼう」日本実験棟での強制流動沸騰実験の提案を行った。「きぼう」では、長時間かつ安定した微小重力環境が得られるので、複数の課題について広範囲な条件の組み合わせのもとに

信頼性の高い系統的データが得られる。**Table 1**に「きぼう」で実施することが可能な実験条件範囲を示す。とくに既存の実験にはあまり見られない低質量速度の実験も予定しており、広範囲の質量速度、入口サブクール度、入口乾き度条件にて実験を行うことを目指している。また、加熱条件は「きぼう」の多目的実験ラックで規定された電力量(最大 400W)で制限される。

これまでに著者らは「きぼう」での強制流動沸騰実験に向けた各要素機器の検証を行うために、Ground Model (GM) を制作し、各要素機器の性能および検証試験を行った⁴⁾。本研究では、その中に組み込まれた加熱テストセクションである金属伝熱管および透明伝熱管を用いて強制流動沸騰実験を行い、熱伝達特性、流動様式について検討を行った。

2. GM 試験概要

GM の概略図を **Fig.1** に示す。試験ループは支持台に二次元的に配置され、各要素機器の変更や調整を容易にしている。また試験ループは支持台を水平置きまたは垂直置きすることで姿勢の変更が可能であり、水平流、垂直流ともに実験が可能である。また、ヒートロスを抑え、乾き度を正確に見積もるために配管全体は断熱材で覆われている。「きぼう」では液漏れを防止して安全性を確保するためにも、試験ループは閉ループを採用している。試験ループはポンプ、流量計、予熱器、テストセクション、凝縮部で構成されている。実験は予熱器によってテストセクション入口の液体サブクール度または乾き度を設定し、異なる 2 種類のテストセクションを上流に位置するバルブの切り替えにより選択して行う。ループ内で発生した蒸気を完全凝縮させるための凝縮部は、ISS での使用実績があるコールドプレートを採用し、JEM 冷却水の使用を模擬できるようにチラーユニットを用いてコールドプレート入口の冷却水温度および流量を調整する。ISS での運用実績から、コールドプレート入口温度 17°C、流量 45L/h で設定している。また、ループ各所には混合器を配置し、流体温度および圧力を計測する。系の圧力レベルはアキュムレータを導入することで、大気圧近傍に設定している。

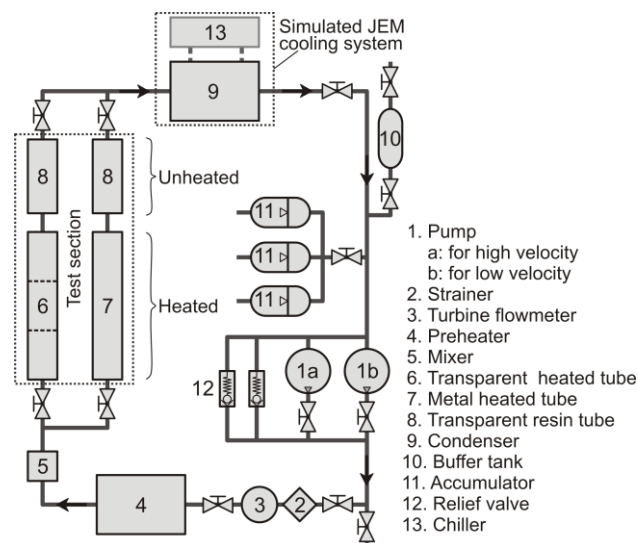


Fig.1 Structure of Ground Model (GM).

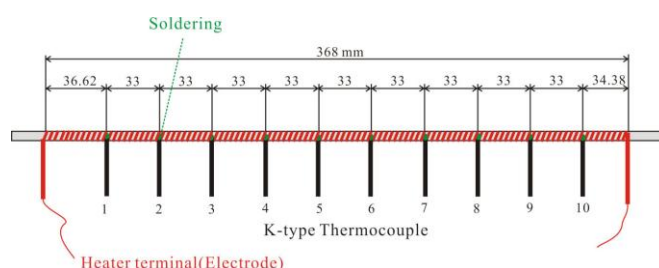


Fig.2 Structure of Metal heated tube.

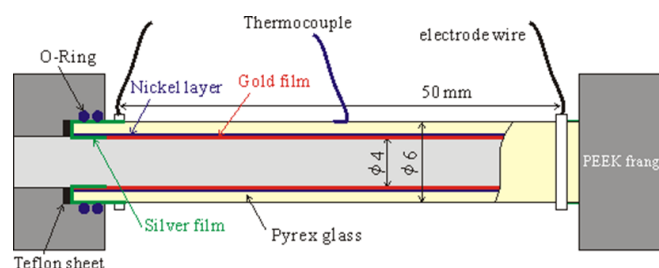


Fig.3 Structure of 1 segment of Transparent heated tube.

Table 1 Experimental conditions for ISS

Test fluid	FC72(deaerated)
Tube inner diameter	$d_i = 4 \text{ mm}$
Mass velocity	$G = 30 - 600 \text{ kg/m}^2\text{s}$
Inlet condition	$\Delta T_{sub,in} = 0 - 10\text{K}$, $x_{in} = 0 - 0.9$
Heat flux	$q = 1 - 100 \text{ kW/m}^2$
Cooling water	$T_{in} = 17^\circ\text{C}$, $V = 45 \text{ L/h}$

Table 2 Experimental conditions for GM

Test fluid	FC72(deaerated)
Tube inner diameter	$d_i = 4 \text{ mm}$
Mass velocity	$G = 150, 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$
Inlet condition	$x_{in} = 0 - 0.7$
Heat flux	$q = 6 - 25 \text{ kW/m}^2$
Cooling water	$T_{in} = 17^\circ\text{C}$, $V = 45 \text{ L/h}$

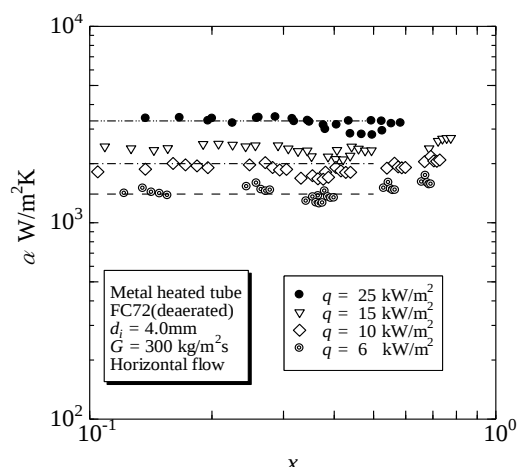


Fig.4 Heat transfer coefficient α versus vapor quality at $G = 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ (Metal heated tube)

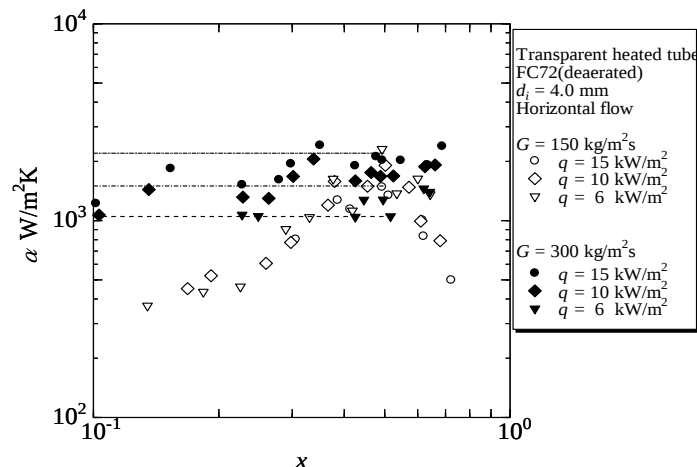


Fig.5 Heat transfer coefficient α versus vapor quality at $G = 150, 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ (Transparent heated tube)

テストセクションは気液挙動の観察と熱伝達係数の計測が同時に可能な透明伝熱管、熱伝達係数の詳細と限界熱流束との計測を目的とした金属伝熱管の2種類の加熱テストセクションを備えている。その下流には気液挙動詳細観察、圧力損失計測用に可視部を備えた非加熱テストセクションを組み込んでいる。

透明伝熱管は管内径 4mm のパイレックスガラス管を用いる。透明伝熱管の構造上、加熱長さにあたる平均の熱伝達特性しか把握できないために、加熱長さ 50mm を1セグメントとして、これを3セグメント直列に配置することにより、流れ方向の熱伝達の変化も大まかに捉えられるように考案されている。加熱はガラス管内面にコーティングされた金薄膜への直接通電により行われる。金薄膜は測温抵抗体として温度計測にも用いられる。透明伝熱管の各セグメントでは、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。

金属伝熱管の概略図をFig.2に示す。管内径 4mm、肉厚 3mm の銅製単一円管を用いた。加熱は金属管外壁面に螺旋状に巻きつけたシースヒータを用い、加熱長さは 368mm としている。テスト管外壁には 10 本の K 型シース熱電対がシースヒータをかわすように銀ろう付けされており、軸方向管外壁の温度分布が測定可能である。テスト管入口・出口での流体温度は流路内に挿入されたシース熱電対で測定した。また、熱電対位置での局所熱伝達係数 α は、式(1)により算出した。

$$\alpha = \frac{q}{T_{w,i} - T_f} \quad (1)$$

ここに、 q : 流体に伝わる熱流束、 $T_{w,i}$: 管内壁温度、 T_f : 流体温度である。管軸方向の流体温度分布は、テスト管入口温度と、テスト管出口における圧力とテスト管入口、出口の差圧から推定した管内圧力分布に対応する飽和温度から推定したが、飽和温度に達するまではエネルギーバランスにより温度分布を求めた。実験は水平置き

金属伝熱管および透明伝熱管を用いて、Table 2 に示す条件で強制流動沸騰実験を行った。

3. 実験結果および考察

乾き度 x に対する熱伝達係数 α の変化について、金属伝熱管、透明伝熱管を用いた結果をそれぞれ Fig.4 および Fig.5 に示す。質量速度 $300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ では、どちらのテストセクションも熱伝達係数が乾き度に依存しない核沸騰による熱伝達係数が、低乾き度において確認できる。さらに乾き度の増大とともに熱伝達係数が乾き度に依存する二相強制対流域へと遷移していることも確認できる。以上の傾向は Bao ら⁵⁾、Huo ら⁶⁾、Shiferaw ら⁷⁾が管内径 1.10-4.26mm、試験流体としてフロンを用いて確認した傾向と定性的に一致している。しかしながら、Fig.5 に示すように、透明伝熱管では異なる質量速度 150、 $300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ を比較すると、核沸騰支配と思われる低乾き度域において、熱伝達係数が質量速度の変化によって大きく異なっている。

この原因として、低質量速度では管の内壁周方向に温度分布が顕著に異なることが考えられる。Fig.6、Fig.7、および Fig.8 に観察された流動様式を示す。低質量速度かつ低乾き度域では、重力依存性がみられる層状流が観察された。この流動様式では、管内壁上面は気相のみに触れており、主に蒸気単相の強制対流により熱伝達が行われていることが確認できる。一方下面では核沸騰が行われていることが確認できる。また、透明伝熱管は、熱抵抗の大きいガラス管の内壁表面に、非常に薄い金薄膜を蒸着させているため、層状流では管内壁上面は下面に比べて非常に高温になる。一方、透明伝熱管では、1セグメント全体の管内壁の平均として温度を得ているため、実際の内壁温度を過大評価することになり、熱伝達係数が予想より低い値になったものと考えられる。なお、フライトモデルでは通常重力下の参照データを得る

ための地上実験を行う際、実験装置の方向を変更することによって垂直流での実験も行うことができる。垂直流は管軸方向に対して対称な流動様式が得られるので、管周方向の内壁温度分布は概ね一様となり、低質量速度においても以上に示した現象は起きず、微小重力下との比較が容易になるものと考えられる。



Fig.6 Stratified flow

($x_{in} = 0.08$, $G = 150 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $q = 10.0 \text{ kW/m}^2$)



Fig.7 Annular flow

($x_{in} = 0.30$, $G = 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $q = 25.0 \text{ kW/m}^2$)



Fig.8 Annular flow with partial dryout

($x_{in} = 0.60$, $G = 150 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $q = 15.0 \text{ kW/m}^2$)

4. 結論

国際宇宙ステーション「きぼう」日本実験棟での強制流動沸騰実験に向け、実験装置の構成機器の性能検証を行うためのGMを制作し、地上で強制対流沸騰実験を行った。その結果、金属伝熱管テストセクション、透明伝熱管テストセクションにおける熱伝達係数の傾向が従来確認されている傾向と定性的に一致することを確認した。また、透明伝熱管テストセクションにより、実験条件の範囲内で層状流、波状流、環状流が観察された。よって同じ仕様のテストセクションをフライトモデルにも採用することで、微小重力下の熱伝達特性、流動様式を把握するのに必要な通常重力下での参照データが得られる見通しを得た。今後はシーケンス制御での構成機器の作動確認と実験パラメータ範囲の検討、透明伝熱管の検定方法の確立、限界熱流束の測定に関する検討、高速度カメラによる観察の検証などを順次行う予定である。

謝辞

このプロジェクトの準備に際して、協力していただきました阿部宜之(産総研)、田中耕太郎(芝浦工業大学)、高柳昌弘、依田眞一、松本聡、大久保堅剛、岡本篤(JAXA)、篠崎紳一、小暮和美(JSF)、村上淳、上田幸寛、中川陽子(IHI エアロスペース)、久保田知里、林田貴大(九州大学)の各方々(敬称略)に深く感謝いたします。

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, 944-4, 69-71, (1994).
- 2) Ohta, H.; Experiments on Microgravity Boiling Heat Transfer by Using Transparent Heaters, *Nuclear Engineering and Design*, 175, 167-180 (1997).
- 3) Luciani, S.; Two Phase Flow Experimental Study Inside a Microchannel: Influence of Gravity Level on Local Boiling Heat Transfer, *Evaporation, Condensation and Heat transfer*, 73-94 (2011).
- 4) Baba, S., T Sakai, T., Sawada, K., Kubota, C., Wada, Y., Shinmoto, Y., Ohta, H., Asano, H., Kawanami, O., Suzuki, K., Imai, R., Kawasaki, H. and Fujii, K.; Proposal of Experimental Setup on Boiling Two-phase Flow on-orbit Experiments onboard Japanese Experiment Module "KIBO", *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 327, 012055, 8pages (2011).
- 5) Bao, Z.Y., Fletcher, D.F. and Haynes, B.S.; Flow Boiling Heat Transfer of Freon R11 and HCFC123 in Narrow Passages, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, 3347-3358 (2000).
- 6) Huo, X., Chen, L., Tian, Y.S. and Karayiannis, T.G.; Boiling and Regimes in Small diameter Tubes, *Applied Thermal Engineering*, 24, 1225-1239 (2004).
- 7) Shiferaw, D., Karayiannis, T.G., and Kenning, D.B.R.; Flow Boiling in a 1.1 mm Tube with R134a: Experimental Results and Comparison with Model, *International Journal of Thermal Sciences*, 48, 331-341 (2009).