

「きぼう」日本実験棟における沸騰二相流実験実施に向けた地上要素試験

九州大学 馬場宗明、酒井崇、澤田健一郎、久保田知里、和田優登、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

宇宙航空研究開発機構 川崎春夫、藤井清澄

IHI 技術開発本部基盤技術研究所 今井良二

Ground Test using BBM for the Experiment of Boiling Two-phase Flow onboard Japanese Experiment Module “KIBO”

*Soumei Baba¹, Takashi Sakai¹, Kenichiro Sawada¹, Chisato Kubota¹, Yuto Wada¹,
Hitoshi Asano², Osamu Kawanami³, Koichi Suzuki⁴, Haruo Kawasaki⁵, Kiyosumi Fujii⁵,
Ryoji Imai⁶, Yasuhisa Shinmoto¹ and Haruhiko Ohta¹*

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

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

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

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

⁵*Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1 Sengen Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8505*

⁶*IHI Corporation, 1 Shinnakahara-chou, Isogo-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 235-8501*

E-Mail: s_baba@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 were proposed to clarify the flow boiling heat transfer phenomena under microgravity conditions. Ground tests by using a Bread Board Model (BBM) were conducted to verify the performance of a heated test section.

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

1. 緒言

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による排熱システム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高い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は単相強制対流による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流体现象および熱伝達特性に対して重力の与える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合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で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、熱流束条件は「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むけた各要素機器の検証を行うために、Bread Board Model (BBM) を製作し、各要素機器の性能および機能の検証試験を行った^[4]。本報では、金属伝熱管を用いて強制流動沸騰実験を行い、熱伝達係数や圧力損失について検討を行った。

2. BBM 試験概要

BBM の概観を Fig.1 に、概略図を Fig.2 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と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。また熱バランスのチェックの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。

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	$q_{liq} = 1 - 100 \text{ kW/m}^2$
Cooling water	$T_{in} = 17^\circ\text{C}, \dot{m} = 45 \text{ kg/h}$

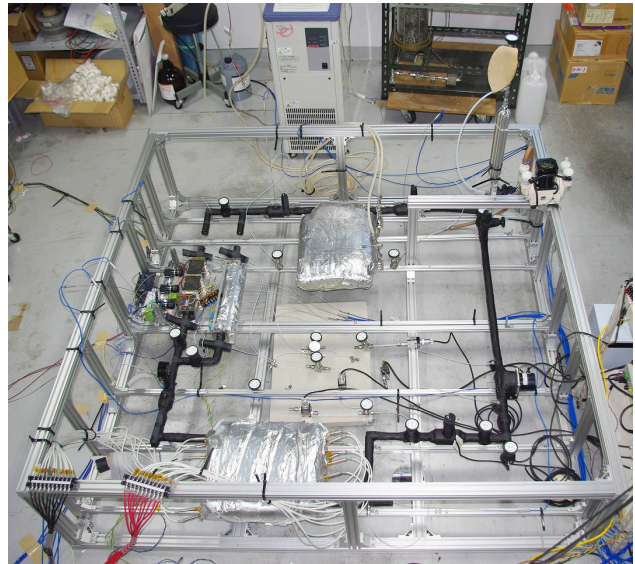


Fig.1 Picture of Bread Board Model.

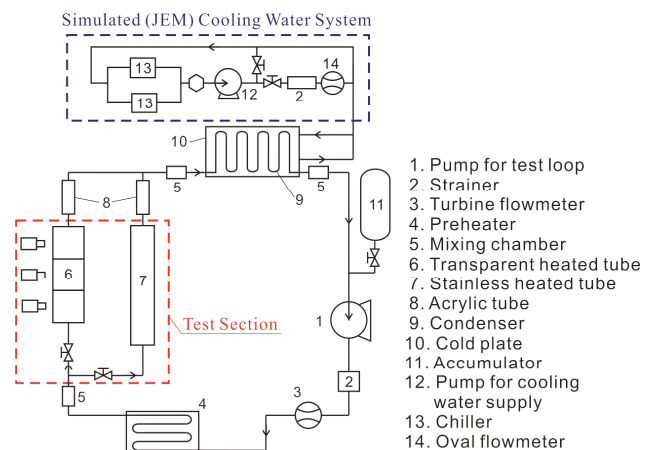


Fig.2 Schematic of Bread Board Model.

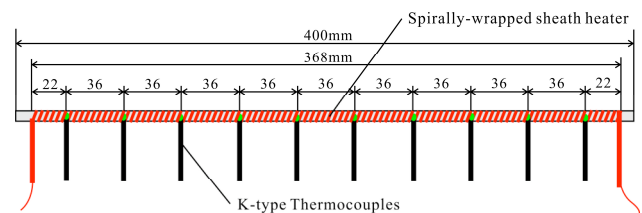


Fig. 3 Schematic of metal heated tube.

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と主に限界熱流束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。その下流には気液流動詳細観察、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おお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.3 に示す。管内径 4mm、肉厚 0.5mm のステンレス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付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ロウ付けされており、軸方向管外壁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。

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

ここに、 q_{liq} : 流体に伝わる実効熱流束、 $T_{w,i}$: 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壁面の熱電対位置間での個々の加熱量に基づく熱バランスから算出した顕熱による温度上昇と、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。実験は水平置き金属伝熱管を用いて、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

Fig.4 にテストセクション入口ー出口間の圧力損失を示す。グラフ中の理論値は摩擦損失に Martinelli-Nelson 相関^[5]を用いて算出している。質量速度 $G=100\text{kg/m}^2\text{s}$ (レイノルズ数 $Re \approx 930$) の条件では実験値は理論値よりおよそ 30%小さくなった。 $G=300\text{kg/m}^2\text{s}$ ($Re \approx 2800$) の条件では付与熱流束が高くなるにつれて沸騰が激しくなり気相速度が増加して層流ー層流の理論値から上昇して乱流ー乱流の理

Table 2 Experimental conditions.

Test fluid	FC72 (deaerated)
Inlet pressure	$P_{in} = 0.11 - 0.14 \text{ MPa}$
Tube inner diameter	$d_i = 4 \text{ mm}$
Mass velocity	$G = 100, 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$
Inlet condition	$\Delta T_{sub,in} = 0, 10 \text{ K}, x_{in} = 0.1$
Heat flux	$q_{liq} = 5 - 30 \text{ kW/m}^2$
Cooling water	$T_{in} = 17^\circ\text{C}, \dot{m} = 45 \text{ kg/h}$

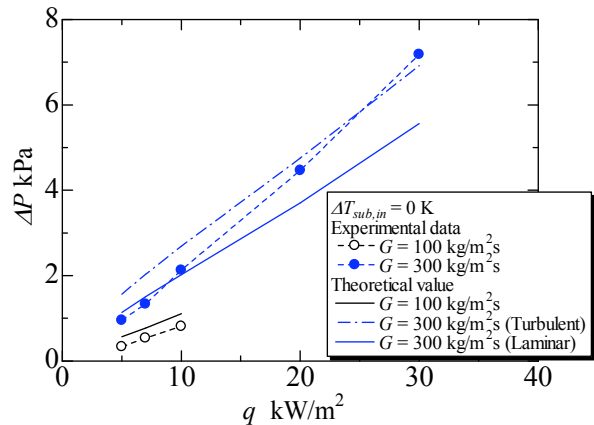


Fig. 4 Pressure drop versus heat flux.

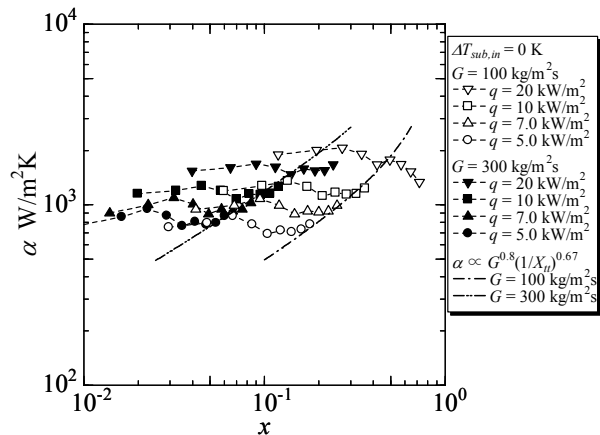


Fig. 5 Heat transfer coefficient versus vapor quality for the same inlet condition $\Delta T_{sub,in} = 0\text{K}$.

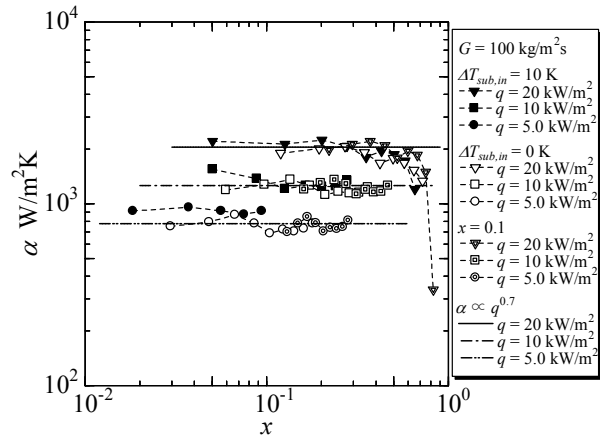


Fig. 6 Heat transfer coefficient versus vapor quality at a constant mass velocity $G = 100\text{kg/m}^2\text{s}$.

論値に近づいているものと考えられる。 $G=300\text{kg/m}^2\text{s}$ の条件でも両相ともに層流と考えられるような低熱流束 ($q=5.0, 7.0\text{ kW/m}^2$) の条件ではやはり実験値は理論値よりおよそ 20%小さくなっている。

乾き度 x に対する熱伝達係数 α の変化を、同一テストセクション入口条件 (入口サブクール度 $\Delta T_{sub,in}=0\text{K}$) および同一質量速度条件 ($G=100\text{kg/m}^2\text{s}$) のそれぞれについて Fig.5 および Fig.6 に示す。Fig.5 より乾き度の増大とともに熱伝達係数が乾き度に依存しない核沸騰域から、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が確認できる。さらに高熱流束付与条件では高乾き度でドライアウトに起因する熱伝達の急激な劣化を生じている。また、核沸騰熱伝達係数が付与熱流束に依存しない傾向が確認できる。以上の傾向は Bao ら^[6]、Huo ら^[7]、Shiferaw ら^[8]が管内径 1.10-4.26mm、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。また、二相強制対流域で熱伝達係数 α と質量速度 G および Lockhart-Martinelli パラメータ X_{tt} の関係は既存の整理式^{[9], [10]}のように $\alpha \propto G^{0.8}(1/X_{tt})^m$ の形で整理でき (本実験では $m=0.67$)、妥当な関係にあると考えられる。また、Fig.6 より同じ質量速度条件では熱伝達係数入口条件 (サブクール度および乾き度) にほぼ依存しないことが確認され、少なくとも図の乾き度範囲ではテストセクション上流部の加熱履歴に熱伝達係数が依存しないことが分かる。さらに核沸騰域の熱伝達係数 α と熱流束 q の関係は $\alpha \propto q^{0.7}$ により $\pm 15\%$ 程度の範囲でまとめ、核沸騰域での熱流束依存性についても妥当であると考えられる。

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 BBM を製作し、地上で強制流動沸騰実験を行った。その結果、金属伝熱管テストセクションにおける圧力損失および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。すなわち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し、再び通常重力下で実験を行えば、微小重力下の熱伝達特性を正確に把握するために十分信頼性のある通常重力下の参照データが得られる見通しを得た。今後は限界熱流束の測定に関する検討を行うとともに軌道上実験を想定した実験パラメータ範囲の検討、安全性の確認などを行う予定である。

謝辞

このプロジェクトの準備に際して、協力していた

いただきました田中耕太郎 (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) 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, 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] T. Oka, Y. Abe, Y.H. Mori, 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, 408-417, 1995.
- [3] H. Ohta, Experiments on Microgravity Boiling Heat Transfer by Using Transparent Heaters, Nuclear Engineering and Design, 175, 167-180, 1997.
- [4] 澤田健一郎, 酒井崇, 馬場宗明, 久保田知里, 新本康久, 大田治彦, 浅野等, 河南治, 鈴木康一, 石塚博弥, 川崎春夫, 藤井清澄, 国際宇宙ステーション「きぼう」での強制流動沸騰実験に向けたBBMの開発, Space Utilization Research, 26, 41-44, 2010.
- [5] Martinelli, R. C., Nelson, D. B., Prediction of Pressure Drop. During Forced-Circulation Boiling of Water, Transactions of the ASME, 70 (1), 695-702, 1948.
- [6] Z.Y. Bao, D.F. Fletcher and B.S. Haynes, Flow Boiling Heat Transfer of Freon R11 and HCFC123 in Narrow Passages, International Journal of Heat and Mass Transfer, 43, 3347-3358, 2000.
- [7] X. Huo, L. Chen, Y.S. Tian, T.G. Karayiannis, Boiling and Regimes in Small diameter Tubes, Applied Thermal Engineering, 24, 1225-1239, 2004.
- [8] D. Shiferaw, T.G. Karayiannis, D.B.R. Kenning, 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.
- [9] Dengler, C.E., J.N. Addoms, Heat transfer mechanism for vaporization of water in vertical tubes. Chemical Engineering Progress Symposium Series, 52 (18) 95-103, 1956.
- [10] Pujol L., Stenning A.H., Effect of Flow Direction on the Boiling Heat Transfer Coefficient in Vertical Tubes," Symp. Ser. Can. Soc. Chem. Eng., 1, 401-453, 1968.