

航空機微小重力実験によるプール沸騰実験の概要と結果

九州大学 小谷優介, 坂田淑乃, 浅田有香, 永安 忠, 新本康久, 大田治彦

兵庫県立大学 河南 治, 宇宙航空研究開発機構 佐藤洋一

ブリュッセル自由大学 Oleg Kabov, Queeckers Patrick, Sergey Chikov

Outline of Pool Boiling Experiment for Nucleate Boiling Heat Transfer by Aircraft Experiment

Yusuke Kotani¹, Yoshino Sakata¹, Yuka Asada¹, Tadashi Nagayasu¹, Yoichi Sato², Yasuhisa Shinmoto¹, Osamu Kawanami³, Haruhiko Ohta¹, Oleg Kabov⁴, Queeckers Patrick⁴, Sergey Chikov⁴

¹Kyushu University, 744 Motoooka, Nishiku, Fukuoka 819-0395,

²JAXA, ³University of Hyogo, ⁴ULB, Belgium

E-Mail: kotani@aero.kyushu-u.ac.jp

Abstract: Investigation of mechanisms in nucleate boiling in microgravity is essential for the development of high efficiency thermal management systems in space. A transparent heating surface with multiple arrays of 88 thin film temperature sensors and mini-heaters was developed for the clarification of boiling heat transfer mechanisms in microgravity through the study of the relation between local heat transfer coefficients and behaviors of liquid microlayer underneath vapor bubbles. Pool boiling experiments in microgravity by ESA parabolic flight campaign were conducted using the heating surface developed, where images of liquid-vapor behaviors and corresponding data of local heat transfer were obtained simultaneously in microgravity. The present paper reports the preliminary analysis of the experimental results.

Key words: boiling, two-phase flow, microgravity, fluid science, parabolic flight

1. 緒言

宇宙構造物の大型化に伴い 取り扱うエネルギー量も増大するため 宇宙用冷却システムの大容量化と高効率化が求められている .そのため潜熱輸送により優れた伝熱特性を示す沸騰熱伝達を宇宙用冷却システムに応用することが期待されている .これまで微小重力下での沸騰熱伝達に関する研究が行われてきたが 重力依存性についての定量的に信頼性のあるデータは得られていない .

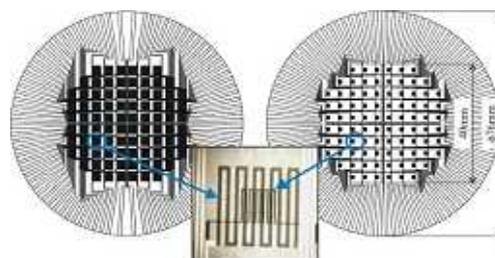
微小重力下における核沸騰では 基本的な気泡構造は地上現象と同じであるが 気泡が伝熱面上から離脱しにくくなり 伝熱面上で気泡が成長し大型化する .そのため微小重力下では 気液界面周辺のマランゴニ対流と気泡底部のマイクロ液膜蒸発が熱伝達を大きく支配する .特に気泡底部のマイクロ液膜分布は時間的・場所的に変化し熱伝達に直接影響するため 伝熱面局所熱伝達とマイクロ液膜挙動との関連性を調査することが微小重力下での核沸騰熱伝達機構の解明に不可欠となる .

そこで本研究では 微小重力下での大型の単一気泡に着目し 其の熱伝達機構^[1]を解明するために これまでの研究^[2]や Kim^[3]らの研究を参考にして 気液挙動観察および局所熱伝達評価が可能な微小重力実験用の透明伝熱面を開発した .この透明伝熱面を用いて地上での予備実験を行い 気泡底部のミ

クロ液膜蒸発による熱伝達促進およびドライパッチ拡大による熱伝達劣化の両効果^{[4],[5]}を計測した^[6] .ここでは 2008 年 11 月に実施した ESA の航空機を利用した微小重力下でのプール沸騰実験について述べる .

2. 透明伝熱面

Fig.1 に使用した透明伝熱面の概観を示す .直径 76 mm ,厚さ 2 mm のサファイアガラスを伝熱面基材とし 其の表面および裏面にそれぞれ 88 個の薄膜温度センサとミニヒータが直接コーティングされている .有効加熱・計測領域は直径 40 mm で微小重力下の大型付着気泡に対応できるサイズとなっており ガラス基材を通して気液挙動の現象観察が可能である .また高熱伝導性の合成サファイア



Mini-heaters (rear side) Temperature sensors (liquid side)

Fig.1 Transparent heating surface.

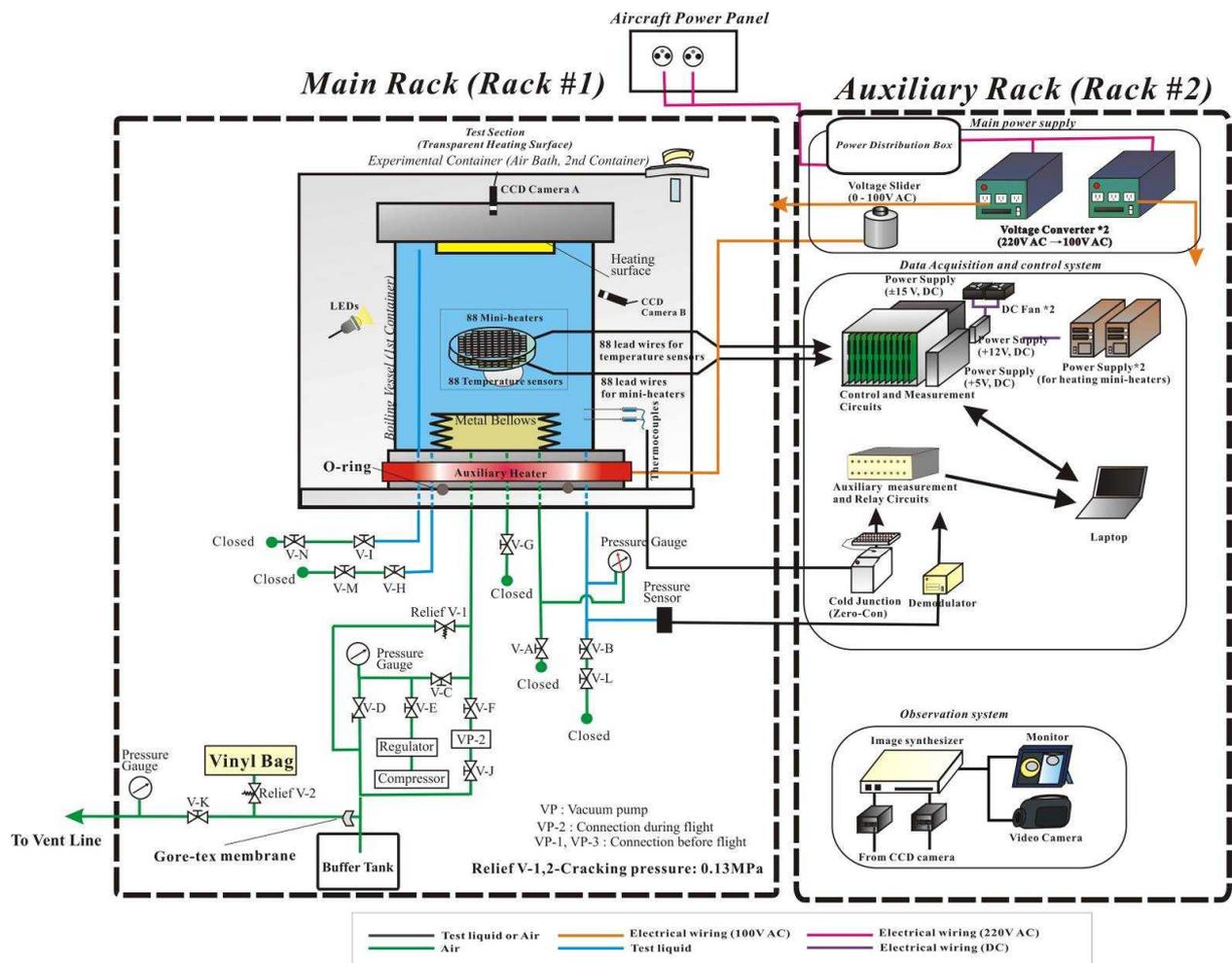


Fig.2 Diagram of experimental setup.

(熱伝導率 $\lambda = 41.8 \text{ W/mK}$) を基材に使用し、裏面加熱形態を採用することで、熱損失の軽減と即応性のある伝熱面加熱が可能である。伝熱面は通常重力下で下向きに取付けられている。Table 1 に温度センサとミニヒータの仕様を示す。

Table1 Specifications of temperature sensor and mini-heater

	Temperature sensor	Mini-heater
Materials	Ti/Pt	Ti/Au
Size	1.3 mm×1.3 mm	3 mm ×3 mm
Thickness	0.1 μm	0.04 μm
Nominal resistance	800 Ω	350 Ω

温度センサは白金薄膜の測温抵抗体であり、その抵抗計測から表面温度を得る。温度センサの温度係数は $0.0012\text{-}0.0013 \text{ K}^{-1}$ である。ミニヒータは金の薄

膜抵抗体であり、直接通電により個々のエレメントで独立した加熱が可能である。この透明伝熱面を用いて、表面温度一定を目標とした加熱条件下において、地上でのプール沸騰実験を行った。この実験より、気液挙動変化に対応した局所熱伝達データの計測が可能であることを確認している。

3. 航空機実験用実験装置

Fig.2 に航空機による微小重力下で使用した沸騰実験装置の概略図を示す。実験装置は2つのラックで構成されている。主ラック#1 は沸騰容器、沸騰容器の圧力調節系、恒温槽で構成され、補助ラック#2 は温度センサとミニヒータの計測・制御系、熱電対、圧力センサ、加速度センサの計測系、観察系および電源系で構成される。Fig.3 に機内に搭載した実験装置の概観を示す。

沸騰容器は内径 120 mm、長さ 260 mm のアクリル円筒とアルミフランジで構成されている。沸騰開始前に蒸気空間を除去し、伝熱面からの沸騰気泡と



Rack#1

Rack#2

Fig.3 Components of Rack#1 and Rack#2.

の干渉を避けるために金属製のベローズが導入されている。また、実験で生じた残留気泡を崩壊させるためにベローズを用いて容器内の液体を加圧し、気泡の凝縮を促進させる。さらに液体の圧力調節も行う。容器内の液体圧力を圧力センサで計測することにより、実験時の液体の飽和温度を求める。液体の予備加熱は下部フランジに設置した補助ヒータで行う。

伝熱面表面の温度センサの温度計測および裏面のミニヒータの加熱は、表面温度が一定になるようにコンピュータによってフィードバック制御される。気液挙動の観察は、沸騰容器上部および側面に設置した2台のCCDカメラで行う。熱電対により液体温度、伝熱面周囲温度を計測し、実験装置に設置した三軸加速度センサにより実験中の重力変動を計測する。実験は伝熱面表面を水平下向きに設置して行う。Table 2 に実験条件を示す。

Table 2 Experimental conditions

Test liquid	FC 72
Pressure range in vessel	$P = 0.06 - 0.1 \text{ MPa}$
saturation temperature	$T_{sat} = 41.0 - 55.0^\circ\text{C}$
Liquid subcooling	$\Delta T_{sub} = 3.0 - 17.0 \text{ K}$
Desired temperature	$T_w = 50.0 - 85.0^\circ\text{C}$

4. ESA パラボリックフライトキャンペーンの概要

開発した透明伝熱面を用いて微小重力下でのブール沸騰実験を行うために、ESA の航空機 A300 によるパラボリックフライトキャンペーンを利用した微小重力実験を行った。このキャンペーンでは、1 回の放物線飛行(パラボラ)で約 20 秒間の微小重力環境が得られる。キャンペーンの概要をまとめたものを Table 3 に示す。

Table 3 Experimental conditions of parabolic flight campaign

Number of parabolas in a flight/day	31 times
Flight days	3 days
Gravity level	$1 g, 2 g, \pm 0.03 g$
Aircraft cabin pressure	0.08 MPa

5. 実験結果

航空機実験によって、微小重力下における経過時間に対する気液挙動の観察画像と局所熱伝達データの分布の推移が得られた。その実験結果の1つである3日目のフライトの23回目(PF23)で得られたデータについて、Table 4 にその実験条件、Fig.4 に伝熱面のセクション1の5つのセンサで観測した温度分布を示す。さらに図内の(a)(b)(c)での伝熱面上部に設置された CCD カメラにより得られた映像を Fig.5 に示す。ここで注目した5つのセンサは Fig.6 のように配列されている。

Table 4 Experimental conditions (PF23)

Pressure range in vessel	$P = 0.082 \text{ MPa}$
Liquid subcooling	$\Delta T_{sub} = 11.0 \text{ K}$
Superheat	$\Delta T_{sat} = 26.0 \text{ K}$
Desired temperature	$T_w = 75.0^\circ\text{C}$

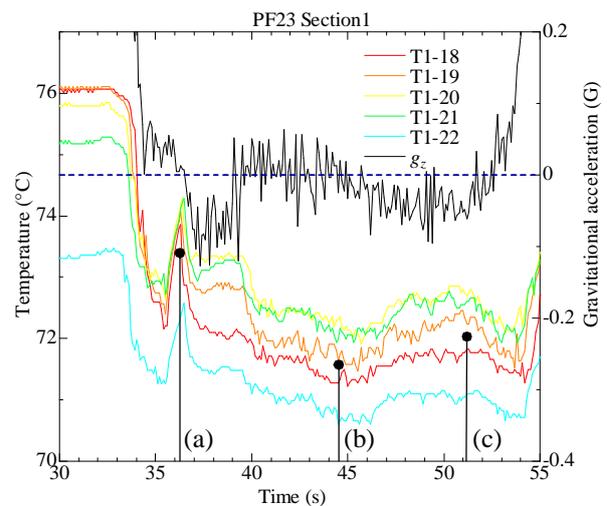


Fig.4 Transition of local surface temperatures (PF23).

Fig.5 (a)の点線で囲われた部分は、 $1 g$ 下から始めた加熱より発生した扁平気泡である。この扁平気泡は41s頃に伝熱面を離脱し、その空間に液体が供給され、その後は Fig.5 (b)や Fig.5 (c)で示した通り小型の気泡の発生が確認できた。

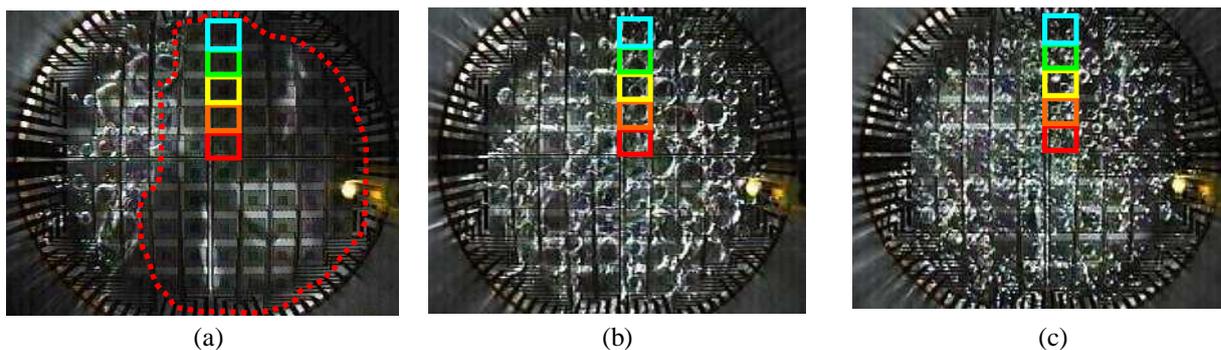


Fig.5 Liquid-vapor behaviors from back side of transparent heating surface (PF23).

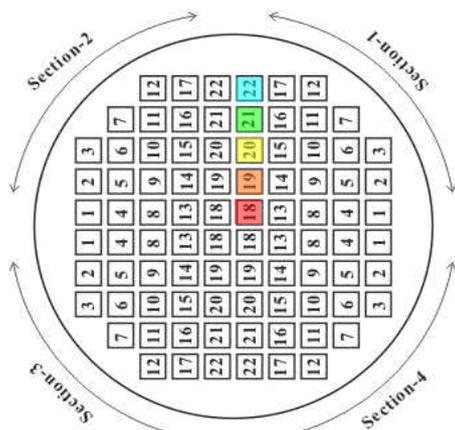


Fig.6 Sensor arrangement.

Fig.5(a)では、Fig.4の温度経過(a)からも明らかに、ドライパッチの拡大により熱伝達が劣化し、伝熱面温度が上昇している。Fig.5(b)では、 $+\mu g$ (プラスの残留重力)により気泡が伝熱面に押し付けられマイクロ液膜が蒸発する。これにより熱伝達が促進され、伝熱面温度が減少している(Fig.4の温度経過(b))。Fig.5(c)では、 $-\mu g$ (マイナスの残留重力)により気泡が離脱し、マイクロ液膜の蒸発効果が減少し、バルク液体への熱伝達が主体となることによって熱伝達が相対的に劣化し、(b)の場合と比較して伝熱面温度が増加している(Fig.4の温度経過(c))。このように温度センサは気泡の挙動を的確に反映していることがわかる。

6. 結言

- (1) 局所熱伝達評価および気液挙動観察が可能な微小重力実験用の透明伝熱面を開発した。
- (2) ESAの安全規約を満たした、航空機による微小重力下核沸騰実験のための実験装置を開発し、それを用いて航空機実験を行った。
- (3) 微小重力下における気泡挙動を反映した局所温度データおよび映像を取得した。

2009年1月に、航空機実験に使用した実験装置を用いた地上での核沸騰実験を予定しており、その結果を踏まえ、異なる重力下での核沸騰熱伝達の機構を定量的にも解明していく予定である。

謝辞

本研究は宇宙環境利用科学委員会研究班ワーキンググループ「微小重力沸騰・二相流研究会」の研究活動の一環として遂行の一部に対して独立行政法人宇宙航空研究開発機構より共同研究経費(HAJK202905)として支援を受けて実施された。JAXAおよび航空機実験機会の提供と実施に関してESA、NOVSPACE、ULBに謝意を表す。

参考文献

- [1] P. Stephan and J. Hammer, "A new model for nucleate boiling heat transfer", *J. Heat Mass Transfer*, 30, 119, 1994.
- [2] H. Ohta, K. Kawasaki, S. Okada, H. Azuma, S. Yoda and T. Nakamura, "On the Heat Transfer Mechanisms in Microgravity Nucleate Boiling", *Adv. Space Res.*, 24, 1325, 1999
- [3] J. Kim, J.F. Benton and D. Wisniewski, "Pool boiling heat transfer on small heaters: effect of gravity and subcooling", *J. Heat Mass Transfer*, 45, 3919, 2002.
- [4] P. Stephan and J. Kern, "Evaluation of heat and mass transfer phenomena in nucleate boiling", *J. Heat Mass Transfer*, 25, 140, 2004.
- [5] C. Sodtke, J. Kern, N. Schweizer and P. Stephan, "High resolution measurements of wall temperature distribution underneath a single vapour bubble under low gravity conditions", *J. Heat Mass Transfer*, 49, 1100, 2006.
- [6] Y. Sato, K. Inoue and H. Ohta, "Development of heating surface for microgravity boiling experiments", *J. Jpn. Soc. Microgravity Appl.*, 24, 71, 2007.