

ESA の航空機を利用した微小重力下のプール沸騰実験

九州大学 赤木翔太、坂田淑乃、吉岡さゆり、永安 忠、新本康久、大田治彦

宇宙航空研究開発機構 佐藤洋一、兵庫県立大学 河南 治

Pool Boiling Experiments in Microgravity Using the Opportunity of ESA Parabolic Flight Campaign

Shota Akagi¹, Yoshino Sakata¹, Sayuri Yoshioka¹, Tadashi Nagayasu¹, Yoichi Sato²,
Yasuhisa Shinmoto¹, Osamu Kawanami³, Haruhiko Ohta¹

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

²JAXA, ³University of Hyogo

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

Abstract: Investigation of mechanisms in nucleate boiling under microgravity condition 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 investigation 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 are planned using the heating surface developed. A description of the experimental setup, methods, conditions and the expected results in the aircraft experiments are presented.

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。とく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、その熱伝達機構^[1]を解明するために、これまでの著者の研究や Kim^[2]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、気泡底部の薄液膜蒸発による熱伝達促進および乾き面拡大による熱伝達劣化の両効果^{[3],[4]}を計測した^[5]。

本報では、2008年3月に予定しているESAの航

空機を利用した微小重力下でのプール沸騰実験の計画、内容、期待される成果などについて述べる。

2. 透明伝熱面

Fig.1 に開発した透明伝熱面の概観を示す。直径 76mm、厚さ 2mm のサファイアガラスを伝熱面基材とし、そ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 40mm で微小重力下で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 ($\lambda=41.8\text{W/mK}$) 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。Table 1 に温度センサとミニヒータの仕様を示す。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

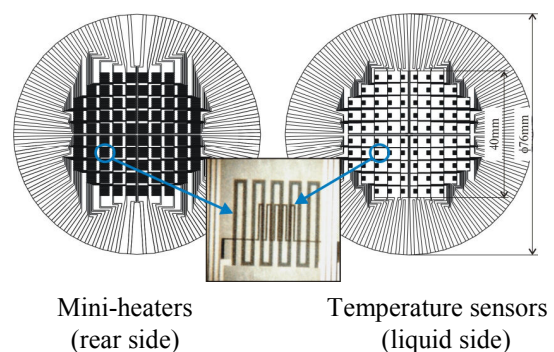


Fig.1 Schematic of transparent heating surface

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、表面温度一定の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、気液挙動変化に応じ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。

微小重力下で、かつ重力ゆらぎが小さい場合には気泡離脱が阻害されるので、気泡サイズが巨大化し、本開発のセンサ配列ピッチでも局所熱伝達の評価が可能と考えられる。

Table 1 Specifications of temperature sensor and mini-heater

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

3. 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プ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計画している。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 2 に示す。

Table 2 Experimental conditions of parabolic flight campaign

Number of parabolas in a flight/day	31 times
Flight days	3 days
Gravity level	1g, 2g, 0.01g
Aircraft cabin pressure	0.08 MPa
Aircraft cabin temperature	18-25 °C
Dimensions of experimental area (L×W×H)	20m×5m×2.3m
Electrical power	220V AC, 50Hz

4. 微小重力下でのプール沸騰実験の計画

Fig.2 に航空機による微小重力下での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、補助ラックは温度センサとミニヒータの計測・制御系、熱伝対、圧力セン

サ、加速度センサの計測系、観察系で構成される。また、航空機の電源は AC 220V(50Hz)であるので、AC 100V の機器を使用するために電圧変換器(1500 VA)を 2 台使用する。Fig.3 に製作した実験装置の概観を示す。

沸騰容器は内径 120mm、長さ 260mm 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、前の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。ベローズ内の圧力を真空ポンプとコンプレッサーで調節することにより、液体の圧力調節を行う。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。この沸騰容器は恒温槽の中に設置されており、容器の加熱を予備ヒータ、冷却をクロスフローファンで行う。

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、アナログ回路を通じてコンピュータのプログラムにより行う。温度センサの表面温度データを裏面のミニヒータにフィードバックさせ、ミニヒータに印加する電圧を調整することにより、表面温度を一定にして実験を行う。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。熱伝対により液体温度、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。試験液体にフロリナート FC72 を使用し、減圧下で実験を行う。Table 3 に実験条件を示す。

Table 3 Experimental conditions

Test liquid	FC72
Pressure range in vessel	$P=0.01\text{--}0.1\text{ MPa}$
Liquid subcooling	$\Delta T_{sub}=0\text{--}15\text{ K}$

5. 解析と期待される結果

航空機実験の実施により、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る。正確な局所熱流束分布を評価するために、サファイアガラス基材内での熱伝導を数値的に解く。このようにして求められた局所熱流束がマイクロ液膜の消費に費やされるとして、液膜表面を飽和温度、液膜底部をガラス基材の表面温度とすることにより、液膜の消費モデルを立てる。このモデルより初期マイクロ液膜厚さの分布が得られる。この結果は、地上の現象も含めて、

6. 結論

- (1) 微小重力下における核沸騰熱伝達機構の解明を目的とした局所熱伝達評価および気液挙動観察が可能な透明伝熱面を開発した。
- (2) ESA の航空機を利用した微小重力下での沸騰実験を計画し、フライト用実験装置を開発した。
- (3) この実験装置を用いて、圧力、液体サブクール度、熱流束分布、伝熱面表面温度分布が適切に設定できることを確認した。

2008 年 3 月に微小重力実験を行うことを予定している。その後、実験結果の解析を行う。

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として位置づけられている。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受託研究経費（HAJJ192904）として支援を受けた。ここに記して、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] 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.
- [3] P. Stephan and J. Kern, “Evaluation of heat and mass transfer phenomena in nucleate boiling”, *J. Heat Mass Transfer*, **25**, 140, 2004.
- [4] 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.
- [5] Y. Sato, K. Inoue and H. Ohta, “Development of heating surface for microgravity boiling experiments”, *J. Jpn. Soc. Microgravity Appl.*, **24**, 71, 2007.