極低温流体強制対流沸騰における重力方向の影響*

The Effect of Gravitational Orientation on Cryogenic Forced Convective Boiling

河 南 治**
KAWANAMI Osamu

西 田 照 男**
NISHIDA Teruo

本 田 逸 郎**
HONDA Itsuro

川 島 陽 介**
KAWASHIMA Yousuke

大 田 治 彦***
OHTA Haruhiko

Abstract We investigated the heat transfer during tube quenching for developing an on-orbit cryogenic fluid management system. This paper describes the experimental results of tube quenching for two flow directions (upflow and downflow) under terrestrial conditions. Liquid nitrogen is used as the test fluid, and it is injected into a transparent heated tube at a mass velocity of 100-300 kg/m²s. The tubes are made of Pyrex glass, and have two kinds of inner diameter (10mm and 13.6mm). The thermal data reveals that the quenching time during which the inner wall temperature became equal to the liquid nitrogen temperature under upflow conditions is less than that under downflow conditions. The flow visualization data reveals that the droplet size and flow derangement under upflow conditions were greater than those under downflow conditions. This flow behavior leads to an increase in the cooling rate of the tube wall under upflow conditions.

Keywords: Cryogenic, Quenching, Forced convective boiling, Gravitational orientation

1. 緒 言

近年、宇宙機器の大型化や高出力化に伴って、総廃熱量の増大や熱輸送距離の増大に対応するため、潜熱輸送を利用できる沸騰二相流体ループの研究・開発が活発に進められている[1]。これらの廃熱システムにおける作動流体は、水、アンモニアやパーフルオロ系冷媒が考えられているため、微小重力に関連した沸騰・二相流研究の対象もこれらの流体がほとんどである（例えば[2,3]）。

一方、現在と将来の宇宙活動を鑑みれば、液体水素、液体酸素、液体ヘリウムなどの極低温流体を軌道上にて管理する技術[4]が重要であることは明白である。LE-5B エンジンなどのロケットエンジン軌道上再着火時における燃料タンク内の流体挙動[5]や、燃料タンクから燃焼室までの移送

管内における管急冷過程[6]など、既に問題視されている現象から、将来の宇宙輸送ネットワーク構想における軌道上燃料ステーションでの流体管理[7]など、微小重力環境における極低温流体の沸騰・二相流現象が関連する事柄は数多い。しかしながら、前述したように、極低温流体を用いた微小重力関連の沸騰・二相流研究は極めて少ない現状にある。特に、流動系沸騰に関しては、Antarらによる航空機実験[8]で流動様式や温度データが報告されているのみで、熱伝達データの報告例は皆無であった。

このような状況の下、著者らは軌道上極低温燃料再補給時や液体ロケットエンジン軌道上再着火時における燃料移送管の熱流動現象を把握する目的で、液体水素を用いた管急冷時の強制対流

* 2006.11.16 受付

** 兵庫県立大学大学院工学研究科機械系工学専攻 〒6701-2201 兵庫県姫路市書写 2167

TEL: (079)267-4844 FAX: (079)267-4844 E-mail: kawanami@eng.u-hyogo.ac.jp

*** 九州大学大学院工学研究院航空宇宙工学部門

沸騰実験を微小重力・地上重力の両環境下にて行い、熱伝達特性や流動挙動に重力の影響が見られること[9]や、流れ方向に対する重力方向が固液接触面（クエンチフロント）の形状と熱伝達に及ぼす影響[10]を明らかにした。さらに、最近、内径 13.6mm の円管を用いた強制対流沸騰実験によって、気液速度差が抑制される下降流においては、高質量流量域（ $350\text{kg/m}^2\text{s}$ 以上）においてフィラメント状の流動様式が見られ、その結果、熱伝達量が上昇流に比べ低くなることも明らかにしている[11]。

本論文では、管急冷現象の熱伝達特性における重力の影響が、管内径によってどのように変化するかを調べるため、液体窒素を用いた強制対流沸騰実験を、2つの円管（内径 10mm と 13.6mm）についてそれぞれ上昇流と下降流の低質量流量域にて実施し、前報[10]での内径 7mm の円管による実験結果と合わせて考察する。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

Table 1 Selected properties of cryogenic liquid at the normal boiling point (101.3 kPa) [12].

Liquid	Normal boiling point (K)	Latent Heat (kJ/kg)	Surface tension (mN/m)	Viscosity ($\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$)	Density (kg/m^3)
Hydrogen	20.27	443	1.930	13.2	1.331
Oxygen	90.81	213	13.2	190	4.470
Helium-4	4.214	20.9	0.093	3.56	16.71
Nitrogen	77.36	199.3	8.75	158	4.609

Fig.1 Experimental system.

本実験では、液体酸素や液体水素を模擬する極低温流体として液体窒素（ LN_2 ）を用いる。Table 1 に示すように、 LN_2 は水などの通常流体と比べて、低沸点、低蒸発潜熱、低気液密度差などの特性が、実用上重要な極低温流体である液体水素、液体酸素、液体ヘリウムなどとよく似ているといえる。実験装置概略図を Fig. 1 に示す。装置構成は LN_2 タンクを大型化（タンク内径 185mm、容量 6L）した以外は前報[10]とほぼ同じであり、窒素ガス（ GN_2 ）タンク、データロガー、CCD カメラ、テストセクションにて構成されている。質量流量を導出するため、 LN_2 タンクには液面計を設置した。

Fig. 2 にテストセクションの詳細図を示す。テストセクションには周りを真空断熱した透明伝熱管が組み込まれ、その両端はテフロンフランジにて固定されている。テストセクションは上下左右がほぼ対称で、透明伝熱管中央を軸として任意の角度に設定できるようになっている。本論文では、上昇流と下降流の2つの流れ方向にて、外

Fig.2 Detailed view of the test section with transparent heated tube.

Fig.3 Relationship between the inner wall temperature and resistance of the thin gold film coated on the inner wall of the tube in the cryogenic temperature region (ID = 13.6mm).

径 12mm / 16mm、内径 10mm / 13.6mm の 2 種類
の透明伝熱管を用いて実験を行った。透明伝熱管
はパイレックスガラスの内壁面に厚さ 10nm オー
ダーの金薄膜をコーティングしたもので、金薄膜
を測温抵抗体として用いると同時に、両端から電
圧を印加することで発熱媒体としても使用でき
る[12]。さらに、金薄膜は非常に薄いため、内部
流体挙動を把握するのに十分な透明性がある。本
研究では金薄膜が発熱しない程度の電圧
(50mVDC) を、透明伝熱管両端の温度計測部(長
さ 150mm) 両端から印加し、管内壁面温度測定
を行った。更に、温度計測部を 50mm 間隔の 3 セ
グメントに分割し、管内壁面の軸方向温度分布を
測定することでクエンチフロント速度の直接計
測を行った。また、各セグメントの管外壁面とテ
ストセクション出入口には K 型熱電対を設置し、
管外壁面温度と出入口における流体温度をそれ
ぞれ測定した。

Fig.4 (a) LN₂ mass velocity measured using the level meter (ID = 13.6mm, ■: $G = 98$ kg/m²s, upflow; ●: $G = 207$ kg/m²s, upflow; ▲: $G = 297$ kg/m²s, upflow; □: $G = 100$ kg/m²s, downflow; ○: $G = 203$ kg/m²s, downflow; △: $G = 292$ kg/m²s, downflow). (b) The value of G versus GN₂ pressure.

Fig. 3 に示すように、各セグメントにおける
温度と管内壁面にコーティングされた金薄膜の
抵抗値の関係は、極低温領域 (77.3~300K) に
おいて、全セグメントともに比例関係にあり、Ohta
らの通常温度領域 (280~330K) における透明伝
熱管の特性[13]と同様であることがわかる。よっ
て、本実験における透明伝熱管の温度測定法・評
価法は Ohta らと同様の方法にて行った。また、
上昇流と下降流ではテストセクションを 180 度
回転させるため、流れ方向に対する各セグメント
の順序はいつも一定であることを付記しておく。

2.2 質量流量測定

本実験における質量流量 G の規定は、LN₂ タン
ク内に設置した液面計で測定した液面の変位か
ら算出した。実験では、テストセクションに流入
する LN₂ の質量流量は、LN₂ タンクを加圧する
GN₂ のガス圧力によって調整される。Fig. 4 (a)
に液面変位から算出した質量流量の時間履歴を
示す。クエンチング開始時や高流量域においては、
質量流量が不安定であるが、上昇流と下降流でほ
ぼ同様の履歴を辿っていることがわかる。本実験
における質量流量は、セグメント 1 にクエンチフ
ロントが生じたとき(図中の矢印で示されたポイ
ント) から実験終了時までの平均と定義した。こ
の流量定義法における設定 GN₂ 圧力と質量流量
の関係を Fig. 4 (b) に示す。質量流量が大き
くするにしたがって定義した質量流量に対する誤
差は大きくなっている。しかし、本研究の目的は、
上昇流と下降流での沸騰熱伝達における重力の
影響を調べることにあるため、Fig. 4 (a) にて示
されたように、定義した質量流量における時間履
歴に大きな違いが無ければ、Fig. 4 (b) の質量流
量誤差は大きな問題ではないといえる。また、液
面計の計測結果は、CCD カメラによる LN₂ タン
ク内液面変動の観測結果と一致している。

2.3 実験方法

はじめに、圧力制御された GN₂ ガスによって、
LN₂ タンクからテストセクション上流に設置さ
れている Bypass に LN₂ を送り込む。Bypass が液
体窒素温度まで冷却された後、3 方向バルブ 3HV1
を切り替え、テストセクションに LN₂ を送り込ん
だ。テストセクション内の透明伝熱管が 300K から
液体窒素温度 (77.3K) まで急冷される間の各
セグメントの管内・外壁面温度、テストセクション
出入口流体温度を、スキャン速度 10Hz にて計

測した。また、流れ方向は重力方向に反する向き（上昇流）と同じ向き（下降流）にて、質量流量は $100 \sim 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ の範囲にて実験を行った。

3. 実験結果および考察

Fig. 5 に質量流量 $100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 、セグメント 2 における管内壁面温度の時間履歴の上昇流と下降

Fig.5 Histories of the inner wall temperature for $G = 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ (at segment 2, ID = 13.6 mm).

Fig.6 Variations in quenching time, t_q , with mass velocity (at segment 2); (a) ID = 10 mm, (b) ID = 13.6 mm.

流の比較を示す。この図から、液体窒素が管内壁面と接するとき、すなわち、温度勾配が急激に変化する変化点である T_q は、下降流のほうが上昇流よりも高い温度であることがわかる。また、管内壁面が液体窒素温度（77.3 K）まで完全に冷却されるまでに要する時間、 t_q は上昇流のほうが早いこともわかった。

次に、質量流量と t_q の関係を Fig. 6 に示す。管内径 10 mm の透明伝熱管における質量流量が $150 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 未満と、管内径 13.6 mm における全質量流領域において、上昇流と下降流の t_q に明確な違いが見られ、いずれも上昇流の t_q が小さくなった。これは、下降流よりも上昇流のほうが、冷却過程が早く進行することを示している。しかし、内径 10 mm において質量流量が $150 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 以上の場合、重力方向の違いによる t_q の違いは見られない。前報における管内径 7 mm での結果では、質量流量が $150 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 以下のとき、上昇流と下降流で t_q の違いは見られなかったことも考慮に入れると、管内径が小さくなるにしたがって、 t_q における重力の影響は小さくなっていくことが明らかとなった。さらに、Fig. 6 の (a) と (b) を比較すると、上昇流の t_q は下降流に比べ、管内径の変化を

Fig.7 Variations in non-dimensional quenching front velocity, U_q/U_{in} , with mass velocity (at segment 2); (a) ID = 10 mm, (b) ID = 13.6 mm.

Fig.8 Boiling curve (at segment 2); (a) $G = 100$ kg/m²s, ID = 10 mm, (b) $G = 300$ kg/m²s, ID = 10 mm, (c) $G = 100$ kg/m²s, ID = 13.6 mm, (d) $G = 300$ kg/m²s, ID = 13.6 mm.

受けにくいこともわかった。

また、各セグメント温度の時間履歴から導出したクエンチフロント速度は、Fig. 7 (Fig. 7 ではクエンチフロント速度 U_q を流入速度 U_m で除した無次元量とした) に示すように全質量流量域において重力の影響を受け、上昇流の速度が速くなっていることがわかる。また、上昇流と下降流における速度差は、管内径が大きくなるほど大きくなっている。前報の結果から、管内径 7mm の場合、上昇流と下降流における速度差が見られなかったことを考慮すると、管内径 10mm における本実験結果は、前述の t_{qt} に比べて重力の影響が強く現れている。つまり、クエンチフロント速度に対する重力影響は、比較的、管内径に大きく依存する傾向にある。一般的に、管内径が小さくなると Bo や We の定義から、気液二相流に対する慣性力や重力に対する表面張力の影響が相対的に大きくなる。すなわち、Fig. 7 の結果は固気液接触界

面であるクエンチフロントが、重力だけでなく、気液速度差の減少や表面張力などの影響を強く受けることを示す結果と考えられる。

Fig. 8 (a) と (c) に管内径 10mm と 13.6mm における低質量流量時、(b) と (d) に管内径 10mm と 13.6mm における高質量流量時のセグメント 2 での沸騰曲線を、また、Fig. 9 に全質量流量域に対する最大熱流束 q_{max} 、最小熱流束 q_{min} の上昇流と下降流の比較を示す。管内径 10mm における質量流量 150 kg/m²s 以下の場合を除いて、 q_{max} は上昇流と下降流による差異はわずかであり、全体的に上昇流のほうがわずかに大きい。それに対し、 q_{min} は上昇流と下降流によって大きく異なり、特に、管内径が 13.6mm の場合に、その差異は大きくなっていることがはっきりとわかる。前報で、管内径 7mm では上昇流と下降流での熱流束の違いは見られなかったことも考慮すると、最小熱流束における重力の影響は、管内径に大きく依存す

Fig.9 Variations in q_{max} and q_{min} with mass velocity (at segment 2); (a) ID = 10mm, (b) ID = 13.6mm.

ることがわかる。管急冷現象での最小熱流束は膜沸騰領域にて生じる。よって、管急冷開始からクエンチフロントが生じるまでの膜沸騰領域における流体挙動を調べるため、CCD カメラによる観測結果を Fig. 10 に示す。Fig. 10 (a) は上昇流、(b) は下降流の場合の質量流量 $105 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 、セグメント 2 における流体挙動である。また、クエンチフロントは静止画では見えにくいいため、図中ではクエンチフロント面にわかりやすく線を引いている。上昇流と下降流の流体挙動を比較すると、上昇流における液滴の大きさが、下降流に比べ大きいのが確認できる。これは、上昇流における管内壁面と液滴間に存在する蒸気膜が、下降流に比べ薄くなることを意味すると考えられる。より詳細に議論するため、Fig. 10 の $t=20\text{s}$ における拡大写真とその模式図を Fig. 11 に示す。上昇流の

Fig.10 Four single frames during tube quenching for $G = 105 \text{ kg/m}^2\text{s}$ (at segment 2, ID = 13.6mm). The quench front line was observed at (a) $t = 28.6 \text{ s}$ and (b) $t = 34.6 \text{ s}$.

場合、壁面のごく近傍に比較的大きな液体の固まり (Liquid Chunk) が確認できる。これは Chung らによる実験 [14] でも確認された流動様式と同様のものであり、Liquid Chunk と管壁面との間には非常に薄い蒸気膜が形成される。また、下降流の場合、Liquid Chunk は確認されなかった。すなわち、上昇流においては Liquid Chunk が存在するため薄い蒸気膜が形成されることで熱伝達が増大し、蒸発が促進する。そのため、液滴飛散が活発化し、液滴同士が合体、液滴径が大きくなると考えられる。

また、上昇流の流れは下降流に比べ、気液速度差が大きくなることから、流れが乱れることも観測された。乱れの増大によっても液滴と管壁面の接触が促進されると考えられる。つまり、上昇流における Liquid Chunk の存在と乱れの増大が、蒸気膜厚の減少および液滴と管壁面の接触を促進することで、最小熱流束やクエンチフロント速度が増大し、管冷却時間が早くなったと考えられる。

4. まとめ

Fig.11 A single frame photograph and a schematic sketch of the structure of the flow at $t = 20$ s for the same conditions of figure 10. (a: upflow, b: downflow)

管急冷現象の熱伝達特性における重力の影響が、管内径によってどのように変化するかを調べるため、液体窒素を用いた強制対流沸騰実験を、2つの円管（内径 10mm と 13.6mm）についてそれぞれ上昇流と下降流の低質量流量域（100～

300kg/m²s）にて実施し、前報での内径 7mm の円管による実験結果と合わせて考察した。その結果、

- 管冷却時間は上昇流のほうが下降流よりも早い。また、上昇流では下降流に比べ、内径変化の影響を受けにくい。
- クエンチフロント速度は上昇流のほうが下降流よりも速い。また、クエンチフロント速度における重力の影響は管冷却時間に比べて、内径変化の影響を受けやすい。
- 最大熱流束は上昇流のほうが下降流よりもわずかに大きい、大きな差異は見られなかった。しかし、最小熱流束は上昇流が下降流よりも明らかに大きくなった。
- 流動観測結果から、上昇流にのみ Liquid Chunk が存在するため、蒸気膜が薄くなり、また、気液速度差が大きくなることによって流れの乱れも大きくなる。この2点が上昇流における熱伝達促進の原因と考えられる。

謝 辞

本研究の一部は（財）マツダ財団の助成を受けた。記して感謝する。

Nomenclature

G	: Mass velocity	$[kg / m^2 s]$
T_q	: Quench temperature	$[K]$
t_{qt}	: Quenching time	$[s]$
q_{max}	: Maximum heat flux	$[W / m^2]$
q_{min}	: Minimum heat flux	$[W / m^2]$
Bo	: Bond number	
We	: Weber number	

参考文献

- [1] 川崎春夫, 今井良二, 塚本貴城, 大久保堅剛, コミュニケーションウィック型エバポレーターの研究開発, 日本マイクログラフィティ応用学会誌, 23, 74-79 (2006).
- [2] J. Straub, Boiling Heat Transfer and Bubble Dynamics in Microgravity, *Advances in Heat Transfer*, 35, 57-172 (2001).
- [3] H. Ohta, Microgravity Heat Transfer in Flow Boiling, *Advances in Heat Transfer*, 37, 1-74 (2003).
- [4] L.J. Hastings, S.P. Tucker and C.F. Huffaker, CFM Technology Needs for Future Space Transportation Systems, *Proc. AIAA/NASA/OAI*

- Conf. on Advanced SEI Technologie.*, AIAA 91-3474 (1991).
- [5] T. Himeno, T. Watanabe and A. Konno, Numerical Analysis of Two-phase Flow Behavior in a Liquid Propellant Tank, AIAA 99-2177 (1999).
- [6] A. Pacros, J. Follet and B. Vieille, Microgravity Activies for The Vinci Engine Re-ignition Capability, *Proc. Microgravity Transport Processes in Fluid, Thermal, Biological and Mateeials Science Conf III*, CD-ROM: MTP-03-34 (2003).
- [7] T. Toru and S. Nakasuka, Fuel Station-based Transportation Network as a Future Space Infrastructure, *Preprints of 43rd Congress of IAF*, IAA-92-0168 (1992).
- [8] B. N. Antar and F. G. Collins, Flow Boiling during Quench in Low Gravity Environment, *Int. J. Microgravity Research and Appl.*, X/3, 118-128 (1997).
- [9] O. Kawanami, T. Hiejima, H. Azuma and H. Ohta, Experimental Study of Cryogenic Forced Convective Boiling under Low Gravity, *Proc. The 6th ASME-JSME Thermal Eng. Joint Conf.*, CD-ROM: TED-AJ03-361 (2003).
- [10] 河南治, 西田照男, 本田逸郎, 川島陽介, 大田治彦, 極低温流体の管急冷現象における重力方向の影響, *日本マイクロ重力ビディ応用学会誌*, 23, 93-98 (2006).
- [11] T. Nishida, O. Kawanami, I. Honda, Y. Kawashima and H. Ohta, The Effects of Gravity on Cryogenic Boiling Heat Transfer during the Tube Quenching at Low Mass Velocity, *Proc. Drop tower Days 2006*, 82-83 (2006).
- [12] Randall F. Barron, *Cryogenic Heat Transfer*, Taylor & Francis (1999).
- [13] Z. H. Ohta, K. Inoue, Y. Yamada, S. Yoshida, H. Fujiyama and S. Ishikura, Microgravity Flow Boiling in a Transparent Tube, *Proc. 4th ASME/JAME Thermal Eng. Conf.*, 547-554 (1995).
- [14] J. N. Chung, Cryogenic Two-Phase Flow and Boiling Heat Transfer During Pipe Chillo down (Invited), *Proc. 37th AIAA Thermophys. Conf.*, AIAA 2004-2175, (2004).