

サブクールされた水道水中における 有限垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達 (第一報: 膜沸騰伝熱特性)

豊田 香¹・島本 貴裕²

要旨：静止した大気圧下の水道水を用いて、有限垂直円柱まわりのサブクール膜沸騰熱伝達について実験を行った。供試円柱の直径および高さは32mmである。供試円柱を電気炉でおよそ560℃に加熱し、サブクール水に深さおよそ150mmまで浸漬し冷却した。膜沸騰実験は、液体のサブクール度 ΔT_{sub} が15Kである水道水をバルク液体とし、10回連続的に行われた。実験回数が増えるに従って、伝熱面過熱度がおおよそ350Kから440Kの範囲において伝熱面平均の熱流束は大きな変化が見られない一方で、膜沸騰下限界点は高い熱流束の値を示すことを明らかにした。

キーワード：膜沸騰，垂直円柱，膜沸騰下限界，水道水

1. はじめに

三次元物体まわりの膜沸騰は金属の焼入れ，材料の製造工程，原子炉の炉心の緊急冷却等で生じる。液体中で冷却される三次元物体まわりの膜沸騰に関して，現象の観察や実験データの蓄積は伝熱のメカニズムを予測するために不可欠である。垂直平板，水平平板，円柱および球など単一伝熱面からの膜沸騰に関しては多くの研究がなされているが，これらの結果を用いても三次元物体まわりの熱伝達を予測することは難しい。

三次元物体まわりの膜沸騰の研究に関しては，水平の上面と底面を有する垂直円柱まわりの飽和膜沸騰熱伝達およびサブクール膜沸騰熱伝達を実験的および解析的に研究されている^{1),2)}が知見がまだ十分でない。また，水道水を冷却剤として使用した場合の膜沸騰状態では伝熱面にスケールが形成されるため，スケールが円柱全表面からの膜沸騰熱伝達に影響を与える可能性が高い。

本研究では，実用的な観点からサブクールされた水道水を使用した伝熱面表面状態を変化させる方法で，円柱全表面からの膜沸騰熱伝達に及ぼすスケールの影響を調べた結果を報告する。

2. 実験装置および実験方法

Fig.1は本研究で使用した実験装置の概略図である。装置は主に沸騰槽，供試円柱加熱装置，昇降装置，温度測定装置および沸騰現象観察装置で構成されている。

- 1 舞鶴工業高等専門学校 機械工学科 准教授
2 舞鶴工業高等専門学校 専攻科 学生

沸騰槽は鉄製で320mm(L)×320mm(W)×450mm(H)の大きさを有する容器である。沸騰槽の2つの側面および底面の中央部に沸騰現象の目視観察や写真およびビデオ撮影ができるように3つの観察窓が設けられている。バルク水には実用上の観点から大気圧下の水道水を用いた。沸騰槽の側面にはバルク水を昇

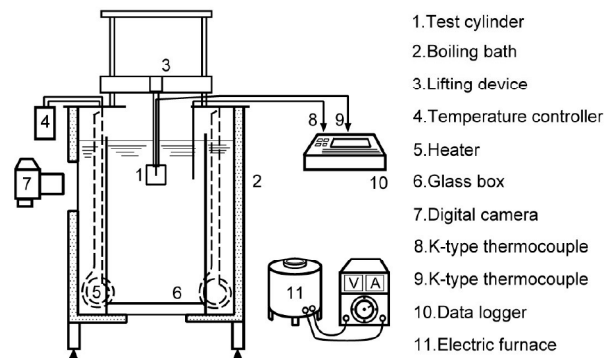


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

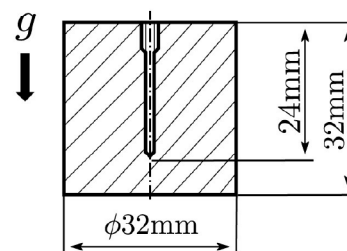


Fig. 2 Test cylinder

温するため 1kW 容量の加熱器を 2 個設置している。この加熱器で発生する気泡が供試円柱周囲のバルク水を乱さないように、沸騰槽の内側に 200mm(L)×250mm(W)×400mm(H)の寸法である透明なガラス箱を設けて二重水槽にしている。実験中のバルク水の温度は温度制御装置によって一定に保たれている。Fig.2は本実験で使用した水平の上面と底面を有する有限垂直円柱の断面図を示したもので、円柱の直径および高さは 32mm である。供試円柱には酸化防止の観点からアルミニウム AL1070 を使用し、供試円柱の伝熱面表面は製作時にだけ鏡面加工を施した。供試円柱の冷却時の温度履歴は、円柱の中心部に円柱上面より 24mm の位置まで挿入されているシース径 1mm の K 型熱電対で測定される。円柱の温度はデータロガーにより 0.2 秒のサンプリング間隔で計測される。供試円柱は垂直の姿勢で電気炉によって約 560 °C まで加熱された後、昇降装置を介して静止した大気圧下のバルク水の水面下約 150mm の深さまで浸漬され冷却される。冷却中の円柱まわりの沸騰の様相観察は目視、ビデオおよび写真撮影により行った。

3. 伝熱面温度と熱流束の測定

供試円柱の材質にはアルミニウムを使用しているが、液体サブクール度が 15K であるとき、ピオー数はおおよそ 0.04 と小さいので、集中定数系の仮定は妥当であると考え、全表面平均の壁面熱流束 q は次式で与えられる。

$$q = -\rho c \frac{V}{A} \left(\frac{dT}{d\tau} \right) \quad (1)$$

ここに、 A は供試円柱の全伝熱面積、 V は体積、 c は比熱、 $dT/d\tau$ は冷却速度および ρ は密度であり、文献 2 を参考に温度依存性を考慮している。本研究では膜沸騰下限界点を冷却速度の絶対値が急激に増加するまえ付近で最小となる点と定め、その時の過熱度 ΔT_{\min} と熱流束 q_{\min} をそれぞれ次式のように評価する。

$$\Delta T_{\min} = (T - T_{\text{sat}}) \Big|_{\frac{dT}{d\tau} \Big|_{\min}} \quad (2)$$

$$q_{\min} = -\rho c \frac{V}{A} \frac{dT}{d\tau} \Big|_{\min} \quad (3)$$

ここに、 T は伝熱面温度、 T_{sat} はバルク水の飽和温度である。

4. 膜沸騰の様相

供試円柱まわりに形成される蒸気膜の様相を、第一回目の実験を例に取り Fig.3 に示す。Fig.3 にパラメータとして示す τ は経過時間、 ΔT_{sat} は伝熱面過熱度(円柱温度−バルク水の飽和温度)であり、液体

サブクール度 $\Delta T_{\text{sat}}=15\text{K}$ の場合である。なお、経過時間 τ の始点を揃えるため、 $\Delta T_{\text{sat}}=440\text{K}$ のとき $\tau=0$ とした。

Fig.3(a) から Fig.3(d) に示すように浸漬直後でも円柱まわりの沸騰の様相は穏やかであり、蒸気膜の界面の乱れも少ない。円柱底面およびそれに接続される円柱側面は概ね平滑な界面状態にあり、安定した薄い蒸気膜で覆われている。一方で円柱の上面および円柱側面の垂直部分上端側の界面は波状になっている。底面で発生した蒸気は側面に沿って上昇する。浸漬直後から 11 秒に至る沸騰の様相に大きな変化は見られず、円柱の底面および側面は安定で薄い蒸気膜で覆われ概ね平滑な界面状態にある。浸漬後 13 秒から 25 秒では、本実験範囲における低伝熱面過熱度域となるが、円柱底面に形成される蒸気膜は、Fig.3(k) から Fig.3(o) に示すように、その厚さが厚くなったり薄くなったりを繰り返す。蒸気膜の崩壊に至る。この蒸気膜厚さが厚くなったり薄くなったりを繰り返す周期は一定値では無い。Fig.3(p) は垂直円柱側面の下端部から蒸気膜の崩壊が始まった瞬間を捉えたもので、局所的な蒸気膜の崩壊は円柱の全表面に短い時間で伝播する。

5. 結果と考察

5.1 冷却曲線および冷却速度曲線

Fig.4 は供試円柱を 15K でサブクールされた水道水中へ浸漬し冷却した場合の円柱中心部の温度と経過時間の関係を示した冷却曲線および冷却速度曲線の一例である。横軸に示した τ および縦軸に示した T はそれぞれ経過時間および円柱中心部の温度を示している。図中の各曲線上に示した ● 記号は膜沸騰の下限界を示している。

Fig.5 は実験回数をパラメータとして、供試円柱を 15K でサブクールされた水中へ浸漬冷却した場合の円柱中心部の温度と経過時間の関係を示している。横軸の τ および縦軸の T はそれぞれ浸漬からの経過時間および供試円柱の中心温度である。図中の各曲線上には ● 印で膜沸騰下限界点を表した。実験回数が増えるにしたがって、伝熱面表面に付着するスケールは多くなると考えられるが、冷却曲線の傾きにおいて実験回数が増えても大きな変化は見られない。レーザー顕微鏡を用いて、供試円柱底面端部付近の表面粗さを計測したところ、鏡面加工した伝熱面ではおおよそ 0.147Ra であったのに対し 10 回焼入実験した伝熱面ではおおよそ 0.300Ra であり、表面粗さは増加していることが確認された。これらのことから膜沸騰領域において伝熱面表面に付着するスケールは薄いため冷却速度に大きな影響を与えないことがわかる。

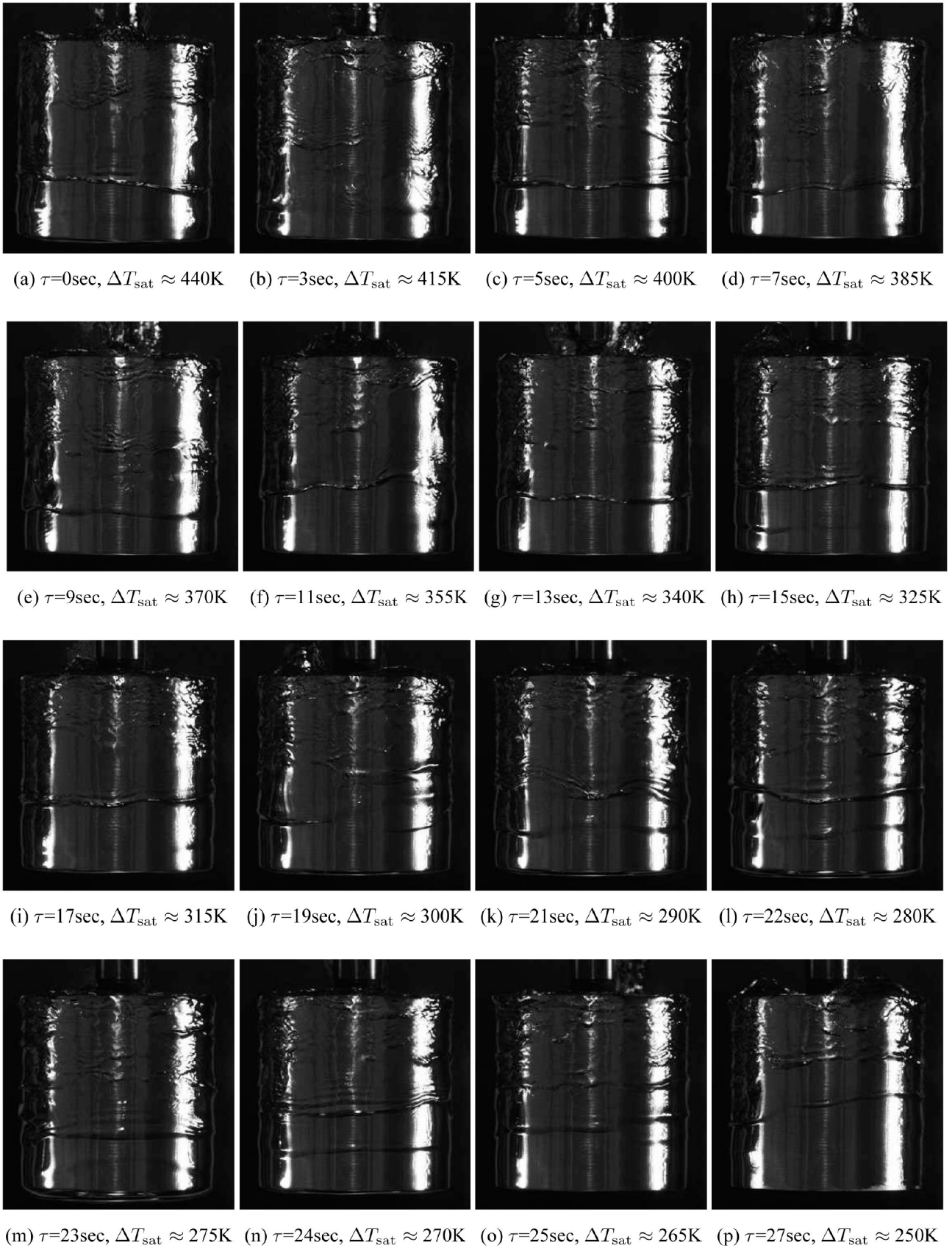


Fig. 3 Photographs of film boiling around a vertical cylinder for $\Delta T_{\text{sub}}=15\text{K}$

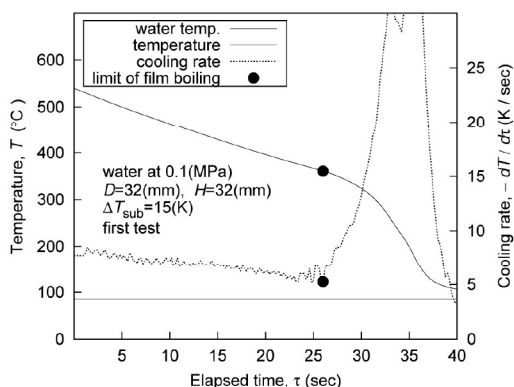


Fig. 4 Cooling curve and cooling rate

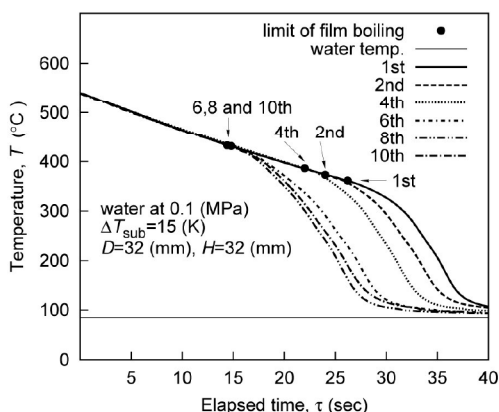


Fig. 5 Cooling curves

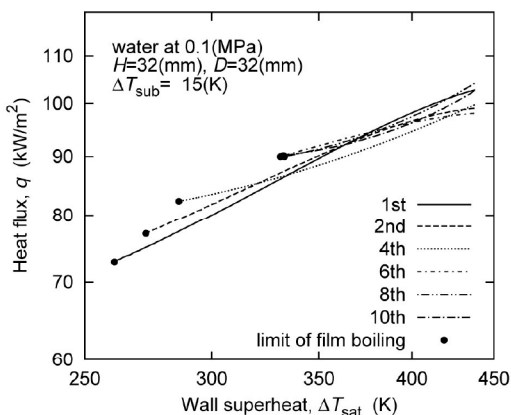


Fig. 6 Boiling curves

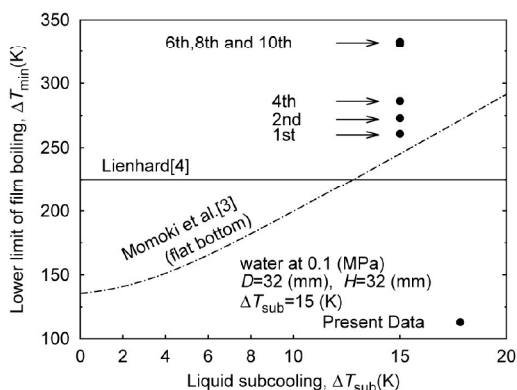


Fig. 7 Effect of run number on ΔT_{min}

5.2 膜沸騰領域の沸騰曲線

Fig.6は膜沸騰領域の沸騰曲線を、実験の順番をパラメータとして示したもので、第1回目、第2回目、第4回目、第6回目、第8回目および第10回目の計測結果を使用し式(1)より求めたものである。この図より、伝熱面表面を実験毎に鏡面加工せず実験回数が増加しても、伝熱面過熱度 ΔT_{sat} がおおよそ440Kから350Kの範囲において伝熱面平均の熱流束 q に大きな変化は見られない。 ΔT_{sat} が400Kのとき第2回目、第4回目、第6回目、第8回目および第10回目の熱流束の値は第1回目の値に比べてそれぞれ2%、4%、2%、1%および2%程度高い。膜沸騰下限界は実験回数が増加するに従って高い伝熱面過熱度および熱流束の領域に移動することがわかる。

6. 膜沸騰下限界点

Fig.7は膜沸騰下限界点の伝熱面過熱度 ΔT_{min} と液体サブクール度 ΔT_{sub} の関係を示したものである。この図にはイオン交換水をバルク液体として銀製垂直円柱によって得られた実験結果³⁾も合わせて示している。●印で示した本実験結果は実験回数に強く依存し、実験回数が増えるに従って増大している。第一回目の実験結果は、供試円柱の伝熱面表面は鏡面加工された状態であるが、イオン交換水をバルク液体として銀製垂直円柱によって得られた実験結果と比べておおよそ8K高い。また、これらの値はLienhard⁴⁾が示す水の伝熱面過熱度の熱力学的下限界225Kを超えている。これらの原因として、液体の流れ、蒸気膜内の蒸気の流れ、蒸気膜の形状や伝熱面性状などの影響が挙げられるが、蒸気膜崩壊のメカニズム解明についてさらなる研究が必要である。

7. おわりに

実用上の観点から、アルミ製有限垂直円柱をサブクールされた大気圧下の静止した水道水に浸漬して冷却する方法で膜沸騰熱伝達の伝熱特性を調べ以下ことが明らかになった。

1. 本実験範囲における低伝熱面過熱度域において、円柱底面に形成される蒸気膜は、厚くなる薄くなるを繰り返す、垂直円柱側面の下端部から蒸気膜の崩壊が起こる。
2. 伝熱面平均の熱流束は、伝熱面過熱度が350Kから440Kの領域において、同様の傾向を示す。一方で、実験回数を重ねると、膜沸騰下限界点は高い伝熱面過熱度および熱流束に推移する。
3. 膜沸騰下限界点に関して、第一回目の実験結果はイオン交換水をバルク液体として銀製垂

直円柱によって得られた実験結果と比べておよそ8K高い。

謝辞: 本研究は舞鶴工業高等専門学校機械工学科奨励研究費の補助を受けて行われた。関係各位に謝意を表す。

参考文献:

- 1) 山田ほか4名: 有限下向き水平面の膜沸騰熱伝達に及ぼす液体サブクール度の影響, 日本機械学会論文集(B編), 64

巻, 628号, pp.4159-4165, 1998.

- 2) 山田ほか4名: 有限長の垂直円柱まわりのサブクール膜沸騰熱伝達, 日本機械学会論文集(B編), 73巻, 732号, pp.1715-1722, 2007.
- 3) 桃木ほか4名: 有限垂直円柱の膜沸騰下限界温度に及ぼす円柱底面形状の影響, 日本機械学会[No.12-11], 第17回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, B-101, pp.47-48, 2012.
- 4) J. H. Lienhard: Corresponding States Correlations of the Spinodal and Homogeneous Nucleations Limits, ASME J. Heat Transfer, Vol104, pp.379-381, 1982.

(2013.12.9受付)

FILM BOILING HEAT TRANSFER AROUND A VERTICAL FINITE-LENGTH CYLINDER TO SUBCOOLED TAP WATER (FIRST REPORT)

Kaoru TOYODA and Takahiro SHIMAMOTO

ABSTRACT: Quenching experiments on film boiling heat transfer around a vertical finite-length aluminum cylinder to subcooled tap water were carried out to clarify the cooling characteristics and examine the effect of scale on film boiling. The diameter and length of the test cylinder are 32 mm and 32 mm, respectively. The test cylinder was heated to about 560 degrees C in an electric furnace and then cooled in subcooled water with an submersion depth of 150mm. The test in experiments is repeated ten times in subcooled tap water with a liquid subcooling of 15 K. The wall superheat at the lower limit of film boiling is affected by test run numbers and becomes larger as the test run number increases, while the film boiling curves show similar tendency in the region from 350K to 440 K of wall superheat even after tenth test run.

Key Words: *Film boiling, Vertical cylinder, Lower limit of film boiling, Tap water*