

半球状の凸底面を有するアルミニウム有限垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達の実験

山田 崚*・荒木憲一**・茂地 徹*・豊田 香***・桃木 悟**・山口朝彦*

Experiments on Film Boiling Heat Transfer around a Vertical Finite-Length Aluminum Cylinder with Convex Hemispherical Bottom

by

Takashi YAMADA*, Kenichi ARAKI**, Toru SHIGECHI*
Kaoru TOYODA***, Satoru MOMOKI** and Tomohiko YAMAGUCHI*

The film boiling heat transfer around a vertical finite-length aluminum cylinder with convex hemispherical bottom was investigated experimentally for quiescent water at atmospheric pressure. The experiments have been carried out by a transient method, i.e., quenching method. The diameter of test cylinder is 32mm and the total length is 48mm with 32mm length of vertical lateral part. The test cylinder was heated to about 560 °C in an electric furnace and then cooled in saturated and subcooled water with the immersion depth of about 100mm. The degree of liquid subcooling was varied from 0 to 30K. The film boiling heat transfer increased in terms of heat flux by 230% with an increase 30K in liquid subcooling at the wall superheating of 300K. The wall superheating and heat flux at the lower limit of film boiling increased with an increase in liquid subcooling. Further, the experimental results for an aluminum cylinder were compared with those for a silver cylinder.

Key Words : *Film Boiling, Vertical Cylinder, Convex Hemispherical Bottom, Aluminum*

1. まえがき

金属の焼入れ, 材料の製造工程, 原子炉の炉芯の緊急冷却等で生じる3次元高温物体まわりの膜沸騰に関して, 伝熱のメカニズムを明らかにし熱伝達特性を予測するためには, 物体まわりに形成される蒸気膜の観察や実験データの蓄積が不可欠である。著者らはこれまでに大気圧下の水を用いて飽和およびサブクール状態で, 円柱の形状として, (1) 底面と上面が水平な円柱^{1~2)}, (2) 底面が半球状の凸面で上面が水平な円柱^{3~6)}, (3) 底面が水平で上面が半球状の凸面の円柱⁷⁾および(4) 底面と上面が半球状の凸面を有する円柱⁸⁾を用いて実験を行い, 銀製の有限垂直円柱まわりの膜沸騰現象の詳細な観察と実験データの蓄積を図る

と共に前述の(1)と(2)の形状を有する円柱に対しては理論的検討を行い, 壁面熱流束の測定値を±15%以内で関連できる伝熱整理式を作成している^{1,2,4~6)}。

これまでの研究では供試円柱の材質として金属の中で最も熱伝導率が高い銀[20 °Cの純銀 427W/(m·K)]を用いていたが, 供試円柱の製作費が非常に高価となることから, 本研究では, 供試円柱の材質に安価なアルミニウムを用いることを試みた。アルミニウムの熱伝導率は温度 20 °C において銀に比べて 48%[204W/(m·K)]で, アルミニウムの融点(660 °C)が銀(960 °C)より低いため供試円柱の加熱上限温度を下げる必要があるが, 供試円柱加熱時の円柱表面の酸化による冷却曲線の再現性に及ぼす影響は無視できる。

平成22年6月21日受理

* 機械システム工学講座 (Department of Mechanical Systems Engineering)

** 生産科学研究科 (Graduate School of Science and Technology)

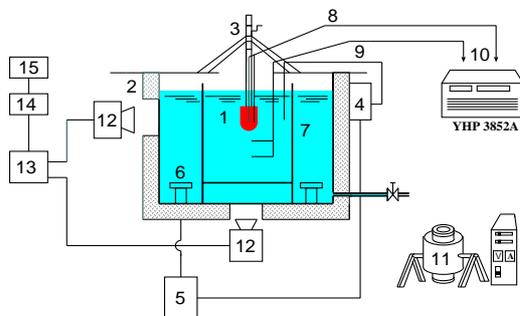
*** 舞鶴工業高等専門学校 (Maizuru National College of Technology)

本研究では、供試円柱の形状として円柱の底面が半球状の凸面で上面が水平なものを用いて、アルミニウム製の有限垂直円柱まわりの飽和並びにサブクール膜沸騰の伝熱特性を得るために円柱の軸中心に挿入された一本の熱電対から取得された冷却曲線の測定値が、銀製の円柱の場合と同等の特性を示すかどうかを検証するため、熱伝導率の大きい銀製の有限垂直円柱まわりの冷却曲線および伝熱特性の測定値^{3~6)}と比較検討したのでその結果について報告する。また、膜沸騰の下限界点における伝熱面過熱度と壁面熱流束の測定値についても比較検討を行った。

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から構成されている。沸騰槽は、450mm(L)×450mm(W)×750mm(H)の内寸法を有する直方体のステンレス製容器である。沸騰槽の側面および底面のそれぞれ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4つの観察窓が設けられている。沸騰槽の底面のコーナー付近に実験水(大気圧下のイオン交換水)を昇温させるため2kW容量の浸漬型加熱器を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水を乱さないように、供試円柱の周囲に300mm(L)×300mm(W)×600mm(H)の透明なガラス箱を設けて二重水槽にしている。実験中の水温は温度制御装置によって一定に保たれる。

Fig.2は本実験で使用したアルミニウム供試円柱の断面図を示したもので、供試円柱の直径 D は32mm、全長 L_T は48mm、円柱の垂直部分の長さ L は32mmである。この供試円柱の底面は直径32mmの半球状に加工されている。前述したようにアルミニウムは銀に比べて熱伝導率が48%小さいので、供試円柱が冷却される過程で円柱内部の温度の均一性を検証するため、



1. Test cylinder 2. Boiling bath 3. Lifting device
4. Temperature controller 5. Power controller
6. Heater 7. Glass box 8. K-type thermocouple
9. K-type thermocouple 10. Data acquisition/control unit
11. Video camera 12. Video cassette recorder
13. Video cassette recorder 14. Digital AV mixer
15. Video monitor

Fig.1 Schematic of experimental apparatus

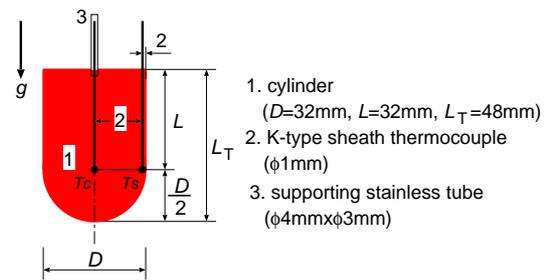


Fig.2 Test cylinder

Fig.2に示すように円柱の中心温度 T_c と側面近傍温度 T_s の測定を試みた。温度は、円柱の軸心と側面の表面より2mm内側で上面よりそれぞれ32mmの深さの所で測定され、シース径1mmのK型熱電対を用いて横河・ヒューレット・パッカード(株)製のデータ集録/制御ユニット(YHP3852A)により0.5秒のサンプリング間隔で計測される。

実験前の表面条件を一定にするために供試円柱表面に金属研磨材を塗り、パフ研磨にて鏡面仕上げし、アルコールで洗浄した。供試円柱は垂直の姿勢でシリコン電炉によって約560℃まで一様に加熱された後、昇降装置を介して静止した大気圧下の水中へ供試円柱の凸底面の底部の位置が水面より100mmの深さとなるまで静かに浸漬される。温度計測の開始時刻($\tau=0$ 秒)は供試円柱が完全に停止した時と定めている。なお、冷却中の垂直円柱まわりの沸騰の様相を目視、高速ビデオおよび写真撮影により観察した。

3. 伝熱面温度の定義

供試円柱の材質には熱伝導率が銀より小さいアルミニウムを用いているため、Fig.2に示すように円柱の2ヶ所の位置にK型シース熱電対を挿入し、円柱の中心温度 T_c と側面近傍温度 T_s の測定を行い、両者の温度差($T_c - T_s$)を精査したところ、飽和膜沸騰($\Delta T_{sub}=0K$)では、Fig.3に示すように計測開始時刻($\tau=0$ 秒)で温度差($T_c - T_s$)は水面下100mmまで供試円柱を下降させる間の円柱表面の冷却により5Kと大きい、膜沸騰が安定している領域では1~2Kである。一方、液体サブクール度 $\Delta T_{sub}=20K$ の場合には、Fig.5に示すように温度差($T_c - T_s$)は5~6K程度である。しかし、この程度の温度差は生じているが、両者の過渡履歴温度に基づく沸騰曲線の差は、液体サブクール度0Kで3%、液体サブクール度20Kで2%程度(Fig.11参照)であるため、本研究では伝熱面温度 T として、円柱の軸中心温度 T_c を採用する。

4. 壁面熱流束の算定

供試円柱の材質にはアルミニウムを使用しているが、膜沸騰時のピオー数が飽和膜沸騰では0.03以下、

半球状の凸底面を有するアルミニウム有限垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達の実験



(a) $\tau=0\text{sec}$, $T_c=556\text{ }^\circ\text{C}$, $T_s=551\text{ }^\circ\text{C}$ (b) $\tau=50\text{sec}$, $T_c=354\text{ }^\circ\text{C}$, $T_s=352\text{ }^\circ\text{C}$ (c) $\tau=65\text{sec}$, $T_c=309\text{ }^\circ\text{C}$, $T_s=307\text{ }^\circ\text{C}$



(d) $\tau=85\text{sec}$, $T_c=258\text{ }^\circ\text{C}$, $T_s=257\text{ }^\circ\text{C}$ (e) $\tau=90\text{sec}$, $T_c=247\text{ }^\circ\text{C}$, $T_s=245\text{ }^\circ\text{C}$ (f) $\tau=95\text{sec}$, $T_c=231\text{ }^\circ\text{C}$, $T_s=228\text{ }^\circ\text{C}$

Fig.3 Photographs of film boiling around a vertical aluminum cylinder for $\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$

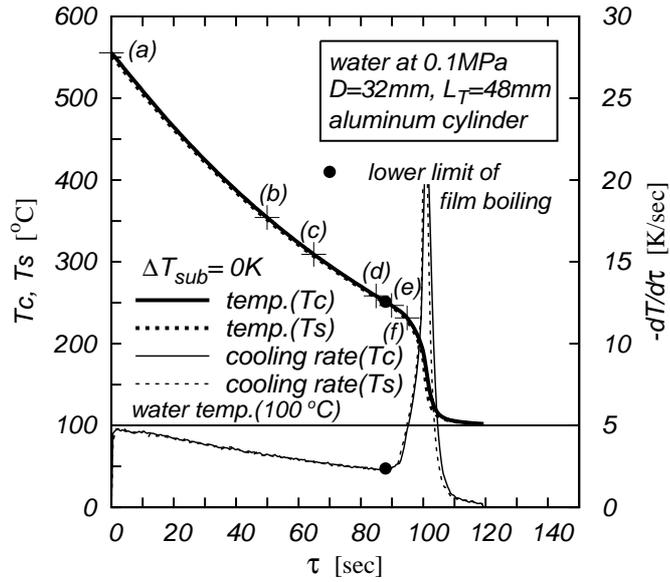


Fig.4 Cooling and cooling rate curves for $\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$

山田 暲 · 荒木 憲一 · 茂地 徹 · 豊田 香 · 桃木 悟 · 山口 朝彦



(a) $\tau=0\text{sec}$, $T_c=560\text{ }^\circ\text{C}$, $T_s=554\text{ }^\circ\text{C}$ (b) $\tau=9\text{sec}$, $T_c=488\text{ }^\circ\text{C}$, $T_s=482\text{ }^\circ\text{C}$ (c) $\tau=12\text{sec}$, $T_c=464\text{ }^\circ\text{C}$, $T_s=458\text{ }^\circ\text{C}$



(d) $\tau=15\text{sec}$, $T_c=445\text{ }^\circ\text{C}$, $T_s=439\text{ }^\circ\text{C}$ (e) $\tau=18\text{sec}$, $T_c=420\text{ }^\circ\text{C}$, $T_s=413\text{ }^\circ\text{C}$ (f) $\tau=30\text{sec}$, $T_c=339\text{ }^\circ\text{C}$, $T_s=335\text{ }^\circ\text{C}$

Fig.5 Photographs of film boiling around a vertical aluminum cylinder for $\Delta T_{\text{sub}}=20\text{K}$

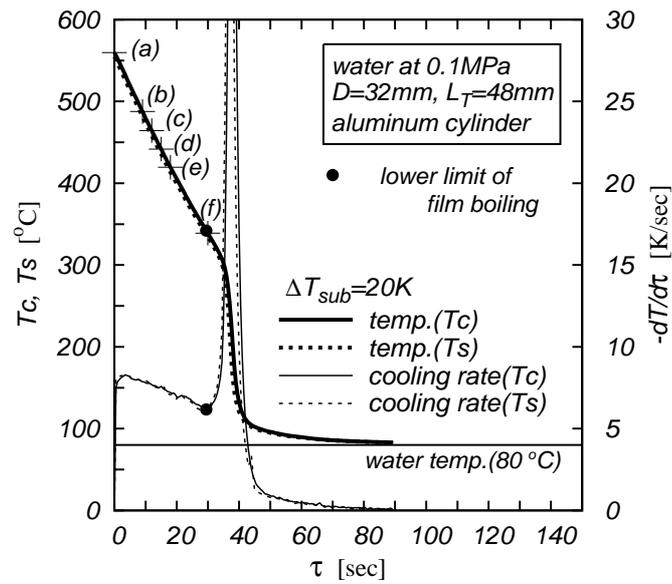


Fig.6 Cooling and cooling rate curves for $\Delta T_{\text{sub}}=20\text{K}$

半球状の凸底面を有するアルミニウム有限垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達の実験

サブクール膜沸騰では 0.065 以下と小さいので、集中定数系の仮定は妥当なものであると考えると、全表面平均の壁面熱流束 q は次式によって与えられる。

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

ここに、 c は比熱 (905 J/(kg·K))、 ρ は密度 (2688 kg/m³)、 $dT/d\tau$ は円柱軸中心温度 T_c に基づく冷却速度である。また、 A は供試円柱の全伝熱面積、 V は体積で次式で与えられる。

$$A = \frac{3}{4}\pi D^2 + \pi DL \quad (2)$$

$$V = \frac{1}{12}\pi D^2(3L + D) \quad (3)$$

ちなみに、単位体積あたりの熱容量 ρc は 2.43×10^6 J/(m³·K)、供試円柱の体積と全伝熱面積の比 V/A は 6.09 mm である。

本研究では膜沸騰下限界点を冷却速度 $dT/d\tau$ が最小となる点と定め、そのときの伝熱面過熱度 ΔT_{\min} と壁面熱流束 q_{\min} をそれぞれ次式のように評価する。

$$\Delta T_{\min} = (T - T_{\text{sat}}) \Big|_{\frac{dT}{d\tau} \Big|_{\min}} \quad (4)$$

$$q_{\min} = -\rho c \frac{V}{A} \frac{dT}{d\tau} \Big|_{\min} \quad (5)$$

ここに、 T は伝熱面温度 (円柱中心温度 T_c)、 T_{sat} は実験水の飽和温度である。

5. 膜沸騰の様相

半球状の凸底面を有するアルミニウム有限垂直円柱の表面に形成される蒸気膜の形成から崩壊に至る沸騰の様相を Fig.3 および Fig.5 に示す。Fig.3 は飽和膜沸騰 ($\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$) の場合で、Fig.5 はサブクール膜沸騰 ($\Delta T_{\text{sub}}=20\text{K}$) の場合であるが、ここに示す ΔT_{sub} は液体サブクール度で、水の飽和温度 T_{sat} と実験水の温度 T_{∞} との差 ($\Delta T_{\text{sub}}=T_{\text{sat}}-T_{\infty}$) として与えられる。また、Fig.3 および Fig.5 にパラメータとして示す τ は冷却経過時間、 T_c は円柱中心温度、 T_s は円柱側面近傍温度である。これらの蒸気膜の写真観察結果から以下のことが明らかになった。Fig.3 に示す飽和膜沸騰 ($\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$) の場合、浸漬後約 65 秒間にわたる伝熱面温度が 310 °C 以上の温度領域では Fig.3(a)、Fig.3(b) および Fig.3(c) のように、円柱全面を覆う蒸気膜は厚く不安定で気液界面はおおきな脈動を伴った乱れた状態にある。Fig.3(d) は浸漬して 85 秒経過した時の蒸気膜崩壊前の伝熱面温度が約 260 °C の様相で、蒸気膜崩壊直前 (蒸気膜崩壊温度 237 °C) になると半球状の凸底面および凸底面に滑らかに接続される垂直面下端側に形成される蒸気膜の気液界面は平滑な界面となってい

るが、半球状の凸上面を含む垂直面の上端側の気液界面は乱れた様相を呈している。Fig.3(e) と Fig.3(f) は蒸気膜崩壊後の伝熱面温度が約 245 °C と約 230 °C の様相で、その後、核沸騰へ移行する。本実験で使用したアルミニウム供試円柱に対する蒸気膜崩壊の起点は垂直円柱上端部の角の部分で、蒸気膜の崩壊は円柱全面に齊時的に伝播する。

一方、Fig.5 に示すサブクール膜沸騰 ($\Delta T_{\text{sub}}=20\text{K}$) の場合には、Fig.3 に示した飽和膜沸騰の様相とは顕著に異なっていることが Fig.3(a) と Fig.5(a) の伝熱面温度がほぼ同じ 556 °C と 560 °C の観察結果から明らかである。これは実験水が 80 °C のサブクール水の場合には、飽和水に比べて伝熱面まわりで形成される蒸気量が少なくなるためである。従って、サブクール膜沸騰では、Fig.5(a) の浸漬直後の膜沸騰の様相写真から円柱の全表面を覆う蒸気膜の気液界面の乱れは少なく、半球状の凸底面では平滑な界面状態にあり、安定した蒸気膜が形成されることがわかる。しかし、半球状の凸底面と滑らかに接続される垂直面および半球状の凸上面に形成される蒸気膜の気液界面は波状界面になっている。浸漬後 9 秒 [Fig.5(b)] から 18 秒 [Fig.5(e)] までは膜沸騰の様相に大きな変化は見られず、半球状の凸底面および凸底面に接続される垂直面下端側は平滑な界面となっている。Fig.5(f) は浸漬して 30 秒経過した伝熱面温度約 340 °C の様相で、半球状の凸上面付近は蒸気膜の崩壊が生じており、その後、遷移沸騰さらに核沸騰へ移行する。サブクール膜沸騰における蒸気膜崩壊の起点は、飽和水の場合と同様に垂直円柱上端部の角の部分である。

6. 結果と考察

6.1 冷却曲線および冷却速度曲線

Fig.4 および Fig.6 は供試円柱を大気圧下で飽和水中およびサブクール水中へ浸漬冷却した場合の円柱内部温度 T_c 、 T_s と冷却時間 τ の関係を示した冷却曲線 (太線) と冷却速度曲線 (細線) の実測値の一例で、実線は円柱中心温度 T_c 、点線は円柱側面近傍温度 T_s である。Fig.4 の冷却曲線および冷却速度曲線は 556 °C の供試円柱を温度 100 °C ($\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$) の実験水中へ浸漬した場合で、一方、Fig.6 は 560 °C の供試円柱を温度 80 °C ($\Delta T_{\text{sub}}=20\text{K}$) の水中へ浸漬した場合である。時間の経過とともに供試円柱は始めゆるやかに冷却されるが、両図の冷却曲線上に示す●印を過ぎた後は急速に冷却される。冷却曲線上の●印の記号は、冷却速度 (冷却曲線の傾き) が最小となる点で、本研究ではこの点を膜沸騰の下限界と定義している。また、両図中の冷却曲線上には + 印が 6 個記されているが、これは Fig.3 および Fig.5 の沸騰の様相写真の撮影時刻に対応している。両図を比較すると、●印で示す下限界点の時刻

での伝熱面温度と冷却速度は液体サブクール度 ΔT_{sub} が大きくなるほど高くなっていくことがわかる。ちなみに、 $\Delta T_{sub}=0K$ の場合の膜沸騰の持続時間は95秒で、この膜沸騰領域の冷却速度は4.7K/sec から2.2K/sec の大きさである。一方、 $\Delta T_{sub}=20K$ の場合の膜沸騰の持続時間は約31秒で、この膜沸騰領域の冷却速度は8.2K/sec から6.0K/sec の大きさである。Fig.4とFig.6に示す冷却速度には円柱中心温度と側面近傍温度の相違はほとんど認められない。

Fig.7は本実験で取得した測定値を、座標の縦軸に無次元温度 $(T-T_{\infty})/(T_i-T_{\infty})[-]$ 、横軸に冷却時間 $\tau[s]$ をとって表わした冷却曲線である。ここに、 T は伝熱面温度(円柱中心温度 T_c)、 T_i は測定開始時刻($\tau=0$)の温度である。液体サブクール度 ΔT_{sub} をパラメータとした各冷却曲線は供試円柱の伝熱面温度が実験水の温度へ漸近する過程を無次元化して描いており、各々の冷却曲線上に示す●印の記号は膜沸騰の下限界点を表している。この図より、液体サブクール度が増大するに従って、●印で示した膜沸騰の下限界点に達する時間は短くなり、冷却曲線の傾きが大きくなっていることがわかる。本研究は膜沸騰領域を対象としているので、次節に示す沸騰曲線の考察には供試円柱の冷却開始($\tau=0$)から●印の記号で示した膜沸騰の下限界点までのデータを対象する。

Fig.8はFig.7と同様に、座標の縦軸に無次元温度 $(T-T_{\infty})/(T_i-T_{\infty})[-]$ 、横軸に冷却時間 $\tau[s]$ をとり、冷却曲線に及ぼす供試円柱の材質の影響について円柱中心温度 T_c を基にして比較したものである。図より、液体サブクール度 ΔT_{sub} が0K, 10K, 20Kおよび30Kの変化に対して、●印と○印で示す膜沸騰下限界点までの到達時間は2~4sec程度アルミニウムの方が銀の場合より早く、無次元温度はアルミニウムの方が銀の場合より大きくなっている。アルミニウムの方が銀の場合より到達時間が早いのは単位体積あたりの熱容量 ρc が銀に比べて小さいためであり、無次元温度が大きいのは、膜沸騰下限界点における温度 T_{min} は銀がアルミニウムに比べて1~4°C大きい(Fig.15参照)ものの測定開始時刻($\tau=0$)での伝熱面温度 T_i が銀に比べて約40°C低いためである。

Fig.9はFig.8に示したアルミニウムと銀の冷却曲線に基づく膜沸騰領域の冷却速度 $dT/d\tau [K/sec]$ を座標軸の縦軸に、冷却時間 $\tau[s]$ を横軸にとり、冷却速度曲線に及ぼす供試円柱材質の影響について比較したものである。両者の冷却速度曲線は単調な右下がりの特性を示しており、冷却速度はアルミニウムの方が銀の場合より、液体サブクール度 $\Delta T_{sub}=0K$ では4~7%、 $\Delta T_{sub}=10K$ では5~9%、 $\Delta T_{sub}=20K$ と30Kでは9~10%程度小さい値となっている。

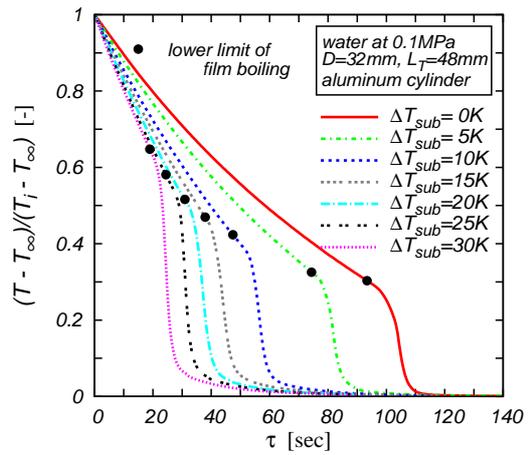


Fig.7 Cooling curves

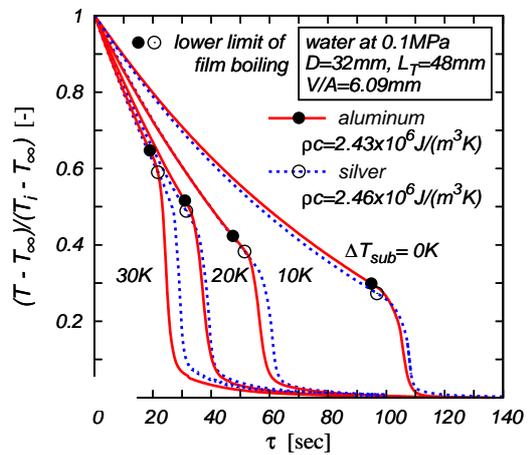


Fig.8 Comparison of cooling curves

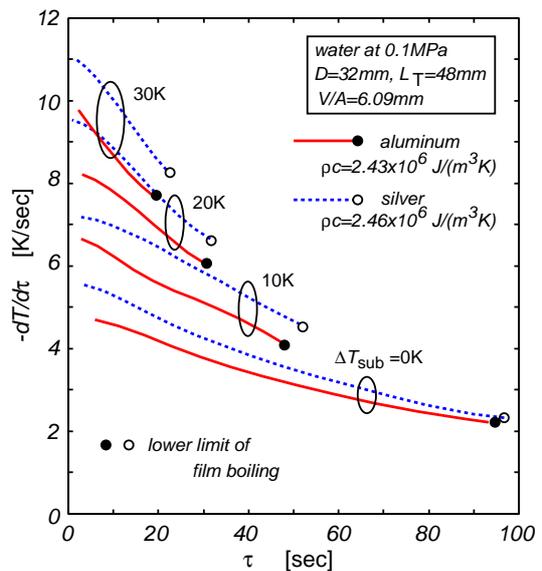


Fig.9 Comparison of cooling rate curves

6.2 膜沸騰領域の沸騰曲線

Fig.10 は Fig.7 に示した円柱中心温度 T_c に基づく冷却曲線のデータを基に，膜沸騰領域に対して式 (1) より定めた壁面熱流束 q と伝熱面過熱度 ΔT_{sat} の関係 (沸騰曲線) を，液体サブクール度 ΔT_{sub} をパラメータとして示したものである．この図より，壁面熱流束 q は液体サブクール度 ΔT_{sub} が大きくなるに従って高くなるとともに ● 印の記号で示した膜沸騰の下限界点での壁面熱流束が高過熱度側へ移動しており，遷移沸騰領域への移行は高い壁面熱流束で生じることがわかる．飽和膜沸騰における壁面熱流束は，伝熱面過熱度 $\Delta T_{sat}=425\sim 150K$ の範囲で約 $70kW/m^2$ から $35kW/m^2$ の値を取り，サブクールされた膜沸騰領域の壁面熱流束は飽和の場合より，伝熱面過熱度 $\Delta T_{sat}=300K$ において， $\Delta T_{sub}=5K$ の場合には約 20%， $\Delta T_{sub}=10K$ の場合には約 52%， $\Delta T_{sub}=20K$ の場合には約 196%， $\Delta T_{sub}=30K$ の場合には約 230% 増大し，液体サブクール度が膜沸騰熱伝達に強く影響していることがわかる．

Fig.11 はアルミニウム供試円柱に基づく膜沸騰領域の沸騰曲線を示しており，液体サブクール度 $\Delta T_{sub}=0K, 10K, 20K$ および $30K$ に対して円柱軸中心温度 T_c と側面近傍温度 T_s を用いて式 (1) より定めた壁面熱流束を比較したものである．いずれの液体サブクール度においても両者の沸騰曲線は $400K$ の伝熱面過熱度では 2~3% の違いがあるが， $400K$ 以下では 1% 程度でほとんど一致している．これはアルミニウム供試円柱内部の熱伝導による熱抵抗が小さいことを示している．また，● 印の記号で示す膜沸騰の下限界点での伝熱面過熱度および壁面熱流束ともほとんど一致している．

Fig.12 はアルミニウムと銀の材質の相違に基づく垂直円柱まわりの沸騰曲線を比較したものである．両材質による壁面熱流束 q を伝熱面過熱度 $\Delta T_{sat}=300K$ において比較すると，アルミニウムの方が銀より，いずれの液体サブクール度とも約 9% 程度小さい値となっている．これは，式 (1) より算出される壁面熱流束 q において，供試円柱が同じ形状 ($V/A=6.09mm$) であることから，冷却速度 $dT/d\tau$ が Fig.9 から明らかなようにアルミニウムが銀より約 9% 小さいことおよび本実験で用いている単位体積あたりの熱容量 ρc が常温近傍でアルミニウムが銀より約 1% 程小さいことによるものである．これまで沸騰曲線を描く場合に，銀の場合には温度依存性を考慮せず，常温近傍の値を代表値として使用していたが，両材質に対して単位体積あたりの熱容量 ρc の温度依存性を示すと Fig.13 のようになる．

Fig.13 は単位体積あたりの熱容量 ρc と温度 T の関係を示したもので，これはそれぞれの材質で密度 ρ と

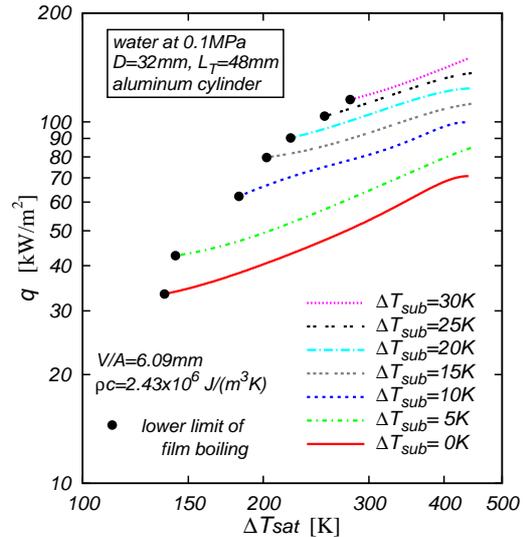


Fig.10 Boiling curves

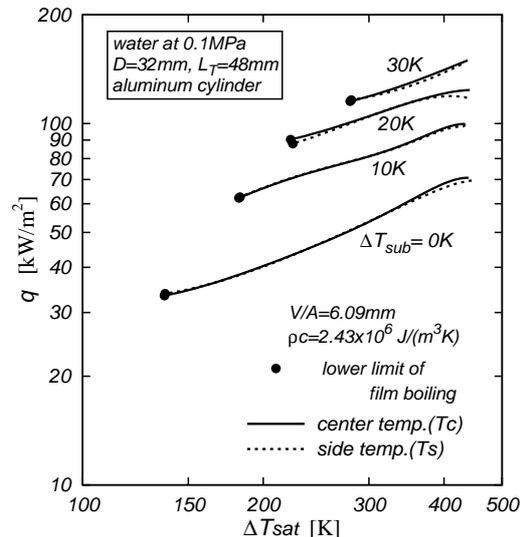


Fig.11 Comparison of boiling curves between at the center and the side

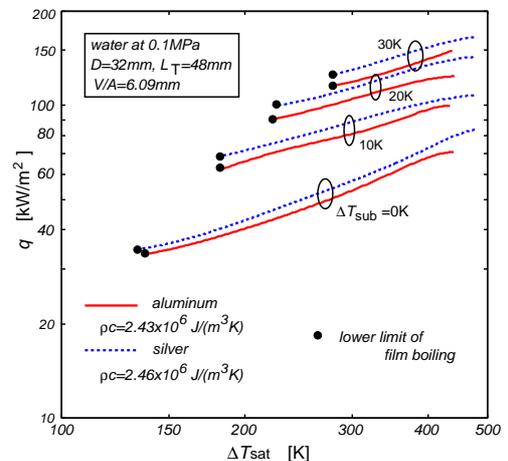


Fig.12 Comparison of boiling curves

比熱 c に対して伝熱工学資料⁹⁾に記述されているデータをもとに相関式を作成し、それぞれの相関式から得られた密度と比熱の積として評価したものである。アルミニウムおよび銀の ρc 値は温度が高くなる程大きくなる傾向を示し、アルミニウムは 2.43×10^6 から $3.04 \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ まで約 25%，銀は 2.46×10^6 から $2.61 \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ まで約 6% 大きくなり、アルミニウムが銀より ρc の温度依存性が強いことがわかる。

Fig.14 は Fig.13 に示したアルミニウムと銀の温度依存性に基づく単位体積あたりの熱容量 ρc を用いて壁面熱流束を式 (1) より再評価した沸騰曲線である。ちなみに、両者を伝熱面過熱度 $\Delta T_{\text{sat}}=300\text{K}$ において比較すると約 3% 以内で、アルミニウムと銀の沸騰曲線は一致している。このことにより、式 (1) の ρc に対して温度依存性を考慮すると銀より熱伝導率が小さいアルミニウムでも十分に銀と同等の伝熱特性が得られることがわかった。

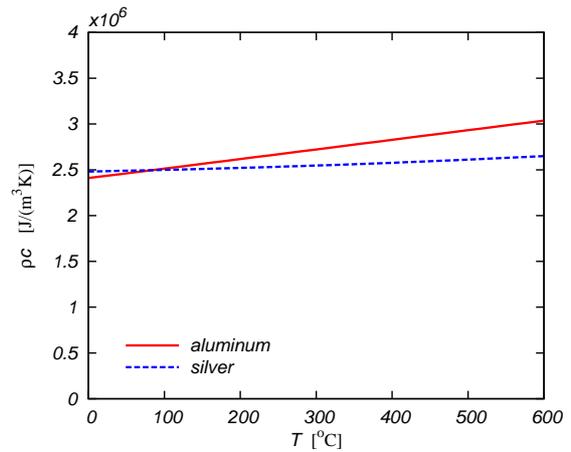


Fig.13 Comparison of ρc values

6.3 膜沸騰下限界点における伝熱面過熱度

Fig.15 は Fig.10 に示した沸騰曲線上の●印点(膜沸騰下限界点)の伝熱面過熱度 ΔT_{min} を縦軸に、液体サブクール度 ΔT_{sub} を横軸にとり整理したものである。図より、●印で示すアルミニウムの ΔT_{min} は液体サブクール度に強く依存し、液体サブクール度が大きくなるに従って増大していることがわかる。また、図中には銀の材質で得られた ΔT_{min} の値(■印)^{3,5~6)}も示しているが、アルミニウムの値と概ね一致している。図中の実線は銀の ΔT_{min} の値(■印)を最小二乗法で補間した次式 (6) の 1 次曲線より得られた計算値である。式 (6) はアルミニウムおよび銀のそれぞれの膜沸騰の下限界点における伝熱面過熱度 ΔT_{min} を $\pm 5\%$ 程度で整理できる。

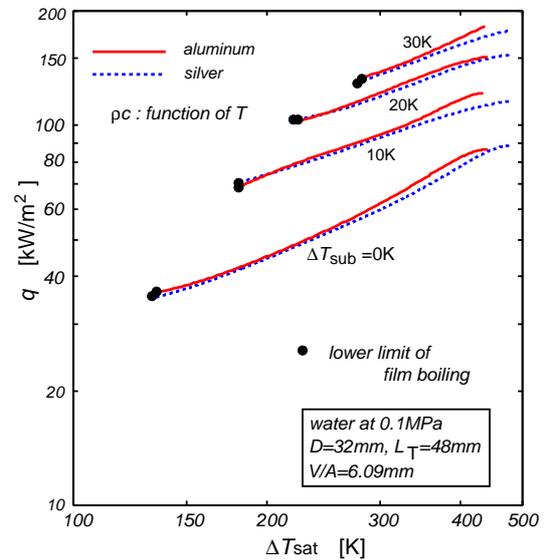


Fig.14 Comparison of boiling curves

$$\Delta T_{\text{min}} = 133 + 4.65\Delta T_{\text{sub}} \quad [\text{K}] \quad (6)$$

6.4 膜沸騰下限界点における壁面熱流束

Fig.16 は Fig.10 に示した沸騰曲線上の●印点(膜沸騰下限界点)の壁面熱流束 q_{min} を縦軸に、液体サブクール度 ΔT_{sub} を横軸にとり整理したものである。図より、●印で示すアルミニウムの q_{min} は液体サブクール度に強く依存し、液体サブクール度が大きくなるに従って増大していることがわかる。また、図中には銀の材質で得られた q_{min} の値(■印)³⁾も示しているが、アルミニウムの値より僅かに大きな値になっている。●印および■印の値は式 (1) で用いる ρc には、アルミニウムに対しては $2.43 \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ を、銀に対しては $2.46 \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ の一定値を用いて算出した値である。図中の実線は銀の q_{min} の値(■印)を最小二乗法で補間した次式 (7) の 1 次曲線より得られた計算値で

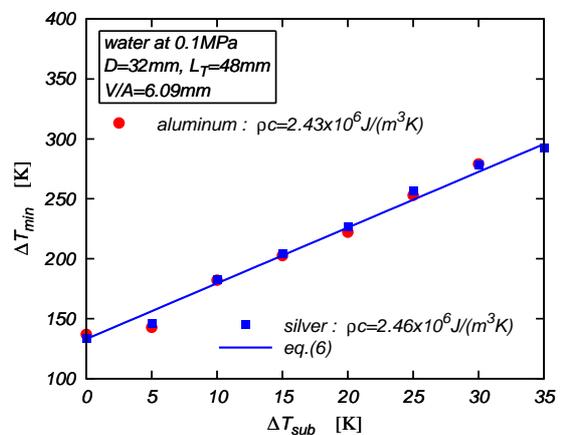
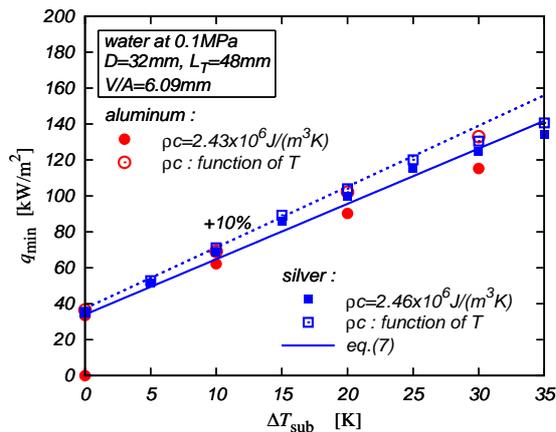


Fig.15 Relationship between ΔT_{min} and ΔT_{sub}

半球状の凸底面を有するアルミニウム有限垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達の実験

Fig.16 Relationship between q_{\min} and ΔT_{sub}

ある。式(7)はアルミニウムおよび銀のそれぞれの膜沸騰下限界点における壁面熱流束 q_{\min} の値を $\pm 5\%$ 程度で整理できる。

$$q_{\min} = 34 + 3.08\Delta T_{\text{sub}} \quad [\text{kW}/\text{m}^2] \quad (7)$$

さらに、図中の○および□印はアルミニウムおよび銀の壁面熱流束 q_{\min} 値で、式(1)で用いる ρc に対して Fig.13 に示した温度依存性を考慮した値を用いることにより得られた値であり、アルミニウムと銀の q_{\min} 値は概ね一致している。従って、両材質の場合には ρc 値の温度依存性を考慮することで膜沸騰下限界点における壁面熱流束 q_{\min} の値が概ね等しくなることがわかった。また、○印および□印で示す値は式(7)を用いることにより $+10\%$ 以内で相関させることができる。

7. 結論

半球状の凸底面を有するアルミニウム有限垂直円柱を大気圧下の静止した飽和およびサブクールの水中に浸漬して冷却する方法で膜沸騰熱伝達の伝熱特性および膜沸騰の下限界点を実験的に調べた。また、円柱の形状と寸法が同一の銀製の有限垂直円柱における伝熱特性および膜沸騰の下限界点とを比較し、実験範囲で以下のことが明らかになった。

- (1) 単位体積あたりの熱容量の温度依存性を考慮しない場合のアルミニウムの供試円柱に対する飽和膜沸騰領域の壁面熱流束は、伝熱面過熱度の降下とともに約 $70\text{kW}/\text{m}^2$ から $35\text{kW}/\text{m}^2$ まで減少する。一方、サブクール膜沸騰領域の壁面熱流束は伝熱面過熱度 300K において、飽和膜沸騰の値より液体サブクール度 5K の場合は 20% 、液体サブクール度 30K の場合は 230% 増大する。
- (2) 単位体積あたりの熱容量の温度依存性を考慮しない場合のアルミニウムの供試円柱に対する飽和およびサブクール膜沸騰領域の壁面熱流束は銀の場

合と比較して約 9% 低い値を示す。しかし、アルミニウムと銀に対する膜沸騰下限界点の伝熱面過熱度は概ね一致しており材質の相違は認められない。両材質による膜沸騰下限界点の伝熱面過熱度および壁面熱流束は液体サブクール度に対して1次の補間式で整理できる。

- (3) 単位体積あたりの熱容量の温度依存性を考慮すれば、アルミニウムと銀の壁面熱流束は最大 3% 以内で一致する。

以上より、アルミニウムは有限長の垂直円柱まわりの膜沸騰冷却における沸騰特性の知見を得る上で単位体積あたりの熱容量の温度依存性を考慮すれば、円柱の材質として実用的観点から利用することは有効である。

参考文献

- 1) 山田 昭, 茂地 徹, 桃木 悟, 金丸邦康, 山口朝彦; 有限長の垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達, 日本機械学会論文集 (B 編), **70**, 695, (2004), 1762-1768.
- 2) 山田 昭, 茂地 徹, 桃木 悟, 金丸邦康, 山口朝彦; 有限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**, 732, (2007), 1715-1722.
- 3) T. Yamada, K. Toyoda, T. Shigechi, S. Momoki, K. Kanemaru, T. Yamaguchi; Experiments on Film Boiling Heat Transfer around a Vertical Finite-Length Cylinder with a Convex Hemispherical Bottom, 18th International Symposium on Transport Phenomena, (2007), 752-755.
- 4) 山田 昭, 豊田 香, 茂地 徹, 桃木 悟, 山口朝彦, 金丸邦康; 有限垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達 (第1報: 半球状の凸底面の場合), 第46回日本伝熱シンポジウム講演論文集, **1**, (2009), 5-6.
- 5) 山田 昭, 豊田 香, 茂地 徹, 桃木 悟, 金丸邦康, 山口朝彦; 半球状の凸底面を有する有限垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達, 日本機械学会論文集 (B 編), **75**, 756, (2009), 1649-1654.
- 6) T. Yamada, K. Toyoda, T. Shigechi, S. Momoki, K. Kanemaru, T. Yamaguchi; Film Boiling Heat Transfer around a Vertical Finite-Length Cylinder with a Convex Hemispherical Bottom, Heat Transfer-Asian Research, **39**, 3, (2010), 166-177.
- 7) 山田 昭, 荒木憲一, 茂地 徹, 豊田 香, 桃木 悟, 山口朝彦; 半球状の凸上面を有する有限垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達の実験, 長崎大学工学部研究報告, **39**, 73, (2009), 1-7.
- 8) 山田 昭, 荒木憲一, 茂地 徹, 豊田 香, 桃木 悟, 山口朝彦; 底面と上面が半球状の凸面を有する有限垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達の実験, 長崎大学工学部研究報告, **40**, 74, (2010), 13-19.
- 9) 伝熱工学資料; 日本機械学会, 金属の物性値, 改訂第3版, (1975), 294, 改訂第4版, (1986), 314.