

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

山田 昭*・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 Cylinder with Convex Hemispherical Bottom and Top Surfaces

by

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

The film boiling heat transfer around a vertical finite-length silver cylinder with convex hemispherical bottom and top surfaces 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 64mm with 32mm length of vertical lateral part. The test cylinder was heated to about 600 °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 35K. The film boiling heat transfer increased in terms of heat flux by 240% with 30K increase 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.

Key Words : *Film Boiling, Vertical Cylinder, Convex Hemispherical Bottom and Top, Heat Transfer*

1. まえがき

3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、原子炉の炉芯の緊急冷却等で生じる。液体中で冷却される3次元物体まわりの膜沸騰に関して、伝熱のメカニズムを研究し熱伝達特性を予測するためには、現象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イオン交換水を用いて飽和状態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形状の円柱^{1,2)}、(2)底面が半球状の凸面で上面が水平な形状の円柱^{3,4)}および(3)底面が水平で上面が半球状の凸面の形状の円柱⁵⁾を用いて実験を行い、有限垂直銀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ともに前述の(1)と(2)の形状を有する円柱に対しては理論解析を行い、取得した壁面熱流束の測定値を±15%以内で相関できる伝熱整理式を作成している^{1~4)}。

本研究では、底面と上面が半球状の凸面を有する円柱の形状を用いて、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に関して知見を得るために現象観察を行うとともに冷却曲線を実測し、それに基づいて沸騰曲線を確定したのでその結果について報告する。また、膜沸騰から遷移沸騰に移行する膜沸騰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報告する。

平成21年12月15日受理

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

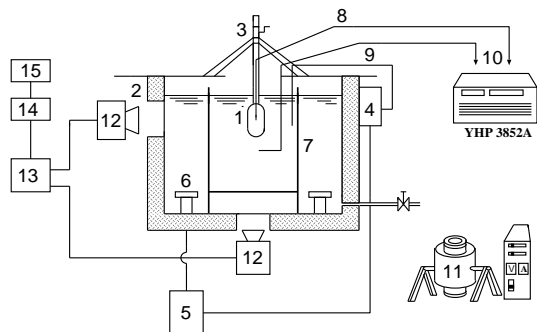
** 生産科学研究科 (Graduate School of Science and Technology)

*** 中国職業能力開発大学校 (Chugoku Polytechnic College)

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。沸騰槽はステンレス製で、450mm(L) × 450mm(W) × 750mm(H) の寸法を有する直方体の容器である。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実験水を乱さないように、沸騰槽の内側に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ている。

Fig.2 は本実験で使用した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 64mm, 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および上面は直径 32mm の半球状に加工されており、材質には酸化防止と高熱伝導率(常温にて約 410[W/(m·K)]) の理由から純度 99.99% の銀を使用した。供試円柱の冷却時の温度履歴は、円柱の



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. Electric furnace 12. Video camera
13. Video cassette recorder 14. Digital AV mixer
15. Video monitor

Fig.1 Schematic of experimental apparatus

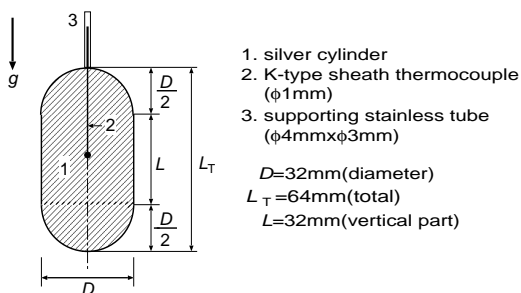


Fig.2 Test cylinder

中心(円柱軸心の頂部より 32mm の位置)に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 0.25 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気炉によって約 600℃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冷却される。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. 伝熱面温度と壁面熱流束の測定

供試円柱の材質には熱伝導率の高い銀を使用しているので、円柱の温度は集中定数系、つまり、空間的に一様に冷えていくと仮定する。従って、円柱の中心部の温度は円柱の表面温度と等しく、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、 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。

$$A = \pi D(L + D) \quad (2)$$

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

なお、式(1)の c は比熱(=234.5J/(kg·K))、 $dT/d\tau$ は冷却速度、 ρ は密度(=10490kg/m³)、供試円柱の体積と全伝熱面積の比 V/A の大きさは 6.67mm である。本実験で採用した銀製の円柱の場合には、膜沸騰時のピオエ数が飽和膜沸騰では 0.02 以下、サブクール膜沸騰では 0.04 以下と評価できるので、集中定数系の仮定は妥当なものであると考える。

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(円柱の中心温度)、 T_{sat} は実験水の飽和温度である。

4. 膜沸騰の様相

底面と上面が半球状の凸面を有する垂直銀円柱の

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

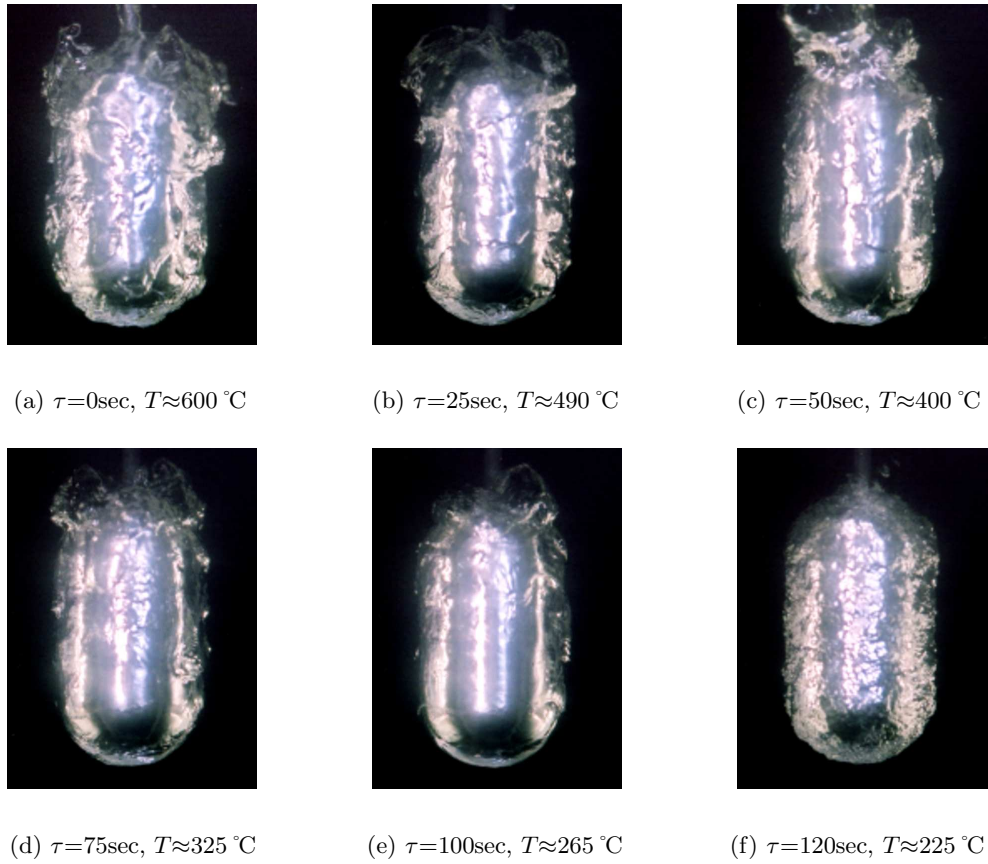


Fig.3 Photographs of film boiling around a vertical cylinder with convex hemispherical top and bottom surfaces for $\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$

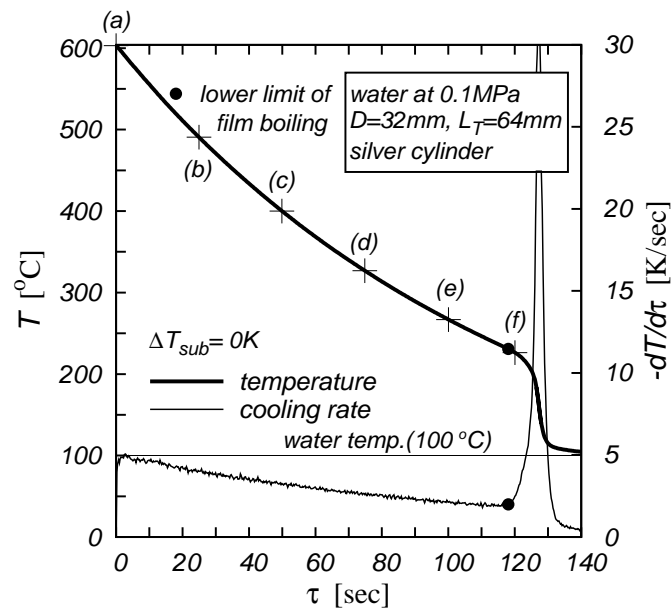


Fig.4 Cooling and cooling rate curves for $\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$

山田 昭・荒木 憲一・茂地 徹・豊田 香・桃木 悟・山口 朝彦

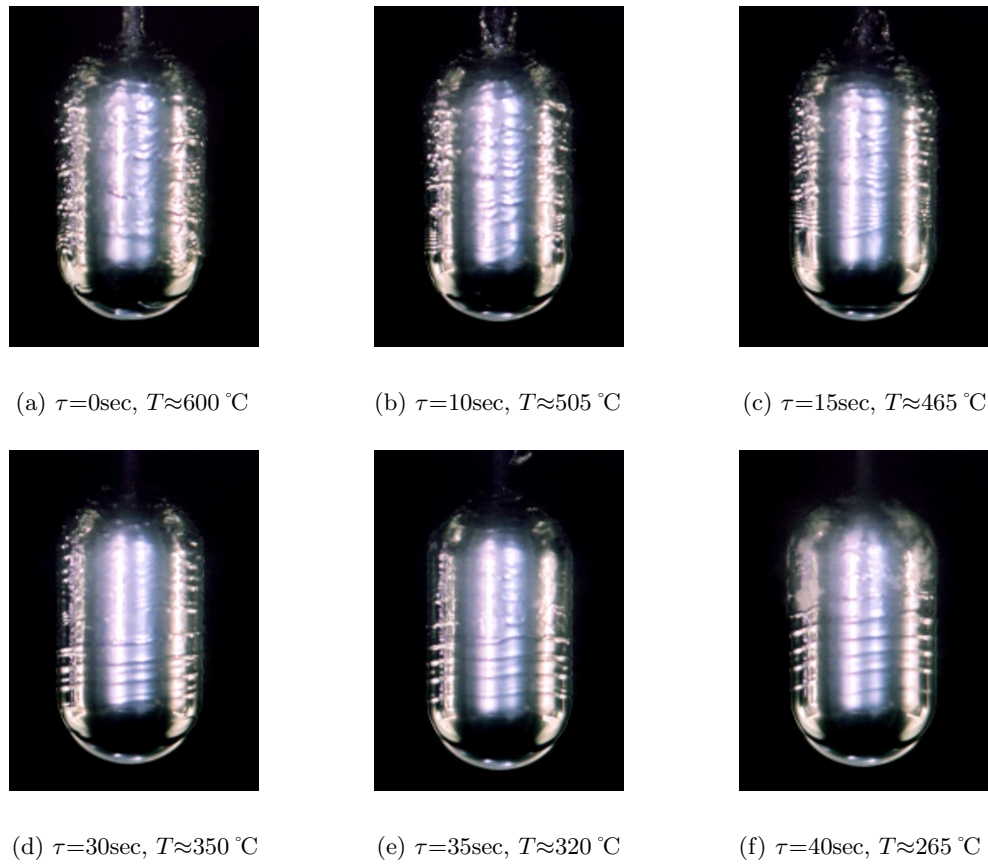


Fig.5 Photographs of film boiling around a vertical cylinder with convex hemispherical top and bottom surfaces for $\Delta T_{sub}=20K$

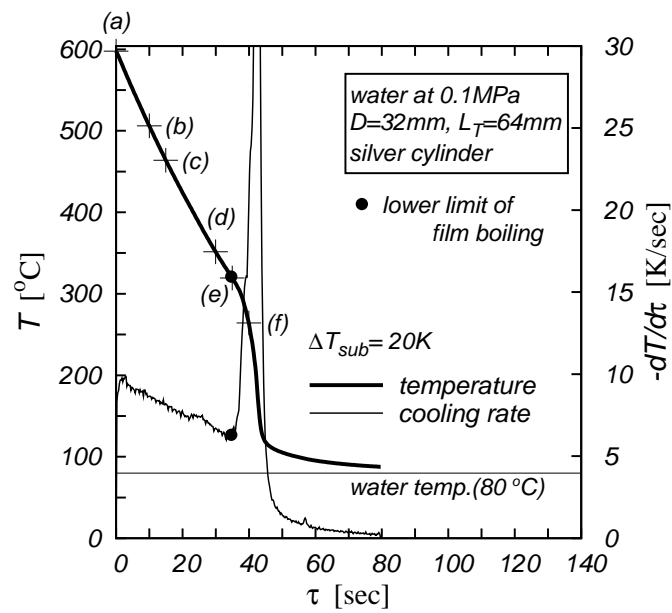


Fig.6 Cooling and cooling rate curves for $\Delta T_{sub}=20K$

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

表面に形成される蒸気膜の生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} は液体のサブクール度で、実験水の飽和温度と実験水の温度との差、 $\Delta T_{\text{sub}}=T_{\text{sat}}-T_{\infty}$ 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 75 秒間にわたる伝熱面温度が 325°C 以上の温度領域では Fig.3(a), Fig.3(b), Fig.3(c) および Fig.3(d) のように、円柱全面に形成された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(e) は浸漬して 100 秒経過した時の蒸気膜崩壊前の伝熱面温度が 265°C の様相で、蒸気膜崩壊直前 (蒸気膜崩壊温度 232°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の下端側は安定した蒸気膜層が形成されかつ気液界面の乱れは弱まっている。しかし、半球状の凸上面を含む垂直面の先端側に形成される蒸気膜の気液界面は乱れた様相を呈している。Fig.3(f) は蒸気膜崩壊後 (約 225°C) の様相で、その後、核沸騰へ移行する。本実験で使用した供試円柱に対する蒸気膜崩壊の起点は供試円柱と円柱を支持するステンレス製支持管との接合部分で、崩壊は円柱全面に同時に伝播する。

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) の伝熱面温度が同じ約 600°C の観察結果から明らかである。これは実験水が 80°C のサブクール水であるため飽和水中に比べて伝熱面まわりで蒸気の生成量が少ないことによるもので、Fig.5(a) の浸漬直後の垂直円柱まわりの膜沸騰の様相写真から円柱の全表面を覆う蒸気膜の界面の乱れは少なく、半球状の凸底面は平滑な界面状態にあり、安定した蒸気膜が形成されていることがわかる。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 10 秒 [Fig.5(b)] から 15 秒 [Fig.5(c)] までは膜沸騰の様相に大きな変化は見られず円柱側面の垂直部分にリング状のしわが出現しているが、その輪郭は蒸気膜が乱れているため不鮮明である。Fig.5(d) は浸漬して 30 秒 (伝熱面温度約 350°C)、Fig.5(e) は浸漬して 35 秒 (伝熱面温度約 320°C) の膜沸騰の様相を示しており、沸騰の様相に相違はなく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。しかし、垂直面の先端側の気液界面は波状で Fig.5(b) と Fig.5(c) と同様にリング状のしわが出現している。蒸気膜の気液界面上に出現したリング状のしわは約 5mm の間隔に形成さ

れ、約 0.5m/s の速度で上昇している。これらのしわの形成間隔や上昇速度の値は高速ビデオカメラ (1125 コマ/秒) で撮影された蒸気膜崩壊前の 4.5 秒間の平均値として導出されたものである。Fig.5(f) は浸漬して 40 秒経過した伝熱面温度約 265°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育時的に移行する。サブクール膜沸騰における蒸気膜崩壊の起点は、飽和の条件下と同じように供試円柱と円柱を支持するステンレス製支持管との接合部分である。

5. 結果と考察

5.1 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伝熱面温度と冷却時間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、Fig.4 は約 600°C の供試円柱を温度 100°C ($\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$) の実験水中へ焼入れた場合、Fig.6 は約 600°C の供試円柱を温度 80°C ($\Delta T_{\text{sub}}=20\text{K}$) の水中へ焼入れた場合である。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 (冷却経過時間に対する温度降下) が最小となる点で 3 節で述べたように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 6 個の + 印が記されているが、これは Fig.3 および Fig.5 の沸騰の様相写真の撮影時刻を示している。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、 $\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$ の場合の膜沸騰の持続時間は 118 秒で、この膜沸騰領域の冷却速度は 4.7K/sec から 2.0K/sec の大きさである。一方、 $\Delta T_{\text{sub}}=20\text{K}$ の場合の膜沸騰の持続時間は約 35 秒で、この膜沸騰領域の冷却速度は 9.8K/sec から 6.3K/sec の大きさである。

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 $\tau[\text{s}]$ をとって表わした冷却曲線である。ここに、 T_i は測定開始時 ($\tau=0$) の伝熱面温度である。液体サブクール度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いる。また、各冷却曲線上の●印の記号は膜沸騰の下限界点を示している。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、冷却曲線の勾配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●印の記号で示した下限界

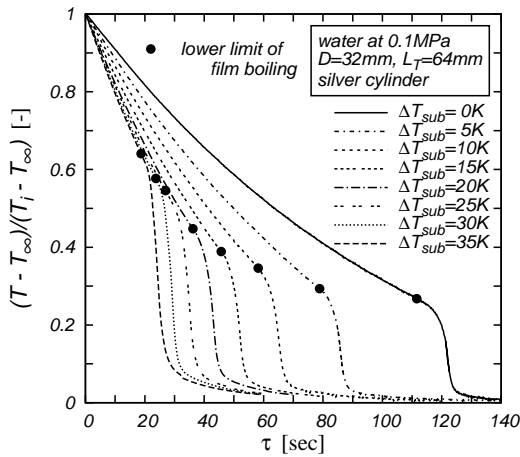


Fig.7 Cooling curves

点までのデータを対象とする。

5.2 膜沸騰領域の沸騰曲線

Fig.8は膜沸騰領域の沸騰曲線を、液体サブクール度 $\Delta T_{sub}=0K, 5K, 10K, 15K, 20K, 25K, 30K$ および $35K$ をパラメータとして示したもので、Fig.7に示した冷却曲線のデータをもとに式(1)より定めたものである。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。飽和膜沸騰熱伝達における壁面熱流束は、 $450K$ の高過熱度から $150K$ の低過熱度において約 $76kW/m^2$ から $34kW/m^2$ の値をとり、サブクールされた膜沸騰領域の壁面熱流束は飽和状態の壁面熱流束より、伝熱面過熱度 $\Delta T_{sat}=300K$ ($\Delta T_{sat}=T_w-T_{sat}$) において、 $\Delta T_{sub}=5K$ の場合には約 32% 、 $\Delta T_{sub}=10K$ の場合には約 66% 、 $\Delta T_{sub}=20K$ の場合には約 213% 、 $\Delta T_{sub}=30K$ の場合には約 240% 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。

5.3 膜沸騰領域の平均熱伝達係数

Fig.9は膜沸騰領域の平均熱伝達係数 $h(=q/\Delta T_{sat})$ と伝熱面過熱度 ΔT_{sat} の関係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、平均熱伝達係数 h は液体サブクール度 ΔT_{sub} が大きくなると増大し、伝熱面過熱度 ΔT_{sat} が大きくなると低下することがわかる。飽和膜沸騰熱伝達における平均熱伝達係数は、 $450K$ の高過熱度から $150K$ の低過熱度において $168W/(m^2 \cdot K)$ から $227W/(m^2 \cdot K)$ の値をとり、サブクールされた膜沸騰領域の平均熱伝達係数は、壁面熱流束と同様に伝熱面過熱度 $\Delta T_{sat}=300K$ において、 $\Delta T_{sub}=5K$ では 32% 、 $\Delta T_{sub}=30K$ では 240%

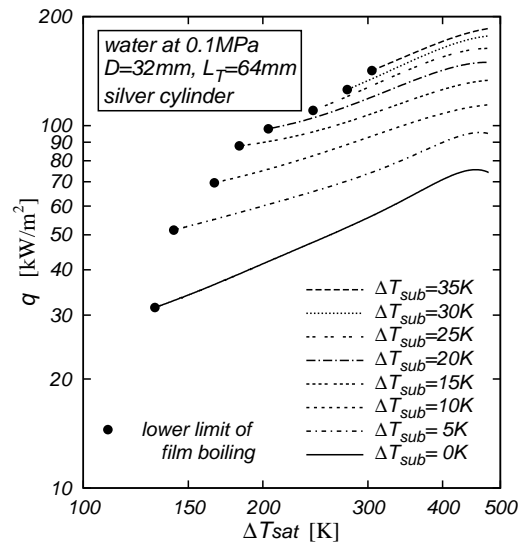
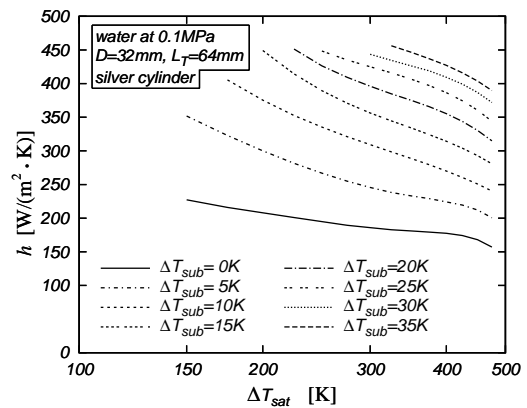


Fig.8 Boiling curves

Fig.9 Relationship between h and ΔT_{sat}

増大し、液体サブクール度が膜沸騰領域の熱伝達係数に強く影響していることがわかる。

5.4 膜沸騰下限界点における伝熱面過熱度

Fig.10はFig.8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} を横軸にとり測定値を整理したものである。Fig.10に示すように、本実験範囲の●印で示す測定値の 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。実線はこれらの測定値を最小二乗法で補間した2次曲線[式(6)]より計算された値であり、膜沸騰下限界点における伝熱面過熱度 ΔT_{min} の測定値を $\pm 5\%$ 程度で整理できる。

$$\Delta T_{min} = 132 + 2.3\Delta T_{sub} + 0.08\Delta T_{sub}^2 \quad [K] \quad (6)$$

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

式(6)より明らかなように、底面と上面が半球状の凸面を有する垂直円柱の飽和における膜沸騰下限界点の伝熱面過熱度は132Kであり、この値はこれまで著者らが行ってきた3種類の円柱^{1,2,4,5)}に対する値と概ね一致している。

5.5 膜沸騰下限界点における壁面熱流束

Fig.11はFig.8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} を横軸にとり測定値を整理したものである。Fig.11に示すように、本実験範囲の●印で示す測定値の 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。実線はこれらの測定値を最小二乗法で補間した1次曲線[式(7)]より計算された値であり、膜沸騰下限界点における壁面熱流束 q_{min} の測定値を $\pm 5\%$ 程度で整理できる。

$$q_{min} = 31 + 3.25\Delta T_{sub} \quad [\text{kW/m}^2] \quad (7)$$

式(7)より明らかなように、底面と上面が半球状の凸面を有する垂直円柱の飽和における膜沸騰下限界点の壁面熱流束は 31kW/m^2 である。

6. 結論

底面と上面が半球状の凸面を有する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膜沸騰熱伝達の実験を行い、本実験範囲で以下のことが明らかになった。

- (1) 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 76kW/m^2 から 34kW/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 の場合には 32% 、液体サブクール度 30K の場合には 240% 増大する。
- (2) 膜沸騰領域の平均熱伝達係数は伝熱面過熱度の増大とともに減少するが、液体サブクール度が高くなると増大する。
- (3) 膜沸騰の下限界点は液体サブクール度が高くなる程、高過熱度側に移動し、遷移沸騰領域への移行は高い壁面熱流束で生じる。
- (4) 膜沸騰下限界点の伝熱面過熱度および壁面熱流束の測定値は $\pm 5\%$ 程度で、液体サブクール度に対して伝熱面過熱度は2次の補間式で、壁面熱流束は1次の補間式でそれぞれ相関できる。

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.

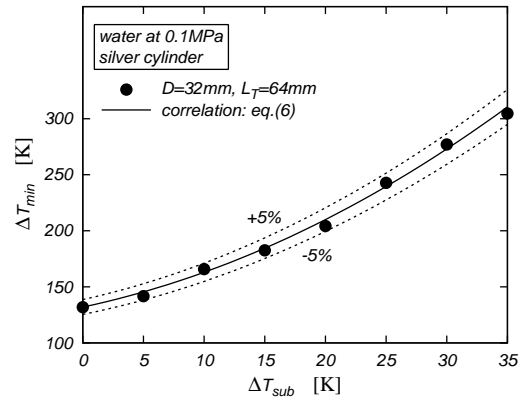


Fig.10 Relationship between ΔT_{min} and ΔT_{sub}

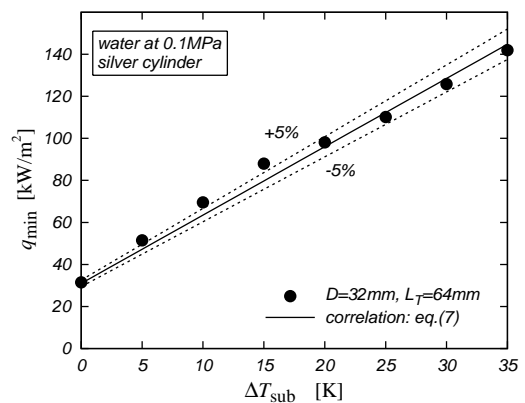


Fig.11 Relationship between q_{min} and ΔT_{sub}

- 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) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.