

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

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 a Convex Hemispherical Top

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 a convex hemispherical top 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 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 30K. The film boiling heat transfer increased in terms of heat flux by 236% with an increase in 20K 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 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、水平の底面と上面を有する形状の円柱^{1,2)}並びに円柱底面が半球状の凸面で上面が水平な面を有する形状の円柱^{3,4)}に対して実験を行い、有限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った。また、それぞれの円柱形状に対して理論解析を行い、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

した^{1~4)}。

本研究では、円柱の底面が水平で上面が半球状の凸面を有する場合の有限垂直円柱まわりの飽和並びにサブクール膜沸騰熱伝達の伝熱特性に関して知見を得るために有限垂直円柱まわりの現象観察を行うとともに冷却曲線を実測し、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、膜沸騰領域と遷移沸騰領域の境界点(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。

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

平成21年8月21日受理

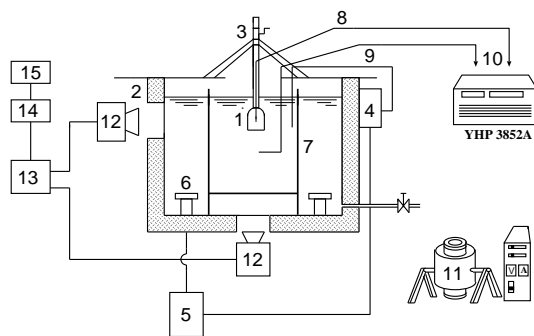
* 機械システム工学講座 (Department of Mechanical Systems Engineering)

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

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

沸騰槽はステンレス製で、450mm(L) × 450mm(W) × 750mm(H) の大きさ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バルク水(大気圧下のイオン交換水)昇温用として、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バルク水を乱さないように、沸騰槽の内側に300mm(L) × 300mm(W) × 600mm(H)の大きさ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。この供試体の底面は水平に、上面は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)])の観点から純度99.99%の銀を使用した。供試円柱の冷却時の温度履歴は、円柱の中心軸上に円柱頂部より32mm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。円柱の温度は横河・ヒューレット・パカード(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。



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

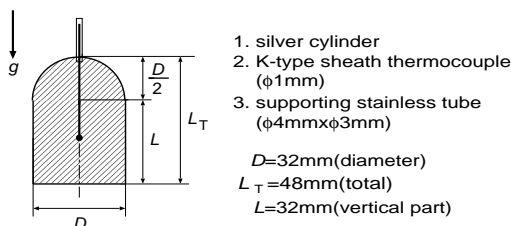


Fig.2 Test cylinder

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バルク水中へ円柱の水平底面の位置が水面より100mmとなるまで静かに浸漬され冷却される。なお、冷却中の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伝熱体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。

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

$$V = \frac{1}{12}\pi D^2 [3(L_T - D/2) + D] \quad (3)$$

なお、 c は比熱(=234.5J/(kg·K))、 $dT/d\tau$ は冷却速度、 ρ は密度(=10490kg/m³)である。本実験で採用した銀製の円柱の場合には、膜沸騰時のピオー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。

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

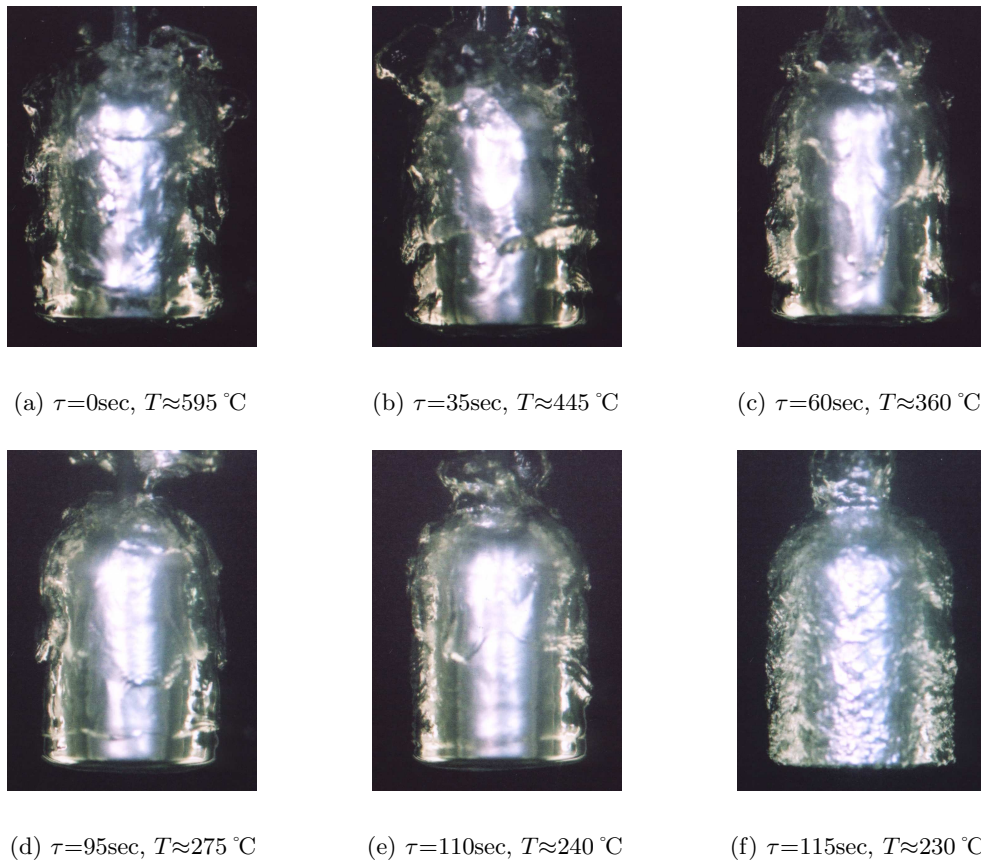
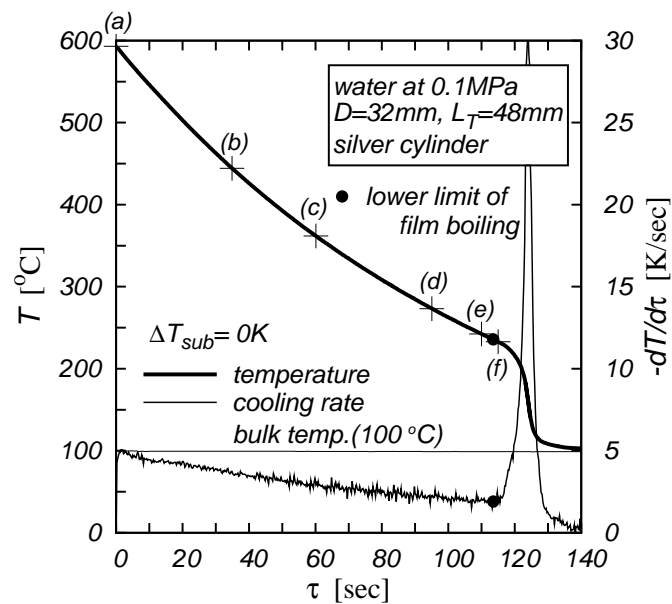
$$q_{\min} = -\rho c \frac{V}{A} \frac{dT}{d\tau} \Big|_{\min} \quad (5)$$

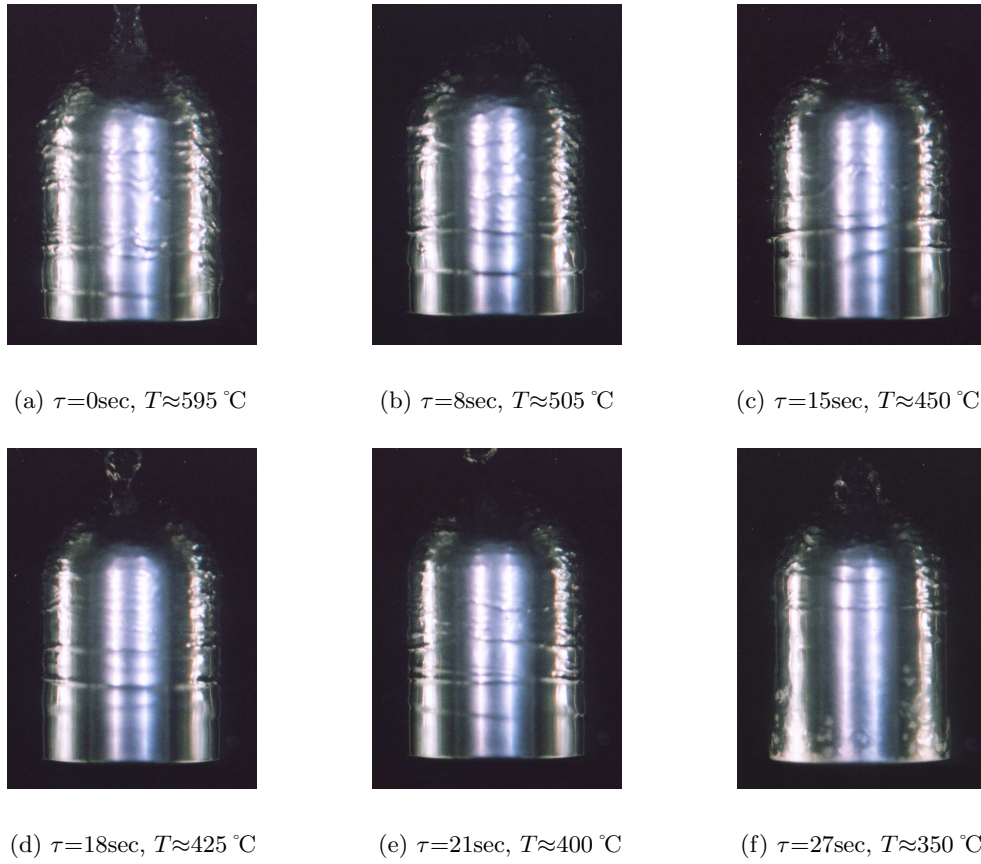
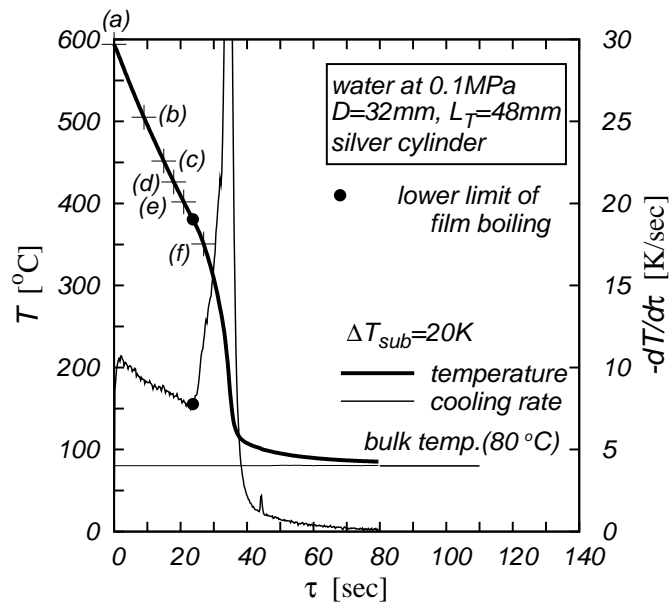
ここに、 T は伝熱面温度(円柱の中心温度)、 T_{sat} はバルク水の飽和温度である。

4. 膜沸騰の様相

半球状の凸上面を有する垂直円柱の表面に形成される蒸気膜の生成から崩壊までの沸騰の様相を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バルク温度との差として与えられる。また、Fig.3およびFig.5にパラメータとして

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

Fig.3 Photographs of film boiling around a vertical cylinder with a convex hemispherical top at $\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$ Fig.4 Cooling curve and cooling rate at $\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$

Fig.5 Photographs of film boiling around a vertical cylinder with a convex hemispherical top at $\Delta T_{\text{sub}}=20\text{K}$ Fig.6 Cooling curve and cooling rate at $\Delta T_{\text{sub}}=20\text{K}$

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

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60秒間にわたる伝熱面温度が 350°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、円柱の側面(垂直面)および円柱側面と滑らかに接続されている半球状の凸上面で発生した蒸気は激しく混合し合い、気液界面は攪乱している。Fig.3(d)は浸漬して95秒経過した時の膜沸騰の様相で、伝熱面温度が 270°C 程度まで低下すると、伝熱面の高温領域で観察された円柱表面を覆う蒸気の混合はなくなり、安定した蒸気膜層が形成されかつ気液界面の乱れが弱まっていることがわかる。さらに、時間が経過し伝熱面温度が低下した膜沸騰の崩壊前では、Fig.3(e)のように、円柱側面の下端部より5mm程度の領域は平滑な気液界面が形成されているが、5mm以上の側面領域および側面と滑らかに接続される半球状の凸上面に形成される蒸気膜の界面は乱れた様相を呈している。このような沸騰の様相は蒸気膜の崩壊(蒸気膜崩壊の伝熱面温度 233°C)まで持続する。Fig.3(f)は蒸気膜崩壊後(約 230°C)の遷移沸騰の様相で、その後、核沸騰へ移行する。膜沸騰下限界点に関係すると考えられる蒸気膜崩壊の起点は垂直円柱下端部の角の部分で、崩壊は円柱全面に同時に伝播する。

先の研究で使用した供試円柱の上面が水平な場合^{1,4)}と比較すると、円柱の上面が水平な場合の様相は、蒸気膜の気液界面は不安定ではあるものの上面が凸面の場合のような攪乱は生じていない。これは円柱上面端部の「角」の有無が側面からの蒸気の上向き流れに大きく影響を及ぼしているものと思われる。本研究の供試円柱では、円柱の底面で発生した蒸気は円柱の底面端部(角の部分)から側面に沿って上昇し、凸面頂部の供試円柱の支持管を覆うかたちで気泡が生成され離脱するが、円柱の直径が同じ大きさの上面が水平な場合では、上面に3個の蒸気溜が形成されそれぞれの蒸気溜から交互に離脱し、両者では気泡の離脱の仕方が異なっている。

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 595°C の観察結果から明らかである。これは実験水がサブクール水であるため飽和水に比べて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、水平底面および円柱側面の下端側は平滑な界面状態にあり、安定した薄い蒸気膜が形成されていることがわかる。しかし、円柱側面の下端側を除く部分の側面領域および側面と滑らかに接続される半球状の凸面の蒸気膜は

不安定で波状界面になっており、凸面頂部の気液界面から小さな気泡が離脱している。浸漬後8秒から21秒に至る膜沸騰の様相[Fig.5(b)からFig.5(e)]に大きな変化は見られず、円柱底面および円柱側面の垂直部分は安定で薄い蒸気膜で覆われ平滑な界面が形成されている。伝熱面温度の低下とともに側面の平滑な界面領域が拡大している。Fig.5(f)は浸漬して27秒経過した膜沸騰の様相を示しており、伝熱面温度は約 350°C で、円柱の下端部の角の部分で蒸気膜の崩壊がすでに始まっている。ちなみに、蒸気膜崩壊の伝熱面温度は 373°C で、その後は遷移沸騰さらに核沸騰の様相へと移行する。Fig.5の液体サブクール度 $\Delta T_{\text{sub}}=20\text{K}$ で観察された円柱側面の蒸気膜の気液界面に発生しているリング状のしわは約6mmの間隔で形成され、気液界面上を約 0.6m/s の速度で上昇している。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垂直円柱下端部の角の部分[Fig.5(f)参照]で、蒸気膜の崩壊は円柱全面に同時に伝播する。

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 の供試円柱をバルク水温度 100°C ($\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$)のイオン交換水中へ焼入れた場合、Fig.6は約 600°C の供試円柱をバルク水温度 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単調に冷却されるが、両図の冷却曲線上に示す●印を過ぎた後は急激に冷却される。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114秒で、この膜沸騰領域の冷却速度の大きさは 5.1K/sec から 1.9K/sec 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25秒で、この膜沸騰領域の冷却速度の大きさは 10.7K/sec から 7.7K/sec であり、両者ともほぼ直線的に変化している。

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、 T_∞ は大気圧下のバルク水

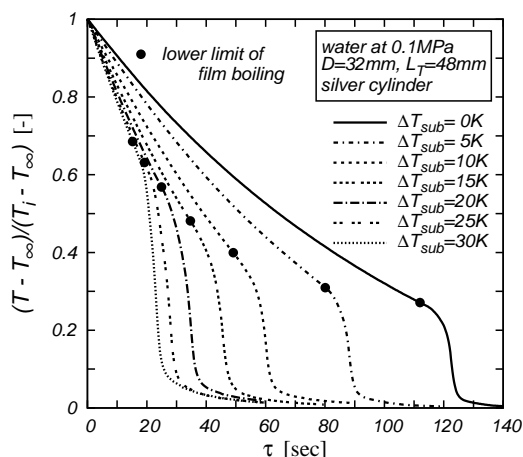


Fig.7 Cooling curve

温度である．図中の各冷却曲線上の●印の記号は膜沸騰の下限界点を示しており，各冷却曲線は供試円柱の伝熱面温度がバルク水温度に到達するまでを描いている．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点までのデータを使用する．

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 $\Delta T_{sub}=0K, 5K, 10K, 15K, 20K, 25K$ および $30K$ 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．サブクール膜沸騰熱伝達を評価する上で基準となる飽和膜沸騰熱伝達における壁面熱流束は， $475K$ の高過熱度から $200K$ の低過熱度において約 $70kW/m^2$ から $37kW/m^2$ 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 $\Delta T_{sat}=300K$ (伝熱面温度－バルク水の飽和温度) に対して， $\Delta T_{sub}=5K$ の場合には約 30%， $\Delta T_{sub}=10K$ の場合には約 79%， $\Delta T_{sub}=20K$ の場合には約 236% 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 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．平均熱伝達係数 h は壁面熱流束 q を伝熱面過熱度 ΔT_{sat} で除すことで Fig.7 に示す沸騰曲線より算出することができる．この図よ

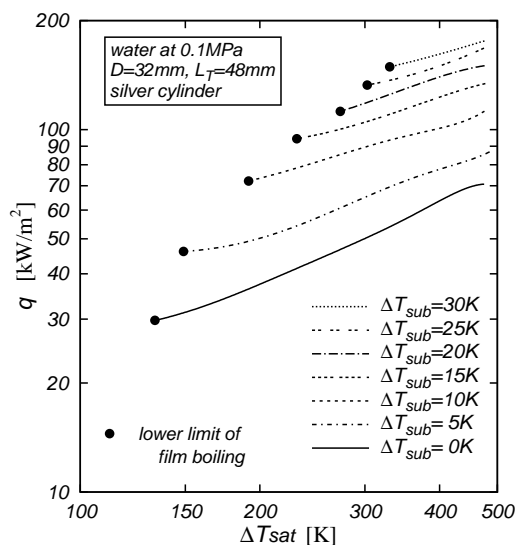
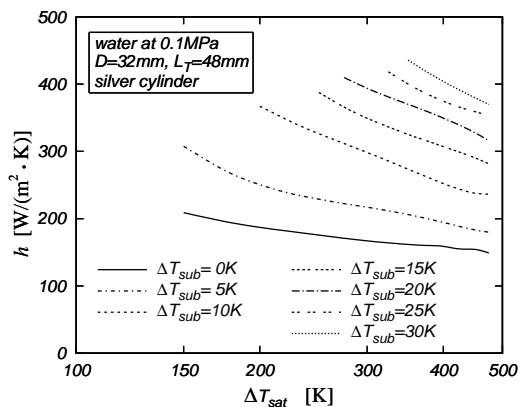


Fig.8 Boiling curve

Fig.9 Relationship between h and ΔT_{sat}

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．サブクール膜沸騰熱伝達を評価する上で基準とな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 $200K$ の低過熱度において約 $154W/(m^2.K)$ から $187W/(m^2.K)$ 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，熱流束と同様に伝熱面過熱度 $\Delta T_{sat}=300K$ に対して， $\Delta T_{sub}=5K$ では 30%， $\Delta T_{sub}=20K$ では 236% 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

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

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1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。

$$\Delta T_{\min} = 133 + 6.62\Delta T_{\text{sub}} \quad [\text{K}] \quad (6)$$

式(6)より明らかなように、水平の底面と半球状の凸上面を有する垂直円柱の場合の飽和における膜沸騰下限界点の伝熱面過熱度は133Kで、水平の底面と上面を有する垂直円柱の場合¹⁾の136K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。

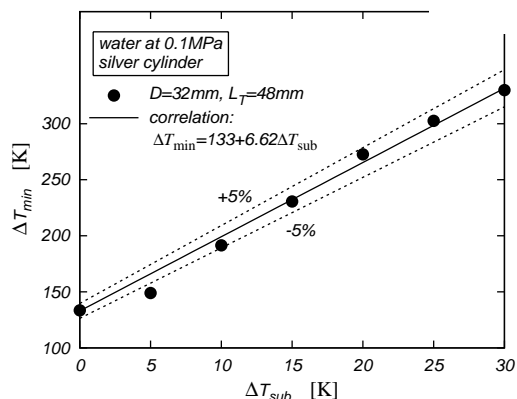
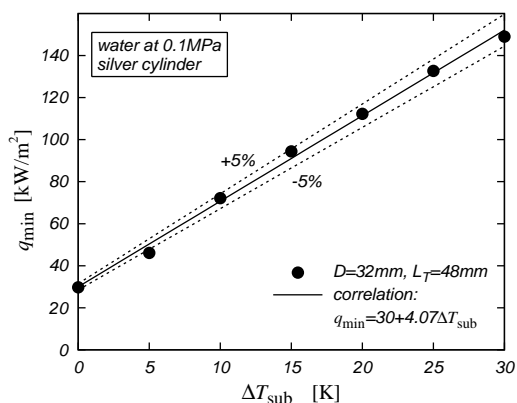
$$q_{\min} = 30 + 4.07\Delta T_{\text{sub}} \quad [\text{kW/m}^2] \quad (7)$$

式(7)より明らかなように、水平の底面と半球状の凸上面を有する垂直円柱の場合の飽和における膜沸騰下限界点の壁面熱流束は 30kW/m^2 で、水平の底面と上面を有する垂直円柱の場合¹⁾でのアスペクト比(円柱長さ/円柱直径)=1近傍の場合の 30kW/m^2 と同じ値である。

6. 結論

半球状の凸上面を有する銀製の供試円柱を垂直の姿勢で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した際の膜沸騰熱伝達に関して実験を行い、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 70kW/m^2 から 37kW/m^2 の範囲で推移し、液体サブクール度の大きさによって伝熱面過熱度300Kで30%から236%の増加が得られた。
- (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。

Fig.10 Relationship between ΔT_{\min} and ΔT_{sub} Fig.11 Relationship between q_{\min} and ΔT_{sub}

- (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する1次の補間式で相関できる。

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.
- 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.