

円錐状の凸底面を有する有限垂直円柱まわりの 膜沸騰熱伝達の実験

山田 崚*・豊田 香**・茂地 徹*・桃木 悟***・山口朝彦*

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

by

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

The film boiling heat transfer around a vertical silver cylinder with a convex conical 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 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 220% with 30K increase in liquid subcooling at a 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 Conical Bottom, Heat Transfer, Lower Limit of Film Boiling

1. まえがき

有限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有限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研究し熱伝達特性を予測するために不可欠である．著者らはこれまでに大気圧下のイオン交換水を用いた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^{3~5)}，(3) 底面が水平で上面が半球状の凸面を有する円柱⁶⁾ および (4) 底面と上面が半球状の凸面を有する円柱⁷⁾ 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%以内で関連できる伝熱整理式を作成している^{1~5)}．

本研究では，円柱の上面が水平で底面が円錐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，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．

平成22年12月15日受理

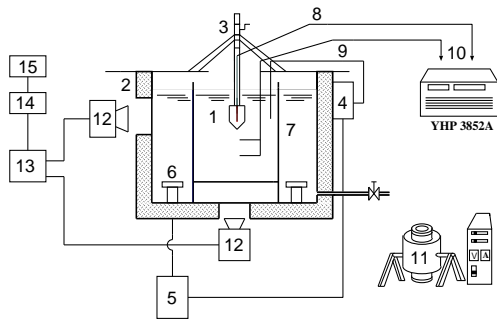
* 機械システム工学講座 (Department of Mechanical Systems Engineering)

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

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

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、沸騰槽の内側に透明なガラス箱[300mm(L)×300mm(W)×600mm(H)]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48mm、円柱の垂直部分の長さ L は円柱直径に等しい32mmである。この供試円柱の底面は円錐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、円柱の中心軸上に円柱上面より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。



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

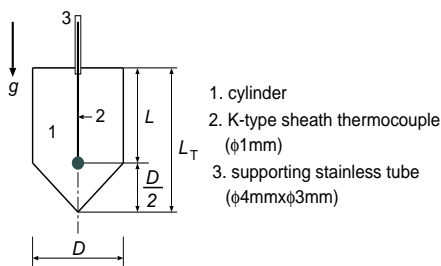


Fig.2 Test cylinder

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シリコン電炉によって約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円錐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、伝熱体の中心温度は伝熱体の表面温度と等しく、全表面平均の熱流束 q は次式によって与えられる。

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

ここに、 T は円柱温度、 τ は経過時間、 c は比熱(=234.5J/(kg·K))、 $(-dT/d\tau)$ は冷却速度、 ρ は密度(=10490kg/m³)、 A は供試円柱の全伝熱面積、 V は体積であり、 A と V はそれぞれ次式で与えられる。

$$A = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) + \pi DL + \sqrt{2}\pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \tag{2}$$

$$V = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) L + \frac{1}{3}\pi \left(\frac{D}{2} \right)^3 \tag{3}$$

ちなみに、上式で与えられる供試円柱の全伝熱面積 A は51.6cm²、体積 V は30.0cm³となり、体積と全伝熱面積の比 V/A は5.81mmとなる。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。

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

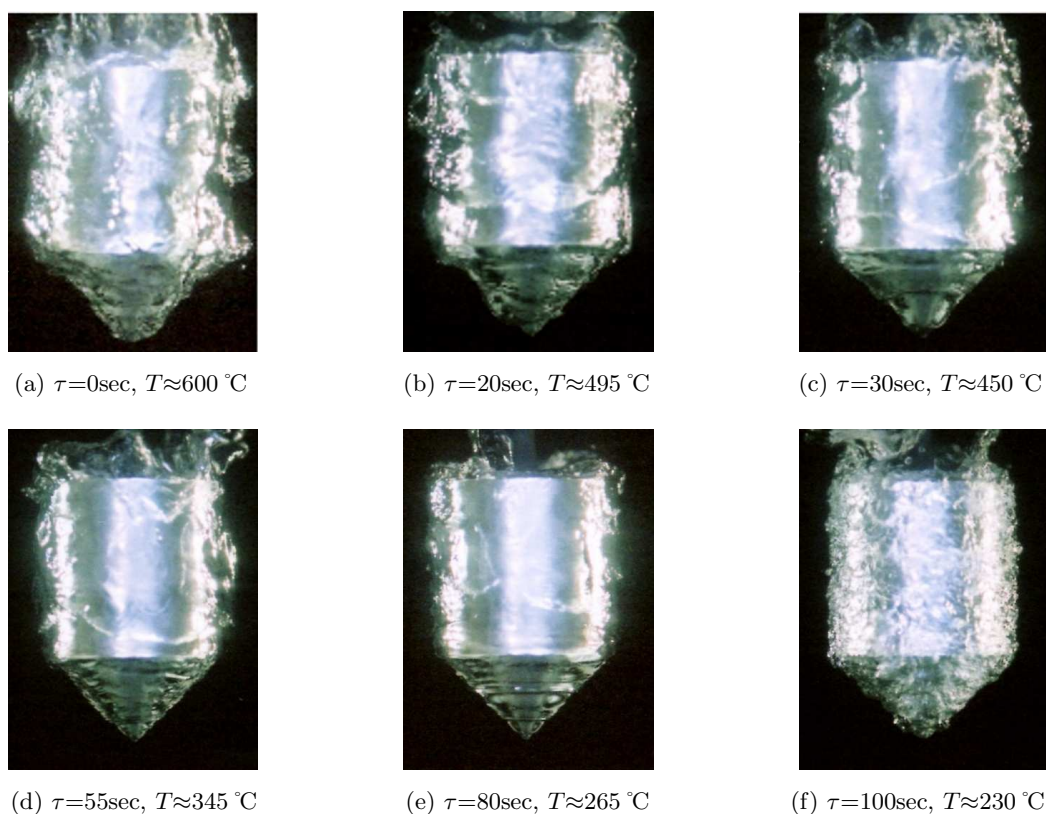
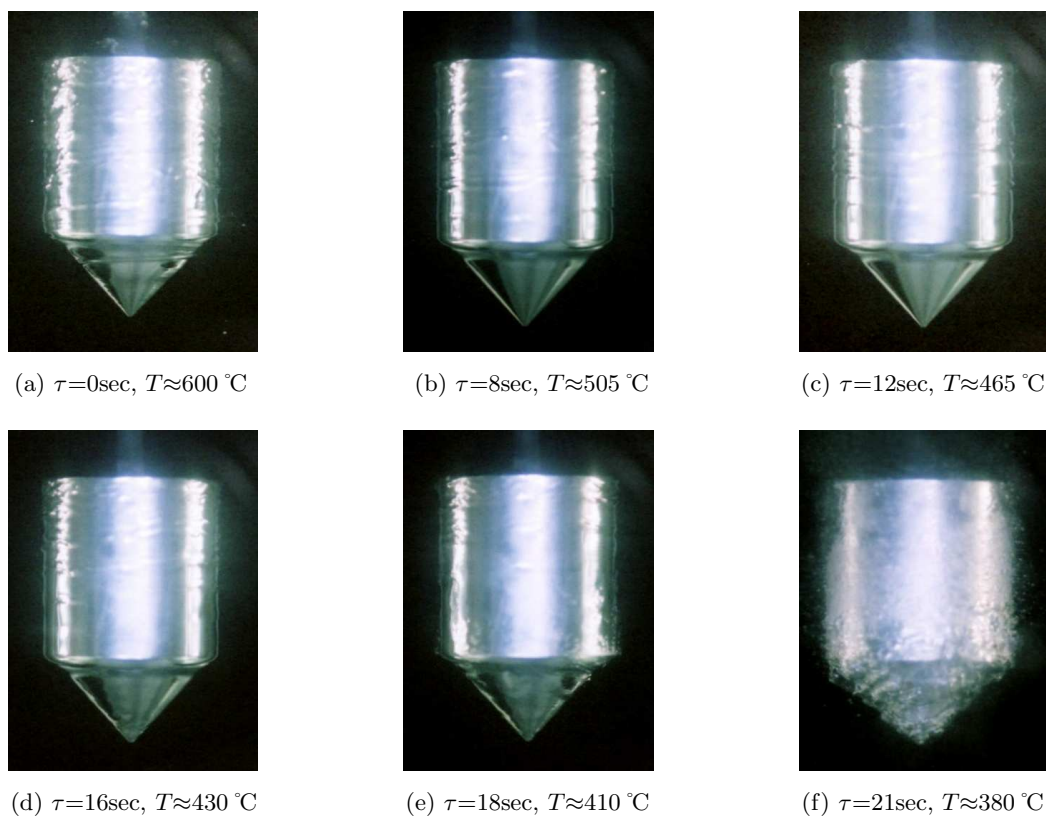
$$q_{\min} = \rho c \frac{V}{A} \left(-\frac{dT}{d\tau} \right) \Big|_{\min} \tag{5}$$

ここに、 T_{sat} は実験水の飽和温度である。

4. 膜沸騰の様相

1/8000秒・絞りF4で撮影した円錐状の凸底面を有する垂直銀円柱の表面を覆う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.4に示す。Fig.3は飽

円錐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の実験

Fig.3 Photographs of film boiling around a vertical cylinder with a convex conical bottom for $\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$ Fig.4 Photographs of film boiling around a vertical cylinder with a convex conical bottom for $\Delta T_{\text{sub}}=30\text{K}$

和膜沸騰 ($\Delta T_{sub}=0K$) の場合で、Fig.4はサブクール膜沸騰 ($\Delta T_{sub}=30K$) の場合であるが、ここに示す ΔT_{sub} は液体サブクール度で、実験水の飽和温度と実験水の温度との差、 $\Delta T_{sub}=T_{sat} - T_{\infty}$ として定義される。また、Fig.3およびFig.4にパラメータとして示す τ は冷却経過時間である。円柱の円錐底面最下端部が水面下100mmの位置になるまで浸漬され、固定された状態における蒸気膜の様相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 ($\Delta T_{sub}=0K$) の場合、浸漬直後 [Fig.3(a)(伝熱面温度約 600°C)] の円柱の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。浸漬後約20秒を経過して伝熱面温度が500°C前後になると、Fig.3(b)に示すように円柱底面の円錐部分の乱れは弱くなってリング状のしわが出現し波状界面を有する蒸気膜に移行する。リング状のしわは円錐底面下部から円錐面に沿って上昇するが、円柱の垂直側面部分にある蒸気と合流して消滅する。一方、円柱の垂直側面に形成されている蒸気膜の気液界面は安定した波状界面に移行せず乱れた様相を呈している。また、円柱上面も垂直側面の様相と同様な乱れた様相であるが、界面からおおきな塊の気泡が連続的に離脱している。Fig.3(c)からFig.3(e)で観察される様相はFig.3(b)と同様であるが、伝熱面温度の低下とともに垂直側面および上面の蒸気膜の乱れは弱くなっているものの他の供試円柱^{1~7)}で形成される安定した蒸気膜は形成されていない。Fig.3(f)は浸漬後約100秒の蒸気膜崩壊後の伝熱面温度230°Cの核沸騰の様相である。蒸気膜の崩壊はFig.3(e)とFig.3(f)の間で発生しているが、蒸気膜崩壊の起点は目視観察によると円錐底面と垂直側面とが接続される付近であり、これは円錐面に沿って上昇する蒸気が垂直側面下端部の蒸気に合流することにより蒸気の流れが一瞬定む箇所であるところと概ね一致している。蒸気膜の崩壊は円柱全面に急速に伝播する。

一方、Fig.4に示すサブクール膜沸騰 ($\Delta T_{sub}=30K$) 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.4(a)の伝熱面温度が同じ約600°Cの観察結果より明らかである。これは実験水が70°Cのサブクール水であるため、飽和水に比べて供試円柱の伝熱面まわりで発生する蒸気の生成量が少ないことによるものである。Fig.4(a)の円錐底面の最下端部が水面下約100mmの位置になるように浸漬され固定された直後の垂直円柱まわりの膜沸騰の様相は概ね平滑な界面状態になっており、円錐状の凸底面およびそれに接続される円柱側面の垂直部分は、安定した薄い蒸気膜で気液界面にはリング状のしわが形成されていることがわかる。また、円柱上面も安定した薄い蒸気膜で覆われているが、気液界面から小さな気泡が離脱するため僅かながら乱れがある。浸

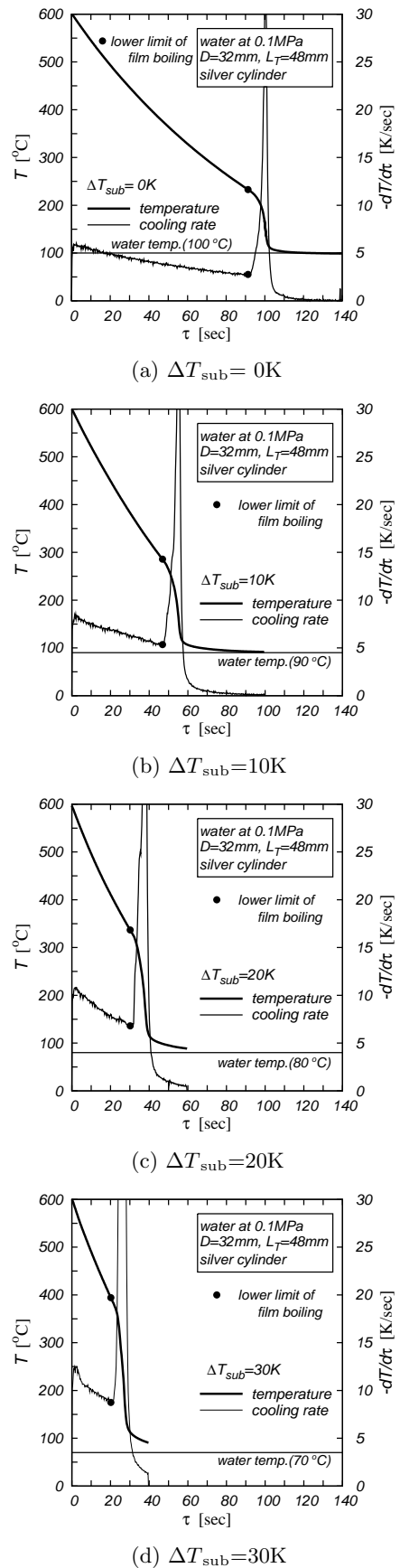


Fig.5 Cooling curve and cooling rate curve

円錐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の実験

漬後 8 秒から 18 秒に至る沸騰の様相 [Fig.4(b) から Fig.4(e)] に大きな変化は見られず円錐状の凸底面およびそれに接続される垂直側面の下端側は平滑な界面となっている。しかし、垂直側面上端側の蒸気膜の気液界面にはリング状のしわが出現している。円柱上面からは小さな気泡が間欠的に離脱している。Fig.4(f) は浸漬して 21 秒経過した伝熱面温度約 380°C における蒸気膜崩壊後の遷移沸騰の様相でその後、核沸騰へ移行する。円錐状の凸底面および垂直側面に出現しているリング状のしわは他の供試円柱^{1~7)} の場合でも同様に観察されている。蒸気膜崩壊の起点は、飽和の場合とは異なり垂直円柱上端部の角の部分かまたは円錐底面最下端部 90° の鋭角部分であり一定していないが、蒸気膜の崩壊は円柱全面に急速に伝播する。サブクール膜沸騰において蒸気膜崩壊の起点が一定していない要因として凸底面最下端部が 90° の鋭角となっている有限垂直円柱まわりに形成される蒸気膜の不安定性が挙げられる。

5. 結果と考察

5.1 冷却曲線および冷却速度曲線

Fig.5 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軸心上の上面より 32mm の位置における温度 T 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、Fig.5(a) は $\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$ (実験水温度 100°C) の場合、Fig.5(b) は $\Delta T_{\text{sub}}=10\text{K}$ (実験水温度 90°C) の場合、Fig.5(c) は $\Delta T_{\text{sub}}=20\text{K}$ (実験水温度 80°C) の場合、Fig.5(d) は $\Delta T_{\text{sub}}=30\text{K}$ (実験水温度 70°C) の場合を示している。図中の各曲線上には●印の記号が付されているが、これは冷却速度 $(-dT/d\tau)$ が最小となる点で第 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。これらの図より、●印で示す膜沸騰下限界点の時刻における円柱温度 T_{min} は液体サブクール度 ΔT_{sub} が增大するにつれて 233°C 、 286°C 、 337°C 、 394°C と高くなっている。また、後述する膜沸騰領域の沸騰曲線で縦軸に示す壁面熱流束 q を評価する際に重要なパラメータとなる冷却速度 $(-dT/d\tau)$ は液体サブクール度 ΔT_{sub} が增大するにつれて大きくなっている。ちなみに、冷却時間が 20 秒時の冷却速度 $(-dT/d\tau)$ は、 $\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$ の場合には 5.0K/sec 、 $\Delta T_{\text{sub}}=10\text{K}$ の場合には 6.9K/sec 、 $\Delta T_{\text{sub}}=20\text{K}$ の場合には 7.9K/sec 、 $\Delta T_{\text{sub}}=30\text{K}$ の場合には 8.8K/sec である。

Fig.6 は本実験で取得した全測定値を、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 $\tau[\text{s}]$ をとって表した冷却曲線である。 T_i は測定開始時 ($\tau=0$) の伝熱面温度、 T_{∞} は大気圧下の実験水温度である。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 T_{∞} へ漸近す

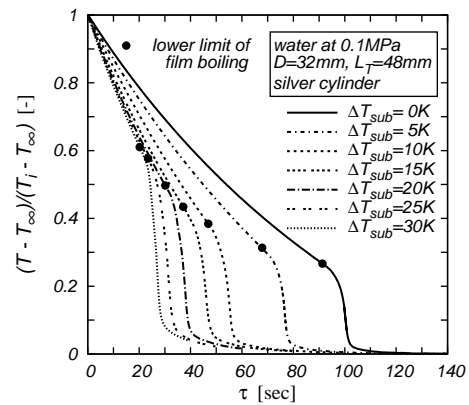


Fig.6 Cooling curves

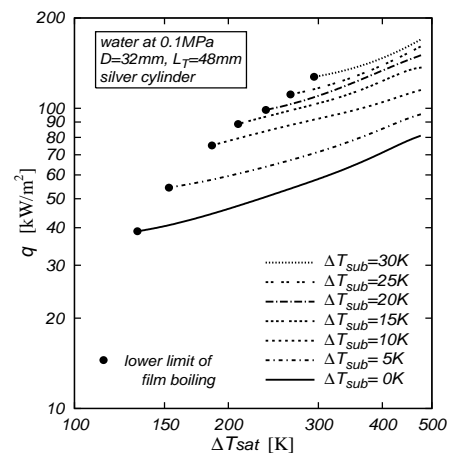


Fig.7 Boiling curves

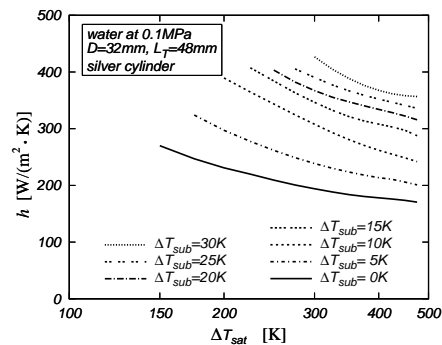


Fig.8 Average heat transfer coefficient

る過程を無次元化して描いている。また、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いる。この図より、液体サブクール度が增大するに従って、●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点までのデータを対象する。

5.2 膜沸騰領域の沸騰曲線

Fig.7は膜沸騰領域の沸騰曲線を、液体サブクール度 $\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}, 5\text{K}, 10\text{K}, 15\text{K}, 20\text{K}, 25\text{K}$ および 30K をパラメータとして示したもので、Fig.6に示した冷却曲線のデータをもとに式(1)より求めたものである。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、 475K の高過熱度から 150K の低過熱度において約 80kW/m^2 から約 40kW/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 $\Delta T_{\text{sat}}=300\text{K}$ ($\Delta T_{\text{sat}}=T_W-T_{\text{sat}}$) において、 $\Delta T_{\text{sub}}=5\text{K}$ の場合には約23%、 $\Delta T_{\text{sub}}=10\text{K}$ の場合には約60%、 $\Delta T_{\text{sub}}=15\text{K}$ の場合には約80%、 $\Delta T_{\text{sub}}=20\text{K}$ の場合には約90%、 $\Delta T_{\text{sub}}=25\text{K}$ の場合には約200%、 $\Delta T_{\text{sub}}=30\text{K}$ の場合には約220%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。ちなみに、伝熱面過熱度 $\Delta T_{\text{sat}}=300\text{K}$ における飽和状態の壁面熱流束は約 58kW/m^2 である。

5.3 膜沸騰領域の熱伝達率

Fig.8は膜沸騰領域の平均熱伝達率 $h(=q/\Delta T_{\text{sat}})$ 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、平均熱伝達率 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率は、 475K の高過熱度から 150K の低過熱度において約 $170\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ から約 $270\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ の値をとり、サブクールされた膜沸騰領域の平均熱伝達率は、壁面熱流束と同様に伝熱面過熱度 $\Delta T_{\text{sat}}=300\text{K}$ に対して、 $\Delta T_{\text{sub}}=5\text{K}$ の場合には約23%、 $\Delta T_{\text{sub}}=10\text{K}$ の場合には約60%、 $\Delta T_{\text{sub}}=15\text{K}$ の場合には約80%、 $\Delta T_{\text{sub}}=20\text{K}$ の場合には約90%、 $\Delta T_{\text{sub}}=25\text{K}$ の場合には約200%、 $\Delta T_{\text{sub}}=30\text{K}$ の場合には約220%増大し、液体サブクール度が膜沸騰領域の熱伝達率に強く影響していることがわかる。ちなみに、伝熱面過熱度 $\Delta T_{\text{sat}}=300\text{K}$ における飽和状態の平均熱伝達率は約 $193\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ である。

5.4 膜沸騰下限界点における伝熱面過熱度

Fig.9はFig.7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.9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

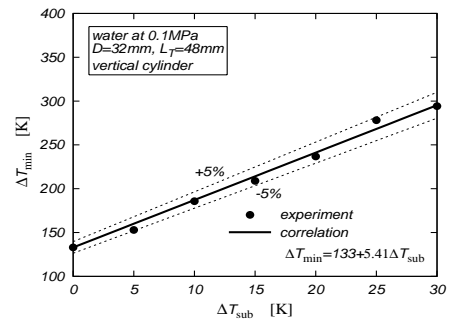


Fig.9 Relationship between ΔT_{min} and ΔT_{sub}

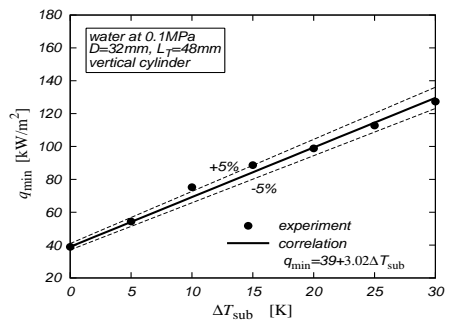


Fig.10 Relationship between q_{min} and ΔT_{sub}

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。

$$\Delta T_{\text{min}} = 133 + 5.41\Delta T_{\text{sub}} \quad [\text{K}] \quad (6)$$

式(6)より明らかなように、円錐状の凸底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における伝熱面過熱度は 133K であり、この値はこれまで著者らが行ってきた4種類の供試円柱、(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^{3~5)}、(3)底面が水平で上面が半球状の凸面を有する円柱⁶⁾および(4)底面と上面が半球状の凸面を有する円柱⁷⁾に対する値と概ね一致しており、膜沸騰下限界点の伝熱面過熱度に及ぼす伝熱面形状の影響はほとんど無い。しかし、サブクール膜沸騰においては伝熱面形状の影響が顕著に表れている。

5.5 膜沸騰下限界点における壁面熱流束

Fig.10はFig.7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.10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

円錐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の実験

る壁面熱流束 q_{min} の測定値を $\pm 5\%$ 程度で整理できる。

$$q_{min} = 39 + 3.02\Delta T_{sub} \text{ [kW/m}^2\text{]} \quad (7)$$

式(7)より明らかのように、円錐状の凸底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 39kW/m^2 で、この値は先に取得した4種類の供試円柱^{1~7)}の場合より高い結果となっており、飽和およびサブクール膜沸騰において円柱形状の影響が表れている。ちなみに、飽和膜沸騰における下限界点の壁面熱流束は、底面と上面が水平な形状の円柱^{1,2)}でアスペクト比(円柱長さ/円柱直径)が1の場合は 30kW/m^2 、(2)底面が半球状の凸面で上面が水平な形状の円柱^{3~5)}の場合は 34kW/m^2 、(3)底面が水平で上面が半球状の凸面を有する円柱⁶⁾の場合は 30kW/m^2 、(4)底面と上面が半球状の凸面を有する円柱⁷⁾の場合は 31kW/m^2 である。

6. 結論

円錐状の凸底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高過熱度から低過熱度に向けて 80kW/m^2 から 40kW/m^2 の範囲にある。
- (2) 飽和膜沸騰領域の熱伝達率は高過熱度から低過熱度に向けて $170\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ から $270\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ の範囲にある。
- (3) 膜沸騰領域の壁面熱流束は液体サブクール度が高くなる程増大し、5Kから30Kの液体サブクール度において伝熱面過熱度300Kで23%から220%程度の増加が得られた。
- (4) 膜沸騰領域の平均熱伝達率は液体サブクール度が高くなる程増大し、伝熱面過熱度が大きくなると低下する。
- (5) 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熱流束で生じる。
- (6) 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を $\pm 5\%$ 程度で、液体サブクール度に対する1次の補間式で関連できる。

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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.