

半球状の凸底面を有する垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達の実験

山田たかし*・豊田 香**・茂地 徹*
桃木 悟**・金丸邦康*・山口朝彦*Experiments on Film Boiling Heat Transfer around
a Vertical Cylinder with a Convex Hemispherical Bottom

by

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

The film boiling heat transfer around a vertical silver cylinder with a 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 length is 48mm. 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 225% with an increase in 30K 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, 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、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、円柱底面が水平な有限垂直円柱まわりの膜沸騰現象の観察と実験データの蓄積を行い、膜沸騰熱伝達に対して±15%以内で相関できる伝熱整理式を作成している^{1,2)}。

本研究では、半球状の凸底面を有する場合の垂直円柱まわりの飽和並びにサブクール膜沸騰熱伝達特性に関して実用的な伝熱整理式を作成することを目的として、垂直円柱まわりの詳細な現象観察を行い、冷却曲線と沸騰曲線を実測し、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)における過熱度と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、 D は円柱の直径($D=32\text{mm}$)、 L は円柱の長さ($L=48\text{mm}$)である。この供試体は円柱の先端を半球

平成 18年 12月15日 受理

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

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

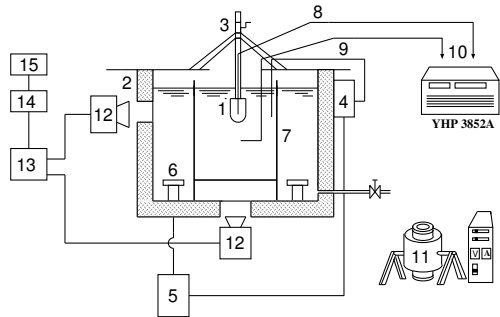
状に加工したものであり、供試円柱には酸化防止と高熱伝導率(常温にて約410[W/(m·K)])の観点から純度99.99%の銀を使用した。供試円柱の冷却時の温度履歴は、円柱の中心部に円柱上面より32mmの位置まで挿入されているシース径1mmのK型熱電対で測定される。円柱の温度は横河・ヒューレット・パッカード(株)製のデータ集録/制御ユニット(YHP3852A)により0.25秒のサンプリング間隔で計測される。

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、バ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の水面下約100mmの深さ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。

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



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

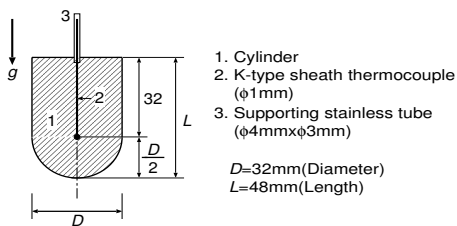


Fig.2 Test cylinder

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。

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

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

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。

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

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

ここに、 T は円柱温度、 T_{sat} はバルク水の飽和温度である。

4. 膜沸騰の様相

1/8000秒・絞りF5.6で撮影した半球状の凸底面を有する垂直円柱に形成される蒸気膜の生成から崩壊までの挙動観察の一例をFig.3およびFig.4に示す。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、 ΔT_{sat} は伝熱面過熱度(円柱温度-バルク水の飽和温度)である。また、 ΔT_{sub} は液体サブクール度(バルク水の飽和温度-バルク水温度)である。本節で用いている語句において、「乱れ」とは円柱表面に形成される蒸気膜内が不規則に激しく混合し気液界面が攪乱しているさまを、「波状」とは気液界面上に一定の間隔で環状のしわが存在するさまを表している。

Fig.3はバルク水が飽和水($\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$)の場合、Fig.4はバルク水がサブクール水($\Delta T_{\text{sub}}=20\text{K}$)の場合であり、これら一連の写真観察結果から以下のことが明らかになった。Fig.3に示すバルク水が飽和水の場合、水面下約100mmの位置に固定された浸漬直後の円柱は激しい沸騰のため円柱全面を覆う蒸気膜は厚く不安定で乱れており、Fig.3(a)のような状態は約25秒程度持続する。その後、安定で平滑な界面を有する蒸気膜に移行する。半球状の凸底面下で発生する蒸気は垂直側面に沿って上昇する。一方、円柱上面では柱状または茸状の蒸気溜が形成され、それぞれの蒸気溜が

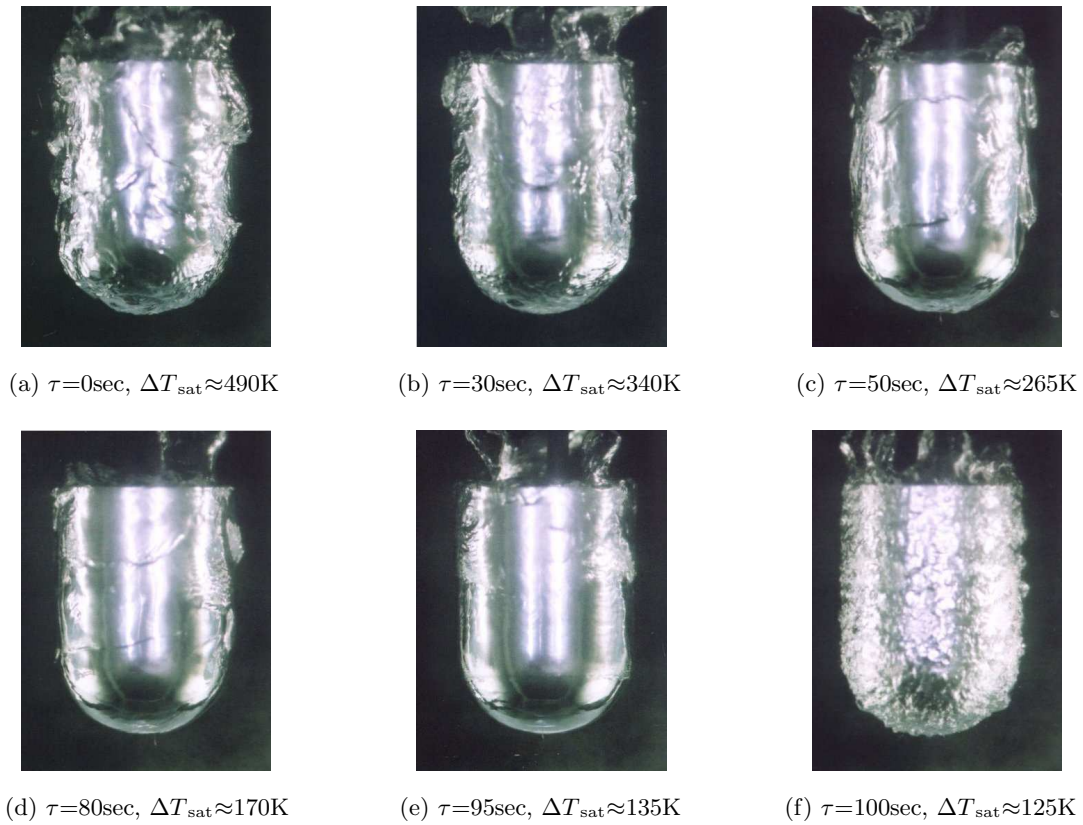


Fig.3 Photographs of film boiling around a vertical cylinder with a convex hemispherical bottom at $\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$

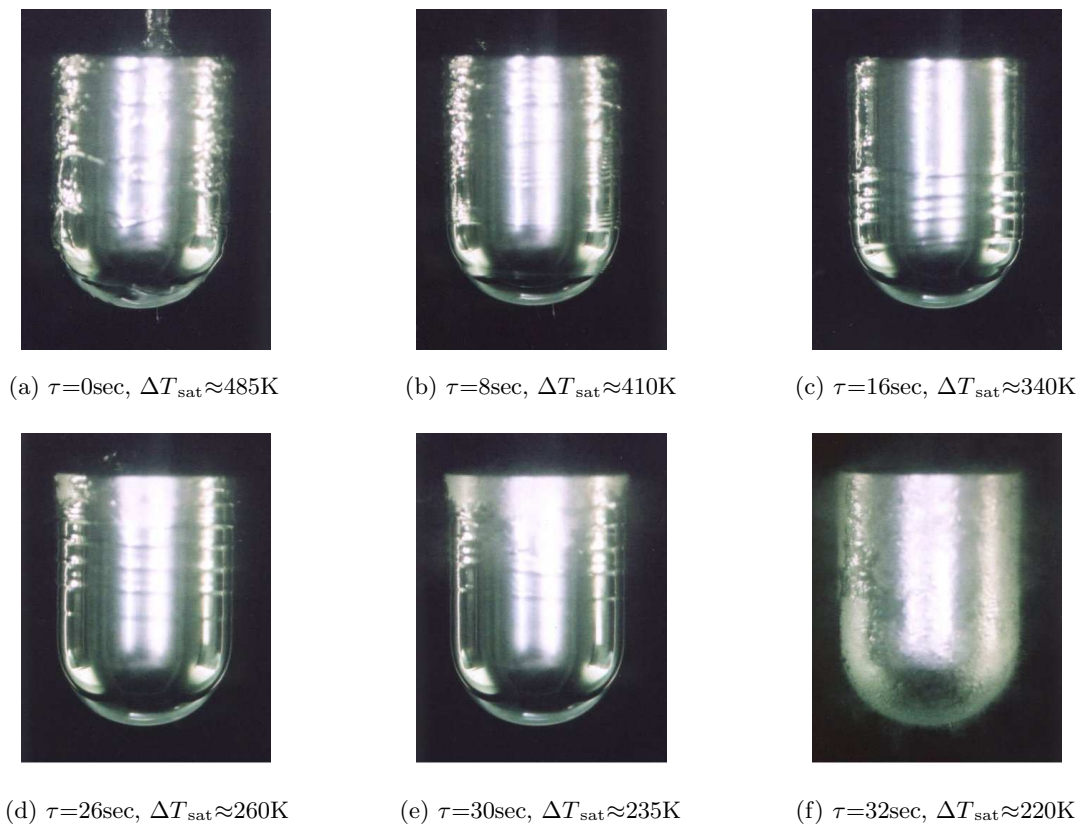


Fig.4 Photographs of film boiling around a vertical cylinder with a convex hemispherical bottom at $\Delta T_{\text{sub}}=20\text{K}$

ら気泡が交互に離脱し、その後には新しい蒸気溜が形成される。Fig.3(b)およびFig.3(c)で観察されるように、浸漬して30秒から50秒経過すると半球状の凸底面の蒸気膜はほぼ平滑な気液界面に移行する。円柱側面および円柱上面の気液界面の乱れは弱くなり安定した蒸気膜に覆われている。浸漬後80秒から95秒経過した沸騰の様相は、Fig.3(d)およびFig.3(e)で観察されるように、半球状の凸底面は平滑な界面状態となり安定した薄い蒸気膜で覆われている。半球状の凸底面から接続される円柱側面の垂直部分の下端側は平滑な界面状態、円柱側面の先端側は波状性の界面状態になっている。一方、円柱上面の気液界面は安定した蒸気膜に覆われているが、弱い乱れが存続している。Fig.3(f)は浸漬後100秒の蒸気膜崩壊後の遷移沸騰状態の様相でその後、核沸騰へ移行していく。蒸気膜の崩壊はFig.3(e)とFig.3(f)の間で発生し、膜沸騰下限界点に密接に関係すると考えられる蒸気膜崩壊の起点は、写真観察では捉えられていないが目視観察によると半球状の凸底面の場合には垂直円柱先端部の角の部分で、先の研究¹⁾において使用した円柱底面が水平な場合には伝熱面上で蒸気膜の厚さが最も薄くなる円柱底面先端部の角の部分であり、円柱底面の形状によって顕著な相違が認められた。しかし、両者とも蒸気膜の崩壊は円柱全面に同時に伝播する。

一方、バルク水が80℃のサブクール水の場合、Fig.4(a)の観察より明らかなように、水面下約100mmの位置に固定された直後でも円柱まわりの沸騰の様相はFig.3(a)に比べて穏やかであり、円柱全面に形成される蒸気膜の界面の乱れは少なく、半球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の下端側は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。円柱側面の垂直部分の先端側は安定した薄い蒸気膜で覆われているが、界面は波状になっている。円柱上面も安定した薄い蒸気膜で覆われているが、界

面からは小さな気泡が離脱し僅かながら乱れがある。円柱上面から離脱した上昇気泡はバルク水の温度が低いほど早く消滅する。浸漬後8秒から26秒に至る沸騰の様相[Fig.4(b)からFig.4(d)]に大きな変化は見られず、半球状の凸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概ね平滑な界面状態にある。円柱上面の気液界面は僅かではあるが乱れが生じている。Fig.4(e)は浸漬後30秒の沸騰の様相で垂直円柱先端部の角の部分から蒸気膜の崩壊が始まった瞬間を捉えたものであり、Fig.4(f)は円柱全面の蒸気膜が崩壊した後の遷移沸騰状態の様相でその後、核沸騰へ移行する。Fig.4(b)からFig.4(e)で見られるような円柱の垂直面の蒸気膜表面に発生している環状のしわは一定の間隔を保って存在しており、垂直面上を上昇している。この現象は伝熱面過熱度が低くなるほど、すなわち、垂直面を覆っている蒸気膜が薄くなるほど顕著であり、底面が水平な円柱^{1,2)}の場合でも観察されている。半球状の凸底面の場合の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先端部の角の部分[Fig.4(e)参照]であるが、一方円柱底面が水平な場合²⁾には円柱底面先端部の角の部分であり、サブクールの条件下でも円柱底面の形状によって起点の相違が認められた。しかし、蒸気膜の崩壊は飽和の条件下と同じように両者とも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.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の中心部の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.5(a)は $\Delta T_{sub}=0K$ (バルク水温度100℃)の場合、Fig.5(b)は $\Delta T_{sub}=10K$ (バルク水温度90℃)の場合、Fig.5(c)は $\Delta T_{sub}=20K$ (バルク水温度80℃)の場合を示している。

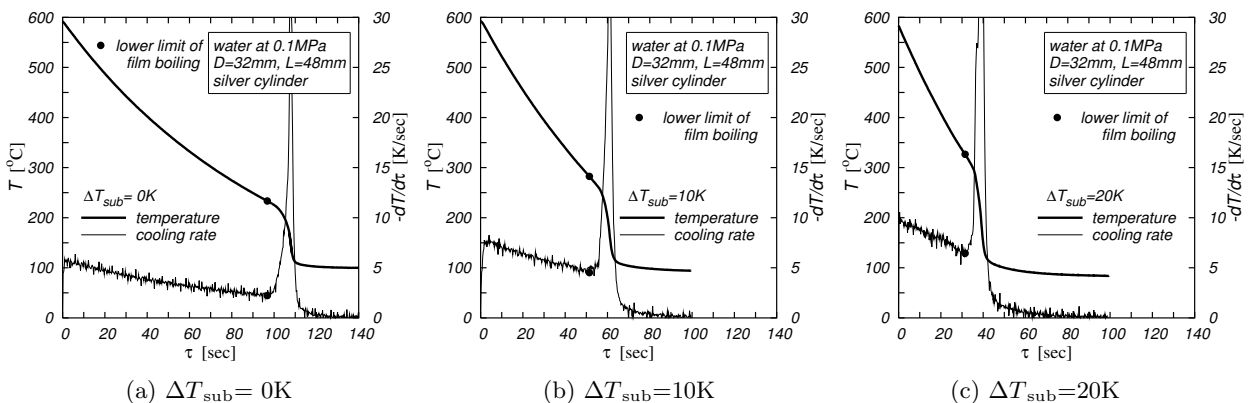


Fig.5 Cooling curve and cooling rate

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。これらの図より、●印で示す下限界点の時刻での円柱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。

Fig.6は座標の縦軸を無次元温度 $(T - T_{\infty}) / (T_i - T_{\infty})$ で表わした冷却曲線で、座標の横軸は冷却時間 τ [s]である。ここに、 T は円柱温度、 T_i は測定開始時の円柱温度、 T_{∞} は大気圧下のバルク水温度である。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.7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.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、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熱流束が高過熱側へ移動しており、遷移沸騰領域への移行は高い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熱流束は、 $450K$ の高過熱度から $200K$ の低過熱度において約 $80kW/m^2$ から $43kW/m^2$ の値をとり、サブクールされた膜沸騰領域の熱流束は飽和状態の熱流束より、過熱度 $\Delta T_{sat}=300K$ に対して $\Delta T_{sub}=5K$ の場合には約25%、 $\Delta T_{sub}=10K$ の場合には約55%、 $\Delta T_{sub}=20K$ の場合には約100%、 $\Delta T_{sub}=30K$ の場合には約225%、 $\Delta T_{sub}=35K$ の場合には約235%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 膜沸騰領域の熱伝達係数

Fig.8は伝熱面過熱度 $\Delta T_{sat}=200K, 250K, 300K, 350K, 400K$ および $450K$ での膜沸騰領域における平均熱伝達係数 h と液体サブクール度 ΔT_{sub} との関係について示したものである。平均熱伝達係数 h は熱流束 q を伝熱面過熱度 ΔT_{sat} で除すことでFig.7に示す沸騰曲線のデータより算出することができる。ここに示す値は伝熱面過熱度 $\Delta T_{sat}=200K, 250K, 300K, 350K, 400K$ および $450K$ に対するもので、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

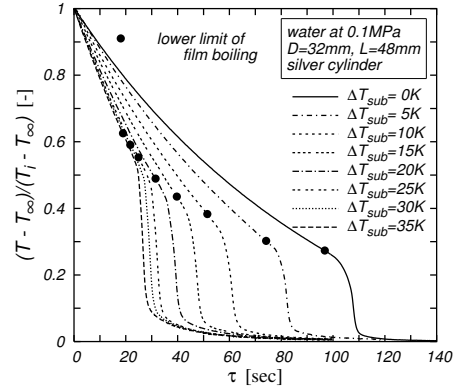


Fig.6 Cooling curve

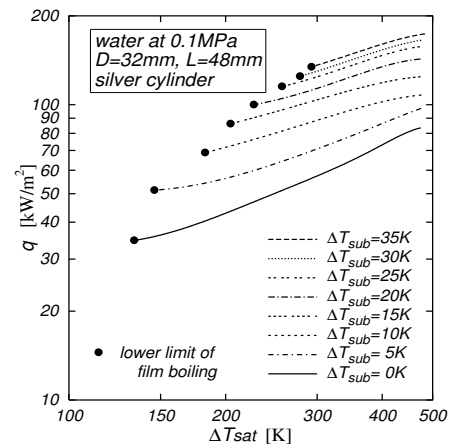


Fig.7 Boiling curve

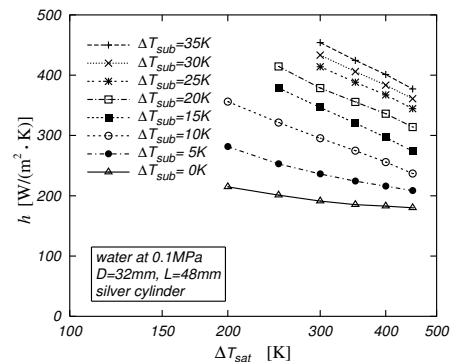


Fig.8 Relationship between h and ΔT_{sat}

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 $180W/(m^2 \cdot K)$ から $215W/(m^2 \cdot K)$ 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、熱流束と同様に伝熱面過熱度 $\Delta T_{sat}=300K$ において飽和の場合より25%から235%程度増大し、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.9はFig.7に示した沸騰曲線上の●印点(膜沸騰下限界点)の過熱度 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過熱度 ΔT_{\min} の測定値を $\pm 5\%$ 程度で整理できる。

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

式(6)より明らかなように、半球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過熱度は133Kであるが、水平底面を有する垂直円柱の場合¹⁾には136Kで、飽和における膜沸騰下限界点の過熱度は半球底面を有する垂直円柱の方が水平底面を有する垂直円柱の場合より低い結果となっている。

5.5 膜沸騰下限界点における熱流束

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

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

式(7)より明らかなように、半球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熱流束は $34\text{kW}/\text{m}^2$ であるが、水平底面を有する垂直円柱の場合¹⁾にはアスペクト比(円柱長さ/円柱直径)=1近傍では $30\text{kW}/\text{m}^2$ で、飽和における膜沸騰下限界点の熱流束は半球底面を有する垂直円柱の方が水平底面を有する垂直円柱の場合より高い結果となっている。

6. 結論

半球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) 飽和膜沸騰領域の熱流束は高過熱度から低過熱度に向けて約 $80\text{kW}/\text{m}^2$ から $43\text{kW}/\text{m}^2$ の大きさである。
- (2) 飽和膜沸騰領域の熱伝達係数は高過熱度から低過

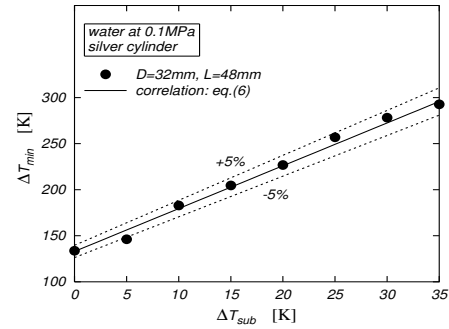


Fig.9 Relationship between ΔT_{\min} and ΔT_{sub}

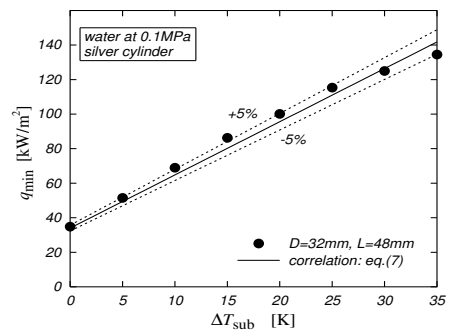


Fig.10 Relationship between q_{\min} and ΔT_{sub}

熱度に向けて約 $180\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ から $215\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ の大きさである。

(3) 膜沸騰領域の熱流束は液体サブクール度が高くなる程増大し、液体サブクール度の大きさによって伝熱面過熱度300Kで25%から235%程度の増加が得られた。

(4) 膜沸騰領域の平均熱伝達係数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) 膜沸騰下限界点の過熱度および熱流束の測定値を $\pm 5\%$ 程度で、液体サブクール度に対する1次の補間式で相関できる。

参考文献

- 1) 山田 他5名; 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 他5名; 有限垂直円柱まわりのサブクール膜沸騰熱伝達に関する研究(第2報: 伝熱整理式の改良), 長崎大学工学部研究報告, **36**, 66, (2006), 23-32., 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2006年度年次大会講演論文集(3), 149-150.