

有限垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達の実験 (底面および上面形状の影響)

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 Cylinder (Effect of Bottom and Top Surfaces Configurations)

by

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

The film boiling heat transfer around vertical finite-length silver cylinders was investigated experimentally for quiescent water at atmospheric pressure. The configurations of bottom and top surfaces of silver cylinders are (1) flat bottom and flat top, (2) curved bottom and flat top and (3) flat bottom and curved top, where “flat” refers to “horizontal” and “curved” to “convex hemispherical”. The experiments have been carried out by a quenching method. The diameter of the test cylinder is 32mm and the lateral length is 32mm. 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 temperature is measured using a K-type thermocouple inserted into the center of the test cylinder. The degree of liquid subcooling was varied from 0 to 35K. The effect of bottom and top surfaces configurations on the degree of superheating and the wall heat flux at the lower limit of film boiling was discussed.

Key Words : *Film Boiling, Vertical Cylinder, Bottom and Top Configuration, Heat Transfer, Lower Limit of Film Boiling*

1. まえがき

著者らは大気圧下の水を用いて飽和およびサブクール状態で、(1) 底面および上面が水平な円柱^{1~2)}、(2) 底面が半球状の凸面で上面が水平な円柱^{3~6)}および(3) 底面が水平で上面が半球状の凸面を有する円柱⁷⁾に対する3種類の銀製供試円柱を用いて焼入れ実験を行い、有限垂直円柱まわりに形成される蒸気膜の詳細な観察と冷却曲線の蓄積を図っている。

本研究では、これまでに取得された3種類の有限垂直銀円柱に対して、プール飽和膜沸騰およびサブクール膜沸騰の冷却曲線と伝熱特性(沸騰曲線)に及ぼす円

柱形状の影響、すなわち円柱底面と垂直面あるいは垂直面と円柱上面の接続の影響について比較検討を行っ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に及ぼす円柱形状の影響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)

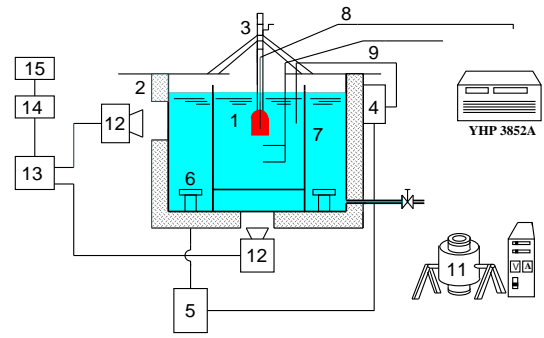
** 生産科学研究科 (Graduate School of Science and Technology)

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

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、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ている。

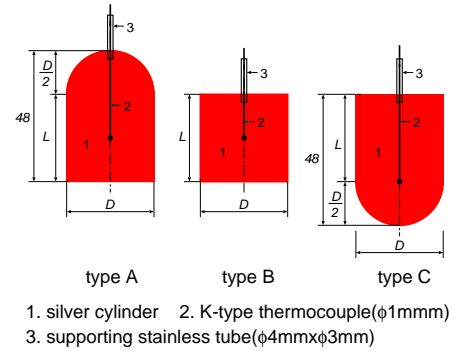
Fig.2 は実験で使用した type A, type B および type C の3種類の供試円柱を示したもので、材質は純度 99.99% の銀である。著者らは type B のような円柱の底面と上面が水平な円柱形状で、飽和膜沸騰¹⁾ では18種類の供試円柱、サブクール膜沸騰²⁾ では7種類の供試円柱を用いて冷却曲線のデータの取得を行ってきたが、この形状の供試円柱の中から、本研究ではアスペクト比 L/D (円柱長さ L と直径 D の比) が1である直径 32mm, 垂直部分の長さ 32mm の供試円柱を基準として、円柱上面に半球状の凸面を付加した形状 type A と円柱底面に半球状の凸面を付加した形状 type C との比較を試みた。表中の A は供試円柱の全伝熱面積, V は体積であり, type A と type C の type B に対する V/A の比は 1.14 である。また, 実験水の液体サブクール度 ΔT_{sub} は type A は $0 \leq \Delta T_{\text{sub}} \leq 30\text{K}$, type B は $0 \leq \Delta T_{\text{sub}} \leq 20\text{K}$, type C は $0 \leq \Delta T_{\text{sub}} \leq 35\text{K}$ である。ここに, 液体サブクール度 ΔT_{sub} は実験水の飽和温度 T_{sat} と実験水の温度 T_{∞} の差 ($\Delta T_{\text{sub}} = T_{\text{sat}} - T_{\infty}$) である。type B の供試円柱で実験水の液体サブクール度が他の供試円柱に比べて狭いのは熱容量が小さいため, 20K 以上のサブクール領域で膜沸騰が実現する時間が非常に短いためである。供試円柱の温度は, ステンレス製支持管 (外径 4mm, 内径 3mm) を介して円柱の軸心上に半球状の凸頂部または水平上面より 32mm (type B を除く。type B は 16mm) の深さまで挿入されているシース径 1mm の K 型熱電対より測定され, 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) 装置でサンプリング間隔 0.25 秒で計測される。

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 °C 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半球状の凸底面の最底部または水平底面の位置が水面より 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, 写真および高速ビデオにより観察した。



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



test cylinder	cylinder size		A [cm ²]	V [cm ³]	V/A [mm]	range of ΔT_{sub} [K]
	D [mm]	L [mm]				
type A	32	32	56.3	34.3	6.09	0 ~ 30
type B	32	32	48.3	25.7	5.33	0 ~ 20
type C	32	32	56.3	34.3	6.09	0 ~ 35

Fig.2 Test cylinders and experimental conditions

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, 銀円柱の内部は空間的に様に冷却される (集中定数系近似) と仮定すると, 円柱の全表面平均の壁面熱流束 q は次式によって与えられる。

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

ここに, c は比熱 ($=234.5\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$), dT/dt は冷却速度, ρ は密度 ($=10490\text{kg}/\text{m}^3$), 単位体積あたりの熱容量 ρc は $2.46 \times 10^6 \text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ である。本実験で採用した銀製の供試円柱では, 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, 集中定数系近似の仮定が成り立つものと考えられる。

本研究では膜沸騰下限界点を冷却速度 dT/dt 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

有限垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達の実験

面熱流束 q_{\min} をそれぞれ次式のように評価する．

$$\Delta T_{\min} = (T - T_{\text{sat}}) \Big|_{\frac{dT}{d\tau}} \Big|_{\min} \quad (2)$$

$$q_{\min} = -\rho c \frac{V}{A} \frac{dT}{d\tau} \Big|_{\min} \quad (3)$$

ここに、 T は伝熱面温度である．

4. 膜沸騰の様相

Fig.2 に示す 3 種類の供試円柱に対する垂直銀円柱まわりの膜沸騰の様相を伝熱面過熱度 ΔT_{sat} 約 350K に対して、Fig.3(a) に液体サブクール度 $\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$ (飽和膜沸騰)の場合、Fig.3(b) に液体サブクール度 $\Delta T_{\text{sub}}=20\text{K}$ (サブクール膜沸騰)の場合を示す．ここに、 ΔT_{sat} は伝熱面過熱度で伝熱面温度 T と実験水の飽和温度 T_{sat} の差 ($\Delta T_{\text{sat}}=T - T_{\text{sat}}$) である．飽和膜沸騰 ($\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$) における沸騰の様相は、伝熱面過熱度 ΔT_{sat} が 250K 以上の温度領域では Fig.3(a) に示すように円柱の全表面は乱れた蒸気膜で覆われているが、図には示していないが 250K より低い温度領域では、円柱底面が水平な type A、type B の円柱では水平底面と垂直面下端側は平滑な気液界面となり、円柱底面が半球状の下向き凸面を有する type C の円柱では下向き凸面の底頂部近傍のみが平滑な気液界面で覆われ、下向き凸面の底頂部近傍以外の円柱表面は乱れた界面の様相を呈して

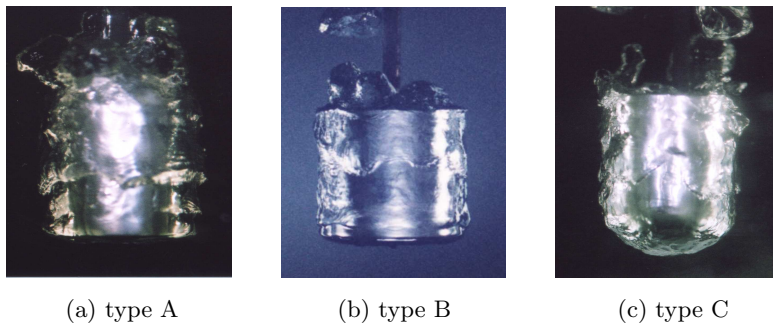


Fig.3(a) Photographs of film boiling around a vertical cylinder at $\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$ and $\Delta T_{\text{sat}} \approx 350\text{K}$

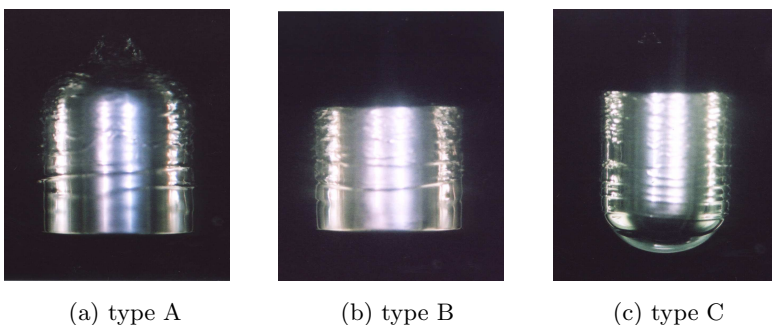


Fig.3(b) Photographs of film boiling around a vertical cylinder at $\Delta T_{\text{sub}}=20\text{K}$ and $\Delta T_{\text{sat}} \approx 350\text{K}$

いる．一方、 $\Delta T_{\text{sub}}=20\text{K}$ のサブクール膜沸騰における沸騰の様相は、type A、type B の場合には水平底面と垂直面下端側で、type C の場合には凸底面とそれに滑らかに接続される垂直面下端側で平滑な界面状態となる．しかし、3 種類の供試円柱とも垂直面上端側の気液界面はリングを有する波状となっている．供試円柱の垂直面に形成される環状のリングを伴うしわは間隔一定で上昇している．蒸気膜は飽和・サブクール膜沸騰とも同時に全面崩壊し、その起点は円柱形状の角の有無で異なり、type A、type B の水平底面を有する円柱では底面端部の角の部分、type C の場合には上面端部の角の部分である．

5. 実験結果および考察

Fig.2 に示す type A、type B および type C の 3 種類の供試円柱に対する実験結果を、供試円柱の伝熱面積と体積が同じ場合と異なる場合に分けて比較検討する．供試円柱の組み合わせの基で比較した特性曲線を Fig.4、Fig.5 および Fig.6 に示すが、(a) は冷却曲線、(b) は冷却速度曲線、(c) は式 (1) で評価した沸騰曲線である．(a) に示す冷却曲線は横軸に冷却時間 τ 、縦軸に無次元温度 $(T - T_{\infty}) / (T_i - T)$ にとり、各々の冷却曲線上に膜沸騰下限界点として●印を示しているが、この膜沸騰下限界点(●印)は冷却速度が最小となる点である．(b) に示す冷却速度曲線は冷却曲線の傾きを、横軸に冷却時間 τ 、縦軸に冷却速度 $dT/d\tau$ にとり、温度測定開始時刻 ($\tau=0$) から●印で示した膜沸騰下限界点までの 0.25 秒のサンプリング間隔で計測された円柱中心温度のデータに対して差分によって求めている．また、(c) に示す沸騰曲線は横軸に伝熱面過熱度 ΔT_{sat} 、縦軸に式 (1) から定められる壁面熱流束 q をとっている．沸騰曲線において、type B の供試円柱で、液体サブクール度 $\Delta T_{\text{sub}}=30\text{K}$ の測定値は供試円柱の熱容量が小さいため取得されていないので、著者らが 7 種類の供試円柱の基で作成した測定値と予測値の相関精度が $\pm 15\%$ である伝熱整理式²⁾を用いて評価した予測値を用いている．なお、特性曲線のパラメータは液体サブクール度 ΔT_{sub} である．

5.1 伝熱面積と体積が同じ供試円柱の比較

Fig.4 は供試円柱の全伝熱面積 A と体積 V が同じ type A と type C の円柱を比較した特性曲線である．

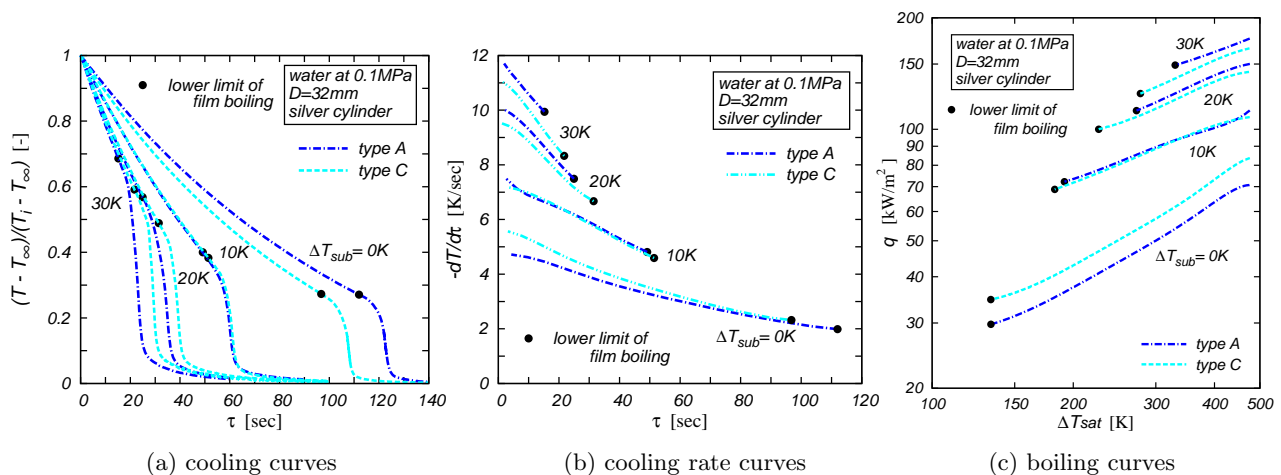


Fig.4 Comparison of characteristic for type A and type C

Fig.4(a) は冷却曲線で、図より、液体サブクール度 ΔT_{sub} が大きくなるに従って冷却曲線の勾配は大きくなり、膜沸騰下限界点に到達するまでの冷却時間は短くなっていることがわかる。上凸面と下凸面での形状相違によって、飽和膜沸騰 ($\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$) では、type Aの方が type Cより膜沸騰下限界点に到達する時間が約15秒長い時間を要している。一方、 $\Delta T_{\text{sub}}=10\text{K}$ のサブクール膜沸騰では、type Aと type Cの冷却曲線はほとんど一致している。 $\Delta T_{\text{sub}}=20\text{K}$ と 30K のサブクール膜沸騰では、膜沸騰下限界点までの到達に要する時間が逆転し type Cの方が type Aより6秒から7秒長い時間を要している。

Fig.4(b) は冷却速度曲線で、図より、type Aと type Cの冷却速度 $dT/d\tau$ は液体サブクール度 ΔT_{sub} が大きくなるに従って大きくなっている。冷却速度 $dT/d\tau$ は、飽和膜沸騰 ($\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$) の場合、type Aは 4.72K/sec から 1.99K/sec の値、type Cは 5.57K/sec から 2.32K/sec の値の値で、type Cの方が type Aより大きな値である。これは、供試円柱まわりに形成される蒸気膜の沸騰現象の観察より明らかのように、飽和の場合には両者の供試円柱の全面は厚い蒸気膜で覆われているものの type Aに比べて type Cの蒸気膜の気液界面の乱れが底面が半球状であるため大きく、冷却が促進されるためであると思われる。一方、サブクール膜沸騰の場合の冷却速度 $dT/d\tau$ は、type Aの方が type Cより、液体サブクール度 $\Delta T_{\text{sub}}=10\text{K}$ では $2\sim 4\%$ 、 20K では $4\sim 5\%$ 、 30K では $6\sim 7\%$ 大きい。液体サブクール度 ΔT_{sub} が大きくなるにつれて冷却速度曲線の傾向が飽和の場合と異なるのは、底面が水平の場合には円柱の端部に向かって蒸気膜の厚さが薄くなるため底面端部の角の影響で円柱側面に形成される蒸気膜の厚さが半球状の凸底面を有する円柱の場合より薄くなり、冷却が促進されたことによるものと考えられる。

Fig.4(c) は膜沸騰領域の沸騰曲線で、壁面熱流束 q

は式(1)より定められるが、単位体積あたりの熱容量 ρc および円柱の全伝熱面積と体積の比 V/A は同じ値であることから、冷却速度 $dT/d\tau$ の大きさに左右される。図より、type Aと type Cの壁面熱流束 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り、●印の記号で示した膜沸騰下限界点は高過熱度側へ移動することがわかる。飽和膜沸騰 ($\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$) の場合の壁面熱流束 q を比較すると、type Cの方が type Aより約 $16\sim 18\%$ 高い値となっている。これは凸底面から側面に形成される蒸気膜の乱れが type Aより大きいことで冷却の促進に寄与したものである。一方、 $\Delta T_{\text{sub}}=10\text{K}$ のサブクール膜沸騰の場合には、type Aと type Cの沸騰曲線は概ね一致しているが、液体サブクール度 $\Delta T_{\text{sub}}=20\text{K}$ および 30K の壁面熱流束 q は type Aの方が type Cより大きくなっている。ちなみに、 $\Delta T_{\text{sub}}=20\text{K}$ では $4\sim 5\%$ 、 30K では $6\sim 7\%$ 大きい。これは、円柱底面端部の角の影響が強くなり円柱側面に形成される蒸気膜の厚さが半球状の凸底面を有する円柱より薄くなり、熱伝達が促進されたことによるものと考えられる。

5.2 伝熱面積と体積が異なる円柱の比較

5.2.1 底面が水平で上面が半球状の凸面を有する円柱と底面および上面が水平な円柱の場合

Fig.5は底面が水平で上面が半球状の凸面を有する円柱 type Aと底面および上面が水平な円柱 type Bを比較した特性曲線である。type Aは円柱上面に半球状の凸面を付加したもので、円柱の直径 D と垂直部長さ L は type Bと同じ 32mm で、円柱の全伝熱面積 A と体積 V の比 V/A は type Bより 14% 大きい。

Fig.5(a) は冷却曲線で、図より、type Aの方が type Bよりいずれの液体サブクール度 ΔT_{sub} においても●印の記号で示した膜沸騰下限界点までの到達に要する時間が長くなっていることがわかる。ちなみに、飽和

有限垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達の実験

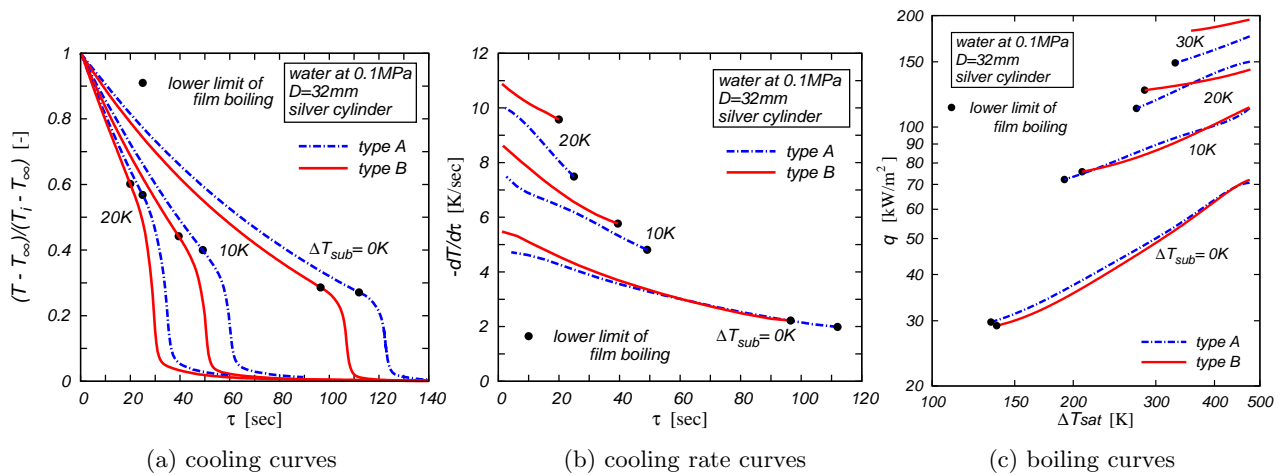


Fig.5 Comparison of characteristic for type A and type B

膜沸騰 ($\Delta T_{sub}=0K$) では約 14 秒, $\Delta T_{sub}=10K$ および 20K のサブクール膜沸騰では, type A の方が type B より約 10 秒長い時間を要している。これは円柱の体積 V の差によるものと思われ, 冷却曲線の傾きが type B に比べてゆるやかになっている。

Fig.5(b) は冷却速度曲線で, 図より, 冷却速度 $dT/d\tau$ は, 飽和膜沸騰 ($\Delta T_{sub}=0K$) の場合, type A は 4.72K/sec から 1.99K/sec の値, type B は 5.48K/sec から 2.22K/sec の値となっており, type B の方が type A より僅かに大きい。一方, $\Delta T_{sub}=10K$ および 20K のサブクール膜沸騰の場合も type B の方が type A より大きな値を示しており, ちなみに, $\Delta T_{sub}=10K$ における冷却速度は約 14~15%, $\Delta T_{sub}=20K$ では約 9~23% 大きい。

Fig.5(c) は膜沸騰領域の沸騰曲線であり, 供試円柱 type A と type B の全伝熱面積と体積の比 V/A は type A の方が type B より 14% 大きいことを踏まえて壁面熱流束 q が式 (1) より定められる。図より, 飽和膜沸騰 ($\Delta T_{sub}=0K$) の場合の壁面熱流束 q は, 膜沸騰の全領域において概ね一致しており, 円柱の上面に付加した半球状の凸面の影響が現れていないことがわかる。 $\Delta T_{sub}=10K$ のサブクール膜沸騰の場合も概ね一致しており, 飽和の場合と同様に円柱上面の形状変化による影響は生じていない。しかし, $\Delta T_{sub}=20K$ の場合の壁面熱流束 q は, 伝熱面過熱度 $\Delta T_{sat}=350K$ 以上では type A の方が type B より 1~5% 大きく, 350K 以下では逆に type B の方が type A より 4~7% 大きくなっている。 $\Delta T_{sub}=30K$ においては, 供試円柱の熱容量が小さいことから type B の測定値が取得されていないので, 著者らが作成した伝熱整理式²⁾を用いて評価した予測値と比較しているが, type B の予測値は type A の値より 11~17% 高い値を示している。これは円柱の上面が半球状の凸面を有しているため, 蒸気膜が厚くなるためである。

5.2.2 底面および上面が水平な円柱と底面が半球状の凸面を有し上面が水平な円柱の場合

Fig.6 は円柱の底面および上面が水平な円柱 type B と底面が半球状の凸面を有し上面が水平な円柱 type C を比較した特性曲線である。type C は円柱底面に半球状の凸面を付加したもので, 円柱の直径 D と垂直部長さ L は type B と同じ 32mm で, 円柱の全伝熱面積 A と体積 V の比 V/A は type B より 14% 大きい。

Fig.6(a) は冷却曲線で, 図より, 飽和膜沸騰 ($\Delta T_{sub}=0K$) の場合の冷却曲線は, 底面形状の影響は現れずほとんど一致している。しかし, $\Delta T_{sub}=10K$ および 20K のサブクール膜沸騰の場合には円柱の底面形状の影響が現れ, type C の方が type B より ●印の記号で示した膜沸騰下限界点に到達するまでに要する時間が長いことがわかる。

Fig.6(b) は冷却速度曲線で, 図より, 冷却速度 $dT/d\tau$ は, 飽和膜沸騰 ($\Delta T_{sub}=0K$) の場合, type B は 5.48K/sec から 2.22K/sec の値, type C は 5.57K/sec から 2.32K/sec の値を示しており, type C の方が type B より僅かに大きい。一方, $\Delta T_{sub}=10K$ および 20K のサブクール膜沸騰の場合, type B の方が type C より大きな値を示しており, ちなみに, $\Delta T_{sub}=10K$ における冷却速度は約 16~20%, $\Delta T_{sub}=20K$ では約 14~28% 大きい。

Fig.6(c) は膜沸騰領域の沸騰曲線であり, 供試円柱 type B と type C の全伝熱面積と体積の比 V/A は type C の方が type B より 14% 大きい。図より, 飽和膜沸騰 ($\Delta T_{sub}=0K$) の場合の壁面熱流束 q は, type C の方が type B より約 16~21% 高い値となっている。これは type C が type B より全伝熱面積と体積の比 V/A が 14% 大きいことが主な要因で, 凸底面から側面に形成される蒸気膜の乱れが type B より大きいことも理由として考えられる。一方, $\Delta T_{sub}=10K$ のサブクール膜沸騰の場合の壁面熱流束 q を比較すると, type B と type C

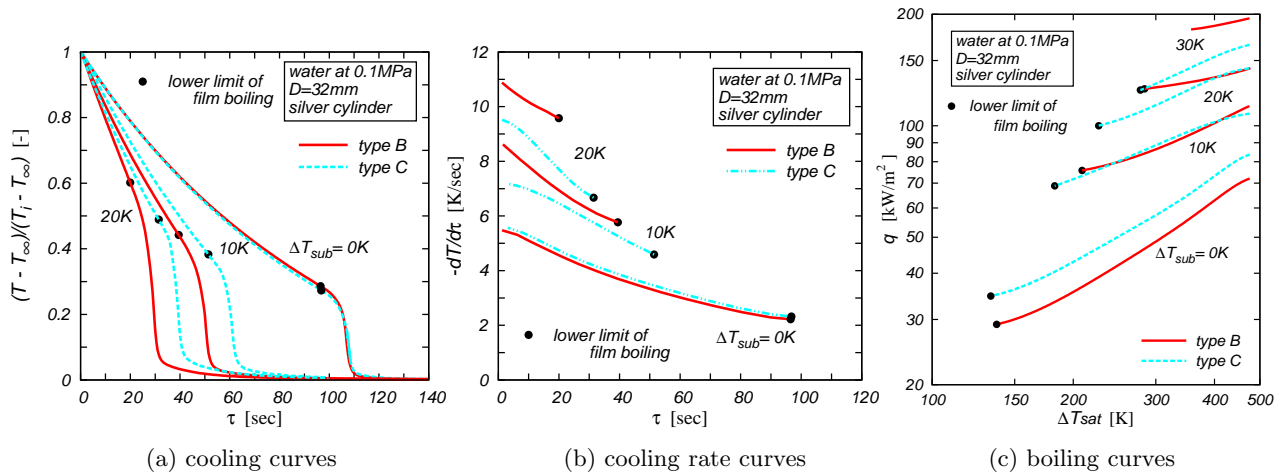


Fig.6 Comparison of characteristic for type B and type C

は概ね一致している。これは、type B の冷却速度 $dT/d\tau$ が type C より大きいことによるもので、ちなみに、伝熱面過熱度 $\Delta T_{sat}=475\text{K}$ では、type B は 8.62K/sec 、type C は 7.19K/sec であることから type B が 20% 大きい。また、 $\Delta T_{sat}=225\text{K}$ では、type B は 5.89K/sec 、type C は 5.07K/sec であるこのことから type B の方が 16% 大きい。 $\Delta T_{sub}=20\text{K}$ の場合には、伝熱面過熱度 $\Delta T_{sat}=400\text{K}$ 以上では type B と type C はほとんど一致しているが、 400K 以下では type B の方が type C より 2~12% 程度大きくなっている。これは円柱側面に形成される蒸気膜の厚さが type C より薄いことで伝熱促進が生じたことによるものと考えられる。 $\Delta T_{sub}=30\text{K}$ においては、type B における壁面熱流束の測定値が取得されていないので、Fig.5(c) と同様に著者が作成した予測式²⁾に基づく予測値と比較しているが、type B の予測値は type C の値より 18~24% 高い値を示している。

5.4 膜沸騰下限界点における伝熱面過熱度および壁面熱流束

Fig.7 は膜沸騰下限界点における伝熱面過熱度 ΔT_{min} を縦軸に、液体サブクール度 ΔT_{sub} を横軸にとり、Fig.4(c)、Fig.5(c) および Fig.6(c) に示した type A、type B および type C の各沸騰曲線上の●印点をプロットしたものである。図より、type A (■印)、type B (○印) および type C (▲印) の膜沸騰下限界点における伝熱面過熱度 ΔT_{min} は液体サブクール度 ΔT_{sub} 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。これらの供試円柱に対して比較すると、飽和膜沸騰 ($\Delta T_{sub}=0\text{K}$) では $\Delta T_{min}=133\text{K}$ で $\pm 1\text{K}$ の差でほとんど一致しており、円柱形状の影響は生じていない。一方、サブクール膜沸騰の液体サブクール度 $\Delta T_{sub}=5\text{K}$ では 146K で $\pm 3\text{K}$ の差で概ね一致しており、飽和と同様に円柱形状の影響は見られない

が、 $\Delta T_{sub} > 10\text{K}$ では、type A と type B の円柱底面に角のある円柱が type C の半球状の凸底面を有する円柱、すなわち底面端部に角のない円柱より高い値を示しており、円柱形状の底面端部の角の影響が現れている。ちなみに、type A と type C の供試円柱では、 $\Delta T_{sub}=20\text{K}$ では type A の方が type C より約 45K 大きい。底面端部に角のある type A と type B を $\Delta T_{sub}=20\text{K}$ において比較すると、type B の方が type A より約 10K 高い結果となっている。図中に示す各供試円柱の相関式は、膜沸騰下限界点における伝熱面過熱度 ΔT_{min} を概ね $\pm 5\%$ 以内で相関できる。

Fig.8 は膜沸騰下限界点における壁面熱流束 q_{min} を縦軸に、液体サブクール度 ΔT_{sub} を横軸にとり、Fig.4(c)、Fig.5(c) および Fig.6(c) に示した type A、type B および type C の各沸騰曲線上の●印点をプロットしたものである。図より、膜沸騰下限界点における壁面熱流束 q_{min} は液体サブクール度 ΔT_{sub} 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。飽和膜沸騰 ($\Delta T_{sub}=0\text{K}$) における q_{min} は約 31kW/m^2 で概ね一致し、 10K 以下の液体サブクール度では円柱底面端部の角の有無による影響は現れていないが、 10K 以上では顕著な相違が認められ、type A および type B の底面端部に角のある円柱が type C の半球状の凸底面を有する円柱より高い壁面熱流束で膜沸騰の下限界となっている。図中に示す各供試円柱の相関式は、膜沸騰下限界点における壁面熱流束 q_{min} を概ね $\pm 5\%$ 程度で相関できる。

6. 結論

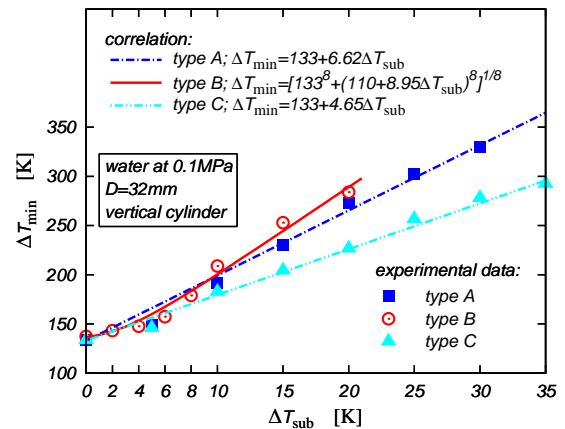
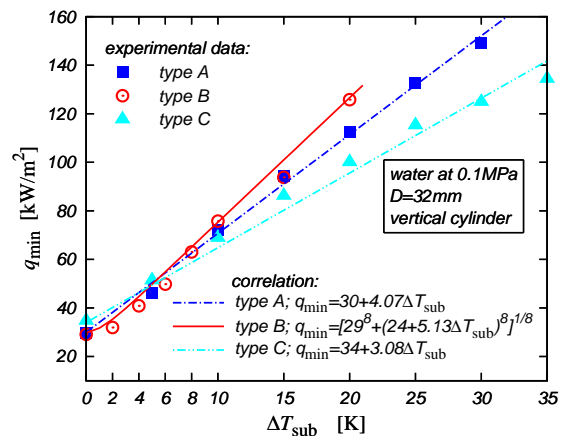
有限垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達に及ぼす円柱形状の影響を調べるために、3種類の銀製の供試円柱を用いて大気圧の条件下で、飽和水およびサブクール水に対して焼入れ実験を行い、比較検討の結果、実験範囲で以下のことが明らかになった。

有限垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達の実験

- (1) 飽和膜沸騰では、円柱まわりの蒸気膜の様相は水平な底面を有する円柱では底面および垂直面下端側で、半球状の凸底面を有する円柱では底面頂部近傍で平滑な界面が形成され、それ以外の円柱表面は乱れた蒸気膜に覆われている。一方、サブクール膜沸騰では液体サブクール度や伝熱面過熱度に依存して平滑な界面領域が拡大する。蒸気膜は飽和・サブクール膜沸騰とも同時に全面崩壊するが、蒸気膜崩壊の起点は円柱形状の角の有無によって異なっている。
- (2) 飽和膜沸騰では、有限垂直円柱の底面形状は冷却速度にほとんど影響を与えないが、サブクール膜沸騰では底面形状は冷却速度に大きく影響を及ぼす。冷却速度は液体サブクール度が増加するとともに増加する。冷却速度は水平な底面を有する円柱が半球状の凸底面を有する円柱よりもかなり高い値を示す。冷却速度に及ぼす円柱上面形状の影響は比較的小さい。
- (3) 飽和膜沸騰では、300Kの伝熱面過熱度での壁面熱流束は水平な底面を有する円柱よりも半球状の凸面を有する円柱が約18%高い値を示す。一方、サブクール膜沸騰では、液体サブクール度が10Kでは3種類の供試円柱とも概ね同じ値を示すが、20Kおよび30Kでは水平な底面を有する円柱が半球状の凸底面を有する円柱よりも高い値を示す。
- (4) 膜沸騰の下限界点における伝熱面過熱度は、飽和膜沸騰では3種類の供試円柱とも約133Kでほとんど一致している。しかし、サブクール膜沸騰では水平な底面を有する円柱が半球状の凸底面を有する円柱よりも高い伝熱面過熱度で膜沸騰が崩壊する。
- (5) 膜沸騰の下限界点における壁面熱流束は、飽和膜沸騰では3種類の供試円柱とも約31kW/m²で概ね一致している。サブクール膜沸騰では水平な底面を有する円柱が半球状の凸底面を有する円柱よりも高い壁面熱流束で膜沸騰の下限界となる。

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

Fig.7 ΔT_{\min} vs. ΔT_{sub} Fig.8 q_{\min} vs. ΔT_{sub}

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.