

種々の端面形状を有する垂直円柱まわりの膜沸騰 (第2報: 膜沸騰下限界点)

茂地 徹*・山田 昭*・桃木 悟*・豊田 香**・山口朝彦*・半田修也***

Film Boiling around Vertical Cylinders with End Surfaces of Various Configurations (2nd Report: Lower Limit Point of Film boiling)

by

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

The wall superheat at the lower limit of film boiling of a vertical finite-length silver cylinder, ΔT_{\min} , was determined experimentally by quenching method for saturated and subcooled water at atmospheric pressure. Five kinds of cylinders were tested where the end surface is flat, hemispherical or conical. The following results were obtained from the experiments. (a) For a cylinder with flat end surfaces, ΔT_{\min} has an average value of 136 K for saturated water, irrespective of the aspect ratio, L/D , where L is the length and D the diameter of the test cylinder. ΔT_{\min} increases linearly with an increase in liquid subcooling, ΔT_{sub} , and exceeds always the thermodynamic limit of liquid superheat (about 225K) for water at atmospheric pressure for ΔT_{sub} larger than 12K. This tendency is similar to the cases of a sphere and a horizontal cylinder obtained experimentally by Dhir and Purohit, and Nishio and Uemura, respectively. (b) For five kinds of cylinders with various end configurations, ΔT_{\min} is irrespective of the end configurations for saturated water. However, in subcooled water, ΔT_{\min} of the cylinder with flat end surfaces has a larger value than those with a hemispherical or conical end surface.

Key words: Lower Limit of Film Boiling, Wall Superheat, Vertical Cylinder, Bottom and Top Configurations

1. まえがき

3次元物体まわりの膜沸騰による冷却過程は原子炉の安全性、金属の焼入れ、材料の製造工程等で生じる。Bromley¹⁾の研究以来、膜沸騰熱伝達に関して多くの研究²⁾が行われ、膜沸騰熱伝達の実用的な相関式が垂直面、水平円柱、球、上向き水平面等のような単一面に対して数多く提案された。しかしながら、熱伝達過程の知見が不十分であるため3次元物体まわりの膜沸

騰熱伝達や伝熱面過熱度の下限界点を正確に予測することは困難である。

3次元物体を覆う蒸気は円柱表面からバルク液体への対流熱伝達を制御するので、3次元物体まわりの膜沸騰においては、底面で発生し、伝熱面に沿って上昇する蒸気の流動とその膜厚が熱伝達の観点から重要な役割をもっている。近年、山田ら^{3,4)}や桃木ら⁵⁾は飽和水とサブクール水に対して水平な端面を有する有限

平成24年12月14日受理

* システム科学部門 (Division of Systems Science)

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

*** 工学研究科博士前期課程 (Graduate School Student, Graduate School of Engineering)

垂直円柱からの膜沸騰熱伝達を解析的かつ実験的に研究を行い、熱伝達の実用的な相関式を提案した。山田ら⁶⁾は原子炉の炉心の緊急冷却における初期過程の熱除去を想定し、半球状の凸底面と水平な上面を有する有限垂直円柱に対する膜沸騰熱伝達について研究した。さらに、山田ら⁷⁾は円錐状の凸底面と水平な上面を有する有限垂直円柱の場合に対する膜沸騰熱伝達について報告した。端面形状の異なるこれらの研究を通して、底面下で発生した蒸気が垂直側面に沿って流れ、最終的に円柱の上面から気泡となって離脱するような有限垂直円柱に対する膜沸騰熱伝達の機構解明が重要であることが明らかにされている。桃木ら^{8,9)}は水平な端面を有する有限垂直円柱と半球状の凸端面を有する有限垂直円柱からの膜沸騰熱伝達との比較によって底面と上面の形状の影響について明らかにした。これらの研究では、著者らによって提案された膜沸騰熱伝達の相関式の適用下限界を明示するために、膜沸騰下限界点における伝熱面過熱度の測定値も示されている。

本研究においては、有限垂直銀円柱からの膜沸騰下限界点における伝熱面過熱度に対する円柱の底面と上面の形状の影響を、著者ら[桃木ら^{5,8,9)}、山田ら^{3,4,6,7)}]の実験で得られた水平、半球状および円錐状の端面を有する5種類の円柱の測定データを用いて検討した。なお、膜沸騰熱伝達に関する垂直円柱の端面形状の影響については第1報¹⁰⁾として本研究報告の中で報告している。

記号(第1報¹⁰⁾で記述した記号は省略する)

- g : 重力加速度
- ℓ : 蒸発潜熱
- q_{min} : 膜沸騰下限界点における壁面熱流束, 式(2)
- ΔT_{min} : $= (T_w - T_{sat})|_{(-dT/d\tau)_{min}}$, 膜沸騰下限界点における伝熱面過熱度
- σ : 表面張力
- 添字
- LS : 飽和水
- VS : 飽和蒸気

2. 実験

2.1 実験装置および実験方法

本実験で使用した実験装置は沸騰槽、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が、実験装置および実験方法の詳細については本研究報告の第1報¹⁰⁾に記述しているので割愛する。

Fig.1は99.99%の純銀で製作された5種類の供試円

柱の断面図を示したものである。Type B, Type Cの底面、Type Dの上面およびType Eの底面と上面は半球状または円錐状に機械加工されている。供試円柱の直径 D は32mm、長さ L は48mm(Type Eは64mm)で、Type Eの円柱を除いてアスペクト比 L/D は1.5である。Fig.1の表に示されている S および V は、それぞれ円柱の全伝熱面積と体積である。供試円柱の底面形状は3グループ: (1) 水平底面を有する形状 Type AとType D, (2) 半球状の凸底面を有する形状 Type BとType E, (3) 円錐状の凸底面を有する形状 Type C, に分けられる。一方、上面形状はType A, Type BおよびType Cは水平で、Type DとType Eは半球状である。主要寸法と熱電対の位置はFig.1に示されている。供試円柱の過渡温度を測定するためにステンレス製支持管を介して円柱の中心軸上にシース径1mmのK型熱電対が設置され、温度履歴は横河・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)を用いて0.25秒のサンプリング間隔で計測される。

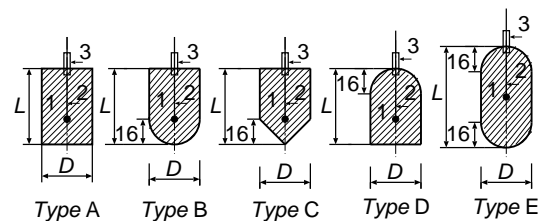
2.2 伝熱面温度の測定

供試円柱は高い熱伝導率を有する銀で製作されているので供試円柱の内部は一様に冷却されると仮定し、円柱の温度は集中定数系として計算した。したがって、全表面平均の壁面熱流束 q は式(1)によって与えられる。

$$q = -\rho c(V/S)(dT/d\tau) \quad (1)$$

ここに、 c , S , V および ρ はそれぞれ比熱、全伝熱面積、円柱の体積および密度である。 T と τ は円柱の温度と冷却開始からの経過時間である。

本研究では膜沸騰の下限界点は冷却速度 $(-dT/d\tau)$



1. Test cylinder 2. K-type thermocouple(ϕ 1mm)
3. Supporting stainless tube(ϕ 4mmx ϕ 3mm)

Type	cylinder size		S [cm ²]	V [cm ³]	V/S [mm]
	D [mm]	L [mm]			
A	32	48	64.3	38.6	6.00
B			56.3	34.3	6.09
C			51.6	30.0	5.82
D			56.3	34.3	6.09
E			64	64.3	42.9

Fig.1 Test cylinder

が最小値をとる点として定義し, そのときの伝熱面過熱度を ΔT_{\min} とする. 膜沸騰の下限界点における壁面熱流束 q_{\min} は式 (2) より与えられる.

$$q_{\min} = \rho c(V/S) \left| \frac{dT}{d\tau} \right|_{\min} \quad (2)$$

式 (1) と式 (2) の集中定数系近似の仮定は, Type A の円柱による 2次元非常定熱伝導計算の数値計算結果と 0.04 以下と評価されるピオ一数により, 妥当なものであると考えられる. 式 (1) および式 (2) から計算される壁面熱流束に対する測定値の最大誤差は15%未満と評価された. さらに, ステンレス製支持管からの熱損失はサブクール水の条件下で最大2%未満と推定された.

3. 実験結果と考察

5種類の供試円柱に対して, 式 (1) で得られる沸騰曲線については本研究報告の前報¹⁰⁾で検討した. 本報告においては, 膜沸騰下限界点における伝熱面過熱度 ΔT_{\min} と壁面熱流束 q_{\min} について考察する.

3.1 Type A の ΔT_{\min} と q_{\min} に及ぼすアスペクト比と液体サブクール度の影響

Fig.2(a) は飽和水のもとで, 両端面が水平な円柱 Type A の膜沸騰下限界点における伝熱面過熱度 ΔT_{\min} を, 横軸にアスペクト比 L/D をとって示している. 図より明らかなように, ΔT_{\min} はアスペクト比 L/D に依存せず $0.08 \leq L/D \leq 20$ の範囲においておおむね一定の値 136K をとることがわかる. これは Type A の円柱の下端部の角まわりの蒸気膜が局部的に崩壊しやすく, $0.08 \leq L/D \leq 20$ の範囲内では全伝熱面上の蒸気膜の崩壊がほとんど同時に生じることによるものと考えられる. 茂地ら^{11,12)}によれば, 水平な底面と垂直側面で構成される角まわりの蒸気膜の厚さは非常に薄くなる. これは, 水平底面下の蒸気は中心部から蒸気膜の厚さを減少させながら端部の角へ流れ, さらに, 垂直側面の蒸気は下端部の角から蒸気膜の厚さが厚くなる上向きへ流れるためである.

Fig.2(a) には Berenson¹³⁾, Dhir & Purohit¹⁴⁾ および西尾¹⁵⁾ によって提案された上向き水平面, 球および水平円柱に対する相関式を用いて計算された ΔT_{\min} の値が示されている. Type A の円柱で得られた 136K の ΔT_{\min} の値は Berenson による上向き水平面に対する値 80K, Dhir & Purohit による球に対する値 101K および西尾による水平円柱に対する値 104K のいずれよりも大きい. これは底面端部と上面端部に鋭角(直角)部を有する Type A の円柱の方が上向き水平面, 水平円柱および球の場合よりも高い温度で蒸気膜の局部的

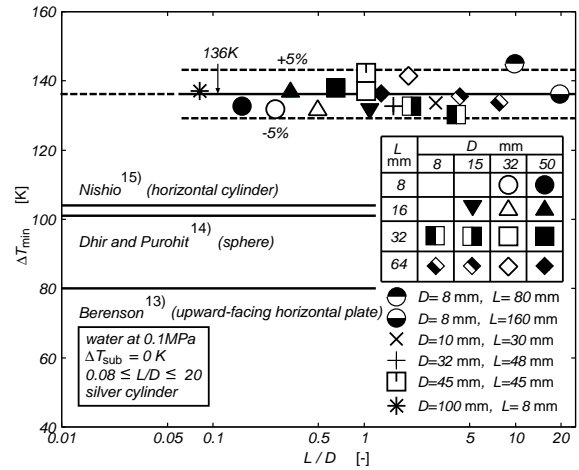


Fig.2(a) Effect of aspect ratio L/D on ΔT_{\min} for Type A cylinders

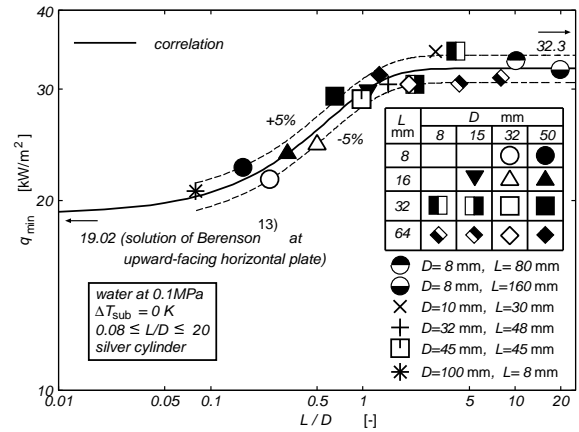


Fig.2(b) Effect of aspect ratio L/D on q_{\min} for Type A cylinders

崩壊を生じさせることを示している.

Fig.2(b) は飽和水のもとで, 両端面が水平な円柱 Type A の膜沸騰下限界点における壁面熱流束 q_{\min} , すなわち式 (2) で計算される q_{\min} を, 横軸にアスペクト比 L/D をとって示している. Fig.2(b) より, q_{\min} の値は L/D が 2 より大きい場合には 32.3 KW/m^2 へ, $L/D \rightarrow 0$ に対しては 19.02 KW/m^2 , すなわち Berenson¹³⁾ の上向き水平面に対する解析解へ漸近することがわかる. Fig.2(a) に示すように ΔT_{\min} はおおむね一定であるけれども, q_{\min} はアスペクト比 L/D に依存して変化する. 全測定値は $\pm 5\%$ の精度で式 (3) によって整理される.

$$q_{\min} = 0.09 \rho_{VS} \ell \left[\frac{g \sigma (\rho_{LS} - \rho_{VS})}{(\rho_{LS} + \rho_{VS})^2} \right]^{1/4} \times \left[\frac{1.70}{1 + 0.70 e^{-2.05(L/D)}} \right] \quad (3)$$

Fig.3 はアスペクト比 L/D が 0.5 から 2 までの両端面が水平な 8 種類の円柱 Type A に対する ΔT_{min} について液体サブクール度 ΔT_{sub} の影響を示したものである。 ΔT_{min} は ΔT_{sub} が 5K より小さい場合にはアスペクト比 L/D の影響は弱くおおむね一定な 136K の値である。しかし、 ΔT_{sub} が 5K より大きい場合には、 ΔT_{min} は ΔT_{sub} に強く依存し、 ΔT_{sub} の増大とともに直線的に増大する。 ΔT_{min} と ΔT_{sub} の直線的な関係は、 Dhir & Purohit によって与えられる球の相関式¹⁴⁾ や西尾・上村によって与えられる水平円柱の相関式¹⁶⁾ でも同様な傾向がみられる。 ΔT_{sub} が 12K より大きい領域では著者らによって測定された ΔT_{min} の値、 Dhir & Purohit や西尾・上村による ΔT_{min} の値は、 Lienhard¹⁷⁾ が示す水の伝熱面過熱度の熱力学的下限界 225K を越えている。サブクール水においては、円柱を覆う蒸気膜は非常に薄くなるので、 ΔT_{min} に及ぼす底面の鋭角(直角)の影響は厚い蒸気膜で覆われる飽和水の場合より顕著に現れる。サブクール水においても、蒸気膜の崩壊は飽和水の場合と同様に、円柱の垂直下端部の角で始まり、 Fig.2(a) で記述しているように、局所的先行崩壊が垂直面に沿って上向きに伝播し、有限垂直円柱を覆う蒸気膜の全面崩壊を引き起こしている。

3.2 ΔT_{min} に及ぼす底面と上面形状の影響

Fig.4 は 5 種類の円柱 Type A, Type B, Type C, Type D および Type E に対する膜沸騰下限点における伝熱面過熱度 ΔT_{min} を、横軸に液体サブクール度 ΔT_{sub} をとって示したものである。両端面が半球状の形状を有する円柱 Type E を除けばアスペクト比 L/D は 1.5 で、 Type A, Type B, Type C および Type D の直径 D は 32mm、長さ L は 48mm である。図中には、有限垂直円柱との比較のため、 Dhir & Purohit¹⁴⁾ の球に対する相関式に基づく ΔT_{min} の値を点線で示している。 Fig.4 より、飽和水 ($\Delta T_{sub}=0K$) に対する ΔT_{min} は有限垂直円柱の底面形状および上面形状への依存性はなく、おおむね 133K の一定値となっていることがわかる。5 種類の供試円柱に対する ΔT_{min} の値は式 (4) のごとく ΔT_{sub} の関数として与えられ、これらの計算値は Fig.4 に実線で描かれている。

ΔT_{min} に及ぼす上面形状の影響は一般的に弱いこと

$$\begin{aligned}
 \text{Type A cylinder: } \Delta T_{min} &= 133 + 7.94\Delta T_{sub} \text{ [K]} \\
 \text{Type B cylinder: } \Delta T_{min} &= 133 + 4.65\Delta T_{sub} \text{ [K]} \\
 \text{Type C cylinder: } \Delta T_{min} &= 133 + 5.41\Delta T_{sub} \text{ [K]} \\
 \text{Type D cylinder: } \Delta T_{min} &= 133 + 6.62\Delta T_{sub} \text{ [K]} \\
 \text{Type E cylinder: } \Delta T_{min} &= 132 + 2.3\Delta T_{sub} \\
 &\quad + 0.08\Delta T_{sub}^2 \text{ [K]}
 \end{aligned} \tag{4}$$

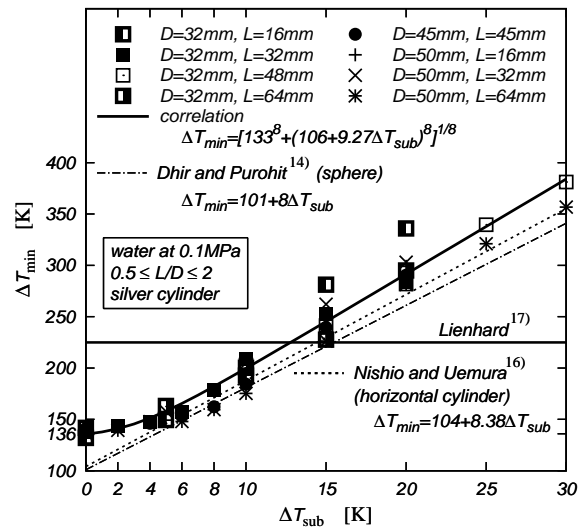


Fig.3 Effect of liquid subcooling on ΔT_{min} for Type A cylinders

が両端面が水平な円柱 Type A と底面が水平で上面が半球状の凸面を有する円柱 Type D の比較から明らかである。水平な上面を有する Type A, Type B および Type C の円柱による比較から、 Type A の ΔT_{min} が Type B および Type C の円柱よりも大きいことがわかる。これは液体サブクール度の増加に伴って水平底面端部の鋭い角の影響で蒸気膜がより薄くなり、崩壊しやすいためと考えられる。

円柱の底面が水平もしくは円錐状の場合には、蒸気膜の崩壊は下端部の角の部分で発生する。両端面が半球状の凸面を有する円柱 Type E の場合には角が存在しないため、蒸気膜の崩壊は上面の支持管まわりで始まり、 ΔT_{min} の値は Type A, Type B, Type C および Type D の 4 種類の円柱の値よりも小さい。

西尾ら¹⁸⁾ や大竹・小泉¹⁹⁾ はサブクール膜沸騰における蒸気膜の伝播的崩壊による極小膜沸騰条件の研究において、金属の焼入れのような生産工程で現れる支持部、突起部あるいは尖った部分が weak spot となって蒸気膜の局所的先行崩壊が生じることを報告している。

Fig.5 は液体サブクール度 $\Delta T_{sub}=20K$ における蒸気膜崩壊直前の種々の端面形状を有する垂直円柱まわりの膜沸騰の様相を 1/8000 秒のシャッター速度で撮影したものであり、 ΔT は膜沸騰を写真撮影した時の伝熱面過熱度である。蒸気膜の崩壊は Type A, Type C および Type D の円柱の場合には下端部角で、 Type B の円柱においては上面端部で始まる。 Type E の円柱においては、蒸気膜は Dhir & Purohit¹⁴⁾ の球による実験で報告されている支持管での崩壊と同様に半球状凸上面の支持管の取付箇所でも崩壊する。

4. 結論

水平、半球状および円錐状の凸底面を有する5種類の有限垂直銀円柱まわりの膜沸騰の下限界点が、大気圧の条件下で飽和水およびサブクール水による焼入れ実験で確定された。実験から以下の結果が得られた。

(a) 両端面が水平な円柱においては、 ΔT_{min} に及ぼすアスペクト比 L/D の影響は小さく、 ΔT_{min} は飽和水ではおおむね 136K で一定である。サブクー

ル水では、 ΔT_{min} は液体サブクール度の増加とともに増大し、12K より大きな液体サブクール度においては、 ΔT_{min} の値は大気圧の飽和水に対して熱力学的限界過熱度 (約 225K) を越える。この傾向は Dhir & Purohit¹⁴⁾ や西尾・上村¹⁶⁾ によって実験的に得られた球や水平円柱の場合と同様である。

(b) 飽和水においては、5種類の ΔT_{min} は円柱の底面

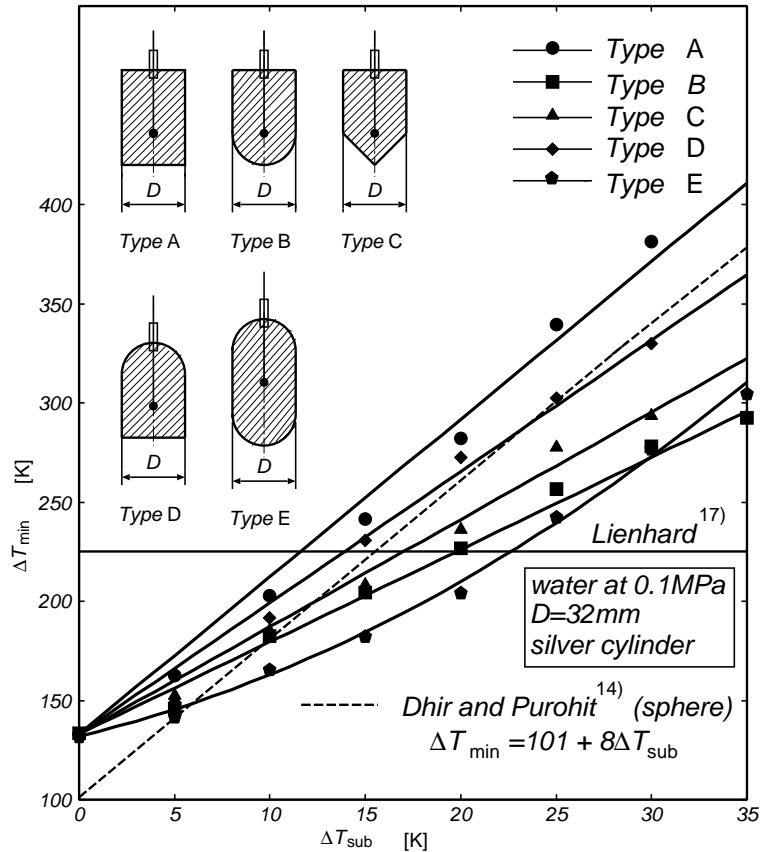


Fig.4 Effects of bottom and top configurations on ΔT_{min}

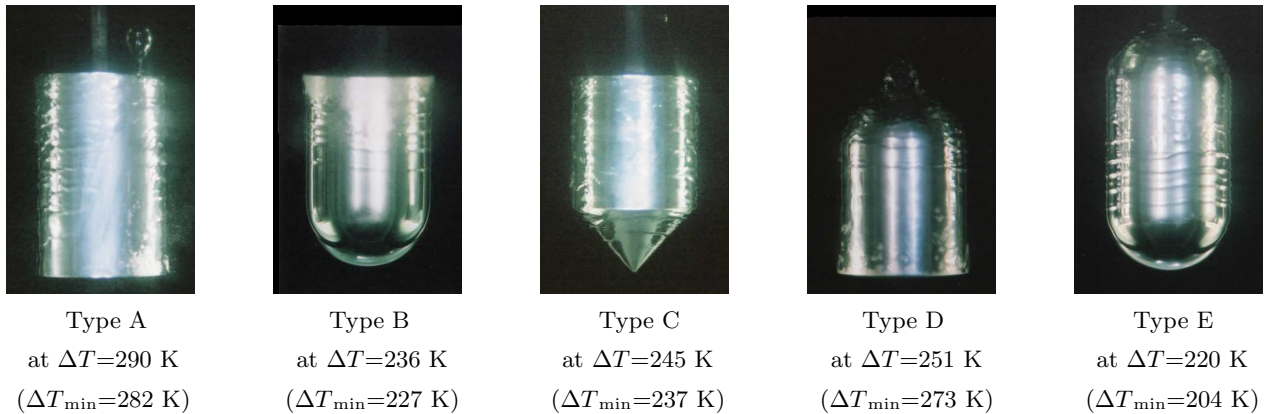


Fig.5 Photographs of film boiling around vertical cylinders with end surfaces of various configurations close to local collapse of a vapor film at $\Delta T_{sub}=20$ K, taken with the shutter speed of 1/8000 seconds

や上面の形状には無関係でおおむね 133K で一定である。しかしながら，サブクール水においては， ΔT_{\min} は半球状の凸端面または円錐状の凸端面を有する円柱よりも両端面が水平な円柱の方が高い値をとる。

参考文献

- 1) L. A. Bromley; Heat Transfer in Stable Film Boiling, *Chem. Eng. Prog.*, Vol.46, No.5, pp.221-227, 1950.
- 2) 日本機械学会編; 沸騰熱伝達と冷却, pp.128-156, 1989.
- 3) 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), Vol.70, No.695, pp.1762-1768, 2004.
- 4) 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), Vol.73, No.732, pp.1715-1722, 2007.
- 5) S. Momoki, T. Yamada, T. Shigechi, K. Kanemaru, T. Yamaguchi; Film Boiling around a Vertical Cylinder with Top and Bottom Horizontal Surfaces, *Proc. of the 2007 ASME-JSME Thermal Engineering Summer Heat Transfer Conference*, HT2007-32733, CD-ROM, 2007.
- 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*, Vol.39, No.3, pp.166-177, 2010.
- 7) 山田 昭, 豊田 香, 茂地 徹, 桃木 悟, 山口朝彦; 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; 長崎大学工学部研究報告, Vol.41, No.76, pp.13-19, 2011.
- 8) S. Momoki, K. Toyoda, T. Yamada, T. Shigechi, T. Yamaguchi; Experiments and Analysis on Film Boiling Heat Transfer around a Finite-length Vertical Cylinder with a Convex Surface Facing Downward, *J. Power and Energy Systems*, Vol.3, No.1, pp.182-193, 2009.
- 9) S. Momoki, T. Shigechi, K. Araki, T. Yamada, K. Toyoda, T. Yamaguchi, J. Odgerel; Effect of the the Bottom and Top Configurations on Pool Film Boiling around a Vertical Finite-length Cylinder, *Proc. of the ASME/JSME 2011 8th Thermal Engineering Joint Conference*, AJTEC2011-44122, CD-ROM, 2011.
- 10) 茂地 徹, 山田 昭, 桃木 悟, 豊田 香, 山口朝彦, 半田修也; 種々の端面形状を有する垂直円柱まわりの膜沸騰 (第 1 報: 膜沸騰熱伝達); 本研究報告 (Vol.43, No.80, 2013)
- 11) T. Shigechi, N. Kawae, Y. Tokita, T. Yamada; Film Boiling Heat Transfer from a Horizontal Circular Plate Facing Downward, *JSME Int. J., Series II*, Vol.32, No.4, pp.646-651, 1989.
- 12) T. Shigechi, T. Yamada, S. Momoki, K. Kanemaru, T. Yamaguchi; Effect of Horizontal Bottom Surface on Film Boiling Heat Transfer from a Vertical Cylinder, *Proc. of the 5th ASME/JSME Joint Thermal Engineering Conference*, AJTE99-6360, CD-ROM, 1999.
- 13) P. J. Berenson; Film-Boiling Heat Transfer from a Horizontal Surface, *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, Vol.83, No.3, pp.351-358, 1961.
- 14) V. K. Dhir and G. P. Purohit; Subcooled Film Boiling Heat Transfer from Spheres, *Nucl. Eng. Des.*, Vol.47, pp.49-66, 1978.
- 15) S. Nishio; Prediction Technique for Minimum-Heat-Flux(MHF)-Point Condition of Saturated Pool Boiling, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.30, No.10, pp.2045-2057, 1987.
- 16) 西尾茂文, 上村光宏; 静止水の冷却能力に関する実験的研究(サブクール度の影響), *熱処理*, Vol.23, No.5, pp.260-265, 1983.
- 17) J. H. Lienhard; Corresponding States Correlations of the Spinodal and Homogeneous Nucleation Limits, *ASME J. Heat Transfer*, Vol.104, pp.379-381, 1982.
- 18) S. Nishio, M. Uemura, K. Sakaguchi; Film Boiling Heat Transfer and Minimum-Heat-Flux(MHF)-Point Condition in Subcooled Pool Boiling, *JSME Int. J., Series II*, Vol.30, No.266, pp.1274-1281, 1987.
- 19) H. Ohtake and Y. Koizumi; Study on Propagative Collapse of a Vapor Film in Film Boiling (Mechanism of Vapor-Film Collapse at Wall Temperature above the Thermodynamic Limit of Liquid Superheat), *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.47, pp.1965-1977, 2004.