

# 有限長の垂直円柱まわりの過渡膜沸騰熱伝達に関する研究 (第4報：液体サブクール度の影響)

山田 昭\*・茂地 徹\*  
桃木 悟\*・金丸 邦康\*

## Study on Transient Film Boiling Heat Transfer around a Vertical Finite-Length Cylinder (4th Report : Effect of Liquid Subcooling)

by

Takashi YAMADA\*, Toru SHIGECHI\*, Satoru MOMOKI\*  
and Kuniyasu KANEMARU\*

The effect of liquid subcooling on the film boiling heat transfer from a vertical finite-length silver cylinder was investigated experimentally for water at atmospheric pressure. The experiments have been carried out by a transient method, i.e., quenching method. The diameter and length of the cylinder used in the experiment are, respectively, 45mm and 45mm. The liquid subcooling was varied from 2 to 20K. As a result, the average heat flux increases with an increase in liquid subcooling. The film boiling heat transfer was enhanced by 15 to 220% with an increase in liquid subcooling. The minimum heat flux increases linearly with liquid subcooling.

### 1. まえがき

金属の焼入れ、材料の製造工程、緊急冷却時の原子炉等で発生する3次元物体まわりの膜沸騰熱伝達を適切に予測することは実用上重要な課題である。金属の焼入れの伝熱に関しては多くの沸騰研究<sup>(1)</sup>が発表されているものの現状ではまだ知見が不足しており、3次元物体まわりの膜沸騰伝熱特性を十分な精度で適切に推定することは困難である。著者らは、3次元物体として金属の焼入れで用いられる有限長さの垂直銀円柱を対象とした飽和膜沸騰熱伝達の伝熱特性に関する研究<sup>(2)~(6)</sup>を行い、過渡実験から得られた全ての測定データを15%以内で相関できる伝熱整理式を作成した<sup>(7)</sup>。さらに、この伝熱整理式を円柱表面の対流境界条件とした2次元非定常熱伝導解析により、熱伝導率が銀より低いステンレス等の材質の焼入れ時の冷却曲線を推定する方法を測定データとの比較から確立した<sup>(8)</sup>。

3次元物体まわりで膜沸騰熱伝達が発生する伝熱機

器の設計や安全性等に関して検討を行うためには、さらに、液体が飽和温度より低くサブクールされた条件下での膜沸騰熱伝達や膜沸騰領域と遷移沸騰領域の境界点、つまり膜沸騰熱流束の下限界となる極小熱流束点(極小熱流束と極小熱流束点過熱度)を把握することが重要である。

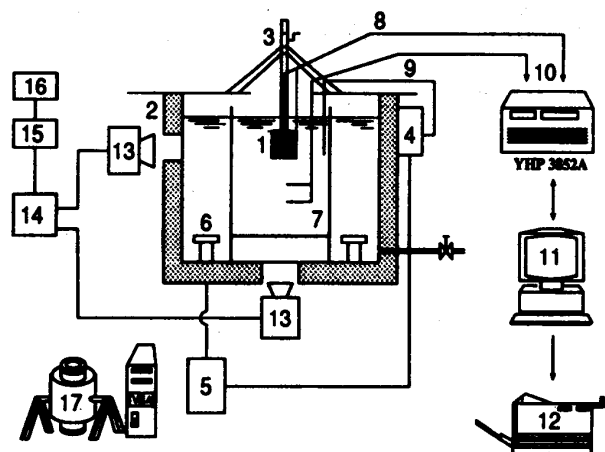
本報では、試験液体(イオン交換水)が98℃から80℃までの範囲で膜沸騰特性と極小熱流束点について液体サブクール度の影響を明らかにするために、大気圧の静止水中に有限長さの垂直銀供試円柱を浸漬する過渡的方法(焼入れ)により実験を行ったので、その結果について報告する。

### 2. 実験装置および実験方法

Fig.1は過渡膜沸騰熱伝達の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

平成13年4月20日受理

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



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. Personal computer  
12. Printer 13. Video camera 14. Video cassette recorder  
15. Digital AV mixer 16. Video monitor 17. Electric furnace

Fig.1 Schematic of experimental apparatus

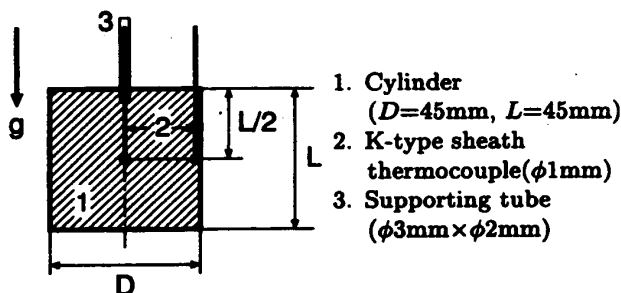


Fig.2 Test cylinder

る。沸騰槽はステンレス製で、内寸法が450mm×450mm×750mmの大きさを有する容器である。沸騰槽の側面および底面には沸騰現象を観察するための窓が設けられている。沸騰槽の底部には試験液体の昇温を行うため2kW容量の浸漬型加熱器を2個設置している。沸騰槽の内側には300mm×300mm×600mmのガラス箱を設置して、加熱器のまわりで発生した気泡が伝熱体周囲の静止水を乱さないようにしている。実験中のバルク液体温度は温度調節器で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ており、 $D$ は円柱の直径で45mm、 $L$ は円柱の長さで45mmである。供試円柱には酸化防止と高熱伝導率の観点から純度99.99%の銀を用いた。供試円柱は外径3mm、内径2mmのステンレス管により支持されている。供試円柱の過渡温度はFig.2に示す円柱中心部と側面から1mm内側の中央部の2ヶ所に装着されている

シース径1mmのK型熱電対によって0.4秒のサンプリング間隔で測定され、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装置を介してパソコン上に記録される。実験前に、供試円柱表面はダイヤモンドコンパウンドで鏡面仕上げし、さらに、エチルアルコールで清掃後、垂直の姿勢で電気炉によって600℃まで加熱される。その後、所定のサブクール度に保たれた静止水中に昇降装置を介して円柱底面が水面から約100mmの深さに到達するまで浸漬される。また、冷却中の円柱まわりの沸騰の様相を目視、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計測

伝熱体の材質には熱伝導率の大きい銀を用いているので、伝熱体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 $q$ を次式で計算する。

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

ここに、 $A$ : 全伝熱面積、 $c$ : 比熱、 $T$ : 温度、 $V$ : 体積、 $\rho$ : 密度、 $\tau$ : 時間、 $dT/d\tau$ : 冷却速度である。伝熱体の温度分布が一様であるという仮定の妥当性は、円筒座標系で2次元の非定常熱伝導計算により検討し確認している。ちなみに、本実験範囲では、膜沸騰領域でのビオー数は0.04程度であるので、集中定数系の仮定は妥当なものであると考える。

### 4. 結果および考察

#### 4.1 沸騰現象の観察

Fig.3は銀円柱の底面が大気圧水面下約100mmの位置に維持された直径45mm、長さ45mmの垂直銀円柱まわりの膜沸騰の様相を1/8000秒で撮影した静止写真の一例を示したもので、過熱度 $\Delta T_{\text{sat}} \approx 360\text{K}$ の場合の液体サブクール度の影響について比較したものである。Fig.3(a)は液体サブクール度 $\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$ の場合、Fig.3(b)は $\Delta T_{\text{sub}}=10\text{K}$ の場合、Fig.3(c)は $\Delta T_{\text{sub}}=15\text{K}$ の場合で、これらの沸騰現象は浸漬して40秒後、25秒後および20秒後に相当する。これらの写真や目視による観察結果から以下のことが明らかとなった。本実験範囲では、垂直円柱底面下に形成される蒸気膜の気液界面は平滑な界面であるが、垂直面や円柱上面の性状について記述すると、Fig.3(a)に示した飽和条件下では垂直面を覆う蒸気膜の気液界面は底面に近い垂直部分を除いて波状となっており、垂直面の上端部および円柱

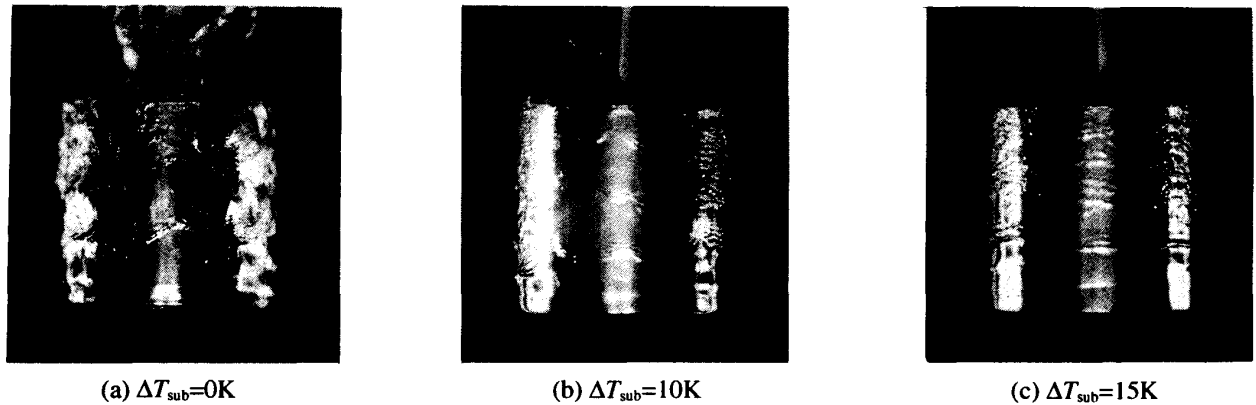


Fig.3 Photographs of film boiling around a vertical cylinder with  $D=45\text{mm}$  and  $L=45\text{mm}$  at  $\Delta T_{\text{sat}}=360\text{K}$

の頂部(上向き水平部分)では、乱れた様相を呈している。一方、Fig.3(b)およびFig.3(c)のサブクール条件下では沸騰様相の観察から判るように、円柱の垂直面の蒸気膜表面に垂直方向に一定の間隔を保ってリング状のしわが形成されている。垂直面のリング状のしわは飽和条件下の $\Delta T_{\text{sat}}=200\text{K}$ 以下の低過熱度域でも形成されているが、リング状のしわが垂直面上で最初に発生する位置は液体サブクール度の増大とともに高くなり、平滑な気液界面の領域が拡大していることがわかる。また、このリング状のしわが形成される間隔は液体サブクール度の増大とともに狭くなっている。垂直円柱側面の蒸気膜表面に形成されるこの様なリング状のしわについては大気圧下で行われたR-113による大竹・西尾<sup>(9)</sup>のサブクール膜沸騰実験においても報告されている。

Fig.3(a)に示している飽和条件下とFig.3(b)およびFig.3(c)に示しているサブクール条件下での膜沸騰現象の相違は円柱上面にあることが両者の観察結果から明らかである。Fig.3(a)の飽和膜沸騰条件下では円柱上面の蒸気膜表面(気液界面)から大きな合体気泡が離脱して常に乱れた厚い蒸気膜が形成されている。一方、Fig.3(b)およびFig.3(c)のようなサブクール膜沸騰条件下ではサブクール度が大きくなる程蒸気の生成量が抑制されるため円柱表面に形成される蒸気膜の厚さは薄くなる。従って、円柱上面から離脱する気泡は小さくなるため蒸気膜の乱れは抑制される。また、円柱側面の気液界面の波状性もサブクール度が大きくなる程抑制されるようになる。さらに、垂直円柱まわりの沸騰の全般的な様相について補足すると、浸漬後、数秒間は、バルク液体との急激な接触により円柱全表面は乱れた蒸気膜で覆われ、安定な蒸気膜が形成されるまで過渡的の沸騰状態が存在する。浸漬後7～8秒経過すると、円柱は全面が安定した蒸気膜で覆われるようになる。前述したように、円柱底面および底面に近い垂直

部分は安定で平滑な気液界面であるのに対して、垂直面上方および円柱上面は波状性を伴った気液界面になっている。蒸気膜の崩壊は円柱の垂直面下端部より始まり上方へと瞬間的に全面に伝播し、以後遷移沸騰領域および核沸騰領域へと移行していく。

#### 4.2 冷却曲線

Fig.4は円柱中心部と円柱側面から1mm内側の中央部との温度差  $T_c - T_s$  を冷却時間  $\tau$  に対して示している。円柱浸漬後の約7秒間はバルク液体との接触により円柱表面は過渡的膜沸騰の状態にある。従って、浸漬直後は円柱表面の急速な冷却で、円柱中心では温度の時間的遅れが生じて両者の温度差は大きい。その後は両者の温度差は小さくなり安定した膜沸騰状態になる。安定した膜沸騰領域においては、液体サブクール度 $\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$ の飽和膜沸騰では両者の温度差は最大2K程度と小さいもので、この温度差は著者が作成した飽和膜沸騰の伝熱整理式から導かれた熱伝達係数を円柱表面の境界条件に適用して得られた円柱内部の温度分布シミュレーション結果と一致している。一方、サブクール条件下では、液体サブクール度 $\Delta T_{\text{sub}}=2\text{K}$ ,  $4\text{K}$ ,  $10\text{K}$ ,  $15\text{K}$ ,  $20\text{K}$ と大きくなるに従って安定した膜沸騰領域での両者の温度差は $4\text{K}$ ,  $5\text{K}$ ,  $7\text{K}$ ,  $8\text{K}$ ,  $12\text{K}$ と飽和膜沸騰に比べて大きな温度差が生じ、温度の時間的遅れがより顕著であることがわかる。図中の・印の記号は膜沸騰の下限界点を示したもので、このことに関しては後述する。

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時の円柱中心での温度の時間変化を示した冷却曲線(太実線)と冷却速度曲線(細実線)である。横軸は冷却経過時間  $\tau$  で単位は秒、縦軸は円柱中心温度および冷却速度 $dT/d\tau$ である。図中の冷却曲線および冷却速度曲線は供試円柱の中心温度がバルク液体温度に達するまでを描いており、Fig.5(a),

Table 1 Lower limit point of film boiling

$\Delta T_{\text{sub}}$ [K]	$\tau$ [sec]	$T$ [°C]	$-dT/d\tau$ [K/sec]
0	144.8	234.8	1.405
10	58.8	318.5	3.839
20	22.0	443.0	6.331

Fig.5(b)およびFig.5(c)は液体サブクール度 $\Delta T_{\text{sub}}$ がそれぞれ 0K, 10K および 20K の場合である。それぞれの曲線上に1つの●印の記号が付されているが、これは冷却曲線の勾配、すなわち冷却速度が最小となる点で、膜沸騰の下限点を示しており、これらの値をTable 1に示す。これらの図表より液体サブクール度が増大するに従って、下限点に達する時間は短くなり、下限点における冷却速度が大きくなることがわかる。ここに、 $\Delta T_{\text{sub}}$ は液体サブクール度で飽和温度とバルク液体温度の差である。

Fig.6は全実験データに対する円柱中心の冷却曲線を、縦軸に無次元温度  $(T-T_{\infty})/(T_i-T_{\infty})$  をとって示したものである。 $T$ ,  $T_i$ および $T_{\infty}$ はそれぞれ円柱中心温度、測定開始時の円柱中心温度およびバルク液体温度である。各冷却曲線上にはFig.4およびFig.5と同様に、膜沸騰の下限点(●印)を示すとともに供試円柱の中心温度がバルク液体温度に達するまでを描いている。この図からも、液体サブクール度が増大するに従って、下限点に達する時間が短くなり、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、次節に示す膜沸騰特性は供試円柱の冷却開始( $\tau=0$ )から●印の記号で示した下限点(極小熱流束点)までのデータに対して検討されている。

### 4.3 沸騰曲線

円柱中心部と円柱側面から1mm内側の中央部とは冷却中の温度履歴に相違がみられ、液体サブクール度が大きくなる程、両者の温度差が大きくなることがFig.4で明らかになっているが、それぞれの温度履歴を用いて集中定数近似の仮定で与えられる式(1)より熱流束 $q$ を算出し、供試円柱浸漬後、約7秒間の過渡膜沸騰領域以降の蒸気膜が安定した膜沸騰領域の沸騰曲線を比較したところ、液体サブクール度 $\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$ では約1%、液体サブクール度 $\Delta T_{\text{sub}}=20\text{K}$ に対しても約2%の相違しか認められず、膜沸騰特性に影響を与えないことが判ったので円柱中心での温度を代表温度として考察を行った。

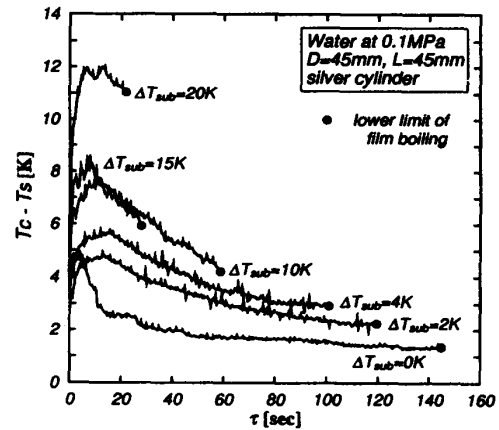


Fig.4 Temperature difference inside the cylinder

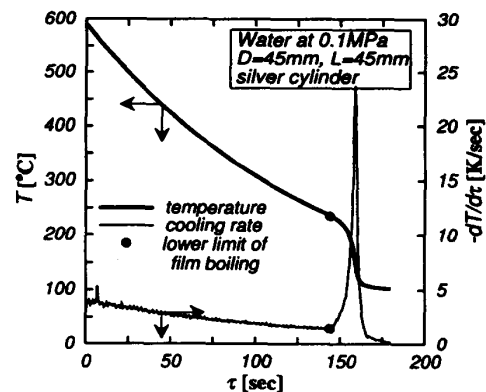
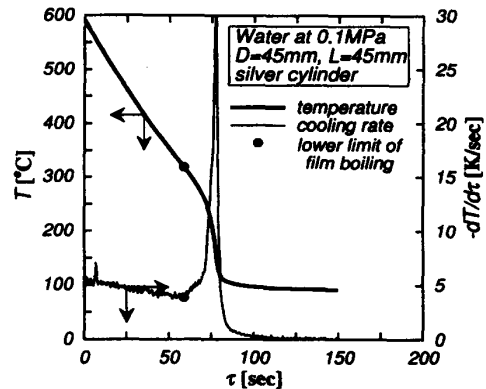
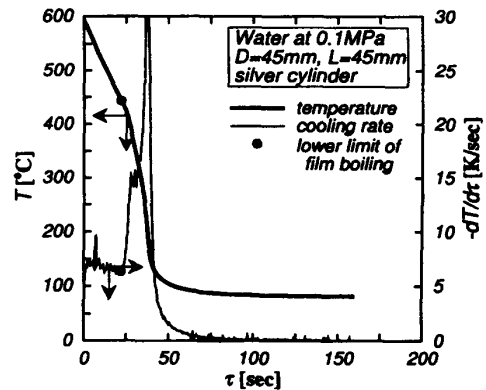
(a)  $\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$ (b)  $\Delta T_{\text{sub}}=10\text{K}$ (c)  $\Delta T_{\text{sub}}=20\text{K}$ 

Fig.5 Cooling curve and cooling rate

Fig.7は円柱中心の温度を代表温度とした膜沸騰領域の沸騰曲線で、液体サブクール度 $\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$ , 2K, 4K, 6K, 8K, 10K, 15Kおよび20Kをパラメータとして示したもので、Fig.6の冷却曲線のデータに基づくものである。この図より、熱流束は液体サブクール度が高くなるに従って大きくなるとともに・印の記号で示した極小熱流束点が高過熱度側へ推移しており、遷移沸騰領域への遷移が早まることがわかる。ちなみに、液体サブクール度による膜沸騰領域の熱流束の増大は、過熱度 $\Delta T_{\text{sat}}=350\text{K}$ に対して液体サブクール度が小さい4Kの場合には30%程度であるが液体サブクール度が最も大きい20Kの場合には約220%となり、液体サブクール度が膜沸騰熱伝達に大きな影響を及ぼすことがわかる。

#### 4.4 極小熱流束

Fig.8は極小熱流束 $q_{\text{min}}$ と液体サブクール度 $\Delta T_{\text{sub}}$ の関係を示したものである。○印は測定データで液体サブクール度が大きくなるに従って、極小熱流束が高くなっており、この傾向は直線的である。この測定データを整理するために、次式に示すような整理式を作成した。

$$q_{\text{min}} = 28 + 4.8\Delta T_{\text{sub}} \quad (2)$$

ここに、極小熱流束 $q_{\text{min}}$ と液体サブクール度 $\Delta T_{\text{sub}}$ の単位は $[\text{kW/m}^2]$ と $[\text{K}]$ である。図中の実線は上式から得られた計算値である。この図より、極小熱流束と液体サブクール度の関係は1次の関数形で整理されることがわかる。

#### 4.5 極小熱流束点過熱度

Fig.9は極小熱流束点過熱度 $\Delta T_{\text{min}}$ と液体サブクール度 $\Delta T_{\text{sub}}$ の関係を示したものである。○印は測定データで液体サブクール度が大きくなるに従って、極小熱流束点過熱度が高くなっている。極小熱流束と液体サブクール度の関係は近似的に次式に示すような整理式で表現される。

$$\Delta T_{\text{min}} = 134 + 0.70\Delta T_{\text{sub}} + 0.94\Delta T_{\text{sub}}^2 - 0.02\Delta T_{\text{sub}}^3 \quad (3)$$

図中の実線は上式から得られた計算値である。

#### 4.6 膜沸騰熱伝達の伝熱整理

Fig.10は過熱度 $\Delta T_{\text{sat}}=200\text{K}$ , 250K, 300K, 350Kおよび400Kでの膜沸騰領域における熱伝達係数 $h=q/\Delta T_{\text{sat}}$ と液体サブクール度 $\Delta T_{\text{sub}}$ との関係について示したもの

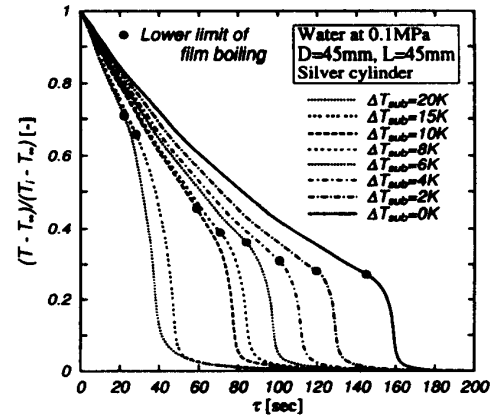


Fig.6 Cooling curves

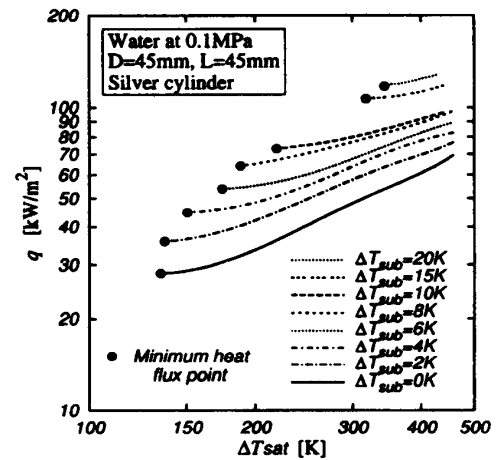


Fig.7 Boiling curves

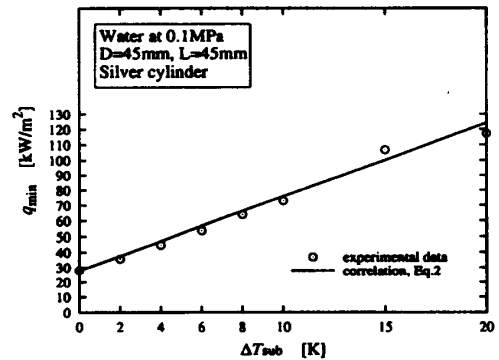


Fig.8 Relationship between  $q_{\text{min}}$  and  $\Delta T_{\text{sub}}$

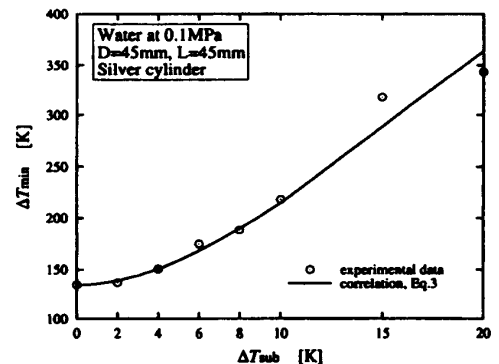
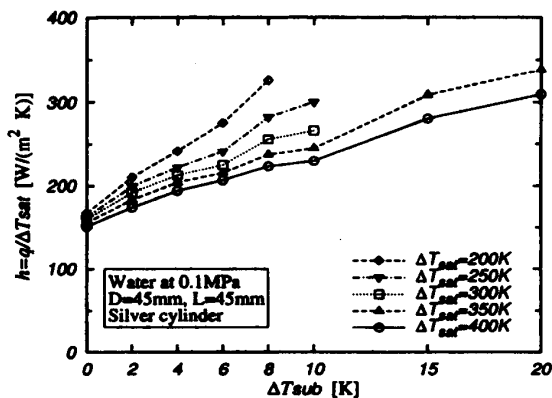


Fig.9 Relationship between  $\Delta T_{\text{min}}$  and  $\Delta T_{\text{sub}}$

Fig.10 Relationship between  $h$  and  $\Delta T_{\text{sub}}$ 

である。この図より、膜沸騰熱伝達係数  $h$  は液体サブクール度  $\Delta T_{\text{sub}}$  が高くなるに従って増大するとともに過熱度  $\Delta T_{\text{sat}}$  が小さい程大きいことがわかる。

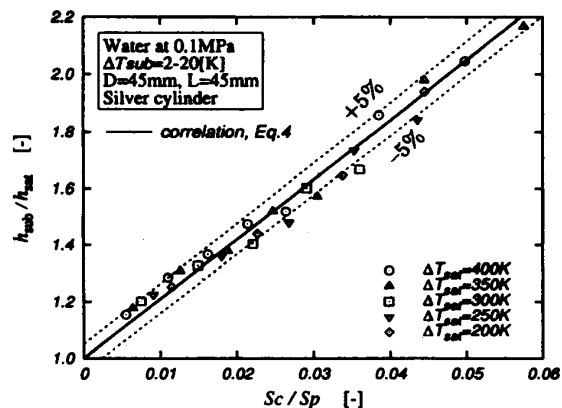
Fig.11は膜沸騰領域における飽和沸騰の熱伝達係数とサブクール沸騰の熱伝達係数の比  $h_{\text{sub}}/h_{\text{sat}}$  を無次元サブクール度と無次元過熱度の比  $Sc/Sp$  に対して示したもので、パラメータはFig.4と同じ過熱度  $\Delta T_{\text{sat}} = 200\sim 400\text{K}$  である。横軸の無次元サブクール度  $Sc$  と無次元過熱度  $Sp$  は、それぞれ  $Sc \equiv c_{pL}\Delta T_{\text{sub}} / (Pr_L \ell)$ 、 $Sp \equiv c_{pV}\Delta T_{\text{sat}} / (Pr_V \ell)$  と定義している。また、 $c_p$ 、 $Pr$  および  $\ell$  は定圧比熱、プラントル数および蒸発潜熱、添字 L と V は液体と蒸気をあらわしており、これらの熱物性値は膜温度を代表温度としている。実測された  $h_{\text{sub}}/h_{\text{sat}}$  の値は  $Sc/Sp$  とともに増大し、その値は図のように式(4)の実線の近傍に点在している。

$$\frac{h_{\text{sub}}}{h_{\text{sat}}} = 1 + 21 \left( \frac{Sc}{Sp} \right) \quad (4)$$

式(4)は測定値を±5% 以内で整理することができる。熱伝達の促進効果は飽和膜沸騰の熱伝達係数とサブクール膜沸騰の熱伝達係数の比  $h_{\text{sub}}/h_{\text{sat}}$  に対して、本実験範囲  $\Delta T_{\text{sub}} = 2\sim 20\text{K}$  では15%から220%程度となっている。

## 5. むすび

垂直の姿勢で銀円柱を大気圧の静止サブクール水中

Fig.11 Relationship between  $h_{\text{sub}}/h_{\text{sat}}$  and  $Sc/Sp$ 

に浸漬して冷却した際の膜沸騰熱伝達に及ぼす液体サブクール度の影響について実験を行った。本実験範囲で、(1)膜沸騰領域の熱伝達はサブクール度が2Kから20Kへと大きくなると15%から220%促進される、(2)液体サブクール度が高くなる程、熱流束は増大し、極小熱流束点も高過熱度側に移動する、ことがわかった。

## 参考文献

- (1) 日本機械学会編、沸騰熱伝達と冷却、(1989)、128.
- (2) 山田・他3名、第33回日本伝熱シンポジウム論文集、II (1996)、505.
- (3) 茂地・他3名、第34回日本伝熱シンポジウム論文集、II (1997)、543.
- (4) 山田・他3名、第34回日本伝熱シンポジウム論文集、II (1997)、545.
- (5) 山田・他3名、第35回日本伝熱シンポジウム論文集、III (1998)、823.
- (6) 山田・他3名、第36回日本伝熱シンポジウム論文集、III (1999)、761.
- (7) 山田・他3名、機講論、No.998-2 (1999)、163.
- (8) 山田・他3名、第37回日本伝熱シンポジウム論文集、I (2000)、79.
- (9) 大竹・西尾、機講論、58, 554 (1992)、3153.