

有限垂直銀円柱まわりの飽和膜沸騰下限界 (アスペクト比の影響)

山田 昭*・茂地 徹*
桃木 悟*・金丸 邦康*

Lower Limit of Saturated Film Boiling around a Vertical Finite-Length Silver Cylinder (Effect of Aspect Ratio)

by

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

Quenching experiments on the transient film boiling heat transfer from a vertical silver cylinder to a quiescent saturated water at atmospheric pressure have been carried out in the wide ranges of the length (8mm to 160mm) and the diameter (8mm to 100mm) of cylinder. The test cylinder was heated to 600°C by an electric furnace and then cooled at the immersion depth of about 100mm. The effect of aspect ratio (length-to-diameter ratio) on the lower limit of film boiling for saturated water was discussed. The prediction method was proposed.

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¹⁾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熱伝達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^{2)~6)}を行い、過渡実験から得られた全ての測定値を15%以内で相関できる伝熱整理式を作成した⁷⁾。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、銀より熱伝導率が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値との比較から確立した⁸⁾。

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、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。膜沸騰の下限界に関してはこれまでに水平無限平板に対するZuber⁹⁾やBerenson¹⁰⁾の研究、水平円柱に対するLienhard & Wong¹¹⁾やShojiら¹²⁾の研究、球に対する西尾¹³⁾の研究等があり、伝熱面の形状・寸法・姿勢の影響、系圧力の影響、液体サブクール度の影響、重力加速度の影響等について理論的および実験的検討が加えられている。しかし、著者らが研究の対象としている有限垂直円柱に関しては明らかにされていない。

本研究では、飽和膜沸騰における有限垂直円柱の膜沸騰下限界に及ぼす伝熱面の寸法効果の影響を明らか

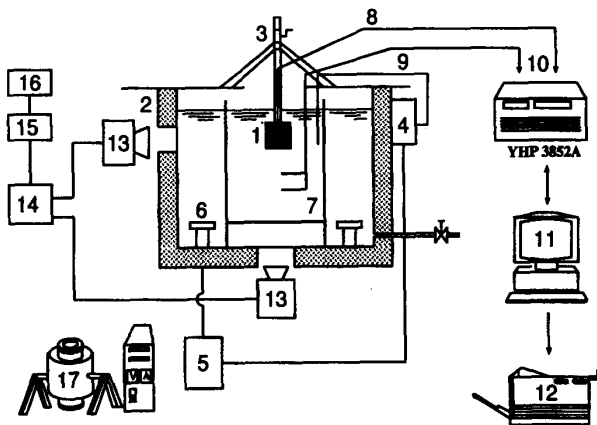
平成13年10月26日受理

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

にするために、過渡実験(焼入れ法)で得られた著者らの測定値を基にして円柱長さと同径の比で表したアスペクト比(L/D)の影響について検討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る。沸騰槽はステンレス製で、内寸法が450mm×450mm×750mmの容器である。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2 kW 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。



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

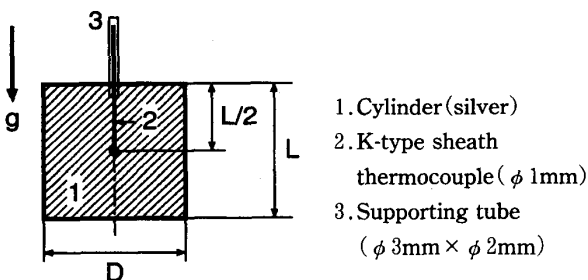


Fig.2 Test cylinder

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、 L は円柱の長さである。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円柱中心部に装着されているシース径1mmのK型熱電対を使用して、円柱の熱容量の大小により0.25秒または0.5秒のサンプリング間隔で測定され、横河ビ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、飽和温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。ただし、直径8mm、長さ160mmの供試円柱の場合には約200mmとした。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. 実験結果および考察

3.1 冷却曲線と冷却速度曲線

Fig.3は供試円柱を大気圧下で飽和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 τ 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いる。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。これらの図表より定性的傾向として円柱の直径や円柱の長さが増大するに従って、下限点に達する時間は長くなり、下限点における冷却速度が小さくなることわかる。

3.2 膜沸騰下限界における熱流束と過熱度の算定

本研究で使用した供試円柱の材質には熱伝導率の大きい銀を用いているので、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と、膜沸騰下限界点の熱流束 q_{\min} (極小熱流束)およびそれに対応する過熱度 ΔT_{\min} はそれぞれ次式で算出することができる。

$$q_{\min} = -\rho c \frac{V}{A} \frac{dT}{d\tau} \Big|_{\min} \quad (1)$$

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

ここに、 A : 全伝熱面積, c : 比熱, T : 温度, V : 体積, ρ : 密度, τ : 時間, $dT/d\tau$: 冷却速度であり, 添字 sat は飽和を意味している。なお, 上述した集中定数系近似の仮定は, 円筒座標系で2次元の非定常熱伝導計算により確認し, また, 本実験範囲での膜沸騰領域

のビオー数が0.03程度であることから妥当なものであると考ええる。

3.3 膜沸騰下限界における熱流束の整理

Fig.4は膜沸騰の下限界における熱流束, すなわち

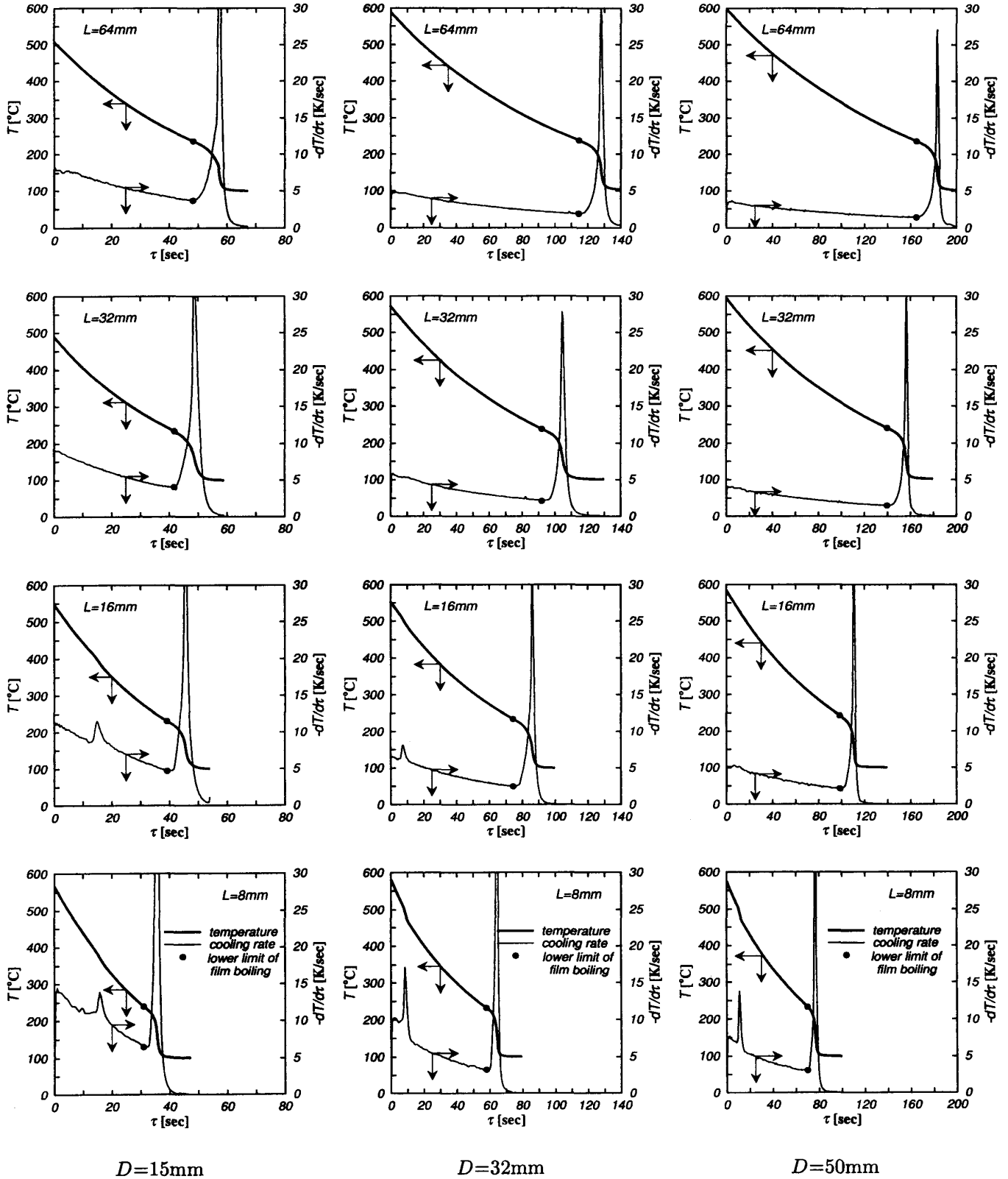
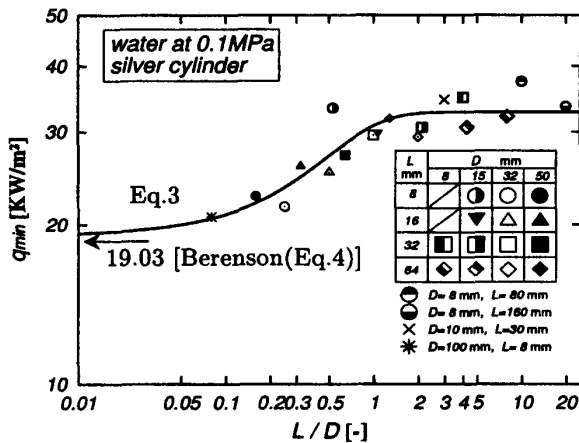


Fig. 3 Cooling curve and cooling rate

Table 1 Minimum heat flux and degree of superheating for quenching data with vertical finite-length cylinder

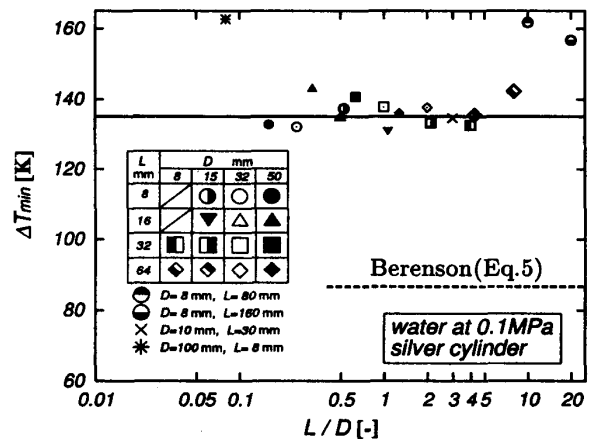
D [mm]	L [mm]	L/D [-]	$-dT/d\tau$ [K/sec]	ΔT_{\min} , (Eq.2) [K]	q_{\min} , (Eq.1) [kW/m ²]	q_{cal} , (Eq.3) [kW/m ²]	q_{\min}/q_{cal} [%]
8	32	4.00	8.037	132.5	34.93	32.73	6.7
8	64	8.00	6.598	142.2	32.10	32.73	-1.9
8	80	10.00	7.844	161.7	37.37	32.73	14.2
8	160	20.00	7.023	156.7	33.57	32.73	2.6
10	30	3.00	6.820	134.5	34.62	32.72	5.8
15	8	0.53	6.977	137.3	33.35	27.33	22.0
15	16	1.07	4.723	131.1	29.88	31.09	-3.9
15	32	2.13	4.082	133.2	30.58	32.60	-6.2
15	64	4.27	3.647	135.4	30.59	32.73	-6.5
32	8	0.25	3.285	132.0	21.66	23.53	-7.9
32	16	0.50	2.488	134.6	25.11	26.99	-7.0
32	32	1.00	2.138	137.7	29.52	30.80	-4.2
32	64	2.00	1.875	137.6	29.32	32.55	-9.9
50	8	0.16	3.072	132.7	22.69	22.01	3.1
50	16	0.32	2.140	142.8	25.80	24.61	4.8
50	32	0.64	1.511	140.7	27.07	28.44	-4.8
50	64	1.28	1.406	136.1	31.82	31.73	0.3
100	8	0.08	2.432	162.7	20.70	20.56	0.7

Fig.4 Relationship between q_{\min} and L/D

極小熱流束とアスペクト比 L/D の関係を示したもので、図中に示す種々の記号は著者らの測定値、実線は著者らが作成した整理式より得られる計算値である。作成した極小熱流束の整理式を次式に示す。

$$q_{\text{cal}} = 0.09 \rho_{\text{vs}} \ell \left[\frac{g \sigma (\rho_{\text{LS}} - \rho_{\text{VS}})}{(\rho_{\text{LS}} + \rho_{\text{VS}})^2} \right]^{1/4} \times \left[\frac{1.72}{1 + 0.72 e^{-2.44(L/D)}} \right] \quad (3)$$

ここに、 D は円柱直径、 L は円柱長さ、 g は重力加速度、 ℓ は蒸発潜熱、 ρ は密度、 σ は表面張力であり、添字 LS は飽和水、VS は飽和蒸気をそれぞれ示している。この図より、測定値には伝熱面寸法効果の影響が認められるとともに測定値が S 字の分布形状を示

Fig.5 Relationship between ΔT_{\min} and L/D

していることがわかる。これらのことから整理式の関数形にロジスティック曲線の関数形を適用した。この曲線は2本の漸近線を持っている。従って、 $L/D \rightarrow +\infty$ に対しては著者らの測定値へ、一方、 $L/D \rightarrow 0$ に対しては次式[(4式)]に示す水平無限平板に対する Berenson¹⁰⁾ の整理式より得られる値へそれぞれ漸近させることとし、その間は単調に増加するような形とした。この手法により、整理式は測定値を約±10%の精度で整理できる。 $L/D \rightarrow 0$ の場合には円柱は下面と上面で構成されるが、下面に形成される蒸気膜は安定であるため、膜沸騰の下限点(蒸気膜の崩壊点)は上面で発生すると考えられるので水平無限平板の Berenson¹⁰⁾ の解へ漸近させることとした。水平無限

平板に対して Zuber⁹⁾ や Berenson¹⁰⁾ が作成した極小熱流束の整理式は伝熱面形状には依存せず単に飽和液体の物性値のみで定まるもので、下式によって与えられている。

$$q_{\min} = c_1 \rho_{vs} \ell \left[\frac{g \sigma (\rho_{ls} - \rho_{vs})}{(\rho_{ls} + \rho_{vs})^2} \right]^{1/4} \quad (4)$$

但し、定数 c_1 の値は Zuber⁹⁾ は 0.131, Berenson¹⁰⁾ は 0.09 とそれぞれ与えている。従って、Zuber の予測値が Berenson より約 1.5 倍程高い極小熱流束を得る結果となり、大気圧水のもとでは Zuber の予測値は 27.70 kW/m², Berenson の予測値は 19.03 kW/m² になる。

3.4 膜沸騰下限界における過熱度の整理

Fig.5 は膜沸騰の下限界における過熱度、すなわち極小熱流束点過熱度 ΔT_{\min} とアスペクト比 L/D の関係を示したものである。図中に示す種々の記号は著者らの測定値、実線は測定値の平均値、鎖線は Berenson¹⁰⁾ の整理式から得られる値で、次式によって与えられる。

$$\Delta T_{\min} = 0.127 \frac{\rho_{vs} \ell}{\lambda_{vf}} \left[\frac{g \mu_{vf} (\rho_{ls} - \rho_{vs})}{(\rho_{ls} + \rho_{vs})^2} \right]^{1/3} \times \left[\frac{\sigma}{g (\rho_{ls} - \rho_{vs})} \right]^{1/2} \quad (5)$$

ここに、 λ は熱伝導率、 μ は粘性係数であり、添字 vf は膜温度を意味し、物性値の代表温度と定めている。Berenson¹⁰⁾ が作成した極小熱流束点過熱度の整理式も極小熱流束の整理式と同様に単に飽和液体の物性値のみで定まるものである。Fig.5 より明らかなように、測定値は伝熱面寸法、すなわちアスペクト比には依存せずほぼ一定値となっている。このように極小熱流束点過熱度が伝熱面寸法に影響を受けず一定値をとるという結果は西尾¹³⁾ の球における実験においても報告されている。式(5)に示した Berenson の整理式に基づく大気圧水の極小熱流束点過熱度の予測値は約 87K であるのに対し、著者らの垂直円柱に対する極小熱流束点過熱度の平均的な値は約 135K となり、Berenson の水平無限平板の予測値より約 55% 程度高い結果となっている。ところで、前述したように、著者らの測定値の中で、アスペクト比 L/D が 0.08, 10.0 および 20.0 の場合には平均的な値として示した

135K (Fig.5 中の実線) の極小熱流束点過熱度より約 25K 程度高い結果となっているので、これらの測定値についてはその妥当性を今後再検討する。

4. むすび

大気圧の飽和水中にアスペクト比 $L/D = 0.08 \sim 20.0$ の範囲における 18 個の銀製供試円柱を垂直の姿勢で浸漬して過渡膜沸騰実験を行い、膜沸騰熱流束の下限界に対する伝熱面の寸法効果について検討し、本実験範囲で以下の結論を得た。

- (1) 膜沸騰の下限界における熱流束の測定値を約 $\pm 10\%$ 程度で相関できる整理式を作成した。
- (2) 下限界過熱度はアスペクト比に依存せず一定値をとる。

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, 日本機械学会講演論文集, 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) Zuber, N., Trans. ASME, J. Heat Transfer, 80, 4, (1958), 711.
- 10) Berenson, P. J., Trans. ASME, J. Heat Transfer, 83, 3, (1961), 351.
- 11) Lienhard, J. H. and Wong, P. T. Y., Trans. ASME, J. Heat Transfer, 86, 2, (1964), 220.
- 12) Shoji, M. *et al.*, JSME Int. Journal, 30, 268, (1987), 1587.
- 13) 西尾, 日本機械学会論文集 (B編), 49, 442, (1983), 1185.