

飽和沸騰熱伝達における極小熱流束点条件の整理に関する研究

—第 3 報 極小熱流束の評価法—

A Correlation of Conditions at Minimum Heat Flux Point for Saturated Boiling

3rd Report : A Prediction Technique for Minimum Heat Flux

西尾 茂文*
Shigefumi NISHIO

1. 緒 言

著者は前報¹⁾において、(1)浸入型固液接触モードの影響が小さく、(2)平滑・清浄かつ熱伝導性の良好な伝熱面系での、(3)標準重力場飽和沸騰熱伝達における極小熱流束点条件 ($\Delta T_M, q_M$) に対し、第 1 報²⁾で有効性を主張した温度支配型アプローチに基づき極小熱流束点過熱度 ΔT_M を支配条件とみなし、これを流体物性および系圧力の関数として整理した。すなわち、 ΔT_M の系圧力 p に対する依存性に注目し、その依存性の異なる低圧域、中圧域および高圧域の 3 領域があることを指摘し、各圧力領域における以下の整理式を導出した。

低圧水: $\Delta T_{Ml} = 87.6 + 5556(0.65 - X)^{2.23}$ (1)

中圧域: $\Delta T_{Mm} = 3.449 \times 10^{-4} \{ \Delta T_{cr} / (Ja^*) \} (\rho_r^*)^{0.6302} (Pr_r^*)^{1.008} (l_r^*)^{0.2056} \exp(4.94X)$ (2)

高圧域: $\Delta T_{Mh} = T_{cr} (0.905 - X + 0.095X^8)$ (3)

ここで、 X : 換算飽和温度 ($= T_{sat} / T_{cr}$), $Ja^* = c_{pl} \Delta T_{cr} / L$, $\rho_r = \rho_v / \rho_l$, $Pr = \nu / \alpha$, $l_r = \sigma / g(p_l - p_v)^3 \nu_l^4$, T_{sat} : 飽和温度, T_{cr} : 臨界温度, c_p : 定圧比熱, L : 蒸発潜熱, ρ : 密度, ν : 動粘性係数, α : 温度伝導率, σ : 表面張力, g : 重力加速度, 添字 l, v は飽和液, 飽和蒸気である。

本報告では、以上の結果を基礎に、極小熱流束点の熱流束条件 q_M の評価法について検討する。

2. 極小熱流束の評価法

極小熱流束点の熱流束条件すなわち極小熱流束 q_M を温度支配型アプローチより評価するには、極小熱流束点における熱伝達率 h_M の値が必要である。 h_M の値については、十分に発達した固液接触のない状態の膜沸騰熱伝達率を h_f とすると、 $h_M = h_f [\Delta T_M]$ なる近似が成立するとする考え方^{3)~5)}と、固液接触による熱伝達によりこの近似が成立しないとする考え方⁶⁾がある。そこで、図 1 に、第 2 報¹⁾の減圧実験において得られた水平円柱—水系での膜沸騰熱伝達率の測定値を、水平円柱系膜沸騰熱

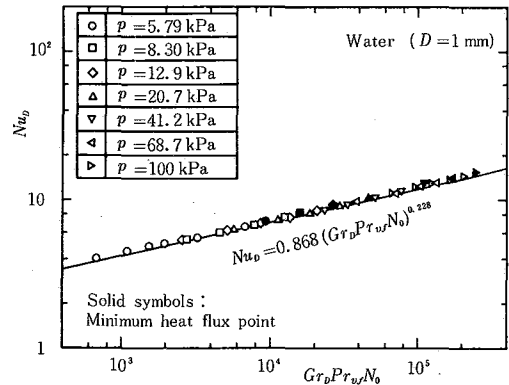


図 1 水平円柱—水系での膜沸騰熱伝達率

伝達率の整理式 (次式)⁷⁾と比較した。

$$Nu_D = K (Gr_D Pr_{vf} N_o)^{0.228}$$

$$K \equiv 0.897 - 0.542 \log(l_c/D) + 0.439 \{ \log(l_c/D) \}^2$$
 (4)

ここで、 $Nu_D = h_f D / k_{vf}$, $Gr_D = g \rho_l (\rho_l - \rho_v) D^3 / \mu_{vf}^2$, $N_o = L_o / c_{p,vf} \Delta T_{sat}$, $l_c = 2 \pi \sqrt{\sigma / g(\rho_l - \rho_v)}$, $L_o = L + 0.5 c_{p,vf} \Delta T_{sat}$, k : 熱伝導率, μ : 粘性係数, D : 円柱直径, 添字 vf は膜温度での蒸気相である。図 1 に示されているように、極小熱流束点での値 (黒ぬり記号) を含めて測定値は式 (4) とよく一致している。同様のことが、円柱直径を変化させた場合についても、第 1 報²⁾の図 2 に示されている。そこで本報告では、少なくとも第 1 章で述べた条件 (1)~(3) を満足する系では $h_M = h_f [\Delta T_M]$ なる近似が十分成立すると判断した。

ところで、従来の研究によれば、条件 (1)~(3) のもとで十分に発達した膜沸騰熱伝達率 h_f は、伝熱面形状 $G \cdot$ 寸法 D (矩形水平平面系では辺長, それ以外では直径), 液体流速 U , 沸騰過程の過渡性 t , 流体物性 P および伝熱面過熱度 ΔT_{sat} により整理される。たとえば、 $U = 0$ で過渡性の小さい沸騰系では、水平円柱系に対し式 (4), 球系に対し以下の式 (5)~(8),⁸⁾ 水平平面系に対

* 東京大学生産技術研究所 第 2 部

研究速報
 以下式(9)~(12)の整理式⁹⁾¹⁰⁾が提案されている。すなわち、球系については、 $D/l_c > (4/\pi)$ では、

$$Gr_D \leq 4 \times 10^4, Nu_D = 10 \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} 4 \times 10^4 < Gr_D < 3 \times 10^7 \\ Nu_D = 0.7 Gr_D^{1/4} Pr_{vf}^{1/3} f_{s1} \\ N \leq 1.4, f_{s1} = 1; N > 1.4, f_{s1} = 0.92 N^{1/4} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} Gr_D \geq 3 \times 10^7 \\ Nu_D = 0.165 Gr_D^{1/3} Pr_{vf}^{1/3} f_{s2} \\ N \leq 1.6, f_{s2} = 1; N > 1.6, f_{s2} = 0.85 N^{1/3} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$D/l_c \leq (4/\pi)$ では、
 $Nu_D = [Nu_D] \{1 + 3.5(l_c/2\pi D)\}^{1/4} \quad (8)$

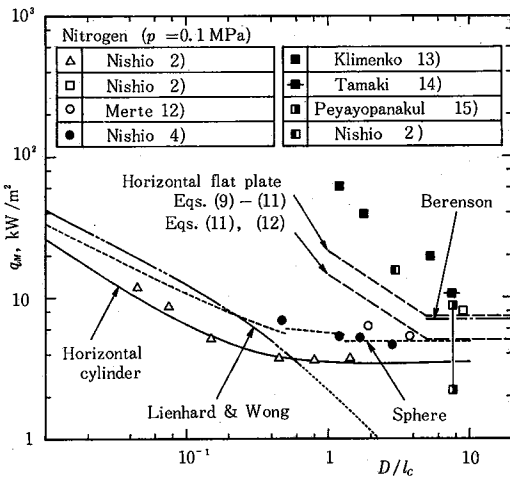
ここで、 $N = L/C_{pv} AT_{sat}$ 、 $[Nu_D]$ は式(6)(7)における Nu_D である。水平平面系については、 $D/l_c > 4.9$ では、

$$\left. \begin{aligned} Gr_{lc} < 10^8 \\ Nu_{lc} = 0.19 (Gr_{lc})^{1/3} Pr_{vf}^{1/3} f_{p1} \\ N \leq 1.4, f_{p1} = 1; N > 1.4, f_{p1} = 0.89 N^{1/3} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

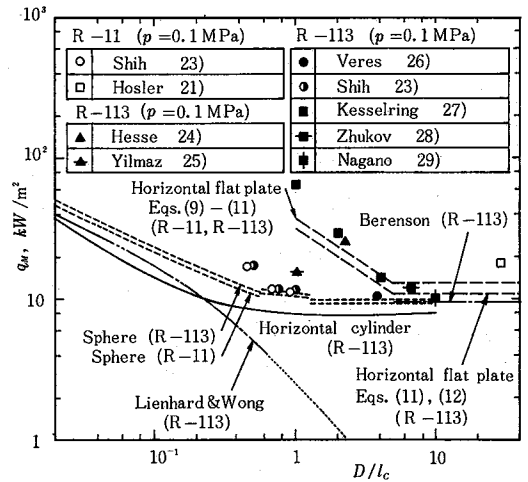
$$\left. \begin{aligned} Gr_{lc} \geq 10^8 \\ Nu_{lc} = 0.0086 (Gr_{lc})^{1/2} Pr_{vf}^{1/3} f_{p2} \\ N \leq 2, f_{p2} = 1; N > 2, f_{p2} = 0.71 N^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$D/l_c \leq 4.9$ では、
 $Nu_{lc} = 2.9 [Nu_{lc}] (l_c/D)^{0.67} \quad (11)$

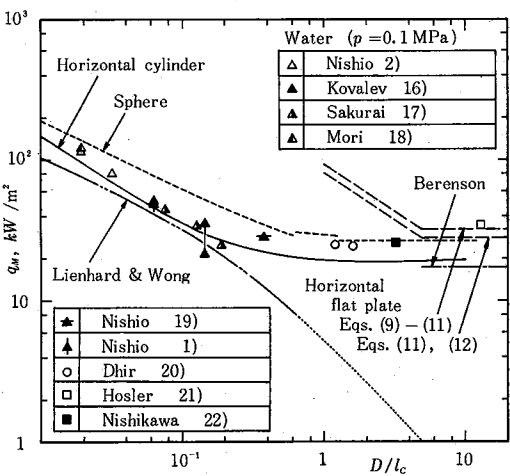
ここで、 $Gr_{lc} = g \rho_{vf} (\rho_l - \rho_{vf}) l_c^3 / \mu_{vf}^2$ 、 $Nu_{lc} = h_f l_c / k_{vf}$ 、



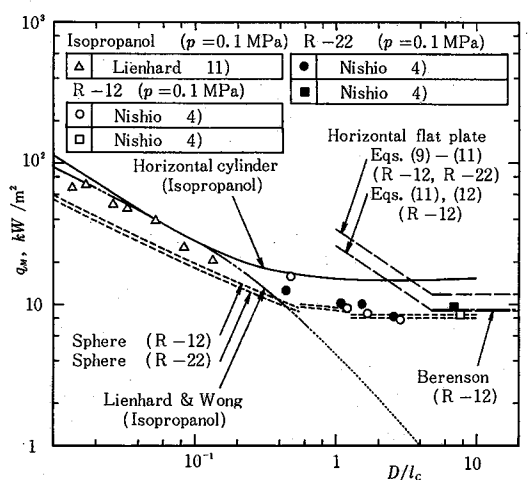
(a) 液体窒素



(c) R-11, R-113



(b) 水



(d) R-12, R-22, イソプロパノール

図2 大気圧状態における極小熱流束に対する伝熱面形状・寸法効果
 (三角, 丸, 四角記号はそれぞれ水平円柱, 球, 水平平面系での値を意味する)

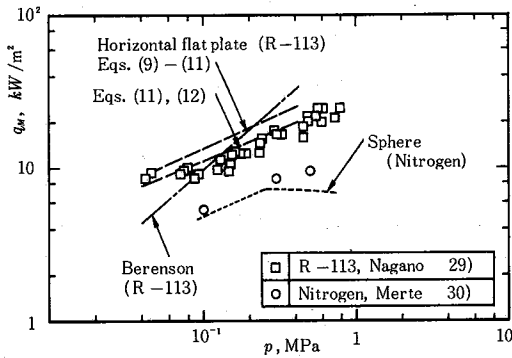
[Nu_{ic}] は式 (9) (10) における Nu_{ic} である。また水平平面系についてはより簡便に

$$Nu_{ic} = 0.81(Gr_{ic} Pr_{vf} N_0)^{1/4} \quad (12)$$

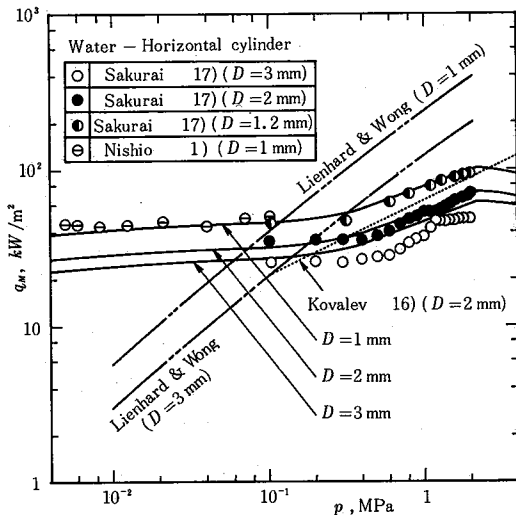
一方、式 (1) ~ (3) に示したように、極小熱流束点過熱度 ΔT_M は、流体物性 P および換算飽和温度 X (系圧力 p を代表する値) により整理される。したがって、第 1 章で述べた条件 (1) ~ (3) のもとでは (液体を特定すれば) 5 因子 G, D, U, t, p により決定される極小熱流束 q_M は、

$$q_M = h_f [G, D, U, t, p; \Delta T_M] \Delta T_M [X] \quad (13)$$

と表現できる。そこで以下では、 $U=0$ かつ過渡性が小さい条件下 (ただし、水平円柱、球系では過渡性の影響は小さいと考えられる¹¹⁾) の q_M の各因子依存性を、式 (1) ~ (13) により評価し、測定値と比較する。



(a) 水平平面-R-113系, 球-液体窒素系



(b) 水平円柱-水系

図 3 極小熱流束に対する系圧力効果 (I)

3. 極小熱流束の評価値と測定値との対応

図 2 に、大気圧状態における液体窒素、水、フロン系冷媒およびイソプロパノールの極小熱流束 q_M について、本評価法における値 (実線、破線) を測定値とともに、無次元伝熱面代表寸法 D/l_c に対して示した。図中には、水平平面系については Berenson³⁾ の式 (式 (14)), 水平円柱系については Lienhard and Wong¹¹⁾ の式 (式 (15)) を用いて、熱流束支配型解析モデルの値を鎖線で示した。

$$q_M = 0.09 \rho_{vf} L_0 \left\{ \frac{g(\rho_l - \rho_{vf})}{(\rho_l + \rho_{vf})^2} \right\}^{1/4} \quad (14)$$

$$q_M = 0.096 \frac{\rho_{vf} L_0 l_c}{\pi D} \left\{ \frac{g(\rho_l - \rho_{vf})}{(\rho_l + \rho_{vf})^2} \right\}^{1/4} \left\{ 2 + \left(\frac{l_c}{\pi D} \right)^2 \right\}^{-1/4} \quad (15)$$

図 2 の比較より、本評価法は、少なくとも大気圧状態における q_M に対する伝熱面形状・寸法効果をよく表現していることがわかる。また、式 (14) (15) は、水平円柱-液体窒素系および水平平面-水系で測定値との相違が大きいことが指摘できる。

図 3 には、浸入型固液接触モードの影響が小さいと考えられる実験系で測定された、水平円柱-水系、水平平面-フロン 113 系および球-液体窒素系における q_M の測定値を、本評価法 (実線および破線) および式 (14) (15) (鎖線) における値と比較して、系圧力 p に対して示した。この図より、浸入型固液接触モードの影響が小さい系において、熱流束支配型解析モデルは測定値より強い系圧力依存性を示すのに対し、本評価法は系圧力効果お

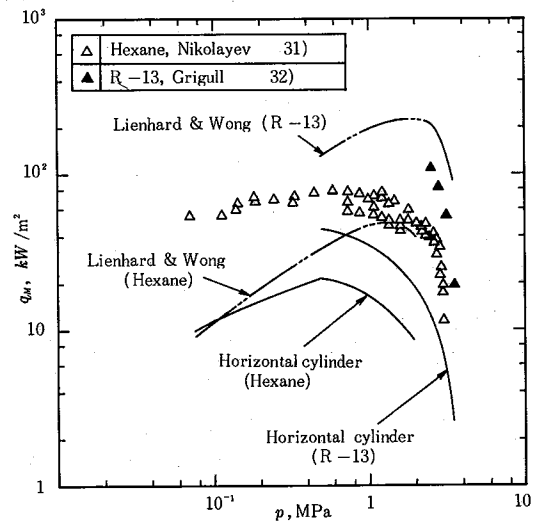


図 4 極小熱流束に対する系圧力効果 (II)

研究速報

よび伝熱面形状・寸法効果を妥当に評価していることがわかる。

一方、図4には、浸入型固液接触モードの排除に特別な考慮を払っていない水平円柱実験系における q_M の測定値を本評価法における値と比較して示したが、測定値はいずれも本評価法における値よりかなり高く、また大気圧近傍でも両者の一致はよくない。同様の傾向は、水平円柱-フロン系冷媒系におけるHesse²⁴⁾およびBier⁹⁾の測定値についてもみられた。これは、Kovalev¹⁶⁾およびHesse^ら³³⁾が指摘するように、浸入型固液接触モードの排除に特別な注意を払っていない水平円柱実験系では、円柱端部に膜沸騰と共存する核沸騰部が存在し、このため、式(1)~(3)あるいは $h_M = h_f[\Delta T_M]$ なる近似が成立していないことに起因すると判断される。

4. 結 言

本報告では、第1報で主張した温度支配型アプローチおよび第2報で導出した極小熱流束点過熱度の整理式に基づき、極小熱流束に対する伝熱面形状・寸法および系圧力の影響を簡便に評価する方法を提案した。すなわち、膜沸騰実験結果より、浸入型固液接触モードの影響の小さい系では極小熱流束点での熱伝達率 h_M が(十分に発達し固液接触の消失した状態での)膜沸騰熱伝達率の整理式の外挿値 $h_f[\Delta T_M]$ に近いことを確認し、この h_f の整理式および極小熱流束点過熱度の整理式を用いた極小熱流束に対する伝熱面形状・寸法効果および系圧力効果の評価法が浸入型固液接触モードの影響の小さい系では妥当であることを示した。

ただし、浸入型固液接触モードの影響が顕著に予想される系については、本評価法は妥当でなく、浸入型固液接触モードによる核沸騰共存効果を考慮する必要があると考えられる。

(1984年11月8日受理)

参 考 文 献

- 1) 西尾, 生産研究, 37-2(1985), 15
- 2) 西尾, 生産研究, 37-1(1985), 26
- 3) Berenson, P. J., Trans. ASME, Ser. C, 83(1961), 351.
- 4) 西尾, 日本機械学会論文集, 49-442, B(1983), 1185.
- 5) Bier, K. ほか2名, "Heat Transfer in Boiling", (Hemisphere Pub. Co.), (1977), 85.
- 6) Gunnerson, F. S. and Cronenberg, A. W., Trans. ASME, Ser. C, 102(1980), 335
- 7) 桜井ほか2名, 第21回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1984), 466.

- 8) Grigoriev, V. A. ほか2名, Proc. 7th Intern. Heat Transfer Conf., (Munich), 4 (1982), 387.
- 9) Klimenko, V. V., Intern. J. Heat Mass Transfer, 24(1981), 69.
- 10) Sauer Jr., H. J. and Ragsdell, K. M., Adv. Cryogn. Engng, 16(1971), 412.
- 11) Lienhard, J. H. and Wong, P. T. Y., Trans. ASME, Ser. C. 86(1964), 220.
- 12) Merte, H. and Clark, J. A., Trans. ASME, Ser. C, 86(1964), 351.
- 13) Klimenko, V. V., "Heat Transfer-Soviet Research, 11-6(1979), 84"に引用.
- 14) 玉木・涌坂, 第7回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1970), 73.
- 15) Peyayopanukul, W. and Westwater, J. M., Intern. J. Heat Mass Transfer, 21(1978), 1437.
- 16) Kovalev, S. A., Intern. J. Heat Mass Transfer, 9 (1966), 1219.
- 17) Sakurai, A. ほか2名, Thermal-Hydraulics of Nuclear Reactors, (ANS), 1 (1983), 280.
- 18) 森・戸田, 日本機械学会論文集, 47-421, B(1981), 1838.
- 19) 西尾・上村, 熱処理, 23-5(1983), 260.
- 20) Dhir, V. K. and Purohit, G. P., Nucl. Engng Des., 47(1978), 49.
- 21) Hosler, E. R. and Westwater, J. W., ARS J., 32(1962), 553.
- 22) 西川ほか3名, 九大工学集報, 38-4(1966), 399.
- 23) Shih, C., Ph. D. Thesis, Univ. of Wisconsin-Madison, (1978).
- 24) Hesse, G., Intern. J. Heat Mass Transfer, 16(1973), 1611.
- 25) Yilmaz, S. and Westwater, J. W., Trans. ASME, Ser. C, 102(1980), 26.
- 26) Veres, D. R. and Florschuetz, L. W., Trans. ASME, Ser. C., 93(1971), 229.
- 27) Kesselring, R. C., ほか2名, AIChE J., 13-4(1967), 669.
- 28) Zhukov, V. M., ほか3名, Heat Transfer-Soviet Research, 7-3(1975), 16.
- 29) 長野・庄司, 第20回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1983), 193.
- 30) Merte, H. and Lewis, E. W., "Adv. Heat Transfer (Academic Press), 5 (1968), 325"中に引用.
- 31) Nikolayev, G. P. and Skripov, V. P., Heat Transfer-Soviet Research, 2-3(1970), 122.
- 32) Grigull, U. and Abadzic, E., Proc. Instn. Mech. Engrs, 182 Pt3I (1967-68), 52.
- 33) Hesse, G. ほか2名, Trano. ASME, Ser. C, 98(1976), 166.