

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 2 報 極小熱流束点過熱度の整理—

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

— 2nd Report : A Correlation of Superheat at Minimum Heat Flux Point —

西 尾 茂 文*

Shigefumi NISHIO

1. 結 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 ($\Delta T_M, q_M$) について検討し、

(a) 影響を及ぼすと考えられる 4 因子すなわち伝熱面形状・寸法、液体流速、沸騰過程の過渡性および系圧力に対し、熱流束条件 q_M はすべてに依存するが、過熱度 (温度) 条件 $\Delta T_M(T_M)$ は系圧力以外の 3 因子に対してほぼ独立であり、ゆえに、

(b) 過熱度 (温度) 条件が支配条件と考えられ、

(c) 過熱度 (温度) 条件が液体種類・系圧力により決定されると考える温度支配型アプローチが有効であることを報告した。そこで本報告では、この温度支配型アプローチに立脚し、極小熱流束点の過熱度 (温度) 条件と液体種類・系圧力との関係の整理を試みる。

2. 極小熱流束点過熱度と系圧力の全般的関係

水平円柱、球および水平平面系での飽和沸騰熱伝達における極小熱流束点の過熱度条件すなわち極小熱流束点過熱度 ΔT_M と系圧力 p との関係に関する実験を表 1 にまとめ、測定値 ΔT_M を換算圧力 p/p_{cr} (p_{cr} は臨界圧力) に対して図 1 に示した。水、有機液体、フロン系冷媒お

よび液化ガスに関するこれらの測定値を総合すると、 ΔT_M と p の関係について以下の定性的特性が指摘できる。

- (i) 系圧力が低い場合、 $d\Delta T_M/dp < 0$ となる。
- (ii) 系圧力が中程度の場合、 $d\Delta T_M/dp \geq 0$ となる。
- (iii) 系圧力が高い場合、 $d\Delta T_M/dp < 0$ となる。

本報告では、以上の特性を示す各圧力領域をそれぞれ、低圧域、中圧域、高圧域と呼ぶ。これらの 3 領域の存在に関しては、測定値が限られていることから今後の実験により確認していく必要があるが、特に低圧域についてはきわめて測定値が少なく、その存在を確認しておく必要があると思われる。ところで、図 1 に示した水の測定値²⁾によれば、水の低圧域は $p < 0.4$ MPa 程度で出現する。そこで、低圧域の存在を確認するため、白金水平円柱 (直径 $D=1.0$ mm) 一水 (蒸留水) 系について、減圧状態における飽和プール沸騰実験を行い、極小熱流束点条件の系圧力依存性を検討した。図 2 に実験装置の概略図を示したが、減圧系である以外は前報での実験と同様であるので詳細な説明は省略する。

図 3 に、 ΔT_M の測定結果を Sakurai ら²⁾ の測定結果と比較して示した。この図より、本測定値と彼らの測定

表 1 ΔT_M の系圧力依存性に関する実験報告

Liquid.	p/p_{cr}	Geometry	Ref.
Water	0.0046-0.89	Wire [2,3mm]	2)
Propane	0.05-0.72	Cylinder[20.6mm]	3)
n-Hexane	0.033-0.91	Cylinder[3.3mm]	4)
Ethanol	0.0055-0.11	Plate [-]	5)
R-113	0.012-0.23	Plate [62mm]	6)
R-114	0.092-0.61	Cylinder [14mm]	7)
RC-318	0.16-0.98	Cylinder [8 mm]	8)
Nitrogen	0.030-0.15	Sphere [25.4mm]	9)

* 東京大学生産技術研究所 第 2 部

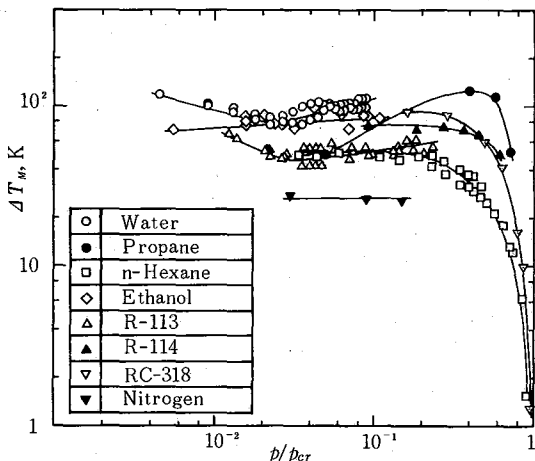
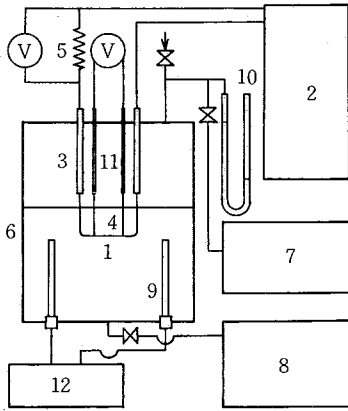


図 1 ΔT_M と系圧力の全般的関係

研究速報



- 1. Platinum wire
- 2. DC Power supply
- 3. Electrode (I)
- 4. Platinum wire (0.05 mm)
- 5. Standard resistance
- 6. Vessel
- 7. Vacuum pump
- 8. Thermostat
- 9. Heater
- 10. Hg Manometer
- 11. Electrode (II)
- 12. AC Power supply

図2 水平円柱-水系の減圧実験装置概略図

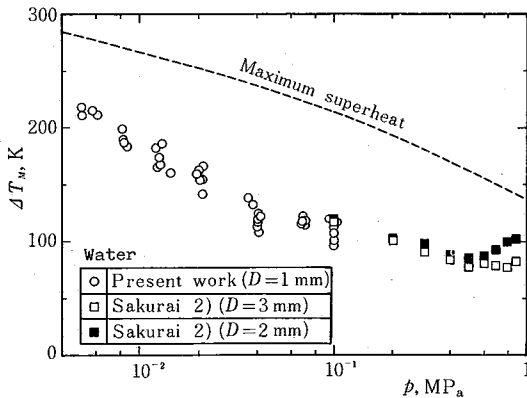


図3 系圧力が低い場合の ΔT_m と系圧力の関係

値は円柱直径は異なるが大気圧状態でほぼ一致しており、両者の測定結果より、極小熱流束点過熱度が系圧力の増大とともに減少する低圧域の存在が確認される。

3. 各圧力領域の極小熱流束点過熱度の整理

熱力学によれば、臨界温度 T_{cr} 以上の温度では液体状態は存在しない。ところで、図1に示した測定値は、いくつかの液体において極小熱流束点温度 T_M が T_{cr} を顕著に上まわることを示している。^{3), 7), 8)} T_M が T_{cr} を超す可能性については議論があるが、現段階ではこの可能性の物理的根拠が明示できないこと、 $T_M > T_{cr}$ となる測定値の多いサブクール水についても浸入型固液接触モードを排除した系では $T_M > T_{cr}$ とならないことを示す実験報告¹⁰⁾ を考慮し、本報告では、 $T_M > T_{cr}$ となる測定値

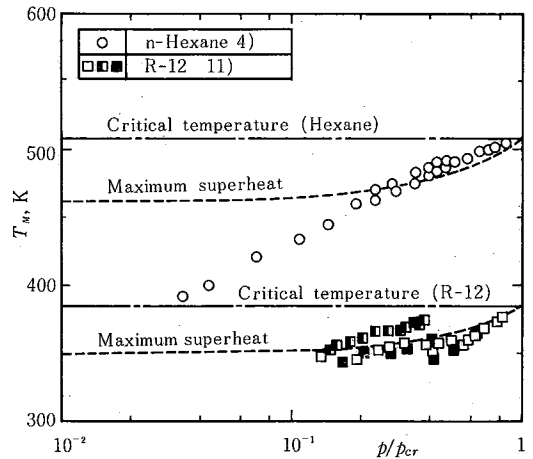


図4 高圧域における T_m と過熱限界温度の関係 (R-12の記号は実験シリーズと対応している)

を含む実験報告では、第1章で述べた条件(1)(2)が満足されていないと判断し、考察対象から除外した。

3.1 高圧域の整理 水平円柱-ヘキサン系、下向き円錐-フロン12系における高圧下の T_M の測定値^{4), 11)} を、図4に換算圧力 p/p_{cr} に対して示した。図中には、非金属材料について実証性^{12), 13)} のある Lienhard¹⁴⁾ の整理式により計算した液体の過熱限界温度 T_{ls} を破線で示したが、図中に示した測定値はいずれも、高圧下では T_M が T_{ls} に近くなることを示している。そこで本報告では、極小熱流束点温度が液体の過熱限界に支配され発生する圧力領域を高圧域と呼び、高圧域における極小熱流束点過熱度の値 ΔT_{Mh} の整理式として、上で述べた液体限界過熱度 $\Delta T_{ls} (= T_{ls} - T_{sat})$ に関する Lienhard の整理式を用いる。

$$\Delta T_{Mh} = T_{cr}(0.905 - X + 0.095X^8) \quad (1)$$

ここで、 X : 換算飽和温度 ($= T_{sat}/T_{cr}$)、 T_{sat} : 飽和温度である。

3.2 中圧域の整理 第2章および前節における検討により、中圧域は、 $\Delta T_M < \Delta T_{ls}$ かつ $d\Delta T_M/dp \geq 0$ である圧力領域として定義される。表1に示した測定値のうち中圧域の条件を満足するものについて検討すると、いずれも $X=0.7$ の状態が中圧域に属することがわかる。そこで、表1に示した実験について、中圧域に属する測定値を $Z (= Y/Y^*, Y = \Delta T_M/\Delta T_{cr}, \Delta T_{cr} = T_{cr} - T_{sat}, Y^*: X=0.7$ の Y) として図5に X に対して示した。この図より、中圧域の ΔT_M の系圧力依存性は、 Z と X とにより相似化され、次式で整理できることがわかる。

$$Z = 0.0315 \exp(4.94X) \quad (2)$$

あるいは、

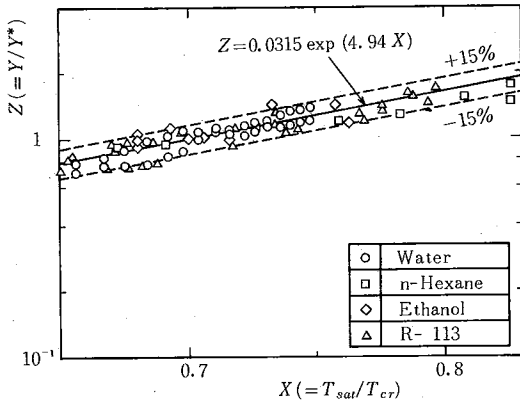


図5 中圧域における ΔT_M と換算飽和温度との関係

$$\Delta T_M = 0.105(\Delta T_M^*/T_{cr})\Delta T_{cr} \exp(4.94 X) \quad (2)'$$

ここで、 ΔT_M^* は換算飽和温度 $X=0.7$ における ΔT_M の値である。表2に、以下の手続で決定した各液体の ΔT_M^* の値を示した。 ΔT_M^* の測定値がある場合は、その実験における他の系圧力での ΔT_M の測定値を他の実験における値と(表2中第3列に示したように)比較し、互いに近いことが確認できるものを採用した。また ΔT_M^* の測定値がない場合は、大気圧での ΔT_M の測定値をいくつかの実験について(表2中第3列に示したように)比較し、互いに近いことを確認し、この値を式(2)を用いて ΔT_M^* に変換した。

以上の手続により決定された ΔT_M^* の値を、以下の次元解析より得られる無次元数 Ja, ρ_r, Pr, l_r により整理すると、中圧域の ΔT_M の代表値である ΔT_M^* の整理式として次式が得られる。

$$Ja^* = 0.01095(\rho_r^*)^{0.6302}(Pr_r^*)^{1.008}(l_r^*)^{0.2056} \quad (3)$$

ここで * 記号は、換算飽和温度 $X=0.7$ での値を意味し、

$$Ja = c_{pl}\Delta T_M/L, \quad \rho_r = \rho_v/\rho_l$$

$$Pr_l = \nu_l/a_l, \quad l_r = \sigma^3/g(\rho_l - \rho_v)^3 \nu_l^4$$

であり、 c_p : 定圧比熱、 L : 蒸発潜熱、 ρ : 密度、 ν : 動粘性係数、 a : 温度伝導率、 σ : 表面張力、 g : 重力加速度、添字 l, v は飽和液、飽和蒸気を示す。中圧域での極小熱流束点の発生機構は未知であるが、ここではこの発生機構として、ぬれ境界の移動とぬれ境界近傍での沸騰核生成気泡の生長との相関による蒸気吹抜け機構を想定し、これに関連する物理量 $\rho_l, \rho_v, \nu_l, c_{pl}, a_l, L, \sigma, g$ および ΔT_M に関する次元解析を行い、上記の4無次元数を得た。表2に示した ΔT_M^* の値 ($\Delta T_M^*_{ex}$) と式(3)の値 ($\Delta T_M^*_{co}$) との対応を図6に示したが、両者は $\pm 10\%$ 程度で一致していることがわかる。

以上の式(2)(3)より、中圧域における極小熱流束点過熱度の値 ΔT_{Mm} の整理式として次式が得られる。

表2 各液体の ΔT_M^* の値 (+, \rightarrow , \circ 記号はそれぞれ液滴、測定値、外挿値を意味する)

Liquid	Geometry	$\Delta T_M (X)$	Ref.	ΔT_M^*
Water	Plate	110(0.576)	15)	$\rightarrow 96.4$
	Wire	117(0.576)	2)	
	Cylinder	104(0.576)	16)	
	Sphere	101(0.576)	17)	
n-Pentane	Plate	59(0.659)	18)	$\circ 62$
	Plate +	58(0.659)	19)	
n-Hexane	Cylinder	41(0.845)	4)	$\rightarrow 49.4$
	Plate +	38(0.850)	19)	
Ethanol	Plate	80(0.681)	5)	$\rightarrow 77.0$
	Cylinder	72(0.681)	20)	
CCl ₄	Plate	79(0.628)	18)	$\circ 90$
	Plate	85(0.628)	21)	
R-12	Plate	49(0.623)	22)	$\circ 59$
	Sphere	55(0.623)	22)	
R-22	Plate	58(0.629)	22)	$\circ 62$
	Sphere	56(0.629)	22)	
R-113	Plate	51(0.658)	6)	$\rightarrow 53.0$
	Sphere	55(0.658)	23)	
Nitrogen	Plate	22(0.613)	24)	$\rightarrow 24.1$
	Plate	22(0.613)	1)	
	Sphere	25(0.613)	25)	
	Sphere	26(0.613)	22)	

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

ここで、 $Ja' = c_{pl}\Delta T_{cr}/L$ である。

3.3 低圧域の整理 低圧域については、測定値が少なく無次元整理が困難であるため、水についてのみ整理を行う。図3に示した測定値より、水における中圧域と低圧域の境界を $X=0.65$ とし、 $X=0.65$ で式(4)と一致するよう低圧域の測定値を最小自乗近似することにより、低圧水の極小熱流束過熱度の値 ΔT_{Ml} の整理式として、次式を得る。

$$\Delta T_{Ml} = 87.6 + 5556(0.65 - X)^{2.23} \quad (5)$$

4. 整理式と測定値の対応

図7に、以上の検討より導出された各圧力領域における極小熱流束点過熱度の整理式(1)(4)(5)(図中破線)と測定値との比較を、水、エタノール、ヘキサンおよびフロン113について示したが、両者の対応は、现阶段で

研究速報

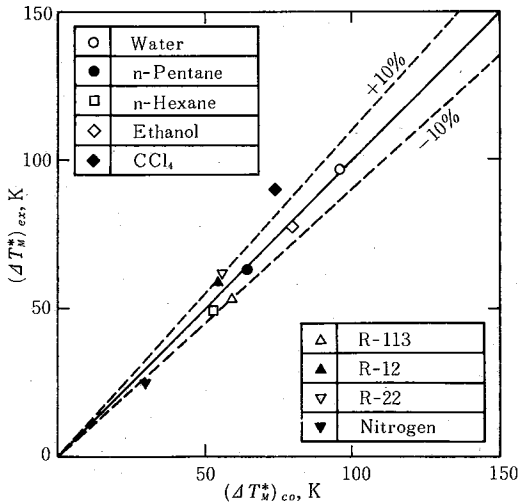


図6 ΔT_M^* の整理

は満足できるものと判断する。特に、図中に示した Hein ら¹¹⁾の測定値は(水平円柱, 球および水平平面系と異なり)膜沸騰状態における気液界面の Taylor 不安定が想定し難い下向き円錐伝熱面系での測定値であり, 本整理式がこうした系での測定値を(膜沸騰状態における気液界面に Taylor 不安定が発生する)水平円柱などの系での測定値と同様に整理することは, 本整理式の妥当性のみでなく, その基礎となっている温度支配型アプローチの有効性を意味するものと考えらる。

5. 結 言

前報で主張した温度支配型アプローチの立場に立脚し, 極小熱流束点の過熱度(温度)条件すなわち極小熱流束点過熱度 ΔT_M と系圧力 p の関係について整理を行った。すなわち, ΔT_M と p の関係に関する考察より, 圧力領域を低圧域($d\Delta T_M/dp < 0$ かつ $\Delta T_M < \Delta T_{is}$), 中圧域($d\Delta T_M/dp \geq 0$ かつ $\Delta T_M < \Delta T_{is}$) および高圧域($d\Delta T_M/dp < 0$ かつ $\Delta T_M \approx \Delta T_{is}$) の3圧力領域に分類し, 中圧域, 高圧域については ΔT_M の無次元整理式, 低圧域については水の ΔT_M の整理式を導出した。これらの整理式は, 測定値に限られていることから暫定式と考えるのが妥当であるが, 水, 有機液体, フロン系冷媒および液化ガスなどの測定値をよく整理する。

(1984年11月5日受理)

参 考 文 献

- 1) 西尾, 生産研究, 37-1 (1985), 26
- 2) Sakurai, A. ほか2名, Thermal-Hydraulics of Nucl. Reactors, (ANS), 1 (1983), 280
- 3) Science, C. T. and Colver, C. P., Trans. ASME, Ser. C, 92 (1970), 659

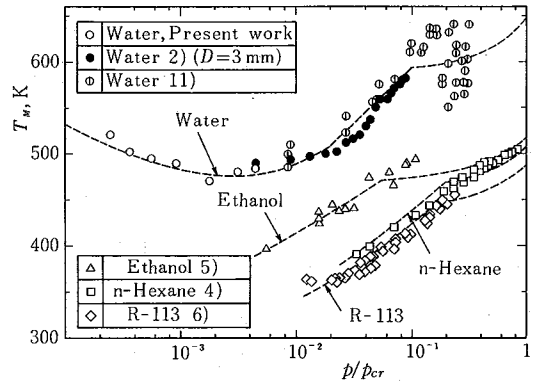


図7 整理式と測定値との対応

- 4) Nikolayev, G. P. ほか2名, Heat Transfer-Soviet Research, 6-1 (1974), 128
- 5) Yao, S. C. and Henry, R. E., Trans. ASME, Ser. C, 100 (1978), 260
- 6) 長野・庄司, 第20回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1983), 193
- 7) Hesse, G., Intern. J. Heat Mass Transfer, 16 (1973), 1611
- 8) Bier, K. ほか2名, "Heat Transfer in Boiling", (Hemisphere Pub. Co.), (1977), 85
- 9) Merte, H. and Lewis, E. W., "Adv. in Heat Transfer, (Academic Press), 5 (1968), 427" に引用
- 10) Sakurai, A. ほか2名, Proc. 1980 ICHMT Intern. Seminar "Reactor Safety Heat Transfer", (Dubrovnik), (1980)
- 11) Hein, D. ほか2名, Paper presented at the Intern. Workshop on Fundamental Aspects of Post-Dryout Heat Transfer, (Salt Lake), (1984)
- 12) Gunnerson, F. S. and Cronenberg, A. W., Trans. ASME, Ser. C, 100 (1978), 734
- 13) 西尾, 日本機械学会講演論文集, No.815-2 (1981), 142
- 14) Lienhard, J. H., Chem. Engng Sci., 31 (1976), 847
- 15) 西川ほか3名, 九大工学集報, 38-4 (1966), 399
- 16) 西尾・上村, 熱処理, 23-5 (1983), 260
- 17) Dhir, V. K. and Purohit, G. P., Nucl. Engng Sci., 47 (1978), 49
- 18) Berenson, P. J., Intern. J. Heat Mass Transfer, 5 (1962), 985
- 19) Skripov, V. P., "Metastable Liquids", (John Willy & Sons), (1974)
- 20) 西川ほか3名, 日本機械学会論文集, 34-257(1968), 134
- 21) 西川ほか3名, 九大工学集報, 38-3 (1965), 306
- 22) 西尾, 日本機械学会論文集, 49-442, B (1983), 1185
- 23) Veres, D. R. and Florschuetz, Trans. ASME, Ser. C, 93 (1971), 229
- 24) Peyayopanukul, W. and Westwater, J. W., Intern. J. Heat Mass Transfer, 21 (1978), 1437
- 25) Merte, H. and Clerk, J. A., Trans. ASME, Ser. C, 86 (1964), 351