

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1報 温度支配型アプローチの有効性——

A Correlation of Conditions at Minimum Heat Flux Point for Saturated Boiling
1st Report: Availability of Approach Giving Attention to Temperature Condition

西尾 茂文*

Shigefumi NISHIO

1. 緒言—本研究の背景—

沸騰熱伝達における極小熱流束点条件 ($\Delta T_M, q_M$) に関しては、過熱度 (温度) 条件 ΔT_M を支配条件と考える温度支配型アプローチ、あるいは熱流束条件 q_M を支配条件と考える熱流束支配型アプローチに立脚する解析モデル^{1)~6)}がいくつか提案されている。しかし、これらの解析モデルはいずれも極小熱流束点条件の挙動を系統的に説明するモデルとしては、その妥当性に問題がある。⁶⁾

すなわち、まず、熱力学的あるいは運動論的に導出される液体の過熱限界や吸着限界などの「ぬれ限界条件」を極小熱流束点の過熱度 (温度) 条件と等置するモデル^{1)~2)}に代表される温度支配型解析モデルに関しては、

(a) 伝熱面形状・寸法、液体流速、沸騰過程の過渡性に対し、 q_M は依存するが ΔT_M は独立であること、^{7)~10)}

(b) 伝熱面熱伝導性・ぬれ性に対し $\Delta T_M, q_M$ ともに依存すること、^{11)~13)}

(c) 系圧力が高い場合、 ΔT_M は液体の限界過熱度 ΔT_{is} に近い値をとること、^{12)~14)}

を示唆する実験結果など、温度支配型アプローチの有効性を支持する実験結果があるが、

(d) 系圧力が低い場合、一般に $\Delta T_M \ll \Delta T_{is}$ であること、⁶⁾

(e) 液体サブクール度に対し $\Delta T_M, q_M$ ともに顕著な依存性があることを示す実験結果^{10), 15)~17)}

など、従来の温度支配型解析モデルでは定量的対応に問題がある実験結果がある。

一方、膜沸騰状態における気液界面の水力学的不安定解析より導出される「気泡生長・離脱に関するエネルギー限界条件」を極小熱流束点の熱流束条件と等置する水力学的不安定モデル^{3)~5)}に代表される熱流束支配型解析モデルに関しては、

(f) q_M に対する系圧力の影響および (水平円柱系での) 伝熱面寸法の影響などに対し、測定値と定性的に一致する傾向をこのモデルが予測すること、^{4), 5), 18)~20)}

(g) いくつかの液体について、大気圧近傍における q_M の測定値がこのモデルの予測値に近いこと、^{3)~6), 14)} など、熱流束支配型アプローチの有効性を支持する実験結果があるが、

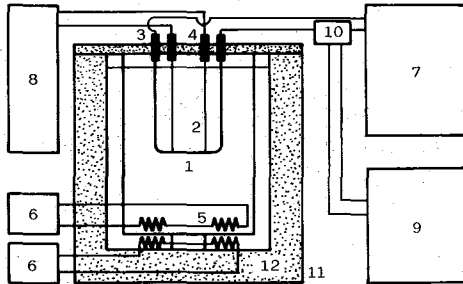
(h) q_M に対する系圧力の影響に対し、このモデルと測定値との間には定量的に差が大きいこと^{6), 14), 18)}

あるいは上記(a)の実験結果に対する対応、伝熱面熱伝導性・ぬれ性や液体サブクール度の取扱いなどに問題がある。

極小熱流束点条件の解析モデルが有する以上のような問題を背景としてこれらのモデルの改良が提案されているが、^{21)~24)} いずれも現在のところ一般の妥当性を獲得するに至っていないと理解している。したがって、極小熱流束点条件の挙動に系統的に対応し得るモデルを構築するためには、その発生機構に係わる素過程、および極小熱流束点条件の因子依存性に関する詳細な情報を集積し、極小熱流束点の発生機構を現象論的に把握し直す必要がある。しかし、こうした情報が不足している現在、極小熱流束点条件の因子依存性を整理し、系統的情報を得ることも有意義と考える。

ところで、極小熱流束点条件に影響を及ぼすと考えられている因子は、(i) 固液接触モード、(ii) 伝熱面形状・寸法、(iii) 系圧力、(iv) 液体サブクール度、(v) 液体流速、(vi) 重力加速度、(vii) 伝熱面表面条件、(viii) 伝熱面熱伝導性、および (ix) 沸騰過程の過渡性である。⁶⁾ いま、(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上での、(3) 標準重力場での飽和沸騰熱伝達における極小熱流束点条件に考察の対象を絞ると、上記因子のうち、(ii) (iii) (v) (ix) の因子が考慮すべき因子として残る。そこで、本報以下の報告では上記(1)~(3)の条件における極小熱流束点条件に対する上記因子(ii) (iii) (v) (ix) の影響を系統的に整理することを試みる。まず本報では、極小熱流束点条件に対する伝熱面形状・寸法、液体流速、および沸騰過程の過渡性の影響を検討し、次報以下で展開する整理法の基礎となる温度支配型アプローチの有効性を主張する。

* 東京大学生産技術研究所 第2部



- 1. Platinum wire
- 2. Platinum wire (0.05mm)
- 3. Electrode (I)
- 4. Electrode (II)
- 5. Heater
- 6. AC power supply
- 7. DC power supply
- 9. Digital voltmeter
- 10. Standard resistance
- 11. Liquid bath
- 12. Insulator

図 1 白金線を用いた実験装置

2. 伝熱面形状・寸法の影響

極小熱流束点条件に対する伝熱面形状・寸法効果を検討するため、大気圧飽和条件での水平円柱-液体窒素系および水系について、円柱直径 D を 0.3~9.6 mm の範囲で変化させ極小熱流束点条件を測定した。図 1 に、本実験で使用した代表的実験装置を示した。水平円柱伝熱面としては、 $D \leq 1$ mm の場合は白金線、 $D > 1$ mm の場合は肉厚 1 mm の銅管を使用した。いずれの場合も円柱端部からの蒸気膜崩壊を防ぐため、円柱伝熱面は中央部約 100 mm を残して U 字型に曲げられ、円柱端部は液面上に露出している。白金線伝熱面については、直流安定化電源による直接通電定常実験を行い、標準抵抗による電流測定と、水平部中央に約 40 mm の間隔でスポット溶接された線径 50 μ m の白金線電圧端子による電圧測定とにより沸騰曲線を求めた。一方、銅管伝熱面については、液中で浸没冷却する非定常実験を行い、円管内部より表面まで埋めこまれた素線径 0.1 mm の CA 熱電対により水平部中央位置の冷却曲線を測定し、円管を集中定数系近似することにより沸騰曲線を求めた。ただし、水平円柱、球系については極小熱流束点条件に対する過渡性影響が小さいことが報告されていることを付言しておく。^{15),25)} なお、液体窒素については、すべての円柱直径で実験を行うとともに、銅製円形水平平面 ($D = 20,60$ mm) での実験も行った。一方、水については水平円柱系での実験結果がいくつか報告されている^{14),17),26)} ので、白金線についてのみ実験を行った。

図 2 に、水平円柱-液体窒素系における膜沸騰曲線の代表的測定結果を示した。図中の実線は、水平円柱系膜沸騰熱伝達率 h_f に関する桜井ら²⁷⁾ の整理式 (次式) を用いた膜沸騰曲線の計算値である。

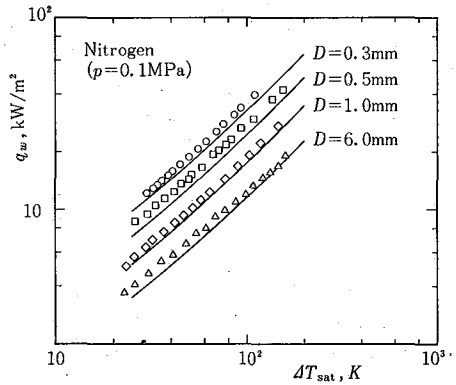


図 2 水平円柱-液体窒素系の膜沸騰曲線

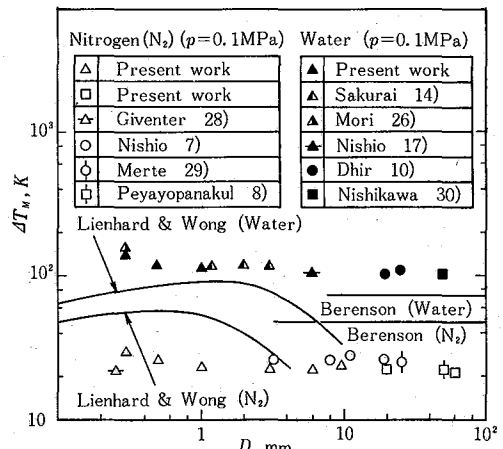


図 3 極小熱流束点過熱度 ΔT_m に対する伝熱面形状・寸法効果 (図中の三角, 丸, 四角記号はそれぞれ水平円柱, 球, 水平平面系での測定値を意味する)

$$h_f = K(k_v/D)[g\rho_v(\rho_l - \rho_v)L_0 D^2 / (\mu_v k_v \Delta T_{sat})]^{0.228}$$

$$K \equiv 0.897 - 0.542 \log(l_c/D) + 0.439 [\log(l_c/D)]^2$$

..... (1)

ここで、 $L_0 = L + 0.5c_{pv}\Delta T_{sat}$, $l_c = 2\pi\sigma/g(\rho_l - \rho_v)$, k : 熱伝導率, g : 重力加速度, ρ : 密度, L : 蒸発潜熱, μ : 粘性係数, c_p : 定圧比熱, σ : 表面張力, 添字 l, v は液相, 膜温度における蒸気相を意味する。図 2 より、膜沸騰曲線の測定値は計算値に比較的近いことがわかる。

図 3 に、極小熱流束点過熱度 ΔT_m について、本測定値を、水平円柱、球および水平平面系での既存測定値とともに、伝熱面代表寸法 D (正方形水平平面系では辺長、それ以外の系では直径) に対して示した。図中には、熱流束支配型解析モデルにおける値を、水平平面系については Berenson の解析³⁾ (式(2)), 水平円柱系については Lienhard and Wong の解析⁴⁾ (式(3)) と式(1)を用いて計算し実線で示した。

研 究 速 報

$$\Delta T_M = 0.127 \left(\frac{\rho_v L_0 l_c}{2\pi k_v} \right) \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)\mu_v}{(\rho_l + \rho_v)^2} \right]^{1/3} \dots\dots (2)$$

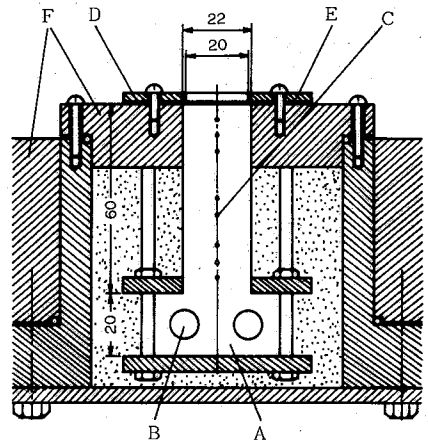
$$q_M = 0.096 \left(\frac{\rho_v L_0 l_c}{2\pi D} \right) \left[\frac{g\sigma(\rho_l - \rho_v)}{(\rho_l + \rho_v)^2} \right]^{1/4} \left[2 + \left(\frac{l_c}{\pi D} \right)^2 \right]^{-1/4} \dots\dots (3)$$

図3に示されているように、水平円柱系での ΔT_M の測定値は、 $D < 0.5 \text{ mm}$ 程度で D の減少とともに若干増大する傾向を示すものの、このような小熱容量の伝熱面を除けば D に対する依存性は極めて弱い。同様のことは球系についても指摘でき、また各液体における水平円柱、球および水平平面系での ΔT_M の測定値は互いに近い。

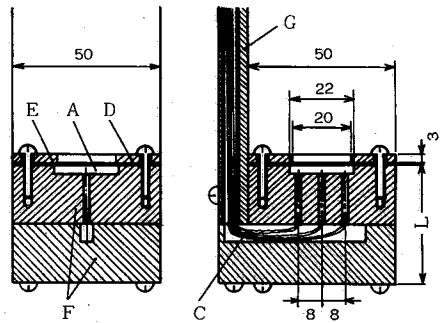
すなわち図2、図3より、伝熱面形状・寸法に対し、極小熱流束点の熱流束条件は依存するが、過熱度(温度)条件はほぼ独立であることがわかる。ちなみに、従来の熱流束支配型解析モデルでは、水平円柱系の ΔT_M は D に対し図3のような依存性を示す。

3. 沸騰過程の過渡性の影響

極小熱流束点条件に対する沸騰過程の過渡性の影響については、水平円柱および球系ではその影響が小さいことが報告され、^{15),25)} 水平平面系ではその熱流束条件 q_M が影響をうけることが報告されている。⁸⁾ そこで、極小熱流束点条件に対する沸騰過程の過渡性の影響を確認するため、大気圧飽和条件での水平平面-液体室素系について、同一の表面寸法をもつ伝熱面において定常および非定常実験を行い、極小熱流束点条件を測定した。図4に、実験装置の概略図を示した。定常、非定常伝熱面ともに直径 22 mm の銅製平面であり、非定常伝熱面の厚さ l は 2.3, 7.0, 22.0 mm である。いずれの伝熱面についても、膜沸騰状態における浸入型固液接触モード⁶⁾を防ぐため、直径 20 mm の穴をもつベークライト製リングが厚さ 0.5 mm のスペーサを介して伝熱面上に取り付けられている。定常伝熱面については、素線径 0.1 mm の 8 組の CA 熱電対により伝熱面深さ方向の温度分布を測定し、これを最小自乗近似して沸騰曲線を求めた。非定常伝熱面については、銅円板内に埋めこまれた素線径 0.1 mm の CA 熱電対により浸没冷却中の冷却曲線を測定し、水平平板を集中定数系近似することにより沸騰曲線を求めた。また、図4(a)の伝熱面について、膜沸騰状態における保持時間 t_w の後にヒータ入力を 0 とし、以後伝熱面内各点での冷却曲線を測定し各時刻における伝熱面内温度分布を 2 次曲線近似することにより沸騰曲線を求める非定常実験も行った。なお、この場合の等価伝熱面厚さは $l = 170 \text{ mm}$ であり、測定された沸騰曲線に対する t_w の影響は $t_w = 0 \sim 60 \text{ 分}$ の範囲では確認されなかった。



(a) 定常伝熱面



(b) 非定常伝熱面

- A: Horizontal flat plate
- B: Heater
- C: Thermocouple
- D: Spacer
- E: Bakelite ring
- F: Bakelite
- G: Support

図4 水平平面伝熱面の概略図

図5に、極小熱流束点条件について、本測定値を、 $D = 50 \text{ mm}$ の水平平面-液体室素系での非定常測定値⁸⁾とともに、伝熱面厚さ l に対して示した。図中の ΔT_M の測定値は、 $l(\text{mm})$ に対して次式で整理され、非定常実験において過渡性の度合を代表する l に対し、 ΔT_M の依存性が極めて小さいこと、および図5の ΔT_M の値は図3の液体室素の ΔT_M の測定値に極めて近いことがわかる。

$$\Delta T_M = 22.0 + 2.21 \times l^{-1} \dots\dots (4)$$

一方、極小熱流束点の熱流束条件 q_M については、水平平面上では過渡性の影響をうけ、過渡性の減少とともに定常値に漸近することがわかる。

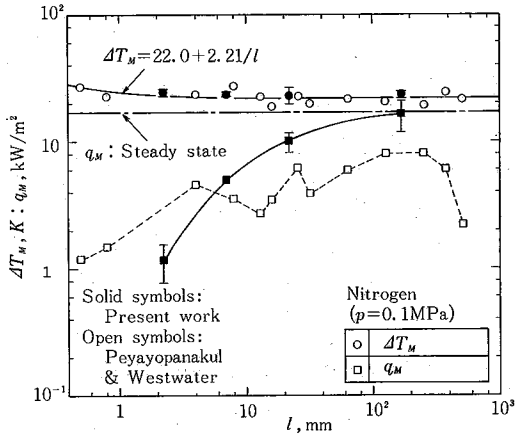


図5 極小熱流束点条件に対する沸騰過程の過渡性の影響

4. 結言—温度支配型アプローチの有効性—

従来の研究^{9),10)}によれば、極小熱流束点条件に対する液体流速の影響は、熱流束条件 q_M に対しては顕著であるが、少なくとも低流速域での過熱度条件 ΔT_M に対しては顕著でない。こうした情報と第2章、第3章の結果を総合すると、伝熱面形状・寸法、液体流速、および沸騰過程の過渡性に対し、極小熱流束点の熱流束条件 q_M は依存するが、過熱度(温度)条件 ΔT_M はほぼ独立であることがわかる。このことは、沸騰熱伝達における極小熱流束点条件の整理にあたり、支配条件が過熱度(温度)条件であるとする温度支配型アプローチの有効性を意味すると考える。すなわち、緒言で述べたように、浸入型固液接触モードの影響が小さく、平滑・清浄かつ熱伝導性の良好な伝熱面系での標準重力場飽和沸騰熱伝達における極小熱流束点条件を考察の対象とすると、残されるパラメータは、伝熱面形状・寸法、流体流速、沸騰過程の過渡性および系圧力の4つになる。こうした系における極小熱流束点条件の整理にあたり過熱度(温度)条件 ΔT_M に注目する温度支配型アプローチの立場に立つと、上記の結果より4つのパラメータのうち前半の3者は ΔT_M に影響しないことから、 ΔT_M を液体の種類と系圧力に対して整理すればよいことになる。

そこで、次報以下の報告では、 ΔT_M を支配条件として注目し、これが上記した沸騰系では液体の種類と系圧力のみにより定まると考える温度支配型アプローチを基礎として、極小熱流束点条件の整理を試みる。

(1984年10月29日受理)

参考文献

1) Spiegler, P. ほか4名, Intern. J. Heat Mass Transfer, 6 (1963), 987.

2) Segev, A. and Bankoff, S. G., Intern. J. Heat Mass Transfer, 23 (1980), 637.
 3) Berenson, P. J., Trans. ASME, Ser. C, 83 (1961), 351.
 4) Lienhard, J. H. and Wong, P. T. Y., Trans. ASME, Ser. C, 86 (1964), 220.
 5) Lienhard, J. H. and Dhir, V. K., Trans. ASME, Ser. C, 102 (1980), 457.
 6) Nishio, S., Paper presented at the Intern. Workshop on Fundamental Aspects of Post-Dryout Heat Transfer, (Salt Lake), (1984).
 7) 西尾, 日本機械学会論文集, 49-442, B (1983), 1185.
 8) Peyayopanakul, W. and Westwater, J. W., Intern. J. Heat Mass Transfer, 21 (1978), 1437.
 9) Yilmaz, S. and Westwater, J. W., Trans. ASME, Ser. C, 102 (1980), 26.
 10) Dhir, V. K. and Purohit, G. P., Nucl. Engng Des., 47 (1978), 49.
 11) Lin, D. Y. T. and Westwater, J. W., Proc. 7th Intern. Heat Transfer Conf., (Munich), 4 (1982), 155.
 12) Yao, S. C. and Henry, R. E., Trans. ASME, Ser. C, 100 (1978), 260.
 13) Bergles, A. E. and Thompson Jr., W. G., Intern. J. Heat Mass Transfer, 13 (1970), 55.
 14) Sakurai, A. ほか2名, Thermal-Hydraulics of Nucl. Reactors, (ANS), 1 (1983), 280.
 15) Sakurai, A. ほか2名, Proc. 1980 ICHMT Intern. Seminar "Reactor Safety Heat Transfer", (Dubrovnik), (1980).
 16) 高木・庄司, 日本機械学会論文集, 49-446, B (1983), 2190.
 17) 西尾・上村, 熱処理, 23-5 (1983), 260.
 18) Nikolayev, G. P. and Skripov, V. P., Heat Transfer-Soviet Research, 2-3 (1970), 122.
 19) Sciance, C. T. and Colver, C. P., Trans. ASME, Ser. C, 92 (1970), 659.
 20) Bier, K. ほか2名, "Heat Transfer in Boiling", (Hemisphere Pub. Co.), (1977), 85.
 21) Baumeister, K. J. and Simon, F. F., Trans. ASME, Ser. C, 95 (1973), 166.
 22) Henry, R. E., AIChE Sym. Ser., 70-138 (1974), 81.
 23) 庄司・高木, 日本機械学会論文集, 48-435, B (1982), 2324.
 24) Gunnerson, F. S. and Cronenberg, A. W., Trans. ASME, Ser. C, 102 (1980), 335.
 25) Veres, D. R. and Florschuetz, L. W., Trans. ASME, Ser. C, 93 (1971), 229.
 26) 森・戸田, 日本機械学会論文集, 47-421, B (1981), 1838.
 27) 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.
 28) Giventer, L. L. and Smith Jr., J. L., Adv. Cryogen. Engng, 15 (1969), 259.
 29) Merte, H. and Clark, J. A., Trans. ASME, Ser. C, 86 (1964), 351.
 30) 西川ほか3名, 九大工学集報, 38-4 (1966), 399.