

サブクール沸騰における膜沸騰熱伝達と極小熱流束点条件に関する研究

—第2報 プール膜沸騰熱伝達—

Study of Film Boiling Heat Transfer and Minimum-Heat-Flux(MHF)-Point Condition during Subcooled Boiling

—2nd Report ; Pool Film-Boiling Heat Transfer—

西尾茂文*・上村光宏*・坂口和貴*
Shigefumi NISHIO, Mitsuhiro UEMURA and Kazutaka SAKAGUCHI

1. 緒言

前報¹⁾では、以前の報告^{2)~4)}において飽和プール沸騰系について主張した極小熱流束点条件に関する温度支配仮説を、サブクール条件下のプール沸騰系について検討した。本報では、極小熱流束点以上の過熱度領域において出現する膜沸騰熱伝達に対するサブクール度の影響を検討する。

周知のように、膜沸騰熱伝達は、沸騰熱伝達において唯一解析の進んでいる沸騰様式である。たとえば、層流平滑界面における膜沸騰熱伝達は二相境界層方程式を相似変換、積分解法あるいは差分法により解くことにより解析され、飽和プール膜沸騰熱伝達の基礎解析^{5)~8)}、サブクールプール膜沸騰熱伝達の基礎解析^{9)~14)}、その変物性問題への拡張¹⁵⁾、流動膜沸騰熱伝達への拡張^{16)~23)}、および放射熱伝達との関連^{24)~27)}が報告されている。

ところで、前報¹⁾で述べたように、従来の沸騰実験系においては、蒸気膜の局所的先行崩壊により極小熱流束点温度がサブクール度 ΔT_{sub} の増大とともに顕著に上昇する。このため、従来の実験系では高サブクール条件下における膜沸騰熱伝達実験は困難であり、したがって二相境界層理論を検証するサブクール膜沸騰熱伝達に関する基礎データは極めて少ない^{14), 28)~32)}。このような事情を背景として、本研究では、前報で報告した蒸気膜の局所的先行崩壊を排除し斉時的崩壊が実現するよう工夫された実験系を用いて、広範囲の過熱度 ΔT_{sat} およびサブクール度領域にわたるサブクール膜沸騰熱伝達の測定値を収集することを、第一の目的とする。

さて、上述の二相境界層理論は主として数値解析により解かれるが、各因子の影響を評価する上で解の見通しのよい解析解は、近似解といえども魅力的である。たとえば Hamill and Baumeister³³⁾ は、最大エントロピ生成原理に基づく水平平面上でのサブクール膜沸騰熱伝達に関する解析を行い、次の近似式を得ている。

$$h_{ft} = h_{fs} + 0.12 h_i \cdot (\Delta T_{sub} / \Delta T_{sat}) + 0.88 h_r \dots (1)$$

ここで、 h_{fs} : サブクール膜沸騰の全熱伝達率

h_{fs} : 飽和膜沸騰熱伝達率の対流成分

h_i : 液相の自然対流熱伝達率

h_r : 放射熱伝達率

である。この表示式は、サブクール膜沸騰熱伝達の因子依存性について優れた見通しを与えるが、その妥当性については、上述の二相境界相理論と同様の理由で、水平円柱—水系^{29), 31)} および球—液体ナトリウム系³⁰⁾ についてそれぞれの測定値に合わせるようこれを修正する方法が提案されているに過ぎない。そこで、本研究では、本報告および既存測定値に基づき、式(1)をさらに一般的に拡張することを第二の目的とする。

2. 実験装置および実験方法

実験系は、前報¹⁾と全く同一の白金水平円柱および球まわりの蒸留水のサブクールプール沸騰系であり、実験装置および測定値処理方法の詳細は、前報を参照されたい。ただし、水平円柱伝熱面系においては、系圧力の影響を検討するために、系圧力 $p = 8 \sim 100$ kpa においてサブクール膜沸騰熱伝達に関する定常実験を新たに行った。

3. 実験結果

3.1 膜沸騰熱伝達率のサブクール度依存性

まず、図1に、本実験で得られた球水深 $H = 1.8D$ の球伝熱面—大気圧水系における膜沸騰熱伝達率 h_{ft} (h_{ft} は放射熱伝達分を含む全膜沸騰熱伝達率を意味する) を、過熱度 ΔT_{sat} をパラメータとしてサブクール度 ΔT_{sub} に対して示した。球水深 $H = 1.8D$ を代表例とした理由は、以下のとおりである。前報で述べたように、球伝熱面系では支持棒における蒸気膜先行崩壊の影響で、 $H = 3D$ の条件では高サブクール条件下で極小熱流束点温度

*東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報

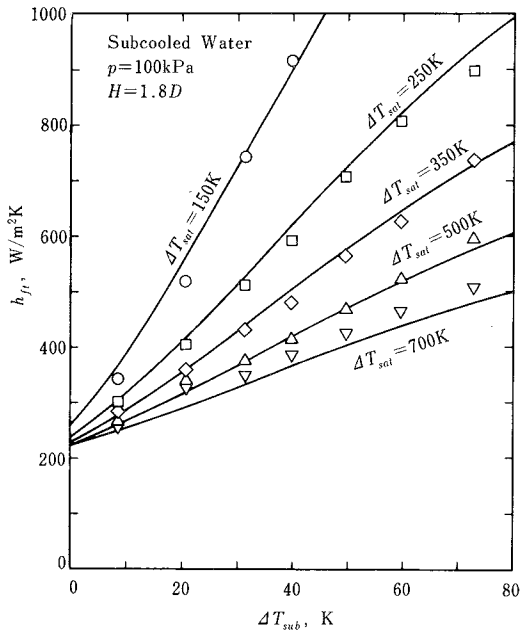


図1 球伝熱面における膜沸騰熱伝達率とサブクール度

が顕著に上昇し、膜沸騰が実現される過熱度領域が高温熱度域に限定される。一方、 $H < 1.8D$ の条件下では、蒸気膜の崩壊は斉時的崩壊により起こるが、膜沸騰熱伝達に対する球水深の影響が無視できない。そこで、膜沸騰域が十分な低過熱度域まで持続する斉時的蒸気膜崩壊が実現されかつ膜沸騰熱伝達に対する球水深の影響が無視できる条件として $H = 1.8D$ を選定した。

さて、図1に示されているように、膜沸騰熱伝達率に関する本測定値 h_{fi} は、サブクール度 ΔT_{sub} に対してほぼ線形関係にあると同時に、過熱度 ΔT_{sat} の増大とともに ΔT_{sub} の影響が小さくなることを示している。このことは、少なくとも定性的には式(1)の予測する傾向と一致している。そこで、本報告では、サブクール膜沸騰熱伝達率が、式(1)のように、飽和膜沸騰熱伝達率、サブクール度の影響を代表する代表熱伝達率および放射熱伝達率の重み付き線形和として表現できると仮定する。

3.2 サブクール膜沸騰熱伝達の統一表示式

サブクール膜沸騰熱伝達率に関して、このような線形関係が成立するとしても、問題はサブクール度の影響を代表する項(式(1)の右辺第2項)の評価である。たとえば、水平円柱一大気圧水について Siviour and Ede²⁹⁾ が実験的に得たこの項の係数は、Hamill and Baumeister³³⁾ の値とかなり異なる。

ところで、Frederking and Hopenfeld¹¹⁾ の解析によれば、高サブクール状態における膜沸騰熱伝達率(ただし

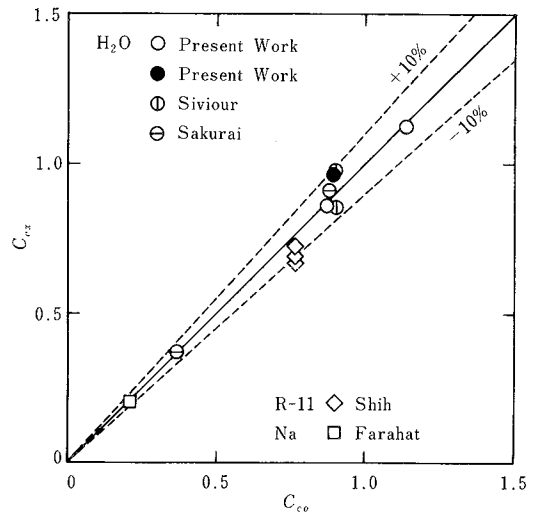


図2 サブクール度の影響を代表する項の係数 C (図中の○印は水平円柱系、●印は球系における値)

放射熱伝達は無視)は、サブクールされている液相への顕熱輸送に支配され、

$$h_{fi} = C [R, Pr_{lf}] \cdot (k_{lf}/D) \cdot (Gr_{lf} \cdot Pr_{lf})^{1/4} \times (\Delta T_{sub}/\Delta T_{sat}) \dots\dots\dots (2)$$

で表される。ここで、

$$R = (\rho \cdot \mu)_{vs} / (\rho \cdot \mu)_{ls} \dots\dots\dots (3a)$$

$$Pr_{lf} = \nu_{lf} / \alpha_{lf} \dots\dots\dots (3b)$$

$$C [R, Pr_{lf}] = \text{Func.} [R, Pr_{lf}] \dots\dots\dots (3c)$$

$$Gr_{lf} = g \cdot \beta \cdot \Delta T_{sub} \cdot D^3 / \nu_{lf}^2 \dots\dots\dots (3d)$$

であり、 D ; 伝熱面代表寸法、 ρ ; 密度、 μ ; 粘性係数、 k ; 熱伝導率、 ν ; 動粘性係数、 α ; 温度伝導率、 g ; 重力加速度、 β ; 液体の体膨張率、添字 ls, vs および lf は飽和液体、飽和蒸気および膜温度における液相を意味する。

そこで、式(1)、(2)および前節で述べた線形関係とを考慮し、本報では、サブクール膜沸騰熱伝達率を次のような重み付き線形和として表現する。すなわち、

$$h_{fi} = h_{fs} + C [R, Pr_{lf}] \cdot h_{ic} \cdot (\Delta T_{sub}/\Delta T_{sat}) + 0.88 h_r \dots\dots\dots (4)$$

ここで、

$$h_{ic} = (k_{lf}/D) \cdot (Gr_{lf} \cdot Pr_{lf})^{1/4} \dots\dots\dots (5)$$

$$h_r = \sigma_s \cdot (\epsilon_w^{-1} + \epsilon_l^{-1} - 1)^{-1} \times (T_w^4 - T_{sat}^4) / \Delta T_{sat} \dots\dots\dots (6)$$

σ_s : ステファンボルツマン定数、 ϵ ; 放射率、 T_{sat} ; 飽和

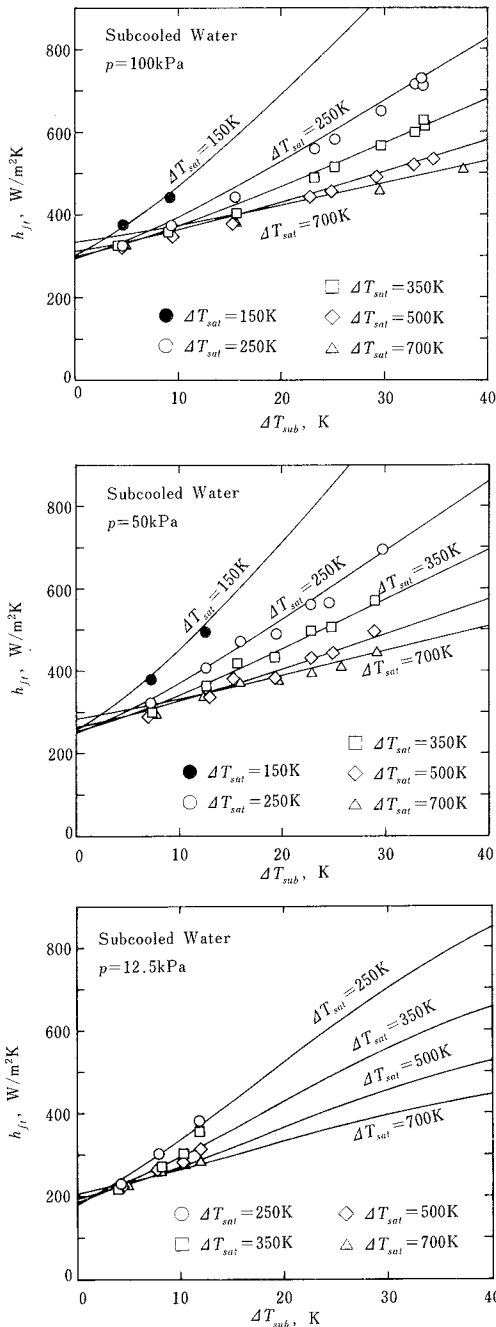


図3 水平円柱伝熱面における膜沸騰熱伝達率とサブクール度

温度, 添字 w, l は伝熱面および液相を意味する. また, 飽和膜沸騰熱伝達率 h_{fs} の算定には, 水平円柱系では桜井ら³⁴⁾の, 球系では Grigoriev ら³⁵⁾の整理式を用いる.

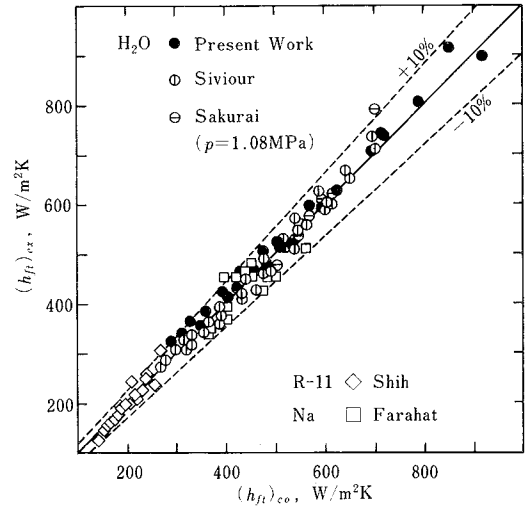


図4 統一整理式と測定値との相関(図中の●印は球伝熱面における値)

図1に示した実線は, 式(4)における右辺第2項の比例係数 C を 0.96 と取った場合の式(4)~(6)の各過熱度における値である. 測定値と実線の一致からみて, 上述の式は十分検討に値すると判断した.

3.3 統一表示式の妥当性

さて, サブクール膜沸騰熱伝達率に関する信頼性の高い測定値には, 水平円柱—大気圧水系における Siviour and Ede²⁹⁾, 大気圧以上の系圧力での水平円柱—水系における Sakurai ら³²⁾, 球—大気圧フロン R-11, 113 系における Shih¹⁴⁾ および球—大気圧液体ナトリウム系における Farahat ら³⁰⁾ の測定値がある. そこで, これらの測定値および本実験における球—大気圧水系, 水平円柱—水 ($p=50, 100 kPa$) 系の測定値より式(4)~(6)を用いてサブクール度の影響を代表する項の比例係数 C の値を計算し, これを式(3c)に示したように気液の密度・粘性係数比 R と液相プラントル数 Pr_l の関数として最小自乗法により整理し, 次式を得た.

$$C = 0.067 R^{-0.23} Pr_l^{0.21} \dots\dots\dots (7)$$

測定値より計算される C の値 C_{ex} と式(7)の値 C_{co} とを図2に比較したが, $\pm 10\%$ 程度で両者は一致しており, このことは, 結果的に統一表示式(4)~(7)の妥当性を示している.

3.4 統一的整理式と測定値

式(4)~(7)より計算される膜沸騰熱伝達率の値と測定値とを図3, 4に比較した. 図3は, 水平円柱伝熱面系における本測定値と本整理式の値(実線)とを比較したものである. また, 図4は, それ以外の測定値($h_{ft})_{ex}$)と整

研 究 速 報

理式の値($h_{r1}co$)とを比較したものである。各図における比較よりわかるように、整理式と測定値との対応は良好である。ちなみに、本整理に用いた測定値の条件範囲は、

$$R = 1.6 \cdot 10^{-6} \sim 6.5 \cdot 10^{-3}$$

$$Pr_{r1} = 0.004 \sim 4.4$$

である。

3.5 整理式の検討

式(4)において、放射熱伝達の影響を示す項の係数0.88は、Hamill and Baumeister³⁹⁾の提案した値を用いている。式(7)の導出あたり用いた測定値における h_r/h_{r1} の算定値は、液体ナトリウム以外では10%以下と小さいが、液体ナトリウムでは26~55%と大きい。また、式(7)の導出において、実際に液相プラントル数が大きく異なるのは、液体ナトリウムのみである。したがって、式(7)のプラントル数の指数の精度は放射項の係数および液体ナトリウムにおける実験の精度に大きく依存している。この点については、今後さまざまな液体における測定値を集積し、検討する必要がある。

4. 結 言

プール条件におけるサブクール膜沸騰熱伝達に関する実験を行い、サブクール条件下におけるプール膜沸騰熱伝達率は、広範囲の液体条件下において、飽和膜沸騰熱伝達率、サブクール度の影響を代表する代表熱伝達率および放射熱伝達率の重み付き線形和として表現できること、およびこの整理式におけるサブクール度の影響を代表する項の係数は、気液の密度・粘性係数比と液相プラントル数の関数として整理できることを示した。

(1986年12月19日受理)

参 考 文 献

- 1) 西尾ほか2名：生産研究, 39-3 (1987), 103
- 2) 西尾：生産研究, 37-1 (1985), 26
- 3) 西尾：生産研究, 37-2 (1985), 53
- 4) 西尾：生産研究, 37-3 (1985), 99
- 5) Koh, J.C.Y. : Trans. ASME, Ser. C, 84-1 (1962), 55
- 6) Frederking, T.H.K. and Clark, J.A. : Adv. Cyogen. Engng, 8 (1963), 501
- 7) Nishikawa, K.ほか3名 : Intern. J. Heat Mass Transfer, 15-4 (1972), 853
- 8) Farahat, M.M. and Nasr, T.N. : Intern. J. Heat Mass Transfer, 21-2 (1978), 256
- 9) Tachibana, F. and Fukui, S. : Proc. Intern. Heat Transfer Conf., (Boulder), 2 (1961), 219
- 10) Sparrow, E.M. and Cess, R.D. : Trans. ASME, Ser. C, 84-2 (1962), 149
- 11) Frederking, T.H.K. and Hopenfeld, J. : Z. Angew. Math. Phys., 15-4 (1964), 388
- 12) Nishikawa, K. and Ito, T. : Intern. J. Heat Mass Transfer, 9-2 (1966), 103
- 13) Dhir, V.K. and Purohit, G.P. : Nucl. Engng Des., 47-1 (1978), 49
- 14) Shih, C., Ph.D Thesis : Univ. of Wisconsin-Madison, (1978)
- 15) Nishikawa, K.ほか2名 : Intern. J. Heat Mass Transfer, 19-10 (1976), 1173
- 16) Ito, T. and Nishikawa, K. : Intern. J. Heat Mass Transfer, 9-2 (1966), 119
- 17) Jacobs, H.R. and Boehm, R.F. : Proc. 4th Intern. Heat Transfer Conf., (Paris), 5 (1970), B 3.9
- 18) Walsh, S.K. and Wilson, S.D.R. : Intern. J. Heat Mass Transfer, 22-5 (1979), 569
- 19) Epstein, M. and Hauser, G.M. : Intern. J. Heat Mass Transfer, 23-2 (1980), 179
- 20) 伊藤ほか2名 : 日本機械学会論文集, 47 B-416 (1981), 666
- 21) 茂地ほか2名 : 日本機械学会論文集, 48 B-432 (1982), 1539
- 22) Wang, B.-X. and Shi, D.-H. : Intern. J. Heat Mass Transfer, 27-7 (1984), 1025
- 23) Fodemeski, T.R. : Intern. J. Heat Mass Transfer, 28-1 (1985), 69
- 24) Sparrow, E.M. : Intern. J. Heat Mass Transfer, 7-2 (1964), 229
- 25) 茂地ほか2名 : 日本機械学会論文集, 49 B-445 (1983), 1912
- 26) 茂地ほか2名 : 日本機械学会論文集, 51 B-466 (1985), 1851
- 27) Srinivasan, J. and Rao, N.S. : Intern. J. Heat Mass Transfer, 27-1 (1984), 77
- 28) Nishikawa, K.ほか3名 : Bull. JSME, 15-90 (1972), 1591
- 29) Siviour, J.B. and Ede, A.J. : Proc. 4th Intern. Heat Transfer Conf., (Paris), 5 (1970), B 3.12
- 30) Farahat, M.M.K.ほか2名 : Nucl. Sci. Engng, 53-2 (1974), 240
- 31) Sakurai, A.ほか2名 : Proc. ICHMT Seminar, Nucl. Safety Heat Transfer, (Hemisphere Pub. Co.), (1981), 301
- 32) Sakurai, A.ほか2名 : Nucl. Sci. Engng, 88-3 (1984), 321
- 33) Hamill, T.D. and Baumeister, K.J. : NASA TN D-3925 (1967)
- 34) 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
- 35) Grigoriev, V.A.ほか2名 : Proc. 7th Intern. Heat Transfer Conf., 4 (1982), 387