



HOKKAIDO UNIVERSITY

| | |
|------------------|---|
| Title | プール沸騰に関する研究 : 第3報 飽和沸騰曲線の推算法の提案 |
| Author(s) | 坂下, 弘人; Sakashita, Hiroto; 熊田, 俊明 他 |
| Citation | 北海道大學工学部研究報告, 150, 91-97 |
| Issue Date | 1990-05-31 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/42223 |
| Type | departmental bulletin paper |
| File Information | 150_91-98.pdf |



プール沸騰に関する研究
— 第 3 報 飽和沸騰曲線の推算法の提案 —

坂下 弘人 熊田 俊明

(平成元年12月25日受理)

**Studies on Pool Boiling Heat Transfer
—3rd Report, Proposed Method for Predicting
Boiling Curves of Saturated Nucleate Boiling—**

Hiroto SAKASHITA and Toshiaki KUMADA

(Received December 25, 1989)

Abstract

A method is proposed for predicting a boiling curve which gives the essential characteristics of boiling heat transfer. The method uses the general correlation, $f(q, \Delta T_{sat}, n, B) = 0$, and the proposed correlation composed of active nucleation site density n and superheat ΔT_{sat} . This method can predict a boiling curve of arbitrary combination of liquid and the surface condition of a heated surface, for the wide range of pressure using one boiling curve given by a combination of a certain liquid and surface.

Comparisons are made with the measured boiling curves from various sources. These comparisons confirmed the usefulness of the present method for predicting boiling curves with reasonable accuracy.

1. 緒 言

プール飽和核沸騰の沸騰曲線推算式については、従来より多くの報告があり、次式の形にまとめられる。

$$q = A \Delta T_{sat}^m \quad (1)$$

$$\alpha = A^{1/m} q^{1-1/m} \quad (2)$$

ここで A は物性値を含む定数であり、 m は式の提唱者によって異なる一定定数である。式(1)や(2)が特定の伝熱面に関する沸騰曲線に過ぎないことについては、第1報⁽¹⁾で詳細に検討した。

著者らは、第1報⁽¹⁾において液の種類や伝熱面の特性に関わらず成立する核沸騰伝熱相関式について、その物理的意味を検討し各種相関式と実験データの比較を行った。本報はこの核沸騰伝熱相関式の応用の一例として、特定の伝熱面についてある液体や圧力での沸騰曲線が与えられたときに、この伝熱面に対する各種の液体や圧力の沸騰曲線を推算する方法について検討したものである。

2. 核沸騰伝熱相関式による沸騰曲線の推算法

2.1 推算法の概要

第1報⁽¹⁾で述べたように、プール飽和核沸騰伝熱の相関式は式(3)で与えられる。

$$f(q, \Delta T_{sat}, n, B) = 0 \quad (3)$$

ここで B は物性値を含む定数項である。式(3)は、液の種類と圧力を定め定数項を特定すると、図1に示すように $q-\Delta T_{sat}-n$ 座標系で一つの曲面を与える。特定の伝熱面の核沸騰挙動は、この曲面上の一本の曲線と与えられる。また、圧力や液の種類が異なり物性値が変化する場合には、図1に示した曲面が移動する。いま、特定の伝熱面で物性値を変化させた場合の核沸騰特性の変化を考えてみる。この場合、物性値の変化に対応する各々の曲面上に、伝熱面の特性によって定まる一本の曲線が存在し、これらの曲線の投影として $q-\Delta T_{sat}$, $n-q$, $n-\Delta T_{sat}$ 各平面に曲線群が与えられる。

$q-\Delta T_{sat}$ 平面の曲線群が推算すべき沸騰曲線群である。 $n-\Delta T_{sat}$ 平面の曲線群は発泡点密度と過熱度、物性値の関係である。従来の多くの研究によれば発泡は伝熱面の特性や物性値および過熱度によって規定されるため、この曲線群が特定の伝熱面における発泡特性を表していることになる。従って、発泡特性を式(4)のように定式化し特定の伝熱面について物性値が変化した場合の $n-\Delta T_{sat}$ 平面の曲線群を予測できれば、核沸騰伝熱相関式が与える曲面群を介して $q-\Delta T_{sat}$ 平面の沸騰曲線群を推算できる。

$$f(n, \Delta T_{sat}, B_n) = 0 \quad (4)$$

ここで B_n は物性値および伝熱面の特性に関わる因子を含む定数である。

2.2 発泡点密度の式の導出方法

従来より、実際の発泡点密度は、伝熱面上の潜在的な気泡発生核を臨界半径 r^* の円錐状キャビティにモデル化して扱われている。しかし、発泡機構の詳細については不明な点が多く理論的に発泡点密度の式を得ることは難しい。ここでは発泡点密度に関する経験式の導出方法について考える。

いま、特定の伝熱面において液体や圧力を変えて一連の沸騰曲線が得られているとする。図1に示したように、これらの曲線群を核沸騰伝熱相関式を介して $n-\Delta T_{sat}$ 平面に投影したものが特定の伝熱面における発泡点密度と過熱度、物性値の関係を表している。いま、用いている核沸騰伝熱相関式が正しいければ、沸騰曲線より算出された発泡点密度も正しい結果を与えている。従って、発泡点密度を整理し得る式(4)を見いだすことにより、特定の伝熱面における発泡点密度の式を得ることができる。さらに、その式の妥当性は他の伝熱面について同様に発泡点密度の整理を試みることで検討することができる。

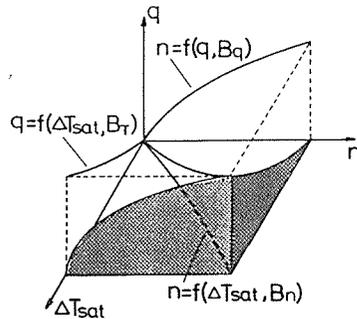


図1 式(3)によって与えられる曲面と特定の伝熱面の核沸騰特性を表す曲線

2.3 発泡点密度の式の提案

著者らは、第1報⁽¹⁾において各種核沸騰伝熱相関式の評価を行い、Kocamustafaogullari ら⁽²⁾の相関式が大気圧での上向き面の各種液体の実験データと広い熱流束範囲に渡って良く一致することを示した。さらに、この相関式は各種液体の臨界圧力の違いや、熱流束の増加と圧力を高めることによる沸騰様相の変化の類似性を考慮すると、大気圧から大きく隔たった圧力領域や限界熱流束近傍を除く広い範囲で成立すると期待される。以上の点から、本報では Kocamusta-faogullari ら⁽²⁾の核沸騰伝熱相関式を用いて発泡点密度を算出し、式(4)に対応する経験式の導出を試みる。発泡点密度の式としては、式(5)を仮定する。

$$n = C \cdot f \{ N_{ja}^{a_1} (r^*/r_s)^{a_2} (r_s/r^*) \} \tag{5}$$

$$N(r^*) = C \cdot f(r_s/r^*) \tag{6}$$

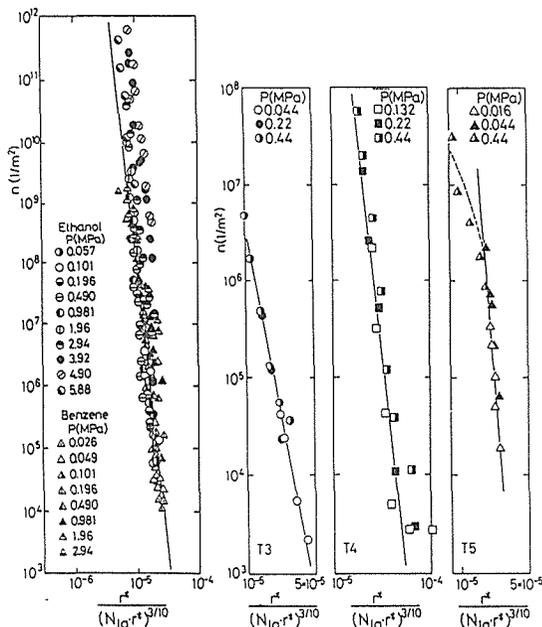
ここで C ($1/m^2$)、 r_s (m) が伝熱面の特性に依存する定数であり、 a_1 、 a_2 は不変定数とする。式(5)は、伝熱面の潜在的な気泡発生核であるキャビティ分布が式(6)で表されているとして、特定のキャビティの発泡が隣接するキャビティから発泡する気泡によって抑制または促進される効果を気泡生長に関わるヤコブ数で表し、液の種類や圧力の変化が発泡特性に与える影響を表面張力や飽和温度を含む r^* で表したものである。

式(5)の未定定数 a_1 、 a_2 を定めその妥当性を検討するために、Fujita ら⁽³⁾の同一特性の伝熱面を用いたエタノールおよびベンゼンを用いた実験、および Bier ら⁽⁴⁾の R11 を用いた面の粗さを3種類 (T3, T4, T5 面) に変化した実験で測定された (q , ΔT_{sat}) のデータを用いた。その結果、式(5)の定数 a_1 、 a_2 を $a_1 = a_2 = 3/10$ とすれば、(q , ΔT_{sat}) の実験データより算出された発泡点密度は式(5)で良く整理されることが明らかとなった。

結果を図2に示す。Fujita ら⁽³⁾の結果は高圧域を除き良く整理されており、Bier ら⁽⁴⁾の3種類の異なる伝熱面 (T3, T4, T5 面) の結果も測定の全圧力で良く整理されている。図中の実線は、核沸騰伝熱の諸関係式が全てべきの形で表されていることから、式(5)を式(7)のように与えた結果である。伝熱面特性に関する定数 C 、 r_s と指数 l は、Fujita ら⁽³⁾ではエタノールの大気圧の実験データ、Bier ら⁽⁴⁾では各伝熱面の最も圧力の低い実験データに沸騰曲線を当てはめ、その係数および指数から定めた。

$$n = C \{ N_{ja}^{3/10} (r^*/r_s)^{3/10} (r_s/r^*) \}^l \tag{7}$$

式(7)を Kocamustafaogullari ら⁽²⁾の相関式に代入し沸騰曲線の指数を m とすると次式を得る。



Fujita ら⁽³⁾との比較

Bier ら⁽⁴⁾との比較

図2 算出された発泡点密度と式(5)の比較

$$q = A \Delta T_{sat}^m = BC^{\frac{3}{8}} r_s^{\frac{7}{10}(m-\frac{3}{2})} \cdot \left\{ \frac{\rho_v H_{fg}}{2\sigma T_{sat}} \left[\frac{2\sigma T_{sat} \rho_l C_{pl}}{(\rho_v H_{fg})^2} \right]^{\frac{3}{10}} \right\}^{m-\frac{3}{2}} \Delta T_{sat}^m \quad (8)$$

ここで $m=31/8+3/2$, B は核沸騰伝熱相関式の定数項であり第1報⁽¹⁾に示した。発泡挙動が $a_1 = a_2 = 3/10$ とした式(5)に従い, 特定の伝熱面のある液体や圧力の沸騰曲線で定めた C , r_s と l が液体や圧力の変化によらず一定に保たれるならば, 発泡点密度は式(7)で定まる図中の実線に乗ることになる。この場合には, 式(8)によって沸騰曲線の推算が可能となる。図2のエタノールの高圧域を除く Fujita ら⁽³⁾の実験データや Bier ら⁽⁴⁾の T3, T4面の実験データがこれに対応する。一方, Bier ら⁽⁴⁾の T5面のデータは破線で示した曲線上にあり, 圧力の増加と共に実線から離れる。この理由は, 圧力の増加と共に沸騰曲線の指数が減少するためであり, 他に Bier ら⁽⁴⁾の R115を用いた実験や Cichelli ら⁽⁵⁾のエタノールやプロパンを用いた実験でも同様の傾向を持つ結果が得られている。

この原因の一つとして, 圧力が高くなると発泡し得るキャビティ自体が不足することが考えられる。また, Semeria⁽⁶⁾の実験で示されたように, 高圧域では極めて微細な一次気泡が発生する。この微細な一次気泡は伝熱面に固着した状態で合体してから離脱する。このため, 個々の一次気泡の運動による対流効果が期待されず, 伝熱に寄与する実効的な発泡点密度が圧力と共に減少することになる。本報ではこれらの効果については考慮していない。

3. 推算した沸騰曲線と実験データの比較

図3に, 式(8)により推算した沸騰曲線と既存の上向き面での各種実験で得られた沸騰曲線の比較を示す。図中の m の値は比較に用いた沸騰曲線の指数であり, 各文献中に記載されている $(q, \Delta T_{sat})$ の実験点に曲線を当てはめて求めた。いずれも, 伝熱面が同じ場合には指数 m が圧力や液体の種類によらず一定に保たれており, 沸騰曲線の推算が可能である。式(8)の伝熱面特性に関わる定数は, 藤田ら⁽⁷⁾では R113の大気圧の沸騰曲線, Cichelli ら⁽⁵⁾および Raben ら⁽⁸⁾では大気圧の沸騰曲線より定めた。ただし, 藤田ら⁽⁷⁾の臨界圧力に近い沸騰曲線については, 式(8)に含まれる物性値の特定ができなかったため推算値との比較は行っていない。図より, Cichelli ら⁽⁵⁾および藤田ら⁽⁷⁾の R22を除く沸騰曲線は, 臨界圧力比約0.2以下では推算値と比較的良好に一致している。高圧域での沸騰曲線の推算法の確立は, 指数 m の減少する要因の解明を含め今後の検討課題である。

図3では Fujita ら⁽³⁾の水の沸騰曲線の推算も行っている。Fujita ら⁽³⁾はエタノール, ベンゼンの他に水を用いた実験も行っているが, 沸騰曲線の指数 m はいずれも $m=5$ で近似でき伝熱面特性は同じ状態であると見なされる。しかし, 沸騰曲線を推算するためにはエタノール, ベンゼンとは異なり水の大気圧の沸騰曲線を用いて伝熱面特性の定数を定める必要があった。本報で用いた Kocamustafaogullari ら⁽²⁾の相関式は水を含む各種液体に対し成立することから, この要因は式(5)の定式化にあると考えられる。水と他の液体では沸騰に関与する物性値の差が大きく, このため発泡特性の変化を式(5)では十分に表わされないためであろう。従来の研究でも水と他の液体に別の核沸騰伝熱相関式を用いている例があるが⁽⁹⁾, 同じ要因によるのかも知れない。

図4に Fujita ら⁽³⁾および藤田ら⁽⁷⁾の沸騰曲線を藤田ら⁽⁷⁾の方法で推算して比較した。藤田ら⁽⁷⁾は, 伝熱面の粗さと圧力を変えた実験を行い, 次の推算式を提唱している。

$$\alpha = \tilde{\alpha} G(R_p, P/P_c) F(P/P_c) q^{4/5} \quad (9)$$

ここで

$$G(R_p, P/P_c) = (8R_p)^{(1-P/P_c)/5} \quad (10)$$

$$F(P/P_c) = (P/P_c)^{0.23} / (1 - 0.99P/P_c)^{0.9} \quad (11)$$

$$\tilde{\alpha} = C_4 P_c^{1/5} / M^{1/10} / T_c^{9/10} \quad (12)$$

R_p は伝熱面の中心線の深さであり単位は μm である。また、その他の単位は α : $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$, q : W/m^2 , P および P_c : Pa , T_c : K , M : kg/kmol である。 C_4 は実験的に定める定数で $C_4 = 34$ と与えられる。式 (9) を用いて沸騰曲線を推算するには、伝熱面の粗さ R_p が必要である。藤田ら⁽⁷⁾の実験では $R_p = 0.125\mu\text{m}$ と与えられているため、その値を用いた。Fujita ら⁽³⁾の実験のうち、エタノールとベンゼンに関してはエタノールの大気圧の沸騰曲線より逆算した。水の沸騰曲線については、水の大気圧の沸騰曲線より R_p を定める必要があった。推算値と実験値は、本推算法による結果と同程度に一致している。藤田ら⁽⁷⁾の推算式は臨界点の物性値のみを用いるため実用上簡便である。ただし、この推算式は、式 (9) を変形すれば明らかなように沸騰曲線の指数が $m = 5$ の沸騰曲線に対するものである。

本報と類似の方法により沸騰曲線を推算する試みは、過去に Mikic ら⁽¹⁰⁾により行われている。Mikic ら⁽¹⁰⁾は、核沸騰伝熱相関式に第1報⁽¹⁾で示した Mikic ら自身の式を用い、発泡点密度の式には式 (5) で $a_1 = a_2 = 0$ とおいた式を用いている。この方法で推算した沸騰曲線と実験データの比較を図5に示す。データは大きく散乱しており、Mikic らの方法⁽¹⁰⁾では沸騰曲線の推算はできないことが分かる。

従来の沸騰曲線推算式では、沸騰曲線を式 (2) の形で表している例も少なくない。そこで、沸騰曲線をこの形で表した場合の推算値と実験値の比較を、参考までに図6に示す。

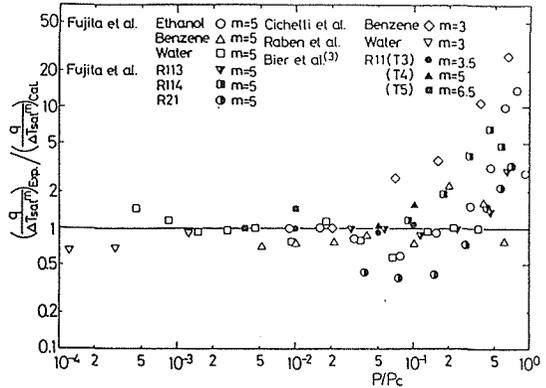


図3 本推算法と実験データの比較

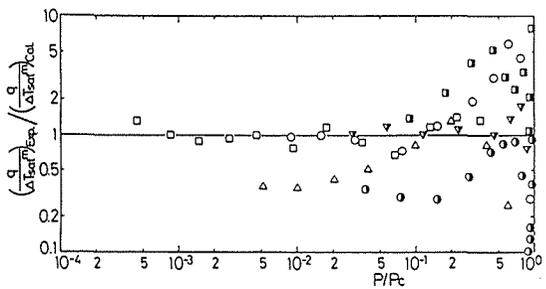


図4 藤田ら⁽⁷⁾の推算法と実験データの比較

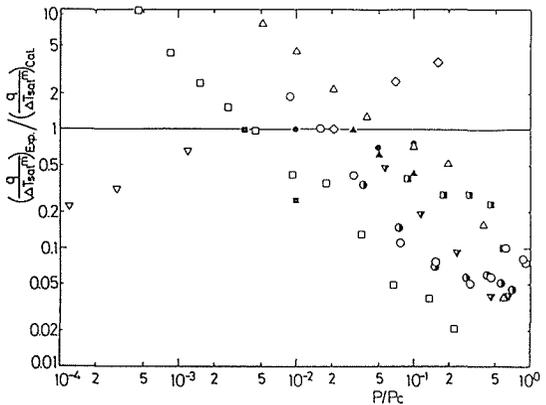


図5 Mikic ら⁽¹⁰⁾の推算法と実験データの比較

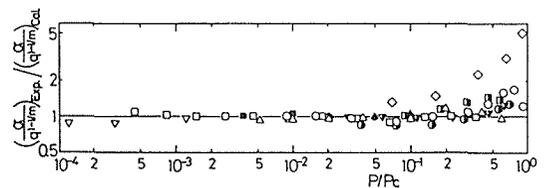


図6 沸騰曲線を α と q で表した場合の結果

4. 結 言

核沸騰伝熱相関式を用いて沸騰曲線を推算する方法について検討し、以下の結論を得た。

- (1) 特定の伝熱面で圧力や液の種類を変えて物性値を変化させた場合の伝熱特性は、核沸騰伝熱相関式によって定まる複数の曲面上の一本の曲線で与えられる。これらの曲線の $q-\Delta T_{sat}$ 平面への投影が沸騰曲線を表し、 $n-\Delta T_{sat}$ 平面への投影がその伝熱面における発泡挙動を表す。従って、特定の伝熱面における発泡挙動を予測できれば、核沸騰伝熱相関式を介してその伝熱面の沸騰曲線を予測できる。
- (2) 核沸騰伝熱相関式が正しければ、その相関式と沸騰曲線より算出される発泡点密度も正しい結果を与える。この場合には、発泡点密度を整理し得る式を見出すことにより発泡挙動を適切に表す発泡点密度の式を得ることができる。
- (3) 発泡点密度の経験式として式(5)を提案した。この式と Kocamustafaogullari ら⁽²⁾の相関式より得られる沸騰曲線推算式(8)は、各種実験より得られた沸騰曲線と高圧域を除き比較的良く一致した。
- (4) 高圧域における核沸騰伝熱機構の詳細は不明であり、この領域の推算法の確立は今後の検討課題である。また本推算法では、伝熱面が同じであっても水と他の液体では異なった伝熱面の特性定数を用いなければならず、この点も今後の検討課題である。

主 な 記 号

| | |
|---|--|
| A: 沸騰曲線の係数 | R _p : 伝熱面の中心線の深さ [式(9)] |
| B: 核沸騰伝熱相関式の定数項 | r _s : 伝熱面の特性に関する定数 |
| B _n : 発泡点密度の式の定数項 | r*: キャビティの臨界半径 |
| C: 伝熱面の特性に関する定数 | $= 2\sigma T_{sat} / \rho_v H_{fg} \Delta T_{sat}$ |
| C _p : 比熱 | T _c : 臨界温度 [式(12)] |
| H _{fg} : 蒸発潜熱 | T _{sat} : 飽和温度 |
| l: 伝熱面の特性に関する定数 | ΔT_{sat} : 過熱度 |
| M: 分子量 [式(12)] | α : 熱伝達率 |
| m: 沸騰曲線の指数 | ρ : 密度 |
| N: 伝熱面のキャビティ密度 | σ : 表面張力 |
| N _{Ja} : ヤコブ数 $= \rho_l C_{p1} \Delta T_{sat} / \rho_v H_{fg}$ | |
| n: 発泡点密度 | 添字 |
| P: 圧力 | l: 液体 |
| P _c : 臨界圧力 | v: 蒸気 |
| q: 熱流束 | |

文 献

- 1) 坂下・熊田, 工学部研究報告, 第144号(1988), 57.
- 2) Kocamustafaogullari, G. and Ishii, M., Int. J. Heat Mass Transf., 26(1983), 2377.
- 3) Fujita, Y. and Nishikawa, K., Mem.Fac. Eng. Kyusyu Univ., 36-4(1977), 303.
- 4) Bier, K., 他3名, Proc. 6th. Int. Heat Transf. Conf., (1978), 151.
- 5) Cichelli, M. T. and Bonilla, C. F., Trans. AIChE, 41(1945), 755.
- 6) Semeria, R., LA HUILLE BLANCHE, No6-October(1963), 679.

- 7) 藤田, 他 3 名, 機論, 48-432(昭57), 1528.
- 8) Raben, I. A., 他2名, Chem. Eng. Prog. Symp. Ser., 61-57(1965), 249.
- 9) Stephen, K. and Abdelsalam, M., Int. J. Heat Mass Transf., 23(1980), 73.
- 10) Mikic, B. B. and Rohsenow, W. M., Trans. ASME, Ser. C, 91(1969), 245.