



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	プール沸騰に関する研究（第1報）：核沸騰伝熱における相関式
Author(s)	坂下, 弘人; 熊田, 俊明
Citation	北海道大学工学部研究報告, 144, 57-65
Issue Date	1988-12-27
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42157
Type	departmental bulletin paper
File Information	144_57-66.pdf



プール沸騰に関する研究(第1報)

—核沸騰伝熱における相関式—

坂下 弘人 熊田 俊明

Studies on Pool Boiling Heat Transfer (1st.)

—Generalized Correlation of Nucleate Pool Boiling Heat Transfer—

Hiroto SAKASHITA and Toshiaki KUMADA

Abstract

Heat transfer correlation of saturated nucleate pool boiling is usually expressed by two parameters, heat flux and surface superheat. The use of this correlation is limited to the combination of the specific conditions of heat transfer surface and liquid. Therefore, several attempts for saturated pool boiling heat transfer have been made to obtain a generalized correlation consisting of three parameters, i.e., active nucleation site density, heat flux and surface superheat.

However, the physical meaning and the usefulness of the generalized correlation are not well understood.

In this paper, a study on the generalized correlation of saturated nucleate pool boiling heat transfer is presented. The correlating parameters, a suitable form and the physical meaning of the generalized correlation are examined. Based on this examination, several correlations that were proposed previously are analyzed and their validity were checked by using available experimental data.

1. ま え が き

核沸騰伝熱の実験結果は $q \propto \Delta T_{\text{sat}}^m$ のように整理されることが多く、時には $\alpha \propto q^n$ のように表わされる。通常、これらの式の比例定数には物性値を含まない定数を用いることが多い。しかし、このようにして得られた沸騰曲線は体系、使用した液体、圧力および伝熱面特性などに固有のもので、この沸騰曲線を一般化して実験条件の異なる場合に適用することはできないのが普通である。

プール飽和核沸騰伝熱特性をより一般化した形の式で与える試みとしては、 q 、 ΔT_{sat} 、 n の三つのパラメータからなる一般化相関式の提案がある。例えば、山縣ら^{1),2)}は水にサポニンやオレイン酸ソーダを添加し液の表面張力を種々に変えた実験を行ない、低熱流束域について次の関係を得ている。

$$\Delta T_{\text{sat}} \propto n^{-1/6} q^{2/3} \quad (1)$$

式(1)の比例定数は界面活性剤の添加の有無に関係なく一定としている。いま、この比例定数を A とすれば式(2)を得る。

$$\Delta T_{\text{sat}} = A n^{-1/6} q^{2/3} \quad (2)$$

式(2)は q , ΔT_{sat} , n を三軸とする座標系で一つの曲面を与える。山縣らにより確認された実験事実は、界面活性剤の添加量に対応して定まる $q-\Delta T_{\text{sat}}-n$ 座標系の各曲線は、界面活性剤の添加量に関係なく式(2)で与えられる曲面上にあることを意味している。さらに、西川³⁾は伝熱面上に逆V字の溝を設け、深さとピッチを変えて測定し式(1)と同様の関係を得ている。山縣ら、西川のこのような実験事実は、液の表面張力や伝熱面の粗さなどによって式(2)の形が変わらないことを示したものであり、核沸騰伝熱を系統化する上で重要な意味を持つ知見である。

本研究では、ある沸騰体系について式(2)のような相関式が得られたとして、この式の持つ物理的意味および利用価値について検討したものである。また、既存の $q-\Delta T_{\text{sat}}-n$ に関する相関式と実験データを比較することにより、各相関式の評価を行なった。

なお、プール飽和核沸騰を取り上げたのは、相関式として流速やサブクール度を因子として含まない核沸騰伝熱の基本的な形が決められることによる。

2. 関与する因子と相関式

2-1 関与する因子

プール飽和核沸騰伝熱に関与する因子を列挙すれば次の通りである。

- (1) 伝熱面に係わる性質：熱物性値、厚さ、表面粗さ、濡れ
- (2) 溶液に係わる性質：物性値、圧力、純度、濡れ
- (3) 体系：伝熱面の寸法・形状・向き、容器の寸法・形状、液位
- (4) その他：外力、伝熱面温度、熱流束

プール飽和核沸騰伝熱に関与する因子は上述のように極めて多く、これらの因子の効果をすべて含む相関式を導くことは実質的には不可能である。そこで、これらの因子を通常の核沸騰伝熱実験では影響が少ないものと、どのような核沸騰実験でも重要となる因子に分類する。(1)の伝熱面の熱物性値と厚さについては、限界熱流束近傍や遷移沸騰域の現象を議論する場合、あるいは極端に熱伝導率の小さい材質の伝熱面や厚さの薄い伝熱面を用いる場合を除き、核沸騰では影響が小さい。伝熱面の粗さと濡れは発泡条件に直接係わる重要な因子である。(2)の圧力や純度の影響は物性値の変化と考えることができる。(3)の容器の寸法・形状、液位の影響は極端な場合を除き小さい。伝熱面の寸法・形状・向きは、その違いによって核沸騰特性が大きく異なる場合にはこれらの因子の影響を考慮すべきである。ここでは、従来の慣習に従って水平上向き面、水平細線、円柱のように体系の違いを考える程度とする。(4)の外力としては通常は重力場を考えるが、重力は密度差による浮力の作用すなわち気泡の離脱に係わる因子である。従って、重力の強さが変化すると核沸騰特性も変化する。ここでは通常は重力が作用する場を考えることとする。

以上のように整理し特定の体系、例えば水平上向き面について核沸騰伝熱に影響する因子をまとめると次のようになる。

- (a) 伝熱面の粗さと濡れ
- (b) 溶液の物性値
- (c) 伝熱面の熱流束と温度

(a)の伝熱面の粗さと濡れは発泡条件に係わる因子である。しかし、伝熱面の粗さと濡れ特性を気泡発生核^{*)}の伝熱面上の分布に置き換えることができたとしても、そのような気泡発生核の分布関数 $N(r^*)$ と核沸騰伝熱に直接関与している実際の発泡点分布を関連付けることは困難である。特

^{*)}気泡発生核とは、その核に係わる温度場がある条件を満たす時に発泡し得る核であり、実際に発泡している核ではない。

定の気泡発生核が発泡するか否かは、マクロな量である q や ΔT_{sat} だけではなくその周囲の気泡発生核の分布密度や実際の発泡状態などに強く影響される。従って、一般化相関式の中に入るべき因子は核沸騰伝熱に直接影響する因子である実際の発泡点数でなければならないと考えられる。

以上、整理した因子 (a), (b), (c) より核沸騰伝熱の支配式として熱流束、伝熱面過熱度、発泡点密度および液の物性値の 4 つの因子からなる一般化相関式を考えれば良い。

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

ここで P は物性値を含む定数をまとめて表わしている。

2-2 各種相関式の関連性

まえがきで述べたように、 q , ΔT_{sat} , n の三つの変数で表わされる式(3)は (q , ΔT_{sat} , n) 三次元座標系で一つの曲面を表わす。山縣らや西川の実験によれば、体系と液体が同じ場合には面の粗さや表面張力を変えても q — ΔT_{sat} — n の関係は式(3)で与えられる一つの曲面で表わされる。いま、ある粗さと濡れを持つ伝熱面を特定すると、式(3)で与えられる曲面上にその伝熱面における q — ΔT_{sat} — n の関係を与える 1 本の曲線が定まることになる。この曲線の q — ΔT_{sat} , n — ΔT_{sat} , n — q の各々の面への投影によって、各々次式が与えられる。

$$q = f_q(\Delta T_{\text{sat}}) \quad (4)$$

$$\Delta T_{\text{sat}} = f_T(n) \quad (5)$$

$$n = f_n(q) \quad (6)$$

いま、式(3)が伝熱面の粗さや表面張力だけでなく物性値の変化に対しても成立するならば、各伝熱面について式(4)～式(6)のいずれかの関係 (例えば沸騰曲線に対応する式(4)) を求めることによって、他の 2 つの関係を決めることができる。従って、式(3)がどのような因子のどの程度の範囲の変化に対して成立するかを確かめることが、核沸騰伝熱をより系統的かつ組織的に把握するうえで重要となる。

2-3 一般化相関式の具体形

従来より提案されている q , ΔT_{sat} , n を含む相関式は、これら三変数の‘べき’の形で与えられている。

$$q = B \Delta T_{\text{sat}}^a n^b \quad (7)$$

ここで、 B は物性値を含む定数である。

しかし、核沸騰の特性を式(7)のような形で表わすことは、必ずしも理論的根拠のあることではない。伝熱面から液や蒸気側への伝熱過程が、液への熱伝導、液薄膜の蒸発、気泡の運動に伴う攪拌効果など複雑な過程に支配されている以上、全熱流束は各々の伝熱過程による伝熱量の和によって表わされるとも考えることができる。式(7)のように表わし得るのは、あくまでも近似であることに留意しておく必要がある。同様に、沸騰曲線は周知のように次式で表わされる。

$$q = C \Delta T_{\text{sat}}^d \quad (8)$$

ここで式(8)が実験式であれば、 d は定数であり C は定数か物性値を含む定数で表わされることが多い。このような近似式が成立するとすれば、核沸騰に関する相関式はすべて‘べき’の形で表わされ実用上簡便である。

3. 既存の各種相関式とその評価

3-1 沸騰曲線

従来より、式(7)の形以外の種々の式が提案されている。代表的な相関式として、核沸騰特性に関する理論式を式(9)の沸騰曲線で表わすことが多い。

$$q = f_q(\Delta T_{\text{sat}}, P_q) \quad (9)$$

ここで P_q は特性値を含む定数である。しかし、2-2 で述べたように式(9)は特定の粗さと濡れを持つ伝熱面に関する式である。逆に言うと、種々の表面特性を持つ伝熱面の沸騰曲線を式(9)のように $q-\Delta T_{\text{sat}}$ の一つの関係式で表わすことはできないということである。

3-2 発泡点密度に関する式

発泡点密度については従来より式(10)のように表わされることが多い。

$$n = f_n(r^*, P_n) \quad (10)$$

$$n = f_n(\Delta T_{\text{sat}}, P_n) \quad (11)$$

ここで P_n , P_n' は物性値を含む定数である。しかし、式(10)は式(11)のように変形すると明らかなように $n-\Delta T_{\text{sat}}$ の関係を定める相関式である。従って、式(9)の沸騰曲線と同様に特定の伝熱面には成立しても、異なる表面特性を持つ伝熱面の発泡点密度を $n-\Delta T_{\text{sat}}$ の一つの関係式で予測することはできないことになる。

3-3 一般化相関式

表 1 に q , ΔT_{sat} , n の三変数を含む既存の一般化相関式を示す。Kocamustafaogullari ら⁴⁾ の相関式は半実験式であり、 $q-\Delta T_{\text{sat}}-n$ の指数関係および物性値を含む定数項は実験データから特定している。ただし、式の概要は気泡離脱に伴う液の流動を考えた Zuber のモデル⁵⁾ に基いており、孤立気泡域を対象とした相関式と見なすことができる。Tien⁶⁾, 原⁷⁾, Mikic ら⁸⁾ の相関式は純粋な理論式であり、いずれも体系は上向き水平面で孤立気泡域を対象としている。Tien, 原は気泡の運動によって誘起される流動に注目してモデルを構築しており、Kocamustafaogullari らと類似の性格を持つ相関式と考えることができる。Mikic らの相関式では、離脱気泡の 2 倍の径を持つ領域を気泡による影響範囲とし、残りの領域を自然対流によって支配されるとしている。また、気泡による伝熱機構を気泡離脱に伴う過熱液層のはく離とそれに続く液層の再加熱と考えているなど、前三者の相関式とはかなり異なった性格を有する相関式である。

表 1 既存の一般化相関式

著 者	文献	一 般 化 相 関 式	定 式 化 の 方 法
Kocamustafaogullari ら	4	$q = B \Delta T_{\text{sat}}^{3/2} n^{3/8}$ $B = 14 \lambda_l \left(\frac{\rho_l C_{p,l}}{\rho_v H_{fg}} \right)^{1/2} Pr^{-0.39}$ $\cdot \left\{ 0.0012 \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_v} \right)^{0.9} \cdot 0.0208 \theta \left(\frac{\sigma}{g \Delta \rho} \right)^{1/2} \right\}^{-1/4}$	気泡離脱に伴う流動を考えた Zuber のモデルに基く。ただし、指数、定数項は実験データより定める。
Tien	6	$q = B \Delta T_{\text{sat}} n^{1/2}$, $B = 61.3 Pr^{0.33} \lambda_l$	連続的気泡離脱に伴う流動を逆転岐流でモデル化。
原	7	$q = B \Delta T_{\text{sat}}^{3/2} n^{3/8}$ $B = \left(\frac{C_1 C_2}{2} \right)^{3/4} \left(\frac{4}{3} \pi C_2 \right)^{-1/2} \frac{(\rho_l C_{p,l} \lambda_l)^{3/4}}{(\rho_v H_{fg})^{1/2}}$ $C_1 = 5.5$, $C_2 = 0.056 \text{ m/s}$	気泡離脱に伴う温度境界層厚さの減少をポテソシャル流れの近似により解析で定める。
Mikic ら	8	$q_b = B \Delta T_{\text{sat}} n$ $q_b = q - (1 - n \pi D_b^2) q_{nc}$ $B = 2 \sqrt{\pi} (\rho_l C_{p,l})^{1/2} f^{1/2} D_b^2$ $f D_b = 0.6 \left(\frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_l^2} \right)^{1/4}$ $D_b = C_2 \left(\frac{\sigma}{g \Delta \rho} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho_l C_{p,l} T_{\text{sat}}}{\rho_v H_{fg}} \right)^{5/4}$ $C_2 = 1.5 \times 10^{-4} \text{ (水)}$, $4.65 \times 10^{-4} \text{ (水以外)}$	全熱流束 q を気泡離脱による温度境界層のはく離に基く伝熱分 q_b と自然対流による伝熱分 q_{nc} の和と考える。

この他、まえがきで述べたように山縣らは $q - \Delta T_{\text{sat}} - n$ の指数関係を実験により定め式(1)を提唱している。また、Cornwell ら⁹⁾は Mikic らと同様に全熱流束から自然対流分を差引いた熱流束に対し式(12)が成立するとしている。(ただし、気泡の発生に関係なく全伝熱面で自然対流が行なわれていると考えており、この点で Mikic らとは異なる。)

$$q_b \propto \Delta T_{\text{sat}}^{1.05} n^{0.9} \quad (12)$$

しかし、山縣ら、Cornwell らの相関式では物性値を含む定数項が特定されていないため実験に用いた溶液以外の溶液の沸騰伝熱特性を定量的に予測することはできず、一般化相関式と見なすことはできない。従って、これらの相関式は実験データとの比較検討からは除外した。

3-4 実験データ

表2に既存の実験を示す。いずれも沸騰曲線($q - \Delta T_{\text{sat}}$, $\alpha - \Delta T_{\text{sat}}$ あるいは $\alpha - q$)以外に発泡点密度が測定されており、一般化相関式の評価に利用することができる。また、同表には実験データに自然対流分の補正を施す場合に用いた自然対流熱伝達式も示した。これらの自然対流熱伝達の式は、Cornwell ら⁹⁾、Gaertner¹⁰⁾では未沸騰領域のデータも提示されているのでその内挿により求めた。山縣ら¹⁾、Kurihara ら¹¹⁾は未沸騰領域のデータを示していないため、 n の非常に小さな領域のデータより類推した。飯田ら¹²⁾、Kirby ら¹³⁾の実験は、熱負荷の高い合体泡領域あるいはそれに近い孤立気泡領域で n を測定しているため、自然対流の寄与は無視できる。なお、合体泡域の実験データと孤立気泡域を対象とした一般化相関式の比較は参考までに行なったものである。

3-5 一般化相関式と実験データの比較

実験データを各種相関式によって整理するために、相関式を次式のように与え左辺を縦軸に取り横軸には n を取って表示した。

$$\frac{q}{\Delta T_{\text{sat}}^a n^b} = B \quad (13)$$

実験データが相関式に従う場合には、実験データは物性値を含む定数項 B で定まる水平線上に乗ることになる。図1〜図3に結果を示す。

図1は Kocamustafaogullari らの相関式による結果である。水の実験データに対しては Cornwell

表2 実験データ一覧

著 者	文献	伝熱面, 実験条件ほか	補正用自然対流式	記号
山 縣 ら	1	50mm ϕ 上向き面, 大気圧の水, 孤立気泡域で測定。	$q_{\text{nc}} = 820 \Delta T_{\text{sat}}^{4/3}$	$\triangle$
Kurihara ら	11	20mm ϕ 上向き面, 大気圧の水, アセトン, CCl_4 , 表面粗さを6通りに変化, 孤立気泡域で測定。	$q_{\text{nc}} = 4370 \Delta T_{\text{sat}}^{0.86} (\text{水})$	$\bigcirc$
			$q_{\text{nc}} = 220 \Delta T_{\text{sat}}^{1.55} (\text{アセトン})$	$\ominus$
			$q_{\text{nc}} = 192 \Delta T_{\text{sat}}^{1.53} (\text{CCl}_4)$	$\bullet$
Gaertner	10	2in ϕ 上向き面, 大気圧の水, 孤立気泡域で測定。	$q_{\text{nc}} = 1300 \Delta T_{\text{sat}}^{4/3}$	$\diamond$
Cornwell ら	9	83mm ϕ 上向き面, 大気圧の水, 表面粗さを6通りに変化, 孤立気泡域で測定。	$q_{\text{nc}} = 1300 \Delta T_{\text{sat}}^{4/3}$	∇
飯 田 ら	12	20mm ϕ 上向き面, 大気圧の水, 合体泡領域で測定。		$\square$
Kirby ら	13	2in $\times$ 2in 上向き面, 大気圧の CCl_4 , 表面を粗くしたガラスを用いて合体泡領域まで測定。		$\blacktriangledown$

らのデータを除き良く整理されており、定数項の値も実験データのほぼ平均値と見なしてよい。Kurihara らのアセトン、 CCl_4 の実験データも相関式との一致は良好である。彼らの相関式は半実験式であり、本報告で比較の対象とした Kurihara ら、山縣らおよび Gaertner ら¹⁴⁾の実験データ*)を満足するように指数および定数項を定めている。従って、彼らの相関式が図 1 において Kurihara らや山縣らのデータと一致することは当然予想されることである。しかし、彼らが用いていない Gaertner および Kirby らの n の小さな領域での実験データとも良く一致している。また、厳密には彼らの相関式の適用範囲外と考えられる合体泡域での飯田らの実験データとも非常に良い一致を示している。このことから、彼らの相関式は液体の種類に係わらず n の広い範囲に渡って成立する可能性がある。

図 2 は Tien の相関式を用いた結果である。Kocamustafaogullari らの相関式と同様、Cornwell らの結果を除く水の実験データは、合体泡域での飯田らのデータを含め彼の相関式と非常に良い一致を示している。しかし、アセトン、 CCl_4 の実験データに対しては、彼の相関式はやや高目の値を予測する。

原の相関式は $q - \Delta T_{\text{sat}} - n$ の指数関係が Kocamustafaogullari らの相関式と同一であり、整理された結果は図 1 で与えられる。定数項は $B(\text{水}) = 29.4$, $B(\text{アセトン}) = 5.5$, $B(\text{CCl}_4) = 3.1$ となり、Kocamustafaogullari らの定数項と比較すると液体の種類によらずほぼ 1/2 の値を予測することになる。

図 3 に Mikic らの相関式を用いた結果を示す。彼らの相関式は自然対流分を補正した熱流束に対して導かれたものであるため、実験データを彼らと同じ方法で補正して比較した。水の実験データについては、他の相関式とは逆に Cornwell らのデータだけがほぼ水平となっている。しかし、定数項の値は Cornwell らのデータの約 2 倍となる。アセトンについてはデータのバラツキが大きく比較し難いが、 CCl_4 については Kurihara ら、Kirby らのどちらの実験データとも良い一致を示さない。以上より、Mikic らの相関式は $q - \Delta T_{\text{sat}} - n$ の指数関係、定数項共に適切でないと考えられる。

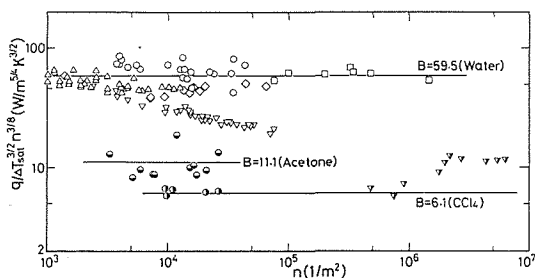


図 1 Kocamustafaogullari らの相関式による結果

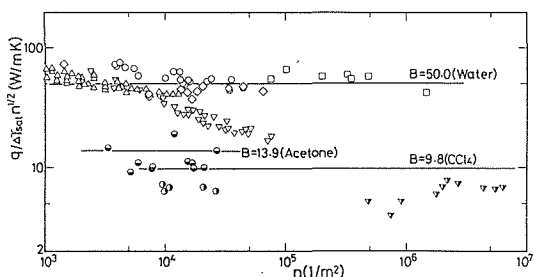


図 2 Tien の相関式による結果

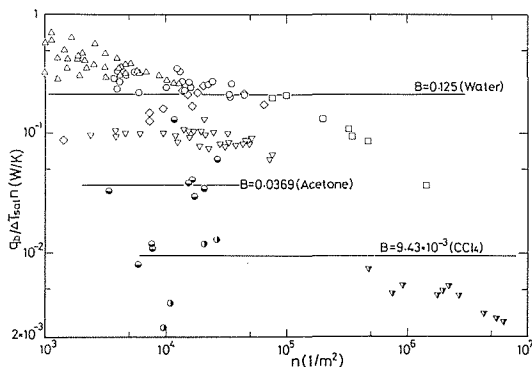


図 3 Mikic らの相関式による結果

*) Gaertner らは Ni 塩溶液を用いメッキ法により孤立気泡域から合体泡域の広い範囲に渡って n を測定している。しかし、溶液には高濃度の Ni 塩が含まれており、物性値を精度よく見積ることは困難と考え本報告では比較の対象とはしなかった。

また, Mikic らの自然対流の補正法自体についてもその妥当性を検討してみた。自然対流の補正法については, 3-3 で述べた Cornwell らの方法もあるが Mikic らの方法がより現実的であり比較的広く採用されている。図 4 に Mikic らの方法で補正したデータを Kocamustafaogullari らの相関式によって整理した結果を示す。実験データは, n の増加と共に急激に増加する傾向を示している。なお, 図は呈示していないが Tien の相関式を用いても実験データは図 4 と同様の傾向を示す。以上の点と Mikic ら自身の相関式によって実験データがうまく整理できない点を考えると, 彼ら自身の相関式に問題があるばかりでなく自然対流の補正法にも問題があると考えらるべきである。

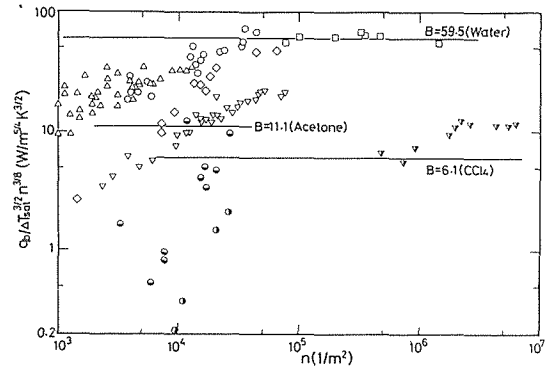


図 4 自然対流による寄与を補正した実験データの, Kocamustafaogullari らの相関式による整理結果

以上, 各種相関式と実験データの比較を行なった結果, 水のデータについては Kocamustafaogullari らおよび Tien の相関式が良い一致を示し, アセトン, CCl_4 のデータを含めると Kocamustafaogullari らの相関式が最も良く実験データを説明し得ることが分った。原の相関式も, 定数項に疑問はあるものの $q - \Delta T_{\text{sat}} - n$ の指数関係は Kocamustafaogullari らの相関式と全く同一である。これらの相関式はいずれも気泡の運動に伴う液の流動を考慮して導出されたものである。一般に, 気泡発生によって伝熱面近傍の流動状況は純粋な自然対流場とは大きく異なったものになる。自然対流の補正を施さない実験データが, 定量的な差はあるにしても定性的にはこれらの相関式で良く整理されるのに対し, 気泡の影響を考えない純粋な自然対流と気泡の離脱に伴う伝熱分の単純な足し合わせである Mikic らの相関式は実験データを説明できない。このことから, Kocamustafaogullari ら, Tien, 原の相関式には気泡発生に伴う液の流動状態の変化がかなり適切に考慮されていると考えてよいであろう。また, Mikic らの気泡離脱による過熱液層のはく離とそれに続く液層の再加熱という単純なモデルでは沸騰伝熱の複雑な機構をモデル化できないものと推論される。

しかし, 非常に低い熱流束域では全過熱度 ΔT_{sat} に対する初気泡発生に必要な過熱度の割合が相対的に大きく, 自然対流の影響を全く補正せずに相関式を‘べき’の形で与えることの是非については検討する必要がある。(相関式が‘べき’の形で与えられることは, 沸騰曲線も同様に‘べき’の形で与えられることを意味する。しかし, 低熱流束域では末沸騰状態の自然対流領域から‘べき’の形で表現される沸騰曲線に推移する領域が存在するが, この領域において全熱流束を用いて‘べき’の形で表わされた一般化相関式がどの程度の近似で成立するかを検討する必要がある。)

一方, 合体泡域で行われた飯田らの実験データが Kocamustafaogullari ら, Tien, 原の相関式で整理すると低熱流束域での実験データの延長線上に乗ることは非常に興味深い。合体泡下に形成されるマクロ液膜の流動は伝熱にはほとんど寄与せず, 一次気泡による潜熱輸送あるいは一次気泡の生成・離脱や破裂による液膜の攪拌効果の寄与が支配的であると考えられる。このように外見上は伝熱特性が全く異なっていると思われる領域の実験データをこれらの相関式が整理し得ることは, 孤立気泡域と合体泡域では外見上の違いにも係わらず同一または類似のメカニズムに基いた伝熱が行なわれており, 同じモデルによる定式化が可能であることを示唆している。

以上, 現在まで知られている一般化相関式の中では Kocamustafaogullari らの相関式が, $q - \Delta T_{\text{sat}}$

— n の指数関係および物性値を含む定数項共に適切であることが示された。しかし、相関式との比較に用いた実験データはいずれも大気圧下で測定されたものであり、彼らの相関式の妥当性が圧力の変化に対しても維持される保障はない。特に高圧領域において、沸騰曲線については多数の測定例があるが発泡点密度を同時に測定している例はない。従って、圧力変化に対する一般化相関式の妥当性を検証するためには、圧力の広い範囲に渡って発泡点密度の測定を含む実験データの蓄積が望まれる。また、本研究では特定の粗さや濡れを持つ伝熱面が指定された場合に、一般化相関式によってその伝熱面の沸騰曲線を特定し得るか否かについては言及し得なかった。この点は核沸騰伝熱を体型化する上で極めて重要な意味を持つため、今後さらに検討する必要がある。

4. ま と め

プール飽和核沸騰熱伝達の一般化相関式の備えるべき形、その物理的意味について検討した。また、既存の一般化相関式と実験データを比較し、その適否を検討することにより以下の結論を得た。

- (1) プール飽和核沸騰熱伝達の一般化相関式が存在するならば、その形は近似的に式(3)で与えられる。
- (2) 一般化相関式が成立するならば、ある体系について特定の表面特性を持つ伝熱面に対し、例えば沸騰曲線(式(4))が与えられると他の2つの関係(式(5), (6))は一般化相関式を媒介として求めることができる。
- (3) 式(9), 式(10)の形で与えられる核沸騰熱伝達に関する既存の関係式は、ある体系の特定の伝熱面についての核沸騰特性を与えており、このような形で一般的な核沸騰特性を表わすことはできない。
- (4) 既存の一般化相関式の中では Kocamustafaogullari らの相関式が実験データとの整合性に最も優れている。ただし、 $q - \Delta T_{\text{sat}} - n$ の指数関係のみに限ると Tien, 原の相関式も実験データを良く整理し得る。これらの相関式はいずれも気泡運動に伴う周囲液体の流動に基いた式であるが、孤立気泡域から合体泡域にかけて水の実験データを良く整理する。このことは、孤立気泡域と合体泡域で伝熱機構が類似であることを示唆している。
- (5) 自然対流の補正を考えた Mikic らの相関式は実験データをうまく整理できず、 $q - \Delta T_{\text{sat}} - n$ の指数関係および物性値を含む定数項共に適切でない。また、彼らの自然対流の補正法自体も問題がある。

最後に、本研究の遂行にあたり原子力安全工学講座の石黒亮二教授には研究全般にわたってご助言をいただいた。付記して謝意を表す。また、研究の一部には文部省科学研究費補助金(一般 C)の援助を受けたことを付記する。

記号

B	: 一般化相関式の定数項, (13)式	α	: 熱伝達率
C_p	: 比熱	ΔT_{sat}	: 壁面加熱度
D_b	: 離脱気泡直径	$\Delta \rho$	: $\rho_l - \rho_v$
f	: 気泡の離脱頻度	θ	: 接触角
g	: 重力加速度	λ	: 熱伝導率
H_{fg}	: 蒸発潜熱	ρ	: 密度

n	: 発泡点密度	σ	: 表面張力
Pr	: プラントル数		
q	: 熱流束	添字	
q_b	: 自然対流の効果を補正した熱流束	l	: 液体
q_{nc}	: 自然対流による熱流束	v	: 蒸気
r^*	: 気泡発生核の半径($2\sigma T_{sat})/(\rho_v H_{fg} \Delta T_{sat})$		
T_{sat}	: 飽和温度		

参考文献

- 1) 山縣, 他 3 名, 日本機械学会論文集, 18—67(昭 27), 53.
- 2) 山縣, 他 3 名, 日本機械学会論文集, 18—76(昭 27), 23.
- 3) 西川, 日本機械学会論文集, 20—100(昭 29), 808.
- 4) Kocamustafaogullari, G. and Ishii, M., Int. J. Heat Mass Transfer, **26** (1983), 1377.
- 5) Zuber, N., Int. J. Heat Mass Transfer, **6** (1963), 53.
- 6) Tien, C. L., Int. J. Heat Mass Transfer, **5** (1962), 533.
- 7) 原, 日本機械学会論文集, 29—204(昭 38), 1374.
- 8) Mikic, B. B. and Rohsenow, W. M., Trans. ASME, J. Heat Transfer, **91** (1969), 245.
- 9) Cornwell, K. and Brown, R. D., Proceedings of 6th Int. Heat Transfer Conf., **PB—8** (1978), 157.
- 10) Gaertner, R. F., Trans. ASME, J. Heat Transfer, **87** (1965), 17.
- 11) Kurihara, H. M., and Myers, J. E., AIChE J., **6** (1960), 83.
- 12) 飯田, 小林, 日本機械学会論文集, 36—283(昭 45), 438.
- 13) Kirby, D. B. and Westwater, J. W., Chem. Eng. Prog. Symp. Ser., **61** (1965), 238.
- 14) Gaertner, R. F. and Westwater, J. W., Chem. Eng. Prog. Symp. Ser., **56** (1960), 39.