

# 強制対流核沸騰熱伝達の整理式

松 村 博 久\*

(受理 昭和42年11月30日)

## A CORRELATION FOR THE NUCLEATE BOILING HEAT TRANSFER WITH FORCED CONVECTION

Hirohisa MATSUMURA\*

In the foregoing paper, the authors reported on the correlations for the subcooled-boiling heat transfer and the saturated-boiling heat transfer with forced convection. These correlations are insufficient for the transition region that lies between the end of the region of subcooled-boiling and the start of the region of saturated-boiling.

The author makes an experiment at the transition region and obtains the correlation for the nucleate boiling heat transfer with forced convection.

### 1. ま え が き

筆者らは、強制対流表面沸騰熱伝達の整理式<sup>1)</sup>および蒸気含有量の比較的少ない場合（流動様式では気ほう流の場合）における強制対流飽和沸騰熱伝達の整理式<sup>2)</sup>を以前に報告した。強制対流表面沸騰熱伝達の整理式は、サブクーリングが約5°Cより大きい範囲で適応され、サブクーリングが約5°Cより小さく、とくに流体温度が液体の飽和温度に近いほど整理式から算出した値と実験値との偏差は増加することが認められている。また、強制対流飽和沸騰熱伝達の整理式は、サブクーリングが0°C、すなわち流体温度が液体の飽和温度におけるものである。

強制対流を伴う核沸騰熱伝達の整理を行なうにあたって、上述の表面沸騰および飽和沸騰における二式を用いた場合には、精度よく整理できない範囲であるサブクーリングが約5°Cより0°Cまでの領域が生じる。ここでは、鉛直二重管を上向きに流れる純水の核沸騰実験を行ない、その実験結果からこの領域も含んだ強制対流核沸騰熱伝達の整理式を検討した。

### 2. 実験装置および実験方法

図1は実験装置の概略図である。流体系路は歯車ポンプ②によつて強制循環する閉回路になつており、使用液体は比抵抗が10<sup>6</sup>Ω-cm以上の純水である。流体

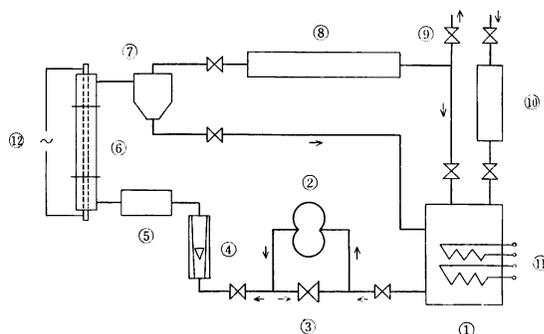


図1 実験装置概略図

- |         |          |
|---------|----------|
| ① 貯水タンク | ⑦ 気水分離器  |
| ② 歯車ポンプ | ⑧ 熱交換器   |
| ③ 流量調節弁 | ⑨ 排気弁    |
| ④ 流量計   | ⑩ 純水製造装置 |
| ⑤ 予熱器   | ⑪ 電気ヒータ  |
| ⑥ 測定部本体 | ⑫ 電気回路   |

温度は貯水タンク①内の電気ヒータ⑪およびガス燃焼加熱による予熱器⑤で調節する。測定部本体⑥は、外径15.8mm、肉厚1.2mmの銅管を内管とし、内径30.8mm、肉厚4.5mmの亚克力樹脂管を外管とした環状流路をなしている。伝熱管は銅管で、その長さは260mmである。銅管の内部には直径10mm、長さ550mmおよび中央の発熱部長さ260mmのエレマ発熱体挿入してあり、伝熱面は間接加熱を行なっている。伝熱管の軸方向の放熱を防止するためと伝熱管を支持するために、銅管の両端には熱伝導率が銅の

\* 鹿児島大学工学部機械工学第二教室・助教授

約20分の1であるステンレス鋼管を長さ120mmずつ熔接してある。アクリル樹脂管は内部の現象を肉眼および写真による観察ができるように透明になっている。

伝熱面表面温度の測定は、伝熱管の上流端から25mmの位置より30mm間隔で8箇所熱電対を伝熱面上にろう付けして行なわれた。また、流体温度は測定部本木の入口ならびに出口と測定部の上流端から30mmの位置より100mm間隔で3箇所の合計5箇所に熱電対を流路中心に設置して測定された。これらに使用された熱電対は、直径0.25mmの銅-コンスタンタンで、設置する直前に検定したものである。飽和温度検出用の静圧測定は、流体温度測定用の熱電対設置場所と同じ位置に静圧孔を5箇所設けて行なつた。熱負荷の算出のためには供給電力を計測した。

実験は鉛直上向流の定常状態にて行なわれ、熱負荷  $1.0 \times 10^5 \sim 3.0 \times 10^5 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ 、流速  $0.3 \sim 0.6 \text{ m/s}$  およびサブクーリング  $0 \sim 10^\circ\text{C}$  の実験範囲でなされた。

### 3. 整理方法

強制対流表面沸騰熱伝達の整理式<sup>1)</sup>は、

$$q = q_b + q_c \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、

- $q$  : 全熱負荷,  $\text{kcal/m}^2\text{h}$
- $q_b$  : 沸騰熱負荷,  $\text{kcal/m}^2\text{h}$
- $q_c$  : 非沸騰時の対流熱負荷,  $\text{kcal/m}^2\text{h}$

である。沸騰熱負荷は次式で与えられる。

$$q_b = 4.50 \exp\left(\frac{P}{20}\right) \Delta T_{\text{sat}}^{3.6} \dots\dots\dots(2)$$

また、内管加熱の二重管の場合における非沸騰時の対流熱負荷は、Walger<sup>3)</sup>の整理式

$$Nu = 0.021 \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^{0.45} Re^{0.8} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu_l}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (3)$$

より

$$q_c = 0.021 \left(\frac{\lambda}{D_e}\right) \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^{0.45} Re^{0.8} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu_l}{\mu_w}\right)^{0.14} \times (\Delta T_{\text{sat}} + \Delta T_{\text{sub}}) \dots\dots\dots(4)$$

ここに、

- $D_1$  : 内管外径, m
- $D_2$  : 外管内径, m
- $D_e$  : 水力相当直径, m
- $Nu$  : ヌセルト数
- $P$  : 系の圧力, ata

- $Pr$  : プラントル数
- $Re$  : レイノルズ数
- $\Delta T_{\text{sat}}$  : 過熱度,  $^\circ\text{C}$
- $\Delta T_{\text{sub}}$  : サブクーリング,  $^\circ\text{C}$
- $\lambda$  : 液体の熱伝導率,  $\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$
- $\mu_l$  : 液体の粘性係数,  $\text{kg/mh}$
- $\mu_w$  : 壁面温度の液体の粘性係数,  $\text{kg/mh}$

である。

一方、強制対流飽和沸騰熱伝達の整理式<sup>2)</sup>は、

$$q = q_b + q_c' \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$q_c' = \left\{ \left[ \left( \frac{v_g}{v_l} \right) \frac{1}{S} - 1 \right] x + 1 \right\}^{0.8} q_c \quad \dots\dots(6)$$

ここに、

- $S$  : すべり比
- $v_g$  : 気体の比体積,  $\text{m}^3/\text{kg}$
- $v_l$  : 液体の比体積,  $\text{m}^3/\text{kg}$
- $x$  : 蒸気重量率

である。すべり比と蒸気重量率との間には、つぎのような近似的関係<sup>2)</sup>が与えられている。

$$S = 1.12 \left[ \left( \frac{x}{1-x} \right) \left( \frac{v_g}{v_l} \right) \right]^{0.37} \dots\dots\dots(7)$$

したがって、(6)式に(7)式を代入して書きなおすと、

$$q_c' = \left\{ \left[ \frac{1}{1.12} \left( \frac{v_g}{v_l} \right)^{0.63} \left( \frac{1-x}{x} \right)^{0.37} - 1 \right] x + 1 \right\}^{0.8} q_c = [f(x) + 1]^{0.8} q_c \quad \dots\dots\dots(8)$$

ただし、

$$f(x) = \left[ \frac{1}{1.12} \left( \frac{v_g}{v_l} \right)^{0.63} \left( \frac{1-x}{x} \right)^{0.37} - 1 \right] x$$

強制対流飽和沸騰熱伝達の整理式(5)式には蒸気含有量の影響を取入れてあるが、強制対流表面沸騰熱伝達の整理式(1)式には蒸気含有量の影響は全然考慮されていない。しかしながら、強制対流表面沸騰時の蒸気体積率の実験結果<sup>4)</sup>の例からもわかるように、サブクーリングが約 $6^\circ\text{C}$ 以上の表面沸騰では飽和沸騰に比較して蒸気含有量を無視できるが、サブクーリングが約 $5^\circ\text{C}$ 以下ではサブクーリングが $0^\circ\text{C}$ 、すなわち液体の飽和温度に近づくほど蒸気含有量は指数関数的に増加する。したがって、飽和沸騰のみならず表面沸騰でもサブクーリングが $0^\circ\text{C}$ に近い領域では、蒸気含有量の影響を考慮する必要がある。

蒸気重量率はつぎの式で計算される。

$$x = \frac{1}{r} \left( \frac{Q}{W} - di_{\text{sat}} \right) \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここに、

$Q$  : 流体に与えた熱量, kcal/h

$r$  : 蒸発の潜熱, kcal/kg

$W$  : 流体の重量速度, kg/h

$di_{sat}$  : 流体の入口エンタルピと飽和エンタルピとの差, kcal/kg

である。表面沸騰において (9) 式で蒸気重量率を算出する場合に、蒸気重量率は 0 または負の値となることがあるので、蒸気重量率としてそのままの値を用いることはできない。そこで、表面沸騰はサブクーリングがあるが、そのサブクーリングを  $0^{\circ}\text{C}$  とし、表面沸騰と同一条件にて飽和沸騰していると仮定した場合の蒸気重量率を  $x_0$  とする。その蒸気重量率  $x_0$  にたいして、表面沸騰のサブクーリングが整理式にどのような影響をおよぼすかを考えればよい。すなわち、

$$q = q_b + q_c'' \quad \dots\dots\dots(10)$$

$q_c''$  は (8) 式から

$$q_c'' = [F(\Delta T_{sub}) \cdot f(x_0) + 1]^{0.8} q_c \quad \dots\dots\dots(11)$$

ただし、

$$\begin{cases} \Delta T_{sub} \rightarrow 0 \text{ の時 } F(\Delta T_{sub}) \rightarrow 1.0 \\ \Delta T_{sub} \rightarrow \infty \text{ の時 } F(\Delta T_{sub}) \rightarrow 0 \end{cases}$$

上述では蒸気含有量を蒸気重量率として示したが、蒸気含有量を蒸気体積率で表わすと、(6) 式はつぎのようになる。

$$q_c' = \left\{ \frac{1}{\left[ \left( \frac{v_l}{v_g} \right) \frac{1}{S} - 1 \right] f_g + 1} \right\}^{0.8} q_c \quad \dots\dots\dots(12)$$

ここに、 $f_g$  は蒸気体積率である。すべり比は一般に次式で表わされる。

$$S = \left( \frac{x}{1-x} \right) \left( \frac{v_g}{v_l} \right) \left( \frac{1-f_g}{f_g} \right) \quad \dots\dots\dots(13)$$

すべり比と蒸気重量率の近似的関係式 (7) 式および (13) 式より

$$S = 1.20 \left( \frac{f_g}{1-f_g} \right)^{0.59} \quad \dots\dots\dots(14)$$

したがって、(12) 式は

$$\begin{aligned} q_c' &= \left\{ \frac{1}{\left[ \frac{1}{1.20} \left( \frac{v_l}{v_g} \right) \left( \frac{1-f_g}{f_g} \right)^{0.59} - 1 \right] f_g + 1} \right\}^{0.8} q_c \\ &= \left[ \frac{1}{f(f_g) + 1} \right]^{0.8} q_c \quad \dots\dots\dots(15) \end{aligned}$$

ただし、

$$f(f_g) = \left[ \frac{1}{1.20} \left( \frac{v_l}{v_g} \right) \left( \frac{1-f_g}{f_g} \right)^{0.59} - 1 \right] f_g$$

表面沸騰時の蒸気体積率を知ることができれば、蒸気重量率にたいするサブクーリングの影響を含んだ (11) 式を用いなくても、(15) 式を用いることにより、整理式としては表面沸騰から飽和沸騰の全領域を包含することができる。

#### 4. 実験結果および考察

はじめに実験装置および実験結果の精度を確かめる意味で、非沸騰時の強制対流熱伝達の実験を行なった。その結果と管内加熱の二重管の場合にたいする Walger<sup>3)</sup> の整理式 (3) 式との比較では良好な一致をみた。

強制対流を伴う表面沸騰の実験値と強制対流表面沸騰熱伝達の整理式 (1) 式から算出した値との比較の一例を熱負荷とサブクーリングの関係で図 2 に示す。前にも報告<sup>1)</sup> したように、サブクーリングが約  $5^{\circ}\text{C}$  より小さくなると実験値と計算値の偏差が大きくなり、サブクーリングが  $0^{\circ}\text{C}$ 、すなわち液体の飽和温度に近づくにつれて偏差の増加率が大きくなっている。図中の

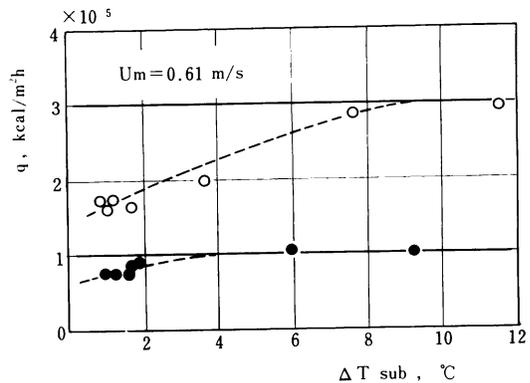


図 2 熱負荷とサブクーリングの関係

実線は実験の熱負荷を表わし、○および●印はそれぞれの実験条件により (1) 式から算出した熱負荷を示す。

図 3 (a) および (b) は熱伝達率におよぼすサブクーリングの影響を示す。破線は (1) 式より計算したおおよその値を表わしている。◎および⊙印はそれぞれの実験条件に応じて強制対流飽和沸騰熱伝達の整理式 (5) 式より算出した値である。

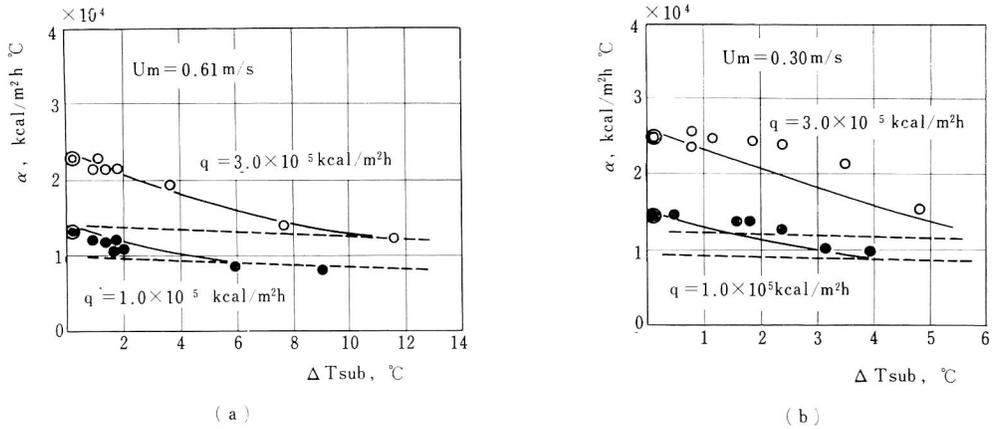


図3 熱伝達率におよぼすサブクーリングの影響

図4(a), (b) および (c) はサブクーリングの影響による沸騰現象の変化を写真観察した例である。熱負荷および流速が一定であれば、サブクーリングが小さくなるほど蒸気含有量は増加している。

図5は(11)式における  $F(\Delta T_{sub})$  の関係を示したものである。図より近似的につぎの関係が得られる。

$$f(x) = f(x_0) \exp \left\{ 7.0 \left[ \frac{\Delta T_{sat}}{(\Delta T_{sat} + \Delta T_{sub})} - 1.0 \right] \right\} \quad \dots\dots\dots(16)$$

したがって、

$$F(\Delta T_{sub}) = \exp \left\{ 7.0 \left[ \frac{\Delta T_{sat}}{(\Delta T_{sat} + \Delta T_{sub})} - 1.0 \right] \right\} \quad \dots\dots\dots(17)$$

結局、ここで求めようとしている強制対流核沸騰熱伝達の整理式は、(16)式を(8)式に代入して、強制対流飽和沸騰についての整理式(5)式を用いればよいことになる。この関係を図3の中に実線で示しているが、定性的傾向を良好に表わしていることが認めら

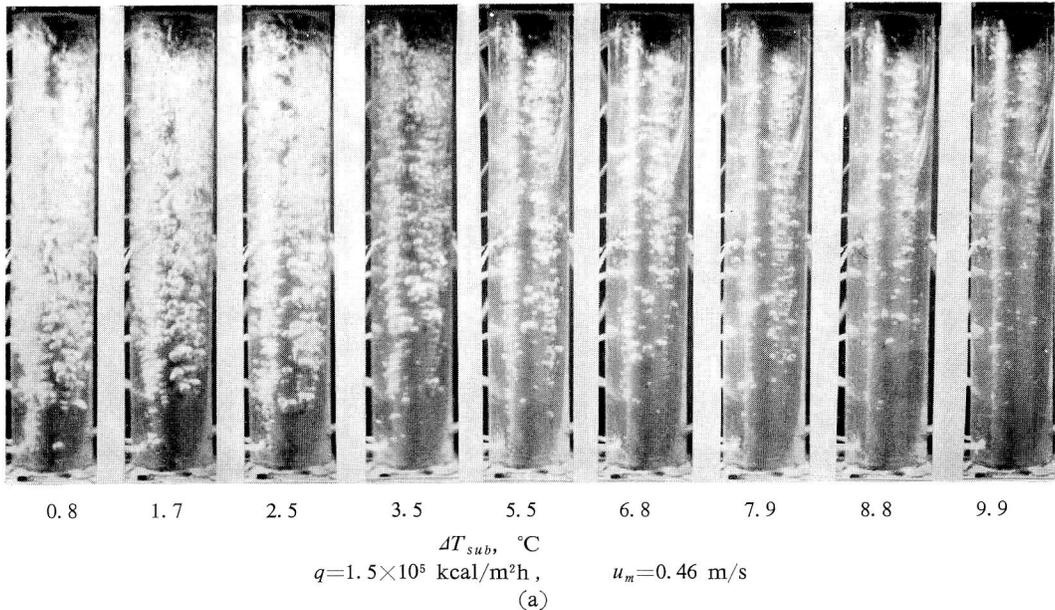


図4 沸騰現象におよぼすサブクーリングの影響

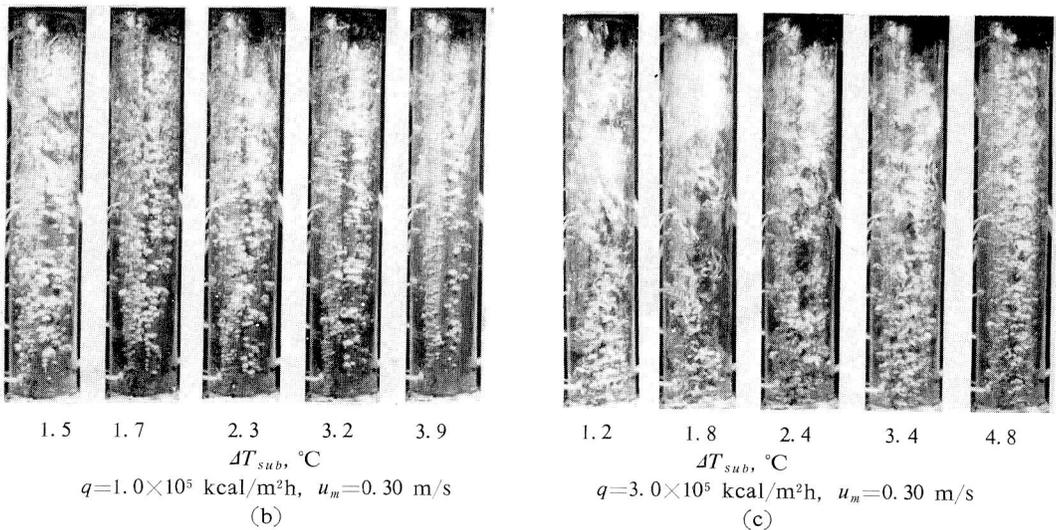


図4 沸騰現象におよぼすサブクーリングの影響

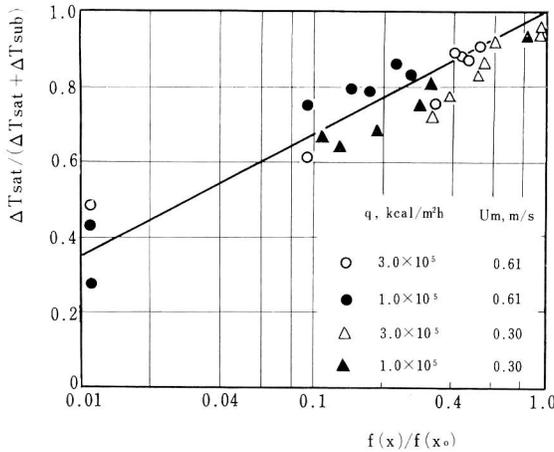


図5 補正係数と  $F(\Delta T_{sub})$  の関係

れる。

### 5. 結 論

以前に、強制対流を伴う表面沸騰および飽和沸騰の熱伝達の整理式を提出したが、それらの整理式では表面沸騰から飽和沸騰への遷移領域における整理が不十分であった。ここでは、遷移領域の実験を行ない、その結果からこの領域にも適応できる整理式の検討を試みた。

その結果、従来から強制対流表面沸騰熱伝達と強制対流飽和沸騰熱伝達の整理式は別々に取扱われていたが、(8)式および(16)式を(5)式に利用することにより、表面沸騰および飽和沸騰の両者を一つの整理式で表わすことができた。なお、ここで求めた整理式は流動様式の気ほう流における核沸騰領域のみに利用されるもので、これ以外の領域については詳細な検討をする必要がある。

最後に、御指導いただいた京都大学工学部佐藤俊教授に深甚なる謝意を表わします。

### 文 献

- 1) 佐藤・松村：強制対流表面沸騰の熱伝達について、日本機械学会論文集，28，195 (1962-11)，1542.
- 2) 佐藤・石神・松村：強制対流飽和沸騰の熱伝達について（第2報，気ほう流域の熱伝達），日本機械学会関西支部第42期定時総会講演会講演論文集，(1967-3)，58.
- 3) O. Walger : Wärmeübergang in Ringförmigen Strömungsquerschnitten, Chem.-Ing.-Tech., 25, (1953), 474.
- 4) 松村：強制対流表面沸騰時の蒸気体積率について，鹿児島大学工学部研究報告，5(1965-9)，31.