

# 強制対流表面沸騰の伝熱機構についての一考察

松 村 博 久

(受理 昭和40年5月31日)

## A CONSIDERATION ON THE MECHANISM OF THE SUBCOOLED BOILING HEAT TRANSFER WITH FORCED CONVECTION

Hirohisa MATSUMURA

As to the theoretical studies on the subcooled boiling heat transfer under forced convection, the present condition is confined to the experimental explanation because the mechanism of heat transfer is complicated and moreover a theoretical approach to it is not easy.

With a simple model of heat transfer mechanism, the author analyzed its thermal capacity of transmission and compared the experimental values with their calculated values. And it was found that the calculated values were more or less higher than the experimental values. This may be due to the fact that a few of hypotheses were introduced in the process of analysis. Therefore the author has a plan to drive on the experimental observations minutely and to develop an appropriate analysis to the phenomenon itself.

### 1. ま え が き

強制流動時の表面沸騰における熱伝達の理論的研究は、伝熱機構が複雑な上に理論的取扱いが容易でないことから、Bankoff<sup>1)</sup>の報告以外にはほとんどみあたらず、また伝熱機構の実験的解明の段階が現状である。

以前に筆者ら<sup>2)3)4)</sup>は、強制対流を伴う表面沸騰の伝熱機構を実験的に調べるため、気ほうの挙動について高速度カメラによる写真的観察を行ない、写真の解析から気ほうの発生より消滅までの気ほう直径の変化、気ほう直径の変化と移動位置の関係、気ほうの発生点数、発生周期および伝熱面表面包圍率などの測定結果を報告した。

本報告では上記の観測結果にもとづき、単純な模型の伝熱機構を設定してその伝熱量の解析を試み、実験値と解析からの計算値との比較を行なった結果および考察を述べる。

### 2. 伝熱機構の概念

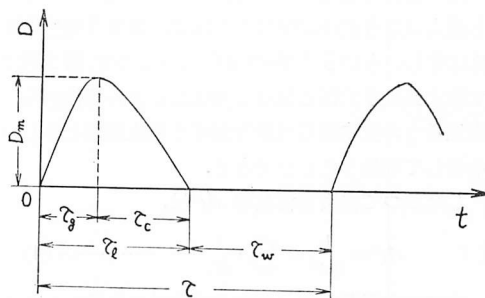
一般の伝熱面表面には気ほう発生核が無限に存在している。その中の気ほう発生により伝熱に大きく影響を与える気ほう発生核を有効気ほう核と称し、単位面積当たりの有効気ほう核数を  $N_i$  とすると、有効気ほう核1個当たりの影響面積  $A_i$  は、

$$A_i = \frac{1}{N_i} \dots \dots \dots (1)$$

それぞれの有効気ほう核から発生する気ほう最大直径は一定の値でなく、同一の有効気ほう核から発生する気ほう最大直径にも多少の変化がみられる。そこで同一の有効気ほう核からの気ほう最大直径の平均値を  $D_m$  とすると、それぞれの有効気ほう核からの気ほう最大直径の平均値、すなわち代表気ほう最大直径  $D_{max}$  は、

$$D_{max} = \sqrt{\frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} (D_{m,j})^2} \dots \dots \dots (2)$$

また、それぞれの有効気ほう核から発生している気ほうは周期性を有しているが、その周期はそれぞれの有効気ほう核により異なっている。第1図には任意の



第1図 気ほう直径と時間の関係

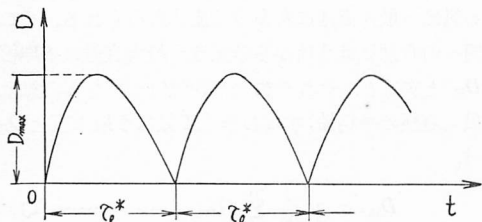
有効気ほう核から発生する気ほう直径と時間との一般的関係を示している。図中の記号は、

- $D$  : 気ほう直径, m
- $D_m$  : 同一有効気ほう核から発生する気ほうの平均最大直径, m
- $t$  : 時間, h
- $\tau$  : 気ほうの発生周期, h
- $\tau_c$  : 気ほうの凝縮期間, h
- $\tau_g$  : 気ほうの成長期間, h
- $\tau_l$  : 気ほうの寿命, h
- $\tau_w$  : 気ほうが消滅してから次の気ほうが発生するまでの期間, h

である。

いま有効気ほう核1個の影響面積において、有効気ほう核上に気ほうが存在しない場合には、隣接の有効気ほう核上の気ほうに伝熱的影響を受けているので、第2図のように気ほうの発生周期が気ほうの寿命に等しい、すなわち前に発生した気ほうが消滅すれば次の気ほうが発生するという相当気ほう寿命  $\tau_i^*$  を有する相当有効気ほう核を考える。その相当有効気ほう核数を  $N_i^*$  とすると、

$$N_i^* = \frac{\tau_i^*}{\tau} N_i \dots \dots \dots (3)$$



第2図 気ほう発生サイクルの概念

ここで、 $\tau_i^*$  は相当気ほう発生周期である。

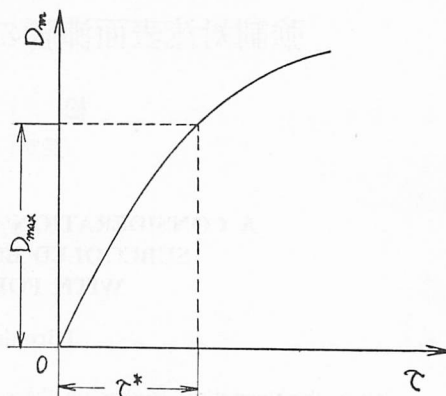
同一条件の実験において、気ほう発生点が異なつても最大気ほう直径が同じであれば、気ほう発生周期はほぼ等しいという結果<sup>3)4)</sup>を得ているので、第3図に示す最大気ほう直径と気ほう発生周期との関係から、代表気ほうの発生周期は相当気ほう発生周期と等しいとみなして取扱うことができる。

したがつて相当影響面積  $A_i^*$  は、

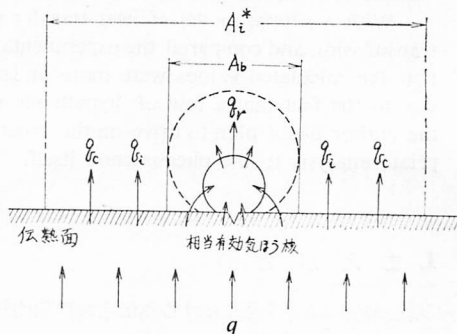
$$A_i^* = \frac{1}{N_i^*} = \frac{\tau}{\tau_i^*} \cdot \frac{1}{N_i} \dots \dots \dots (4)$$

次に相当影響面積における熱移動の機構を考える。

第4図には熱移動の概念図を示している。図中の記号



第3図 気ほうの最大直径と発生周期の関係



第4図 熱移動の概念

は、

$A_b$  : 気ほう最大直径時の伝熱面への投影面積,  $m^2$

$q$  : 全熱負荷,  $Kcal/m^2h$

$q_c$  : 非沸騰時対流の熱負荷,  $Kcal/m^2h$

$q_i$  : 気ほうが周囲液体に起動力としての影響を与えるために生ずる熱負荷,  $Kcal/m^2h$

$q_r$  : 気ほうに潜熱として与える熱負荷,  $Kcal/m^2h$

である。

気ほうの最大投影面積  $A_b$  は、

$$A_b = \frac{1}{4} \pi D_{max}^2 \dots \dots \dots (5)$$

最大投影面積と相当影響面積の比を  $\phi$  とすると、

$$\phi = \frac{A_b}{A_i^*} \dots \dots \dots (6)$$

第4図の熱移動の概念図に示すように、 $q_i$  は  $A_i^*$  全面に分布するが、 $q_c$  は気ほうの存在しない ( $A_i^* - A_b$ ) の範囲を通過する。また  $q_r$  は気ほうの成長および離脱のさいの潜熱として与えられる熱負荷である。この熱移動の関係を式に表わすと、

$$q=(1-\phi)q_c+q_i+q_r \dots \dots \dots (7)$$

である。

3. 伝熱量の解析

非沸騰時対流の熱負荷  $q_c$  は強制対流の場合、たとえ  
ば McAdams の式

$$N_n=0.023 R_e^{0.8} P_r^{0.4}$$

を用いて、

$$q_c=0.023 \left( \frac{\lambda}{D_e} \right) R_e^{0.8} P_r^{0.4} (\Delta T_{sat} + \Delta T_{sub}) \dots \dots \dots (8)$$

ここに、

- $D_e$  : 相当直径, m
- $N_n$  : ヌセルト数, 無次元
- $P_r$  : プラントル数, 無次元
- $R_e$  : レイノズル数, 無次元
- $\Delta T_{sat}$  : 過熱度, °C
- $\Delta T_{sub}$  : サブクーリング, °C
- $\lambda$  : 液体の熱伝導率, Kcal/mh °C

である。

ここでは温度境界層内での温度分布を直線と仮定し、境界層厚さを  $\delta$  とすると、

$$\delta = \frac{\lambda(\Delta T_{sat} + \Delta T_{sub})}{q}$$

(7) 式の関係から

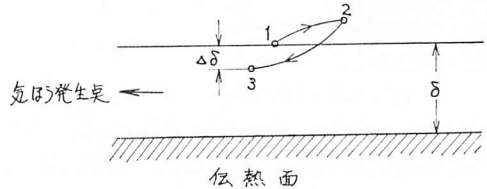
$$\delta = \frac{\lambda(\Delta T_{sat} + \Delta T_{sub})}{(1-\phi)q_c + q_i + q_r} \dots \dots \dots (9)$$

気ほうの成長、離脱および消滅によつて、温度境界層内の液体運動のために生ずる熱負荷  $q_i$  を気ほう周囲の液体粒子に誘起する運動がポテンシャル流れとして取扱つている原<sup>5)</sup>の理論を応用して求めることにする。

$$q_i = \sqrt{\left[ \frac{(1-\phi)q_c + q_r}{2} \right]^2 + \frac{1}{2} C_p r_l (\Delta T_{sat} + \Delta T_{sub})^2 \frac{K}{\tau_l^*}} - \left[ \frac{(1-\phi)q_c + q_r}{2} \right] \dots \dots \dots (12)$$

次に気ほうに与える潜熱としての熱負荷  $q_r$  は、気ほうが伝熱面に付着している期間に気ほう表面から放出する熱量と、気ほうが伝熱面から離脱する際に持去る熱量に相当する二つの熱負荷が考えられる。気ほうはほぼ最大直径に達したら気ほう発生点から離脱し、それ以後は次第に凝縮していくこと、および気ほうの成長速度はかなり大きいことなどの観察結果<sup>2)</sup>から、気

第5図には原による液体粒子の運動軌跡を示しているが、最初境界層外縁1にあつた液体粒子は気ほうの成長につれて2まで押上げられ、次に気ほうの浮上に伴つて伝熱面の方に引き下げられて3の位置までくる。この降下した距離を  $\Delta\delta$  とすると、次の関係式が得られている。



第5図 液体粒子の運動軌跡 (原<sup>5)</sup>による)

$$\frac{\Delta\delta}{\delta} = 5.5(N \cdot R_d^2)^{1.16}$$

ここに、

- $N$  : 気ほう発生点数, 個/m<sup>2</sup>
- $R_d$  : 伝熱面離脱時の気ほう半径, m

である。

ここに前節で述べた筆者の伝熱機構の概念を導入すると、

$$\frac{\Delta\delta}{\delta} = K = 5.5 \left( \frac{N_i^* D_{max}^2}{4} \right)^{1.16} \dots \dots \dots (10)$$

境界層の厚さが  $\Delta\delta$  だけ降下したので、その分だけ押上げるのに必要な熱負荷  $q_i$  は、

$$q_i = \frac{1}{2} C_p r_l (\Delta T_{sat} + \Delta T_{sub}) \frac{\Delta\delta}{\tau_l^*} \dots \dots \dots (11)$$

ここに、

- $C_p$  : 液体の比熱, Kcal/kg °C
- $r_l$  : 液体の比重, kg/m<sup>3</sup>

である。

したがつて、(9)、(10) および (11) 式より

ほう成長中の大部分の期間は気ほうの表面が過熱層で覆われていると思われるので、前者の場合の熱負荷は無視できるものとする。したがつて、 $q_r$  は離脱時気ほうの潜熱のみの熱負荷と考えると、

$$q_r = \frac{\pi}{6} D_{max}^3 r_l g \frac{1}{A_i^* \tau_l^*} \dots \dots \dots (13)$$

ここに、

$r$ : 蒸発の潜熱, Kcal/kg

$r_g$ : 気体の比重量, kg/m<sup>3</sup>

である。

前節でも述べたように、気ほう発生周期および気ほう最大直径はそれぞれの有効気ほう核により異なっているが、前に報告<sup>4)</sup>した結果から、気ほう成長期間と気ほう最大直径の間にはほぼ次の関係があつた。

$$\tau_g = 2.36 \times 10^{-4} \cdot D_m$$

このことから、

$$\tau_g^* = 2.36 \times 10^{-4} \cdot D_{max} \dots \dots \dots (14)$$

ここに、 $\tau_g^*$  は相当気ほう成長期間である。

一方、西川ら<sup>6)</sup>は気ほう直径と時間の関係において、次の関係式を導いている。

$$\frac{D}{D_m} = \frac{1}{(2n+1)} \sqrt{\frac{t}{\tau_g} \left[ 2(n+1) - \left( \frac{t}{\tau_g} \right)^{n+\frac{1}{2}} \right]} \dots \dots \dots (15)$$

ただし、 $n$  は不均一温度場の特性値であり、実験結果から求めている。

ここで (15) 式の関係を用いて、 $t \rightarrow \tau_l^*$  とすれば  $D \rightarrow 0$  となるので、

$$\frac{D}{D_m} = 0$$

$$\frac{t}{\tau_g} = \frac{\tau_l^*}{\tau_g^*} = 1 + \left( \frac{\tau_c^*}{\tau_g^*} \right)$$

の関係となり、

$$\tau_c^* = \left\{ [2(n+1)]^{\frac{2}{2n+1}} - 1 \right\} \tau_g^* \dots \dots \dots (16)$$

相当気ほう凝縮期間  $\tau_c^*$  は、

$$\tau_c^* = \tau_l^* - \tau_g^*$$

であるから、(14) 式および (16) 式より

$$\begin{aligned} \tau_l^* &= [2(n+1)]^{\frac{2}{2n+1}} \cdot \tau_g^* \\ &= 2.36 \times 10^{-4} [2(n+1)]^{\frac{2}{2n+1}} \cdot D_{max} \dots (17) \end{aligned}$$

$n$  の値については、サブクーリングの影響に較べて熱負荷および流速の影響は小さいので、この影響を無視してサブクーリングのみの関数とすると、サブクーリング 25~65°C の範囲での実験結果<sup>4)</sup> から次の関係が得られる。

$$n = 2.43 \log(\Delta T_{sub}) - 3.47 \dots \dots \dots (18)$$

#### 4. 実験値と計算値の比較および考察

実験結果<sup>2),3),4)</sup>のおもな値および必要数値の一覧を第1表に示している。ここで、 $q_{ex}$ は実験による熱負荷であり、 $U_m$ は平均流速である。第1表における過熱度  $\Delta T_{sat}$  は筆者ら<sup>7)</sup>の実験にもとづいて得られた次の整理式より算出している。

第1表 実験値<sup>2),3),4)</sup> および必要数値

実験番号	1	2	3	4	5	6	7
$U_m$ , m/s	0.15	0.15	0.30	0.30	0.45	0.45	0.45
$q_{ex}$ , Kcal/m <sup>2</sup> h	$3.32 \times 10^5$	$2.05 \times 10^5$	$3.59 \times 10^5$	$2.43 \times 10^5$	$3.53 \times 10^5$	$2.97 \times 10^5$	$3.98 \times 10^5$
$\Delta T_{sub}$ , °C	27.0	31.2	32.0	27.0	31.1	28.0	62.7
$\Delta T_{sat}$ , °C	21.5	18.1	21.0	18.6	20.5	19.0	20.4
$N_i$ , 個/cm <sup>2</sup>	22	16	24	16	22	18	16
$D_{max}$ , m	$2.3 \times 10^{-3}$	$1.7 \times 10^{-3}$	$2.3 \times 10^{-3}$	$1.6 \times 10^{-3}$	$1.9 \times 10^{-3}$	$1.8 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-3}$
$\tau_c^*$ , msec	26	21	24	14	16	16	10
$\tau_g^*$ , msec	1.95	1.44	1.95	1.36	1.61	1.53	0.85
$\tau_l^*$ , msec	7.76	5.09	6.84	5.40	5.69	5.88	2.19
$\phi$	0.274	0.0882	0.285	0.124	0.221	0.168	0.0276
$K$	0.323	0.0870	0.339	0.127	0.253	0.185	0.0225

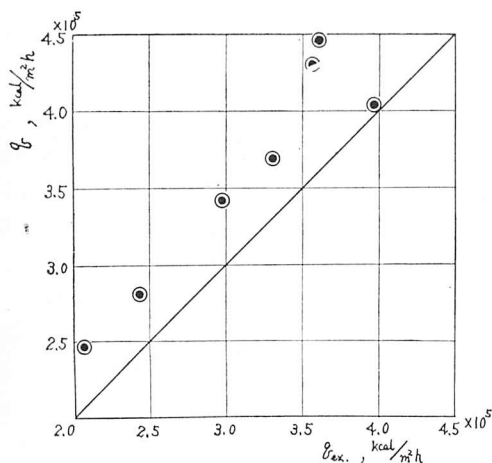
$$q_{ex} = 4.53 \Delta T_{sat}^{3.6} + 0.023 \left( \frac{\lambda}{D_e} \right) R_e^{0.8} P_r^{0.4} (\Delta T_{sat} + \Delta T_{sub}) \dots \dots \dots (19)$$

解析において導いた関係式 (7) 式に第1表の値を用いて熱負荷の計算を行なった結果が第2表である。全熱負荷の実験値と解析からの計算値との比較を第6図に示しているが、計算値の方が実験値よりもいくぶん高い値が出ている。この原因としては次のことが考えられる。第一には、気ほうの成長、離脱および

凝縮により温度境界層内の液体粒子の運動のために生ずる熱負荷を、粘性の影響を含まないポテンシャル流れとして算出しているため、流動状態が実際よりも過大評価されている。第二には気ほうが伝熱面より離脱する際は、伝熱面の垂直方向に移動するよりは、むしろ液体の流動によりいくらか下流に向つて動くのであ

第 2 表 計 算 結 果

実 験 番 号	1	2	3	4	5	6	7
(1- $\phi$ ) $q_c$ , Kcal/m <sup>2</sup> h	4.26×10 <sup>4</sup>	5.42×10 <sup>4</sup>	7.61×10 <sup>4</sup>	8.54×10 <sup>4</sup>	10.3×10 <sup>4</sup>	9.90×10 <sup>4</sup>	19.4×10 <sup>4</sup>
$q_r$ , Kcal/m <sup>2</sup> h	6.03×10 <sup>4</sup>	2.21×10 <sup>4</sup>	6.83×10 <sup>4</sup>	2.74×10 <sup>4</sup>	5.51×10 <sup>4</sup>	3.85×10 <sup>4</sup>	0.97×10 <sup>4</sup>
$q_i$ , Kcal/m <sup>2</sup> h	2.67×10 <sup>5</sup>	1.72×10 <sup>5</sup>	3.06×10 <sup>5</sup>	1.74×10 <sup>5</sup>	2.76×10 <sup>5</sup>	2.06×10 <sup>5</sup>	1.98×10 <sup>5</sup>
$q$ , Kcal/m <sup>2</sup> h	3.70×10 <sup>5</sup>	2.48×10 <sup>5</sup>	4.50×10 <sup>5</sup>	2.87×10 <sup>5</sup>	4.34×10 <sup>5</sup>	3.44×10 <sup>5</sup>	4.02×10 <sup>5</sup>



第 6 図 計算値と実験値の比較

るが、ここでは単に気ほうは伝熱面の垂直方向に離脱するとして取扱っている。第三には、温度境界層内の温度分布を直線と仮定しているために、その温度境界層内には実際の温度分布から算出した保持熱量よりも過分の熱量を貯えている。

なお、Bankoff<sup>1)</sup> は伝熱機構の解析にあたって、気ほうの成長期間  $\tau_g$  と凝縮期間  $\tau_c$  とは等しいとして影響面積  $A_i$  を考え、気ほう発生点を壁面に沿う吹出しおよび吸込みのポテンシャル流れに置き代えて取扱っている。解析結果は、高熱負荷のもとで大きな流速およびサブクーリングにて実験を行なった Gunther<sup>3)</sup> の実験値と比較しているために、流速およびサブクーリングが小さい範囲では、気ほうの成長期間と凝縮期間とを等しいとしていることに問題があるし、気ほうの最大直径の投影面積  $A_b$  が影響面積  $A_i$  よりも大となる場合が生じてくる。また本報告と同様に、気ほうによる液体の流れをポテンシャル流れとして解析してい

るので、実際の値より大きな値が算出されていることはいうまでもない。

### 5. む す び

単純な伝熱機構を設定して解析を行なった結果、実験値と解析からの計算値とは第 6 図のような関係が得られた。しかしながら、解析上にはいくつかの仮定が導入されているために、実際とは合致しない点が含まれているので、今後は詳細な実験的観察を押し進めるとともに、観察による現象により忠実な解析へと発展したい。

### 6. あと が き

本報告に際し、御指導いただいた京都大学工学部佐藤俊教授ならびに実験および討議に協力された岡田瑞夫氏（当時京都大学大学院学生）に謝意を表わします。

### 参 考 文 献

- 1) S. G. Bankoff : Chem. Engng. Progr. Symposium Series, 57, 32 (1962), 156.
- 2) 佐藤・松村・岡田：日本機械学会関西支部 第 38 期定時総会講演会，前刷 (1963-3)，49.
- 3) 佐藤・松村・岡田：日本機械学会第 714 回講演会，前刷集 (1963-11)，93.
- 4) 佐藤・松村・岡田：日本機械学会関西支部 第 39 期定時総会講演会，前刷 (1964-3)，31.
- 5) 原：日本機械学会論文集，29，204 (1963-8)，1374.
- 6) 西川・楠田・山崎：日本機械学会論文集，30，216 (1964-8)，989.
- 7) 佐藤・松村：日本機械学会論文集，28，195 (1962-11)，1542.
- 8) F. C. Gunther : Trans. ASME, 73, 2 (1951-2), 115.