自然対流表面沸騰の熱伝達について

松　村　博　久

（受理　昭和39年5月30日）

ON THE SUBCOOLED-BOILING HEAT TRANSFER UNDER NATURAL CONVECTION

Hirohisa MATSUMURA

In the foregoing paper, the author reported on the correlation of the subcooled-boiling heat transfer under forced convection. The boiling heat flux in this correlation was observed not affected by velocities and subcooling, while it was found dependent on the system pressure.

Then, the boiling heat flux was applied to the correlation of the subcooled-boiling heat transfer under natural convection. The results of the applied correlation were found agreeing with other investigators' data obtained from their experiments.

1. 緒　　言

沸騰による伝熱現象は，熱伝達率が非常に良好であり，高熱負荷をも受け入れるために，化学工業プラントから原子炉やロケットに至るまでの広範囲に応用されている．一般に，沸騰現象は核沸騰と膜沸騰に分類され，さらにそれぞれは自然対流の場合と強制対流の場合とに分けて考えられ，また液体の温度が飽和温度である場合を飽和沸騰，飽和温度以下である場合をサブクール沸騰または表面沸騰と称している．

沸騰に関する研究報告および論文は莫大な数に達している．しかしながら，表面沸騰についての研究は比較的少なく，特に自然対流時の表面沸騰熱伝達に関しての資料は，数編[1)~3)]にとどまつている現状である．

筆者は，以前に強制対流を伴う表面沸騰熱伝達の整理方法について報告[4)]し，そこでの沸騰熱負荷は，自然対流時の表面沸騰熱伝達の整理における沸騰熱負荷としても適用しうることを示唆した．本報告では，強制対流表面沸騰熱伝達の整理方法と同様の考えで，自然対流表面沸騰熱伝達を整理し，従来の整理式および実験データとの比較を行なつてみた．その結果，自然対流表面沸騰熱伝達は強制対流表面沸騰熱伝達の整理と同じ方法で整理できることが確められた．

2. 沸騰機構および整理式

自然対流核沸騰，すなわちプール沸騰の場合には，非沸騰時の自然対流による熱負荷よりも熱負荷が増加する．その理由としては，従来から (1) 気ほうの成長や離脱および消滅による流体のかく乱，(2) 気ほうの壁面付着が表面あらさとしての作用，(3) 伝熱面離脱後の浮上気ほうの運動による流体への干渉，および (4) 気ほう離脱の際の潜熱の移動，などが考えられている．

これに対比して，表面沸騰においては，液体のサブクーリング（液体の飽和温度と液体の混合平均温度との差）が極めて小さい領域を除き，発生した気ほうは伝熱面を離れると直ちに凝縮および消滅し，発生する気ほうの直径も大きくならないために，西川ら[5)]が報告している“気ほうの有効かく拌長”なるものも小さいと思われる．また，バーンアウト条件近傍を除外しては，発生する気ほうの量も多くないので，気ほうによる流体のかく乱効果は小さく，非沸騰時の対流伝熱と沸騰伝熱との相互干渉は少ないとみてよいであろう．

前の論文[4)]において，強制対流表面沸騰熱伝達の整理方法として，Rohsenow[6)]の提唱している強制対流飽和沸騰熱伝達の整理方法（すなわち，沸騰熱負荷と対流熱負荷との和を全熱負荷とする方法）が，応用できることを明らかにした．すなわち，

$$q = q_b + q_c \qquad \cdots\cdots\cdots (1)$$

ここで，

q ：強制対流を伴う表面沸騰熱負荷，Kcal/m²h

q_b ：沸騰の熱負荷，Kcal/m²h

q_c ：強制対流の熱負荷，Kcal/m²h

ただし，(1) 式に用いられた沸騰の熱負荷および強

制対流の熱負荷は，Rohsenow の提唱した値と異なり，次の式で表わされる．

沸騰の熱負荷は，

$$q=4.50\,e^{P/20}(\Delta T_{\mathrm{sat}})^{3.6} \quad \cdots\cdots\cdots (2)$$

ただし，

P：絶対圧力，ata

ΔT_{sat}：過熱度（伝熱面温度と液体の飽和温度との差），℃

強制対流の熱負荷は，たとえば McAdams の式

$$N_u=0.023\,R_e^{0.8}\,P_r^{0.4} \quad \cdots\cdots\cdots (3)$$

から書きなおして，

$$q_c=0.023\left(\frac{\lambda}{D_e}\right)R_e^{0.8}\,P_r^{0.4}(\Delta T_{\mathrm{sat}}+\Delta T_{\mathrm{sub}}) \cdots (4)$$

ただし，

D_e：流力的相当直径，m

N_u：ヌセルト数 $\left(=\frac{\alpha D_e}{\lambda}\right)$，無次元

P_r：プラントル数，無次元

R_e：レイノルズ数，無次元

ΔT_{sub}：サブクーリング，℃

α：熱伝達率$\left(=\frac{q_c}{\Delta T_{\mathrm{sat}}+\Delta T_{\mathrm{sub}}}\right)$，Kcal/m²h℃

λ：熱伝導率，Kcal/mh℃

本報告では，以上の考え方をさらに自然対流表面沸騰熱伝達の整理に拡大してみた．すなわち，サブクーリングの小さい領域を除き，(2) 式の沸騰熱負荷が，自然対流表面沸騰熱伝達の整理にも成立すると考え，強制対流の場合と同じく，自然対流表面沸騰の熱負荷を次のごとく表わした．

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

ただし．

q'：自然対流時の表面沸騰熱負荷，Kcal/m²h

q_c'：自然対流の熱負荷，Kcal/m²h

一般に，自然対流の乱流の場合に対して，

$$N_u'=K(G_r\cdot P_r)^{1/3} \quad \cdots\cdots\cdots (6)$$
$$K=0.13\sim0.17$$

ただし，

G_r：グラスホフ数 $\left(=\frac{g\beta l^3(\Delta T_{\mathrm{sat}}+\Delta T_{\mathrm{sub}})}{\nu^2}\right)$，無次元

g：重力の加速度，m/h²

K：比例係数，無次元

l：伝熱面代表長さ，m

N_u'：ヌセルト数 $\left(=\frac{lq_c'}{\lambda(\Delta T_{\mathrm{sat}}+\Delta T_{\mathrm{sub}})}\right)$，無次元

β：膨脹係数，1/℃

ν：動粘性係数，m²/h

いま，たとえば $K=0.14$ を用いて (6) 式を書きなおすと，自然対流熱負荷は

$$q_c'=0.14\left(\frac{g\beta\lambda^3}{\nu^2}\cdot P_r\right)^{1/3}(\Delta T_{\mathrm{sat}}+\Delta T_{\mathrm{sub}})^{4/3} \cdots (7)$$

次に，(5) 式と従来の整理式および実験データとの比較を行なつてみる．

3. 従来の整理式および実験データとの比較

これまでに提案されている自然対流表面沸騰熱伝達の整理式としては，Levy[1)7)] および西川ら[3)] などのがある．

Levy の整理式は，

$$q=\frac{\lambda c_p\gamma_l^2 J}{\sigma T_s(\gamma_l-\gamma_g)}\cdot\frac{1}{B_L}\cdot\frac{r+c_p\Delta T_{\mathrm{sub}}}{r}(\Delta T_{\mathrm{sat}})^3 \cdots (8)$$

ただし，

B_L：γ_g と r の積から決まる実験的定数，無次元

c_p：液体の比熱，Kal/kg℃

J：熱の仕事当量，kg·m/Kcal

r：蒸発の潜熱，Kcal/kg

T_s：絶対飽和温度，°K

γ_g：蒸気の比重量，kg/m³

γ_l：液体の比重量，kg/m³

σ：表面張力，kg/m

西川らの整理式は，

$$Y=6.35(f_p\cdot X)^{2/3} \quad \cdots\cdots\cdots (9)$$

$$Y\equiv\frac{\alpha R}{\lambda}$$

$$\overline{X}\equiv X\left(\frac{\Delta T_{\mathrm{sat}}}{\Delta T_{\mathrm{sat}}+\Delta T_{\mathrm{sub}}}\right)^{3/2}$$

$$X\equiv\left[\frac{1}{M^2P_0}\cdot\frac{c_l\gamma_l^2}{\lambda\sigma r\gamma_g}\right]^{1/2}R^{3/2}q$$

$$M=900,\ 1/\mathrm{m}$$

$$P_0=1.699,\ \mathrm{Kcal/h}$$

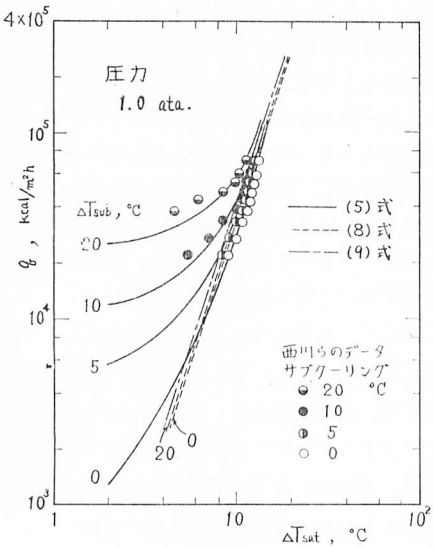
ただし，

f_p：圧力の補正係数，無次元

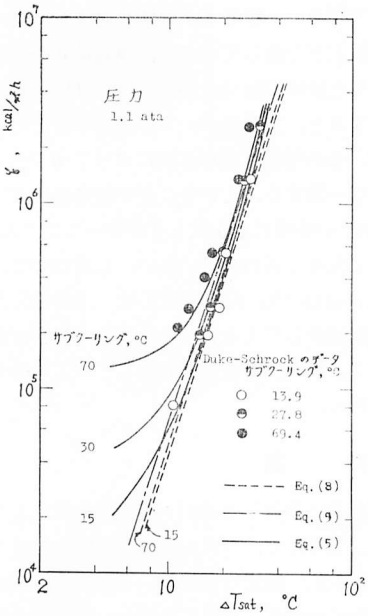
R：伝熱面半径，m

である．

水平円板の伝熱面を用いた大気圧下における西川ら[3)]の実験データをサブクーリングをパラメータとして，熱負荷 q と過熱度 ΔT_{sat} との関係で示したのが第

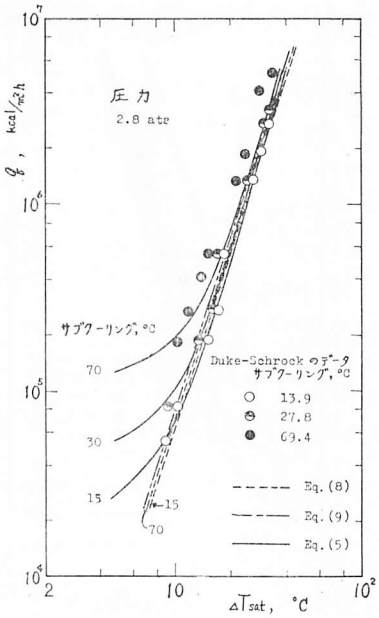


第1図　西川ら[3]の実験データとの比較

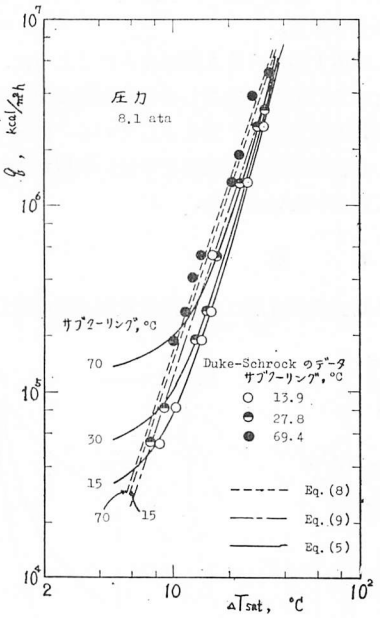


第2図　Duke-Schrock[2]の実験データとの比較（圧力 1.1 ata の場合）

1図である．サブクーリングの実験範囲は 0°C から 25°C であるが，便宜的にサブクーリング 0, 5, 10 および 20°C のパラメータをとつた．図中の実線は筆者の整理式 (5) 式で，破線は (8) 式，鎖線は (9) 式を表わしている．また，水平板伝熱面を使い，圧力 1.1, 2.8, 8.1 および 36 ata での Duke & Schrock[2] の実

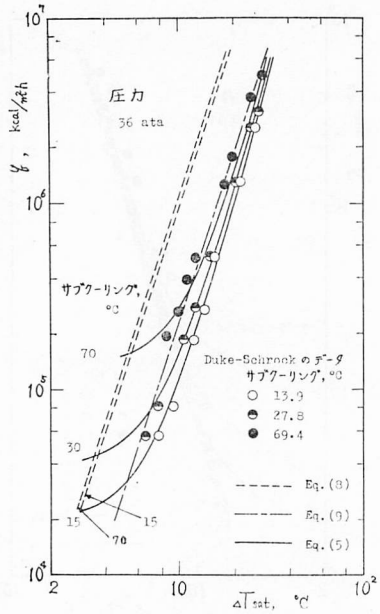


第3図　Duke-Schrock[2]の実験データとの比較（圧力 2.8 ata の場合）



第4図　Duke-Schrock[2]の実験データとの比較（圧力 8.1 ata の場合）

験データを，それぞれ第2図から第5図に示している．実験を行なつたサブクーリングは，13.9, 27.8 および 69.4°C の3段階である．第2図から第5図の図



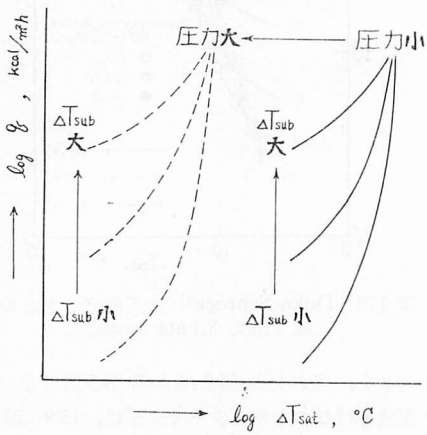
第5図　Duke-Schrock[2] の実験データとの比較（圧力 36 ata の場合）

中にも，第1図と同様に，(5)，(8) および (9) 式をも表わしてある．

以上の第1図から第5図にみられるように，実験データとここに筆者が提案した自然対流表面沸騰熱伝達の整理式とは良好な一致を示している．従来の整理式では，沸騰開始附近の過熱度の低い領域が十分に表わされていないといえよう．

4. 考　　察

自然対流表面沸騰は強制対流表面沸騰の場合と同じように，熱負荷は圧力およびサブクーリングの影響を受け，第6図に示すような関係にある．すなわち，圧力一定のもとでは，実線または破線で表わしているように，同一過熱度に対してサブクーリングの大きい方が熱負荷も大きくなつている．そしてサブクーリングの増加に伴つて，過熱度に対する熱負荷の上昇はゆるやかになつているのがみられる．また，圧力が増加すると実線の状態から破線の状態へ，沸騰曲線全体が過熱度の小さい方向へ移動している．



第　6　図

しかるに，過熱度の小さい沸騰開始点近くでは，熱負荷に対するサブクーリングの差異の影響は特に顕著であるが，過熱度が大きくなるにつれて，熱負荷に対するサブクーリングの影響は小さくなつている．このことは，Forster & Greif[8] の述べている沸騰の伝熱機構からも容易に理解できることであろう．

しかし，西川ら[3] によると，表面沸騰においては熱負荷 q を伝熱面と液体との温度差 $\Delta T(=\Delta T_{sat}+\Delta T_{sub})$ に対してプロットすると，液体の温度をパラメータとして実験点が分離してくるが，熱負荷 q を過熱度（伝熱面温度と液体の飽和温度との差）ΔT_{sat} に対してプロットすると，実験点が一本の曲線にまとめられる．そして，その関係は飽和沸騰における q と ΔT_{sat} との関係に一致する，ということが報告されている．また，Levy の整理式 (8) 式もサブクーリングの影響は，たいして大きく表われていない．したがつて，両者の (8) 式および (9) 式の整理式は，沸騰熱負荷が対流熱負荷に比較して大きい割合を占める場合に適用されるもので，表面沸騰全般を表わしているものではないと思われる．

5. 結　　論

筆者が前に報告した強制対流表面沸騰熱伝達の整理方法と同じ考えで，自然対流表面沸騰熱伝達の整理式 (5) 式を導き，従来の実験データおよび整理式との比較を行なつた結果，非常に良好な一致が得られた．とくに，従来の整理式よりも，筆者の提案した整理式の方が実験データの傾向をよく表現し，表面沸騰全般に利用できることが確められた．

なお，筆者の整理式は実験式であるために，今後は沸騰伝熱機構との関係についての検討が必要であろう．

終りに，御指導くださつた京都大学工学部佐藤俊教授ならびに御助言をいただいた鹿児島大学工学部石神重男教授に謝意を表わします．

参 考 文 献

1) S. Levy: Trans. ASME, J. Heat Transfer. (1959-2) 37.
2) E. E. Duke & V. E. Schrock; Proc. 1961 Heat Transfer & Fluid Mech. Inst. (1961) 130.
3) 西川・楠田：機械学会論文集 29, 204 (1963-8) 1388.
4) 佐藤・松村：機械学会論文集 28, 195 (1962-11) 1542.
5) 西川・他：機械学会 第36期総会 前刷集 No. 3 (1959-4) 27.
6) W. M. Rohsenow: Heat Transfer, Michigan Univ. (1953) 101.
7) 西川・楠田：機械学会 九州支部 第15期総会 前刷集 (1962-3) 63.
8) K. E. Forster & R. Greif: Trans. ASME, J. Heat Transfer, 81 (1959) 43.