

有機液体の表面沸騰熱伝達について

松 村 博 久

(受理 昭和41年 5月31日)

ON THE SUBCOOLED-BOILING HEAT TRANSFER OF ORGANIC LIQUIDS

Hirohisa MATSUMURA

In the preceding paper, the author reported on the correlations of the subcooled-boiling heat transfer of pure water with and without forced convection.

In this report the author treats with the subject materials as extended from water to organic liquids. Thus from the same point of view, he gets an experimental formula which can apply for any organic liquids. Compared with other researchers' formulae and data, this formula has shown a favorable agreement.

1. 緒 言

化学工業における製造過程で使用される媒体および原子炉の減速材または冷却材などのごとく、各方面で多種の有機液体が使用されている。そのために従来から有機液体に対しても水と同様に伝熱に関する多くの実験が行なわれてきた。とくに非沸騰時の対流領域の熱伝達および自然対流飽和沸騰領域の熱伝達については、水および数種類の有機液体に適用できる整理式もいくつか報告されているが、自然対流あるいは強制対流を伴う表面沸騰領域の熱伝達までの広範囲を包含する整理式についてはほとんど述べられていない。

以前に筆者ら¹⁾²⁾は水に対する自然対流および強制対流の表面沸騰熱伝達の整理式を提示したが、この考え方は有機液体についても応用できるもので、したがって同様の形式の整理式を導くことができると考えられる。本報告では、水および有機液体についての自然対流あるいは強制対流を伴う表面沸騰時の熱伝達に関する一般的整理式を導き、その整理式と従来の整理式および実験値の比較を行なった結果を述べる。

2. 記 号

使用した記号はつぎのとおりである。

C_p : 液体の比熱, kcal/kg °C

D_d : 伝熱面離脱時の気ほう半径, m

D_e : 水力的相当直径, m

$f(\)$: 関数関係を表す

G_r : グラスホフ数

g : 重力の加速度, m/h²

J : 熱の仕事当量, kgm/kcal

K : 比例係数

N_u : ヌセルト数

P_r : プラントル数

p : 圧力, ata

q : 熱負荷, kcal/m²h

R : 伝熱面の半径, m

R_e : レイノルズ数

r : 蒸発の潜熱, kcal/kg

T_{sat} : 飽和温度, °C

ΔT_{sat} : 過熱度, °C

ΔT_{sub} : サブクーリング, °C

α : 熱伝達率, kcal/m²h °C

β : 膨張係数, 1/°C

$\bar{\gamma}$: 比重量, kg/m³

λ : 液体の熱伝導率, kcal/mh °C

μ : 液体の粘性係数, kgh/m²

ν : 液体の動粘性係数, m²/h

σ : 表面張力, kg/m

添字;

a : 大気圧における値

l : 液体

v : 蒸気

3. 従来の整理式

非沸騰時の自然対流および強制対流の熱伝達については、理論的ならびに実験的関係式が多数発表されて

いる。一般に、自然対流においては

$$Nu = f(G_r \cdot Pr)$$

また強制対流においては

$$Nu = f(Re \cdot Pr)$$

なる関係がある。

筆者ら¹⁾の水についての強制対流乱流熱伝達の実験によると、実験値と Mc Adams の式

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \dots\dots(1)$$

と比較したところでは、両者は±10%の範囲で一致することができた。また、ディフェニールやサントワックスのような各種ポリフェニールなどの有機液体についての強制対流乱流熱伝達の実験値と Dittus-Boelter の式

$$Nu = 0.0243 Re^{0.8} Pr^{0.4} \dots\dots(2)$$

の比較では、±20%の範囲でおさまっていることが認められている³⁾。

自然対流飽和沸騰の熱伝達の整理式については、従来から数多く提案されているが、水および有機液体に関連性のあるおもな整理式をとりあげて表1に示してある。Levy⁷⁾によるベンゼン、n-ヘプタン、四塩化炭

素、イソプロピルアルコール、n-ブチルアルコール、n-ペンタン、エチルアルコールおよびプロパンなどの有機液体について、またAtomic International Report³⁾によるサントワックスやディフェニールなどの有機液体についての核沸騰熱伝達に関しては、自然対流飽和沸騰および強制対流沸騰のいずれの実験値とも(6)式から導いたLevyの式

$$q = \frac{J \lambda C_p \tau_l^2}{\sigma T_{sat}(\tau_l - \tau_v)} \cdot \frac{1}{B_L} \cdot \frac{r + C_p \Delta T_{sub}}{r} \Delta T_{sat}^3 \dots\dots(8)$$

と近似的に合っていることが報告されている。ここに B_L は実験的に与えられる係数で、 $\tau_v r$ の関数として表わされている。

4. 一般的整理式の誘導

前節で述べた従来の整理式については、非沸騰時の対流熱伝達と表面沸騰時の熱伝達の連続的関係を同一の整理式で表現することができないが、筆者ら¹⁾²⁾は水についての非沸騰時の対流熱伝達から強制対流表面沸騰および自然対流表面沸騰の熱伝達までの関係を同

表1 従来のおもな自然対流飽和沸騰の熱伝達の整理式

研究者名	整理式	備考
Insinger-Bliss ⁴⁾	$\log Y = 0.363 + 0.923 \log X - 0.047(\log X)^2 \dots\dots(3)$ <p>ここに、$X = \frac{q}{\tau_l (Jgr^3)^{0.5}} \cdot 10^{10}$</p> $Y = \frac{\alpha(\tau_v \sigma)^{0.5}}{[\lambda C_p \tau_l^3 (J^3 gr^3)^{0.5}]^{0.5}} \cdot 10^{10}$	Jakob ⁵⁾ の近似式 $Y = 4X^{0.68}$
Jakob ⁵⁾	$\frac{\alpha}{\lambda} \left(\frac{\sigma}{\tau_l - \tau_v} \right)^{0.5} = 31.6 \left(\frac{\nu_a}{\nu} \right) \left[\left(\frac{\tau_{la}}{\tau_l} \right) \left(\frac{\sigma}{\sigma_a} \right) \left(\frac{q}{\tau_{va} r X} \right) \right]^{0.8} \dots\dots(4)$	$x = 280, m/h$
西川 ⁶⁾	$Y = 8.0 \left[X \left(\frac{p}{p_a} \right) \right]^{2/3} \dots\dots(5)$ <p>ここに、$Y = \frac{\alpha R}{\lambda}$</p> $X = \left(\frac{1}{M^2 P_0} \cdot \frac{C_p \tau_l^2}{\lambda \sigma r \tau_v} \right)^{1/2} R^{3/2} q$	$M = 900, 1/m$ $P_0 = 1,699, kcal/h$
Levy ⁷⁾	$q = \frac{J \lambda C_p \tau_l^2}{\sigma T_{sat}(\tau_l - \tau_v)} \cdot \frac{1}{B_L} \Delta T_{sat}^3 \dots\dots(6)$	B_L は $\tau_v r$ の関数で 実験的に求めている
宮内一矢 ⁸⁾	$\frac{\alpha}{\lambda} = A \left(\frac{q \tau_l}{r \mu \tau_v} \right)^{0.74} \left(\frac{\tau_v}{\tau_{va}} \right)^{0.69} \left(\frac{C_p \mu}{\lambda} \right)^{0.63} \dots\dots(7)$	人為的蒸気発生点数 32個/cm ² の場合は $A = 1.33 \pm 0.09, m^{-0.26}$

様の整理式で表わすことができることを述べた。すなわち、その整理式は

$$q = q_b + q_c \quad \dots\dots(9)$$

ここに、

- q : 対流を伴う表面沸騰時の熱負荷, kcal/m²h
- q_b : 沸騰の熱負荷, kcal/m²h
- q_c : 非沸騰時の対流熱負荷, kcal/m²h

である。

沸騰の熱負荷は実験結果から

$$q_b = 4.50 e^{b/20} \Delta T_{sat}^{3.6} \quad \dots\dots(10)$$

非沸騰時の対流熱負荷は、強制対流の場合については例えば (1) 式から

$$q_c = 0.023 \left(\frac{\lambda}{D_e} \right) R_e^{0.8} P_r^{0.4} (\Delta T_{sat} + \Delta T_{sub}) \quad \dots\dots(11)$$

自然対流の場合については例えば Saunders の式

$$Nu = 0.14 (G_r \cdot P_r)^{1/3}$$

から

$$q_c = 0.14 \left(\frac{g \beta \lambda^3}{\nu^2} \cdot P_r \right)^{1/3} (\Delta T_{sat} + \Delta T_{sub})^{4/3} \quad \dots\dots(12)$$

非沸騰時の対流熱負荷は (2) 式と実験結果の比較からわかるように有機液体に対しても適用できるであろうが、沸騰の熱負荷は使用する有機液体の種類によってそれぞれ異なった値をとる。沸騰の熱負荷というのは自然対流飽和沸騰の熱負荷とかならずしも同一ではないが、熱負荷が大きい範囲または一般に核沸騰と呼ばれている領域では流速およびサブクーリングの影響は顕著でなくなるので、自然対流飽和沸騰の熱負荷とほとんど一致してくる。いま大気圧における水について、(10) 式と表 1 に示している従来のおもな自然対流飽和沸騰の整理式と比較したのが図 1 であり、これより上述のことが明白となつている。ただし、宮内-矢木の整理式は人為的な蒸気発生点数が 32 個/cm² の場合であつて、人為的蒸気発生点数 1~8 個/cm² であれば図中の破線で示したよになつている。また、自然対流飽和沸騰として (9) 式から求めた場合も図 1 に曲線で示してあるが、(6) 式とほとんど一致している。

表 1 にあげた従来の自然対流飽和沸騰の熱伝達の整理式は、水以外のいくつかの有機液体についても成立することが報告されているので、それらの整理式と水に対する沸騰の熱負荷を表わす (10) 式との相互関係から、有機液体に対する沸騰の熱負荷についてつぎの関係が推測される。

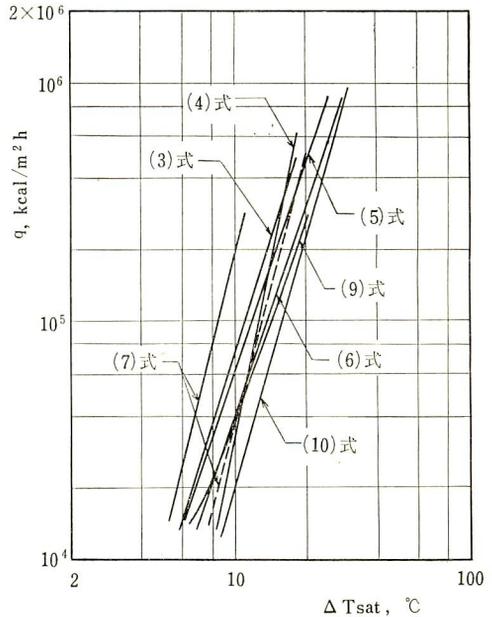


図 1 大気圧における水の場合

$$q_b \propto \Delta T_{sat}^{3.6}$$

すなわち、大気圧下においては

$$q_b = K \Delta T_{sat}^{3.6} \quad \dots\dots(13)$$

ここにおいて、水および有機液体の種類によって比例係数 K が定まることになる。つぎに各種有機液体に対する比例係数について調べてみる。

伝熱面離脱時の気ほう径は、浮力および表面張力による付着力とから

$$D_d = f \left(\frac{r_l - r_v}{\sigma} \right)$$

で表わされ、気ほうが伝熱面を離れる際に持去る熱量としての蒸発の潜熱などの考慮から、Insinger-Bliss⁴⁾, Jakob⁵⁾ および宮内-矢木⁶⁾ の実験値を用いて図 2 に示すようなつぎの関係が得られる。

$$\frac{q}{\Delta T_{sat}^{3.6}} \propto \left[J_r \left(\frac{r_l - r_v}{\sigma} \right)^{0.5} \right]^{1.8}$$

ここで、熱負荷の大きい領域いわゆる核沸騰領域では対流の影響は小さくなることより、対流を伴う沸騰熱負荷すなわち全熱負荷はほぼ沸騰の熱負荷に等しいとみなせるので、上の関係と (10) 式の大気圧における水の値とから次式のような水および各種有機液体についての沸騰の熱負荷が求まる。

$$q_b = 2.2 \times 10^{-14} \left[J_r \left(\frac{r_l - r_v}{\sigma} \right)^{0.5} \right]^{1.8} \Delta T_{sat}^{3.6} \quad \dots\dots(14)$$

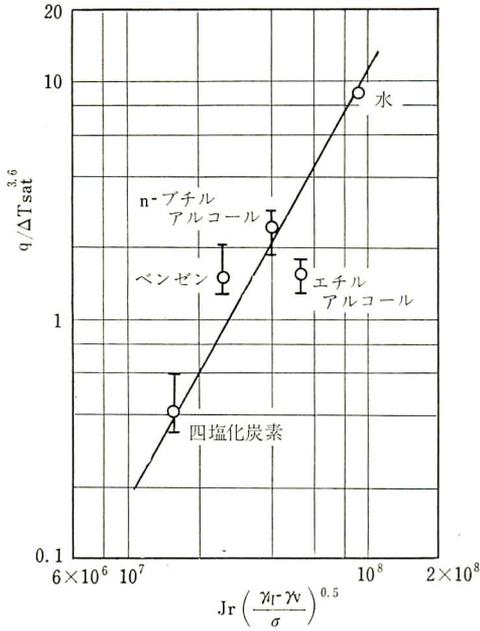


図2 比例係数の関係

また、有機液体についての圧力の影響が水の場合と大差がなければ、(10)式と(14)式の関係から次式が得られる。

$$q_b = 2.1 \times 10^{-14} \left[Jr \left(\frac{r_l - r_v}{\sigma} \right)^{0.5} \right]_a^{1.8} e^{p/20} \Delta T_{sat}^{3.6} \dots (15)$$

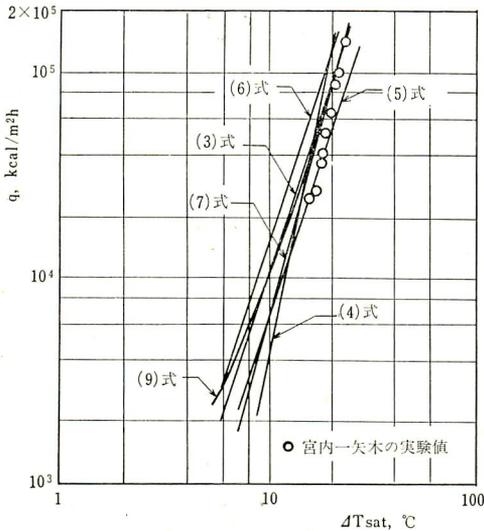


図3 大気圧におけるエチルアルコール

5. 従来の整理式および実験値との比較ならびに考察

大気圧におけるエチルアルコール、n-ブチルアルコールおよび四塩化炭素などの有機液体について、Insinger-Bliss⁴⁾、Jakob⁵⁾および宮内-矢木⁶⁾の実験値と従来の整理式およびここで導いた沸騰の熱負荷を表わす(14)式を用いた(9)式との比較を図3、図4および図5に示している。図にみられるように(9)式はかなり良好な一致を与えている。図5の四塩化炭素に

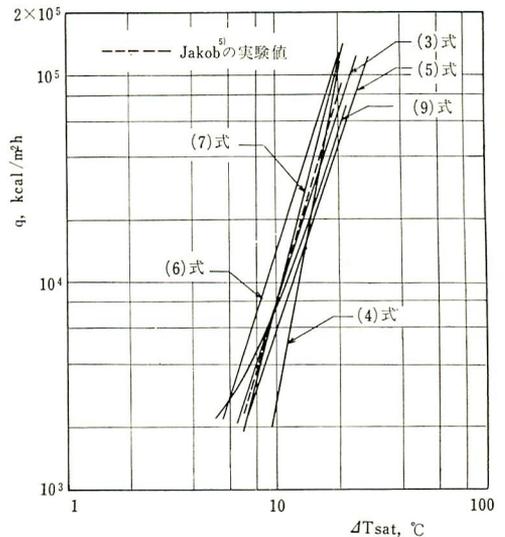


図4 大気圧におけるn-ブチルアルコール

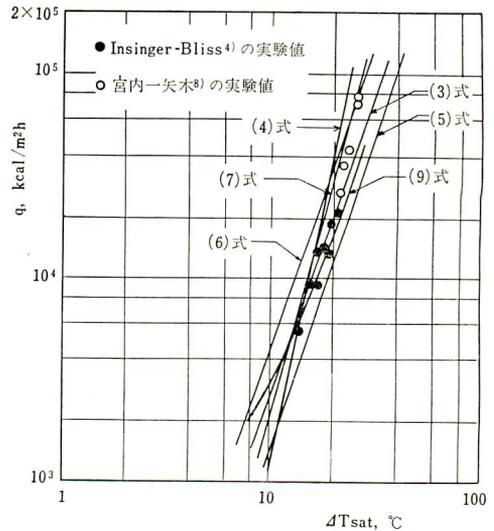


図5 大気圧における四塩化炭素

においては熱負荷が大きくなると実験値は(9)式よりも大きな値を示しているが、このことは低熱負荷の飽和沸騰からバーンアウト点近傍の飽和沸騰へと沸騰現象が移行しているために特性曲線が変つていることを表わしている。

岐美ら⁹⁾¹⁰⁾による大気圧下でのディフェニールおよびネオSKオイル#350(組成はサントワックスRとほぼ同じで、メタタフェニール50%,パラターフェニール40%,オルソターフェニール5%およびポリフェニール5%である)を用いた自然対流表面沸騰の実験値と(8)式および(9)式の比較を、ネオSKオイル#350については図6およびディフェニールについては図7に示している。図6および図7において(9)式は実験値と定量的な一致はしていないが、(8)式とくらべた場合は(9)式の方が実験値の定性的傾向をよく表現していることが認められる。ただし、(9)式の計算にあつてはディフェニールおよびネオSKオイル#350の膨張係数についての資料がみつからなかつたので、ここでは $3 \times 10^{-3} 1/^{\circ}\text{C}$ なる値を用いてある。なお図7中の鎖線はJordanら¹¹⁾の大気圧におけるディフェニールの自然対流飽和沸騰の実験値を示している。

以上の比較結果によると、熱負荷の比較的大きい領域では(9)式と従来の整理式との間にはほとんど差異は認められない。しかしながら、前にも報告¹⁾²⁾したように非沸騰時の対流領域から表面沸騰の初期の領域

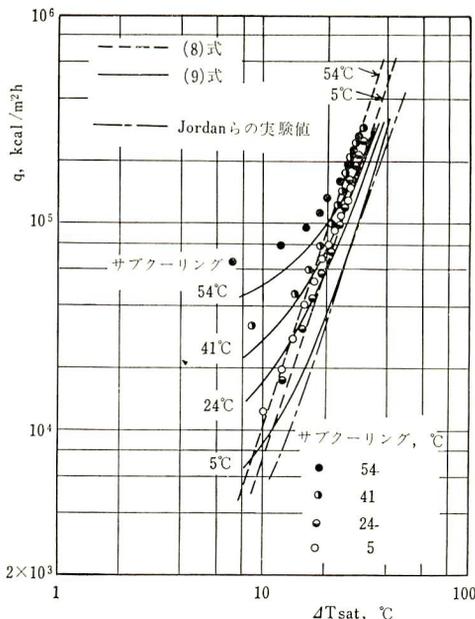


図7 大気圧におけるディフェニール

においては従来の整理式では表現できないところを、ここで導いた(14)式を用いた一般的整理式の(9)式は実験値と良好なる一致を示していることが確認された。

6. 結 論

水についての自然対流表面沸騰の熱伝達および強制対流表面沸騰の熱伝達の整理式を前に報告したが、それは非沸騰時の対流熱負荷と沸騰の熱負荷の和を全熱負荷とするという考えにもとづく整理式である。この考えを各種有機液体にも適用するために沸騰の熱負荷として(14)式を用いた整理式(9)式を得た。これにより水および各種有機液体の表面沸騰が一般的に整理される。

従来の整理式および実験値とここに導いた一般的整理式(9)式との比較検討の結果、従来の整理式よりも(9)式が実験値をその全域にわたつてはるかに良く表現していることが認められた。なお圧力の加わつた場合および強制対流を伴う場合については実験値がないので、ここでは検討しなかつた。

終りに、御指導くださっ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深甚なる謝意を表わします。

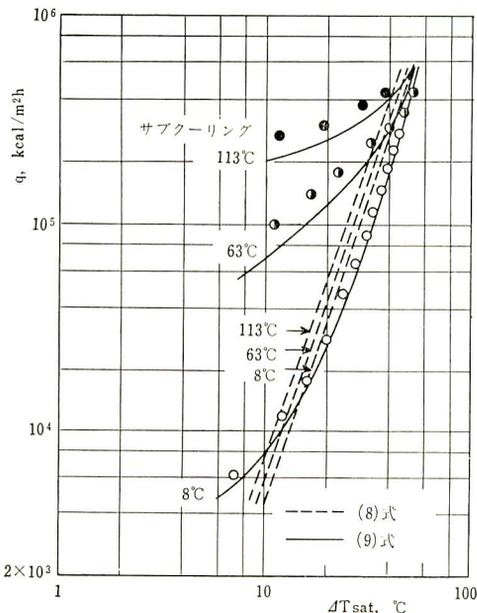


図6 大気圧におけるネオSKオイル #350

参 考 文 献

- 1) 佐藤・松村：日本機械学会論文集. 28, 195(1962~11), 1542.
- 2) 松村：鹿児島大学工学部研究報告. 4(1964~11) 17.
- 3) Atomic International Report, NAA-SR-5688, (1960).
- 4) T. H. Insinger & H. Bliss : Trans. Amer. Inst. Chem. Engr., 36(1940), 491.
- 5) M. Jakob : Heat Transfer, Vol. I (1949), Wiley & Sons. Inc.
- 6) 西川：日本機械学会論文集. 22, 120(1956), 557.
- 7) S. Levy : Trans. ASME, 81(1959), 37.
- 8) 宮内・矢木：化学工学. 25, 1(1961), 18.
- 9) 岐美・他3名：日本機械学会 関西支部第38期定時総会講演会. 前刷, (1963~3), 53.
- 10) 岐美・他2名：京都大学 工学研究所 研究彙報. 24(1963) および 26(1964).
- 11) J. P. Jordan & G. Leppert : Nucl. Sci. Engng., 5(1959), 349.