

凝縮時の熱伝達に関する研究(第1報)

水平下向きの滑面における凝縮熱伝達

石 神 重 男, 田 中 義 弘
玉 利 賢 一, 松 村 博 久

(受理 昭和41年5月31日)

STUDIES ON THE HEAT TRANSFER BY CONDENSATION (Report 1)

Heat Transfer by Condensation on a Smooth
and Horizontal Downward Surface

Shigeo ISHIGAMI, Yoshihiro TANAKA,
Masakazu TAMARI and Hirohisa MATSUMURA

The heat transfer by dropwise and filmwise condensation of saturated steam on a smooth and horizontal downward surface are investigated experimentally, and the results are obtained as follows :

(1) The coefficients of heat transfer by dropwise and filmwise condensation are almost independent of the magnitude of heat flux, the flow rate of cooling water and the temperature difference of saturated steam and condensing surface.

(2) The coefficients of heat transfer by dropwise condensation on horizontal downward surface are a few times smaller than that on vertical or inclined surface.

1. 緒 言

蒸気の凝縮時における熱伝達について従来すでに多くの研究がなされている。すなわち膜状凝縮に関しては1916年にNusselt¹⁾の報告以来、Schmidt^ら²⁾、Grigull³⁾、Bromley⁴⁾、Rohsenow⁵⁾、SparrowとGregg⁶⁾および馬淵⁷⁾などの実験的ならびに理論的研究がある。また滴状凝縮に関しては1930年にSchmidt^ら⁸⁾が鉛直伝熱面上に初めて水蒸気を滴状凝縮させた実験結果に始まり、Drew^ら⁹⁾、Nagle^ら¹⁰⁾、Gnam¹¹⁾、Fitzpatrick^ら¹²⁾、SheaとKrase¹³⁾、Hampson¹⁴⁾、WestwaterとWelch¹⁵⁾などの実験的研究およびFaticaとKatz¹⁶⁾ならびに菅原と岐美¹⁷⁾などの理論的解析が報告されている。しかしながら、液体の蒸発や蒸気の凝縮現象などのごとき相変化を伴う熱伝達は、多くの影響因子を包含している複雑な伝熱機構であるため、いまだ全面的に満足な結論がえられていない。とくに従来の研究は鉛直あるいは傾斜している伝熱面における凝縮熱伝達が主体に取扱われていて、水平伝熱面での凝縮熱伝達の研究はほとんどみあたらない。

鉛直あるいは傾斜伝熱面における凝縮熱伝達のさいには凝縮液滴が落下する時の掃除作用なる現象が加わっている。本研究は、水平下向きのなめらかな伝熱面を用いて凝縮液滴の掃除作用の影響を除去して実験的に凝縮熱伝達率を調べたもので、その結果および考察を述べる。

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略を図1に示す。給水タンク①よりボイラ②に供給された水は重油バーナ③で加熱され、発生した蒸気は導管⑤より蒸気過熱器⑦を通つて蒸気室⑨にはいる。蒸気量は調節弁⑥で制御され、蒸気圧力はマノメータ③で計測し、蒸気温度はベックマン温度計④にて測定する。蒸気導管および蒸気室はその周囲を保温材で包み外部への放熱を防止してある。また冷却水は水量調節弁⑩を通つて冷却水流路に導入され、導管⑪をへて堰⑫より流出する。流量は前もつて検定してある堰のフック⑬の読みで測定する。測定部本体は蒸気室⑨、伝熱板⑩および凝縮水受器⑪などから構成されており、測定部における冷却水温度および伝熱板温度の測定には直径0.25 mmの銅—コンスタント

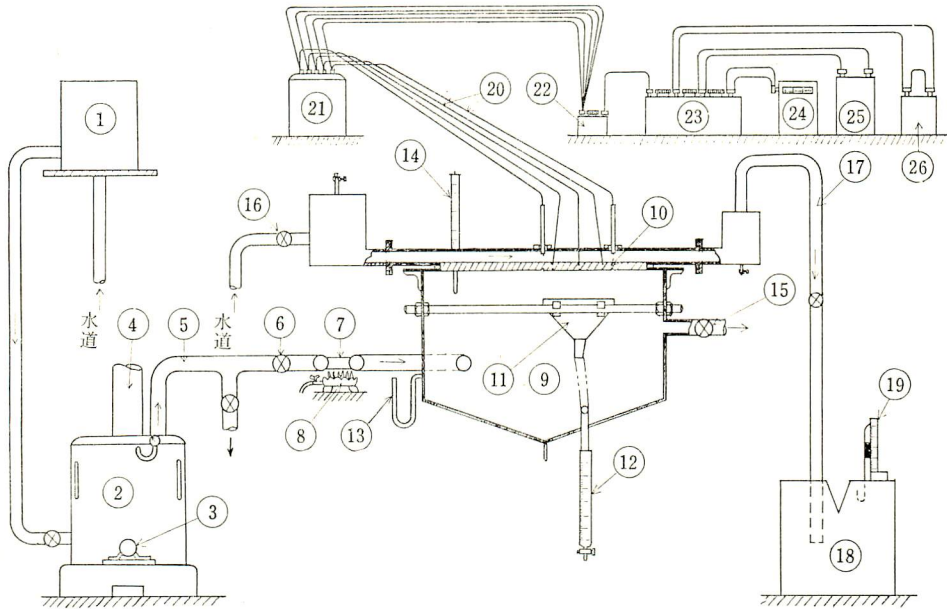


図 1 実験装置概略図

- | | | |
|--------------|------------|------------|
| ① 給水タンク | ② ボイラ | ③ 重油バーナ |
| ④ 煙突 | ⑤ 蒸気導管 | ⑥ 蒸気量調節弁 |
| ⑦ 過熱器 | ⑧ ガスバーナ | ⑨ 蒸気室 |
| ⑩ 伝熱板 | ⑪ 凝縮水受器 | ⑫ メスピュレット |
| ⑬ マノメータ | ⑭ ベックマン温度計 | ⑮ 蒸気排出弁 |
| ⑯ 冷却水量測定用フック | ⑰ 冷却水導管 | ⑱ 冷却水量測定用堰 |
| ⑲ 冷却水量測定用フック | ⑳ 熱電対 | ㉑ 熱電対用冷接点 |
| ㉒ 切替スイッチ | ㉓ ポテンシオメータ | ㉔ 検流計 |
| ㉕ 蓄電池 | ㉖ 標準電池 | |

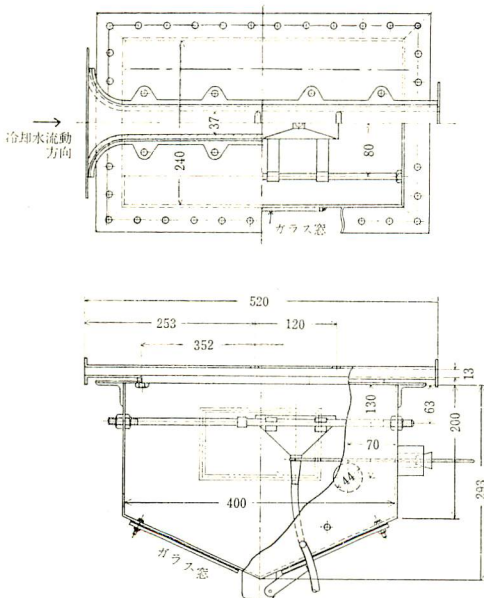


図 2 測定部本体詳細図

ン熱電対⑳を用いて、電位差はポテンシオメータ㉓ならびに検流計㉔によつて測定した。

図2に測定部本体の詳細図を示す。図にみられるように冷却水路は幅 37 mm および高さ 13 mm の長方形断面をしており、伝熱板に対する水路両壁には厚さ 6.5 mm の断熱用塩化ビニール板がはりつけてある。伝熱面における蒸気の凝縮状態を肉眼観察あるいは写真撮影するため、蒸気室には下部の2箇所および側壁の1箇所の合計3箇所に約 160 mm×100 mm の透明なガラス窓を設けてある。

伝熱板の詳細を図3に示す。伝熱板は銅製で幅 40 mm および全長 351 mm であるが、前端から 169 mm は流路の助走区間であり、測定部は助走区間のあとに 120 mm とつてある。伝熱板蒸気側表面には測定部 (120 mm×40 mm) とその前後面との凝縮液の混合をさけ、測定面の凝縮液滴の採取を正確にするために測定部軸方向の両端に幅 3 mm および深さ 3 mm の三角溝を設けてある。測定部の入口端から 20, 60 および

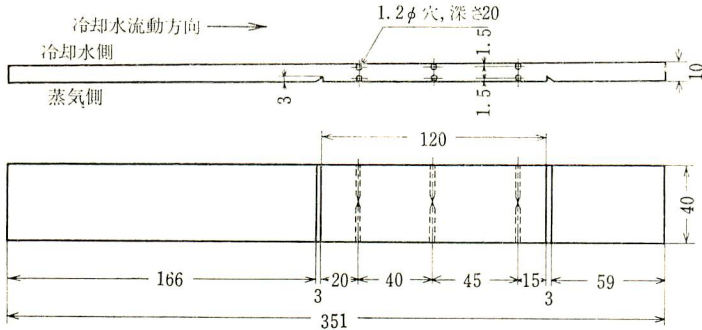


図 3 伝熱板詳細図

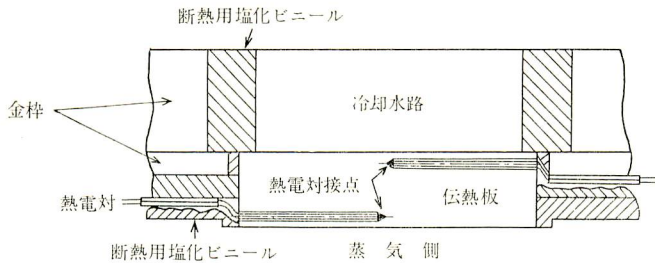


図 4 伝熱板熱電対設置詳細図

105 mm の 3 個所には蒸気側および冷却水側の伝熱板表面から 1.5 mm のところに直径 1.2 mm および深さ 20 mm の孔をあけて、伝熱板表面温度算出用の熱電対が入れている。伝熱板温度測定用熱電対の設置状態を図 4 に示す。それぞれの熱電対はアルダイト接着剤で絶縁被覆し、伝熱板の中心部に接点をもっている。

また熱電対の先端を流路の高さ方向に変えるため、素焼管を自由に上下できるように O-リングで支持してある。

伝熱面の表面は 06 のエメリーパーでよく研磨し、さらに稀塩酸で洗ったのち水で清浄にして使用した。滴状凝縮の実験では水洗後乾かしてから滴状凝縮促進剤としてオレイン酸を一面にうすく塗布した。実験を長時間続けると表面に塗布したオレイン酸が洗い流されるので適当な時間経過後同様の表面処理を行なった。また膜状凝縮の場合は伝熱板表面がよごれると膜状の一部が滴状に変わるので、そのようなことのないようにしばしば表面処理を繰返して行なった。

つぎに実験方法を簡単に述べる。冷却水流量調節弁で所要の流量に制御したのち、蒸気排出弁は開放にした状態で蒸気を測定部本体に送る。測定部本体内の空気は送入された蒸気とともに排出弁から外部へ放出される。蒸気により測定部本体が加熱され、蒸気温度が所定の温度になるのを待ち、排出弁を閉じる。蒸気は過熱器で過熱度 0.5~0.7°C の乾き蒸気にし、蒸気室内の圧力は大気圧以上 10 mmAq に保たれる。以上の調整が終り、伝熱板冷却水側の熱電対による温度指示が定常に達してから測定を開始する。測定期間中は蒸気圧力、蒸気温度および冷却水流量を一定に保持する

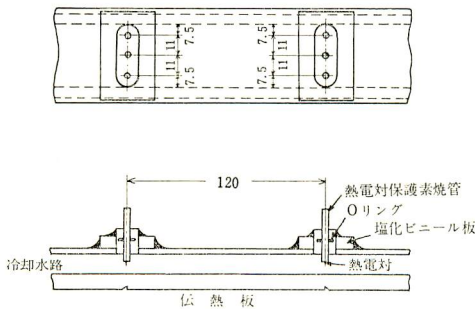


図 5 冷却水用熱電対設置詳細図

図 5 は冷却水温度測定用熱電対の設置場所および取付け状態を示す。冷却水温度測定用熱電対は伝熱板測定部の入口と出口に相当する冷却水流路中に各 3 本設置し、各熱電対は絶縁用にアルダイト接着剤を塗布して素焼管に入れ、歯科用セメントで固定してある。

ように注意した。

実験は冷却水入口温度 $18\sim 24^{\circ}\text{C}$ において、冷却水流量 $0.30\times 10^3\sim 2.2\times 10^3\text{kg/h}$ (流速 $0.20\sim 1.3\text{ m/s}$)

および熱負荷 $0.70\times 10^5\sim 3.3\times 10^5\text{kcal/m}^2\text{h}$ の範囲で行なった。

3. 実験結果および整理

蒸気温度、伝熱板の蒸気側表面温度ならびに冷却水側表面温度および冷却水温度の測定部における温度分布の一例を図6に示している。図によると下流に行く

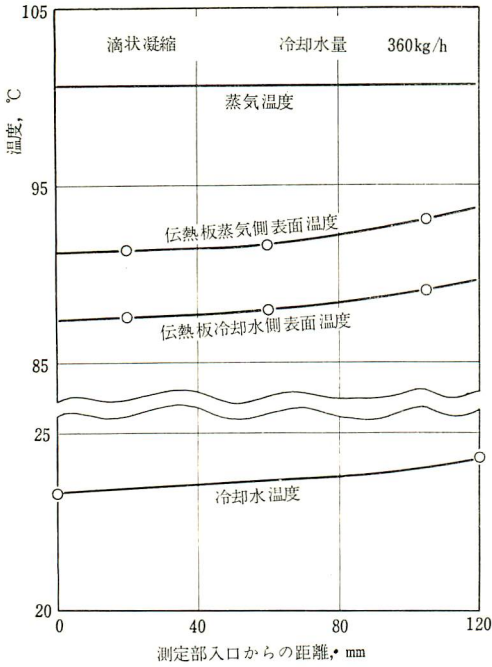


図6 温度分布の一例

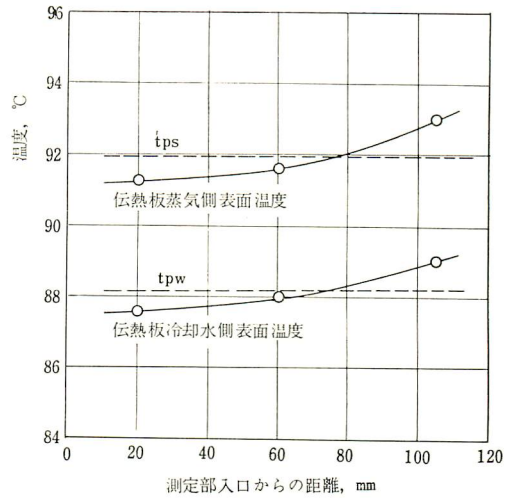


図7 伝熱板表面温度の定義

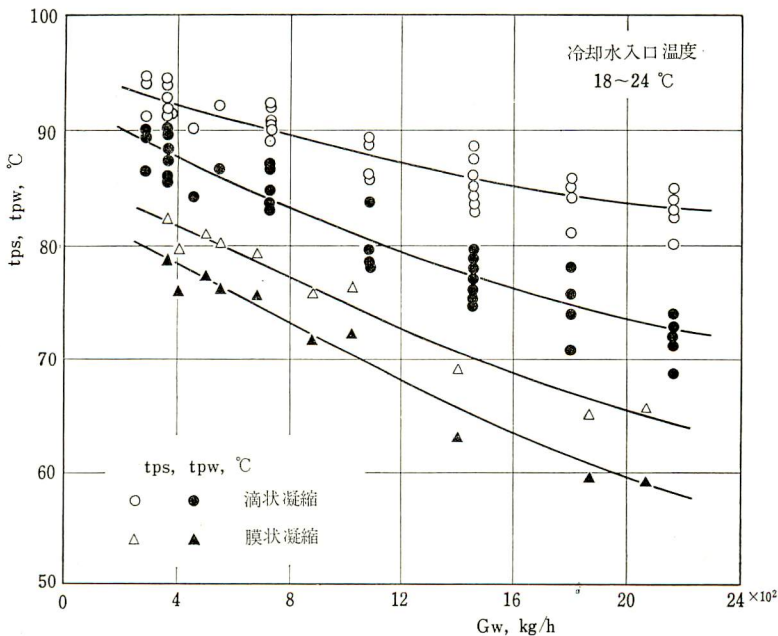


図8 伝熱板表面温度と冷却水流量の関係

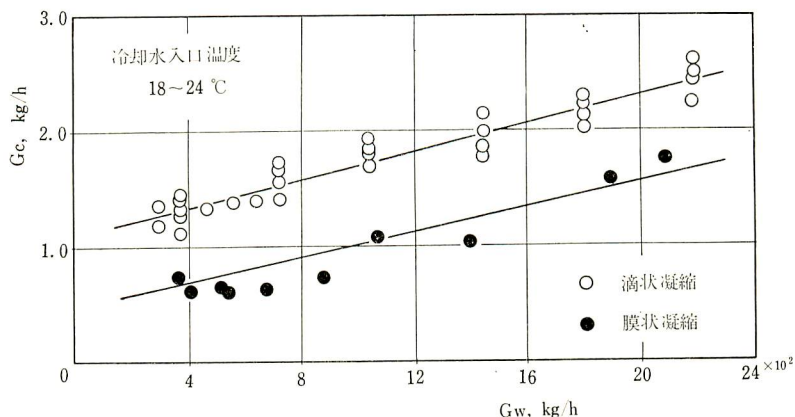


図 9 凝縮水量と冷却水流量の関係

に従つて冷却水温度は上昇するので、これに伴つて伝熱板の表面温度 もいくらか増加していることがわかる。伝熱板表面の温度分布はこのようであるが、これを図7に示すように測定部の平均値をとつて代表させた。すなわち伝熱板の蒸気側表面温度 t_{ps} 、冷却水側表面温度 t_{pw} である。 t_{ps} 、 t_{pw} と冷却水流量 G_w との測定結果を図8に示す。冷却水流量が増加すると蒸気側および冷却水側ともに表面温度は下がるが、蒸気側表面と冷却水側表面との温度差は次第に大きくなつていく。膜状凝縮の場合は滴状凝縮に比較して表面温度は低いが同じような傾向がみられる。

図9には凝縮水量 G_c と冷却水流量 G_w との関係を示す。冷却水流量が増すとともに凝縮水量も大となるが、滴状凝縮に較べて膜状凝縮の場合の凝縮水量は少ない。凝縮水量の測定では滴状凝縮および膜状凝縮のいずれの場合にも伝熱面測定部より外側へ凝縮水がわずかながら流出することがさげられなかつた。このために凝縮水量の絶対値は測定値よりいくぶん大きな値であることが推察される。

熱負荷の算出法には次の三つの方法が考えられる。

i) 伝熱板内の温度勾配から求める方法

$$q_t = \frac{\lambda}{\delta} (t_{ps} - t_{pw}) \dots\dots\dots (1)$$

ii) 冷却水の温度上昇から求める方法、

$$q_w = \frac{G_w}{A} (t_{wo} - t_{wi}) C_w \dots\dots\dots (2)$$

iii) 凝縮水量から求める方法、

$$q_c = \frac{G_c r}{A} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

- A : 測定部伝熱板表面積, m^2
- C_w : 冷却水の比熱, $kcal/kg \cdot ^\circ C$
- G_c : 凝縮水量, kg/h
- G_w : 冷却水流量, kg/h
- q_c : 凝縮水量から算出した熱負荷, $kcal/m^2h$
- q_t : 伝熱板内温度勾配から算出した熱負荷, $kcal/m^2h$
- q_m : 冷却水温度上昇から算出した熱負荷, $kcal/m^2h$
- r : 蒸発の潜熱, $kcal/kg$
- t_{ps} : 伝熱板の蒸気側表面温度, $^\circ C$
- t_{pw} : 伝熱板の冷却水側表面温度, $^\circ C$
- t_{wi} : 冷却水の測定部入口温度, $^\circ C$
- t_{wo} : 冷却水の測定部出口温度, $^\circ C$
- δ : 伝熱板の厚さ, m
- λ : 伝熱板の熱伝導率, $kcal/mh \cdot ^\circ C$

である。

以上の3方法の中の(2)式の冷却水温度上昇から求める方法は、本実験の測定部長さが短いために冷却水流量が多い場合は測定誤差が大きいため、ここでは採用しなかつた。また前に述べたように実験結果の凝縮水量の絶対値が正確でないため、凝縮水量から求める方法は参考にする程度にし、ここでは(1)式から算出した熱負荷を用いることにした。

図10は(1)式から算出した熱負荷 q_t および(3)式から算出した熱負荷 q_c を冷却水流量に関して示している。図において図9の説明で述べたように実際の凝縮水量より測定した凝縮水量がいくらか小さいために、凝縮水量からの熱負荷が伝熱板内の温度勾配からの熱負荷よりいくぶん低めにでていることが明確とな

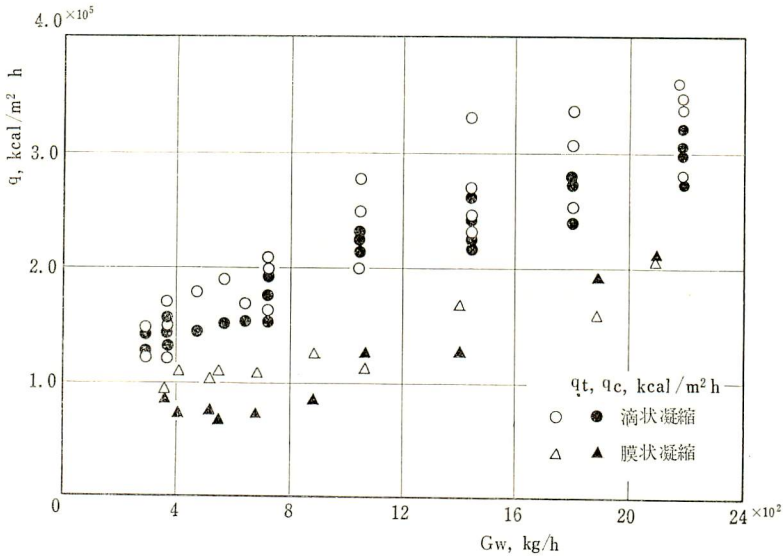


図10 熱負荷の比較

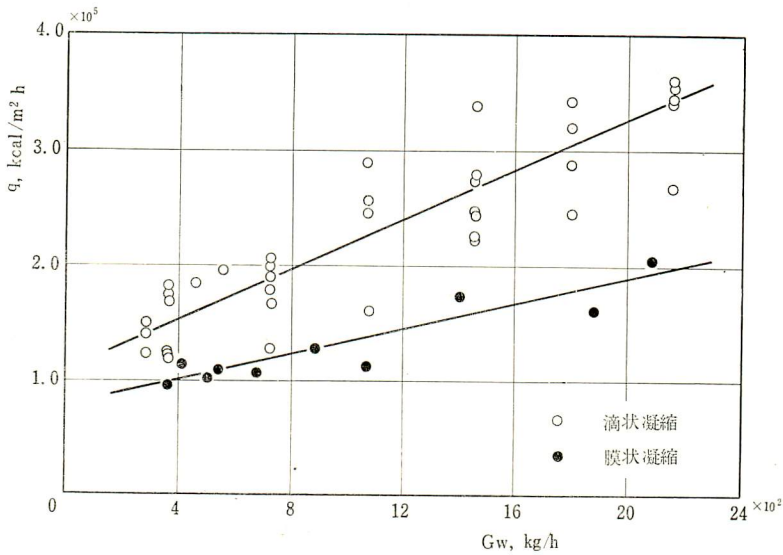


図11 熱負荷と冷却水流量の関係

つている。

図11は熱負荷 q と冷却水流量 G_w の関係であるが、図8から明白なように冷却水流量の増加にともなつて熱負荷は大となり、膜状凝縮に比較して滴状凝縮の方が同じ冷却水流量において熱負荷が大きくなつている。冷却水流量 G_w と蒸気側熱伝達率 α_s の関係を図12に示しているが、滴状凝縮および膜状凝縮ともに冷却水流量には関係なく蒸気側熱伝達率は一定値を示している。このことは冷却水流量が大となるに伴う熱

負荷の増加する割合と伝熱板蒸気側表面温度の低下する割合の比がほとんど等しいことを表わしている。なお滴状凝縮の蒸気側熱伝達率は膜状凝縮のそれと較べてほぼ4倍も大きいことが認められる。

蒸気温度と伝熱板蒸気側表面温度の差を ΔT とし図13に ΔT と熱負荷 q の関係を、図14に ΔT と蒸気側熱伝達率 α_s の関係を示している。図13および図14に示すように ΔT を座標軸にとると、滴状凝縮の場合と膜状凝縮の場合とは明確に区別できる。滴状凝縮

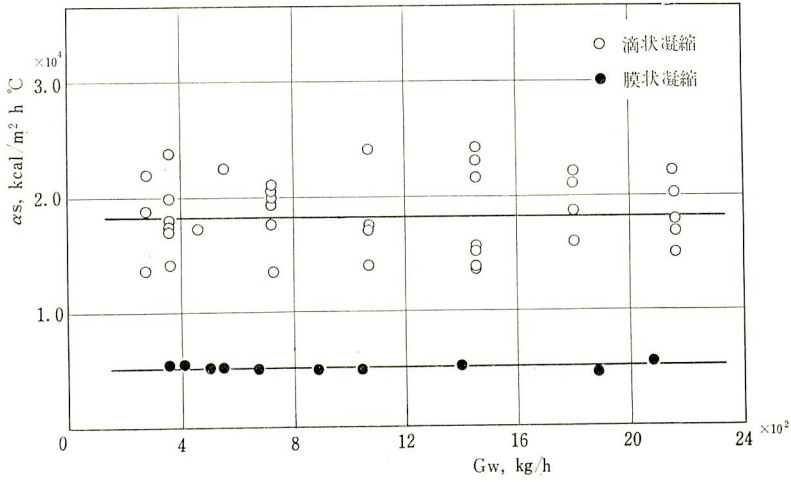


図 12 蒸気側熱伝達率と冷却水流量の関係

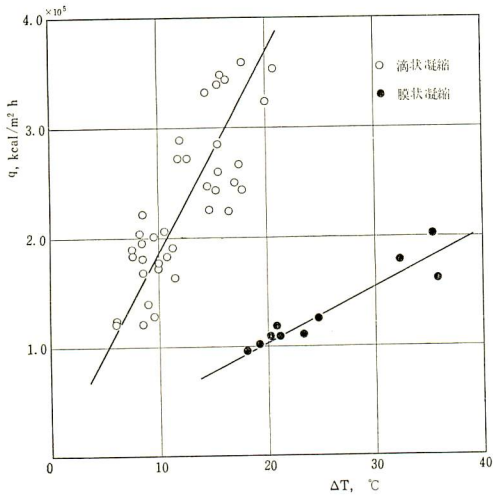


図 13 熱負荷と温度差の関係

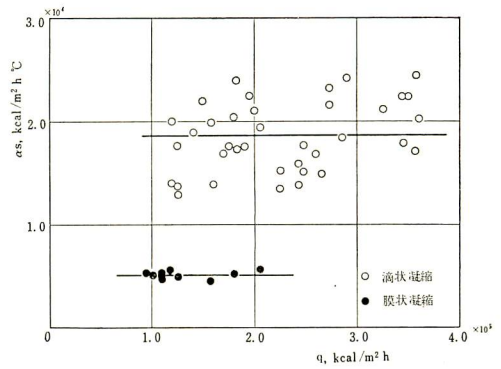


図 15 蒸気側熱伝達率と熱負荷の関係

に較べて膜状凝縮は伝熱面にできる凝縮液の膜によつて伝熱抵抗が大となるために同じ q の値に対し温度差が増加する。また熱負荷 q と蒸気側熱伝達率 α_s の関係を図 15 に示す。図から滴状凝縮および膜状凝縮いづれの場合も熱負荷 q が変化しても蒸気側熱伝達率はほぼ一定値をとることがわかる。ただし滴状凝縮においては熱負荷の増加につれて蒸気側熱伝達率はわずかに大きくなる傾向ともみられるが、本実験の範囲内では明りようでないので一定線で示した。

4. 考 察

従来の研究には水平下向平面伝熱面での凝縮時の熱伝達についての実験結果がほとんどないので、ここでは鉛直伝熱面での実験結果などと筆者らの実験結果との比較考察を行なつてみる。

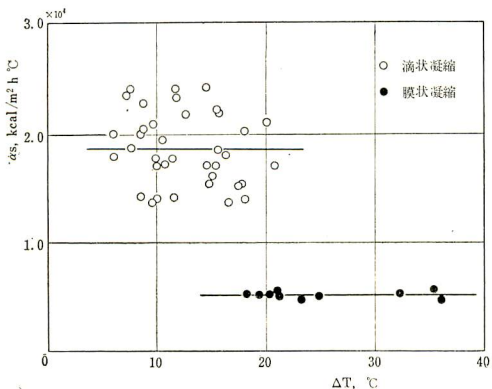


図 14 蒸気側熱伝達率と温度差の関係

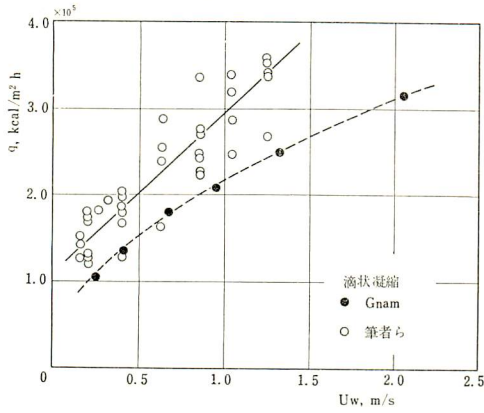


図16 熱負荷と冷却水流速の関係

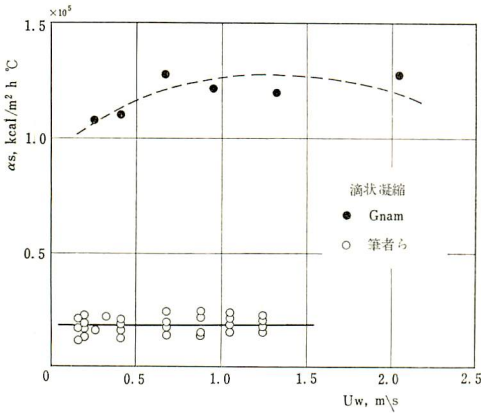


図17 蒸気側熱伝達率と冷却水流速の関係

図16は冷却水流速 U_w と熱負荷 q の関係であるが、圧力 0.9 ata における鉛直円管を用いての Gnam¹⁴⁾ の実験結果と筆者らの結果とは同じ傾向を表わしている。冷却水流速 U_w と蒸気側熱伝達率 α_s との関係は図17に示している。Gnamの実験結果が筆者らの結果の6倍近くも大きくなっているが、これはGnamの場合蒸気温度と伝熱板蒸気側表面温度の差が1.0~2.5°Cであり、筆者らの場合に較べて温度差が非常に小さいことから鉛直伝熱面と水平下向き伝熱面の蒸気側熱伝達率の差異が表われていることが認められる。

蒸気温度と伝熱板蒸気側表面温度の差 ΔT と熱負荷 q の関係および ΔT と蒸気側熱伝達率 α_s との関係について、Westwater^ら¹⁵⁾ の実験結果と筆者らの実験結果との比較が図18および図19である。膜状凝縮の場合はWestwater^らと同じ傾向を示しているが、滴状凝縮の場合はいくぶん異つた傾向を表わしている。これはWestwater^らの実験が鉛直伝熱面を用いて行な

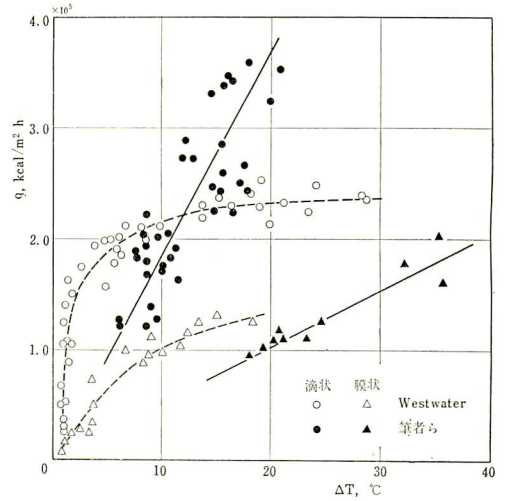


図18 熱負荷と温度差の関係

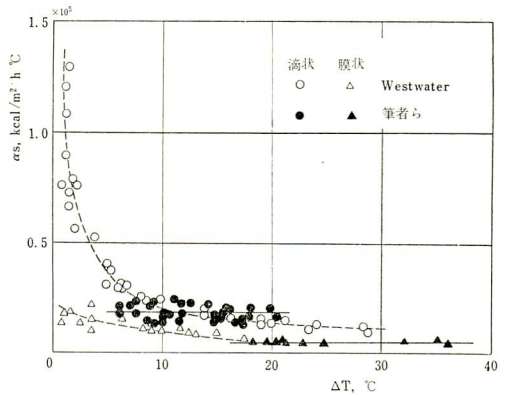


図19 蒸気側熱伝達率と温度差の関係

われたもので、その差異が滴状凝縮のばあい顕著にあらわれるものと考えられる。 ΔT と α_s の関係が図19であるが滴状における α_s の値は ΔT の増加とともに筆者らの値とWestwater^らの値は開いて行すが、一方Westwater^らの値は筆者らと膜状凝縮の値に近づくことが推定できる。このことは鉛直管の場合 ΔT の増加とともに凝縮液の掃除作用が増大し、実質は膜状凝縮に近くなることを示すものであろう。

図20は熱負荷 q と蒸気側熱伝達率 α_s の関係について従来の研究者の滴状凝縮の実験結果の比較を示したものである。田中^ら¹⁶⁾および筆者らの実験結果を除いたほかはすべて鉛直伝熱面を使用した実験結果である。図に示されているように実験値は各研究者によつて大きな差があるが、凝縮時の熱伝達は蒸気の温度、圧力、流速および不凝縮ガスの混在などの蒸気側の条

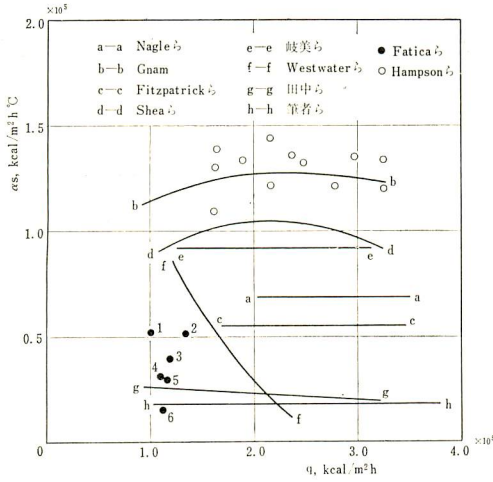


図20 蒸気側熱伝達率と熱負荷の関係

件、伝熱面および促進剤の種類などの伝熱面表面状態ならびに冷却水の温度、流速などの冷却水側の条件に関係するために、条件の差によりこのように広範囲の値がでているものと推察される。またFaticaら¹⁶⁾の実験値で蒸気側熱伝達率の最も低い6の値は、銅板に凝縮促進剤としてオレイン酸を塗布してあるもので、この値は鉛直伝熱板を使用しているにもかかわらず筆者

らの実験値とほぼ一致していることがわかる。これは伝熱板高さがわずか76mmで掃除作用が目立たないため水平板に近い値となつたものであろう。なお図20に示してある各研究者の実験条件概要の一覧を表1に示してある。

以上の結果から水平下向き伝熱面での蒸気側熱伝達率は鉛直伝熱面に較べて非常に小さい。いいかえると鉛直伝熱面での蒸気側熱伝達率が良好な理由としては、凝縮液滴の落下時に伝熱面に附着している成長中の凝縮液滴を集合して掃除する作用が大きな役割をはたしていることが認められる。ただしWestwaterらの実験結果からわかるように、凝縮液滴の掃除作用の影響も凝縮水量が増加してくると伝熱面表面は水膜におおわれた状態となるので、鉛直伝熱面の上部の一部を除いては実質は膜状凝縮状態となるために蒸気側熱伝達率は急激に低下すると認められる。

次に鉛直あるいは傾斜している伝熱面上における滴状凝縮時の熱伝達率を表わす理論式としてFaticaら¹⁶⁾は次の仮定のもとに(4)式を誘導している。

- i) 凝縮液滴の表面および内部の温度は一樣である。
- ii) 凝縮液滴で包圍されていない伝熱面の部分では

表1 従来の研究者の実験条件一覧

| 研究者 | 伝熱板 | | 促進剤の種類 | 蒸気圧力 (ata) |
|------------------------------|---|---|--|------------|
| | 形状 | 寸法 (mm) | | |
| Nagle ら ¹⁰⁾ | 鉛直, クロムメッキ銅管 | 高さ 610 | オレイン酸 | 1.35 |
| Gnam ¹¹⁾ | 鉛直, 銅管 | 外径 32, 内径 25, 高さ 810 | グリース | 0.90 |
| Fitzpatrick ら ¹²⁾ | 〃 | 外径 75, 高さ 1860 | ベンジルメルカプタン | 1.00 |
| Shea ら ¹³⁾ | 鉛直, 銅板 | 幅 120, 高さ 100 幅 120, 高さ 600 | 〃 | 1.00 |
| Hampson ら ¹⁴⁾ | 〃 | 高さ 130 | 〃 | 1.00 |
| Westwater ら ¹⁵⁾ | 鉛直, 銅管 鉛直, 銅板 | 外径 19 幅 10, 高さ 27, 厚さ 43 幅 76, 高さ 180, 厚さ 110 | オレイン酸をボイラ給水中へ直接混入 | |
| Fatica ら ¹⁶⁾ | 鉛直, 1. クロム板 2. ニッケル板 3. クロム板 4. 銅板 5. ニッケル板 6. 銅板 | 幅 25, 高さ 76 | ステアリン酸 〃 オレイン酸 ステアリン酸 オレイン酸 〃 | 1.00 |
| 岐美 ら ¹⁷⁾ | 鉛直, 六四黄銅板 | 幅 60, 高さ 210, 厚さ 10 | オレイン酸 | |
| 田中 ら ¹⁸⁾ | 水平, 黄銅管 | 外径 16, 内径 13, 長さ 480 | オレイン酸 | 1.00 |

熱抵抗を無視できる。

iii) 凝縮液滴が伝熱面を包覆する面積割合，すなわち附着面積比は時間的に一定である。

iv) 凝縮液滴の分布は一様である。

v) 凝縮液滴の形状は球冠をなし，すべて同じ大きさをしている。

$$\alpha_s = \frac{\left(\frac{1-A_d}{A_d}\right)U_0}{1 - \frac{\lambda_d A_d}{6(1-A_d)U_0} \cdot \frac{F(\theta)f(\theta)}{V_m} \ln \left[1 + \frac{6(1-A_d)U_0}{\lambda_d A_d} \cdot \frac{V_m}{F(\theta)f(\theta)} \right]} \dots\dots\dots (4)$$

ただし，

$$\frac{1}{U_0} = \frac{1}{\alpha_w} + \frac{\delta}{\lambda_p} \dots\dots\dots (5)$$

$$\alpha_d = \frac{\lambda_d}{D} \cdot F(\theta) \dots\dots\dots (6)$$

$$v = \frac{\pi D^3}{24} \left(\frac{2 - 3 \cos \theta + \cos^3 \theta}{\sin^3 \theta} \right) = \frac{\pi D^3}{24} \cdot f(\theta) \quad (7)$$

$$\frac{V}{A_d} = \frac{v}{\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)} = \frac{D}{6} \cdot f(\theta) \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{V_m}{A_d} = \frac{D_m}{6} \cdot f(\theta) \dots\dots\dots (9)$$

ここに，

A_d : 単位面積当りの凝縮液滴による包覆面積

D : 凝縮液滴の伝熱面附着部分の直径

D_m : 凝縮液滴の限界附着直径

U_0 : 冷却率

V : 単位面積当りの凝縮液滴体積

V_m : 単位面積当りの凝縮液滴最大体積

v : 凝縮液滴の体積

α_d : 凝縮液滴を通しての熱伝達率

α_s : 蒸気側熱伝達率

α_w : 冷却水側熱伝達率

δ : 伝熱板の厚さ

θ : 凝縮液滴の接触角

λ_d : 凝縮液滴の熱伝導率

λ_p : 伝熱板の熱伝導率

である。また $F(\theta)$ および $f(\theta)$ は凝縮液滴の接触角の関数であり，この値は Fatica らによると図 21 の通りである。

ここで (4) 式を水平下向き伝熱面上における滴状凝縮時の熱伝達率に適用してみる。図 22 に示すように水平下向き伝熱面上の凝縮液滴の重量と表面張力との関係から，凝縮液滴の伝熱面離脱時の限界附着直径を D_m とすると，

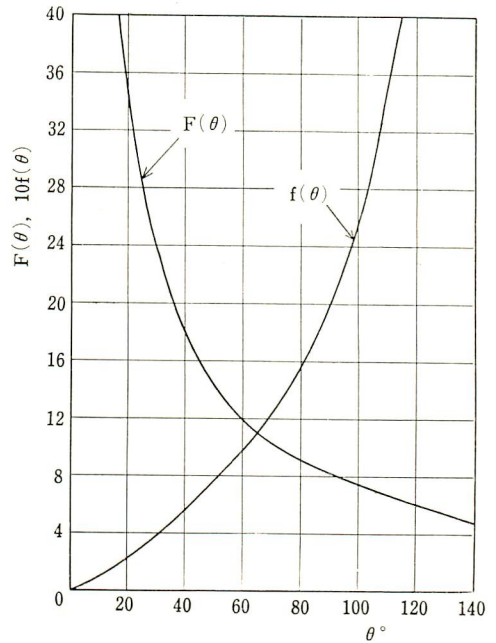


図21 $F(\theta)$ および $f(\theta)$ の値

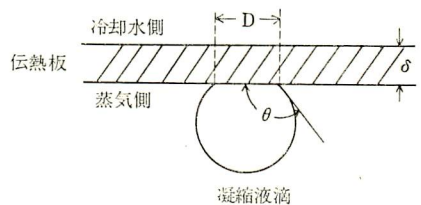


図22 水平下向き面上の凝縮滴

$$D_m = \frac{\tau v_m}{\pi \sigma \sin \theta} \dots\dots\dots (10)$$

(7) 式から

$$v_m = \frac{\pi D_m^3}{24} \cdot f(\theta) \dots\dots\dots (11)$$

ここに，

v_m : 凝縮液滴の最大体積

τ : 凝縮液滴の比重量

σ : 凝縮液滴の表面張力
である。

(10) 式に (11) 式を代入すると、

$$D_m = \sqrt{\frac{24\sigma \cdot \sin \theta}{r \cdot f(\theta)}} \dots\dots\dots(12)$$

ゆえに、(4) 式に (9) 式および (12) 式を代入することにより、

$$\alpha_s = \frac{\left(\frac{1-A_d}{A_d}\right)U_0}{1 - \frac{\lambda_d}{(1-A_d)U_0} \cdot F(\theta) \sqrt{\frac{r \cdot f(\theta)}{6\sigma \cdot \sin \theta}} \ln \left[1 + \frac{(1-A_d)U_0}{\lambda_d} \cdot \frac{1}{F(\theta)} \sqrt{\frac{6\sigma \cdot \sin \theta}{r \cdot f(\theta)}} \right]} \dots\dots\dots(13)$$

いま、水平下向面での凝縮液滴の接触角は筆者らの観察結果によると銅板に促進剤としてオレイン酸を用いた場合 95~105 度であつた。ここでは θ を 100 度とすると図 21 より、 $F(\theta)$ は 7.5、 $f(\theta)$ は 2.7 である。凝縮液滴の温度を 100°C と仮定すると、(13) 式は次式のようになる。

$$\alpha_s = \frac{\left(\frac{1-A_d}{A_d}\right)U_0}{1 - \frac{1.19 \times 10^3}{(1-A_d)U_0} \ln [1 + 8.40 \times 10^{-4}(1-A_d)U_0]} \dots\dots\dots(14)$$

微視的観察が必要である。この問題は今後の研究に待つことにする。

5. 結 論

水平下向き伝熱面における蒸気の凝縮時の熱伝達率を実験的に調べたところ、本実験範囲については滴状凝縮および膜状凝縮ともに蒸気側熱伝達率は冷却水流量、蒸気温度と伝熱板蒸気側表面温度の差および熱負荷にほとんど関係なくほぼ一定値をとることがわかつた。そして滴状凝縮の蒸気側熱伝達率は膜状凝縮の場合に比較して約 4 倍も大きいことを示した。

また従来の鉛直伝熱面における滴状凝縮の熱伝達率の値は、水平下向き伝熱面での滴状凝縮の熱伝達率に較べると 3~6 倍の高い値であつた。このことは鉛直あるいは傾斜している伝熱面での凝縮液滴の掃除作用の効果が非常に大きいことを表わしていることが認められた。理論的解析を完全にするにはさらに微視的研究が必要である。

6. む す び

本研究に際し、実験に協力をえた仮屋崎侃、牧田九十九、鯉坂等 および 上加世田司郎の 諸君に感謝します。なお本報告の一部は日本機械学会九州支部佐世保地方講演会(昭和40年5月28日)にて講演を行なつたことを付記する。

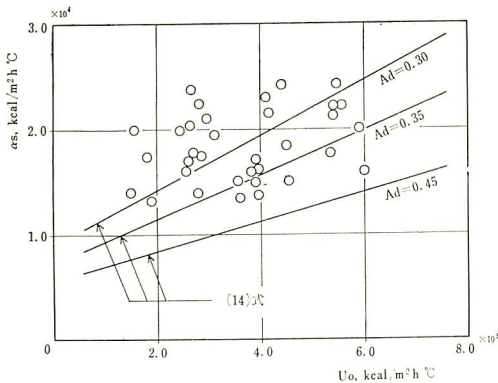


図23 (14) 式と実験値の比較

図 23 には蒸気側熱伝達率 α_s と冷却率 U_0 との実験結果および (14) 式を示している。凝縮液滴の付着面積比すなわち単位面積当りの凝縮液滴包覆面積 A_d は、Fatica らによると鉛直伝熱面では 0.45 と報告されているが、筆者らの水平下向き伝熱面で観察したところでは Fatica らの値よりやや小さいようである。図には (14) 式において付着面積比が 0.45、0.35 および 0.30 の場合を実線で表わしてあるが、(14) 式と筆者らの実験結果とは定性的にはほぼ一致しているけれども定量的には良き一致を示していない。これは理論式にいくつかの仮定が取入れられているためであり、理論的解析をもう少し厳密に行なうには蒸気の凝縮機構の

参 考 文 献

- 1) W. Nusselt : Z. VDI, 60, 27 (1916~7), 541.
- 2) E. Schmidt & others : Tech. Mech. Thermodynamik, 1, 2(1930~2), 53.
- 3) U. Grigull : Forsch. Geb. Ing.-Wesen., 13, 1 (1942), 49,
- 4) L. A. Bromley : Indust. Engng. Chem., 44, 12(1952~12), 2966.
- 5) W. M. Rohsenow : Trans. ASME, 78, 8 (1956~11), 1645.

- 6) E. M. Sparrow & J. L. Gregg : Trans. ASME, Series C, 81, 1(1959~2), 13.
 - 7) 馬淵 : 日本機械学会論文集. 26, 168 (1960~8), 1134.
 - 8) 2) と同じ.
 - 9) T. B. Drew & others : Trans. Amer. Inst. Chem. Engr., 31, 4 (1935~12), 605.
 - 10) W. M. Nagle & others : Trans. Amer. Inst. Chem. Engr., 31, 4 (1935~12), 593.
 - 11) E. Gnam : Forsch. u. Forsch.-h., 382(1937), 17.
 - 12) J. P. Fitzpatrick & others : Trans. Amer. Inst. Chem. Engr., 35, 1 (1939~2), 97.
 - 13) F. L. Shea & N. W. Krase : Trans. Amer. Inst. Chem. Engr., 36, 5 (1940), 463.
 - 14) H. Hampson : Proc. General Discussion on Heat Transfer, (1951), 58.
 - 15) J. W. Westwater & J. F. Welch : International Developments in Heat Transfer, Part II, (1961), 302.
 - 16) N. Fatica & D. L. Katz : Chem. Engng. Progr., 45 (1949), 661.
 - 17) 菅原・岐美 : Memoirs of the Faculty of Engng., kyoto Univ., 18, 2 (1956~4), 84.
 - 18) 田中・玉利 : 鹿児島大学工学部研究報告. 第2号 (1962~9), 63.
-