日本における最近の凝縮研究の進展*

日本機械学会論文集(B編)
55巻516号(1989-8)

棚 沢 一 郎^{*1}

Condensation Heat Transfer —Recent Progress of Japanese Research

Ichiro TANASAWA

A state-of-the art review is presented on the research activities in Japan on condensation heat transfer during these nine years. On writing this article the author has decided to choose those papers which have been published on the Trans. JSME from 1980 until 1988 as the main target of the review. The papers printed elsewhere on the other publications or prior to 1980 are referred to only whenever it is needed. The author classifies the subjects into five items. They are; (1) Film condensation of single-component vapor, (2) Film condensation of multi-component vapor, (3) Enhancement of condensation heat transfer, (4) Dropwise condensation, and (5) Direct contact condensation and other forms of condensation. However, the author's effort is focussed mostly on the item (3) on the techniques of enhancement of condensation heat transfer. Dropwise condensation is another item that is discussed in some detail. Only the outlines are presented for the remaining items. Also it should be noted that the papers referred to in this article do not cover all the publications on condensation heat transfer even for those published after 1980 on the Trans. JSME, though more than 100 references are cited.

Key Words: Heat transfer, condensation, film condensation, multi-component vapor, enhancement of condensation, dropwise condensation, direct contact condensation

1. はじめに

本稿では、日本機械学会論文集に発表された論文を主たる対象として、最近約10年間の凝縮伝熱に関する研究についての展望を行う。この分野の研究に関する報告・論文は各種の雑誌や紀要、プロシーディングスなどに発表されているが、日本においては、その大多数が日本機械学会論文集のB編(熱および流体工学)に含まれる。ちなみに、1980年から1988年までの9年間に日本機械学会論文集のB編に掲載された凝縮伝熱関連の論文数は約120編あり、あえて断言すれば、日本で行われた凝縮研究の成果の主要なものはこの中に入っていると考えてよいであろう。

図1は、日本機械学会論文集B編に掲載された伝熱分野および凝縮伝熱関連の論文数を年代別に示し、かつ米国機械学会(ASME)発行のJournal of Heat Transferの論文数と比較したものである。すなわち、図1の上方に示した●印および▲印は、それぞれJournal of Heat Transferおよび日本機械学会論文集B編に毎年掲載された伝熱関係の論文数を示し、下方

の○印および△印は、それぞれに対応する論文集に掲載された凝縮関連の論文数を表すものである。なお、ここで論文数を数えるに当たって、ASMEの場合にはTechnical Paperを、またJSMEの場合には寄書をも含めている。また、どの範囲までを凝縮関連論文と考えるかによって数値は若干変わりうる。

図1から二つの傾向がわかる。一つは、日本における伝熱関係論文総数が1984年から増大しはじめ、

図1 ASMEおよびJSMEの論文誌に掲載された論文数の比較

* 原稿受付 平成元年4月24日。

^{*1} 正員, 東京大学生産技術研究所 (〒106 東京都港区六本木7-22-1)。

ASME のジャーナルの論文数に近づいてきたこと、もう一つは、JSME における凝縮関係の論文数がこの 9 年間を通じて ASME を上回っていることである。9 年間の合計をとると ASME における伝熱関係論文および凝縮関係論文の数はそれぞれ 1448 および 51 であるのに対し、JSME についての数は 1129 および 117 となっている。この数字は日本における凝縮研究の地位をかなりよく表しているものと言えるであろう。

著者は、この展望論文の執筆に当たり、1980 年から現在に至るまでに日本機械学会論文集に発表された論文を主な対象とすることとし、必要に応じてその他の雑誌などに掲載された論文および 1980 年以前に出版された文献も引用することとした。また、凝縮に関する研究には、基礎的なものから実際の応用に至る各段階のものがあるが、以下では凝縮に関する研究を 5 項目に分類した。すなわち、(1) 単成分蒸気の平滑面上への膜状凝縮、(2) 多成分蒸気の膜状凝縮、(3) 膜状凝縮伝熱の促進法、(4) 滴状凝縮、(5) 直接接触凝縮その他の凝縮形態に関する研究。ただし、著者の能力および紙数の関係で、これら 5 項目のすべてについて詳しく述べる余裕はないので、本稿では(3)の凝縮伝熱の促進技術および(4)の滴状凝縮にある程度焦点を絞り、その他の研究については概略を紹介するにとどめることにした。なお、本稿で引用した文献は、1980 年以降についても、日本機械学会に発表されたものの全部を網羅してはいないことをお断わりしておきたい。

2. 平滑面上への単成分蒸気の膜状凝縮

1917 年に Nusselt⁽¹⁾によって発表された平板および水平円管外表面上への膜状凝縮に関する理論は、現在でもなお命脈を保っている。急速な変化をとげつつある工学の世界にあって、70 年前の理論が今もって通用するのはまことに希有な例と言えるであろうが、これは Nusselt の理論が膜状凝縮伝熱の現象面の肝要な点を抑えているからである。しかし、周知のように Nusselt の理論は、実際の現象をモデル化する際に数多くの理想化を行っており、これら理想化のための仮定が成立しないような条件の下では当然大なり小なりの修正が必要となる。

たとえば、Rohsenow ら⁽²⁾⁽³⁾は流れによる顕熱輸送や液膜内の温度分布の非直線性を考慮に入れた修正を行い、Sparrow-Gregg⁽⁴⁾は凝縮液膜に対する境界層近似を適用して慣性項をも含むより厳密な解を求めている。ただし、これらの研究の結果は、多くの場合、Nus-

selt の解からの修正量が比較的小さくてよいことを確認するものであった。

Nusselt の理論が立脚している仮定の中で、実際の凝縮装置内での現象とかけ離れる場合もありうると考えられるものの一つは、気液界面におけるせん断力を無視するという仮定である。凝縮装置内での蒸気の流速を考えると、この仮定と現実との差異を明確にしておくことが必要であろう。この問題についての 1970 年頃までの研究の成果については、藤井・上原⁽⁶⁾によりまとまった解説が書かれている。

凝縮を伴う水平円管まわりの蒸気流は、単相流の場合とは異なり、液膜の影響および気液界面での蒸気の吸込みの影響を受ける。藤井・本田⁽⁶⁾は、境界層の近似解法によって気液界面せん断力を評価し、蒸気の流速と方向および壁面の熱的境界条件が熱伝達におよぼす影響を理論的に検討し、さらに実験⁽⁷⁾との比較を行った。その結果、平均ヌセルト数に関しては、一様壁面熱流束の解と実験値とはよい一致を示すが、壁温の周方向分布については、はく離点および液膜流の合流点近傍で両者がかなり異なることを認めた。著者らは、この原因は壁内の熱伝導の影響を無視したことにあると推測した。

著者らがこの論文で提案している水蒸気に関する熱伝達率の整理式は次のとおりである。

$0.03 \leq Pr_L / Fr H_m < 600$ について：

$$Nu_m / Re_L = 0.96 (Pr_L / Fr H_m)^{0.2} \dots\dots\dots (1)$$

$600 < Pr_L / Fr H_m$ について：

$$Nu_m = 0.69 (Ga Pr_L / H_m)^{0.25} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 Nu_m ：平均ヌセルト数 ($= \alpha_m d_o / \lambda_L$)、 Pr_L ：液相のプラントル数、 Re_L ：二相レイノルズ数 ($= U_\infty d_o / \nu_L$)、 Fr ：フルード数 ($= U_\infty^2 / g d_o$)、 H_m ：平均相変化数 ($= C_{pL} \Delta T / L$)、 Ga ：ガリレオ数 ($= g d_o^3 / \nu_L^2$)、 C_{pL} ：液相比熱、 d_o ：円管外径、 g ：重力の加速度、 L ：凝縮潜熱、 U_∞ ：近より蒸気速度、 α_m ：平均熱伝達率、 ν_L ：液相動粘性率、 λ_L ：液相熱伝導率、 ΔT ：面積平均壁面過冷度である。ちなみに一様壁温の体積力対流凝縮に関する Nusselt の式は

$$Nu_m = 0.728 (Ga Pr_L / H_m)^{0.25} \dots\dots\dots (3)$$

で、式(1)、(2)とは係数に差異がある。その後、本田・藤井⁽⁸⁾は管壁内熱伝導を考慮した解析を行い、凝縮熱伝達は蒸気条件のみならず、管の寸法および材質、管内側の冷却条件などにも影響されることを明らかにした。ただし、水蒸気の場合には、蒸気側の熱伝達率が管内の強制対流冷却の熱伝達率に比べてかなり大きいので、実用上は寸法・材質・冷却条件などの影響を無視してもよい。一方、フロン系冷媒蒸気の場合には、むしろ

る蒸気側熱伝達率のほうが冷却側に比べて小さいので、水蒸気の場合とは異なる結果が予測される。藤井ら⁽⁹⁾は前報⁽⁸⁾の解析をフロン系蒸気の場合に適用し、その結果を R 113 蒸気による実験の結果と比較した。その結果、蒸気流速が増大するにつれて、水蒸気の膜状凝縮熱伝達率は一樣壁面熱流束の解に近い性質を示すのに対し、フロン系蒸気では一樣壁温の解に近づくことを確認した。この論文で著者らが提案している平均熱伝達率に関する相関式は次のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} Nu_m / \sqrt{Re_L} &= 0.73 (Pr_L / FrH_m)^{0.25} \\ &\times \{1 + 2.6(1 + Pr_L / RH_m)^{0.3} \\ &\times (Pr_L / FrH_m)^{-0.45}\}^{0.3} \\ &[0.03 < Pr_L / FrH_m] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 R はいわゆる $\rho\mu$ 比 ($=\sqrt{\rho_L\mu_L/\rho\mu}$)、すなわち液相と蒸気相の密度と粘性率の積の比の平方根を表す。その他の記号は式(1)、(2)と同じである。

式(4)は、変数 $Pr_L/(FrH_m)$ が大きくなると Nusselt の式(3)に漸近する形になっている。著者らによれば、式(4)は R 22 を用いた Gogonin-Dorokhov⁽¹⁰⁾ の実験値に対してはやや高めの、また R 113 を用いた著者ら自身の実験値に対してはやや低めの予測値を与えるが、総じて一致の程度はよいようである。

この種の研究としては他に、藤井・小田⁽¹¹⁾⁽¹²⁾による水平管群を流れる低圧水蒸気の膜状凝縮熱伝達および圧力降下に関する研究、上原ら⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾による鉛直面上の膜状凝縮の研究、藤井・小田^{(15)~(17)}による凝縮液インテンデーションに関する理論解析、藤井・渡部⁽¹⁸⁾による亜臨界域の層流膜状凝縮に関する研究などが発表されているが、ここでは割愛する。

3. 多成分蒸気の膜状凝縮

現在までのところ、3 成分以上の多成分蒸気の凝縮に関する研究は少なく、大部分が 2 成分蒸気の凝縮を扱っている。

2 成分蒸気の凝縮は、これを二つに分けることができる。一つは 2 成分のうちの一つが不凝縮気体の場合であり、もう一つは両成分とも凝縮する場合である。ただし、どのような気体でも十分に低い温度では凝縮するから、このような分け方は蒸気の過冷度に対して相対的なものである。

不凝縮気体としての空気を含む 2 成分気体の凝縮に関する研究は、主として発電プラントにおける復水器の性能低下を予測する目的で従来から研究されてきたが、理論的な解析法が確立し、また数値成分による高精度の解が得られるようになったのは比較的近年のこと

とである。

詳しい内容についての記述は省略するが、土方ら⁽¹⁹⁾、藤井ら^{(20)~(22)}の論文はこの種の問題についての基礎的考察を行ったものであり、また、土方ら⁽²³⁾、小林ら⁽²⁴⁾および瀬下ら⁽²⁵⁾の研究は伝熱機器における応用を含んだものである。

一方、凝縮する蒸気が 2 成分以上ある場合の伝熱については、化学工業における蒸留分離プロセスなどに関連した実際的な研究が従来も行われているが、最近 2 成分混合媒体を作動流体として使用するヒートポンプや冷凍機が注目されるようになってきたことと関連して、研究が盛んになりつつある。すなわち、ヒートポンプや冷凍機用の蒸発器や凝縮器において、作動媒体が純物質の場合には、蒸発や凝縮がほぼ一定温度で起こるから、熱交換過程の始めと終わりでは、熱源流体との温度差は異なる。熱交換に必要な最小温度差（ピンチ温度差）として数℃は確保しなければならないとすると、熱交換過程の大部分はこれよりも大きな温度差で行われることになる。もし作動媒体として適当な混合物質を選び、蒸発あるいは凝縮の過程で相変化温度が連続的に変化し、熱源流体との温度差を一定に保つことができれば、熱交換のための有効エネルギー損失を、純物質を用いた熱力学的サイクルよりも小さくすることが可能になる。通産省のムーンライト計画の中の一つのプロジェクトである「スーパーヒートポンプ・エネルギー集積システムに関する研究」は 1984 年にスタートしたが、この中で成績係数 8 を目指す高効率ヒートポンプは、混合媒体の使用によって目標を達成しようとしている。

このような 2 成分蒸気の凝縮における問題点は、その伝熱性能にある。熱力学的なサイクル効率を向上させるという見地から、現実を選択しうる 2 成分媒体は非共沸組成のものが多く、このような蒸気を凝縮させると、凝縮しにくいほうの成分の蒸気が不凝縮気体のように振る舞うから、凝縮熱伝達率の大幅な低下を招く可能性がある。したがって、両成分が凝縮するような 2 成分蒸気の凝縮に関する研究には、(1) 凝縮伝熱特性の予測法と(2) 凝縮伝熱の劣化の防止法の確立という二つの主要課題であることになる。

著者は、この分野の研究が今後の凝縮伝熱に関する研究の中で重要な位置を占めるようになるものと考えている。これまでに発表された論文としては、藤井ら^{(26)~(28)}、小山ら^{(29)~(31)}、土方ら⁽³²⁾および望月ら⁽³³⁾のものがある。ただし、これらの論文のなかには混合蒸気の中に空気が含まれている場合を部分的に扱ったものも入っている。

4. 凝縮伝熱の促進

原理的に、凝縮伝熱の促進には二つの方法がある。一つは伝熱面積を大きくすること、もう一つは凝縮液膜の熱抵抗を小さくすることである。前者はフィン付き面やフルート管などのような拡大伝熱面の使用に結びつくが、単相の気体の伝熱の場合とは違って、凝縮の場合には、それ自体の熱伝達率がもともと比較的大きいので、あまり高いフィンを使用することはフィン効率の点から考えて無駄が多く、したがって背の低いフィンを使用することになる。後者については、いろいろな手段によって凝縮液膜の厚さを減少させる工夫が必要になる。そして実用上は、これら二つの組合せ、すなわちローフィン付き伝熱面の使用と、その上での液膜厚さの低減策とを同時に考えた凝縮伝熱面が採用されることになる。平沢ら^{(34)~(37)}は、先端が鋭い微細なフィンを多数有する伝熱面が、フィンの先端や溝の底部近傍における表面張力の効果により非常に高い凝縮熱伝達率を示すことに着目し、このような凝縮面による伝熱促進について理論解析と実験を行っている。さらに、このような高性能凝縮管の一つとして、鋭い先端部をもつ軸方向フィンと、凝縮液排除用の円板をもつ鉛直管を提案し、フィンのピッチ、高さ、肉厚およびディスクの間隔などの最適条件を明らかにした。彼らによれば、裸管の約7倍の伝熱促進を得ることが可能である。

さらに森ら⁽³⁸⁾は、上述のような鉛直凝縮管群の伝熱性能におよぼす、蒸気過熱度、蒸気流速および管配列の影響をR113蒸気による実験で調べている。その結果、この実験で用いた微細矩形フィン付き凝縮管の単管についての平均熱伝達率は、平滑管の約10倍であり、蒸気過熱度、蒸気流速の影響はいずれも小さく、また管群の伝熱性能は管間の最大流速でほぼ整理することができ、たとえば最大流速が約2 m/sで低下しはじめ、約5 m/s以上では一定値（元の値の約15%減）に落ち着くことを確かめている。

なおこれに関連して、土方ら⁽³⁹⁾は不凝縮気体の混合による熱伝達率の低下について実験を行い、結果を一次元の理論値と比較することによって、フィン寸法と不凝縮気体拡散層の厚さの相対的な関係と平均熱伝達率との間の関係を明らかにしようとしている。その結果、不凝縮気体の混入によって凝縮熱伝達率は低下するが、その程度は、不凝縮気体の拡散境界層がフィンのぬれぶちに沿って発達すると考えた一つの極限と、拡散境界層の中にフィンがすっかり埋没してしまうと考えたもう一つの極限の中間に位置し、その値は拡散

層厚さの代表値とフィン高さとの比に依存すること、より具体的には著者らが実験に用いた波形フィンの場合、0.1%の空気の混入で熱伝達率が約30%低下することを明らかにしている。

上にも述べたように、近年のいわゆる高性能凝縮管は、フィンによる伝熱面積の増大と、表面張力の作用による凝縮液の薄膜化による伝熱促進をあわせて採り入れている。しかし、実際にはこれら二つの効果が両立しないことがある。すなわち、伝熱面積を増やす目的で微細フィンのピッチを小さくしすぎると、間の溝部に凝縮液が充満し、薄液膜部の有効面積がかえって減少する。これまでの研究から、フィン間の凝縮液のたまりやすさは凝縮液の表面張力 σ と密度 ρ_L の比に依存し、 σ/ρ_L が大きいほど液はたまりやすいと言われている。すなわち、平滑管と比べた凝縮伝熱促進率は σ/ρ_L の大きい物質ほど低下する傾向がある。

本田ら^{(40)~(43)}は、 σ/ρ_L の大きい物質についての凝縮伝熱促進法として、水平フィン付き凝縮管の下端に多孔排液板を取付け、毛細管力と重力の作用によって溝部にたまった凝縮液を排除し、有効伝熱面積を増大させ伝熱性能の向上をはかるという方法を提案している。

著者らの実験では、外径約19 mmの円管表面に高さ0.92~1.46 mm、ピッチ0.50~0.98 mmの4種類の形状の微細フィンを設けた凝縮管を用意し、これらの下端に幅2 mm、深さ1~1.5 mmの軸方向溝を切り、厚さ1.9 mm、高さ14~19 mmのニッケル製多孔板（かさ比重490 kg/m³、平均孔径約0.8 mm）を取付けている。

図2はこのような排液板の効果を示すものである。すなわち、図2(a)はメタノール、図2(b)は冷媒R113を凝縮させた場合で、図2(a)(i)および図2(b)(i)は多孔質板がない場合の凝縮の状態、図2(a)(ii)および図2(b)(ii)は多孔質板を付けた場合の凝縮の状態を示している。このときの凝縮面の過冷度は約8 Kである。それぞれの写真の左側の水平の矢印はこの位置でフィン間の溝部液膜厚さが急変し、周方向に凹部と凸部の境界ができていること、すなわちほぼこの矢印より下方の溝部には凝縮液が充満していることを示す。写真によれば、この境界の位置は多孔質板を置くことによってずっと管底部のほうに近づくことがわかる。そしてR113とメタノールとを比較すると、境界の位置は σ/ρ_L の値の大きいメタノールのほうが管頂近くにあり、多孔質板の有無による変化も大きい。このことから多孔板の取付けにより、溝部に保持される凝縮液量は大幅に減少し、凝縮伝熱の促進に役

立っていることがわかる。

溝部に保持される凝縮液の境界位置を、円管中心を原点として円管頂部から測った角度で表したものを液充滿角 (retention angle) と呼ぶことにすれば、その大きさ ϕ は凝縮液の表面張力と密度および円管とフィンの幾何学的形状・寸法できまらるはずである。本田らは若干の仮定のもとに ϕ および溝部の液膜の厚さを理論的に求め、これらが実験値とおおむね一致することを確認した。たとえば、図 2 に示したようなフィン付き管の場合、多孔板取付けによる液充滿角 ϕ の比は R 113 の場合 1.22, メタノールの場合 1.61 であり、これに対応する熱伝達率の増大率はそれぞれ 1.36 および 2.08 となる。平滑円管と比較すると、このローフィン管 (多孔板なし) の伝熱促進率は R 113 に対して 8.8, メタノールに対して 4.9 であるから、多孔板を取付けた場合の伝熱促進率は、それぞれ約 12 倍および 10 倍という大きな値になる。

本田らは、これら一連の報告の中で多孔質排水板を付けたローフィン付き管上の平均ヌセルト数を求めるための予測式を導いている。この式はさほど複雑なものではないが、本田らが別報⁽⁴⁶⁾⁽⁴⁷⁾で導いている水平ローフィン付き管上の膜状凝縮熱伝達率の計算式に関する知識が必要となるので、ここでは紹介を割愛して、

図 2 水平ローフィン管および多孔質排水板付きローフィン管での凝縮 [写真は本田博司教授 (九大) の提供による]

本田らが得た他の結論を述べるにとどめる。その一つは多孔質板が有効に働くためにはその高さに上限・下限があり、とくに上限のほうは毛管限界によって定まるということ、もう一つは排水板の効果は中実な板より多孔質板のほうがはるかに大きいということである。

このような伝熱促進法の研究と並行して、本田・藤井⁽⁴⁴⁾⁽⁴⁵⁾および本田・野津⁽⁴⁶⁾⁽⁴⁷⁾は、ローフィン付き凝縮面における膜状凝縮熱伝達率の求め方を提案している。これらの論文でとくに興味深いのは、フィンとフィンとの間にできる凝縮液の表面形状および局所ヌセルト数の分布を解析的に求めたうえで、さらにそれを $\pm 5\%$ 以内の誤差で近似する平均ヌセルト数の表示式を作成したことである。この近似式を用いれば微分方程式を解くことなしに、ローフィン付き凝縮面上での熱伝達率を予測することができるので便利である。

このようなかなり手の込んだ凝縮伝熱促進法に対してもっと簡便な方法として以前から知られているのは、円管外面にワイヤを巻き付ける方法である。これは円管に巻き付けられたワイヤが凝縮液を引き寄せて保持し、ワイヤ間の円管表面の液膜厚さを減少させるという効果を狙っている。ワイヤを巻き付けるピッチが小さすぎても大きすぎても効果は小さくなるから、最適ピッチが存在するはずである。藤井ら⁽⁴⁸⁾は、体積力対流凝縮の場合について実験と解析を行い、巻き付ける細線の径とピッチの比が約 1:2 の場合に凝縮伝熱の促進比は最大となることを見いだした。促進比は円管径と細線径の比および液体の種類によって異なるが、平滑円管と比べて 3 倍前後の値が得られる。また王・藤井⁽⁴⁹⁾は強制対流凝縮の場合について、同じ促進法の効果を検討しているが、この場合には巻き付けた細線によって有効凝縮面積が減少するため、平均ヌセルト数は円滑管の場合よりも小さくなる。

このほか、電子機器の冷却と関連して、水平下向き伝熱面への凝縮とその促進法についての研究が、梁取ら^{(50)~(52)}、および本田ら⁽⁵³⁾によって発表されているが、内容についての紹介は省略する。

以上に紹介したようないわゆる受動的な伝熱促進法ではなく、静電場を印加するという能動的な方法も提案されている。すなわち、矢部ら⁽⁵⁴⁾は垂直円管外面上へのフロンの凝縮において、凝縮面とこれに向き合う電極との間に非一様静電場を与えると、凝縮液表面が不安定となって電極のほうに引っ張られる現象を発見し、これを利用して凝縮面上の凝縮液を引き出すことで伝熱促進を実現することに成功した。たとえば、図 3 に示すように金属凝縮面とそれに対向して設けた細

線電極間に電場をかけることにより、凝縮液は液柱状となって細線のほうに引き出されるから、この外側に導出路を置けば凝縮液のかなりの部分を排除することが可能である。このような電極と導出路とを適当な間隔で並べれば大きな伝熱促進効果が得られることになる。なお、フロンのような導電性の小さい液体の場合、電圧が大きくても流れる電流はわずかであり、消費電力が伝熱量の1%以下にとどまるので、このような方法をとることによる損失がきわめて小さいことも利点である。こうした基礎的な研究をもとに竹谷⁽⁵⁵⁾らは、細い帯状のらせん電極を用いることにより、凝縮液の引出しと排除を同時に行うことに成功し実用化への一歩を進めている。また、電場によって引き出しうる凝縮液量には上限があり、どうしてもある程度の薄液膜が凝縮面上に残ってしまうが、矢部⁽⁵⁶⁾は面状電極を用いて電場を印加することにより薄膜液に凹凸を生じさせ、さらに凝縮伝熱を促進させるよう試みている。薄液膜上にできる凹凸が滴状凝縮と似ているところから、矢部らはこれを擬似滴状凝縮と呼んでいるが、フロン114の垂直円管外面上での凝縮では、らせん電極による凝縮液の引出しと、面状電極による擬似滴状凝縮の双方によって約6倍の伝熱促進率が実現されている。

5. 滴 状 凝 縮

洞状凝縮に関する論文は1930年のSchmidt⁽⁵⁷⁾によるものが最初であるが、それ以後1970年代半ばまでの研究については棚沢⁽⁵⁸⁾⁽⁵⁹⁾によって詳しい展望が書かれている。またこれ以後10年間の研究に関する展望が同じ著者⁽⁶⁰⁾⁽⁶¹⁾によって出されている。

滴状凝縮では、きわめて高い熱伝導率が得られる。大気圧の水蒸気の場合、鉛直銅面上への滴状凝縮の熱伝達率は約 $200 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ で、同一条件での膜状凝縮の20倍を超える。このような滴状凝縮の熱伝達率の

測定技術は1960年代後半から1970年代にかけて確立し、研究者間の大きな差異はあまり見られなくなった。また、滴状凝縮における微視的な現象（たとえば、初期液滴発生メカニズムに関する研究など）も一段落した感がある。最近の滴状凝縮の研究は、凝縮の条件や蒸気の種類を変えた場合の熱伝達率の測定へと中心が移ったように思われる。

1974年に東京で開かれた第5回国際伝熱会議において、武山・清水⁽⁶²⁾は凝縮面の過冷度（蒸気飽和温度と凝縮面表面温度の差）を3 Kから250 Kまで変化させて熱流束を測定した。横軸に過冷度、縦軸に熱流束をとってプロットしたこのような曲線は、沸騰曲線との対比で（滴状凝縮における）凝縮曲線と呼んでよいであろう。ただし、落合⁽⁶³⁾によれば武山・清水による測定には精度の点で疑問がある。宇高・棚沢^{(64)~(66)}は、特殊な形状の凝縮面を作成して、大気圧の水蒸気の凝縮曲線を測定した。

その結果によれば、滴状凝縮曲線は沸騰曲線とよく似た形状をしており、はじめ過冷度とともに熱流束が増大し極大値に達する。しかし沸騰の場合とは違ってこの極大値が凝縮装置に被害を与えることはない。極大値を超えて熱流束が低下する領域での凝縮形態は、蒸気流に対して凝縮面上流端では滴状凝縮であるが、下流側では液が滞留して擬似的な膜状凝縮になる。この擬似膜状凝縮の領域はしだいに上流側に広がっていきついには全面が液で覆われることになる。大気圧の水蒸気の凝縮においては、このような一種のフラディング現象は、凝縮面過冷度が 100°C （すなわち、表面温度が 0°C ）に近いところで起こるので、表面が液膜に覆われ始めると同時に表面温度が低下しはじめ、凍結が生じる。そしてできた氷の上に膜状凝縮が起こることになる。このような凝縮形態を武山⁽⁶²⁾は氷状凝縮（glacial condensation）、宇高⁽⁶⁴⁾⁽⁶⁵⁾は氷上凝縮（on-ice condensation）と名付けているが、これは凝縮液の水点に保たれている表面上への膜状凝縮であり、容易にわかるようにこの場合の熱流束は冷却壁面の温度（あるいは過冷度）には依存しない。凝縮曲線の測定は、この後も何人かの研究者によって行われている。たとえば、泉⁽⁶⁷⁾は水蒸気の凝縮曲線における二つのヒステリシス現象の解明を試み、また宇高^{(68)~(72)}はプロピレングリコール、エチレングリコール、グリセリンなどの有機物蒸気の凝縮曲線を測定し、凝縮面過冷度が大きいところで生ずる滴状から膜状への遷移のメカニズムについて詳細に検討している。

これらに近い実験的研究として、山内^{(73)~(74)}は、凝縮面上に親水性の部分と撥水性の部分とが交互に存

図3 電場による膜状凝縮の伝熱促進

在するような特殊な伝熱面を作成し、膜状凝縮と滴状凝縮とが混在する状態での伝熱特性を測定している。当然、伝熱面上の局所熱伝達率は、滴状凝縮が起きている部分では高く、膜状凝縮の部分では低い。しかし、膜状凝縮となっている部分の液膜が、隣接する滴状凝縮の液滴を引き込むために、伝熱面の分割のしかたによっては、滴状凝縮部分の液滴の最大径が小さくなり熱伝達がよくなる。条件によっては全面が滴状凝縮の場合よりも高い熱伝達率が得られることすらありうる。

凝縮曲線の測定結果によれば、大気圧の水蒸気の滴状凝縮は、凝縮面過冷度がかかなり大きいところまで存続し、熱伝達率も高い値を保ち続ける。膜状凝縮の場合には、凝縮面過冷度が増大すると、面上の平均液膜厚さが増すために熱伝達率は低下する。滴状凝縮における高い熱伝達率は、液滴どうしの合体や液滴の離脱によって、凝縮面上にひんぱんに空地（液膜の存在しない場所）が露出するためと考えられるが、このような現象が継続する限り熱伝達の劣化は起らないと推測される。もしこの推論が正しいとすれば、膜状凝縮の場合に問題となるようなインアンデーションの効果は、滴状凝縮では回避できる可能性がある。斎藤・棚沢⁽⁷⁵⁾⁽⁷⁶⁾は、水平円管を鉛直面内に配置した管群上での滴状凝縮の場合、上段管からの流下液によって下段管における熱伝達率がどのように変化するかを測定している。その結果によれば、少なくとも8段めまでは第1段めにくらべ熱伝達率の劣化はなく、むしろ3~5段めでは第1段めよりも高い熱伝達率が得られている。

以上のような滴状凝縮におけるマクロな熱伝達特性についての実験的研究とは別に、滴状凝縮の微細なメカニズムを明らかにしようとする研究もいくつか行われている。海野ら⁽⁷⁷⁾は、表面過冷度がきわめて小さく、核生成による液滴発生が抑制される（可能性がある）ような条件下での熱伝達実験を行っている。また、鶴田・田中⁽⁷⁸⁾は、低圧の水蒸気の滴状凝縮について熱伝達率を測定するとともに液滴の挙動の観察を行っている。さらに幡宮・田中⁽⁷⁹⁾⁽⁸⁰⁾は、表面仕上げの異なる5種類の凝縮面（銅板上への2種類のクロムめっき表面、銅板上への金めっき、表面超精密切削金表面、シリコン表面上に金を蒸着したもの）を用意し、有機物のプロモータを用いることなしに滴状凝縮を生じさせ、低圧水蒸気を用いた実験を行っている。図4は、幡宮・田中による低圧水蒸気の滴状凝縮熱伝達率の測定結果のうち、銅基板クロムめっき表面についてのものを、従来発表されている信頼できる結果とともに示したもの

である。この研究の後半⁽⁸⁰⁾で、著者らは液滴径分布についての測定結果をもとに理論的考察を展開し、水蒸気が凝縮する際の凝縮係数の値は、圧力が1~3 kPaの範囲ではその上限値1.0より有意に小さく、0.2~0.6の範囲にあり、最も確からしい値は0.4であるとの結論を導いている。この結論は、ごく最近石黒・杉山⁽⁸¹⁾によって発表されたカリウムの凝縮熱伝達に関するきわめて詳細な実験的研究の結論、すなわち、カリウム蒸気の凝縮係数は1と考えてよいという結論と対比してみるときわめて興味深い。

滴状凝縮伝熱に関する研究で長い間未解決のまま残されてきた課題の一つに、凝縮面材料の熱伝導率が凝縮熱伝達率に影響を与えるかどうかという問題がある。その経緯と内容の詳細についてはここでは触れないが、最近この問題に対する最終的解答に挑戦する研究結果が鶴田・田中⁽⁸²⁾によって発表されている。著者らによれば、滴状凝縮の熱伝達率は凝縮面材料の熱伝導率が低いものでは低下するということである。

著者の私見では、滴状凝縮についての研究は、実用に耐えうる永続的な撥液性伝熱面をいかに製作するかという技術的課題が最重要であり、他の研究は二義的な重要性をもつにすぎない。しかし、現在のところこの最重要課題についての進展は見られない。

6. 直接接触凝縮およびその他の凝縮形態

直接接触凝縮器には、表面凝縮器にはないいくつかの利点があるとされているが、実際の使用例は限られており、これに対応して基礎的な研究も多くない。しかし、直接接触凝縮では連続相と分散相の形態や物質の組合せによっていろいろ興味深い現象が観察されている。

亀井・平田^{(83)~(86)}は、水蒸気泡をサブクール水中に噴出したときに起こる直接接触凝縮における気泡の消滅までの挙動および音響の発生についての一連の研究結果を発表している。図5⁽⁸⁵⁾はその結果の一つで、1

図4 低圧水蒸気の滴状凝縮熱伝達

図5 サブクール水中に噴出した二次元蒸気泡の凝縮
[写真は亀井秀也氏(東大)の提供による]

mm 間隔の2枚のガラス板にはさまれた二次元気泡の消滅の様子を高速度写真で撮影したものである。この写真によれば、一次気泡が離脱すると、その後流端に向かって二次気泡が侵入し、両気泡は合体することなく、一次気泡が二次気泡を包み込むような形をとり、最後には二次気泡が一次気泡を突き抜けるようになって消滅する様子がわかる。このような二次元気泡による観察は、三次元気泡で起こっている現象を明確にする点で大変興味深い。

張ら⁽⁸⁷⁾は、落下水滴上にフロン R 113 が直接接触凝縮する際にきわめて高い熱伝達率が得られることを確認し、高速写真による観察によって、このような高い熱伝達率は、凝縮したフロン液が水滴表面を一様に覆うことなく、水滴表面の一部に突起状に滞積するためであるとの推測をしている。しかし、彼らの凝縮熱伝達率の測定には大きな誤差が含まれている可能性がある。

中島・棚沢⁽⁸⁸⁾はより精度の高い測定によって、同じ水-フロン R 113 の組合せについての実験を行いやや低めの熱伝達率を得ている。図6はこの実験で得られた落下中の液滴の形態を示すもので、張らの観察と同じように、凝縮したフロン液が水滴表面の一部に帽子状の突起を形成していることがわかる。このように、水-フロンのような非混合液どうしの直接接触凝縮では、両液相間の界面エネルギーの関係でいろいろな特異な現象が起こり、それによって伝熱特性が影響を受ける可能性がある。

同一物質の組合せによる直接接触凝縮においても興味深い結果が得られている。土方⁽⁸⁹⁾は、落下中のフロン R 113 の液滴に同じ R 113 の蒸気が凝縮する際の熱伝達率を測定しきわめて高い値を得ているが、これは液滴の落下中の二次モードの変形振動によって液滴内の循環流のかくはんが促進されるからであることを証明している。なお、同じ著者⁽⁹⁰⁾による液滴列への直接接触凝縮についての研究結果も発表されている。こ

図6 R 113 蒸気中を落下する水滴

のほか、水蒸気の水中共凝縮についての有信ら⁽⁹¹⁾の研究、チャギングについての綾・成合ら^{(92)~(95)}の研究、非混合直接接触についての西山ら⁽⁹⁶⁾の研究があるが説明は省略する。膜状凝縮・滴状凝縮・直接接触凝縮のいずれにも属さない凝縮現象に関する研究としては、小竹⁽⁹⁷⁾⁽⁹⁸⁾による凝縮の素過程についての考察、滝本ら⁽⁹⁹⁾によるミスト生成についての研究、松尾ら^{(100)~(102)}によるラバルノズル内の凝縮過程についての研究などがあるがここでは触れないことにする。

文 献

- (1) Nusselt, W., *Z. VDI*, 60 (1916), 541, 569.
- (2) Rohsenow, M. M., Webber, J. H. and Ling, A. T., *Trans. ASME*, 78 (1956), 1637.
- (3) Rohsenow, W. M., *Trans. ASME*, 78 (1956), 1645.
- (4) Sparrow, E. M. and Gregg, J. L., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 81 (1959), 13.
- (5) 藤井・上原, 伝熱工学の進展, 1, (1973), 1 養賢堂.
- (6) 藤井・本田, 機論, 46-401, B (1980), 95.
- (7) 藤井・本田・小田, 機論, 46-401, B (1980), 103.
- (8) 本田・藤井, 機論, 46-412, B (1980), 2420.
- (9) 藤井・本田・小田・加藤・河野, 機論, 47-421, B (1981), 1861.
- (10) Gogonin, I. I. and Dorokov, A. R., *Zh. Prikl. Mekh. Tekh. Fiz.*, 2 (1976), 133.
- (11) 藤井・小田, 機論, 48-436, B (1982), 2580.
- (12) 藤井・小田, 機論, 49-437, B (1983), 197.
- (13) 上原・中岡・楠田・中島, 機論, 48-433, B (1982), 1751.
- (14) 上原・楠田・中岡・山田, 機論, 49-439, B (1983), 666.
- (15) 藤井・小田, 機論, 50-452, B (1984), 1062.
- (16) 藤井・小田, 機論, 52-474, B (1986), 818.
- (17) 藤井・小田, 機論, 52-474, B (1986), 822.
- (18) 藤井・渡部, 機論, 53-490, B (1987), 1801.
- (19) 土方・森・宇都宮, 機論, 46-407, B (1980), 1514.
- (20) 藤井・本田・小田・河野, 機論, 47-417, B (1981), 836.
- (21) 藤井・加藤, 機論, 49-438, B (1983), 466.
- (22) 藤井・小田, 機論, 50-449, B (1984), 107.

- (23) 土方・C. L. Tien・姫野, 機論, 52-473, B (1986), 182.
- (24) 小林, 松本, 機論, 54-504, B (1988), 1970.
- (25) 瀬下・小川・丸本・藤井, 機論, 54-499, B (1988), 716.
- (26) 藤井・加藤, 機論, 46-402, B (1980), 306.
- (27) 藤井・小山・五島, 機論, 51-467, B (1985), 2442.
- (28) 藤井・小山・渡部, 機論, 53-486, B (1987), 541.
- (29) 小山・藤井, 機論, 51-465, B (1985), 1497.
- (30) 小山・渡部・藤井, 機論, 52-474, B (1986), 827.
- (31) 小山・官良・藤井・高松・米本, 機論, 54-502, B (1988), 1447.
- (32) 土方・森・姫野・稲川・高橋, 機論, 52-477, B (1986), 2195.
- (33) 望月・井上・富永, 機論, 54-503, B (1988), 1796.
- (34) 平沢・土方・森・中山, 機論, 44-382 (1978), 2041.
- (35) Hirasawa, S., Hijikata, K., Mori, Y. and Nakayama, W., *Proc. 6th Int. Heat Transf. Conf.*, 2 (1978), 413.
- (36) Mori, Y., Hijikata, K., Hirasawa, S. and Nakayama, W., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 103-1 (1981), 96.
- (37) 平沢・森・土方・中山, 機論, 48-427, B (1982), 527.
- (38) 森・土方・近藤・平沢, 機論, 50-460, B (1984), 3000.
- (39) 土方・森・魏, 機論, 51-467, B (1985), 2140.
- (40) 本田・野津・光森, 機論, 49-445, B (1983), 1937.
- (41) Honda, H., Nozu, S. and Mitsumori, K., *Proc. 1st ASME-JSME Thermal Eng. Joint Conf.*, 3 (1983), 289.
- (42) 本田・野津, 機論, 51-470, B (1985), 3191.
- (43) Honda, H. and Nozu, S. (Wang, B. X., ed.), *Heat Transfer Science and Technology*, (1987), 455.
- (44) 本田・藤井, 機論, 50-460, B (1984), 2993.
- (45) Honda, H. and Fujii, T. (Avedisian, C. T. and Rudy, T. M., eds.), *Fundamentals of Phase Change: Boiling and Condensation*, HTD-38 (1984), 99.
- (46) 本田・野津, 機論, 51-462, B (1985), 572.
- (47) Honda, H. and Nozu, S., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 109 (1987), 218.
- (48) 藤井・王・小山・清水, 機論, 51-467, B (1985), 2436.
- (49) 王・藤井, 機論, 51-465, B (1985), 1699.
- (50) 梁取・土方・森・内田, 機論, 50-454, B (1984), 1558.
- (51) 梁取・土方・森・内田, 機論, 52-475, B (1986), 1086.
- (52) 梁取・土方・森・内田, 機論, 53-486, B (1987), 522.
- (53) 本田・野津, 古川, 機論, 52-475, B (1986), 1355.
- (54) 矢部・菊地・竹谷・山西・森・土方, 機論, 48-435, B (1982), 2271.
- (55) 竹谷・矢部・菊地・森・土方, 機論, 52-477, B (1986), 2202.
- (56) Yabe, A., Taketani, T., Kikuchi, K., Mori, Y. and Maki, H., *Proc. 8th Int. Heat Transf. Conf.*, 6 (1986), 2957.
- (57) Schmidt, E., Schuring, W. and Sellschopp, W., *Technol. Mech. Thermodyn.*, 1 (1930), 53.
- (58) 棚沢, 伝熱工学の進展, 4, (1976), 229, 養賢堂.
- (59) Tanasawa, I., *Proc. 6th Int. Heat Transf. Conf.*, 6 (1978), 393.
- (60) 棚沢, 機論, 48-429, B (1982), 835.
- (61) Tanasawa, I. (Wang, B. X., ed), *Heat Transfer Science and Technology*, (1987), 43, Hemisphere Publishing Co. 43 (1987).
- (62) Takeyama, T. and Shimizu, S., *Proc. 5th Int. Heat Transf. Conf.*, 3 (1974), 274.
- (63) 落合・棚沢・宇高, 機論, 43-370 (1977), 2261.
- (64) 宇高・棚沢, 機論, 46-409, B (1980), 1844.
- (65) Tanasawa, I. and Utaka, Y., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 105 (1983), 633.
- (66) 宇高・棚沢, 機論, 47-420, B (1981), 1620.
- (67) 泉・須々木・武山, 機論, 50-454, B (1984), 1600.
- (68) 宇高・斎藤・谷・渋谷・片山, 機論, 50-458, B (1984), 2418.
- (69) 宇高・斎藤・石川・柳田, 機論, 52-476, B (1986), 1835.
- (70) 宇高・斎藤・石川・柳田, 機論, 53-494, B (1987), 3100.
- (71) 宇高・斎藤・柳田, 機論, 53-494, B (1987), 3107.
- (72) 宇高・斎藤・柳田・山根, 機論, 54-502, B (1988), 1461.
- (73) 山内・熊谷・武山, 機論, 51-468, B (1986), 2606.
- (74) Kumagai, S., Yamauchi, A., Fukushima, H. and Takeyama, T., *Proc. 1987 ASME-JSME Thermal Eng. Joint Conf.*, 4 (1987), 409.
- (75) 斎藤・棚沢, 機論, 53-488, B (1987), 1270.
- (76) Tanasawa, I. and Saito, M., *Proc. 1987 ASME-JSME Thermal Eng. Joint Conf.*, 5 (1987), 143.
- (77) 海野・泉・清水・武山, 機論, 48-431, B (1982), 1339.
- (78) 鶴田・田中, 機論, 49-446, B (1983), 2181.
- (79) 幡宮・田中, 機論, 52-476, B (1986), 1828.
- (80) 幡宮・田中, 機論, 52-477, B (1986), 2214.
- (81) 石黒・杉山, 機論, 54-500, B (1988), 967.
- (82) 鶴田・田中, 機論, 54-506, B (1988), 2811.
- (83) 亀井・平田, 機論, 49-438, B (1983), 483.
- (84) 亀井・平田, 機論, 51-465, B (1985), 1507.
- (85) 亀井・平田, 機論, 53-486, B (1987), 464.
- (86) 亀井・平田, 機論, 54-503, B (1988), 1791.
- (87) 張・棚沢・西尾, 機論, 48-436, B (1982), 2565.
- (88) 中島・棚沢, 機論, 55-509, B (1989), 206.
- (89) 土方・森・川口, 機論, 51-461, B (1985), 152.
- (90) Hijikata, K., *Res. on Natural Energy* (文部省科学研究費 重点領域研究英文報告書), SPEY 8 (1984), 295.
- (91) 有信・鈴木, 機論, 49-446, B (1983), 2094.
- (92) 綾・成合, 機論, 50-458, B (1984), 2427.
- (93) 綾・成合, 機論, 51-461, B (1985), 177.
- (94) 綾・成合・若林, 機論, 51-463, B (1985), 910.
- (95) 綾・成合, 機論, 51-471, B (1985), 3359.
- (96) 西山・天野・梶川・宮部, 機論, 50-456, B (1984), 1928.
- (97) 小竹, 機論, 49-445, B (1983), 1946.
- (98) 小竹・青木, 機論, 52-474, B (1986), 953.
- (99) 滝本・林・増田, 機論, 46-405, B (1980), 1110.
- (100) 松尾・生井・瀬戸口・川越, 機論, 47-421, B (1981), 1691.
- (101) 松尾・川越・園田・瀬戸口, 機論, 49-437, B (1983), 108.
- (102) 松尾・川越・園田・瀬戸口, 機論, 50-453, B (1984), 1319.