



## 滴状凝縮について\*

棚 沢 一 郎\*\*

### 1. はじめに

夏、冷たいビールをついだコップをしばらく放置しておく、外側の表面がしだいに白く曇ってきて、やがて小さい水滴が無数に付着している様子が観察できるようになる。よく見ると、比較的小さい水滴は円に近い形をしているが、少し大きくなると大分形がくずれ、隣どうしくっつき合った不規則なものになってしまう。

言うまでもなく、これは空気中に含まれた水蒸気が、冷たいガラスの表面で液化するために見られる現象で、これから述べる滴状凝縮とも密接な関連がある。

一般に、蒸気をなんらかの方法でその飽和点以下のある温度まで冷却してやると液化が起こる。これが凝縮(consolidation)と呼ばれる相変化現象である。どの程度の温度まで冷却したときに、初めて凝縮が起こるか、いいかえれば、蒸気をどの程度の過冷却の状態にまでもっていきけるかは、蒸気中に含まれている不純物や、蒸気を取り囲んでいる容器壁の性質によってきまる複雑かつ興味深い問題であるが、ここでは目をつぶって通り過ぎることにする。また、冷却の程度が大きいと、液化の段階を乗り越えて(物質によっては、液化の段階を経ずに)固化にいたることもあり、これも凝縮の名で呼ばれるべき現象であるが、本稿では対象としないことにさせていただく。

蒸気が凝縮する場合、最初は何んらかの異物質を核とするのがふつうである。理論的には、全く核のない状態で、分子運動のゆらぎだけが原因で確率的に起こる凝縮(これを均質凝縮(homogeneous condensation)という)もありうるが、現実の凝縮過程ではほとんど見られないと考えてよい。一方、核を持つ凝縮過程(これを不均質凝縮(heterogeneous condensation)という)は、空間中で起こる凝縮(容積凝縮)と面の上に起こる凝縮(面積凝縮)とに分けられる。前者は、雲や霧の発生、あるいは寒い日に吐く息が白くなる現象のように、空間中に浮遊している固体や液体の微粒子を核として生ずる凝縮過程である。現象的な興味もさることながら、この容積凝縮の典型的なものの一つであるミスト生成は、最近液体金属冷却原子炉の開発等に関連して盛んに研究されるようになってきた。

後者、すなわち、面積凝縮のうち、工業的応用面との関連で重要なのは、低温固体壁面上への凝縮である。理屈

っぽく言えば、最初に蒸気が固体面に触れて凝縮したとき、そこには液層ができるから、以後は蒸気と壁面とがつねに直接接触することはなくなるが、固体壁が熱の移動に重要な役割を演ずるということには変わりはない。

固体面上にできる凝縮液層の形態に注目してこれを分類するとき、典型的な二つのタイプとして膜状凝縮(film condensation)と滴状凝縮(dropwise condensation)の区別が生ずる。これら二つの形態がどのような条件の下で生ずるかについての詳しい説明は省略するが、簡単には凝縮液が固体壁面をぬらすかぬらさないかでどちらが実現するかがきまると言ってもよい。すなわち、低温壁面が凝縮液でぬらされる場合には、凝縮液は面上に広がり、薄膜を形成し、重力その他の外力の作用によって流れ落ちる(図1(a))。一方、冷却面が凝縮液でぬらされない場合には、凝縮液は広がることができず、表面張力の働きによって切り欠き球形の液滴となって面上に付着する(図1(b)、図2)。引き続き凝縮や、隣接する液滴との

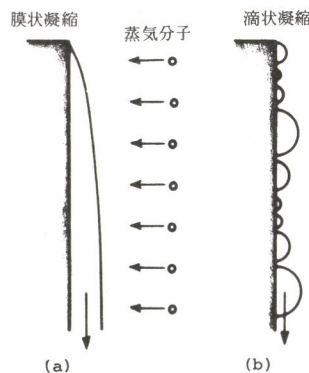


図1 膜状凝縮と滴状凝縮

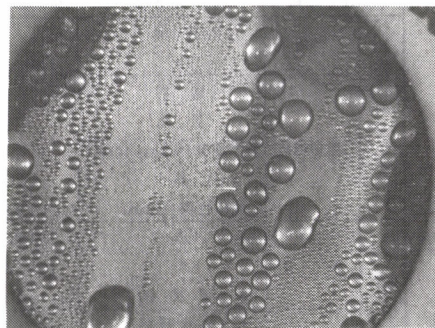


図2 滴状凝縮

\* 原稿受付 昭和52年11月1日

\*\* 東京大学生産技術研究所(東京都港区六本木7-22-1)

合体によって液滴は急速に大きくなってゆき、ある大きさになったところで外力の作用が付着力に打ちかかって、面を転がり落ちることになる。

後にも述べるように、きれいな固体面は水などの液体でぬれるものが多い。しかし、そのような場合でも、表面には水性（あるいは液性）物質のごく薄い膜をつくってやれば、液でぬれなくすることができる。このような物質を用いて、凝縮の形態を膜状から滴状へと変えることができるので、この物質のことを滴状凝縮の促進剤（promoter）と呼ぶ。

最初のビールのコップの例では、ガラスの表面に残っているわずかの油脂分のために一種の滴状凝縮が起こってコップは曇って見えるようになる。しかし、コップを完全にきれいに洗った場合には、曇らなくなるはずである。（事実、コップの表面を一度ふきんでぬぐってやれば、しばらくの間曇らないようになる。）また、コップの場合には、局所的な表面状態が必ずしも一様でないので、液滴が付着しても、上から見て完全な円形にはならなかったり、場所によって滴と膜とが混在していたりすることが多い。実際の凝縮装置においても、位置によって凝縮形態が異なり、膜状凝縮と滴状凝縮とが混在することがある。このようなものを混合凝縮（mixed condensation）と呼ぶこともある。

いずれの形態にせよ、蒸気が固体表面で凝縮すると、液化のための潜熱が放出される。この熱は液層を通過して移動し、固体面によって吸収される。ここで伝熱の問題が生ずることになる。

表1は、われわれの周囲で見られる数多くの伝熱過程のうち、代表的なものの熱伝達率を示したものである。一般的に言って、対流伝熱では、気体よりも液体、自然対流よりも強制対流の熱伝達率が大きい、相変化を伴う伝熱、すなわち、沸騰および凝縮の熱伝達率は概してこれらよりもさらに大きい。中でも水の滴状凝縮の熱伝達率は著しく大きく、膜状凝縮の20倍以上、核沸騰に比べても数倍という値に達することが確認されている。

このように高い能率をもつ伝熱過程を、実際の伝熱機器に利用したいと誰しもが考えるのは当然である。しかし、主として三つの障害のために、現在のところ滴状凝縮過程の実用化は達成されていない。その第一は滴状凝縮のメカニズムに未知の部分が残っていること、第二は広範囲の外部条件に対する熱伝達率の測定データが不備であること、第三は長時間にわたって安定な滴状凝縮を維持できるような促進剤あるいは促進法がまだみつかっていないことである。

以下では滴状凝縮に関する過去の研究をふり取りながら、実用化をはばんでいる問題の概略を明らかにしていきたいと思う。

## 2. 滴状凝縮のサイクル

滴状凝縮の様子を観察すると、一見きわめて不規則のようではあるが、個々の液滴は図3のような四つの基本過程からなるサイクルを行っていることがわかる。

まず、凝縮面上の裸の部分に微小な液滴（初生滴）が数多く発生する。引き続き凝縮によりこれらの液滴は急速に成長するが、液滴どうしの距離は最初からきわめて小さいので、ただちに隣接するものとの接触が生じ、表面張力による吸引力が働いて合体し新たな液滴となる。この合体によって液滴が移動し、凝縮面上には裸の部分ができるが、そこにはまた初期液滴が発生する。これらの液滴も、やはり引き続き凝縮と合体によって成長するが、多くのものはある程度の大きさになったところで、付近にある大きい液滴に吸収されて消滅する。このように、液滴の成長は凝縮と合体のひんぱんな繰返しの結果であり、実際の滴状凝縮過程においてこの両者を分離することは不可能である。ともあれ、成長した液滴がある大きさ（離脱限界径、あるいは単に離脱径と呼ぶ）に達すると、重力や蒸気せん断力などの外力と表面張力による付着力とのつり合いが破れて凝縮面から離れていく。このとき、面が水平下向きで、しかも蒸気流などによる力が働かないという特殊な場合を除いては、離脱液滴は面をすべり

表1 各種熱伝達率の比較

（熱伝達率の単位は kcal/m<sup>2</sup>h℃）

熱伝達の種類	流体の種類	熱伝達率の値	条 件	
相変化のないもの	自然対流	空気	3	常温付近 温度差10℃
		水	260~300	" "
	強制対流	水素	23	常温 10 cm 径管内、流速 3 m/s
		空気	18	" " " " 3 m/s
		飽和蒸気 (16kg/cm <sup>2</sup> )	34	200℃ " " " 10 m/s
		水	7,300	20℃ " " " 3 m/s
液体金属 (NaK)	4,000	300℃ " " " 1 m/s		
ともなうもの	沸 騰	水	約8,000	大気圧 $q = 10^5$ kcal/m <sup>2</sup> ·h 付近 (核沸騰)
		水	約50,000	" $q = 10^6$ kcal/m <sup>2</sup> ·h 付近 (バーンアウト点近く)
		水 (膜沸騰)	1,200	" $\Delta T_{sat} = 500$ ℃
	凝 縮	水 (膜状凝縮)	約20,000	$q = 5 \times 10^4$ kcal/m <sup>2</sup> ·h 付近
		水 (滴状凝縮)	約200,000	$q = 5 \times 10^5$ kcal/m <sup>2</sup> ·h 付近

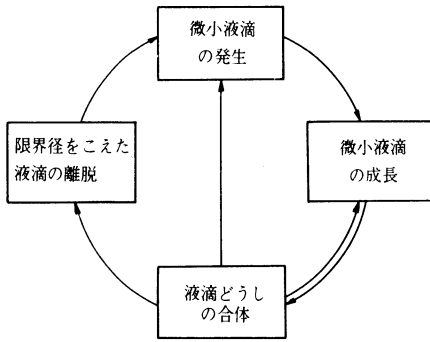


図3 滴状凝縮のサイクル

落ちながらこの通路にある他の液滴をすべて吸収していってしまう(液滴の掃除作用)。そして、掃除によって新たに生じた裸の面には、また、微小滴の発生がみられる。このようにして一つのサイクルが完結する。

滴状凝縮は、これら四つの基本過程からなるサイクルが時間的・場所的にランダムに生じ、それが組み合わさって構成されたものである。したがって滴状凝縮のメカニズムを解明するためには、まず、個々の基本過程について十分な知識を得ること、続いてそれら相互のつながりを知ることが必要となる。

しかし、残念ながら、現時点においては、これらの基本過程に対するわれわれの理解は必ずしも十分ではない。表2は、現時点で未解決の問題にどのようなものがあるかをまとめたものである。これらの内容の一つ一つについて説明することは、紙数の関係上とても無理なので、以下ではその一つである初期液滴の発生の問題について簡単な説明を加えるにとどめる。なお、興味のある読者は、筆者による解説<sup>1)</sup>を参照していただきたい。

### 3. 初期液滴の発生

**3.1 薄膜分裂説** 滴状凝縮が生じている凝縮面上での初期液滴の発生について、1936年に Jakob<sup>2)</sup>は薄膜分裂説なるものを提唱した。これは、面上で蒸気が凝縮する際、凝縮液は最初薄膜を形成し、それがしだいに厚くなっていく、ある厚さ(限界膜厚)に達したところでなんらかの原因による不安定が生じ、分裂して小さな液滴になるという仮説であった。

それから四半世紀後、Welch-Westwater<sup>3)</sup>は、高速度顕微鏡写真による観察を主体とする研究によって、Jakobの仮説を支持するような結論に到達した。図4は彼らが撮影した顕微鏡写真で、毎秒4080コマで撮られている。まず1コマ目の右上方で3個の液滴が合体を始め、2コマ目から7コマ目までで合体が完了しているのがみられ

表2 滴状凝縮メカニズムの研究における問題点

問題点の所在		内容の補足的説明
大分類	小分類	
液滴の発生	初生の形態	○ 薄膜分裂か核生成か(ほとんど核生成説に定着しているが、まだ実証が完全ではない。)
	発生源の性質	○ 表面上のどのような場所が発生源となるか — 小孔、溝、突出部、促進剤層の欠陥、その他のうちどれが実際の発生源になっているのか(観察による実証が必要)。
	発生源密度	○ どの程度の数値か。 ○ 表面状態との関連はどうか。 ○ 表面過冷度によってどう変わるか。(熱伝達率との関連)
	成長限界径	○ Kelvin-Helmholtz の式で定められる限界径は正しいか。 (熱力学的平衡から導かれた関係式が非平衡過程にどの程度適用できるか。実測が必要。)
	発生割合	○ 単位面積・単位時間あたりどのくらい初生滴ができるのか。 (発生源密度、過冷度との関連)
液滴の成長	合体をとまわない成長過程	○ 直接凝縮のみによる成長速度の理論的解析。 (表面温度の不均一・変動も考慮に入れる) ○ 測定による確認は可能か。
	合体成長過程	○ 合体による成長促進はどの程度か。 ○ 合体成長のダイナミクス。 (合体の速さ、合体時の液滴の変形・運動など) ○ 合体による凝縮面温度変動。 (実際の測定、熱伝達率や滴径分布への影響)
液滴の離脱	離脱のメカニズム	○ 接触角のヒステリシス — その成因と理論的予測法、外部条件との関連。 ○ 離脱径の理論的決定。 ○ 各種条件下での離脱径測定、外力の種類による差異。 ○ 動的離脱径と静的離脱径の差異の理論づけ。
	離脱のダイナミクス	○ 離脱滴の運動 — 液滴の変形・移動速度・掃除作用などの理論解析および測定。



図4 滴状凝縮過程の高速顕微鏡写真<sup>3)</sup>

(撮影速度 4080 こま/秒, 視野は高さ約 0.55 mm, 熱流束 =  $2.2 \times 10^5$  kcal/m<sup>2</sup>h<sup>2</sup>, 過冷度 = 1.6 deg)

る。このとき、2コマ目あるいは3コマ目あたりでは合体滴の周囲に白く光る部分が現われ、その白さが以後しだいにうすれていくのがわかる。Welch-Westwaterによれば、この白い部分は合体によって凝縮面表面が露出したための金属光沢であり、それがうすらいでいくのは露出部分に凝縮液の薄膜が形成されていくからであるという。図4ではまだわからないが、コマ数がずっと進んだところでは合体滴の周辺部に微小滴がみられるようになる。Welchらは、これを薄層が分裂してできたものと考えた。

さらに、Welchらは、液滴の合体の結果金属面が露出した瞬間から、その場所に微小滴(顕微鏡の能力の及ぶ限りの)が出現するまでに要する時間と、そのときの凝縮面過冷度(蒸気飽和温度と凝縮面表面温度の差)および熱流束からいわゆる限界膜厚を推定し、0.5~1 $\mu$ mという値を得た。

これに続いて Ruckenstein-Metiu<sup>4)</sup>は薄膜-液滴遷移に関する熱力学的解析を行い、また菅原-勝田<sup>5)</sup>は干涉顕微鏡を用いて液滴発生過程を観測し、それぞれWelchらが求めたのと同程度の限界膜厚を得ている。

これらの研究結果は、Jakobが唱えた仮説を支持するものであり、しばらくの間、液滴の発生は薄膜の分裂に

よるといふ考えが有力であった。

**3.2 核生成説** これに対し、Umur-Griffith<sup>6)</sup>は、凝縮過程に関する熱力学的考察と、偏光の性質を利用した巧妙な実験とによって、次のような結論に到達している。すなわち、滴状凝縮が生じうるような面においては、

- (i) 液滴と液滴の間の面には、単分子層以上の厚さの液膜は存在しない。
- (ii) 液滴と液滴の間の面には、正味の凝縮は起こらない。したがって冷却側への熱移動は、ほとんどすべて液滴を通して行われる。
- (iii) 液滴の発生点として最も可能性の大きいのは面上面にあるぬれたピット(小孔)や溝などである。

Umurらによる研究の詳細に触れることはここではしないが、これらの結論は、前述の薄膜分裂説を全く否定し、液滴の発生は核生成現象(nucleation phenomenon)であることを主張するものである。そして、以後こちらの考え方が広く受け入れられることになった。

なお、ここで筆者の個人的見解を述べさせていただくと、まず、筆者は完全に露出した(乾いた)面上での液滴発生は、Umurらの主張するように核発生過程であろうと考える。しかし、実際の滴状凝縮においては、表面が完全に欠陥のないはっ水性表面となっているとは思われないので、液滴の合体や掃除のあとで露出した面における液滴発生は、まず、そうしたごく微小な欠陥の上で起こり、液相が広がってはっ水性をもつ面に接触するようになったところで、液滴の形をとるのではないかと推測する。

少なくとも、Umur-Griffithによる偏光を用いた測定は、滴と滴の間で起こっている現象を正確に観測しうるほど精密なものではないので、今後、核発生過程に関するもっと別な面からの実証的研究が必要であろう。

#### 4. 滴状凝縮の熱伝達率

**4.1 これまでの測定結果** 滴状凝縮の熱伝達率の最初の測定者はドイツのSchmidt-Schurig-Sellschopp<sup>7)</sup>である。彼らは、1930年、往復運動式蒸気機関のシリンダ内壁で起こる凝縮過程では、有名なNusseltの膜状凝縮理論で予測される熱伝達率よりもずっと高い熱伝達率が実現されること、そしてそれはシリンダ内壁に付着している少量の油脂のために蒸気が小さな滴の形で凝縮するためであることに気づいた。Schmidtらのこのときの測定によれば、この滴状凝縮の熱伝達率はおおよそ30,000~40,000 kcal/m<sup>2</sup>h degであった。

この測定値がかなり低すぎるものであることは、その後の多くの研究者の実験によって明らかになったが、本当に信頼できる滴状凝縮熱伝達率の値はごく最近まで得られなかった。

図5は、ほぼ1気圧の水蒸気が垂直平面上で滴状凝縮する場合についてのこれまでの測定結果の主なものを示したものである。見やすくするために、測定データのば

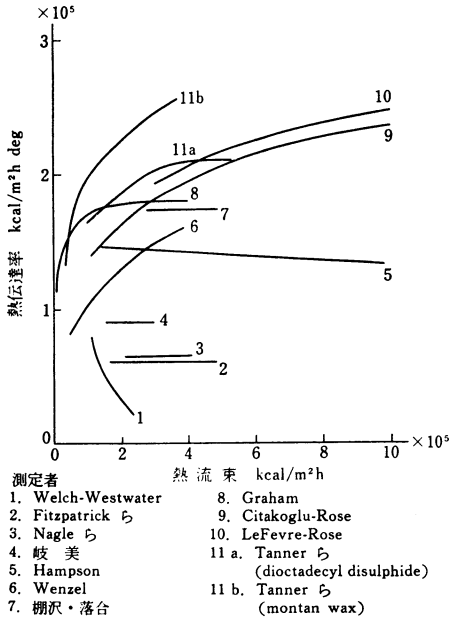


図5 熱伝達率の測定結果

らつきなどは省いてある。

この図にみられるように、測定値間の差異は非常に大きい。最近、数年間に実験・測定に技術がみられ、データの再現性がある程度確立されるようになった。その結果、上記の条件下での滴状凝縮熱伝達率は、 $1.5 \times 10^5 \sim 2.5 \times 10^6$  kcal/m<sup>2</sup>h degの値をとることにおおたの意見の一致をみている。なお、この範囲内で数値の差が生ずる原因としては、(1)蒸気流速、(2)凝縮面の高さ、(3)促進剤(プロモータ)の種類を含む広い意味での表面状態、などが考えられる。これらの中では、通常(1)の影響が最も大きく現われるが、それは(i)不凝縮気体を除去する効果、(ii)液滴の離脱径を小さくする効果、の二つのためである。

また、以前に行われた測定において、上記の値よりも低い熱伝達率が得られた理由は、おそらく(a)凝縮面表面温度および熱流束の測定の不正確さ、および(b)不凝縮気体の凝縮面表面近傍への蓄積、の二つであろうと推測される。

**4.2 滴状凝縮の伝熱理論** 膜状凝縮の熱伝達に関する理論は、よく知られているように、今から60年以上も前に Nusselt<sup>9)</sup>によって発表された水膜理論を基礎として発展してきた。この理論によれば、膜状凝縮時の熱伝達量は凝縮液膜の厚さに逆比例する。したがって、垂直凝縮面では、液膜厚さの小さい上方ほど熱伝達率が大きくなる。

一方、滴状凝縮に関しては、現在に至ってもまだ決定的な伝熱理論は完成をみていない。これは、なによりも滴状凝縮の現象的な複雑さによるものであろう。液滴の大きさの分布が不規則である上に、合体や離脱の過程に

ともなってその位置がひん繁に変わるからである。したがって、滴状凝縮の伝熱理論をつくり上げていくには、これらの不規則過程をどのように定式化するのが最も重要な課題となる。

もちろん、滴状凝縮と膜状凝縮における熱伝達率の大きな違いについては、すでになん人かの研究者が各様の意見を出している。たとえば、Jakob<sup>2)</sup>は、滴状凝縮の高い熱伝達率は、蒸気と冷却面の直接接触によるものであろうと述べている。すなわち、滴状凝縮においては凝縮液が広がらず滴になってしまうため、ただちに面が露出されるからである。また Welch-Westwater<sup>3)</sup>は、凝縮面上に分布している個々の液滴の伝熱抵抗を等価的な液膜厚さに置き換えてそれぞれを通過する熱量を計算し、結論として滴状凝縮時の伝熱量のうち97%が直径0.25mm以下の液滴および瞬間的な裸面を通るものであることを導いている。

これらの推論は、多少の疑問の余地を残すとはいえ、定性的には滴状凝縮熱伝達のメカニズムをある程度説明しているといえる。筆者の計算によれば、1気圧の水蒸気が過冷度1 degの垂直面上に滴状凝縮しているとき、面上に分布している液滴のうち直径10μm以上のものがおおっている面積は約75%である。また、これらの液滴で面上に一樣な液膜をつくったとすれば、その厚さは約0.1mmとなる。この膜厚に相当する膜状凝縮の熱伝達率は約6,000 kcal/m<sup>2</sup>h degであることを考えると、直径10μm以下の液滴におおわれている部分の役割の大きさが明らかになる。

しかし、もっと重要なことは、滴状凝縮過程においては、液滴の合体や掃除作用によって、裸の面がひん繁に蒸気と直接接触し、そこで非定常伝熱が行われるということであろう。余談になるが、現在、凝縮熱伝達を促進させるためにいろいろ工夫をこらした高性能伝熱面が開発されている。それらのほとんどは、伝熱面積を大きくとること(フィン効果)と同時に、表面張力などを利用して伝熱面上の液膜の厚さをできるだけ薄くして伝熱量を増大させようとしたものである。しかし、定常伝熱過程によるこれらの方法には限界があり、結局は自然に非定常伝熱を行う滴状凝縮過程を利用する方法には及ばないと、筆者は考えている。

**4.3 離脱径の影響** 前節で述べたように、滴状凝縮における高い熱伝達率は、合体や離脱によって生じた瞬間的裸面への蒸気の非定常的凝縮に起因すると考えられる。したがって、液滴の離脱径と熱伝達率の間には密接な関連があるはずである。

また、4.1節では、1気圧の水蒸気の垂直面上への滴状凝縮熱伝達率を変える外的条件として三つのものをあげた。これらのうち、(1)の蒸気流速と(3)の表面状態の影響とは、ともに液滴の離脱径の変化として現われる。また、面を垂直にせず傾きを変えた場合には、液滴を落下させるのに寄与する重力の成分が変化するため、これに

よっても離脱径が変わる。さらに、重力以外の体積力が作用するような場の中に凝縮面が置かれた場合も同様である。

筆者ら<sup>9)</sup>は、このような離脱径と滴状凝縮熱伝達率との関係に注目し、実験を行った。図6はその結果を示したものである。離脱径を変えるためには、凝縮面の傾斜・蒸気流によるせん断力・遠心力の三つを利用した。

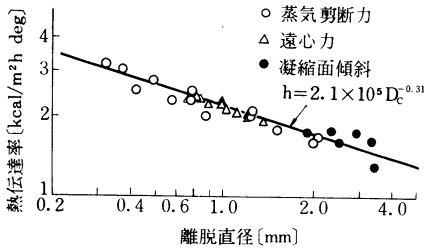


図6 離脱径と熱伝達率

最後の遠心力については、凝縮装置を直径約1mの回転円板上に取付け、これを回転させることによって、地上重力加速度の30倍に相当する遠心加速度を発生させ、これによって液滴の離脱を促進させたものである。

図6を見ると、筆者らの予想通り、熱伝達率と離脱径とは、外力の種類に関係なく一定の関係に従い、ほぼ離脱径の0.3乗に逆比例して熱伝達率が大きくなっていることがわかる。

なお、Rose<sup>10)</sup>および田中<sup>11)</sup>は、筆者らが実験で求めたのと同じ関係を、それぞれ独立に理論的に導いていることを付け加えておく。

このように、離脱径と熱伝達率との関係を明らかにすることは、滴状凝縮のメカニズムの解明という面から意味があるばかりでなく、その実用化を考える場合にも重要である。

すなわち、実際の凝縮装置において、離脱径を小さくするには、蒸気流速を利用するのがもっとも適当と考えられるが、これによって熱伝達率が増大するばかりでなく、同時に、不凝縮気体の蓄積も押えられるからである。これについては次章で触れることにする。

## 5. 滴状凝縮の実用化

これまで述べたように、滴状凝縮のメカニズムや各種の外部条件下での熱伝達率の変化などについて、まだ、解明されていない部分がいくつか残されているとはいえ、滴状凝縮で得られる高い熱伝達率を実際の凝縮装置で利用することの有利さについては議論の余地がない。もちろん、滴状凝縮の利用によって改善されるのは、蒸気側の熱伝達だけであり、装置全体としての伝熱性能がどの程度向上するかは、固体壁や冷却側の伝熱抵抗にも依存する。しかし、ごくおおざっぱに言って、もし、蒸気側で滴状凝縮を利用することができれば、全体の熱通過率は約2倍となり、必要な伝熱面積を半分にすることが可能になる。現在、多くの凝縮装置において、そのコストの

主要部分が凝縮面の材料費であることを考えると、伝熱面積を半分にできるということは、きわめて大きな利得であるといえよう。

滴状凝縮を実用化する上で解決を要する問題が二つある。一つは不凝縮気体の蓄積に対してどういう方策をとるかということであり、もう一つは長時間の使用に耐えうるような滴状凝縮促進剤(プロモータ)あるいは低エネルギー表面の開発である。

### 5.1 不凝縮気体の問題

凝縮過程において熱移動の駆動力となるものは、凝縮液表面と凝縮面表面との温度差であるが、このうち凝縮液の表面温度はそこでの蒸気飽和温度にほぼ等しい。もし蒸気中に不凝縮気体が含まれていると、その分圧の分だけ蒸気自体の圧力は低くなり、それに応じて飽和温度が下がって、凝縮液内の温度差が小さくなってしまいます。これは大幅な熱伝達率の低下につながる。ここで注意すべきことは、蒸気中の平均的な不凝縮気体含有率ではなくて、凝縮液表面における分圧が影響をもつということである。

一般に、膜状凝縮におけるよりも滴状凝縮の場合のほうが不凝縮気体の混入による熱伝達率低下の度合いが大きい。その理由は二つ考えられる。第一に、滴状凝縮の場合のほうが凝縮量が大きいから、それに伴って凝縮面表面まで運ばれ蓄積される不凝縮気体の量も多くなるということ、第二に、滴状凝縮においては面上に大小さまざまな液滴が分布しているために、そこの不凝縮気体の濃度境界層が厚くなるということである。

現在のところ、不凝縮気体の混入率と熱伝達率の低下の間の量的関係については、理論的にも実験的にも未知の部分が多い。しかし、上に述べたようなことから考えると、実用の凝縮装置においては蒸気中の不凝縮気体の含有率を小さくするように蒸発器内の脱気などに十分留意するばかりでなく、凝縮面表面への蓄積を防止するために、蒸気に十分な流速を与えてやる必要がある。小規模の実験においては、この蒸気流による吹きとばしがきわめて有効であることがわかっている<sup>12), 13)</sup>。

5.2 滴状凝縮の持続法の問題 長時間にわたって滴状凝縮を持続させるような促進剤あるいは表面処理法の開発は、伝熱工学の直接の対象とはいえないかも知れないが、滴状凝縮の実用化においては最も重要な課題である。

固体面上への凝縮において、水や有機液体の多くは金属や無機物固体面をぬらすので膜状凝縮となるが、このような表面を液にぬらされないような物質の薄い層でおおってやれば滴状凝縮に変えることができる。

現在、小規模な実験で滴状凝縮を得るには次のいずれかの方法が用いられている。

(1) 固体表面には水性(はつ液性)物質を付着させる方法。たとえば、水蒸気を銅表面に滴状凝縮させたい場合には、ステアリン酸・オレイン酸などの脂肪酸類、ベンジルメルカプタン、シリコン油などを吸着させる。吸着の方

法としては、溶剤にこれらの促進剤を溶かしたものの中に固体表面を一定時間浸しておくというのが標準的なやり方であるが、吸着層の厚さが問題にならないような場合には塗布したり吸きつけたりしてもよい。

(2) 蒸気器の給水(水以外の場合には、その液)中に上のような促進剤を溶かしておいたり、蒸気中に微量を噴射したりして、凝縮と同時に固体面に吸着させる方法。

(3) 貴金属被膜をつくる方法。水蒸気の場合には金めっきが有効である。

(4) 高分子被膜をつくる方法。テフロン被覆が代表的である。

実用の凝縮装置では、上の方法のすべてが採用可能ではない。むしろ、どの方法にも大なり小なりの問題があるといった方がよい。用途により差があるであろうが、実用の装置で滴状凝縮を実現させようとする場合、少なくとも1万時間程度はなら手入れなしに初期と同じ状態を維持させなければならないであろう。ところが、上の(1)の方法では、凝縮液滴の落下に伴って凝縮面から促進剤が持ち去られ、数十ないし数百時間の後にはすっかりなくなってしまうことが多い。Blackman-Dewar-Hampson<sup>14)</sup>は、37種の有機化合物について、水蒸気の滴状凝縮の促進剤としての適性、特にその持続時間をテストした。彼らがテストした有機物のうち持続時間が最も長かったものはglycerol tri-[11-ethoxy (thiocarbonyl) thioundecanoate]という長い名前のもので、3530時間(21週間)にわたって初期の状態と変わらない滴状凝縮が観察されよう。しかし、Blackmanらの結果は、十分に注意深く行なわれた実験室規模のものだから可能だったので、実用機器で同じことを期待するのは難しいのではないと思われる。実用機器では上で得られた3倍以上もの持続時間が要求される上に、蒸気中の不純物や混入気体(とくに酸素)などによる促進剤の劣化、あるいは機械的な原因による吸着相のはく離などの心配が大きいためである。

これに対し、(2)の方法では、吸着層が洗い流される分は直ちに補充される。したがって、用途によってはこの方法は有効であり、実用化の見込みも大きい。しかし、この方法でも、促進剤の種類によっては、蒸発器や凝縮管の汚損・腐食の心配があり、また、海水淡水化装置などへの応用を考えると、せっかく得られた水の中に微量ながらも促進剤が混入しているから、その再処理を考えなければならないという別の問題も生じてくる。

以上のようなことを考えると、工業的規模での滴状凝縮促進のためには、凝縮面と強く結合し、しかも長時間にわたって性質が変化しないような材質で表面を被覆するのがよいと思われる。前述の(3)、(4)の方法がこれに該当する。

(3)の貴金属被膜による水蒸気の滴状凝縮の促進法については、Erb-Thelen<sup>15)</sup>による詳しい報告があり、各種

の貴金属のうちで、金めっき面が最も効果的であることが認められた。

金めっき面上で滴状凝縮が起こることは、他の研究者達によっても発見されており、金めっきした凝縮面を用いて行った実験の報告も多い。しかし、完全に純粋な金の面上でも液滴が形成されるかどうかについてはかなり疑問があり、大勢としては、金めっき上で起こる滴状凝縮はめっき液中に含まれている或種の成分の表面吸着によるという見解が有力のようである。

一方、実用上の見地から考えれば、原因がなんであれ、とにかくある方法によって持続的な滴状凝縮表面ができさえすればよいので、この点では金めっき面は十分に有望と考えてよい。ただ一つ大きな問題となるのは、このような貴金属めっき法が経済的に引き合うかどうかということである。この問題についてErbらは、滴状凝縮を採用して凝縮面面積を節約することによる経費の減少と、めっきの施工にともなうコスト増大とを、海水淡水化プラントの場合について試算し、将来の開発によって貴金属めっきの費用が現在よりある程度下げられれば十分採算はとれると言っている。しかし、その実現までにはいくつかの技術的問題の解決が必要であり、現段階で楽観的な見通しをたてることは難しいように思われる。

滴状凝縮の長時間維持法として、現在最も有望と考えられているのは、(4)の方法である。よく知られているようにテフロンやシリコン樹脂などは低い表面エネルギーをもっており、水などの液体をはじく性質がある。このような材料で凝縮面を被覆し、滴状凝縮を継続させようという試みは10年以上前から各所で行われている。

このような高分子被膜を使う上での問題点は二つある。一つは、下地の金属面との密着性が十分によく、しかも、ピンホールなどの欠陥のない被膜をつくる必要があること。もう一つは、このような高分子材料は熱伝導率が非常に小さいのが普通であるから、その熱抵抗が障害にならない程度の薄い被覆(数ミクロン以下)にしなければならないことである。

これまでのテストで比較的良好な結果が出ているのはテフロン被覆である。また、Erb-Thelen<sup>15)</sup>は、クロムめっきした管上に厚さ1 $\mu$ mのポリレン(バラキシレン重合体)の被膜をつくったものについてテストし、2,400時間にわたって完全な滴状凝縮を得ている。まだ、実用化までには、被膜の強度やその経時変化などについて解決すべき技術上の問題が残っているが、前の貴金属めっき法に比べるとコストの点ではるかに有利なので、あるいはこの方法による実用化がいちばん早いかもしれない。

結局、現在の段階では実用に十分耐えうるような滴状凝縮表面は得られていない。しかし、今日の材料開発のスピードを考えると、いまあちこちでテストされている材料に数倍する性能をもったものがつくり出される日はそう遠い将来のこととは思われない。われわれ伝熱工学の研究に従事する者は、そのような努力を側面から援助

するとともに、開発成功の暁に備えて、伝熱研究の基礎を固めておかなければならないと思う。

## 文 献

- 1) 棚沢, 伝熱工学の進展, 第4巻, (昭51), 229, 養賢堂.
- 2) Jakob, M., Mech. Engg., 58 (1936), 729.
- 3) Welch, J. F. and Westwater, J. W., International Developments in Heat Transfer, Proc. 1961-1962 Int. Heat Transfer Conf. (1963), 302.
- 4) Ruckenstein, E. and Metiu, H., Chem. Engg. Sci., 20 (1965), 173.
- 5) Sugawara, S. and Katsuta, K., Proc. 3rd Int. Heat Transfer Conf., Vol. 2 (1966), 362.
- 6) Umur, A. and Griffith, P., Trans. ASME, J. Heat Transfer, 87 (1965), 275.
- 7) Schmidt, E., Schurig, W. and Sellschopp, W., Techn. Mech. u. Thermodyn., 1 (1930), 53.
- 8) Nusselt, W., Z. VDI, 60 (1916), 541, 549.
- 9) 棚沢, 落合, 宇高, 塩治, 日機論, 42, (昭51), 2846.
- 10) Rose, J. W., Int. J. Heat Mass Transfer, 19 (1976), 1363.
- 11) Tanaka, H., Trans. ASME, J. Heat Transfer, 97 (1975), 72.
- 12) Graham, C., Ph. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology (1969).
- 13) 棚沢, 落合, 日機論, 38 (昭47), 3193.
- 14) Blackman, L. C. F., Dewar, M. J. S. and Hampson, H., J. Appl. Chem., 7 (1957), 160.
- 15) Erb, R. A. and Thelen, E., U.S. Dept. of Interior, Office of Saline Water, R&D Report, No. 184 (1966), 67.

## 委員会報告要旨

### 機関部調節弁設計マニュアル (タービン船)

機関研究委員会機関第三研究部会

#### 1. ま え が き

近年、機関の自動化が進み、自動制御器として調節弁が大幅に採用され、その範囲はますます拡大されつつある。調節弁の性能は、主補機器の性能に影響することはもちろん、タービン船においては、プラント全体の性能に影響するので、計画に際しては、調節弁自体の構造および性能とともに、プラント全体のシステムをは握する必要がある。また、配置の計画においては、取付け方法が性能に影響するので、十分注意するとともに、装置の保守点検を考慮しなければならない。本マニュアルは調節弁のうち、減圧弁、圧力調節弁、水位調節弁および温度調節弁について、構造の説明、流量特性、材料選定、流量決定要領、選定要領、工事要領等を取りまとめたものであり、将来、調節弁の設計に参考として活用されれば幸いである。なお、詳細については別途学会資料として、詳しく取まとめているので参照されたい。

#### 2. 構造の説明および用途

弁本体の構造説明とともに、操作部、調節器、付属品との組合せを具体的に記述し、動作原理を説明している。

また、用途については、タービンプラントの相違により、調節弁の装備箇所が異なるので、定義づけることは困難であるが、一般的に使用されている例を系統により説明するとともに、タービンプラントが相違した場合の装備箇所についても補足説明を加えた。

#### 3. 選 定 要 領

調節弁の選定に際しては、流量特性が重要で、弁の取付けられるプロセスの制御結果に重大な関係がある。また、弁口径の算出に際しては、プロセスの最大流量、最小流量、弁出入口差圧を決定する必要がある。本マニュアルでは、これらの決定要領を具体的に説明するとともに、ブロックダイアグラムおよびフローチャートを用いて、設計作業の手順をわかりやすく説明した。また、使用実績一覧表を記載した。

#### 4. す え 付 要 領

調節弁のすえ付について、取付け位置、取付け方法、調節弁のバイパス配管のあり方、検出端装備要領およびすえ付けに対する注意事項を具体的に記述した。