

氏 名	ち ば よう いち 千 葉 陽 一
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 60 年 10 月 9 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 43 年 3 月 東北大学大学院工学研究科化学工学専攻 修士課程修了
学 位 論 文 題 目	滴状凝縮の伝熱機構
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 大谷 茂盛      東北大学教授 武山 斌郎 東北大学教授 斎藤正三郎      東北大学教授 只木 楨力 東北大学教授 鈴木 睦

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 緒 論

滴状凝縮の熱伝達係数は極めて高いものであり、現在  $15 \times 10^4 \sim 30 \times 10^4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  程度の値となることが知られている。これは、膜状凝縮のそれに比較すると、20倍から30倍の値である。従って、凝縮装置に、従来利用されている膜状凝縮の代わりに、滴状凝縮を利用することが出来るならば、装置は大幅に小形化されることになる。勿論、装置の大きさは、総括の熱伝達係数によって決まり、凝縮面の材質や厚さ、また冷却水側熱伝達係数の大きさによって異なるので、簡単には論述できないが、一般的な場合を考えるならば、大体半分ぐらいになる。このメリットは極めて大なるものであるということが出来る。

しかし、その伝熱機構となると、今日まで多くの研究がなされているにもかかわらず、未だに不確実な多くの分野が存在している。本研究は、滴状凝縮の実用化のため、その伝熱機構を明らかにすることを目的としている。

第 1 章では、本研究を行う意義と目的について述べ、さらに、滴状凝縮に関する既往の研究の成果および本研究の概要について述べた。

## 第2章 凝縮界面における物質移動に伴う伝熱抵抗

凝縮過程の第一段階である、蒸気の凝縮熱伝達係数の大きさについて考察した。気体の分子運動論を用いて、蒸気の正味凝縮量を算出し、これをもとに凝縮熱伝達係数を算出した。つぎに金属面上に凝縮が起こる時を想定し、凝縮係数の種々の値に対する熱伝達係数を求めた。

蒸気が金属面上に凝縮する時の熱伝達係数の測定は極めて難しく、実測値は皆無に等しい。滴状凝縮時の表面温度変動の測定結果をもとに、計算して求めると、 $103 \times 10^4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  が得られる。しかし、これは熱電対および測定系の応答性の問題から、実際よりは低目の値を算出している可能性がある。実際の値はもう少し大きい値になると考えられる。

## 第3章 液滴の存在に起因する伝熱抵抗

滴状凝縮における伝熱現象の主体は、液滴と裸の金属面の共存状態における熱伝達と考えられるので、液滴と裸の金属面とが共存し、裸の金属面より主として熱が流入する場合の熱伝達係数の大きさを、理論計算および電気槽実験により求めた。

同じ被覆率の場合、滴が大きな滴として存在するよりは、小さな滴として、分散して存在する方が伝熱は良くなることがわかった。また、極端に被覆率が大きい ( $\phi > 0.9$ ) 場合は別として、一般に、伝熱量は被覆率が少々変化しても顕著には変化せず、高い値をとることがわかった。なお、このモデルでは、熱伝達係数は  $h = \lambda_M / \ell_0$  という形で表現される。 $\ell_0$  は一種の形状係数であり、熱伝達係数は素地金属の熱伝導率によって影響されることが示される。

単一(半球)滴を通しての熱伝達係数は、極微小滴の伝熱を扱う時に重要である。従来この値は Fatica-Katz が差分的手法により求めている。厳密に解析解を求めたところ、解が収束しないことがわかった。Fatica-Katz は差分的手法により求めたため、うまく解を得ることができたものと思われる。電気槽によって近似値を実測し、Fatica-Katz の値とあまり異ならない結果を得た。従来利用されてきた Fatica-Katz の値は、滴の熱伝達係数として一応の妥当な値を与えていると考えられる。

## 第4章 滴状凝縮の二次元シミュレーション

滴状凝縮に関するシミュレーションは、従来もいくつか行われている。しかしそれらでは、素地金属の温度は一定として取扱っている。また、莫大な凝縮核を実現するために、凝縮面の大きさは、極めて小さなものに限られてきた。

一般に、滴状凝縮面上には、 $10^6 \text{ cm}^2 \sim 10^8 \text{ cm}^2$  程度の凝縮核が不均一に存在し、凝縮はここを核として進行すると考えられている。この核密度は極めて大きな値であり、このような裸の金属面上に凝縮が開始するとすれば、その当初は、滴分布は実質的に均一分布と見なすことが出来る。凝縮が進行し、滴が大きくなってくると、均一分布とは見なせなくなる。そこで、ここでは、滴を微小滴と独立滴に分けて取扱いを別にし、計算を単純化することにした。これにより、従来莫大な核密度を実現するために制約されていた、凝縮面の大きさを、十分大きなものにとることが出来た。

モデルの作成に当たっては、現実の滴の挙動が十分反映されるように配慮し、液滴の生成・成長

・合体・落下（清掃）に伴う素地金属の温度変化も可能なようにした。しかし、滴状凝縮を三次元でモデル化すると、計算時間が膨大になり過ぎ、實際上計算不可能となるので、二次元でシミュレーションを行った。二次元の場合、滴液は（半円柱の）液帯として表わされることになり、特に液滴同士の合体の際に、三次元との間に相違を生ずるが、これは合体接近距離という補正項を導入することによって、実質的に三次元と異ならないように工夫した。局所熱伝達係数は、裸の金属面には  $464.8 \times 10^4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、滴の熱伝達係数には Fatica-Katz の値を用いた。

計算より、滴状凝縮の熱伝達係数は、熱流束および素地金属の熱伝導率によって影響を受ける結果を得た。一般に、熱伝達係数は、熱流束が増大すると、それとともに増し、その後ほぼ一定となり、やがて減少する。こうした傾向が現われるのは、落下滴の清掃効果によるものと考えられ、熱伝達係数は凝縮面の鉛直方向上端からの位置によって異なった値になっている。表面温度は液滴の挙動に合わせて激しく変化している。これらの得られた結果は、実際の滴状凝縮において観察される特性とよく一致している。なお、素地金属の熱伝導率の影響については、これの影響はないと主張している研究者もあるが、本シミュレーション結果は、明らかに熱伝達係数は素地金属の熱伝導率が大きいほど大きくなる結果を導いている。

## 第 5 章 表面温度変動

精度ある表面温度の測定法について、種々検討し、滴状凝縮時における表面温度変動を実測した。その結果、表面温度は液滴の挙動に合わせて激しく変動していることが明らかとなった。これはシミュレーションの結果とも良く符号する。この表面温度の実測結果をもとに、蒸気から金属面に流入する熱量を逆算し、液滴が去った直後の裸の金属面において、多量の熱が流入することを明らかにした。滴状凝縮では、液滴の合体によっても裸の面が形成されるので、合体によっても同様の効果が生じ、熱伝達係数は高い値に保持されるものと考えられる。

## 第 6 章 伝熱特性と落下滴の影響

滴状凝縮の伝熱特性を実測し、概して既往の測定値と近似する結果を得た。また、滴状凝縮面上に液滴を強制的に加える実験を行い、液滴の清掃作用が伝熱増進に大きく寄与することを明らかにした。しかし、落下滴の数が増すと、清掃効果よりも落下滴自身の被覆の増大による伝熱抵抗の方が上回って、伝熱が減少する。減少が起こる落下滴の量は、微小滴の成長速度との関係で決定され、成長速度が大きい場合には、落下滴の数がかかなり多くなるまで伝熱が減少しない。むしろ成長速度が大きい場合には、清掃が追いつかないため、その間に微小滴が成長して大きくなり、これによって伝熱抵抗が増し、熱伝達係数が減少することが考えられる。

凝縮面上を滴が速度を持って移動する場合の伝熱量の計算から、面の更新頻度が熱伝達におよぼす効果を求め、更新頻度が増すと熱伝達係数が増す結果を得た。これは、更新頻度が増すと、恰も熱伝導率が増加したかの如き効果が生ずるために起こるものである。滴状凝縮では、落下滴による清掃および液滴同士の合体によって、表面が頻繁に更新されるが、この凝縮面の更新頻度の増大も、熱伝達を高めるのに貢献していると考えられる。

## 第7章 長い伝熱面における伝熱特性

長い伝熱面における滴状凝縮の伝熱特性を実測した。長い伝熱面では、短い伝熱面と異なり、下方では、滴が有尾状滴となり、これによって熱伝達が低下する。しかし、有尾状滴が分裂し、面を良く清掃するので、熱伝達係数は大きく低下しないことがわかった。また、上部より少し下がった位置においては、落下滴の清掃作用により熱伝達係数がピークをとる結果を得た。この傾向は第4章のシミュレーション結果とも良く近似している。

## 第8章 総 括

第2章～第7章について総括し、実験的に得られる水蒸気の滴状凝縮の伝熱特性を、熱伝導論を主体とした理論的考察によって、良く説明することが出来たことを述べた。

## 審査結果の要旨

凝縮の形態は膜状と滴状の2つに大別されるが、前者についてはその伝熱機構はほぼ明らかにされている。一方滴状凝縮における熱伝達係数は膜状のそれに較べると数倍から100倍におよぶ範囲の値をとり、伝熱工学の分野で注目をあびているが、影響する因子が複雑多岐にわたるため、滴状凝縮の伝熱機構は未だ不明の部分が多い。

本論文は伝熱面上に存在する凝縮滴の挙動に着目して、伝熱機構を理論と実験の両面より検討した一連の研究成果をまとめたもので、全編8章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では気体の分子運動論より蒸気の正味凝縮量を計算し、凝縮係数の種々の値に対する熱伝達係数を求め、後述の滴状凝縮時の表面温度変動の測定結果から解析した値と比較し考察している。

第3章では滴状凝縮における伝熱現象を液滴と裸の金属面の共存状態における熱伝達と考え、いわゆる裸の金属面よりの熱の流入が律速として求めた熱伝達係数の値が、熱と電気の流れの相似性を利用した電気槽実験より求めた値とよく一致していることを示し、同時に滴の大きさや被覆率などの影響を論じている。さらに単一半球状滴の熱抵抗に対して電気槽実験をこころみ、差分的手法によって求めた従来の Fatica-Katz の値の妥当性を示している。

第4章では凝縮面の温度変動ならびに液滴の生成・成長・合体および落下滴の清掃効果も考慮に入れたモデルを用いて、滴状凝縮の二次元シミュレーションを行っている。その結果、滴状凝縮の熱伝達係数は熱流束および素地金属の熱伝導率によって影響されることを明らかにしている。これは本研究でたしかめられた重要な知見である。

第5章では伝熱面の表面温度の精度ある測定法を検討し、その温度変動を実測し、それが凝縮滴の挙動と非常によく対応していることを述べ、またこの温度曲線より時間的に金属面に流入する熱量を算出している。

第6章では落下滴の清掃作用が伝熱特性におよぼす効果を調べるため液滴を凝縮面上に強制的に加えた実験と、面上を滴が速度をもって移動する場合の伝熱量の理論計算とを行い、表面の更新頻度が増すに応じて熱伝達が増大することを明らかにしている。

第7章では約1 mにおよぶ長い伝熱面における滴状凝縮の伝熱特性を実測している。短い伝熱面と異なり下方では滴が有尾状滴となり熱伝達係数が低下すること、さらに下方では有尾状滴が紐状の水流になり、面をよく清掃するので熱伝達係数はさほど減少しないことがわかった。これは貴重なデータである。

第8章は総括である。

以上要するに本論文は、滴状凝縮の伝熱機構を凝縮滴と裸の金属面の共存する熱伝導問題としてとらえて理論解析を行い、熱伝達係数におよぼす諸因子の影響を滴の挙動に主眼をおいて明快に説明しており、化学工学ならびに伝熱工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。