

滴状凝縮研究の進展

Dropwise Condensation—The Progress Toward Practical Applications

棚 沢 一 郎*

Ichiro TANASAWA

滴状凝縮においては、膜状凝縮に較べてきわめて高い熱伝達率が得られる。しかし、滴状凝縮を実際の装置で実現させるためには、いくつかの困難を克服しなければならない。本稿は、滴状凝縮に関する研究の最近 10 年間の進展を概観し、実用化のための問題点に検討を加えたものである。

1. はじめに

1978年にカナダのトロントで開かれた第6回国際伝熱会議において、著者⁸⁹⁾は、“Dropwise Condensation—The Way to Practical Applications”というタイトルの基調講演を行い、滴状凝縮に関するそれまでの研究を概括するとともに、滴状凝縮の実用化のために残されている問題についての指摘を行った。また著者は、ほぼ時期を同じくして、滴状凝縮についての3編の解説^{75),77),92)}を発表している。これらのうちの1編⁷⁷⁾はかなり詳しいもので、初期の研究や、滴状凝縮の微視的素過程に関する研究についての広範な調査結果が示されている。

その後も、滴状凝縮に関する研究にはかなりの進展が見られる。本稿は、上記の4編の内容への補足・追加を目的とし、とくに1975年頃から現在に至る10年間に得られた滴状凝縮研究の成果を示し、実用化のための問題点について再検討を加えたものである。ただし、読者の理解を助けるために、1975年以前の成果をも適宜引用している。

2. 熱伝達率の測定

滴状凝縮熱伝達に関する実験は、まだごく限られた条件下でのみ行われているに過ぎない。蒸気の種類について見れば、1気圧の水蒸気についての測定結果が最近になってようやくとまるとり始めたような状況にあり、異なった条件下や、水以外の物質に関する測定はまだ少ない。したがって、以下での記述も、1気圧の水蒸気の滴状凝縮が中心となる。

2.1 1気圧の水蒸気についての測定結果

Schmidtら²⁾による最初の観測以来、数多くの研究者によって、1気圧付近の水蒸気の滴状凝縮熱伝達率の測定が行われた。その結果は、Tannerら²⁶⁾、Graham⁴⁵⁾、

棚沢^{77),89),92)}などによってまとめられているとおり、測定者によるかなり大きな差異を示している。しかし、最近約15年間に実験・測定技術に進歩が見られ、データの再現性がある程度確立されるようになった。このことについては、Le Fevre-Rose^{21),25)}、Citakoglu-Rose⁴⁰⁾の貢献が大きい。現在、垂直銅面上・地上重力下での滴状凝縮熱伝達率は、不凝縮気体が完全に除かれており、面の高さが数十cm以下、熱流束が0.1~1 MW/m²程度、蒸気流速が10 m/s以下であれば、190~350 kW/(m²K)の値をとると考えてよい。なお、この範囲内で数値の差が生ずる原因のうちでは、蒸気流速および表面状態の影響が大きい。

なお、過去の測定の多くにおいて、上記の値よりも低い熱伝達率が得られた原因は、おそらく(a)凝縮面表面温度および熱流束測定の不正確さ、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。[これらのうち、(a)については、Wilcox-Rohsenow⁵¹⁾、落合ら⁸³⁾を、(b)については、Citakoglu-Rose⁴⁰⁾、Tannerら²⁶⁾、Hampson²⁰⁾、武山・清水⁷⁰⁾、Sahde-Mikić⁷³⁾、宇高・棚沢⁹³⁾などを参照されたい]。

2.2 低圧水蒸気についての測定結果

前述のように、水蒸気の圧力が1気圧以外の場合の滴状凝縮熱伝達率の測定値は多くない。

低圧の場合については、Gnam⁴⁾、Brown-Thomas²⁷⁾、Tannerら³⁸⁾、Graham⁴⁵⁾、Wilmshurst-Rose⁴⁸⁾、鶴田・田中¹⁰¹⁾などの測定があるが、これらのうち最初の二つは測定圧力範囲が狭く、また精度に問題がある。

図1に残る4組の研究者による測定結果を示す。多少の差異は見られるが、いずれも蒸気圧力の低下につれて熱伝達率が小さくなる傾向を示している。(なお、高圧水蒸気については4.3節で触れる。)

2.3 離脱液滴径あるいは最大液滴径の影響

滴状凝縮の熱伝達率は、面上の液滴の大きさの分布と密接な関連をもっているが、この滴径分布を規定するも

* 東京大学生産技術研究所 第2部

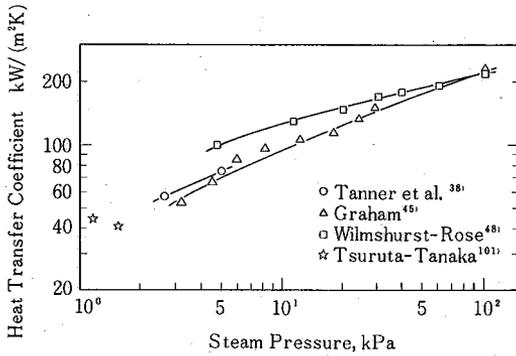


図1 低圧水蒸気の滴状凝縮熱伝達率

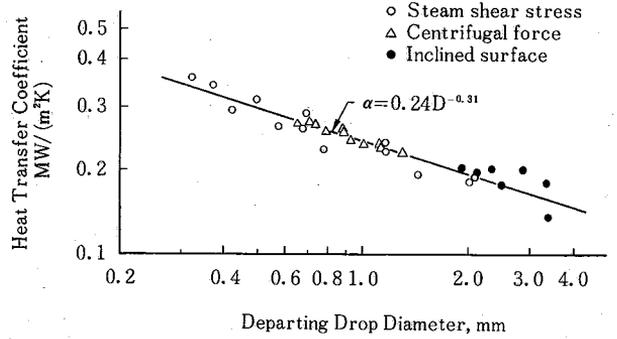


図2 離脱滴径と滴状凝縮熱伝達率の関係

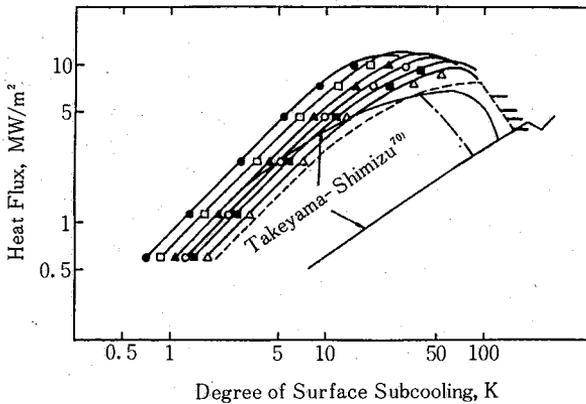


図3 凝縮曲線

Max. Drop Dia. mm	Departure Dia. mm	Steam Vel. m/s	
● 0.025	0.05	76	
□ 0.055	0.11	51	
▲ 0.11	0.23	32	
○ 0.19	0.40	20	
■ 0.30	0.74	13	
△ 0.54	1.5	7	
---	0.90	2.5	4

のは、落下滴が占める面積割合と、付着滴のうち最大のものの径である。したがって、滴状凝縮における熱伝達率と最大滴径の関係については、もっと注意が払われてしかるべきである。滴状凝縮熱伝達率に影響を与える外部的な因子の中にも、凝縮面上の最大滴径と結びつくものがある。たとえば、蒸気流速、表面状態、凝縮面の高さや傾斜などの影響は、液滴径を変えることで現れる。

これまで報告されている蒸気流速^{6),13),15),26),36),45)}、凝縮面高さ^{6),8),21)}や凝縮面傾斜^{6),9),42),49),57)}と熱伝達率との関係についての測定結果は、離脱液滴径あるいは最大液滴径を同時に測定していない場合には一般性を欠くことになる。

棚沢ら⁸²⁾は、重力・遠心力・蒸気せん断力などを用いて離脱液滴径を変化させ、滴状凝縮熱伝達率がどのように変わるかを測定した。結果は図2のとおりであり、外力の種類に関係なく、熱伝達率は離脱径のほぼ0.3乗に比例することがわかった。なお、田中^{74),76)}およびRose⁸¹⁾が、理論的考察によってほぼ同一の関係を導いたことは大変興味深い。

2.4 凝縮曲線

周知のように、沸騰伝熱においては、伝熱面の過熱度を上げていくと、伝熱の形態が対流→核沸騰→遷移沸騰→膜沸騰と変化し、これに伴って熱流束も変化する。このような熱流束と伝熱面過熱度の関係を描いた曲線は沸騰曲線と呼ばれ、抜山ら³⁾によって初めて測定された。

これに対し、滴状凝縮においても、凝縮面の過冷度をしだいに大きくしていくことによって、凝縮曲線と呼ぶものが得られるはずである。しかし、滴状凝縮の場合には、通常の冷却方法で大きな過冷度を実現させることが非常に難しいため、最近まで測定がなされていなかった。水蒸気について最初にこれを行ったのは、武山・清水⁷⁰⁾である。[有機物蒸気(アニリン、ニトロベンゼン、エチレングリコール)についての最初の測定は、Wilmshurst-Rose⁶⁹⁾による。]ただし、Westwater⁷¹⁾および落合ら⁸³⁾によって指摘されているように、武山・清水の測定結果には精度上の疑問がある。

宇高・棚沢^{95),97)}は、同心凹球面状という特殊な形状の伝熱面を作って、凝縮曲線の精度の高い測定を行った。得られた結果が図3に示されている(武山・清水⁷⁰⁾の結果も図中に細線で示している)。これによれば、水蒸気の滴状凝縮における凝縮曲線は、沸騰曲線とよく似た形を

しているが、極大熱流束はきわめて高く 10 MW/m^2 を越える。滴状凝縮は低い過熱度のところからこの極大熱流束点までずっと維持されるが、過冷度がさらに大きくなると凝縮面に凝縮液が溜った状態（偽膜状凝縮）にいたる。そして表面温度が 0°C 以下にまで下がると氷ができ始め、その上で膜状凝縮（水上膜状凝縮）が生じる。

この結果で重要な意味をもつものの一つは、かなり大きな熱流束でも滴状凝縮が続くということであろう。これは、滴状凝縮の実用化が実現した場合、多段管群などの上段からの流下凝縮液の悪影響についてあまり心配する必要がないことを意味するものである（たとえば文献^{90),94)} 参照）。

なお、ごく最近になって、1 気圧の水蒸気の凝縮曲線および関連現象に関する観測結果^{102),105)} およびプロピレングリコールの滴状凝縮の凝縮曲線の測定結果¹⁰⁴⁾ が報告されている。

3. 伝熱理論

膜状凝縮の熱伝達に関する理論は、今から 70 年近くも前に Nusselt¹⁾ 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。これに対し、滴状凝縮については、現在にいたってもまだ完全な伝熱理論はつくられていない。これは、滴状凝縮の現象的な複雑さによるものである。液滴の大きさの分布が、局所的・瞬間的には不規則である上に、合体や離脱の過程に伴って液滴の位置が頻繁に変わり、これが表面温度の変動と不均一化をもたらすからである。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う取り扱うかがもっとも重要な課題となる。

現在までに提案されている理論の中でもっとも完成度の高いのは田中^{64),72),74)} によるものである。これは、凝縮面上に存在する液滴の成長過程における生成・消滅のバランスを幾何学的・確率的に導き、そこから液滴の見かけの成長速度や液径分布や熱伝達率などを求めたものである。しかし、この理論には三つの不満がある。第一は凝縮面温度の変動が考慮されていないこと、第二は凝縮点間距離についての仮定が必要であること、第三は液滴の（合体によらない）成長速度の仮定値として、たとえば Fatica-Katz⁵⁾ に代表されるような準定常熱伝導モデルによる解を用いていることである。しかし、それにもかかわらず、この理論による最大液滴径と熱伝達率の関係や液滴径分布などの予測値が、実験値とよく合うのは興味深い事実である。

これに対し、LeFevre-Rose,²⁸⁾ Rose³⁴⁾ による理論は、滴状凝縮熱伝達率を、個々の液滴の伝熱抵抗と凝縮面上での液径分布の組合せから導いたものであり、実験結果^{28),69),88)} ともよく一致している。しかし、この理論には、実験的に決まる定数が 4 個含まれており自己完結的な

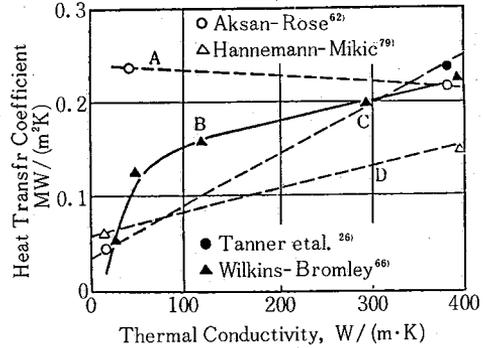


図4 凝縮面材料の熱伝導率と滴状凝縮熱伝達率

い、また凝縮面温度の不均一や変動も考慮されていない。この意味で著者は滴状凝縮伝熱理論としての価値に疑問をもっている。

上述のようないわば解析的理論に代わるものとして、現象の不規則性を計算機シミュレーションによって考慮しようという試みが何人かの研究者によってなされている^{32),47),53),59)}。しかし、面上に存在するきわめて多数の液滴を扱うことが膨大な計算時間と費用を要するところから、あまり成功していない。

なお、大変興味深いことに、凝縮面上での液径分布については、理論^{61),72),76)} と測定結果^{57),60)} の一致がきわめてよいことを付け加えておく。

4. 伝熱測定に関する今後の課題

4.1 凝縮面材料の熱物性の影響

従来、滴状凝縮熱伝達率の測定や伝熱理論においては、凝縮面表面の温度が一様かつ一定であることを暗黙のうちに（あるいはまったく不注意で）前提としていた。しかし、凝縮面上には大きささまの液滴が分布し、それらは合体や離脱に伴って不規則に運動しているから、表面の温度や熱流束には、場所的・時間的な不均一が生じているはずである。事実、凝縮面の温度変動が二、三の研究者によって観測されている^{50),56),70),87)}。

このような温度変動あるいは不均一は、凝縮面材料の熱伝導率あるいは温度伝導率が有限であることに起因するが、それが熱伝達率に影響を与える可能性を最初に指摘したのは Mikić⁴³⁾ である。ただし、実験による確認という面では、過去 20 年にわたる多くの研究者の努力にもかかわらず、この問題に関する結論はまだ得られていない。信頼度の点で問題のあるもの³³⁾ は除くとしても、これまでに行われた実験の結果の間には、まったく異なった二つの傾向が見られる。

図 4 は、凝縮面表面材料の種類と熱伝達率の関係を測定した 4 組の測定結果^{26),62),66),79)} を比較したものである。横軸には、材料の熱物性値を代表するものとして熱伝導

率がとつてある。

この測定結果は、相異なる二つの傾向が得られていることを示している。一つは Aksan-Rose⁶²⁾ の結果 (図中の破線 A) で、熱伝達率が材料の熱伝導率にほとんど無関係というものである。この後行われた Rose⁶⁰⁾、Stylianou-Rose⁶⁰⁾ の実験 (これらは熱通過率を比較している) でもほぼ同様の結果が得られている。一方、Tanner²⁶⁾、Wilkins-Bromley⁶⁶⁾、Hannemann-Mikić⁷⁹⁾ (図中の B, C, D) によれば、熱伝導率の低い材料面の上では、熱伝達率は小さい値を示すという傾向が得られている。

このような結果の食い違いについて、Rose と Mikić との間で、約 10 年に及ぶ議論のやりとりが続いているが、第三者的立場から見て、現在のところどちらの結論が正しいという判定を下すことは困難なように思われる。Mikić 氏^{43), 68), 78)} の唱える狭窄熱抵抗 (constriction resistance) の考え方は十分に根拠のあるものであり、また一方、Rose^{81), 85)} が主張するように、頻繁な液滴合体の生じている凝縮面上では、温度・熱流束の不均一性は結局平均化されて、熱伝達には影響しないという意見も否定しがたいからである。けっきよは、もう少し信頼性と精度の高い測定の繰返しによって、実験的検証を積み重ねていくほかはないであろうが、ガラス面上での滴状凝縮実験⁹³⁾ からの著者の推測では、少なくとも低熱流束の場合には、凝縮面材料の熱物性の影響は皆無ではないと考えられる。

4.2 小温度差・低熱流束域での熱伝達

第 2.4 節では、凝縮面過冷度 ΔT をしだいに大きくしていった場合の熱流束の変化、すなわち凝縮曲線について述べたが、逆に ΔT を小さくしていったらどうなるかも大変興味深い問題である。 ΔT が非常に小さいところ (たとえば 0.2 K 以下) では、液滴初生時の臨界径が大きくなるため、核生成が抑えられる可能性が生じるからである。測定技術上きわめて大きな困難が伴うので、現在までに報告されている結果^{26), 45), 93), 100)} には精度上の疑問があるが、今後の課題としては重要であろう。

4.3 高圧水蒸気に関する測定

1 気圧以上の水蒸気の滴状凝縮熱伝達に関しては、Wenzel⁹⁾ (4 気圧まで)、O'Bara 氏^{36), 41)} (約 9.5 気圧まで) の測定結果が発表されている。しかし、後者については、1 気圧での熱伝達率に疑問がある。そして、Wenzel についても、熱伝達率が圧力上昇とともに低下するという結果を与えているという点で、著者は疑問を抱いている。今後の研究にまつほかはない。

4.4 水以外の蒸気の滴状凝縮

(i) 液体金属 これまでに発表された報告には、Ivanovskii 氏³⁷⁾、Gel'man⁴⁶⁾、Kollera-Grigull^{44), 54)}、Rose 氏^{68), 84), 88)} などがあるが、いずれも水銀蒸気を扱ったものである。上記のうち、結果が信頼できそうなのは、最初

のもの最後のものであるが、まだ十分に広い条件範囲について実験が行われているとは言いがたい。

(ii) 有機化合物 各種の化学プラントや熱交換器などへの応用を考えると、有機化合物蒸気の滴状凝縮はもっと盛んに研究されるべきである。しかし現実には、有機物蒸気の滴状凝縮を維持させようような表面処理法が確立していないために、現在入手できる測定データは少ない。

これまでに、Topper-Baer⁷⁾、水科氏³⁵⁾、Peterson-Westwater²⁹⁾、Wilmshurst-Rose⁶⁹⁾、宇高氏¹⁰⁴⁾ などによるエチレングリコール、アニリン、ニトロベンゼン、プロピレングリコールに関する実験結果の報告があるが、液体金属と同じく、データとしてはまだ不十分である。

なお、もっとも重要な有機熱媒体の一種であるフロン類の滴状凝縮については、Iltscheff⁵⁵⁾ による考察がある。

5. 実用化のための問題点

これまでに述べたように、熱伝達率と外的諸条件の関係などについて、未解決の問題点がまだいくつか残されているとはいえ、滴状凝縮の熱伝達率がきわめて高いものであることには疑問の余地がない。したがって、凝縮装置の設計に際して現在採用されている膜状凝縮という前提を、滴状凝縮に変えることができれば、装置は大幅に小形・軽量化されるはずである。もちろん、ここで改善されるのは蒸気側の熱伝達率であり、装置全体としての伝熱特性がどの程度良くなるかは、固体壁や冷却側の伝熱抵抗にも依存する。概算によれば、もし蒸気側で滴状凝縮を持続させることができれば、全体の熱通過率は約 2 倍になり、伝熱面積は半分で済むことになる。現在の凝縮装置においては、そのコストの主要部分が、凝縮面の材料費であるといわれていることを考えると、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言えよう。

しかし、滴状凝縮過程を実際の凝縮装置で実現させる上で解決を要する問題は二つある。一つは不凝縮気体の蓄積に対してどのような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るように低エネルギー (撥液性) 表面をどのようにして製作するかということである。

5.1 不凝縮気体の除去

滴状凝縮の熱伝達に対して、不凝縮気体がどのような役割を演ずるかについてここで詳しく述べる余地はないが、蒸気中にごく微量混入してさえ、大幅な熱伝達率の低下をもたらすから、まず蒸発器での脱気などには十分に留意する必要がある。さらに、凝縮面表面への蓄積を防止するには、Graham-Aerni⁵²⁾ も述べているように、蒸気流速を大きくして吹き飛ばす方法が考えられる。この方法の有効性は、小規模な実験装置においては実証

されており^{19),20),67),82),95)}, 実用規模の装置においてもさほど問題は無いものと考えられる。

5.2 低エネルギー表面の開発

長時間にわたって滴状凝縮を継続させるような低エネルギー表面の開発は、滴状凝縮の実用化においてもっとも重要な課題である。しかし厄介なことに、これは伝熱工学の問題というよりは、表面物理化学あるいは表面処理技術の問題であり、著者らが貢献しうる部分は限られている。

実験室規模・工業的規模の両方を含めて、これまで固体面上で滴状凝縮を継続させるために用いられてきた方法を分類すると、次の5種類になる。

(i) 撥液性物質(促進剤)を、あらかじめ凝縮面に付着させておく方法。

(ii) 促進剤を、間欠的(あるいは連続的)に蒸気中に添加する方法。

(iii) 凝縮面表面に、金属硫化物のような無機化合物の被覆をつくる方法。

(iv) 凝縮面表面に貴金属の被膜をつくる方法。

(v) 凝縮面表面に有機高分子被膜をつくる方法。

これらの方法のうち、(i)は、実験室規模ではこれまでもっともよく用いられているものである。オレイン酸・ステアリン酸のような鎖状脂肪酸類やメルカプタン類のほか、植物の葉が露をはじくことにヒントを得て合成されたモンタンワックス^{10),17)}などが用いられている。とくに、英国国立工学研究所(NEL)における Blackman^{10),11)}による37種類の有機化合物についての組織的研究では、かなり長時間にわたって有効な促進剤が発見されている。しかし、実用機器においては、蒸気中の不純物による劣化や剝離がもっとも短時間で起こる可能性が大きく、大規模な応用はあまり期待できないように思われる。

これに対して、(ii)の方法によれば、剝離した促進剤はたえず補充され、持続時間はずっと長くなる^{10),12),18)}。しかし、蒸気および凝縮液の汚染、凝縮面材料の汚損・腐食などの問題があり、特殊な場合以外には使えない。

(iii)は、Erb-Thelen³⁰⁾による実験結果の中で有効な方法の一つとして報告されているものであるが、金属(銀など)の硫化物が撥水性をもつこと自体に疑問があり、現在この方法を発展させようという動きはない。

(iv)の方法も Erb-Thelen^{24),30)}によって組織的にテストされ、銀・クロム・金・白金・パラジウム・ロジウムなどが諸条件下で試験された。これらのうちでは金めっき面がもっとも有効であり、最長12,500時間(1.43年)にわたって滴状凝縮を維持することができた。その後、金めっき面は多くの実験に使用されている^{33),80),82),91)}。

ところで Erb⁶⁷⁾は、金自体が撥水性をもつと考えていたが、これには疑義がある⁶⁵⁾。純粋な金には撥水性はな

く、めっき液中の成分が表面に吸着することによって、表面エネルギーを低下させるのだという Westwater⁷¹⁾の見解がいまのところ妥当と思われる。最近の Woodruff-Westwater^{91),98)}の実験でもこのことが実証されつつあるが、めっき液中のどの成分が有効なのかはまだ確認されていない(なお、最近 O'Neil-Westwater¹⁰³⁾は、銀めっきした面について同様の実験を行っている)。

金めっき面による滴状凝縮維持法の問題点は、そのコストにある。金自体の使用量をできるだけ少なくするばかりでなく、めっきという加工工程に要する費用を低く抑えるための研究が必要であろう。

滴状凝縮の長時間持続法として、現在もっとも有望と考えられるのは、高分子材料による表面被覆法である。第二次大戦後に開発され商品化された数多くの高分子材料の中には、テフロンやシリコン樹脂などのように表面エネルギーが低く、水などの液体をはじく性質のものがある。そ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20年以上前から各所で行われている^{14),22),23),24),30),31),35),39)}。

このような高分子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、しかもピンホールのような欠陥のまったくない被膜をつくる必要があること。もう一つは、この種の高分子材料は熱伝導率の小さいものが多いので、その熱抵抗が問題にならない程度の薄い被覆(数ミクロン程度以下)にしなければならないことである(このような問題があるので Westwater⁹⁹⁾は金めっきの方が有望と考えている)。これら二つの問題点は互いに関連しあっており、さらに被膜の強度や経時変化などについて解決すべきことが残っているが、前述の金めっき法などに較べると、高分子被覆法はそのコストの点で有利なので、この方法による実用化がいちばん早いのではないかと著者は推測している。

(1984年10月19日受理)

参考文献

- 1) Nusselt, W., *Z. VDI*, 60 (1916), 541, 569.
- 2) Schmidt, E., ほか2名, *Techn. Mechan. u. Thermodyn.*, 1 (1930) 53.
- 3) 坂山, 吉澤, 機誌, 37 (1934), 347.
- 4) Gnam, E., *VDI-Forsch. -h.*, 382 (1937), 17.
- 5) Fatica, N. and Katz, D. L., *Chem. Engng. Progr.*, 45 (1949), 661.
- 6) Hampson H. and Özisik, N., *Proc. IME*, IB (1952), 282.
- 7) Topper, L. and Baer, E., *J. Colloid Sci.*, 10 (1955), 225.
- 8) Gregorig, R. *Chemie-Ing. -Techn.*, 28 (1956), 551.
- 9) Wenzel, H., *Allg. Wärmetechnik*, 8 (1957), 53.
- 10) Blackman, L. C. F., ほか2名, *J. Appl. Chem.*, 7 (1957), 160.
- 11) Blackman, L. C. F. and Dewar, M. J. S., *J. Chem. Soc.*, (1957), 162.

- 12) Bobco, R. P. and Gosman, A. L., *ASME Paper*, No. 57-S-2 (1957).
- 13) Furman, T. and Hampson, H., *Proc. IME*, **173** (1959), 147.
- 14) Kullberg, G. K. and Kendall, H. B., *Chem. Engng. Progr.*, **56** (1960), 82.
- 15) 岐美, 機誌, **65** (1962), 1438.
- 16) Watson, R. G. H., ほか 3 名, *J. Appl. Chem.*, **12** (1962), 539.
- 17) Tanner, D. W., ほか 4 名, *J. Appl. Chem.*, **12** (1962), 547.
- 18) Osment, B. D. J., ほか 3 名, *Trans. IChE*, **40** (1962), 152.
- 19) Welch, J. F. and Westwater, J. W., *International Developments in Heat Transfer, Proc. 1961-1962 Int. Heat Transfer Conf.*, (1963), 302.
- 20) Hampson, H., *International Developments in Heat Transfer, Proc. 1961-1962 Int. Heat Transfer Conf.*, (1963), 310.
- 21) Le Fevre, E. J. and Rose, J. W., *IJHMT*, **7** (1964), 272.
- 22) Depew, C. A. and Reisbig, R. L., *I & EC, Process Design and Development*, **3** (1964), 365.
- 23) Edwards, J. A. and Doolittle, J. S., *IJHMT*, **8** (1965), 663.
- 24) Erb, R. A. and Thelen, E., *I & EC*, **57** (1965), 49.
- 25) Le Fevre, E. J. and Rose, J. W., *IJHMT*, **8** (1965), 1117.
- 26) Tanner, D. W., ほか 3 名, *IJHMT*, **8** (1965), 419.
- 27) Brown, A. R. and Thomas, M. A., *Proc. 3rd Int. Heat Transfer Conf.*, Vol. 2 (1966), 300.
- 28) Le Fevre, E. J. and Rose, J. W., *Proc. 3rd Int. Heat Transfer Conf.*, Vol. 2 (1966), 362.
- 29) Peterson, A. C. and Westwater, J. W., *Chem. Engng. Progr., Symposium Series*, **62**, No. 64 (1966), 135.
- 30) Erb, R. A. and Thelen, E., *U. S. Dept. of Interior, Office of Saline Water, R & D Report*, No. 184 (1966).
- 31) Butcher, D. W. and Honour, C. W., *IJHMT*, **9** (1966), 835.
- 32) Gose, E. E., ほか 2 名, *IJHMT*, **10** (1967), 15.
- 33) Griffith, P. and Lee, M. S., *IJHMT*, **10** (1967), 697.
- 34) Rose, J. W., *IJHMT*, **10** (1967), 697.
- 35) Mizushina, T., ほか 2 名, *IJHMT*, **10** (1967), 1015.
- 36) O'Bara, J. T., ほか 2 名, *Chem. Engng. Sci.*, **22** (1967), 1305.
- 37) Ivanovskii, M. N., ほか 2 名, *Teploenergetika*, **14** (1967), 81.
- 38) Tanner, D. W., ほか 3 名, *IJHMT*, **11** (1968), 181.
- 39) Kosky, P. G., *IJHMT*, **11** (1968), 374.
- 40) Citakoglu, E. and Rose, J. W., *IJHMT*, **11** (1968), 523.
- 41) Dolloff, J. B. and Metzger, N. H., *ONR Technical Report*, No. 2 (1968).
- 42) Citakoglu, E. and Rose, J. W., *IJHMT*, **12** (1969), 645.
- 43) Mikić, B. B., *IJHMT*, **12** (1969), 1311.
- 44) Kollera, M. and Grigull, U., *Wärme-und Stoffübertragung*, **2** (1969), 31.
- 45) Graham, C., *Ph. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology* (1969).
- 46) Gel'man L. I., "Problems of Heat Transfer and Hydraulics of Two-phase Media" (ed. Kutateladze, S. S., translated by Blunn, O. M.), Pergamon Press (1969), 184.
- 47) Tanasawa, I. and Tachibana, F., *Proc. 4th Int. Heat Transfer Conf.*, Vol. 6 (1970), Cs. 1. 3.
- 48) Wilmshurst, R. and Rose, J. W., *Proc. 4th Int. Heat Transfer Conf.*, Vol. 6 (1970), Cs. 1. 4.
- 49) Tower, R. E. and Westwater, J. W., *Chem. Engng. Progr., Symp. Ser.*, **66**, No. 102 (1970), 21.
- 50) Abdelmessih, A. H. and Nijaguna, B. T., *Proc. 1970 Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute* (ed. Surpkaya, T.), Stanford Univ. Press (1970), 74.
- 51) Wilcox, S. J. and Rohsenow, W. M., *Trans. ASME, JHT*, **92** (1970), 359.
- 52) Graham, C. and Aerni, W. F., *Report Presented at 7th Annual Technical Symp., Association for Senior Engineers* (1970).
- 53) Tanasawa, I. and Tachibana, F., *Proc. AICA Symp., Simulation of Complex Systems* (1971), G-6/1.
- 54) Kollera, M. and Grigull, U., *Wärme-und Stoffübertragung*, **4** (1971), 244.
- 55) Iltscheff, S., *Kältetechnik-Klimatisierung*, **23** (1971), 237.
- 56) 千葉・ほか 2 名, 化学工学, **36** (1972), 78.
- 57) 棚沢・落合, 機論, **38** (1972), 3193.
- 58) Rose, J. W., *IJHMT*, **15** (1972), 1431.
- 59) Glicksman, L. R. and Hunt, Jr., A. W., *IJHMT*, **15** (1972), 2251.
- 60) Graham, C. and Griffith, P., *IJHMT*, **16** (1973), 337.
- 61) Rose, J. W. and Glicksman, L. R., *IJHMT*, **16** (1973), 411.
- 62) Aksan, S. N. and Rose, J. W., *IJHMT*, **16** (1973), 461.
- 63) 棚沢・ほか 2 名, 機論, **39** (1973), 278.
- 64) 田中, 機論, **39** (1973), 3099.
- 65) Wilkins, D. G., ほか 2 名, *AICHe J.*, **19** (1973), 119.
- 66) Wilkins, D. G. and Bromley L. A., *AICHe J.*, **19** (1973), 839.
- 67) Erb, R. A., *Gold Bulletin*, **6** (1973), 2.
- 68) Horowitz, J. S. and Mikić, B. B., *Proc. 5th Int. Heat Transfer Conf.*, Vol. 3 (1974), 259.
- 69) Wilmshurst, R. and Rose, J. W., *Proc. 5th Int. Heat Transfer Conf.*, Vol. 3 (1974), 269.
- 70) Takeyama, T. and Shimizu, S., *Proc. 5th Int. Heat Transfer Conf.*, Vol. 3 (1974), 274.
- 71) Westwater, J. W., *Proc. 5th Int. Heat Transfer Conf.*, Vol. 6 (1974), 234.
- 72) 田中, 機論, **40** (1974), 2283.
- 73) Sahde, Jr., R. L. and Mikić, B. B., *AICHe Annual Meeting, Paper* 67B (1974).
- 74) Tanaka, H., *Trans. ASME, JHT*, **97** (1975) 72.
- 75) 棚沢, 機誌, **78** (1975), 439.
- 76) Tanaka, H., *Trans. ASME, JHT*, **97** (1975), 341.
- 77) 棚沢, 伝熱工学の進展4, 養賢堂, (1976), 229.
- 78) Hannemann, R. J. and Mikić, B. B., *IJHMT*, **19** (1976), 1299.
- 79) Hannemann, R. J. and Mikić, B. B., *IJHMT*, **19** (1976), 1309.

- 80) Detz, C. M. and Vermesh, R. J., *AICHE J.*, **22** (1976), 87.
- 81) Rose, J. W., *IJHMT*, **19** (1976), 1363.
- 82) 棚沢・ほか3名, 機論, **42** (1976), 2846.
- 83) 落合・ほか2名, 機論, **43** (1977), 2261.
- 84) Necmi, S and Rose, J. W., *IJHMT*, **20** (1977), 877.
- 85) Rose, J. W., *IJHMT*, **21** (1978), 80.
- 86) Rose, J. W., *IJHMT*, **21** (1978), 835.
- 87) Tanasawa, I., ほか2名, *Proc. 6th Int. Heat Transfer Conf.*, Vol. 2 (1978), 477.
- 88) Niknejad, J. and Rose, J. W., *Proc. 6th Int. Heat Transfer Conf.*, Vol. 2 (1978), 483.
- 89) Tanasawa, I., *Proc. 6th Int. Heat Transfer Conf.*, Vol. 6 (1978), 393.
- 90) Tanasawa, I., *Proc. 6th Int. Heat Transfer Conf.*, Discussions (1978), 35.
- 91) Woodruff, D. W. and Westwater, J. W., *IJHMT*, **22** (1979), 629.
- 92) 棚沢, 機械の研究, **31** (1979), 99.
- 93) Tanasawa, I. and Shibata, Y., *Condensation Heat Transfer, Proc. 18th ASME-AICHE Heat Transfer Conf.*, (1979), 79.
- 94) Marto, P. J. and Nunn, R. H. (ed.), *Power Condenser Heat Transfer Technology*, (1980), 368.
- 95) 宇高・棚沢, 機論, **46B** (1980), 1844.
- 96) Stylianou, S. A. and Rose, J. W., *Trans. ASME, JHT*, **102** (1980), 477.
- 97) 宇高・棚沢, 機論, **47B** (1981), 1620.
- 98) Woodruff D. W., and Westwater, J. W., *Trans. ASME, JHT*, **103** (1981), 685.
- 99) Westwater, J. W., *Gold Bulletin*, **14** (1981), 951.
- 100) 海野・ほか3名, 機論, **48B** (1982), 1339.
- 101) 鶴田・田中, 機論, **49B** (1983), 2181.
- 102) 泉・ほか2名, 機論, **50B** (1984), 1600.
- 103) O'Neil, G. A. and Westwater, J. W., *IJHMT*, **27** (1984), 1539.
- 104) 宇高・ほか4名, 機論, **50B** (1984), 2418.
- 105) 熊谷・ほか3名, 機論, 掲載予定.

