滴状凝縮曲線の研究*

〔表面吸着性促進剤を用いた銅面上におけるプロピレングリコール、
エチレングリコール、グリセリン蒸気の滴状から膜状への遷移 (その1)〕宇高義郎**, 斎藤彬夫**
石川宏†, 柳田浩幸††

Study on Dropwise Condensation Curves

〔Dropwise to Filmwise Transition of Propylene Glycol, Ethylene Glycol and
Glycerol Vapors

on a Copper Surface Using a Monolayer Type Promoter (Part 1)〕

by Yoshio UTAKA, Akio SAITO,
Hiroshi ISHIKAWA, and Hiroyuki YANAGIDA

In order to determine the condensation mechanisms of the transition from dropwise to filmwise condensation heat transfer, dropwise condensation curves on a copper surface adsorbing a common monolayer type promoter, trilauryl trithiophosphite, are measured precisely. The substances used were those having various physical properties, i. e. propylene glycol, ethylene glycol and glycerol vapors, at several reduced pressures and vapor forces. As the condensing surface subcooling increases in steady states, an abrupt change from drop type to film type occurs, and the dropwise condensation curves become discontinuous in the case of all vapors at comparatively high vapor pressures, although the curves are continuous for propylene glycol and glycerol vapors at low vapor pressures. The surface subcoolings at the points where these discontinuities start are also shown and discussed.

Key Words: Phase change, Condensation heat transfer, Dropwise condensation curve, Transition, Organic vapor

1. はじめに

本研究は、滴状凝縮熱伝達における凝縮面過冷度と熱流束あるいは熱伝達率との関係、すなわち滴状凝縮曲線に関する特性について明らかにすることを目的とする。特に、従来の測定結果においては、凝縮面過冷度を増加させてゆくとともに、滴状から膜状へ連続的に接続する場合⁽¹⁾と不連続な曲線となる場合⁽²⁾⁽³⁾が知られているが、これらの異なる現象を生じさせる条件の違いについて明確にされていないなど、滴状凝縮曲線を支配する凝縮機構には不明点が多い。

前報⁽¹⁾では、薄い PTFE を被覆した銅面上におけるプロピレングリコール蒸気の凝縮について、蒸気力および蒸気圧力をパラメータとして測定を行った。ここで蒸気力とは凝縮面上を通過する蒸気流による凝縮液滴に作用する力を意味している。本研究では、これまで水蒸気の測定に多く利用されてきた銅面に滴状凝縮促進剤を吸着させる形式の促進面を用いて、前報と同

様の凝縮用蒸気であるプロピレングリコールの滴状凝縮曲線を求め、比較するとともに、滴状凝縮曲線に関するより広い知見を得るため、さらに滴状凝縮曲線を支配する重要な因子と考えられる、液体物性の大きく異なる他の有機蒸気について測定を行った。具体的には、2章に述べるように、銅面への吸着性の滴状凝縮促進剤としてチオ垂りん酸トリウラルル $[(C_{12}H_{25}S)_3P]$ 、融点、23°C を共通に使用し、凝縮用有機液体として、プロピレングリコール、エチレングリコールおよびグリセリンの3種類の蒸気について蒸気圧力あるいは蒸気力をパラメータとして測定を行った。

2. 有機蒸気に対する有効な滴状
凝縮促進剤の選定試験

水蒸気の場合に比べて、これまで有機化合物蒸気について滴状凝縮を実現・測定した例は非常に少なく、有効な滴状凝縮の促進法はあまり知られていない。

従来行われてきた有機蒸気に関する滴状凝縮の実現法は2種類に分けることができる。一つは、疎液性物質として周知のふっ素系樹脂(主にポリテトラフルオロエチレン、PTFE)を被覆した面を利用する方法であり、アニリン、エチレングリコール、ニトロベンゼンについての観察⁽³⁾および測定⁽⁴⁾、エチレングリコー

* 昭和60年11月13日 第934回講演会において講演、原稿受付 昭和60年4月24日。

** 正員、東京工業大学工学部 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)。

† 准員、帝人(株) (〒503-01 岐阜県安八郡安八町南条1357)。
†† 東京工業大学大学院。

ル⁽⁵⁾、プロピレングリコール⁽¹⁾の滴状凝縮曲線の測定が行われている。なお、PTFE 被覆法は、化学的安定性の非常に高い低エネルギー表面を実現できるため、表面張力の比較的大きな液体についての滴状凝縮の実現は比較的容易である。他の一つは、表面吸着性促進剤を使う方法である。この方法においては、凝縮用有機物質に対する溶解性が低く、伝熱面への吸着性が強固であることなどの条件を満足する必要がある、有効な物質はあまり知られていない。これまで短時間ではあるがペルフロロ酸系の物質を吸着させた面上でイソオクタン、デカリン、エタノール、四塩化炭素など7種類の有機蒸気について⁽⁶⁾、キューブリックオリエイトを吸着させた銅面上におけるエチレングリコールとグリセリン蒸気について⁽⁷⁾観察例が報告されている。定量的な測定としては、オレイン酸吸着の銅面上におけるエチレングリコール⁽⁵⁾⁽⁸⁾の例があるにすぎない。

本研究では、上記の例あるいは従来の水蒸気用の促進剤の研究⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾などを参考に、比較的大きな表面張力をもつ有機液体に対して有効な吸着性促進剤を知るため、以下に示す経験的に定めた3段階の試験を行った。なお、凝縮面用の材質は、これまで多く使用されてきている良導性の銅とした。

(1) 溶解性：有機液体と促進剤の候補である物質を混合し、湯洗により加熱した後、溶解性を試験する。不溶性を示した場合には次に進む。

(2) 吸着性および疎液性：銅板に促進剤候補物質を塗付し、有機液体中にそう入し、吸着性および疎液性を試験する。合格の場合には次に進む。

(3) 凝縮試験：新たに製作した減圧凝縮試験装置により、実際に凝縮させてみる。

以上の方法による試験の結果を表1に示した。ここで、△印は第(1)段階、□印は第(2)段階、○印は第(3)段階までを満足した組合せを示している。また、*印と◇印は、それぞれ第(1)段階を満足しなかった場合と、第(1)、第(2)段階は合格であったが、第(3)段階の試験を省いた場合を示している。

水蒸気に対して良好な促進剤であっても、有機蒸気に対して有効な物質は非常に少ないが、本試験により、プロピレングリコール、エチレングリコールおよびグリセリン蒸気に対して表1中の14番のチオ垂りん酸トリラウリルが共通に有効性をもつことが判明した。これらの3物質は、液体における粘性、表面張力が大きく異なっているため、本研究の目的に適合しており、これらの組合せを用いて測定を行うこととした。

3. 実験装置および方法

実験装置を図1(a)~(c)に示す。これらの装置は前報とほぼ同様であるので、主要な点および改良点について述べる。

図1(a)は実験装置全体の概略を示しており、ガラス製凝縮管直後の容器を真空ポンプにより真空吸引し続けながらバルブ開度を調整することにより、上部中央に取付けられた凝縮室を通る蒸気の圧力および流速を一定に保つことができる構造となっている。図1(b)は凝縮装置を下方から見た断面を示している。凝縮室カバーはガラス製一体構造となっており、特に正面部分〔図1(b)中上方〕には光学研磨ガラスを観察・記録用に使用している。蒸気は、凝縮面とテフロン断熱材、ガラスカバーおよび側方に取付けられるテフロ

表 1 滴状凝縮促進剤の試験結果

Promoter	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Organic vapor														
Acetophenone	*		*							*				*
Anisole	*		*	*						*				*
Bromobenzene	*	*	*	*	*	*	*	*	*	□	*	*	*	*
Benzoic Acid Methyl Ester	*		*							*				*
Cyclohexane	*	*	*	*	*	*	*	*	*	□	*	*	*	*
Epichlorohydrin	*		*	*		*	*		*	*	*		*	□
Ethylene Glycol	○		○		*	*	○	△	○		○			○
Methyl Salicylate	*		*							*				*
Morpholine	*		*							*				*
o-Nitroanisole	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
o-Nitrotoluene	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Propylene Glycol	□	◇	□	◇	△	△	*	△	*	□	*	◇	*	○
Quinoline	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Toluidine	*		*							*				*
Glycerol														○

- Promoter
- 1: Di-n-Decyl Disulfide
 - 2: Di-n-Octadecyl 3,3'-Thiodipropionate
 - 3: Di-tert-Dodecyl Disulfide
 - 4: Lauryl Mercaptan
 - 5: n-Octadecane
 - 6: n-Octadecylamine
 - 7: Oleic Acid
 - 8: Paraffin
 - 9: Palmitic Acid
 - 10: Perfluoro-n-Butylic Acid
 - 11: Stearic Acid
 - 12: Stearyl Mercaptan
 - 13: Tetraethylthiuram Disulfide
 - 14: Trilauryl Trithiophosphite

前報と同様に、上流側と下流側で凝縮の様相あるいは熱流束に著しい差異が現れにくいように比較的小さな寸法(直径 8 mm)の円柱端面を凝縮面とし、側面をテフロンにより断熱して使用した。凝縮面は、粒径約 0.5 μm の酸化クロム粉で研摩し、ほぼ鏡面仕上げとなるようにした。伝熱ブロックには、図示のように、5箇所凝縮面に平行な直径 0.5 mm の貫通穴を通し、各穴の中央部にろう付されたテフロン被覆コンスタンタン線(線直径 0.1 mm)とブロック根本部にろう付された銅線により熱電対を形成させてある。これらの出力と接点位置から熱流束および凝縮面温度を決定した。なお、測定時のブロック内温度分布が良好な直線性を示すことは確認した。蒸気温度の測定には、凝縮室内の凝縮面直前に配置したシース熱電対を用いた。また、伝熱ブロックの断熱材に疎液性の高いテフロンを用いたため、予備実験において、離脱滴(液)が凝縮面から円滑に排除される妨げとなる状態が観察された。この影響を除外するため、親液性の高いトレーシングペーパーを凝縮面下流端部となめらかにつながらるように断熱材面に固定して測定を行うようにした。

(1) 凝縮面を研磨, アルコール, アセトンなどの溶剤で清浄にした直後, 約 1% のチオ亜リッ酸トリラウリルの四塩化炭素溶液中に 15 min から 20 min ほどつけておき促進剤の吸着を行う。

(2) 速やかに凝縮装置を実験装置に組み付けた後、系の真空吸引、蒸気発生器の加熱などを開始する。なお、凝縮面に過剰に付着した促進剤は、水蒸気に対してオレイン酸を塗付した場合と同様に、凝縮液により流され、銅面と直接に接触している分子が残るものと思われ、その状態で凝縮は安定する。また、特にプロモータの寿命試験は行っていないが、20 h 程度以上はほとんど劣化なしに使用可能であることは確認した。

(3) 系が十分に安定し、蒸気流速、圧力等が一定になった後に測定を行う。通常の定常測定と冷却液温をゆっくりと降下させながら行う準定常測定とを併用した。特に、遷移域付近で行った準定常測定においては、十分に定常に近い状態を実現させるよう注意を払い、恒温冷却液槽の自然冷却などを利用することにより冷却液温の降下速度を $0.001 \sim 0.004 \text{ K/s}$ と非常に低く押さえた。また、本研究では、通常の滴状凝縮から膜状へ遷移するまでの現象を対象としているため、常に冷却能力の小さい側から増大させて測定を行うようにした。

図 1 実験装置

4. 結果 および 考 察

4.1 プロピレングリコール蒸気 チオ垂りん酸トリラウリルを吸着させた銅製凝縮面におけるプロピレングリコールの測定結果を図2(a)~(e)に、それらの対応する印と測定条件を表2に示した。測定は、蒸気飽和温度 T_s および蒸気質量流速 m を一定に保ち、前述の定常および準定常状態を実現させながら行った。また、前報と同様の方法により蒸気過熱度の測定を行い、蒸気飽和温度を決定した。これらの方法は、後述のエチレングリコールおよびグリセリンにおいて

表 2 プロピレングリコール蒸気の実験条件

	P kPa	T_s K	m kg/m ² s	D mm	
△	16.0	408	3.1	0.9	Present work
○	6.5	388	2.1		
● ▲	1.9	363	0.8		
□	6.5	388	8.1	0.2	Present work
■ ◇	1.9	363	5.2		
—	6.5	388	3.0	0.7	Utaka et al. (1)
- - -	1.9	363	1.6		
- - -	6.5	388	6.8		
- - -	1.9	363	3.2	0.2	(PTFE surface)

(a) 離脱液滴直径と凝縮面過冷度

(b) 熱流束と凝縮面過冷度 ($D=0.9$ mm) (c) 熱伝達率と凝縮面過冷度 ($D=0.9$ mm) (d) 熱流束と凝縮面過冷度 ($D=0.2$ mm) (e) 熱伝達率と凝縮面過冷度 ($D=0.2$ mm)

図 2 プロピレングリコール蒸気の測定結果

も同様である。表2に示したように、蒸気圧力 P を三とおり、蒸気力を二とおり（質量流速、離脱液滴直径 D で表示してある）の計五とおりの条件について測定を行った。これらの条件は、PTFE 被覆面における前報と比較するため類似のものとしてある。図2(a)は、ビデオ撮影から読取った離脱液滴直径の変化を示したものである。前報と同様に離脱直径は凝縮面過冷度

ΔT に依存しており、過冷度の増大に伴って減少するがほぼ二とおりの値(図2(b), (c)中の Δ , $\circ$, $\bullet$ 印と図2(d), (e)中の $\square$, $\blacksquare$ 印)にそろっていることがわかる。蒸気力を表す指標として離脱直径を用い、前者を0.9 mm, 後者を0.2 mm と表示することにする。

図2(b), (c)は、比較的蒸気力の小さな場合の過冷度 ΔT に対する熱流束 q と熱伝達率 h の変化を両対数目盛上に示しており、図2(d), (e)は比較的蒸気力の大きな場合を示している。また、図2中の実線、一点鎖線、破線、二点鎖線は PTFE 被覆面で行った前報の結果を示しており、それぞれ本測定の $\circ$, $\bullet$, $\square$, $\blacksquare$ 印に対応している。図2(b)~(e)からわかるように、凝縮面の性質により滴状凝縮曲線の形は大きく異なっている。

2種類の凝縮用表面の違いによる差異として、第1に、PTFE 被覆面に対してチオ垂りん酸トリラウリルを吸着させた銅面では、滴状凝縮曲線は過冷度の小さな側に移動しており、比較的過冷度の小さな領域(熱伝達率がほぼ一定値を示す領域)の熱伝達率は2~5倍程度大きいことが挙げられる。これは、ガラスにシリコン樹脂を厚さ0.1~0.2 μm 塗布した面上で永田・棚沢⁽¹¹⁾が測定した大気圧水蒸気の熱伝達率が、従来行われてきた銅にオレイン酸などを吸着させた面上での値の25~30%程度であることと類似している。ここで、これらの差異の原因の一つと考えられる伝熱面表面被覆層の熱伝導性の影響について Hannemann⁽¹²⁾ および Hannemann-Mikic⁽¹³⁾による解析を用いて検討してみると、前報の PTFE 被覆面上の値 h' は銅面上の値 h を用いて

$$h' = (0.82 \sim 0.91) \cdot h$$

と表せる。しかし、測定における差異はこの値よりかなり大きく、その違いが凝縮面の物理化学的な性質(核生成能力など)に依存している可能性も考えられ、今後の詳細な検討を要する課題の一つであろう。

第2の大きな相違は、PTFE 被覆面上の場合においては、全測定条件について滴状から膜状へ連続的に移行する(過冷度を増大させていく場合に、滴状凝縮曲線は1本の連続線として表せる)のに対して、チオ垂りん酸トリラウリルを吸着させた銅面の本測定においては、圧力1.9 kPaを除いた全条件で、滴状凝縮の熱流束が低下する領域の現れないうちに膜状へ移行し、過冷度に対する熱流束の変化は不連続曲線となっていることである。また、圧力1.9 kPaの条件においては、2種類の蒸気力の場合とも、連続曲線と不連続曲線の両者が測定された(図2中では別の印を使って区別し

ておいた)が、このうち不連続な場合でも、より圧力の高い他の条件の場合と異なり、熱流束が大幅に低下する領域まで伸びており、連続線に非常に近いものとなっている。なお、圧力1.9 kPa, 離脱直径0.2 mmの $\diamond$ 印の条件は、蒸気過熱度がやや大きく、飽和温度は表に示した値よりわずかに低くなっている。ここでは滴状域の最大過冷度を表す点を、滴から膜への飛躍開始点と呼ぶことにする。図2(b)~(e)において、特に飛躍開始点に矢印を入れて示しておいた。後述の結果においても同様である。本測定における飛躍開始点の過冷度は小さく、約11 Kから19 Kに、熱流束は $1.8 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ から $6.5 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ にわたっている。

4.2 エチレングリコール蒸気 図3(a)~(c)は、チオ垂りん酸トリラウリルを吸着させた銅面上における本測定結果と、Stylianou-Rose⁽⁵⁾によるオレイン酸を促進剤として用いた銅面上の測定結果の一部を示している。図3中の印と測定条件は表3のとおりで、図3(c)からわかるように、離脱滴径をほぼそろえ、圧力を二とおりの大きく異なる値、1.6 kPaと24.5 kPaに選んだ。

図3(a), (b)に示したように、圧力1.9 kPaの条件を除くプロピレングリコール蒸気の場合と同様に、滴状凝縮から膜状への飛躍的な移行を示している。飛躍開始点は、圧力1.6 kPaにおいて過冷度約46 K, 熱流束 $7.7 \times 10^5 \text{ W/m}^2$, また、圧力24.5 kPaにおいてそれぞれ約27 K, $2 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ であった。

このように、エチレングリコールにおける飛躍開始過冷度はプロピレングリコールに比べて大きいことがわかる。また、低い蒸気圧力の場合ほど飛躍開始過冷度が大きくなるのは、エチレングリコール、プロピレングリコールともに共通の傾向である。

本測定結果と Stylianou-Roseの結果を比較すると、各滴状凝縮曲線の形は類似している。使用している促進剤および伝熱面寸法が異なっており、また圧力の値が一致していないので厳密な比較は難しいが、定性的に、飛躍開始点の過冷度および熱流束は本測定の値のほうがやや大きい。Stylianouらの測定は、ほぼ静止

表3 エチレングリコール蒸気の実験条件

	P kPa	T_s K	m kg/m ² s	D mm	
$\circ$	24.5	428	3.1	0.7	Present work
$\bullet$	1.6	368	0.6		
∇	19.5	424			Stylianou & Rose ⁽⁵⁾ (Oleic Acid)
$\blacktriangledown$	11.5	411			
$\diamond$	3.8	386			

した蒸気中のものであるため、熱流束の差異は蒸気流速の影響によるものと思われる。ただし、Stylianou らも述べているように、423 K においてオレイン酸吸着面は疎液性を失ってしまう。図 3 中の▽印はこの限界温度付近の値であり、促進機能が劣化しているものと考えられる。なお、本測定に用いた促進剤について

は、蒸気温度 443 K まで充分な促進効果を発揮することを確認してある。

4.3 グリセリン蒸気 測定に用いた 3 種類の有機液体のうち、最も大きな粘性と表面張力をもつグリセリンの結果を図 4 (a), (b) に示した。グリセリンは比較的沸点の高い液体であるので、装置の耐熱性を考慮して、図 4 中に示してある比較的圧力の低い 2 種類の条件を選び、4.1 節および 4.2 節と同様に蒸気力をほぼそろえて測定を行った。なお、圧力 0.35 kPa の場合には、実験装置の容量、蒸気流量調節弁の調節範囲の限界から、広い過冷度範囲において圧力を一定に保つのが難しかったため、比較的過冷度の大きな領域（この領域では凝縮速度の変化が小さいため、蒸気流量と圧力とも一定に保つのが容易である）における測定だけを行った。図 4 (a) (b) から、蒸気圧力 0.35 kPa の条件では、蒸気圧力 1.9 kPa のプロピレングリコールにおいて現れたように、滴状から膜状へ連続的に移行した。なお、この場合には、2 回行った測定とも連続的移行を示した。また、蒸気圧力 0.6 kPa では、上記の場合を除いたすべての条件と同様に滴状か

(a) 熱流束と凝縮面過冷度

(b) 熱伝達率と凝縮面過冷度

(c) 離脱液滴直径と凝縮面過冷度

図 3 エチレングリコール蒸気の測定結果

(a) 熱流束と凝縮面過冷度

(b) 熱伝達率と凝縮面過冷度

図 4 グリセリン蒸気の測定結果

ら膜状への移行に際して飛躍が現れた。このときの飛躍開始点の過冷度の値は大きく、約 82 K、熱流束は約 $1 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ であった。なお、本章で述べた飛躍開始点付近の測定は 2 章に示した準定常法によって測定されているが、飛躍開始点直前において冷却液の降温を停止し一定温度に保っておくと、凝縮の様子あるいはブロック内熱電対示度などの変化のないことから、ここで利用した準定常測定法は十分に定常測定法に近い状態が実現されていることが確認される。

5. ま と め

3 種類の有機化合物蒸気、プロピレングリコール、エチレングリコール、グリセリン蒸気について共通の凝縮用表面、すなわち、滴状凝縮促進剤としてチオ亜りん酸トリラウリルを銅に吸着させた表面において、蒸気の圧力および流速を変化させて行った滴状凝縮曲線の測定結果を示した。その結果は以下のようにまとめられる。

同一の吸着性促進剤を用いた凝縮用表面において、液の種類、圧力条件により滴状凝縮曲線は大きな特性変化を受ける。すなわち、3 種類の蒸気とも、ほぼ定常状態を実現させながら凝縮面過冷度を増大させてゆくと、突然凝縮面上で液膜が急速に広がり始め、面は完全に液膜で覆われる場合がある。これらの条件における滴状凝縮曲線は、滴状域から膜状へ飛躍する不連続曲線となる。このような飛躍開始点の過冷度あるいは熱流束は、蒸気の種類、測定圧力に大きく依存している。飛躍開始点過冷度は、プロピレングリコール、エチレングリコール、グリセリンの順に小さく、また蒸気圧力が低下するほど増大する傾向を示した。

また、プロピレングリコール、グリセリン蒸気においては、測定を行ったうち最も圧力の低い条件のとき上述の飛躍は現れず、滴状凝縮曲線は 1 本の連続曲線として表される場合が存在した。これらの条件では、凝縮面が液膜で覆われるときの過冷度は、同一蒸気

の、より圧力の高い条件で現れる飛躍開始点過冷度より大きな値を示した。

プロピレングリコール蒸気を共通の凝縮物質とし、凝縮用表面が異なる場合にも滴状凝縮曲線は大きな特性変化を示す。すなわち、本測定のチオ亜りん酸トリラウリルを銅に吸着させた面においては、前報の PTFE 被覆面の結果と比較して、熱伝達率が大きな値を示すとともに、PTFE 面では滴状凝縮曲線がすべての条件で連続性を示したのに対して、ほぼ同様な外部条件において滴から膜への飛躍が現れる場合が存在した。

なお、以上述べてきた現象は、凝縮用表面と凝縮用液体により決まる疎液性、あるいは凝縮液体の物性などに支配されるものと考えられ、次報において、凝縮面上の凝縮液の挙動とそれらの関連などについて検討したいと考えている。

文 献

- (1) 宇高・ほか 4 名, 機論, 50-458, B (昭 59), 2418.
- (2) 宇高・棚沢, 機論, 46-409, B (昭 55), 1844.
- (3) Topper, L. and Baer, E., *J. Colloid Sci.*, 10 (1955), 225.
- (4) Wilmshurst, R. and Rose, J. W., *Proc. 5th Int. Heat Transf. Conf.*, 3 (1974), 269.
- (5) Stylianou, S. A. and Rose, J. W., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 26-5 (1983), 747.
- (6) Bobco, R. P. and Gosman, A. L., Paper No. 57-S-2, ASME, (1957).
- (7) Welch, J. F. and Westwater, J. W., *Proc. 1961-1962 Int. Heat Transf. Conf.*, (1963), 302.
- (8) Peterson, A. C. and Westwater, J. W., *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.*, 62-64 (1966), 135.
- (9) Blackman, L. C. F. and Dewar, M. J. S., *J. Chem. Soc.*, (1957), 162.
- (10) Blackman, L. C. F., ほか 2 名, *J. Appl. Chem.*, 7- (1957), 160.
- (11) 永田・棚沢, 第 21 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (昭 59), 313.
- (12) Hannemann, R. J., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 21-1 (1978), 65.
- (13) Hannemann, R. J. and Mikic, B. B., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 19-11 (1976), 1299.

討 論

〔質問〕 棚 沢 一 郎

(1) 滴状凝縮から擬似膜状凝縮への移行が、凝縮曲線が右下がりの領域で起こるとすれば、現象は本質的に不安定のはずである。それにもかかわらず、貴論文 1841 ページ左欄に述べられているように、飛躍開始点直前において冷却液の降温を停止することによって定常状態が実現されるのはどういう理由によるか。

(2) 各測定における飛躍開始点の再現性はどの程度か。

(3) 貴測定とは逆に、凝縮面過冷度を小さくしていった場合には、どのような凝縮曲線が得られると考えられるか。

〔回答〕 (1) 滴状凝縮曲線における右下がりの領域 (付図 1 の点 B~C) の安定性については、蒸気側

および冷却側を含めた熱通過の系として考えられる。すなわち、曲線中の極大熱流束を示す点Bから点Cに至る過程では、凝縮面過冷度の増大にともなって熱流束は低下するにもかかわらず、点AからBまでと同様に、冷却能力の増大してゆく領域を形成している。ここで、本測定では冷却液温を降下させることだけにより冷却能力を増大させている。このように、曲線のB-C間の点を右側へ移すにはより大きな冷却能力を必要としているため、冷却液温を一定に保つことにより安定すると思われる。

(2) 論文中の図2～4の測定点に矢印で示したように、各測定条件毎に2回だけ測定を行った。したがって、飛躍開始点の再現性あるいは条件を正確に把握するには充分ではないかもしれないが、各々2回ずつの測定結果では、飛躍開始点は比較的類似の値を示していること、および各有機物質について定性的傾向が一致していることから、本論文の目的に対しては十分なものと判断した。

付図1

(3) 定量的な測定は行っていない。滴状から膜状へ移行した直後に凝縮面温度を上昇させる場合では膜状状態が持続され続け、その後、急激に液膜が除かれ滴状状態に戻ることを観察した。したがって、この場合には膜から滴への飛躍が現れると思われる。そのときの過冷度は、膜状に到達するときに比べてかなり小さな値であった。