

# 凝縮時の熱伝達に関する研究 (第2報)

水平下向きの焼結合金面における凝縮熱伝達

石 神 重 男\*, 松 村 博 久\*\*

(受理 昭和 41 年 11 月 30 日)

## STUDIES ON THE HEAT TRANSFER BY CONDENSATION (Report 2)

Heat Transfer by Condensation on the Downward Surface  
of a Sintered Alloy Plate Horizontally Placed.

Shigeo ISHIGAMI\* and Hirohisa MATSUMURA\*\*

The influence of the difference between a smooth and a rough surface on the heat transfer by condensation of saturated steam are investigated experimentally. About a rough surface an experiment on a method for long continuation of dropwise condensation is made.

The results are obtained as follows:

(1) The coefficients of heat transfer by dropwise and filmwise condensation have no conspicuous difference respectively between a smooth and a rough surface in the region of this experiment.

(2) The surface of sintered alloy having enough condensing promoter keeps up the dropwise condensation for a long time.

### 1. 緒 言

凝縮時における熱伝達率は膜状凝縮よりも滴状凝縮の場合が数倍も良好なので、滴状凝縮の状態を持続させる研究が従来より行なわれている。Schmidt<sup>1)</sup>は各種の金属材料を鏡面仕上げすれば、その面上では滴状凝縮を起すと報告しており、Drew<sup>2)</sup>および Emmons<sup>3)</sup>は材料表面の研磨の仕方には無関係であり、凝縮促進剤なしでは滴状凝縮は生じないと述べている。また、勝田<sup>4)</sup>は滴状凝縮において凝縮面はあらいう方が単位時間にたいする凝縮水量は多く、しかも凝縮液滴の限界直径は大きくなることを調べている。このようにそれぞれの報告によつて相異なるのは、材料表面の清浄度合、凝縮促進剤の種類および凝縮促進剤の塗布厚さなどが滴状凝縮の形成および持続時間に影響を与えるものと考えられる。

前報において、筆者ら<sup>5)</sup>は滑面を有する水平下向きの銅製伝熱面を用いた場合の滴状凝縮ならびに膜状凝縮にたいする熱伝達の実験的研究を行なつた。その結果によると、滴状および膜状の凝縮時における蒸気側熱伝達率は冷却水流量、蒸気と伝熱板蒸気側表面との

温度差および熱負荷にほとんど関係なくほぼ一定値をとること、蒸気側熱伝達率は膜状凝縮に比較して滴状凝縮の場合が約4倍も大きいことなどがわかつた。

本報告は、含油焼結合金を伝熱面とすれば滴状凝縮が長期間保持でき、凝縮面として有効であろうということを用意して、水平下向きの多孔質焼結合金面を凝縮面とし、これに凝縮促進剤を含ませた場合と含まない場合について、滴状および膜状凝縮時の熱伝達の実験的研究を行なつた。実験結果にたいしてはおもに熱伝達におよぼす凝縮面の表面あらさの影響および凝縮促進剤の含有量による滴状凝縮の持続効果について検討した。

### 2. 実験装置および実験方法

実験装置ならびに実験方法はその大部分が前報<sup>5)</sup>と同様であり、前報にこれらの詳細な説明を行なつていたので、ここでは概要を述べる。

図1は実験装置の概略図である。ボイラで発生した水の蒸気は過熱器を通つて蒸気室にはいる。蒸気量は調節弁で制御し、蒸気圧力はマンメータの水柱ではかり、蒸気温度はベックマン温度計にて測定する。また冷却水は水量調節弁から測定部本体の冷却水路をへてせきより流出する。測定部本体は蒸気室、冷却水路、

\* 鹿児島大学工学部機械工学第二学教室・教授

\*\* 鹿児島大学工学部機械工学第二学教室・講師

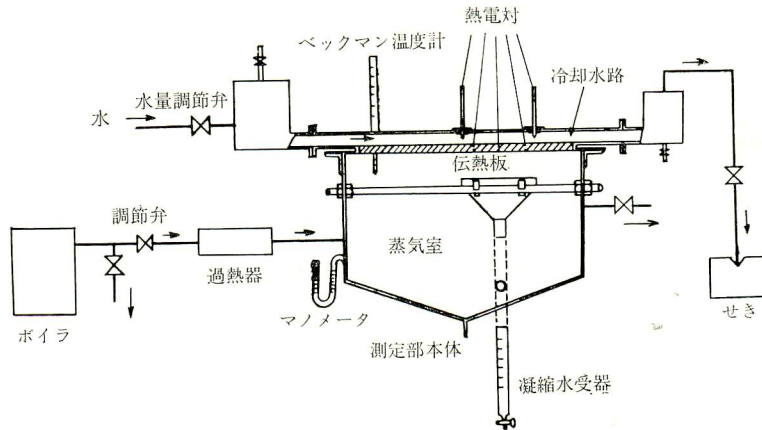


図1 実験装置概略図

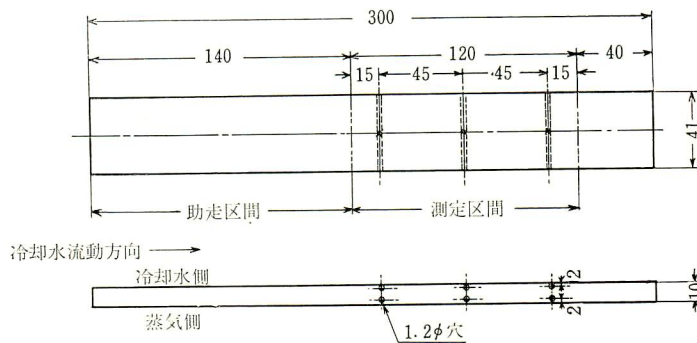


図2 焼結合金製伝熱板の詳細図

伝熱板および凝縮水受器などから構成されている。測定部における冷却水温度および伝熱板温度の測定には直径 0.25 mm の銅-コンスタンタン熱電対を用い、電位差はポテンシオメータと検流計にて測定した。

伝熱板の詳細は図2に示す。伝熱板は組成が銅約90%、亜鉛約10%の黄銅系焼結合金製であり、見掛け比重量は  $6800 \text{ kg/m}^3$  および空隙率は約20%である。伝熱板の冷却水上流端から140 mmは流路の助走区間とし、測定部はその下流に120 mmとつてある。測定部の冷却水上流端から15, 60および105 mmの3個所には蒸気側および冷却水側の伝熱板表面から2.0 mmのところに直径1.2 mmおよび深さ20.5 mmの孔を側方からあけ、そこに伝熱板表面温度検出用の熱電対が設置してある。

伝熱板はこれを石けん液で約10時間、つぎに水で約5時間しや沸して脱油乾燥したもの（以下は脱油状態という）について、つぎのような処理を行なった。

膜状凝縮の場合は伝熱板蒸気側表面を稀塩酸で洗って水で清浄にし、滴状凝縮の場合は水洗後表面をよく乾燥させてから凝縮促進剤としてのオレイン酸を表面にうすく塗布した。また、滴状凝縮の持続実験では伝熱板蒸気側表面にオレイン酸をうすく塗布した場合と伝熱板をオレイン酸の中に浸し、多孔質伝熱板の空隙にオレイン酸を  $0.196 \text{ gr/cm}^3$  ( $0.218 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ) 含有させた場合の二種類とした。

実験は蒸気過熱度が  $0.5 \sim 0.7^\circ\text{C}$ 、蒸気室内の圧力が大気圧より10 mmAqだけ大きくして定常状態のもとで行なった。実験範囲は冷却水入口温度  $15 \sim 19^\circ\text{C}$ 、冷却水流量  $0.36 \times 10^3 \sim 2.2 \times 10^3 \text{ kg/h}$  (冷却水流速  $0.24 \sim 1.3 \text{ m/s}$ ) および熱負荷  $1.0 \times 10^5 \sim 3.1 \times 10^5 \text{ kcal/m}^2\text{h}$  である。

### 3. 予備実験

#### 3.1. 焼結合金板の熱伝導率

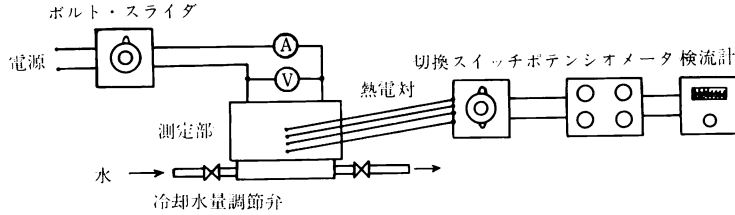


図3 熱伝導率測定装置の概略図

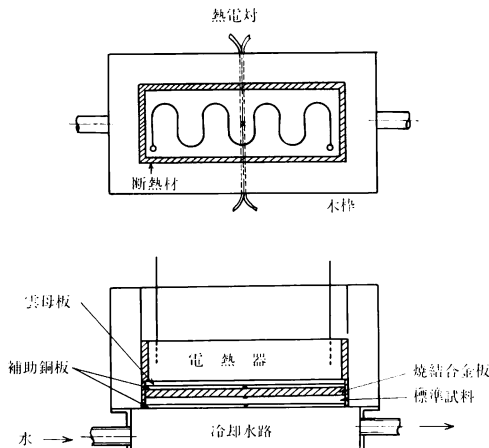


図4 測定部詳細図

測定装置の概略を図3に、測定部の詳細を図4に示す。熱伝導率の測定は比較法で行ない、標準試料には熱伝導率が20°Cにおいて320 kcal/mh°Cである長さ130 mm、幅50 mm および厚さ10 mm の銅板を用いた。標準試料と脱油焼結合金板を重ね合せ、その加熱側と冷却側には厚さ1.0 mm の銅板を補助におき、熱電対ひきだし用の溝は補助銅板に持たせて熱負荷の均一をはかった。またそれぞれの板はグリセリンの薄い膜で接着してある。測定方法は熱負荷を与える電圧および電流をボルト・スライダにより調節し、冷却用の水量を流量調節弁により調節して行なった。標準試料および脱油焼結合金板のそれぞれの両表面の温度差は定常状態になった時、直径0.2 mm の銅—コンスタンタン熱電対を用いてポテンシオメータと検流計で読みとった。

図4の実験装置から明らかなように、標準試料および脱油焼結合金板を通過する熱量は等しいので、それぞれの板の両表面温度差と熱伝導率の関係は、

$$\frac{\lambda_p}{\delta_p} \Delta T_p = \frac{\lambda_c}{\delta_c} \Delta T_c \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\delta_p = \delta_c = 1.0 \times 10^{-2}, \text{ m より}$$

$$\lambda_p = \lambda_c \frac{\Delta T_c}{\Delta T_p} = \lambda_c \frac{E_c}{E_p} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

$$\lambda_c = 320 [1 + 3.75 \times 10^{-4} (20 - T_m)]$$

ここに、

$E$ : 板の両表面の温度差による起電力, mV

$T_m$ : 板の平均温度, °C

$\Delta T$ : 板の両表面の温度差, °C

$\delta$ : 板の厚さ, m

$\lambda$ : 熱伝導率, kcal/mh°C

添字;  $c$ : 標準試料

$p$ : 焼結合金

脱油焼結合金板の熱伝導率の測定結果を表1に示す。この結果から、ここでは焼結合金板の熱伝導率の値として93 kcal/mh°Cを用いることにする。この値と表2に示す各種黄銅の熱伝導率<sup>6)</sup>を比較してみるとほぼ妥当な値と思われる。

表1 焼結合金板の熱伝導率の測定結果

	$T_m$ (°C)	$\lambda_c$ (kcal/mh°C)	$E_c/E_p$	$\lambda_p$ (kcal/mh°C)
1	65	315	0.295	92.9
2	103	310	0.300	93.0
3	147	305	0.304	92.7

表2 各種黄銅の熱伝導率<sup>6)</sup>

黄銅の種類	熱伝導率, kcal/mh°C	
	100°C	0°C
60Cu — 40Zn	104	90
90Cu — 10Zn	101	88
70Cu — 30Zn	94	91
67Cu — 33Zn	92	87

### 3.2. 蒸気凝縮面の表面あらさ

焼結合金製伝熱板および前報で使用した銅製伝熱板の蒸気凝縮面の表面あらさは、触針法電気式あらさ測定機により測定した。結果は図5および表3に示して

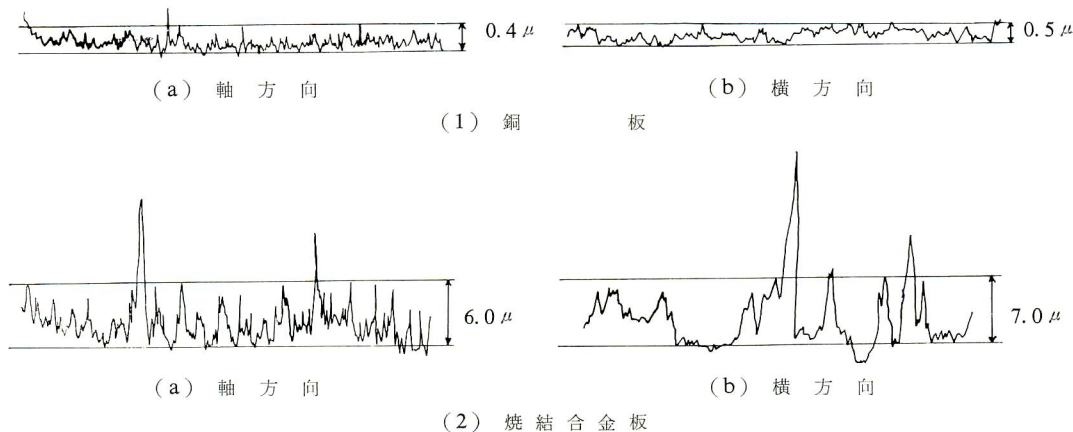


図 5 蒸気凝縮面の表面あらかの測定例

表 3 蒸気凝縮面の表面あらかの測定結果

伝熱板の種類	軸方向	横方向
銅	0.4 $\mu$	0.5 $\mu$
焼結合金板	6.0 $\mu$	7.0 $\mu$

いる。焼結合金製伝熱板の表面あらかは銅製伝熱板の表面あらかの約 15 倍である。銅製伝熱板の表面は 06 のエメリーパーで鏡面仕上げがしてあるのにたいして、焼結合金製伝熱板の表面は図 6 に示す顕微鏡写真の一例をみるとわかるように、種々の形と大きさの空隙が存在している。

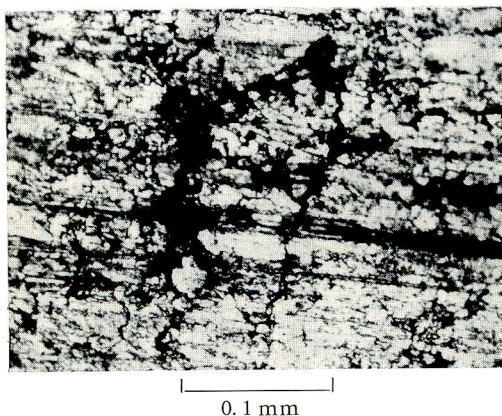


図 6 焼結合金板表面の顕微鏡写真の一例

### 3.3. 焼結合金板の空隙率

焼結合金板を石けん液で約 10 時間、その後水で約 5 時間しや沸して脱油乾燥したものから、つぎの方法にて空隙率を算出してみた。

(1) 見掛け比重量から求める方法 伝熱板は組成が銅約 90%，亜鉛約 10%の焼結合金であることより、九一黄銅（銅 90%，亜鉛 10%）の比重量が 8800 kg/m<sup>3</sup> なので、  
(空隙率)

$$= \frac{(\text{九一黄銅の比重量}) - (\text{脱油焼結合金板の比重量})}{(\text{九一黄銅の比重量})}$$

$$= \frac{8800 - 6800}{8800} = 0.227$$

(2) オレイン酸を含有させた量から求める方法  
体積 71.5 cm<sup>3</sup> の脱油焼結合金板の空隙に含有させたオレイン酸の量は 15.6 cm<sup>3</sup> であったことから、

$$(\text{空隙率}) = \frac{(\text{含有したオレイン酸の体積})}{(\text{脱油焼結合金板の体積})} = \frac{15.6}{71.5}$$

$$= 0.218$$

以上の結果から、空隙率は約 20% とした。

## 4. 実験結果

### 4.1. 凝縮時の熱伝達率

はじめに脱油焼結合金面について、前報と同様な滴状ならびに膜状の凝縮についての実験を行なった結果を述べる。

伝熱板表面温度（蒸気側表面温度  $t_{ps}$ ，冷却水側表面温度  $t_{pw}$ ）は測定した伝熱板内の温度勾配から算出されるので、それと冷却水流量  $G_w$  との関係について、滴状凝縮の場合を図 7 に、膜状凝縮の場合を図 8 に示す。滴状凝縮および膜状凝縮のいずれの場合も冷却水流量が増加するにしたがつて伝熱板蒸気側表面温度はさがり、伝熱板両表面の温度差は大きくなつてい

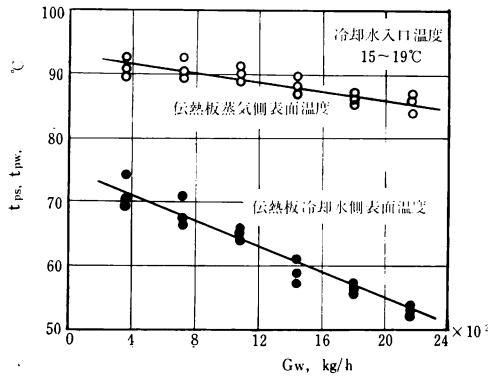


図7 滴状凝縮における伝熱板表面温度と冷却水流量の関係

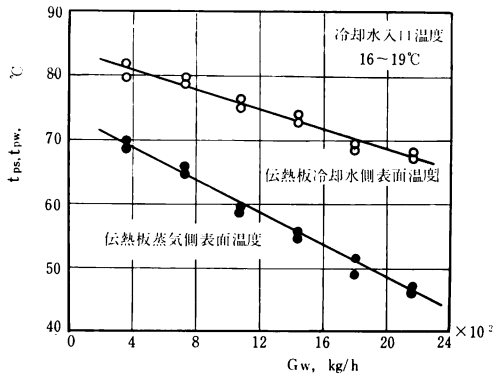


図8 膜状凝縮における伝熱板表面温度と冷却水流量の関係

る。

熱負荷の算出は前報と同様に凝縮水量から算出したのは参考にして伝熱板内の温度勾配から求めた。図9は冷却水流量にたいする滴状凝縮および膜状凝縮の熱負荷  $q$  を示す。

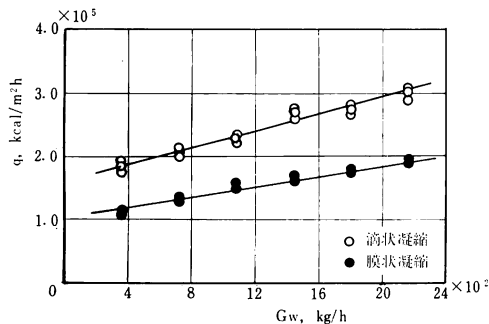


図9 熱負荷と冷却水流量の関係

図10は蒸気側熱伝達率  $\alpha_s$  と冷却水流量の関係、

図11は熱負荷と温度差（蒸気温度と伝熱板蒸気側表面温度の差） $\Delta T$  の関係、図12は蒸気側熱伝達率と温度差の関係および図13は蒸気側熱伝達率と熱負荷の

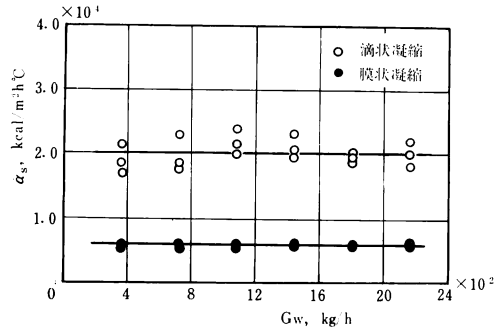


図10 蒸気側熱伝達率と冷却水流量の関係

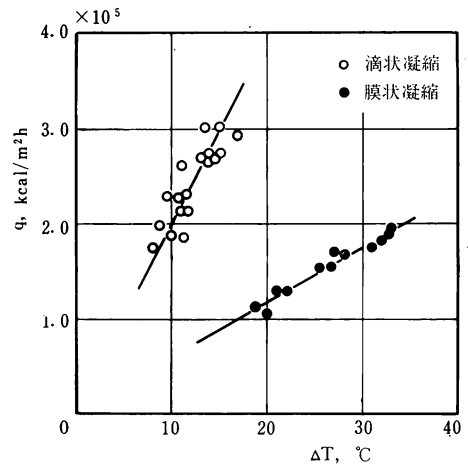


図11 熱負荷と温度差の関係

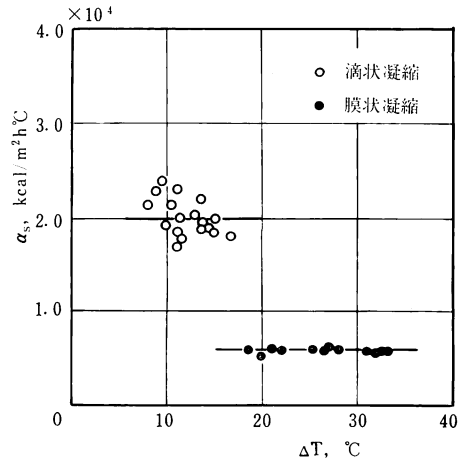


図12 蒸気側熱伝達率と温度差の関係

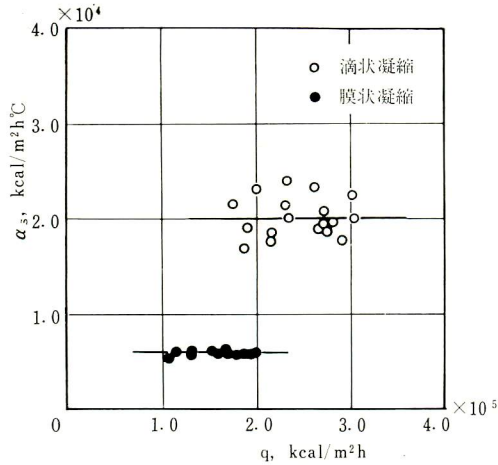


図13 蒸気側熱伝達率と熱負荷の関係

関係について滴状凝縮と膜状凝縮の両方をいつしよに示している。図から明白のように滴状凝縮および膜状凝縮ともに蒸気側熱伝達率は冷却水流量、蒸気と伝熱板蒸気側表面の温度差および熱負荷にほとんど関係なくほぼ一定値をとっている。また、滴状凝縮時の蒸気側熱伝達率は膜状凝縮に比較して約4倍も良好である。

#### 4.2. 滴状凝縮の持続性

つぎに滴状凝縮の持続実験を行なったのでその結果をのべる。時間の経過にともなう滴状凝縮の様相の変化の写真観察したものを図14に示す。これは伝熱板蒸気側表面に凝縮促進剤としてオレイン酸を一面にうすく塗布した場合である。

最初は接触角が大きくて限界直径3~4mmの凝縮滴が多数発生しているが、4~5時間経過後には凝縮滴の限界直径がやや増して5~6mmとなり接触角が少し小さくなってくる。この頃まで凝縮滴は他の凝縮滴との接触合体により動きまわっているのがみられる。10時間後には凝縮滴は接触角の小さい扁平な形になり、ほとんど一定の場所にとどまって成長し、限界直径に達すると落下している。20時間前後の凝縮滴はさらに接触角が小さくなって扁平の度合を増し、凝縮滴の形状はやや明確でなくなり、凝縮滴の限界直径は約10mmになつて滴の数を減少している。また凝縮滴が落下した後も水膜が残るのが観察された。以後はこのような状態が相当時間続くようである。図15は写真から測定した限界直径 $D_c$ と経過時間 $T$ のおおよその関係を示している。

脱油焼結合金板の空隙に凝縮促進剤としてオレイン

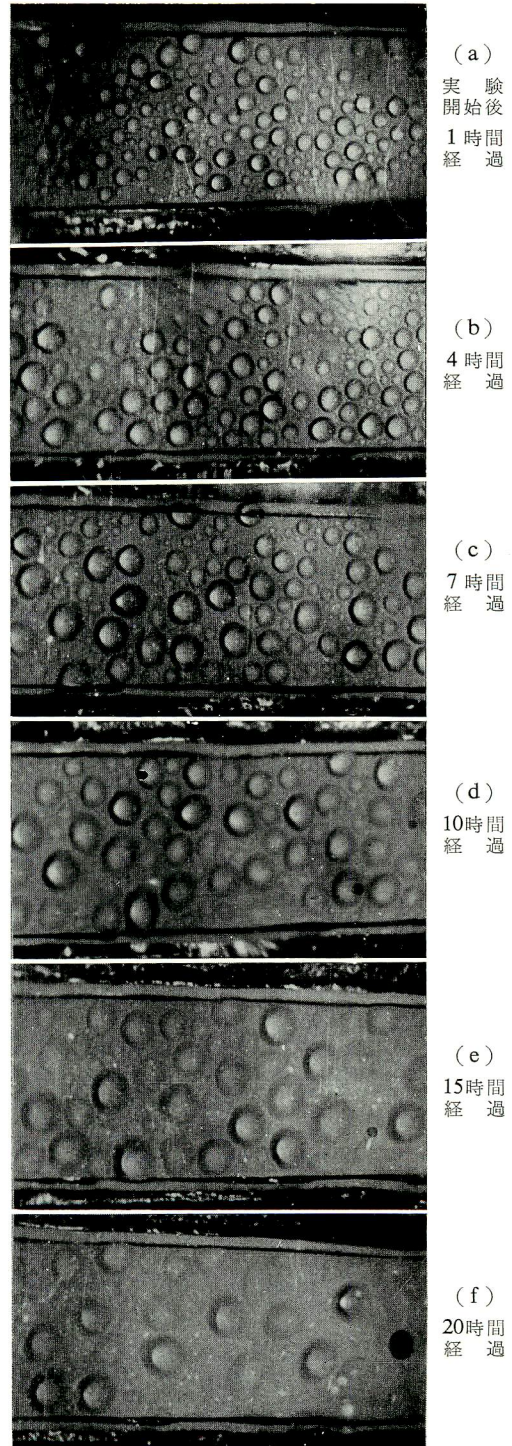


図14 滴状凝縮の様相の変化

酸を  $0.196 \text{ gr/cm}^3$  ( $0.218 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ) 含有させての滴

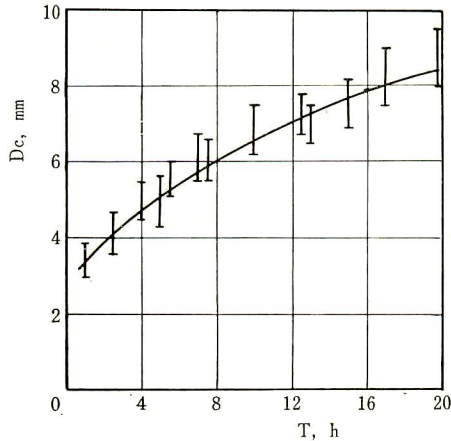


図15 凝縮滴の限界直径と経過時間の関係

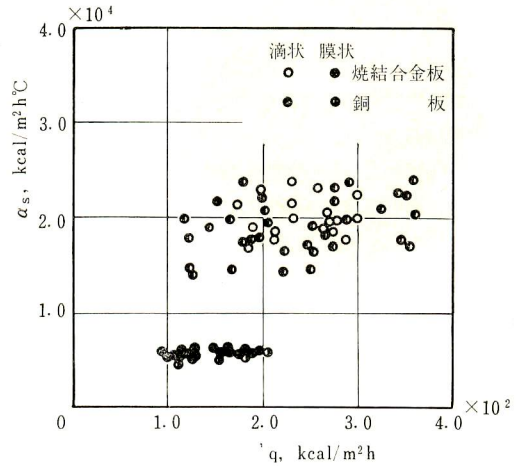


図18 蒸気側熱伝達率と熱負荷の関係

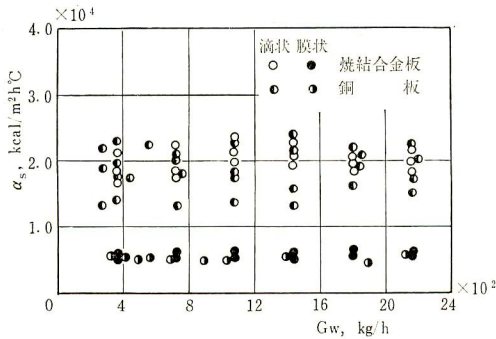


図16 蒸気側熱伝達率と冷却水流量の関係

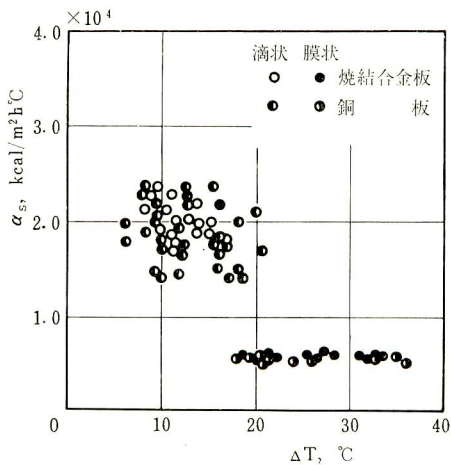


図17 蒸気側熱伝達率と温度差の関係

## 5. 考 察

焼結合金板の粗面と前報の銅板の滑面との比較を行なつてみる。図16は蒸気側熱伝達率と冷却水流量の関係、図17は蒸気側熱伝達率と温度差の関係および図18は蒸気側熱伝達率と熱負荷の関係を示しているが、粗面および滑面ともに同様の傾向を表わすとともに、蒸気側熱伝達率は冷却水流量、蒸気と伝熱板蒸気側表面の温度差および熱負荷には無関係にほぼ一定値をとっている。その一定である絶対値もこの実験範囲では凝縮面の表面あらさの影響について顕著な差異が認められないようである。

滴状凝縮促進剤の塗布について、Emmons<sup>9)</sup>は促進剤の厚さは2分子層が最適であつて、過剰な促進剤は速かに洗い流されてしまうと報告している。このことより促進剤の塗布厚さは凝縮状態に大きな影響を与えないであろうが、図14の滴状凝縮持続の実験結果でわかるように、時間の経過にともない促進剤が洗い流され、促進剤の効果がなくなつてくると凝縮滴の接触角が小さくなり、凝縮滴の形は扁平となるので促進剤の途中供給が必要となる。しかしながら、焼結合金板の空隙に促進剤を十分に含有させた場合のような方法を用いることにより、焼結合金板凝縮面があらいで滑面よりも表面積は増加するために蒸気凝縮における時間経過につれての促進剤の流失を極度に防ぐことができ、しかもわずかながらでも促進剤の自然供給とすることができるので、相当な長時間滴状凝縮を持続することが可能であろう。

状凝縮持続についての実験を行なつた結果は、実験開始後約70時間経過したときでも凝縮状態は最初の様子とほとんど変化がないことが認められた。

## 6. 結 言

水平下向きの焼結合金面における凝縮時の熱伝達についての実験的研究を行なったことより、つぎのような結果が得られた。

(1) 前報で述べた滑面を有する銅製伝熱面における熱伝達の実験結果と同様に、滴状凝縮および膜状凝縮いずれの場合にも、蒸気凝縮時の熱伝達率は冷却水流量、蒸気と伝熱板蒸気側表面の温度差および熱負荷にほとんど関係なくほぼ一定値をとる。そして、滴状凝縮の蒸気側熱伝達率は膜状凝縮の場合に比較して約4倍も大きい。

(2) 本実験範囲において、滴状凝縮 および膜状凝縮ともに凝縮面の表面あらさの影響は顕著に認められない。

(3) 脱油焼結合金製伝熱面に凝縮促進剤としてオレイン酸をうすく塗布した場合は、蒸気凝縮における時間の経過につれて滴状凝縮の状態が次第にくづれて膜状凝縮に移行してしまう。しかし、焼結合金板の空隙にオレイン酸を十分に含有させた場合は、滴状凝縮状態が相当な長期間にわたって持続するようである。

本研究に際し、援助を受けた田中義弘助教授ならびに玉利賢一助教授および材料を提供して下さった日本

オイレス株式会社に謝意を表わします。また実験に協力をえた仮屋崎侃、牧田九十九および鰐坂等の諸氏に感謝します。

## 文 献

- 1) E. Schmidt, W. Schurig und W. Sellschopp : Versuche über die Kondensation von Wasserdampf in Film-und Tropfenform, Tech. Mech. u. Thermodynamik, 1(1930—2), 53.
- 2) T. B. Drew, W. M. Nagle and W. Q. Smith : The Conditions for Dropwise Condensation of Steam, Trans. Amer. Inst. Chem. Engrs., 31 (1935), 605.
- 3) H. Emmons : The Mechanism of Drop Condensation, Trans. Amer. Inst. Chem. Engrs., 35 (1939), 109.
- 4) 勝田・竹内：凝縮熱伝達の基本的研究（第1報）滴状凝縮におよぼす凝縮面粗さの効果，日本機械学会第41期全国大会前刷集 No. 98 (1963—10)，127.
- 5) 石神・松村・他 二名：凝縮時の熱伝達に関する研究（第1報）水平下向きの滑面における凝縮熱伝達，鹿児島大学工学部研究報告，6 (1966—9)，37.
- 6) A. I. Brown and S. M. Marco : Introduction to Heat Transfer, 3rd Edition, (1958), 13, McGraw-Hill Book Company, Inc.