# 冷媒 R-22の水平管内蒸発熱伝達

Evaporating Heat Transfer of Refrigerant R-22 inside Horizontal Tubes

高橋豊吉\*細田泰生\* 埋橋英夫\* Toyokichi Takahashi Taisei Hosoda Hideo Uzuhashi

## 内 容 梗 概

小形空調機の一つであるルームクーラには、冷媒蒸発器として一般にクロスフィン形熱交換器が使用されている。効率の良い蒸発器を設計するためには空気側と冷媒側の熱伝達特性を十分は握しておく必要がある。しかるに後者の冷媒蒸発熱伝達については正確な値が知られていない。本報告は水平管内で冷媒 R-22 が蒸発流動するときの熱伝達率を実験的に求めたものである。

#### 1. 緒 言

ルームクーラに使用されている蒸発器は,内径が8mm 前後の水平管内の冷媒と,パイプ外に取りつけたフィン の間を流れる空気との間で熱交換を行なわせて,内部の 液冷媒の蒸発により空気の冷却,除湿作用をするもので ある。

すでに報告した「ルームクーラ用フィン形熱交換器<sup>(1)</sup>」では空気 とフィンとの熱伝達に関する実験を行ない、「フィン形熱交換器の



第1図 ルームクーラ用蒸発器

過飽和域 飽和域 / 温频域

熱貫流率<sup>(2)</sup>」では熱交換器の性能に及ぼす因子について検討した。 また「冷媒 R-22の水平管内凝縮熱伝達<sup>(3)</sup>」においては管内凝縮冷 媒および過熱ガス冷媒と管壁との間の熱伝達について述べた。

冷媒が水平管内で蒸発している場合の熱伝達についてはすでに若 干の文献があり, Ashley 氏<sup>(4)</sup>, Witzig 氏<sup>(5)</sup>, Boling 氏<sup>(6)</sup>, 手塚氏<sup>(7)</sup> らが R-12 について, また Baker 氏<sup>(8)</sup>, Altman 氏<sup>(9)</sup>らが R-22 に ついて実験結果を報告している。しかしルームクーラの蒸発器のよ うに水平細管内を強制流動するような場合についての実験資料は少 なく, ただちに現在の熱交換器の性能改良に役立てることは困難で ある。

本報告は,冷媒 R-22 が小径の水平管内をルームクーラ用蒸発器の使用状態に近い状態で蒸発して流れているときの熱伝達率を測定したものである。

#### 2. 冷媒の蒸発

ルームクーラの蒸発器は第1図のような外観をしており、パイプ 内を流れる冷媒と、表面のフィンの間を流れる空気との間で熱交換 を行なう構造になっている。この蒸発器はパイプ内径 7.9 mm、水平 長さ 540 mm、冷媒管段数 16 本、パイプ肉厚 0.8 mm の寸法である。

第2図は凝縮器から出た冷媒が蒸発器内で蒸発し、過熱状態で圧 縮機にはいるまでの冷媒状態線図を示すものである。④は凝縮器出 ロにおける冷媒状態であり、キャピラリチューブ(細孔抵抗管)で減 圧されて⑧で蒸発器にはいる。蒸発器内における冷媒状態変化の過 程は明確でないが、本実験および内田氏ら<sup>(10)</sup>の観察によれば、キャ ピラリチューブから出た直後の冷媒はフラッシュガスと大粒子の液 滴の混合流 (Mist Flow) である。それが重量および表面張力の大 きい液冷媒が管内壁に付着しその中心を蒸発したガスが流れる環状



第2図 冷媒状態線 図

给了 1	±:	THE	1
<b>新</b> 1	K	(四)	汜

	280	1	1991	
•	122.3	<u> </u>	440	

囲

項			目 単 位		住	様	
蒸	発	圧	カ	kg/cm <sup>2</sup> G	5.3~	~5.5	
蒸	蒸 発 温 度		C	5.9~6.8			
冷	媒 流 量		kg/h	kg/h 24~72			
熱	密		度	kcal/m <sup>2</sup> h	3,500~300,000		
乾	き度		度		0.2~1.0		

行なわれて完全ガスの状態で圧縮機にはいってゆく。

#### 実験方法および装置

3.1 実験方法

熱伝達率の測定には温水加熱による二重水平管蒸発器を使用し, その前後に2台の予備蒸発器を設けて任意の乾き度において実験を 行なった。実験範囲は第1表のとおりである。

流 (Annular Flow) となる( <sup>©</sup> )。 蒸発が進むにつれて内壁をおお	3.2 单一二重管測定装置
っている液膜の厚さが薄くなり,ガス,液膜のスピードは大きくな	熱伝達率を測定するために第3図のような内管を冷媒,外管を温
る(①)。さらに乾き度が1に近い®になるとガスのスピードが急激	水が流れる水平管を製作し,熱の漏えいを少なくするために断熱性
に増加し、壁面から液冷媒が吹出し細粒滴となり中心部のガスと一	能の高い硬質ウレタンフォームで全体をおおった。冷媒流動状態を
緒に流れる。普通の使用状態においては蒸発器の出口直前に液冷媒	観察するため内径の異なった3本の硬質ガラス管を測定管と平行に
の蒸発はすべて完了し, 若干の過熱が出口 🖻に至るまでの過熱域で	取り付けバルブで切り換えられるようにした。測定管内の冷媒蒸発
* 日立製作所栃木工場	温度は両端部の圧力を測定してその飽和温度によって確認した。

評 77

日

論

第47卷第11号



圧力は手動膨張弁により調節した。二重測定管の入口乾き度が任意 に得られるよう一次蒸発器の蒸発量を制御した。一次蒸発器は内管 を冷媒,外管を温水が流れる 5.5 m の二重管を4巻してウレタンフ オーム断熱したもので蒸発熱量は温水で制御できる。また二次蒸発 器は一次蒸発器と同一の構造であり,一次蒸発器,測定管で蒸発し なかった液冷媒を完全にガス化させる働きをする。

3.4 多段測定管

単一測定管の結果を確認するために第5図のような多段の二重管 からなる全域測定管を製作した。各段の入口,出口部に温水,管壁, 冷媒の温度測定用に熱電対を取り付けてある。全体はやはり硬質ウ レタンフォームで断熱絶縁されている。

### 4. 実験結果とその検討

#### 4.1 冷媒流動状態

第1図に示したルームクーラの蒸発器にガラス管を取り付けて, 実際に空気を冷却しているときの冷媒流動状態を観察した(冷媒流 量約45 kg/h)。ルームクーラの減圧機構は内径1.2 mmのキャピラ リチューブであるが、吐出直後の蒸発器入口状態は第6図のように





第8図 蒸 発 器 後半

次に第4図の測定管の所に管内径が5,8,11mmの水平ガラス管 を取り付けて冷媒流動状態を観察した。その結果は第9図に示した ように冷媒流量が24 kg/hと低くても、管内径が小さい場合には環 状流であるが,管内径が大きくなると管底に液冷媒がたまって流れ, その上部をガスが流れる層状流(Wave+Mist Flow)になる。管内 径が小さくても流量が非常に小さければ、液とガスが分離して層状

液冷媒の中にガスが混合した流れである。それが入口から1/8ほど	流となる。第10図は内径5
の位置から第7図のような環状流となる。この環状流領域において	kg/h 前後の速さで流れると
は,最初のうち管全周をおおっている薄い液膜と中心部のガススピ	4.2 熱伝達率測定
ードは遅く、液膜の流れる様子も肉眼で観察することができる。蒸	第11図は温度測定の結果
発が進むにつれて液膜のスピードは大きくなり肉眼で見ることはで	冷媒流量 62.5 kg/h, 入口乾
きなくなる。第8図は出口から1/12の位置において乾き度が0.8前	測の冷媒温度と蒸発圧力から
後の状態である。	していることがわかる。また

mm および 8 mm の管内をそれぞれ 15 きの冷媒状態である。 の一例として, 蒸発圧力 5.3 kg/cm<sup>2</sup>G, き度 0.4 の場合を示したものである。実 ら換算した温度とはほとんど完全に一致 た温水温度・管壁温度とも上部のほうが

冷媒 R-22 の 水 平 管 内 蒸 発 熱 伝 達

(C)

主义

등필



パイプ内径 11.0mm





第10図 層 状 流





第9図 冷媒 流 動 状 態

第2表 熱 伝 達 率 計 算 例

			-		A COLUMN A C	And in case of the local division of the loc	and the second division of the local division of the			
	項 目	No. 単位	12	18	47	52	57	82	102	115
次	加熱水量	kg/h	104.5	47.9	0	109.8	38.2	45.0	0	81.9
蒸	出入口水温度差	deg	16.8	15.8	0	17.8	10.7	8.5	0	11.9
<b></b>	熱量	kcal/h	1,760	756	0	1, 953	408	382	0	975
二次	加熱水量	kg/h	20.4	97.8	118.0	114.0	43,8	61.5	65.7	10.5
蒸	出入口水温度差	deg	14.6	15.8	18.9	6.7	8.8	5.9	10.1	16.2
<b>発</b> 器	熱量	kcal/h	298	1, 543	2, 234	762	385	363	664	170
	加熱水量	kg/h	88.1	64.4	97.8	35.9	45.3	49.1	42.5	62.9
	出入口水温度差	deg	9.0	10.2	6.5	1.8	13.7	13.2	15.4	2.8
洲	全 熱 量	kcal/h	793	656	636	65	620	648	655	176
0.14	平均壁温度	°C	8.8	7.8	11.7	8.8	11.7	11.8	12.0	9.1
	冷媒温度	°C	5.2	3.9	5.7	7.2	6.8	6.8	4.9	6.1
	冷媒-壁温度差	deg	3.6	3.9	6.0	1.6	4.9	5.0	7.1	3.0
	高位水温度	°C	24.5	26.8	18.6	25.1	24.9	23.6	25.9	23.5
定	低位水温度	°C	18.6	20.4	14.5	23.9	16.0	15.3	16.0	21.7
	加熱水温度差	deg	5.9	6.4	4,1	1.2	8.9	8.3	9.9	1.8
	熱 量	kcal/h	425	413	400	43	403	407	405	113
	熱 密 度	kcal/m <sup>2</sup> h	22, 800	22, 200	21,500	23, 200	21,600	22,000	21,800	6,080
管	熱伝達率	kcal/m²h deg	6, 380	5,680	3,600	1,490	4,380	4,420	3,060	2,030
	入口乾度		0.81	0.55	0.21	0.94	0.48	0.73	0.24	0.9
	出口乾度		0.87	0.56	0.28	0.99	0.73	0.80	0.30	0.9
	平均乾度		0.84	0.56	0.25	0.97	0.61	0.76	0.27	0.9
総	熱 量	kcal/h	2, 851	2, 955	2, 870	2, 780	1, 413	1, 393	1, 319	1, 321
冷	媒 流 量	kg/h	68.3	71.2	70.9	68.7	33.0	32.8	30.3	31.2



第11図 温度測定結果例
ここに、a<sub>R</sub>:冷媒熱伝達率 (kcal/m<sup>2</sup>h deg)
Q:蒸発伝熱量 (kcal/h)
A:測定管内面積 (m<sup>2</sup>) *F*<sub>w</sub>:測定管平均温度 (℃) *T*<sub>R</sub>:冷媒温度 (℃)
管内壁温度 *T<sub>w</sub>* は管外温度で代用しているが、

内外の温度差は Takob の変形式<sup>(11)</sup>を用いれば本 実験範囲では外周温度の 0.1% 以下であり問題な い。第11 図 のような測定結果より(1)式を用い て熱伝達率を計算した例を第2表に掲げた。

 405
 113
 冷媒流量 68~72 kg/h,および 30~33 kg/h,熱

 21,800
 6,080
 30
 6,080

 3,060
 2,030
 密度 20,000~23,000 kcal/m²h とほぼ一定の条件

 0
 0.24
 0.94
 での熱伝達率を求めて、乾き度との関係で整理し

 0
 0.30
 0.99
 こス7
 0.96

 1,319
 1,321
 1,321
 日蒸発器においては乾き度が 0.3 より大きい所で

 30.3
 31.2
 運転されるが、本実験においては実験可能の 0.2

 変度が一定の場合には、乾き度が 0.2 から 0.9 まで大きくなるにつ

 れて熱伝達率は若干増加し、0.9 以上になると急激に低下している。

 0.2 から 0.9 の間においては冷媒の観察結果からもわかるように管

 内壁全間が液冷媒でおおわれており、その液膜内で気泡発生あるい

 は液のかく乱対流が生じているので非常に熱伝達率は高い。乾き度

 が0.9に近ずくにつれて蒸発したガス冷媒のスピードが大きくなり、

若干高いがこれは加熱水の流れ方が一様に乱れなかったためと考え 密度かられる。各部分の温度としては上下の平均値を取ったものである。 れて熱冷媒と管壁との間の熱伝達率は,実験により次式で求めることがで 0.2 からきる。  $\alpha_R = \frac{Q}{A(T_W - T_R)}$  .....(1) れ液のが0.90



液膜の乱れを促進するとともに液膜の厚さが薄くなり熱伝達は向上 する。

乾き度が0.9以上になると第2図 回点のようにもはや管内壁全周 を液膜がおおわなくなり、有効伝熱面積が減少してくるためみかけ 上の熱伝達率は低下する。このような状態においては、ガス冷媒中 を運ばれる微細な液滴が乾き壁面に衝突して瞬時に蒸発する現象を 呈するものと考えられるが、それは常に一定したものではなく本 実験においても実験値のバラツキが非常に大きかった。 乾き度が 0.2~0.9の間で熱密度のみ変えて平均熱伝達率を求め、熱密度との 関係で整理すると第13図のようになった。これより冷媒流量が一 定のときは熱伝達率は熱密度 qの 0.6 乗に比例することがわかる。

次に冷媒流量を変えて実験を行ない、熱密度が同程度の熱伝達率 のみを抽出して整理すると、第14図のように熱伝達率は冷媒流量の 0.3 乗に比例することがわかる。第13,14 図の結果より次の実験式 が得られる。

 $\alpha_R = 3.85 \ G_R^{0.3} q^{0.6}$  $(0.2 < x < 0.9) \dots (2)$ 単一測定管で得られた各実験値と(2)式による計算値と比較し て,第15図に示した。これより±15%のバラツキ範囲内で実験式 (2)が成立することがわかる。 一般に、 蒸発沸騰時の伝熱機構は加熱壁面に発生した気ほうの成 長によるものといわれ、その観点から伝熱量の大小は気ほう成長の 大きさを左右する壁温と流体との温度差の関数となる。自然沸騰に おける代表的な実験によれば, 西川氏<sup>(12)</sup>, Levy 氏<sup>(13)</sup>, Rohsenow ると報告されている。本実験においては実験式(2)を変形すると

 $q=29. G^{0.75} (T_W - T_R)^{2.5}$  .....(3) となり、伝熱量は温度差の2.5乗に比例していることになる。また自 然沸騰でも強制流動沸騰でもある温度差以上になると熱密度の増加 が停止するバーンアウト点が存在するものである。本実験において は温度差の最大が11 deg でありバーンアウト点は見られなかった。

#### 4.3 多段測定管による確認

ルームクーラ用蒸発器の冷媒管は第1図に示したように多段にな っている。そこで前項で得られた単一測定管の結果が多段の場合に おいても成立するかどうかの確認実験を行なった。第5図のような 多段蒸発器を第4図の一次蒸発器,単一測定管,二次蒸発器の代わ りに設置し,膨張弁から出た冷媒を直接下部から通して蒸発させた。 各段の乾き度変化,熱密度,熱伝達率の測定結果の一例は第16図 に示すとおりとなった。図中点線で示した熱伝達率の値は各段の平

均熱密度 q の値を単一管の実験式(2)に代入して求めたものであり 良く一致している。

また過熱ガス式の熱伝達率は一般に管内を流れる完全流体の熱伝 達率を求める次式(4)より計算できることを冷媒凝縮熱伝達の実験

で確認している。





と計算値とほぼ一致していることがわかった。

#### 5. 結 言

直径 7.9 mmの水平銅管内で蒸発する冷媒 R-22の熱伝達率を測 定した結果を要約すると次のとおりである。

- (1) ルームクーラ用蒸発器の大部分は管内壁面を液冷媒,中心 部をガス冷媒が流れる環状流である。
- (2) 乾き度が 0.2 から 0.9 までの環状流領域においては乾き度 の増加とともに熱伝達率は若干増大し、その平均値は  $\alpha_R = 3.85 \ G^{0.3} \ q^{0.6}$

 $(24 \sim 72 \text{ kg/h}, 3,500 \sim 30,000 \text{ kcal/m}^2\text{h})$ 

により算出できる。

終わりに本研究にあたってご指導,ご助言をいただいた東京大学 内田教授にお礼申し上げる。

#### 考 文 献 参

- 松村, 埋橋: 日立評論 44, 1228 (昭 37-8) (1)
- (2)松村, 埋橋: 日立評論 45, 886 (昭 38-5)
- (3)高橋, 埋橋: 日本機械学会講演会前刷集 722, 73 (1964)
- (4)C. Ashley: A. S. R. E., 50, 89 (1942)
- W. Witzig: A. S. R. E., 56, 153 (1948) (5)
- C. Boiling: A. S. R. E., 61, 1338 (1953) (6)
- 手塚: 日本機械学会講演会前刷集 705, 107 (1962) (7)
- M. Baker: A. S. H. R. A. E., 4, 83 (1959) (8)
- (9)M. Altman: Trans, A. S. M. E., 82, 189 (1960)

#### 第16図 多段測定結果例

- ν: ガス冷媒動粘性係数 (m<sup>2</sup>/h)
- Pr: ガス冷媒プラントル数

本実験においても乾き度が 1.0 以上の過熱ガス域において実験値

- 内田,山口: 日本伝熱シンポジウム 2, 149 (昭 40-5) (10)
- (11)大賀: 伝熱諸論とその適用 43 (1931)
- (12) 西川: 日本機械学会誌 64, 43 (昭 36-1)
- (13) S. Levy: Trans, A. S. M. E., 81, 37 (1959)
- (14) W. Rohsenow: Trans, A. S. M. E., 74, 969 (1952)
- Forster-Zuber: A. I. Ch, E., 1, 531 (1955) (15)
- С. Богданов: Хопобнгвнаю Техника 4, 40 (1964) (16)



従来永久磁石を用いたマイクロ波電子管のビーム集束装置として は第1図のような構成のものがあるが、NS両極磁片がそれぞれ1 個の磁性体ブロックを構成しているため,両永久磁石間に磁路を形 成し,互いに他を逆方向に磁化する力が働らき,永久磁石1個の場 合よりも自己減磁力が増大し損失が大きくなって十分なビーム集束



の対向両側に円錐リング状突起を設けることによって, 比較的軸対 称性がより強い集束磁界を得ることができるなどの特長を有するも のである。 (半田)

