

## 研究レビュー

日本冷凍空調学会論文集  
Trans. of the JSRAE  
Vol.31, No. 3 (2014)  
pp.245 ~256  
原稿受付:平成26年3月16日

## 冷媒/冷凍機油混合物の水平管内凝縮

## Flow Condensation of Refrigerant/Lubricant Mixture in Horizontal Tubes : A Review

野 津 滋\*  
Shigeru NOZU

岡山県立大学情報工学部スポーツシステム工学科 (719-1197 岡山県総社市窪木 111 番地)

Department of Systems Engineering for Sports

Faculty of Computer Science and Systems Engineering, Okayama Prefectural University

(111 Kuboki, Soja-shi, Okayama, 719-1197)

## Summary

A comprehensive review is presented for the flow condensation of conventional refrigerant/lubricant mixture in horizontal tubes. Previous studies on the local and average condensation heat transfer data are collected and integrated discussions are made using simple laminar film condensation theories. The lubricant shows the decrease in the condensation heat transfer coefficient with the increase of oil concentration at the tube inlet, and the decrease is marked in high vapor mass quality region where shear-controlled condensation is dominant. The heat transfer deterioration due to lubricating oil for microfin tube seems to be larger than that for smooth tubes. The effects of tube diameter and fin dimensions on the heat transfer performance can not be summarized clearly because the lack of relevant experimental results. It is required to accelerate research in this field, especially the characteristics in the enhanced tubes and minichannels for practical use.

**Key words:** Condensation, Two-phase flow, Heat transfer, Pressure drop, Refrigerant/Lubricant mixture

## 1 緒 言

冷凍機油の役割は圧縮機に良好な潤滑機能等を提供することである。冷媒と冷凍機油は共存状態でサイクル構成機器内を循環するため、冷凍機油（以下、「油」と略記する。）には高温域から低温域に至る広い温度範囲で相溶性をはじめ、いくつかの機能が求められる。それと同時に、油が凝縮器・蒸発器の流動伝熱特性に及ぼす影響を的確に把握することが重要になる。

水平管内凝縮の特徴は、熱伝達を支配する力学的な要因が凝縮の進行とともに変化することにある。質量速度が高い場合、管入口の高クオリティ領域では蒸気せん断力の影響により環状流が形成され液膜厚さは管周方向にほぼ一様になる。そして、凝縮の進行に伴うクオリティの低下が蒸気流速の減少と液流量の増大をもたらすため、重力の影響により管内面の上部に薄液膜が、下部に厚い液層が形成され熱伝達の低下を生じる。さらに、内面に微細な溝が多数加工されたマイクロフ

\*Fax:+81 866-94-2199 E-mail: nozu@ss.oka-pu.ac.jp

イン付管では、表面張力効果によりフィン上に形成される薄液膜が熱伝達を支配する。

冷媒/油混合物の管内凝縮に関する研究は古くからなされており、冷媒と油の組み合わせ、実験装置と実験方法、測定精度等さまざまであるが、熱伝達率は油の混入により低下すると認識されている。冷媒の凝縮に及ぼす油の影響を扱ったレビュー論文として、Gidwani *et al.*<sup>1)</sup>, Cavallini *et al.*<sup>2,3)</sup>, Shen-Groll<sup>4)</sup>, Dalkilic-Wongwises<sup>5)</sup>, Wang *et al.*<sup>6)</sup> などがあげられる。

本レビューでは、管の細径化とフィンの微細化・高密度化について油の影響が大きくなるとされる水平管内凝縮熱伝達を主として取りあげ、流動伝熱特性に及ぼす油の影響を調査するとともに、熱伝達の低下要因を簡単に考察する。なお、本レビューは水平な直管に限定し、Uベンドを含む管は扱わない。その理由は、冷媒/油混合物の直管内凝縮熱伝達特性が十分解明されてないことがある。

### 主な記号

$c_p$	定圧比熱
$d$	管内径、フィン根元における管内径
$e$	フィン高さ
$Nu$	ヌセルト数 = $hd/k_L$
$G$	質量速度
$g$	重力加速度
$h$	熱伝達率
$k$	熱伝導率
$p$	圧力
$T_s$	純冷媒の飽和温度、混合物の露点
$T_w$	伝熱面温度
$W$	流量
$w$	油の質量分率（濃度）
$x, x'$	クオリティ、式(4)
$\Delta h_v$	凝縮潜熱
$\beta$	らせん角
$\mu$	粘度
$\rho$	密度
$\sigma$	表面張力
$\phi_v$	二相流の摩擦増倍係数
$X_{tt}$	Lockhart-Martinelli のパラメータ
	添字

$L$	混合液
$o$	管入口
$oil$	液相内の油
$ref$	冷媒

## 2. 冷媒/油混合物の性質

冷媒/油混合物の凝縮を理解するためには、流動伝熱特性と密接に関係する混合物の相溶性と溶解性、混合物の熱力学的性質と輸送的性質、および相変化に伴う蒸気クオリティの計算法等の知識が必要になる。したがって、研究レビューに先立って、本章では相溶性および各種物理量に関する事項を簡単に説明する。

### 2.1 相溶性

相溶性は温度と圧力で定まり、二層分離するものから完全相溶するものに大別される。表1は冷媒との相溶性を示す<sup>7)</sup>。鉛油はナフテン系とパラフィン系に大別され、R12とR22のフロン系冷媒とともに炭化水素系冷媒との相溶性に優れる。ポリアルキルグリコール油(PAG)、ポリビニルエーテル油(PVE)およびポリオールエステル油(POE)は、鉛油やアルキルベンゼン油(AB)よりも相溶性が優れる。

図1はR410Aと2種類の合成油(POE, PVE)の二層分離温度曲線を示す<sup>8)</sup>。両者の油は高温側と低温側に二層分離域が存在し、溶解域はPVEの方が広い。

### 2.2 溶解性

図2の(a)はR134a/PAGとR134a/POE<sup>9)</sup>、(b)はR22/AB<sup>10)</sup>に関する圧力-質量分率-温度の測定結果を示す。図2は、たとえば質量分率と温度から蒸気圧が求まる線図であり、冷媒/油混合物を扱う際は、この線図を溶解度線図と呼ぶことが多い。図から明らかなことは、(1)蒸気圧は定温では油の質量分率の増大につれて低下すること、(2)蒸気圧に及ぼす質量分率の影響は冷媒と油の組合せに依存すること等である。溶解度曲線で注意すべきことは、凝縮を生じる温度範囲では、油は蒸発しないため、油は液相にのみ存在することである。凝縮熱伝達率を次式で定義する。

Table 1 Miscibility of Refrigerant-Lubricant Mixtures (JSRAE<sup>7)</sup>)

Refrigerant		Mineral Oil	Synthetic oil			
			AB	PAG	PVE	POE
HFC, HFO Refrigerants	R134a	×	×	○	○~◎	◎
	R1234yf	×	×	○	○~◎	◎
	R410A	×	×	○	○	○
	R407C	×	×	○	◎	○
	R404A	×	×	○	○	○
Natural Refrigerants	R744	×	×	○	○	○
	R600a	◎	◎	○~◎	◎	◎
	R290	◎	◎	○~◎	◎	◎
	R717	×	×	○	○	Unavailable

× immiscible, ○ bilayer separation, ◎ miscible

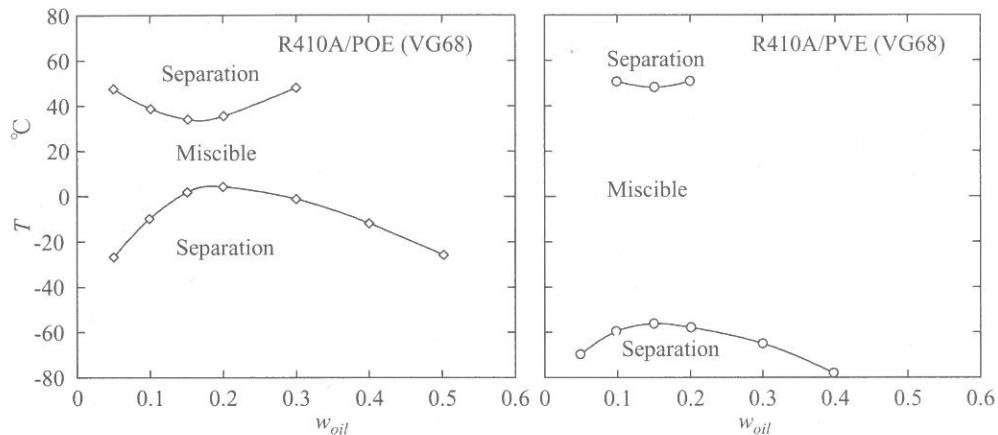
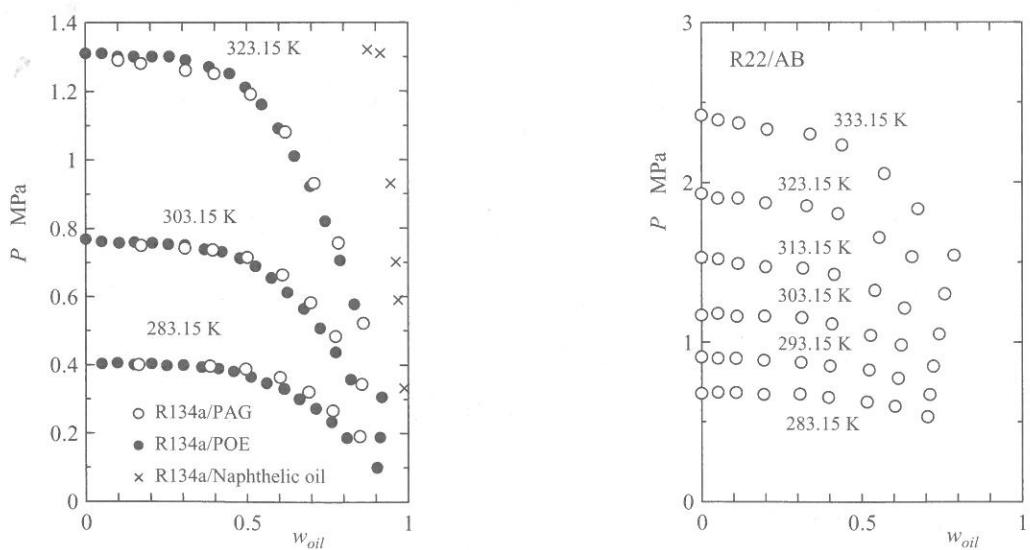
Fig. 1 Miscibility curves (Kaneko<sup>8)</sup>)(a) R134a/PAG, R134a/POE (Sato *et al.*<sup>9)</sup>)(b) R22/AB (Takaishi-Oguchi<sup>10)</sup>)

Fig. 2 Solubility of refrigerant/lubricant mixture

$$h = \frac{q}{(T_s - T_w)} \quad (1)$$

ここに、 $q$  は熱流束、 $T_w$  は伝熱面温度である。混合物の飽和温度  $T_s$  は油の影響を無視して純冷媒の値を用いる方法と混合物の溶解度曲線から定める方法がある。

### 2.3 クオリティの計算法

管内を流れる混合物について、油の断面平均質量分率  $w_o$  は次式で定義される。

$$w_o = \frac{W_o}{W_o + W_{ref,V} + W_{ref,L}} \quad (2)$$

ここに、 $W_o$  は油の流量、 $W_{ref,V}$  および  $W_{ref,L}$  はそれぞれ冷媒蒸気および冷媒液の流量である。油がすべて液相に存在すると仮定すれば、液相内の油の質量分率  $w_{oil}$  は次式で求まる。

$$w_{oil} = \frac{W_o}{W_o + W_{ref,L}} \quad (3)$$

油流量の影響を考慮する場合のクオリティを  $x'$ 、その影響を無視する場合を  $x$  とすれば、それぞれ次式から求まる。

$$x' = \frac{W_{ref,V}}{W_o + W_{ref,V} + W_{ref,L}} \quad (4a)$$

$$x = \frac{W_{ref,V}}{W_{ref,V} + W_{ref,L}} \quad (4b)$$

そして、2種類の定義によるクオリティは互いに次の関係がある。

$$x' = (1 - w_o)x \quad (5)$$

液相内における油の質量分率  $w_{oil}$  は管の入口における質量分率  $w_o$  とクオリティを用いて次式で求まる。

$$w_{oil} = \frac{w_o}{1 - x'} = \frac{w_o}{1 - (1 - w_o)x} \quad (6)$$

図 3 は式 (6) で表される液相内の油の質量分率  $w_{oil}$  とクオリティ  $x$  の関係について、管を流れれる油の質量分率  $w_o$  をパラメータとして示す。式

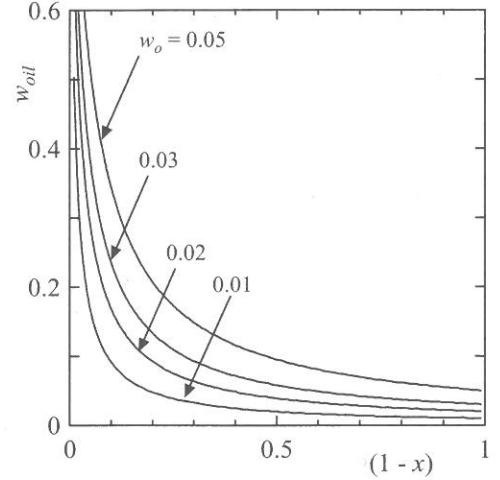


Fig.3 Variation of  $w_{oil}$  with  $(1-x)$

(6) は全ての油が液相に含まれると仮定しているため、凝縮二相流では低クオリティ領域で近似的に適用できる可能性がある。混合物の凝縮過程で油が液膜に取り込まれるプロセスは未解明であり、Cavallini *et al.*<sup>2)</sup> は高クオリティ領域で油の全量が液相に含まれることは考えられないことを指摘している。このことも考慮すれば、式 (6) から定まる  $w_{oil}$  は液相内における油の質量分率の最大値と見なせよう。また、高クオリティ領域では凝縮液流量が低いため、油の質量分率が高くなることも生じるであろう。

### 2.4 混合物の熱物性

はじめに、凝縮熱伝達率と熱物性値の関係を層流液膜モデルによる解析結果をもとに大まかに把握する。蒸気せん断力支配領域の熱伝達は次の特性を持つ<sup>11)</sup>。

$$h \propto k_L \left( \frac{U_\infty \rho_L}{\ell \mu_L} \right)^{1/2} \quad (7a)$$

ここに、 $U_\infty$  および  $\ell$  はそれぞれ代表速度および代表寸法である。同様に、重力支配領域では式 (7b) が<sup>11)</sup>、表面張力支配領域では式 (7c) が<sup>12)</sup>それぞれ成り立つ。

$$h \propto \left\{ \frac{k_L^3 \rho_L^2 \Delta h_v g}{\mu_L (T_s - T_w) \ell} \right\}^{1/4} \quad (7b)$$

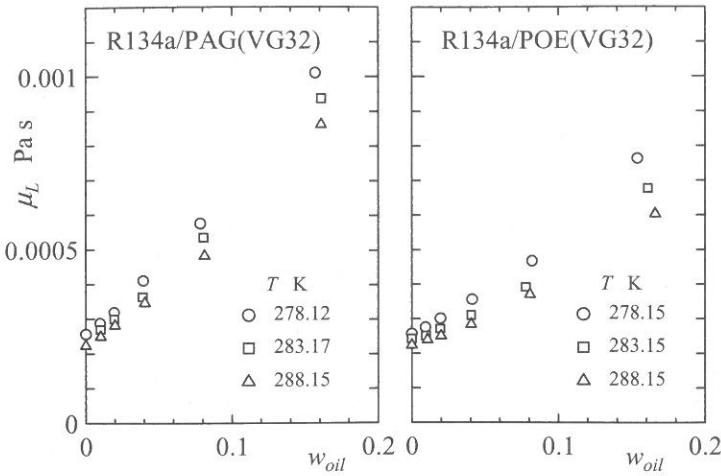


Fig. 4 Variation of  $\mu_L$  with  $w_{oil}$   
(Sato *et al.*<sup>13,14)</sup>)

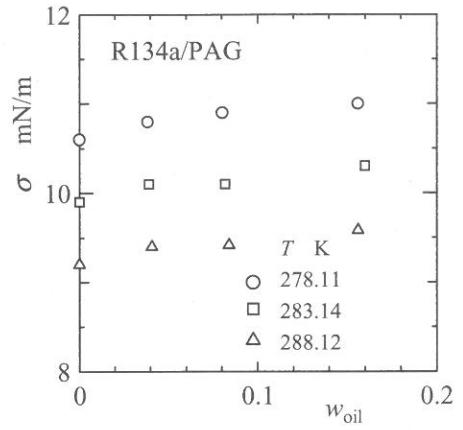


Fig. 5 Variation of  $\sigma$  with  $w_{oil}$   
(Wakabayashi *et al.*<sup>15)</sup>)

$$h \propto \left\{ \frac{k_L^3 \sigma \rho_L \Delta h_v}{\mu_L (T_s - T_w) \ell^3} ds \right\}^{1/4} \quad (7c)$$

ここに,  $ds$  は気液界面の曲率こう配を表す. 式 (7) より, 熱伝達率は, 蒸気せん断力支配領域では粘度の平方根に逆比例, 重力支配および表面張力支配領域では 0.25 乗に逆比例する特性を持つ.

混合物の物性研究を概観すると, 冷媒/油系の溶解度, 液相粘度および表面張力に関するものが多い. 図 4 は R134a/PAG および R134a/POE 混合液粘度に及ぼす油の影響<sup>13,14)</sup>を, 図 5 は R134a/PAG の表面張力に及ぼす影響<sup>15)</sup>をそれぞれ示す. 粘度と表面張力は油の質量分率の増加または温度の低下とともに増大する. 図 4 と図 5 を比較すれば, 粘度は油の質量分率に対する依存性が大きく, 表面張力は温度依存性の方が大きい.

本章で示した実測値のほか, Neto-Barbosa<sup>16)</sup>, は R600a/AB の溶解度, 密度, 粘度を, Zhelenzy *et al.*<sup>17)</sup> は R600a/鉱油および R245fa/POE の粘度を, Zhelenzny *et al.*<sup>18)</sup> は R245fa/POE の溶解度, 密度, 表面張力をそれぞれ検討している. そして, これらの文献で示されている粘度と表面張力の温度および濃度に対する依存性は図 4, 5 と定性的に同じである.

Shen-Groll<sup>4)</sup> は, 冷媒/油混合物の液相物性推算式として次式を推奨している.

$$\frac{1}{\rho_L} = \frac{w_{oil}}{\rho_{oil}} + \frac{(1 - w_{oil})}{\rho_{ref}} \quad (8)$$

$$\ln \mu_L = \xi_{ref} \ln \mu_{ref} + \xi_{oil} \ln \mu_{oil} \quad (9)$$

$$c_{pL} = (1 - w_{oil}) c_{p,ref} + w_{oil} c_{p,oil} \quad (10)$$

$$\sigma = \sigma_{ref} + (\sigma_{oil} - \sigma_{ref}) \sqrt{w_{oil}} \quad (11)$$

$$k_L = (1 - w_{oil}) k_{ref} + w_{oil} k_{oil} - 0.72 (k_{oil} - k_{ref}) (1 - w_{oil}) w_{oil} \quad (12)$$

ここに,  $\xi$  はモル分率, 添字 *ref* および *oil* はそれぞれ冷媒および油を表す. Shen-Groll<sup>4)</sup> に加えて混合物の熱力学的性質および輸送的性質に関する測定・評価とともに, 物性をより厳密に推算する方法が提案されつつある. それらは, 瀧川<sup>19)</sup>, Yokozeki<sup>20)</sup>, Thome<sup>21)</sup>, Medvedev *et al.*<sup>22)</sup>, Youbi-Idrissi and Bonjour<sup>23)</sup> 等を参照.

### 3 混合物の流動伝熱特性

表 2 は冷媒/油混合物の凝縮実験の概要を示す. Tube 欄の記号 S, M, L はそれぞれ平滑管, マイクロフィン付管およびローフィン付管を表す. Mass quality 欄の記号  $\Delta x$  は測定部のクオリティ変化を表す. 表から明らかなように, 従来の研究は実用的に重要な伝熱促進管に関する研究が少なく, また平均熱伝達特性に関するものが多い. さらに,

Table 2 Summary of previous experimental studies

Author	Tube	Mixture	Mass velocity [Kg/(m <sup>2</sup> ·s)]	Oil mass Fraction [% by mass]	Mass quality, mass quality change	Reference
Tichy <i>et al.</i> (1985)	S	R12/300SUS	94 ~ 940	0 ~ 5	0.2 ~ 0.8	24
Schlager <i>et al.</i> (1988)	S, M, L	R22/150SUS	125 ~ 400	0 ~ 5	inlet; 0.8~0.88 exit; 0.05~0.15	42, 43
Schlager <i>et al.</i> (1989)	S, M	R22/150SUS R22/300SUS	125 ~ 400	0 ~ 5	inlet; 0.8~0.88 exit; 0.05~0.15	44
Fukushima-Kudou (1990)	S	R134a/PAG	400	0 ~ 0.23		26
Sur-Azer (1991)	S, L	R113/150SUS		0 ~ 4		45
Eckels-Pate (1991)	S	R12/150SUS R134a/165SUS	125~400	0 ~ 5.5	inlet; 0.8~0.88 exit; 0.05~0.13	46
Cawte (1992)	S	R22/Clavus 32	155	0 ~ 5, 10	ave; 0.15 ~ 0.95 $\Delta x = 0.09$	25
Hinde <i>et al.</i> (1992)	S	R12 R134a/POE VG22	75, 150, 300	0 ~ 5	ave; 0.15~0.9 $\Delta x < 0.4$	47
Torikoshi-Ebisu (1993)	S, M	R134a/PAG	69, 183		inlet; superheat exit; subcool	34
Eckels <i>et al.</i> (1994)	S, M	R134a/169SUS, R134a/369SUS	85 ~ 375	0 ~ 5	inlet; 0.8~0.88 exit; 0.05~0.1	33
Shao-Granryd (1995)	S	R134a/SW32	120 ~ 260	0 ~ 5		48
Sweeney <i>et al.</i> (1995)	M	R134a/Ester oil	75, 300, 400	0 ~ 5	ave; 0.15~0.9 $\Delta x < 0.37$	29
Eckels <i>et al.</i> (1998)	S, M	R134a/150SUS	125 ~ 375	0 ~ 5	in; 0.8~0.88 exit; 0.05~0.1	49
Eckels <i>et al.</i> (1998)	S, M	R134a/169SUS	85 ~ 300	0 ~ 4.9	inlet; 0.8~0.88 exit; 0.05~0.15	50
Katsuta <i>et al.</i> (1998)	S	R134a/PAG	40 ~ 160 220 ~ 500	0 ~ 3.5		38
Huang <i>et al.</i> (2010)	S, M	R410A /POE RB68EP	200 ~ 600	0 ~ 5	inlet; 0.3 ~ 0.9 $\Delta x = 0.2$	27, 28, 30, 31

S; smooth tube, M; microfin tube L; lowfin tube

 $\Delta x$ ; mass quality change in test section

2000 年以降の実験は限定されるとともに、今後重要なミニチャンネルやマイクロチャンネルを扱った実験は見あたらない。

### 3.1 热伝達と圧力損失

はじめに局所的な熱伝達を求めた研究を紹介する。図 6 は Tichy *et al.*<sup>24)</sup>, Cawte<sup>25)</sup>および Fukushima-Kudou<sup>26)</sup>による熱伝達率のデータを比較したものである。図 (a) は R12/ナフテン油<sup>24)</sup>で、式 (1) の飽和温度は Raoult の法則から、熱流束と伝熱面温度は水温と伝熱面温度の管軸方向変化からそれぞれ求めている。図 (b) は R22/ナフテン油<sup>25)</sup>の結果で、伝熱管を R11 液中に設けて

伝熱面温度一様の条件を満たす工夫を行っている。実験は、質量速度 155 kg/(m<sup>2</sup>·s), 熱流束 2.5 kW/m<sup>2</sup> の条件で行い、測定部におけるクオリティ変化は 0.09、凝縮側温度差は 1 ~ 2.5 K である。図 (c) は R134a/PAG<sup>26)</sup>による実験で、長さ 1m のサブセクション 5 個を直列接続することにより熱伝達率の管軸方向分布を求めている。図 (b), (c) の熱伝達率を求める際の飽和温度には純冷媒の値を採用している。

図 7 は R410A/POE を用いた Huang *et al.* の実験で、図 (a) は平滑管<sup>27)</sup>、図 (b) はマイクロフィン付管<sup>28)</sup>の場合である。図中のデータは質量速度 200 kg/(m<sup>2</sup>·s), 熱流束 4.21 kW/m<sup>2</sup>, したがって測

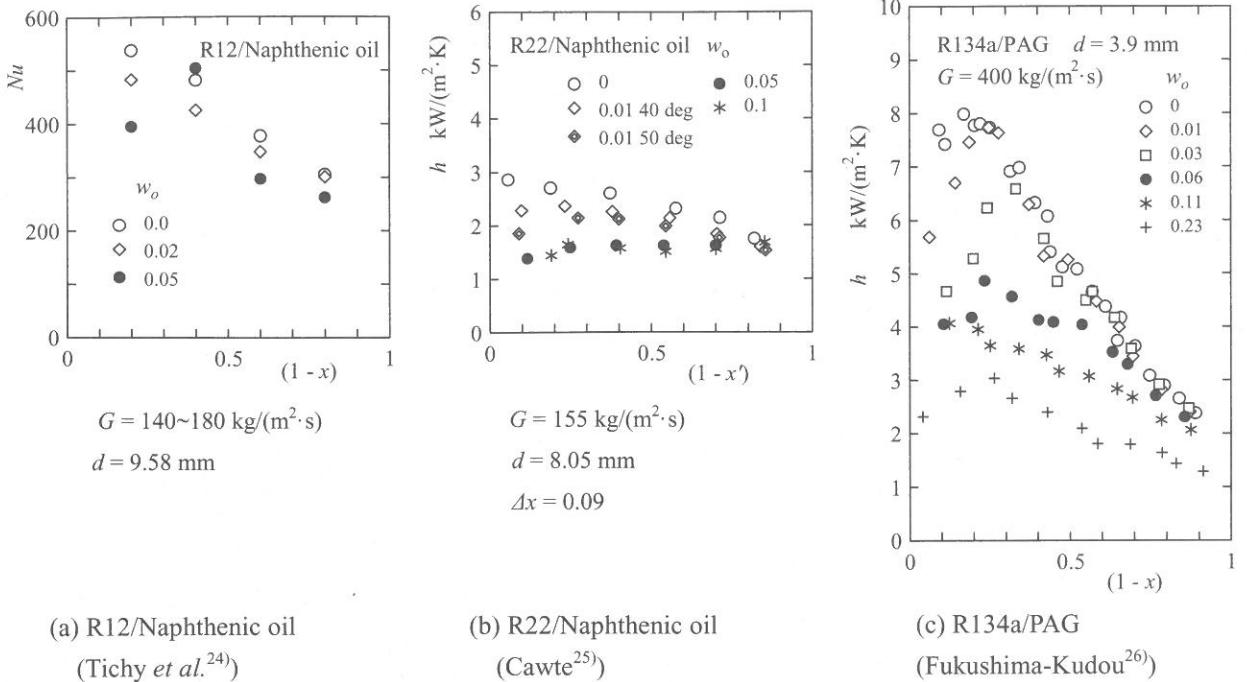
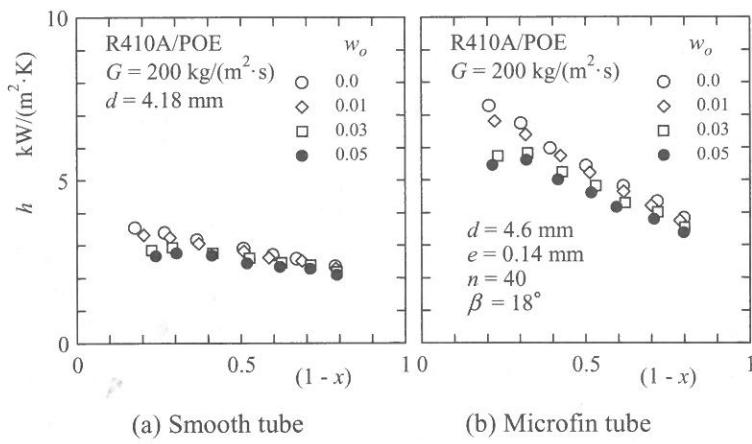
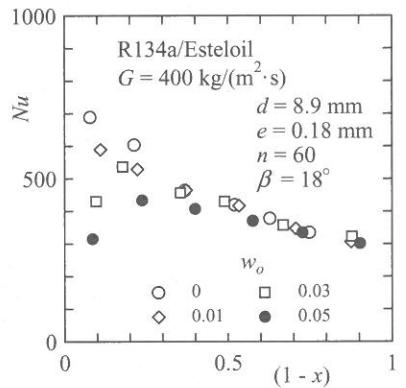


Fig. 6 Variations of heat transfer results with wetness fraction for smooth tubes

Fig.7 Variation of  $h$  with  $(1-x)$  (Huang et al.<sup>27,28)</sup>)Fig.8 Variation of  $Nu$  with  $(1-x)$   
Microfin tube (Sweeney et al.<sup>29)</sup>)

定部のクオリティ変化が 0.2 のものである。式(1)の飽和温度には純冷媒の値を採用し、凝縮側温度差は平滑管で 1.1 ~ 2 K, マイクロフィン付管で 0.5 ~ 1.3 K である。

平滑管に関する図 6 および図 7(a)のデータを検討する。純冷媒の熱伝達率は凝縮の進行（湿り度の増大）についていずれも単調に低下する。混合物の熱伝達率は、図 6(b), (c)に明瞭に見られるように、管軸方向に凸形の分布形をとり、その傾向は油の質量分率の増大とともに顕著になる。すなわち、熱伝達率は高クオリティ領域で純冷媒より

かなり低く、凝縮の進行につれて増大しピークに達した後、単調に低下し純冷媒の値に漸近する。熱伝達率がピークに達する湿り度は油の質量分率が高いほど増大し、管の下流側へシフトする傾向が見受けられる。次に、油の質量分率  $w_o = 0.05 \sim 0.06$  の熱伝達率を量的に検討する。混合物の熱伝達率について、純冷媒からの低下割合をクオリティ 0.8 で比較する。混合物の成分、質量速度、管径等は異なるが、図 6 の R12/ナフテン油が 25%, R22/ナフテン油が 45%, R134a/PAG が 40%, 図 7(a) の R410A/POE が 30% に達する。さらに、ク

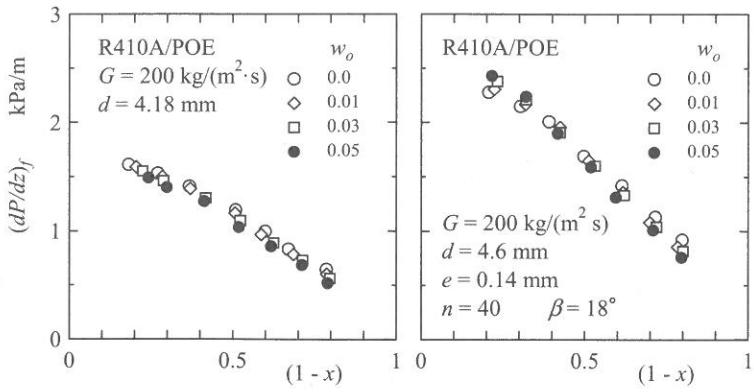


Fig.9 Variation of  $(dp/dz)_f$  with  $(1-x)$  (Huang *et al.*<sup>30,31</sup>)

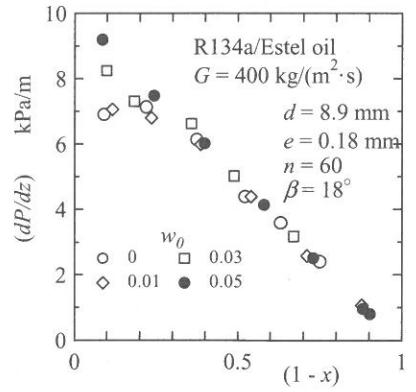


Fig.10 Variation of  $(dp/dz)$  with  $(1-x)$   
Microfin tube (Sweeney *et al.*<sup>29</sup>)

オリティ 0.9 における低下割合は図 6(b), (c)ともに 50%程度に達する。

図 8 はマイクロフィン付管を流れる R134a/Estel oil に関する Sweeney *et al.*<sup>29</sup>のデータを示す。式 (1) の飽和温度は純冷媒の値を用い、凝縮側温度差は 1.5~2.1 K、測定部のクオリティ変化は 0.04 ~0.09 である。図 7(b) のマイクロフィン付管のデータとともに見ると、分布形の特徴は平滑管の場合とおおむね類似で、混合物の熱伝達率は純冷媒より図 7(b)のクオリティ  $x = 0.8$  で 26%，図 8 の  $x = 0.8$  で 33%， $x = 0.9$  で 54% 低下している。

図 6～図 8 をまとめると、油の影響は、管入口における油の質量分率がおおむね 1%までは小さく、1%を超えると熱伝達率は平滑管、伝熱促進管を問わず、質量分率の増大につれて低下する。そして、純冷媒からの低下割合はクオリティ 0.9 以上で最大 50% 程度に達する。

次に圧力損失に関する研究紹介を行い、引き続き、熱伝達と圧力損失の関係、および油の混入による熱伝達の低下について考察を行う。

図 9 は R410A/POE を用いた Huang *et al.*による平滑管<sup>30</sup>とのマイクロフィン付管<sup>31</sup>の摩擦圧力勾配を比較したものである。図 10 は R134a/Estel oil を用いた Sweeney *et al.*<sup>29</sup>による静圧勾配を示す。熱伝達に関する図 7, 8 と比較すると、圧力損失に及ぼす油の質量分率の影響は熱伝達よりも小さく、高クオリティ領域における混合物の圧力損失が純冷媒のものよりやや高めの値を示す程度である。

蒸気せん断力支配領域における環状凝縮液膜理論<sup>32</sup>によれば、層流液膜域の熱伝達率は次式で与えられる。

$$h = k_L \left\{ \frac{2\rho_L \tau_w}{G(1-x)d\mu_L} \right\}^{1/2} \quad (13)$$

ここに、 $\tau_w$  は壁面せん断力である。式(13)で密度の質量分率依存性を無視すれば次の関係が成り立つ。

$$h \propto \sqrt{\tau_w/\mu_L} = \sqrt{(dp/dz)_f/\mu_L} \quad (14)$$

Huang *et al.*による図 7 の熱伝達と図 9 の摩擦圧力勾配を比較すれば、摩擦圧力勾配の実験値は平滑管、マイクロフィン付管とともに凝縮の進行につれて単調に減少する。純冷媒 R410A の熱伝達率は管の種類を問わず摩擦圧力勾配と同じ傾向を示す。しかし、混合物 R410A/POE の熱伝達率は油の質量分率の増加とともに上に凸の分布形をとり、摩擦圧力勾配と傾向が異なる。この原因として、図 4 で示した混合液粘度の顕著な質量分率依存性と式 (14) の特性を考慮すれば、蒸気せん断力支配領域の熱伝達には、液粘度の影響がかなり大きく出現することが考えられる。

以上の考察も含めて、混合物の熱伝達の低下と回復をもたらす原因を考察する。油は凝縮開始点で蒸気相にミストとして流入し、凝縮開始と同時に液膜に取り込まれると仮定する。気相中の油は蒸気流速が高い領域で液膜に沈着しやすく、また、高クオリティ領域では凝縮液流量が少ないため

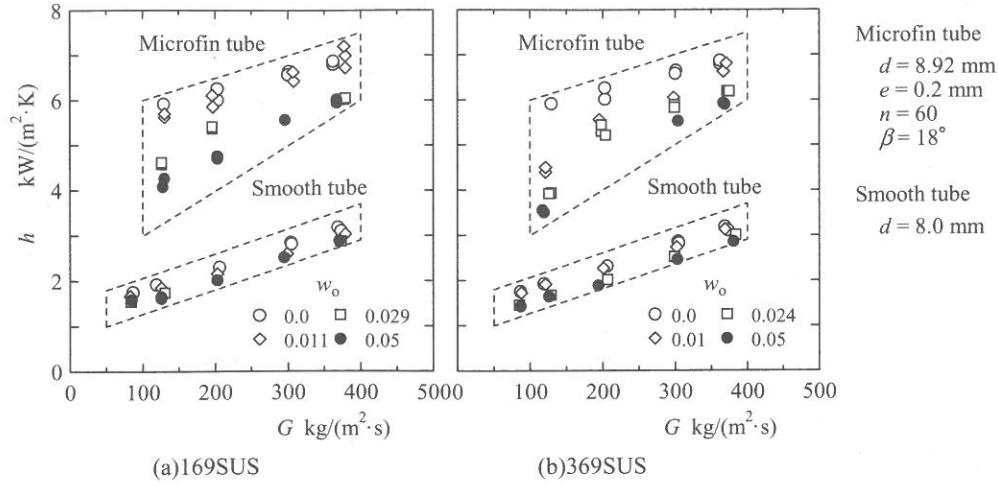


Fig.11 Effect of mixture viscosity on average condensation heat transfer coefficient (Eckels *et al.*<sup>33)</sup>

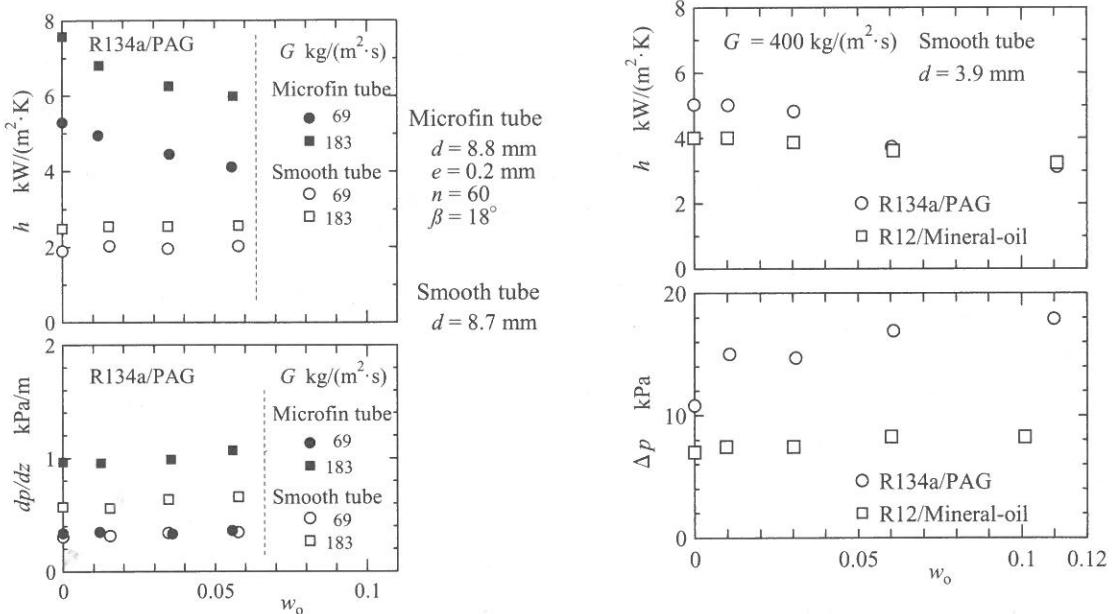


Fig.12 Variations of  $h$  and  $(dp/dz)$  with  $w_o$   
(Torikoshi-Ebisu<sup>34)</sup>)

液相の油濃度が高くなる。このことにより混合液の粘度が増大するため熱伝達の低下を生じる。ついで、凝縮の進行について冷媒液流量が増大するため、液相内における油の質量分率が低下し、混合液の物性が純冷媒のものに近づき、熱伝達率が純冷媒の値に漸近すると考えられる。クオリティが低い領域で油の影響が小さい理由として、蒸気せん断力より、重力や表面張力の影響が相対的に大きくなるため、薄液膜の伝熱を支配する式(7b,c)で表されるように、液粘度の影響が低くなるため

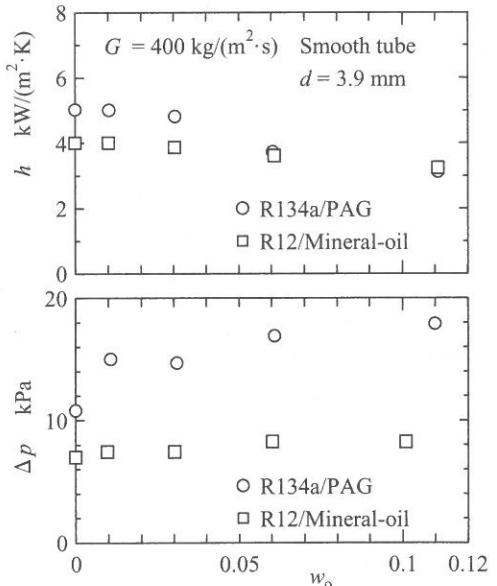


Fig.13 Variations of  $h$  and  $\Delta p$  with  $w_o$ , smooth tube  
(Fukushima-Kudou<sup>26)</sup>)

と考えられる。

次に管全体の流動伝熱特性について紹介する。図 11 は Eckels *et al.*<sup>33)</sup> による R134a/Penta erythritol ester mixed acid 混合物の熱伝達に及ぼす粘度の影響を、図 (a) の 169SUS と図 (b) の 369SUS で比較したものである。伝熱管長さ 3.66m の平滑管とマイクロフィン付管を用い、熱伝達率を求める際の飽和温度は溶解度曲線から定めている。実験は管の入口と出口のクオリティがそれぞれ 0.8~0.88 および 0.05~0.1 で行われているため、局所的な

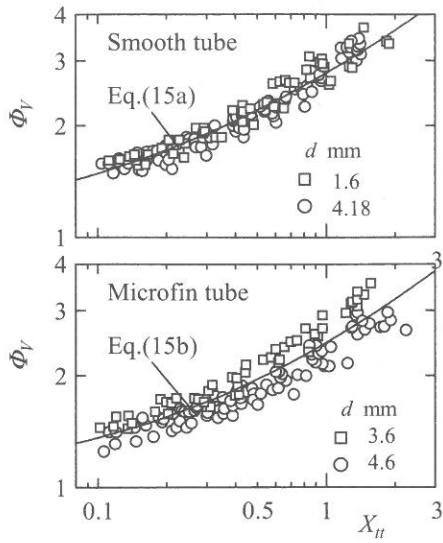


Fig. 14 Correlation of frictional pressure gradient  
(Huang *et al.*<sup>30,31)</sup>)

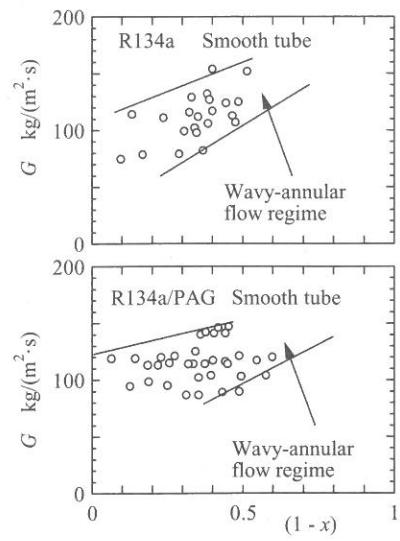


Fig. 15 Effect of oil on Wavy-annular flow regime  
(Katsuta *et al.*<sup>38)</sup>)

特性に関する図 6, 8 に示される高クオリティ領域の特性が含まれにくいと考えられる。しかし、図 11 によれば、マイクロフィン付管の熱伝達に及ぼす粘度の影響は質量速度の低い領域で見られ、粘度の低い 169SUS の方が 369SUS よりやや高めの熱伝達率を与える。

図 12 は鳥越・蛭子<sup>34)</sup>による R134/PAG の過熱度 (45±1) K から過冷却度 (4±0.5) K の広範囲に渡る管全体の熱伝達と圧力勾配に及ぼす油の影響を示す。図 13 は Fukushima-Kudou<sup>26)</sup>による R134a/PAG および R12/ナフテン油による結果を示す。過熱度の影響が小さい局所的な特性に関する図 6～10 および平均的な特性に関する図 11, 13 をもとに考察すれば、油の影響は圧力降下より熱伝達に現れやすく、熱伝達については平滑管より伝熱促進管の方が受けやすいと見なせよう。

### 3.2 热伝達と圧力損失の予測式

図 14 は Huang *et al.* による摩擦圧力損失の整理結果である。彼らは、二相流の摩擦増倍係数  $\Phi_V$  と Lockhart-Martinelli のパラメータ  $X_{tt}$  を用い、図中に示す次式(15a, b)を提案した。

平滑管<sup>30)</sup>

$$\Phi_V = 1 + 1.777 X_{tt}^{0.516} \quad (15a)$$

マイクロフィン付管<sup>31)</sup>

$$\Phi_V = 1 + 1.45 X_{tt}^{0.604} \quad (15b)$$

熱伝達に及ぼす油の影響を予測する方法は大きく分けて 2 種類ある。第 1 の方法は混合物の熱伝達率と純冷媒の熱伝達率との比を、主として油の質量分率の関数として表す方法で、たとえば、Tichy *et al.*<sup>24)</sup> は R12/ナフテン油による実験に基づき次式を提案している。

$$Nu_{oil}/Nu_{pure} = \exp(-5.0w_o) \quad (16)$$

ここに、 $Nu_{oil}$  および  $Nu_{pure}$  はそれぞれ混合物および純冷媒の熱伝達率である。式 (16) は純冷媒の熱物性値と管入口における油の質量分率で混合物の熱伝達を予測できるメリットがある。しかし、熱伝達の低下割合がクオリティ 0～1 の全領域で一定となり図 6～8 の実験結果を説明できない。したがって、実用に際して式 (16) と類似な形の式を用いる際は、その根拠となる実験条件を検討し、適用範囲に注意を払うことが必要である。

熱伝達に関する第 2 の予測法は、純冷媒の熱伝達の式に含まれる物性値を混合物の値で置き換える方法である。Huang *et al.*<sup>27)</sup> は平滑管に関する彼らのデータを、純冷媒の実験から提案された原口ら<sup>35)</sup> の式に修正を加えて -30%～20% で整理できることを示した。同様に、Huang *et al.*<sup>28)</sup> はマイクロフィン付管に関する彼らのデータを純冷媒の

実験に基づく Yu-Koyama<sup>36)</sup> の式で-15% ~ 20%で整理できることを示した。

### 3.3. 流動様相

冷媒/油混合物の蒸発管内における流動様相は Worsoe-Schmidt<sup>37)</sup>に見られるように半世紀前から観察されているが、凝縮流に関する研究は皆無に近い。勝田ら<sup>38)</sup>は R134a/PAG の平滑管内凝縮実験で観察を行っている。実験は油濃度を 1.4, 2.5, 3.5% の 3 種類、質量速度を内径 6mm 管で 40~160 kg/(m<sup>2</sup>·s) の条件でなされ、内径 6 mm 管の流動様相を Annular, Wavy, Slug, Plug ならびに Annular と Wavy の遷移域 Wavy-Annular の 5 種類に分類した。図 15 は Wavy-Annular 領域の範囲に及ぼす油の影響を表す。油の存在により Wavy-Annular 領域が広くなる。同様な現象は、断熱二相流に関する Manwell-Bergles<sup>39)</sup> の R12/ナフテン油、 Wongwises *et al.*<sup>40)</sup> の R134a/PAG を用いた実験でも報告され、図 15 と同様に、油の混入により層状・波状流と環状流の遷移を与える混合気の質量速度が低下することが特徴である。その理由として、油の混入による液粘度の増大が示されている。なお、この遷移領域で油滴が液膜とともに流れる Tear-flow を生じることも報告されている<sup>38)</sup>。

### 4 まとめ

冷媒/冷凍機油混合物の水平管内凝縮について主として熱伝達に関する研究レビューを行った。実験データ、特に伝熱促進管のデータが極めて少ないが、おおむね次の事が言える。

1. 圧力損失に及ぼす油の影響は小さい。
2. 熱伝達率は油の混入により低下する。その影響は、管の入口における油の質量分率が 2 ~ 3 % 以上で現れる。
3. 局所的な熱伝達に及ぼす油の影響は高クオリティ領域で顕著である。そして、熱伝達率の管軸方向分布は純冷媒の場合と異なり、油の質量分率の増大とともに凸形を示す。
4. 油の影響は平滑管より伝熱促進管の方が出てやすいと考えられる。
5. 流動様式について、純冷媒と比較して環状流と層状流の遷移的な領域が長くなること、そして、この遷移的な領域では Tear-flow と呼

ばれる流れが出現することがある。

今後は、管の細径化とフィンの微細化・高密度化が急速に進むと考えられ、冷媒/冷凍機油混合物の凝縮特性の把握がより重要になると思われる。その際、凝縮開始点における油の流動状態の扱いがポイントの一つになる。凝縮器では、Cavallini *et al.*<sup>2)</sup> が指摘するように、凝縮開始点で油の全量が凝縮液に含まれるとは考えにくい。したがって、実機を考えれば、ミスト状の油が冷媒蒸気とともに流入する場合、および、気相中に油が存在しない場合の 2 つの極限モデルが必要になろう。最近、Nebuloni-Thome<sup>41)</sup> はミニチャンネルを対象に冷媒/油混合物の凝縮モデルを提案したが、このモデルは後者に該当する。

### 文 献

- 1) Gidwani, A., Ohadi, M.M. and Salehi, M., ASHRAE Trans., **104**(1), 1322(1988).
- 2) Cavallini, A., Col, D.D., Doretti, L., Longo, G.A. and Rossetto, L., Int. J. Refrig., **23**, 4(2000).
- 3) Cavallini, A., Gensi G., Col, D.D., Doretti L., Longo G.A., Rossetto L. and Zilio, C., Int. J. Refrig., **26**, 373(2003).
- 4) Shen, B. and Groll, E.A., HVAC&R Res., **11**, 511(2005).
- 5) Dalkilic, A.S. and Wongwises, S., Int. J. Heat Mass Transf., **52**, 3409(2009).
- 6) Wang, C.C., Hafner, A., Kuo, C.S. and Hsieh, W.D., Renewable and Sustainable Energy Rev., **16**, 5071(2012).
- 7) 日本冷凍空調学会、「冷媒圧縮機」、第 9 章、日本冷凍空調学会、東京(2013).
- 8) 金子正人、冷凍、**82**(959), 741(2007).
- 9) 佐藤智明、高石吉登、小口幸成、冷論、**18**(3), 273(2001).
- 10) Takaishi, Y. and Oguchi, K., Proc. 18th Int. Congress Refrig., Vienna, B, 217 (1987).
- 11) Rose, J.W., JSME Int. J., Ser.II, **31**(3), 357(1988).
- 12) 本田博司、野津滋、機論 B 編、**51**(462), 572 (1985).
- 13) 佐藤智明、大平晃寛、高石吉登、小口幸成、

- 冷論, **23**(3), 291(2006).
- 14) 佐藤智明, 高石吉登, 小口幸成, 冷論, **24**(4), 315(2007).
  - 15) 若林光祐, 佐藤智明, 高石吉登, 小口幸成, 機講論, 九州支部・中国四国支部合同企画鹿児島地方講演会, 219(2003)
  - 16) Neto, M.A.M. and Barbosa, J.R., Fluid Phase Equilib., **292**, 7(2010).
  - 17) Zhelezny, V.P., Sechenyh, V.V., Semenyuk, Yu.V., Grebenkov, A.J. and Beliayeva, O.V., Int. J. Refrig., **32**, 1389 (2009).
  - 18) Zhelezny, V.P., Semenyuk, Yu.V., Ancherek, S.N., Grebenkov, A.J. and Beliayeva, O.V., J. Fluorine Chemistry, **128**, 1029(2007).
  - 19) 瀧川克也, 日石三菱レビュー, **42**(4), 154 (2000).
  - 20) Yokozeiki, A., Int. J. Thermophysics., **22**(4), 1057(2001).
  - 21) Thome, J.R., HVAC&R Res., **1**(2), 110 (1995).
  - 22) Medvedev, O.O., Zhelezny, P.V. and Zhelezny, V.P., Fluid Phase Equilib., **215**, 29(2004).
  - 23) Youbi-Idrissi, M. and Bonjour, J., Int. J. Refrig., **31**, 165(2008).
  - 24) Tichy, J.A., Macken, N.A. and Duval, W.M.B., ASHRAE Trans., **91**(1), 297 (1985).
  - 25) Cawte, H., Int. J. Energy Res., **16**, 327 (1992).
  - 26) Fukushima, T. and Kudou, M., Int. Refrig. Conf., Purdue, 196(1990).
  - 27) Huang, X., Ding, G., Hu, H., Zhu, Y. and Peng, H., Int. J. Refrig., **33**, 158(2010).
  - 28) Huang, X., Ding, G., Hu, H., Zhu, Y., Gao, Y. and Deng, B., Exp. Therm. Fluid Sci., **34**, 845(2010).
  - 29) Sweeney, K.A., Chato, J.C., Ponchner, M. and Rhines, N.L., ACRC, TR-87(1995).
  - 30) Huang, X., Ding, G., Hu, H., Zhu, Y., Gao, Y. and Deng, B., HVAC&R Res., **16**, 453 (2010).
  - 31) Huang, X., Ding, G., Hu, H., Zhu, Y., Gao, Y. and Deng, B., Int. J. Refrig., **33**, 1356 (2010).
  - 32) Traviss, D.P., Rohsenow, W.M. and Baron A.B., ASHRAE Trans., **79**(1), 157(1973).
  - 33) Eckels, S.J., Doerr, T.M. and Pate, M.B., ASHRAE Trans., **100**(2), 283(1994).
  - 34) 鳥越邦和, 蚊子毅, 冷論, **10**(3), 437(1993).
  - 35) 原口英剛, 小山繁, 藤井哲, 機論B編, **60**(574), 2117(1994).
  - 36) Yu, J. and Koyama, S., Proc. Int. Refrig. Conf., Purdue, 325(1998).
  - 37) Worsoe-Schmidt, P., J. Refrig., **3**(2), 40(1960).
  - 38) 勝田正文, 宮井玲, 小松智弘, 河井昭成, 冷論, **15**(4), 401(1998).
  - 39) Manwell, S.P. and Bergles, A.E., ASHRAE Trans., **96**(2), 456(1990).
  - 40) Wongwises, S., Wongchang, T. and Kaewon, J., Heat Transf. Engng., **23**, 13(2002).
  - 41) Nebuloni, S. and Thome, J.R., Int. J. Refrig., **36**, 1545(2013).
  - 42) Schlager, L.M., Pate, M.B. and Bergles, A.E., ASHRAE Trans., **94**(1), 149(1988).
  - 43) Schlager, L.M., Pate, M.B. and Bergles, A.E., ASHRAE Trans., **94**(2), 1176 (1988).
  - 44) Schlager, L.M., Pate, M.B. and Bergles, A.E., ASHRAE Trans., **95**(1), 387 (1989).
  - 45) Sur, B. and Azer, N.Z., ASHRAE Trans., **97**, 365(1991).
  - 46) Eckels, S.J. and Pate, M.B., ASHRAE Trans., **97**(2), 62(1991).
  - 47) Hinde, D.K., Dobson, M.K., Chato, J.C., Mainland, M.E. and Rhines, N., ACRC, TR-26(1992).
  - 48) Shao, D.W. and Granryd, E., Int. J. Refrig., **18**(8), 524(1995).
  - 49) Eckels, S.J., Doerr, T.M. and Pate, M.B., ASHRAE Trans., **104**(1), 366(1998).
  - 50) Eckels, S.J., Doerr, T.M. and Pate, M.B., ASHRAE Trans., **104**(1), 376(1998).