九州大学学術情報リポジトリ Kyushu University Institutional Repository

# 二成分蒸気の鉛直平滑管内凝縮に関する実験

**小山, 繁** 九州大学機能物質科学研究所

**原口, 英剛** 九州大学大学院総合理工学研究科博士課程

**屋良, 朝康** 九州大学機能物質科学研究所

**藤井, 哲** 九州大学機能物質科学研究所

https://doi.org/10.15017/6611

出版情報:九州大学機能物質科学研究所報告.6(2), pp.67-77, 1993-03-20.九州大学機能物質科学研究所 バージョン: 権利関係: 機能物質科学研究所 報告 第6巻 第2号 pp. 67 ~ 77 (1992)

# 二成分蒸気の鉛直平滑管内凝縮に関する実験

小山 繁・原 ロ 英 剛\*・屋 良 朝 康・藤 井 哲

# An Experiment on Condensation of Binary Vapor Mixtures inside a Vertical Smooth Tube

# Shigeru KOYAMA, Hidetaka HARAGUCHI\*, Tomoyasu YARA and Tetsu FUJII

An experimental study of condensation of nonazeotropic refrigerant mixtures (NARMs) of HCFC22 and CFC114 inside a vertical smooth tube has been carried out. The local Nusselt number of a pure refrigerant of HCFC22 is correlated well with the equation which is obtained by modifying an empirical equation proposed by Uehara et al., while that of NARMs is lower than the value predicted from the modified correlation equation; the difference being dependent on the mass velocity and the composition of NARMs. By assuming that the condensate heat transfer coefficient of NARMs can be expressed by the correlation equation for pure refrigerants, temperature and mass fractions of vapor and liquid at the vapor-liquid interface are evaluated. Then, the local vapor mass transfer coefficient is obtained.

#### 1.緒 言

2成分蒸気の鉛直円管内の凝縮に関する実験的研究 としては、CFC114+CFC11 を用いた望月ら<sup>1)</sup>の研 究、CFC114+CFC113 を用いた Hijikata ら<sup>2)</sup>の研究 などがあるが、局所の熱および物質伝達特性が十分解 明されたとは言えない。

本報では,供試流体として非共沸混合冷媒HCFC22+ CFC114 の鉛直円管内凝縮の実験を行い,前報<sup>37</sup>と同 様の方法を用いて凝縮液膜の熱伝達と蒸気相内の物質 伝達について検討する。

受理日 平成4年11月30日 \* 九州大学大学院総合理工学研究科博士課程

### 記号

Cp	:定圧比熱 [J/(kg·K)]
D	:拡散係数 [ml/s]
di	:内管内径 [m]
Fr	:フルード数
$f_{V}$	:蒸気成分が管を満たして流れる
	とした場合の管摩擦係数
G	:質量速度 [kg/(㎡·s)]
g	:重力加速度 [m/s²]
h <sub>is</sub>	:凝縮潜熱[J/kg]
$H_L$	:顕潜熱比
l	:代表寸法(z または d <sub>i</sub> )[m]
m	:凝縮質量流束 [kg/(m²·s)]
ň	:低沸点成分 HCFC22 の
	凝縮質量流束 [kg/(m <sup>2</sup> ·s)]

Na	・マセルト数
P	・ / c// f 政 : 圧力「Pa]
Pr	・ プラントル教
a	: 執流束「W/m <sup>2</sup> ]
R	
Re	・レイノルズ数
Sc	・ シー シット教
Sh	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
л Т	・
I I	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
W	· 你愿 [m/s] : 皙
r ·	・只重に重「なら、い」
N .	・/ 4 / / 4 : 所沸占成分 HCFC22 の
9	「国のPAMAD FIGT OLL の 暦島公室「kg/kg]
~ N	「 低 二 低 M M M M M M M M M M M M M
J.	モル分离「mol/mol]
~	・凝縮哭冷雄入口からの
~	令軸方向距離「m]
α	・執伝達係数「W/(m <sup>*</sup> ·K)]
ß	· 物質伝達係数 [kg/(m <sup>2</sup> ·s)]
δ	・ $\delta_{\tau}$ における変化量
ΔP	
$\delta P$	
$\Lambda P_{\rm r}$	・「「「」」「」」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「
	于力変化項「kPa]
δPr	ニスクロス [1] : 各小区間の気液界面摩擦による
	田力変化項「kPa]
$\Lambda P_c$	二級縮器入口からの重力による
<b>_</b>	F力変化項「kPa]
$\delta P_c$	: 各小区間の重力による
- 0	用力変化項「kPa]
$\Delta P_{M}$	: 凝縮器入口からの運動量変化による
	压力変化項「kPa]
δPM	:各小区間の運動量変化による
	压力変化項「kPa]
δz	:各小区間の有効伝熱長さ,
	あるいは実長さ [m]
λ	:熱伝導率 [W/ (m·K)]
$\mu$	:粘度 [Pa·s]
ν.	:動粘度 [m²/s]
ξ	:ボイド率
ρ	:密度 [kg/m <sup>3</sup> ]
$\phi_{v}$	:二相流摩擦損失パラメータ

添	字
b	:バルク
C	:冷却水
cal	:計算值
dew	:混合冷媒の場合は露点,
	純冷媒の場合は飽和液状態
exp	:実験値
i	:気液界面
in	:凝縮器入口
L	:液
out	:凝縮器出口
r	:冷媒
ref	:代表值
V	:蒸気
wi	:伝熱管内壁面
wo	:伝熱管外側面

#### 2.実験装置および測定方法

図1(a)および(b)は,それぞれ試験凝縮器の 概略および小区間の詳細を示す。鉛直に設置された試 験凝縮器は全長5mの二重管型で,冷媒は伝熱管内を 上から下へ,冷却水は伝熱管と外管の間の環状部を冷 媒と逆向きに流れる。伝熱管は内径16mm,外径19mmの 銅製平滑管であり,外管は内径29mmのステンレス鋼管 である。環状部は,管軸方向の局所熱流束を求めるた めに,5つの小区間に分割されている。試験凝縮器 は,水を熱源とする圧縮式ヒートポンプループ(詳細 は文献(4)参照)に組み込まれている。

供試流体として,物性値が明確で,露点と沸点の温 度差が比較的大きくとれる混合冷媒 HCFC22+-CFC114 を用いた。実験では,次の諸量を測定した。

- (1) 冷媒質量流量(マイクロモーション質量流量計)
- (2) 冷却水体積流量(オーバル容積流量計)
- (3) 凝縮器入口冷媒圧力 (ゲージ圧計,図1の⑧)
- (4) 凝縮器入口での冷媒蒸気質量分率 (ガスクロマトグラフ)
- (5) 凝縮器出入口での冷媒混合平均温度
   ( φ 2 mm シース Pt 100 測温抵抗体,図1の④)
- (6) 各小区間出入口での冷却水混合平均温度
   (φ 2 m シース Pt 100 測温抵抗体,図1の⑤)
- (7) 各小区間出入口での冷媒温度
   (φ0.5mmシース K 熱電対,図1の③)
   (2) タル区間中中での第四本白00° 年の4第5
- (8) 各小区間中央での管周方向90°毎の4箇所の伝

#### 九州大学機能物質科学研究所報告 第6卷 第2号(1992)



- 1 Mixing chamber (Refrigerant)
- 2 Mixing chamber (Cooling water)
- 3 Thermocouple (Refrigerant)
- 4 Resistance Thermometer (Refrigerant)
- 5 Resistance Thermometer (Cooling water)
- 6 Thermocouple (outer surface of inner tube)
- 7 Partition plate
- 8 Pressure measuring tap

熱管外壁面温度(素線径0.13mmのT熱電対,図 1の⑥)

実験データの整理法は文献(3)と類似であり,管断面 で蒸気コアと凝縮液が相平衡の関係を満足し,管軸方 向の圧力変化は無視できると仮定し,冷媒流量,凝縮 器入口の冷媒質量分率,圧力および温度,各小区間で の熱交換量の測定値を用いて,各小区間における熱収 支の式を冷媒入口側より順次解いて,各小区間出口の 冷媒混合平均温度 T<sub>6</sub>,クオリティ x,蒸気質量分率 yw,液質量分率 yu などを求めた。なお,実験値を無 次元整理する際の代表物性値の取り方も文献(3)と同 じである。

#### 3.実験結果および考察

#### 3.1 実験結果

実験は,純冷媒 HCFC22,75mol% HCFC22 および 50mol%HCFC22 混合冷媒について,冷媒質量速度 *G*,=200~500 [kg/(㎡·s)] および凝縮器出ロクオリ ティ $x_{out} = 0 \sim 0.6$ の範囲で行った。実験結果の一部を 付録に示す。

#### 3.2 試験凝縮器内の圧力分布の推算

蒸気圧力の測定は凝縮器入口でのみ行い,管軸方向 の分布は測定していない。そこで,以下の仮定をお き,蒸気コアの管軸方向の運動量式を解き,凝縮器内 の圧力分布を推算する。

- (1) 気液二相の流動様式は環状である。
- (2) 蒸気コア部の管軸方向速度は、半径方向に一様である。
- (3) 気液界面の吸い込みによる管軸方向の運動量変 化は無視できる。
- (4) 気液界面の摩擦による圧力損失は、水平平滑管 内の断熱二相流に関するLockhalt-Martinelli<sup>5</sup>) の相関を近似した Soliman ら<sup>6</sup>)の式で表せる。
- (5) ボイド率 € とクオリティ x との関係は, Smith<sup>7)</sup>の式で表せる。

各小区間 $\delta z$ における圧力変化 $\delta P$ は、重力による 圧力変化項 $\delta P_{c}$ 、運動量変化による圧力変化項 $\delta P_{w}$ および気液界面摩擦による圧力変化項 $\delta P_{r}$ の和とし て表され、次のようになる。

 $\frac{\delta P}{\delta z} = \frac{\delta P_G}{\delta z} + \frac{\delta P_M}{\delta z} + \frac{\delta P_F}{\delta z}$ (1)

$$\frac{\delta P_{g}}{\delta z} \equiv \rho_{v} g \qquad (2)$$

$$\frac{\delta P_{M}}{\delta z} \equiv -\frac{1}{\xi} \frac{\delta}{\delta z} \left( \frac{G_{r}^{2} x^{2}}{\xi \rho_{v}} \right)$$
(3)

$$\frac{\delta P_F}{\delta z} \equiv -\frac{2 f_V G_r^2 x^2}{d_i \rho_V} \phi_V^2 \qquad (4)$$

ここに、 $\rho_v$ は蒸気密度、gは重力加速度、G,は質量速 度、 $f_v$ は蒸気成分のみが管を満たして流れるとした場 合の管摩擦係数(本計算では Coluburn の式を用い る)、 $\phi_v$ は二相流摩擦損失パラメータ、 $d_i$ は伝熱管内 径である。

図 2 (a)および(b)は,それぞれ  $G_r = 496$  および 201  $[kg/(m^3 \cdot s)]$ の HCFC22 の実験結果に対応した冷媒 流れ方向の圧力分布の計算結果を示す。〇印は凝縮器 入口からの圧力変化 $\Delta P_r$ ,〇印は重力による圧力変化 頃 $\Delta P_{G}$ ,〇印は運動量変化による圧力変化項 $\Delta P_{M}$ ,▽ 印は気液界面摩擦による圧力変化項 $\Delta P_{F}$ ,◆印はボイ

#### 二成分蒸気の鉛直平滑管内凝縮に関する実験



図2. 管軸方向の圧力変化



図3.温度,熱流束およびクオリティの管軸方向の分布

ド率 €, ●印はクオリティ x を示す。

G, = 496 [kg/(m<sup>2</sup>·s)]の場合は,気液界面の摩擦に よる圧力変化項が他の圧力変化項に比して大きいの で,圧力は,流れ方向にいったん低下し,凝縮終了点 の近くで上昇する。一方,G, = 201 [kg/(m<sup>2</sup>·s)]の場 合は,重力による圧力変化項が気液界面の摩擦による 圧力変化項に比して大きいので,圧力は流れ方向に上 昇する。以上の計算例は本実験範囲の最大および最小 のG,の結果であることから,本実験範囲では凝縮器内 の圧力変化は最大2.5 [kPa] 程度(飽和温度の差に換 算すれば約0.06 [℃])と見積 もられる。よって、凝縮器内の 圧力は一定であるとして熱伝達 および物質伝達のデータ整理を 行ってよい。

#### 3.3 温度分布

図3(a)および(b)は、それぞれ 純冷媒 HCFC22 と混合冷媒 50mol%HCFC22 の測定結果の 例(付表1(c)および付表3(c)) である。 へ印は冷媒温度 T.(測 定値), ▽印は冷媒混合平均温 度T<sub>6</sub>(計算值), □印は伝熱管 内壁面温度 T<sub>wi</sub> (測定值), ○印 は冷却水温度 Tc (測定値), ◇ 印はクオリティ x (計算値),● 印は熱流束q(測定値)である。 横軸のz/diは凝縮器冷媒入口か らの無次元有効伝熱長さである。 計算で求めた冷媒混合平均温度  $T_{b}$ と冷媒測定温度  $T_{c}$ とはよく 一致している。また, 飽和蒸気 域での冷媒混合平均温度T。は. 純冷媒の場合一定となるが、混 合冷媒の場合は冷媒流れ方向に 低下する。

#### 3.4 熱伝達

図4は,純冷媒の管内凝縮熱 伝達に関する従来の整理式と純 冷媒 HCFC22 の本実験値との 比較を示す。縦軸は実験値,横 軸は整理式による予測値であ

$$Nu_{l} = \frac{q l}{\lambda_{L} (T_{drw} - T_{wi})} = \frac{\alpha l}{\lambda_{L}}$$
(5)  
$$(l = d_{i} \text{ or } z)$$

ここに、qは伝熱管内面基準熱流束、代表寸法lは $d_i$ またはz、 $\lambda_L$ は液熱伝導率、 $T_{dev}$ は純冷媒の場合は飽和 蒸気温度(混合冷媒の場合は露点温度)、 $T_{wi}$ は伝熱管 内壁面温度、 $\alpha$ は熱伝達係数である。実験値は、

-70-

#### 九州大学機能物質科学研究所報告 第6巻 第2号(1992)



図4. 純冷媒 HCFC22 の局所ヌセルト数の実験値と従来の整理式による予測値との比較

Shekriladze ら<sup>8</sup>) (鉛直管)の式による予測値に対して 約100%高く(図(a)), Traviss ら<sup>8</sup>) (鉛直管および水平 管)および野律ら<sup>10</sup> (水平管)の式による予測値に対 して, 凝縮終了点近傍 ((*Nu<sub>d</sub>*)<sub>cd</sub> く5×10<sup>2</sup>の領域)を 除けば約10~30%低い(図(b)および(c))。一方, Cavalliniら<sup>11</sup> (鉛直管), Shah<sup>12</sup> (鉛直管および水平管) および上原ら<sup>13</sup> (鉛直平板)の式による予測値と実験 値との差異は±20~30%程度である(図(d), (e)および (f))。

図5は,図4(f)の上原らの式と本実験値との比較を 座標軸を変えて行ったものである。図中の実線は以下 の上原らの式を示す。

$$(Nu_z)_{cal} = 0.125 \left(1 + \frac{0.024 H_L^{1/3} P r_L^{1/6} R^{5/4}}{Fr}\right)^{2/5}$$

 $\times H_L^{1/15} Pr_L^{1/3} R^{-1/2} Re_L^{4/5} \tag{6}$ 

ここに,  $H_L$ ,  $Pr_L$ , R, Fr および  $Re_L$ は, それぞれ顕潜 熱比, 液プラントル数,  $\rho - \mu$ 比, フルード数および 二相レイノルズ数であり, 次の諸式で定義される。

$$H_{L} = c_{pL}(T_{dow} - T_{wi})/h_{fg}$$

$$Pr_{L} = c_{pL} \mu_{L} / \lambda_{L}$$

$$R = (\rho_{L} \mu_{L} / \rho_{V} \mu_{V})^{1/2}$$

$$Fr = U_{V}^{2}/(g z)$$

$$Re_{L} = U_{V} z / \nu_{L}$$
(1)

実験値は、上式に比して強制対流域(横軸が10以下) では30%程度高く,自由対流域(横軸が10<sup>2</sup>以上)では 20%程度低い。そこで、上原らの式中の係数を修正 し、次の実験式を作成した。

$$(Nu_{z})_{cal} = 0.16 \left(1 + \frac{0.006H_{L}^{1/3}Pr_{L}^{1/6}R^{5/4}}{Fr}\right)^{2/5} \times H_{L}^{1/15}Pr_{L}^{1/3}R^{-1/2}Re_{L}^{4/5}$$
(12)

上式を図中に一点鎖線で示す。上式と純冷媒の実験値 との差異は±20%以内である。

図 6 (a)および(b)は, それぞれ 50mol% および 75mol%HCFC22 混合冷媒の実験値と式(12)との比較を 示す。いずれのモル分率の場合も実験値は上式より低 く,その低下の程度は,質量速度 G,が小さく, 凝縮器







図6. 混合冷媒の局所熱伝達特性

出口蒸気クオリティ xout が高いほど大きくなる。また, G,および xout が同一の条件では,50 mol%HCFC22の (Nu<sub>2</sub>)exp の低下の程度が,75mol%HCFC22 の場合よ りも大きい。

#### 3.5 物質伝達

混合冷媒の凝縮液膜の局所ヌセルト数は純冷媒の式 (12)で表せる(ただし、( $Nu_z$ )<sub>cal</sub> および  $H_L$ の定義式中の  $T_{drw}$ を気液界面温度  $T_i$ とする)と仮定して、各小区 間の気相側の物質伝達のデータ整理を試みる。

計算は以下の手順で行う。

- (1) Tiを仮定して,式(12)より局所ヌセルト数 (Nu<sub>z</sub>)<sub>cal</sub> を求める。
- (2) (Nu<sub>z</sub>)<sub>cal</sub> とT<sub>wi</sub>およびqの測定値を次式に代入し て、あらたに $T_i$ を求める。

$$T_i = T_{wi} + \frac{q z}{\lambda_L (N u_z)_{cal}}$$
(13)

上式の値と仮定値とが一致するまで手順(1).(2) を反復し、 $T_i$ を定める。

- (3) TiとPを相平衡の関係式に代入し、気液界面の 蒸気と液の質量分率 yvi および yu を求める。
- (4) 次式で定義される気相側の局所物質伝達係数  $\beta_v$ を求める。

$$\beta_{v} = \frac{\mathbf{\dot{m}} y_{v_{i}} - \mathbf{\dot{n}}}{y_{v_{i}} - y_{v_{ref}}} \qquad (1)$$

ここに.

$$\dot{m} = -\frac{G_r d_i}{4} \frac{\delta x}{\delta z} \qquad (15)$$
$$\dot{n} = -\frac{G_r d_i}{4} \frac{\delta (x y_{Vb})}{\delta z} \qquad (16)$$

S

*m*は全凝縮質量流束,*n*は低沸点成分 HCFC 22 の凝縮質量流束, yvref は代表蒸気質量分率, yv, はバルク蒸気質量分率である。

(5) 次の諸式で定義されるシャーウッド数 Shv, シュミット数Scv およびレイノルズ数Rev を計 算する。

$$Sh_{v} = \beta_{v} d_{i} / (\rho_{v} D_{v})$$

$$Sc_{v} = \mu_{v} / (\rho_{v} D_{v})$$
(17)
(18)

$$Re_{v} = G \ x \ d_{i} \ / \ \mu_{v} \tag{19}$$

図 7 (a)および(b)は、それぞれ 50mol%HCFC22 混合 冷媒の場合のG,=350および202 [kg/(m・s)]の凝縮質 量流束の計算結果を (1-x) に対して示す。 $\bigcirc$ ,  $\triangle$ お よび□印はそれぞれ $\hat{m}$ ,  $\hat{m}$ y<sub>vi</sub> および $\hat{n}$  である。 $\hat{m}$ と n の差は高沸点成分 CFC114 の凝縮質量流束であ る。低沸点成分HCFC22の凝縮質量流束<sup>n</sup>は上流で小 さく,下流に行くにつれて増加する。一方,高沸点成 分 CFC114 の凝縮質量流束 ( $\hat{m} - \hat{n}$ ) は上流で大き







#### 図8.蒸気側の局所物質伝達特性

く、下流に行くにつれて減少する。また $m_{yv_i}$ とnの 差で表される気液界面から蒸気コアへのHCFC22の 拡散質量流束は流れ方向に減少する。

図8は, Sh<sub>v</sub>/Scv<sup>04</sup> と Rev の関係を示す。○, ●, △,▲印は本実験結果であり,実線は水平平滑管に関 する次の実験式3)である。

$$Sh_{\rm V} = 0.02 Re_{\rm V}^{0.8} Sc_{\rm V}^{0.4} \tag{20}$$

(適用範囲: 5×10<sup>3</sup> < Rev < 10<sup>5</sup>, 0.4 < Scv < 0.7)

実験データのShv/Scv<sup>04</sup>とRevの関係は質量速度や組成 比によって異なった傾向を示す。水平管に関する上式 と実験値との差異は+100%~-50%である。以上の 原因として,データ整理モデル<sup>3)</sup>,液膜の熱伝達の式 (12)および状態方程式の不確かさなどが考えられる。

## 4.結

非共沸混合冷媒 HCFC22+CFC114 の鉛直平滑管内 凝縮の実験を行い,以下の結論を得た。

- (1) 凝縮器内における圧力分布を環状流モデルを用いて推算し,圧力変化が露点温度や熱伝達係数に及ぼす影響は小さいことを示した。
- (2) 純冷媒 HCFC22 の局所ヌセルト数(代表温度 差: T<sub>drw</sub> - T<sub>wi</sub>)は、上原らの共存対流乱流凝縮 の実験式を修正した式(12)と±20%以内の差異で 一致した。
- (3) 混合冷媒の局所ヌセルト数は、純冷媒に比べて 低下することを式(12)との比較で示した。また、 ヌセルト数の低下の程度は、バルクの質量分 率、冷媒の質量速度および出ロクオリティ(冷 媒と伝熱管との温度差)によって異なることを 示した。
- (4) 混合冷媒の凝縮液膜の熱伝達係数が純冷媒に関する式(12)で表せると仮定して、気液界面の状態量および気相側の物質伝達係数を求めた。求めた物質伝達係数と水平平滑管に関する実験式(20)との差異は+100%~50%であった。なお、物質伝達特性をより明確に示すためには、データ整理モデル、液膜熱伝達および状態方程式についてさらに検討する必要がある。

#### 参考文献

- (1) 望月・八木・但野,非共沸二成分作動流体の垂直 円管内凝縮熱伝達,冷凍,57-659,(1982),55.
- (2) K. Hijikata, N. Himeno and O. Nakabeppu, Condensation of a binary mixtrue of vapors in a vertical tube, Proc. 1st JSME-KSME Thermal and Fluids Eng. Conf., (Seoul), Vol.1, (1988), 186.
- (3) 小山・高・今村・藤井,非共沸混合冷媒 HCFC
   22+CFC114 の水平平滑管内凝縮,機論(B),
   57-538, (1991), 2032.
- (4) 高松・小山・池上・加茂川・屋良・藤井, R22/R114 系混合冷媒を用いたヒートポンプシス テムに関する研究(第一報,組成および熱源条件 が成績係数に及ぼす影響),機論(B),57-537, (1991),1851.

- (5) R. W. Lockhart and R. C. Martinelli, Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes, *Chem. Eng. Progress*, 45-1, (1949), 39.
- (6) M. Soliman, J. R. Schuster and P. J. Berenson, A general heat transfer correlation for annular flow condensation, J. Heat Transfer, 90-2, (1968), 267.
- (7) S. L. Smith, Void fraction in two-phace flow: a correlation based upon an equal velocity heated model, *Heat and Fluid Flow*, 1-1, (1970), 22.
- (8) I. Shekriladze and SH. Mestvirishvili, High-Rate condensation process theory of vapour flow inside a vertical cylinder, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 16, (1970), 715.
- (9) D. P. Traviss, W. M. Rohsenow and A. B. Baron, Forced convection condensation inside tube, ASHRAE Trans., (1973), 157.
- (10) 野津・本田・藤井,過熱蒸気の水平管内凝縮,冷 凍,58-669,(1983),659.
- A. Cavallini and R. Zechin, A dimensionless correlation for heat transfer in forced convection condensation, *Proc. 5th Int. Heat Transfer Conf.*, (Montreal, Vol. 3), (1974), 309.
- M.M.Shah, A general correlation for heat transfer during film condensation inside pipes, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 22, (1979), 547.
- 13) 上原・江頭・田口,蒸気流動がある場合の鉛直面
   上の膜状凝縮,機論(B),55-510,(1989),450.

#### 付 録

純冷媒HCFC22と混合冷媒HCFC22+CFC114の鉛 直管内凝縮の実験結果の例を示す。

付表 1 ~ 3 は, それぞれ純冷媒 HCFC22,混合冷媒 75mol%HCFC22,50mol%HCFC22 の実験結果の例で ある。G, は冷媒質量速度, Wc は冷却水質量流量,  $P_{in}$  は凝縮器入口冷媒圧力, y, は凝縮器入口での低沸 点成分 (HCFC22) のモル分率である。また,表中の  $z/d_i$  は凝縮器冷媒入口からの無次元有効伝達長さ, T, は冷媒温度 (測定値), T<sub>6</sub> は冷媒混合平均温度(計 算値), T<sub>c</sub> は冷却水混合平均温度 (測定値), T<sub>wi</sub> は伝 熱管内壁面温度 (T<sub>wo</sub>の測定値より計算), x はクオリ ティ, q は伝熱管内面基準熱流束である。

#### 付表 1. 純冷媒 HCFC22 の実験結果の例

(a) File No. B4005083

 $G_r = 350.5 [\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}] \quad W_C = 1024.0 [\text{kg/h}]$ 

 $P_{in} = 1.935[\text{MPa}] \quad \tilde{y}_b = 1[\text{mol/mol}]$ 

Sec.	z/di	Tr ℃	T. °C	Twi ℃	<i>T</i> <sub>C</sub> ℃	£	$q kW/m^2$
Inlet 1 2 3 4 5 Outlet	0.0 58.6 117.9 176.5 237.1 296.5	71.99 71.83 50.41 50.09 50.01 49.78 49.19 50.09	71.99 49.81 49.81 49.81 49.81 49.81	36.24 32.89 31.82 29.97 27.55	25.13 22.96 20.78 18.84 17.00 15.05	1.00 0.91 0.67 0.46 0.25 0.04	54.8 54.3 49.0 44.9 48.5

 $G_r = 349.7 [kg/m^2 \cdot s] W_c = 665.1 [kg/h]$ 

 $P_{in} = 1.882$ [MPa]  $\tilde{y}_b = 1$ [mol/mol]

Sec.	z/di			T <sub>wi</sub> ℃	<i>T</i> <sub>C</sub> ℃	x	$q kW/m^2$
Inlet 1 2 3 4 5 Outlet	0.0 58.6 117.9 176.5 237.1 296.5	70.91 70.80 50.08 48.92 48.80 48.70 48.90 48.92	70.91 50.58 48.61 48.61 48.61 48.61	42.02 40.26 39.97 38.77 35.59	34.60 32.76 30.77 28.81 26.82 24.81	1.00 1.00 0.87 0.73 0.59 0.45	30.2 32.2 32.1 31.5 32.5

## (c) File No. B4005092

 $G_r = 201.0 [\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}] \quad W_C = 645.5 [\text{kg/h}]$ 

 $P_{in} = 1.852$ [MPa]  $\tilde{y}_b = 1$ [mol/mol]

Sec.	z/di	<i>T</i> , ℃	T⊾ ℃	T <sub>wi</sub> ℃	<i>T</i> <sub>C</sub> ℃	x	$q kW/m^2$
Inlet 1 2 3 4 5 Outlet	0.0 58.6 117.9 176.5 237.1 296.5	68.52 68.21 49.61 48.76 48.26 47.94 47.84 48.18	68.52 47.92 47.92 47.92 47.92 47.92 47.92	37.00 34.64 34.10 33.34 31.40	29.01 27.23 25.43 23.73 21.93 19.92	1.00 0.92 0.71 0.51 0.29 0.05	28.3 28.2 27.0 27.7 31.5

(d) File No. B4005161

 $G_r = 200.5 [\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}] \quad W_C = 417.0 [\text{kg/h}]$ 

 $P_{in} = 1.848[\text{MPa}] \quad \tilde{y}_b = 1[\text{mol/mol}]$ 

Sec.	$z/d_i$		Ть ℃	T <sub>wi</sub> ℃	<i>T</i> <sub>C</sub> ℃	x	q kW/m <sup>2</sup>
Inlet 1 2 3 4 5 Outlet	0.0 58.6 117.9 176.5 237.1 296.5	68.29 68.07 50.19 48.68 48.15 47.96 48.14 48.25	68.29 48.54 47.82 47.82 47.82 47.82 47.82	42.12 40.64 40.01 39.12 37.02	35.86 34.22 32.43 30.68 28.79 26.81	1.00 1.00 0.87 0.73 0.59 0.44	16.9 18.1 18.0 18.8 20.1

-75-

# 二成分蒸気の鉛直平滑管内凝縮に関する実験

付表 2. 混合冷媒75mol% HCFC22 の実験結果の例

# (a) File No. B3012203

 $G_r = 350.5 [\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}] W_c = 993.6 [\text{kg/h}]$ 

 $P_{in} = 1.595 [MPa] \tilde{y}_b = 0.754 [mol/mol]$ 

Sec.	z/di			Twi ℃	T <sub>C</sub> ℃	x	$q kW/m^2$
Inlet 1 2 3 4 5 Outlet	0.0 58.6 117.9 176.5 237.1 296.5	75.11 74.97 57.70 55.49 53.85 51.22 48.62 49.61	75.11 58.12 54.75 52.67 51.24 50.29	37.42 33.45 32.11 29.90 27.15	26.33 24.20 22.09 20.33 18.66 17.03	1.00 0.83 0.57 0.37 0.18 0.00	52.2 51.0 43.1 39.5 39.4

(b) File No. B3012171

 $G_r = 350.1 [kg/m^2 \cdot s] W_c = 644.7 [kg/h]$ 

 $P_{in} = 1.637$ [MPa]  $\tilde{y}_b = 0.760$ [mol/mol]

Sec.	z/di	Tr ℃	7⊾ ℃	T <sub>wi</sub> ℃	7 <sub>C</sub> ℃	x	$q kW/m^2$
Inlet 1 2 3 4 5 Outlet	0.0 58.6 117.9 176.5 237.1 296.5	70.48 70.34 59.26 57.71 56.30 55.12 54.30 53.22	70.48 60.12 58.11 56.41 54.93 53.87	47.85 45.67 45.11 43.49 39.59	41.98 40.25 38.54 36.88 35.18 33.70	1.00 0.92 0.78 0.65 0.52 0.41	27.5 26.8 26.4 26.1 23.2

(c) File No. B3012201

 $G_r = 200.0 [\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}] \quad W_C = 536.3 [\text{kg/h}]$ 

 $P_{in} = 1.574$ [MPa]  $\tilde{y}_b = 0.758$ [mol/mol]

Sec.	z/di		7⊾ ℃	T <sub>wi</sub> ℃	7 <sub>C</sub> ℃	x	$q kW/m^2$
Inlet 1 2 3 4 5 Outlet	0.0 58.6 117.9 176.5 237.1 296.5	75.01 74.67 58.53 56.45 54.66 51.31 48.74 49.09	75.01 57.72 54.68 52.56 50.90 49.72	39.69 36.37 35.40 34.20 31.85	30.61 28.56 26.61 24.83 22.93 20.95	1.00 0.86 0.63 0.44 0.24 0.03	27.1 25.4 23.5 24.3 25.8

(d) File No. B3012214

# $G_r = 201.4 [kg/m^2 \cdot s] W_c = 367.2 [kg/h]$

 $P_{in} = 1.695 [MPa] \tilde{y}_b = 0.756 [mol/mol]$ 

•••				<u> </u>			
Sec.	$z/d_i$			T <sub>wi</sub> ℃	<i>T<sub>C</sub></i> ℃	x	$\frac{q}{\mathrm{kW/m^2}}$
Inlet 1 2 3 4 5 Outlet	0.0 58.6 117.9 176.5 237.1 296.5	76.96 76.67 62.52 60.43 58.74 57.35 55.85 54.89	76.96 62.29 60.14 58.35 56.81 55.59	49.70 47.33 46.36 44.85 41.65	43.63 41.76 39.94 38.20 36.42 34.71	1.00 0.94 0.79 0.65 0.52 0.39	16.9 16.3 15.8 15.6 15.3

#### 九州大学機能物質科学研究所報告 第6巻 第2号(1992)

#### 付表 3. 混合冷媒50mol% HCFC22 の実験結果の例

# (a) File No. B2002271

 $G_r = 350.4 [kg/m^2 \cdot s] W_C = 844.2 [kg/h]$ 

 $P_{in} = 1.267 [MPa] \tilde{y}_b = 0.487 [mol/mol]$ 

Sec.	z/di		Ть ℃	T <sub>wi</sub> ℃	7 <sub>℃</sub> ℃	x	$\frac{q}{kW/m^2}$
Inlet 1 2 3 4 5 Outlet	0.0 58.6 117.9 176.5 237.1 296.5	78.84 78.68 64.95 61.82 59.08 54.66 49.50 50.34	78.84 66.26 61.63 57.70 54.46 50.64	42.22 37.57 35.24 32.34 29.55	30.17 27.62 25.25 23.33 21.67 20.03	1.00 0.77 0.50 0.31 0.15 0.00	53.1 48.6 40.0 33.4 33.7

(b) File No. B2003061

 $G_r = 349.8 [kg/m^2 \cdot s] W_c = 446.0 [kg/h]$ 

 $P_{in} = 1.332 [MPa] \tilde{y}_b = 0.488 [mol/mol]$ 

Sec.	z/di	Tr °C	Ть ℃	Twi ℃	<i>T</i> <sub>C</sub> ℃	x	$\frac{q}{\mathrm{kW/m^2}}$
Inlet 1 2 3 4 5 Outlet	0.0 58.6 117.9 176.5 237.1 296.5	78.85 78.72 68.75 67.04 65.18 63.40 61.84 60.24	78.85 70.63 68.63 66.60 64.47 62.53	57.78 55.38 54.23 52.08 47.61	51.64 49.52 47.38 45.34 43.31 41.51	1.00 0.92 0.78 0.66 0.54 0.44	23.3 23.2 22.4 21.6 19.5

(c) File No. B2002273

 $G_r = 201.6 [\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}] \quad W_C = 486.5 [\text{kg/h}]$ 

 $P_{in} = 1.231 [MPa] \tilde{y}_b = 0.477 [mol/mol]$ 

Sec. Inlet 1	<i>z/d<sub>i</sub></i> 0.0 58.6	<i>T</i> <sub>r</sub> ℃ 78.28 77.95 64.63	<i>T⊾</i> ℃ 78.28 65.90	<i>Twi</i> ℃ ℃	<i>T<sub>C</sub></i> ℃ 33.09 30.65	x 1.00 0.78	<i>q</i> kW/m <sup>2</sup> 29.3 24.8
2 3 4 5 Outlet	117.9 176.5 237.1 296.5	62.02 59.75 54.57 49.00 49.35	61.85 57.94 54.29 50.08	37.03 35.44 33.14	28.55 26.66 24.85 22.96	0.54 0.35 0.17 0.00	22.7 21.0 22.4

(d) File No. B2003071

 $G_r = 200.3 [kg/m^2 \cdot s] W_c = 347.0 [kg/h]$ 

 $P_{in} = 1.376[\text{MPa}] \quad \tilde{y}_b = 0.478[\text{mol/mol}]$ 

Sec.	$z/d_i$	Tr ℃	<i>T⊾</i> ℃	<i>T</i> ℃	7 <sub>C</sub> ℃	x	$q kW/m^2$
Inlet 1 2 3 4 5 Outlet	0.0 58.6 117.9 176.5 237.1 296.5	83.39 83.08 71.56 69.28 67.30 65.44 63.58 61.81	83.39 72.45 70.38 68.28 66.02 64.03	57.58 55.00 53.69 51.91 48.73	52.45 50.53 48.89 47.35 45.78 44.43	1.00 0.90 0.76 0.63 0.51 0.40	16.4 13.8 13.2 13.0 11.4

-77-