

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 :

二成分蒸気の鉛直平滑管内凝縮に関する実験

小山 繁・原口 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¹⁾の研究、CFC114+CFC113を用いたHijikataら²⁾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³⁾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。

記 号

c_p	: 定圧比熱 [J/(kg·K)]
D	: 拡散係数 [m^2/s]
d_i	: 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 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]
g	: 重力加速度 [m/s^2]
h_{fg}	: 凝縮潜熱 [J/kg]
H_L	: 顕潜熱比
l	: 代表寸法 (z または d_i) [m]
\dot{m}	: 凝縮質量流束 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]
\dot{n}	: 低沸点成分 HCFC22 の 凝縮質量流束 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]

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

二成分蒸気の鉛直平滑管内凝縮に関する実験

Nu	: ヌセルト数
P	: 圧力 [Pa]
Pr	: プラントル数
q	: 熱流束 [W/m^2]
R	: $\rho - \mu$ 比
Re	: レイノルズ数
Sc	: シュミット数
Sh	: シャーウッド数
T	: 温度 [$^{\circ}C$]
U	: 流速 [m/s]
W	: 質量流量 [kg/h]
x	: クオリティ
y	: 低沸点成分 HCFC22 の 質量分率 [kg/kg]
\tilde{y}	: 低沸点成分 HCFC22 の モル分率 [mol/mol]
z	: 凝縮器冷媒入口からの 管軸方向距離 [m]
α	: 熱伝達係数 [$W/(m^2 \cdot K)$]
β	: 物質伝達係数 [$kg/(m^2 \cdot s)$]
δ	: δz における変化量
ΔP	: 凝縮器入口からの圧力変化 [kPa]
δP	: 各小区間の圧力変化 [kPa]
ΔP_f	: 凝縮器入口からの気液界面摩擦による 圧力変化項 [kPa]
δP_f	: 各小区間の気液界面摩擦による 圧力変化項 [kPa]
ΔP_G	: 凝縮器入口からの重力による 圧力変化項 [kPa]
δP_G	: 各小区間の重力による 圧力変化項 [kPa]
ΔP_M	: 凝縮器入口からの運動量変化による 圧力変化項 [kPa]
δP_M	: 各小区間の運動量変化による 圧力変化項 [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 [$W/(m \cdot K)$]
μ	: 粘度 [$Pa \cdot s$]
ν	: 動粘度 [m^2/s]
ξ	: ボイド率
ρ	: 密度 [kg/m^3]
ϕ_v	: 二相流摩擦損失パラメータ

添 字

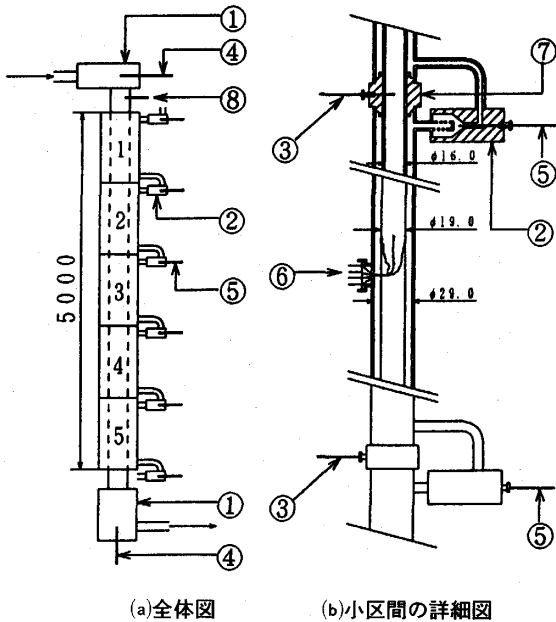
b	: バルク
C	: 冷却水
cal	: 計算値
dew	: 混合冷媒の場合は露点, 純冷媒の場合は飽和液状態
exp	: 実験値
i	: 気液界面
in	: 凝縮器入口
L	: 液
out	: 凝縮器出口
r	: 冷媒
ref	: 代表値
V	: 蒸気
wi	: 伝熱管内壁面
wo	: 伝熱管外側面

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 5 m 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 mm 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 (ϕ 0.5 mm シース K 熱電対, 図1の③)
- (8) 各小区間中央での管周方向 90° 毎の4箇所の伝



(a)全体図 (b)小区間の詳細図

- 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

図 1. 試験凝縮器

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たし、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_b 、クオリティ x 、蒸気質量分率 y_{vb} 、液質量分率 y_{lb} 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 $G_r = 200 \sim 500$ [kg/(m²·s)] および凝縮器出口クオリ

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、半径方向に一樣である。
- (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 Lockhart-Martinelli⁵⁾ の相関を近似した Soliman ら⁶⁾ の式で表せる。
- (5) ボイド率 ξ とクオリティ x との関係は、Smith⁷⁾ の式で表せる。

各小区間 δz における圧力変化 δP は、重力による圧力変化項 δP_G 、運動量変化による圧力変化項 δP_M および気液界面摩擦による圧力変化項 δP_F の和として表され、次のようになる。

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

$$\frac{\delta P_G}{\delta z} \equiv \rho_v g \quad (2)$$

$$\frac{\delta P_M}{\delta z} \equiv -\frac{1}{\xi} \frac{\delta}{\delta z} \left(\frac{G_r^2 x^2}{\xi \rho_v} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\delta P_F}{\delta z} \equiv -\frac{2 f_v G_r^2 x^2}{d_i \rho_v} \phi_v^2 \quad (4)$$

ここに、 ρ_v は蒸気密度、 g は重力加速度、 G_r 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 Colburn の式を用いる)、 ϕ_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/(m²·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。○印は凝縮器入口からの圧力変化 ΔP 、△印は重力による圧力変化項 ΔP_G 、□印は運動量変化による圧力変化項 ΔP_M 、▽印は気液界面摩擦による圧力変化項 ΔP_F 、◇印はボイ

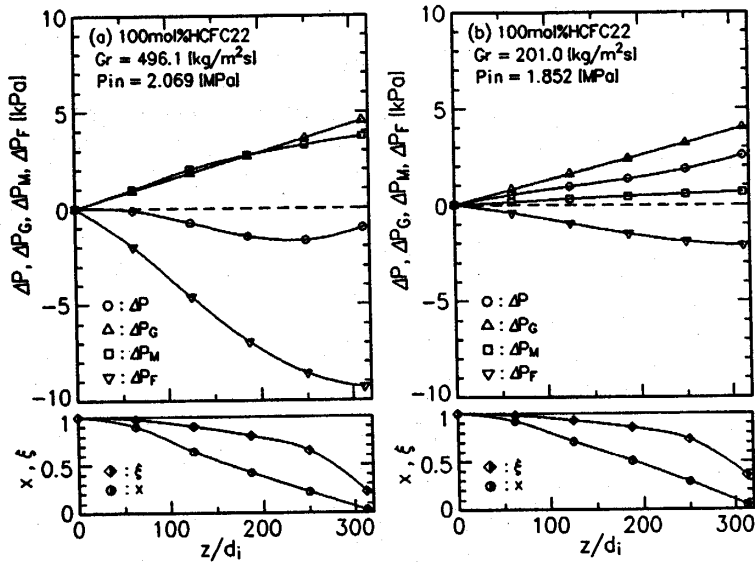


図2. 管軸方向の圧力変化

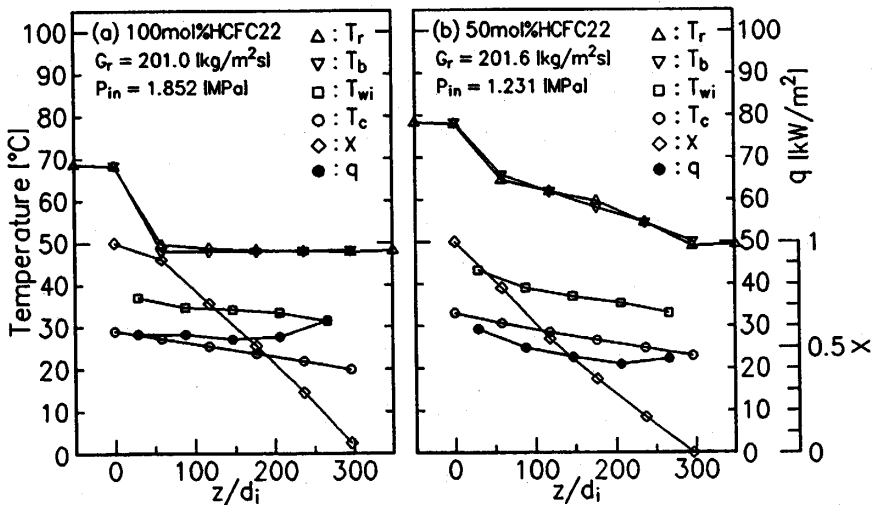


図3. 温度、熱流束およびクオリティの管軸方向の分布

ド率 ξ , ●印はクオリティ x を示す。

$G_r = 496$ [kg/(m²·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、 $G_r = 201$ [kg/(m²·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_r 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 [°C])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。△印は冷媒温度 T_r (測定値)、▽印は冷媒混合平均温度 T_b (計算値)、□印は伝熱管内壁面温度 T_{wi} (測定値)、○印は冷却水温度 T_c (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/d_i 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_r 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_b 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り、

局所ヌセルト数は次式で定義されている。

$$Nu_{li} = \frac{q l}{\lambda_L (T_{dew} - T_{wi})} = \frac{\alpha l}{\lambda_L} \quad (5)$$

$(l = d_i \text{ or } z)$

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 、 λ_L は液熱伝導率、 T_{dew} 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、 α は熱伝達係数である。実験値は、

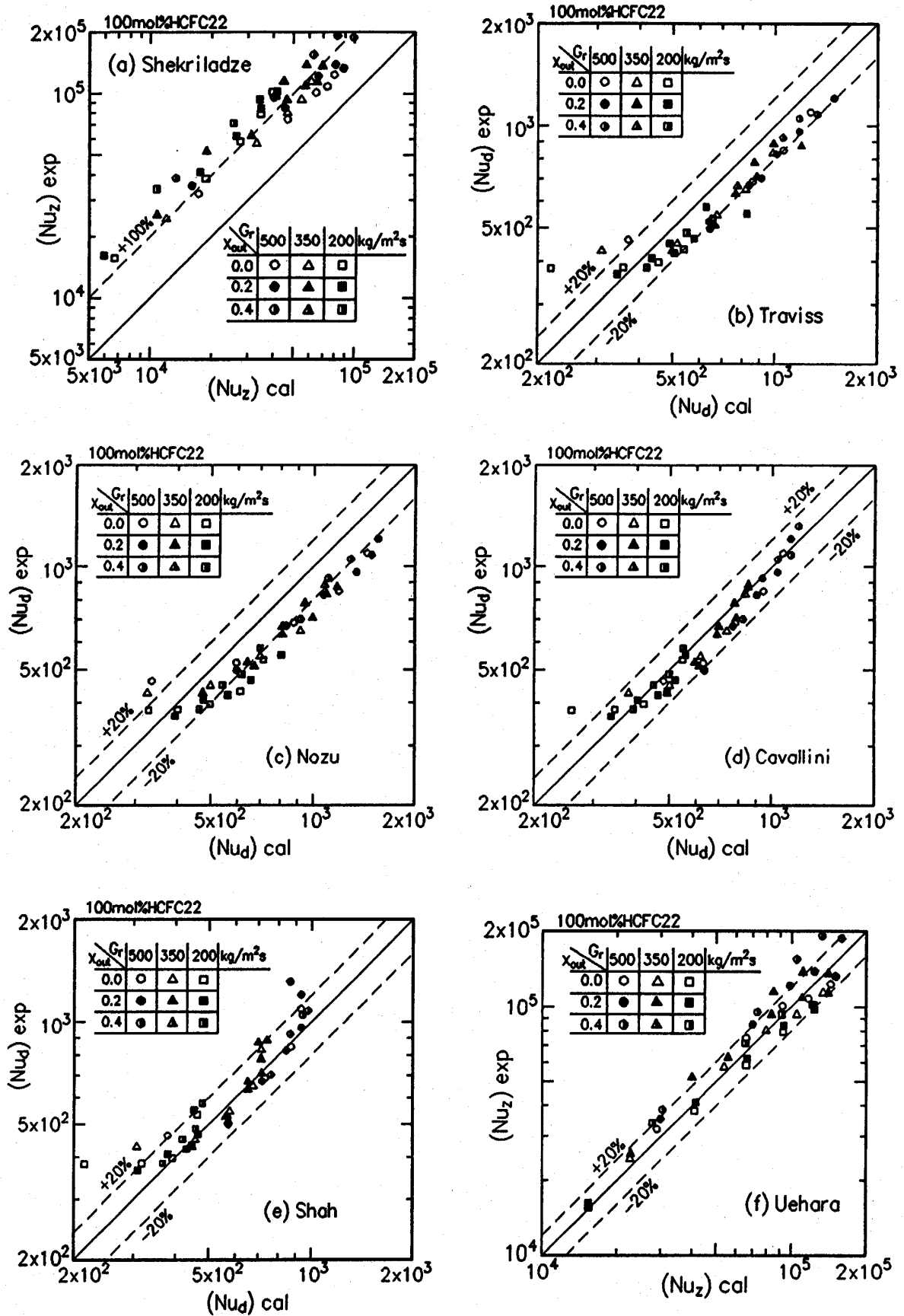


図4. 純冷媒 HCFC22 の局所ヌセルト数の実験値と従来の整理式による予測値との比較

Shekrladze ら⁹⁾ (鉛直管) の式による予測値に対して約100%高く (図(a)), Traviss ら⁹⁾ (鉛直管および水平管) および野律ら¹⁰⁾ (水平管) の式による予測値に対して, 凝縮終了点近傍 ($(Nu_d)_{cal} < 5 \times 10^2$ の領域) を除けば約10~30%低い (図(b)および(c))。一方, Cavallini ら¹¹⁾ (鉛直管), Shah¹²⁾ (鉛直管および水平管) および上原ら¹³⁾ (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。

$$(Nu_z)_{cal} = 0.125 \left(1 + \frac{0.024 H_L^{1/3} Pr_L^{1/6} R^{5/4}}{Fr} \right)^{2/5} \times H_L^{1/15} Pr_L^{1/3} R^{-1/2} Re_L^{4/5} \quad (6)$$

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。

$$H_L = c_{pl}(T_{dew} - T_{wi})/h_{1f} \quad (7)$$

$$Pr_L = c_{pl} \mu_L / \lambda_L \quad (8)$$

$$R = (\rho_L \mu_L / \rho_V \mu_V)^{1/2} \quad (9)$$

$$Fr = U_v^2 / (g z) \quad (10)$$

$$Re_L = U_v z / \nu_L \quad (11)$$

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10²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。

$$(Nu_z)_{cal} = 0.16 \left(1 + \frac{0.006 H_L^{1/3} Pr_L^{1/6} R^{5/4}}{Fr} \right)^{2/5} \times H_L^{1/15} Pr_L^{1/3} R^{-1/2} Re_L^{4/5} \quad (12)$$

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

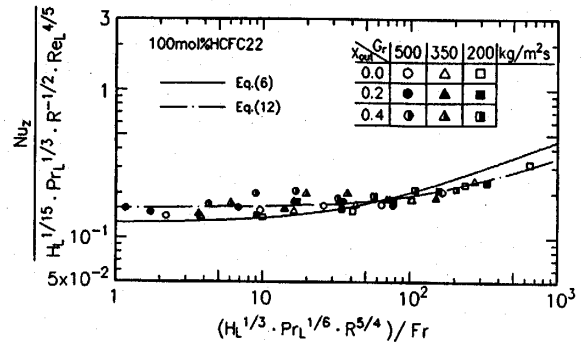


図5. 純冷媒 HCFC22 の局所ヌセルト数の実験値と上原らの式との比較

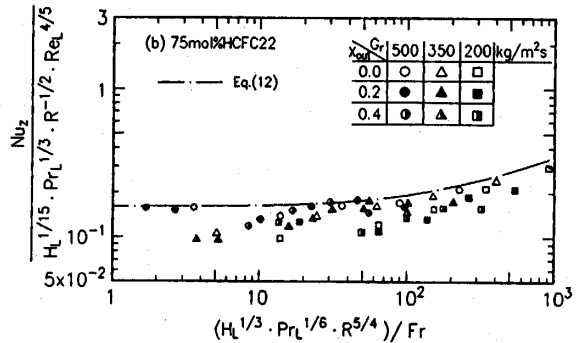
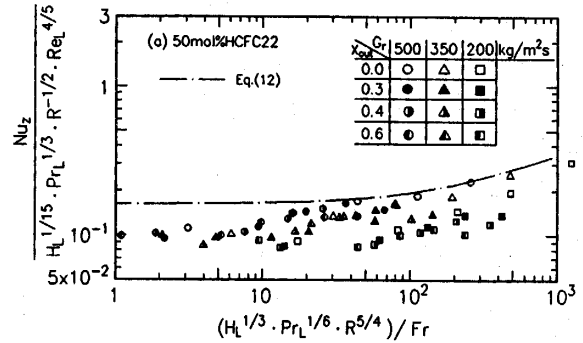


図6. 混合冷媒の局所熱伝達特性

出口蒸気クオリティ x_{out} が高いほど大きくなる。また, G , および x_{out} が同一の条件では, 50 mol% HCFC22 の $(Nu_z)_{exp}$ 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, $(Nu_z)_{cal}$ および H_L の定義式中の T_{dew} 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) T_i を仮定して、式(12)より局所ヌセルト数 $(Nu_z)_{cal}$ を求める。
- (2) $(Nu_z)_{cal}$ と T_{wi} 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。

$$T_i = T_{wi} + \frac{qz}{\lambda_L(Nu_z)_{cal}} \quad (13)$$

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) T_i 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 y_{vi} および y_{li} 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 β_v を求める。

$$\beta_v = \frac{\dot{m} y_{vi} - \dot{n}}{y_{vi} - y_{vref}} \quad (14)$$

ここに,

$$\dot{m} = -\frac{G_i d_i}{4} \frac{\delta x}{\delta z} \quad (15)$$

$$\dot{n} = -\frac{G_i d_i}{4} \frac{\delta(x y_{vb})}{\delta z} \quad (16)$$

\dot{m} は全凝縮質量流束, \dot{n} は低沸点成分 HCFC22 の凝縮質量流束, y_{vref} は代表蒸気質量分率, y_{vb} 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 Sh_v , シュミット数 Sc_v およびレイノルズ数 Re_v を計算する。

$$Sh_v = \beta_v d_i / (\rho_v D_v) \quad (17)$$

$$Sc_v = \mu_v / (\rho_v D_v) \quad (18)$$

$$Re_v = G x d_i / \mu_v \quad (19)$$

図7(a)および(b)は, それぞれ 50mol%HCFC22 混合冷媒の場合の $G_i = 350$ および 202 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] の凝縮質量流束の計算結果を $(1-x)$ に対して示す。○, △および□印はそれぞれ \dot{m} , $\dot{m} y_{vi}$ および \dot{n} である。 \dot{m} と \dot{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 \dot{n} 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 ($\dot{m} - \dot{n}$) は上流で大き

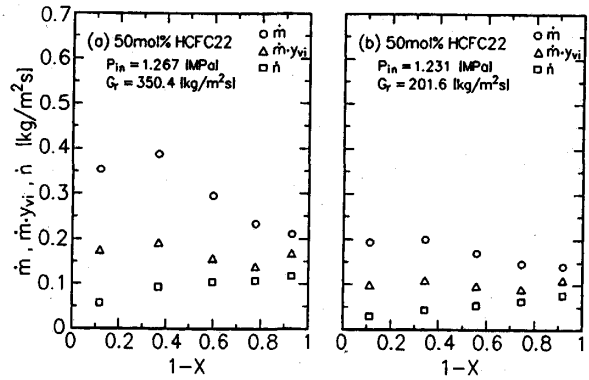


図7. 凝縮質量流束の管軸方向の分布

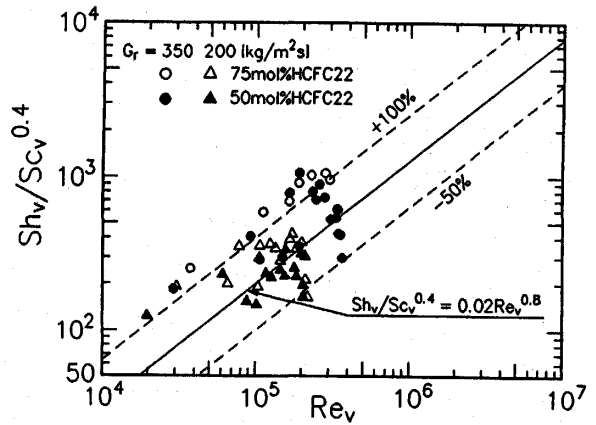


図8. 蒸気側の局所物質伝達特性

く, 下流に行くにつれて減少する。また $\dot{m} y_{vi}$ と \dot{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, $Sh_v / Sc_v^{0.4}$ と Re_v 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。

$$Sh_v = 0.02 Re_v^{0.8} Sc_v^{0.4} \quad (20)$$

(適用範囲: $5 \times 10^3 < Re_v < 10^5$, $0.4 < Sc_v < 0.7$)

実験データの $Sh_v / Sc_v^{0.4}$ と Re_v 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³⁾, 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 論

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： $T_{\text{sat}} - T_w$ ）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口クオリティ（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。
- (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-phase flow: a correlation based upon an equal velocity heated model, *Heat and Fluid Flow*, 1-1, (1970), 22.
- (8) I. Shekrladze 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.
- (11) 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.
- (12) 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.

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 mixture 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 HCFC22+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.

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, W_c は冷却水質量流量, P_{in} は凝縮器入口冷媒圧力, y_0 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_i は冷媒温度 (測定値), T_b は冷媒混合平均温度 (計算値), T_c は冷却水混合平均温度 (測定値), T_w は伝熱管内壁面温度 (T_{w0} 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

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

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

Sec.	z/d_i	T_r °C	T_b °C	T_{wi} °C	T_c °C	x	q kW/m ²
Inlet		71.99					
1	0.0	71.83	71.99		25.13	1.00	
2	58.6	50.41	49.81	36.24	22.96	0.91	54.8
3	117.9	50.09	49.81	32.89	20.78	0.67	54.3
4	176.5	50.01	49.81	31.82	18.84	0.46	49.0
5	237.1	49.78	49.81	29.97	17.00	0.25	44.9
5	296.5	49.19	49.81	27.55	15.05	0.04	48.5
Outlet		50.09					

(b) File No. B4005111

$$G_r=349.7[\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}] \quad W_C=665.1[\text{kg}/\text{h}]$$

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

Sec.	z/d_i	T_r °C	T_b °C	T_{wi} °C	T_c °C	x	q kW/m ²
Inlet		70.91					
1	0.0	70.80	70.91		34.60	1.00	
2	58.6	50.08	50.58	42.02	32.76	1.00	30.2
3	117.9	48.92	48.61	40.26	30.77	0.87	32.2
4	176.5	48.80	48.61	39.97	28.81	0.73	32.1
5	237.1	48.70	48.61	38.77	26.82	0.59	31.5
5	296.5	48.90	48.61	35.59	24.81	0.45	32.5
Outlet		48.92					

(c) File No. B4005092

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

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

Sec.	z/d_i	T_r °C	T_b °C	T_{wi} °C	T_c °C	x	q kW/m ²
Inlet		68.52					
1	0.0	68.21	68.52		29.01	1.00	
2	58.6	49.61	47.92	37.00	27.23	0.92	28.3
3	117.9	48.76	47.92	34.64	25.43	0.71	28.2
4	176.5	48.26	47.92	34.10	23.73	0.51	27.0
5	237.1	47.94	47.92	33.34	21.93	0.29	27.7
5	296.5	47.84	47.92	31.40	19.92	0.05	31.5
Outlet		48.18					

(d) File No. B4005161

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

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

Sec.	z/d_i	T_r °C	T_b °C	T_{wi} °C	T_c °C	x	q kW/m ²
Inlet		68.29					
1	0.0	68.07	68.29		35.86	1.00	
2	58.6	50.19	48.54	42.12	34.22	1.00	16.9
3	117.9	48.68	47.82	40.64	32.43	0.87	18.1
4	176.5	48.15	47.82	40.01	30.68	0.73	18.0
5	237.1	47.96	47.82	39.12	28.79	0.59	18.8
5	296.5	48.14	47.82	37.02	26.81	0.44	20.1
Outlet		48.25					

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

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

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

Sec.	z/d_i	T_r °C	T_b °C	T_{wi} °C	T_C °C	x	q kW/m ²
Inlet		75.11					
1	0.0	74.97	75.11		26.33	1.00	
2	58.6	57.70	58.12	37.42	24.20	0.83	52.2
3	117.9	55.49	54.75	33.45	22.09	0.57	51.0
4	176.5	53.85	52.67	32.11	20.33	0.37	43.1
5	237.1	51.22	51.24	29.90	18.66	0.18	39.5
Outlet	296.5	48.62	50.29	27.15	17.03	0.00	39.4

(b) File No. B3012171

$$G_r=350.1[\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}] \quad W_C=644.7[\text{kg}/\text{h}]$$

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

Sec.	z/d_i	T_r °C	T_b °C	T_{wi} °C	T_C °C	x	q kW/m ²
Inlet		70.48					
1	0.0	70.34	70.48		41.98	1.00	
2	58.6	59.26	60.12	47.85	40.25	0.92	27.5
3	117.9	57.71	58.11	45.67	38.54	0.78	26.8
4	176.5	56.30	56.41	45.11	36.88	0.65	26.4
5	237.1	55.12	54.93	43.49	35.18	0.52	26.1
Outlet	296.5	54.30	53.87	39.59	33.70	0.41	23.2

(c) File No. B3012201

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

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

Sec.	z/d_i	T_r °C	T_b °C	T_{wi} °C	T_C °C	x	q kW/m ²
Inlet		75.01					
1	0.0	74.67	75.01		30.61	1.00	
2	58.6	58.53	57.72	39.69	28.56	0.86	27.1
3	117.9	56.45	54.68	36.37	26.61	0.63	25.4
4	176.5	54.66	52.56	35.40	24.83	0.44	23.5
5	237.1	51.31	50.90	34.20	22.93	0.24	24.3
Outlet	296.5	48.74	49.72	31.85	20.95	0.03	25.8

(d) File No. B3012214

$$G_r=201.4[\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}] \quad W_C=367.2[\text{kg}/\text{h}]$$

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

Sec.	z/d_i	T_r °C	T_b °C	T_{wi} °C	T_C °C	x	q kW/m ²
Inlet		76.96					
1	0.0	76.67	76.96		43.63	1.00	
2	58.6	62.52	62.29	49.70	41.76	0.94	16.9
3	117.9	60.43	60.14	47.33	39.94	0.79	16.3
4	176.5	58.74	58.35	46.36	38.20	0.65	15.8
5	237.1	57.35	56.81	44.85	36.42	0.52	15.6
Outlet	296.5	55.85	55.59	41.65	34.71	0.39	15.3

付表 3. 混合冷媒50mol% HCFC22 の実験結果の例

(a) File No. B2002271

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

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

Sec.	z/d_i	T_r °C	T_b °C	T_{wi} °C	T_C °C	x	q kW/m ²
Inlet		78.84 78.68	78.84		30.17	1.00	
1	0.0			42.22			53.1
2	58.6	64.95	66.26	37.57	27.62	0.77	48.6
3	117.9	61.82	61.63	35.24	25.25	0.50	40.0
4	176.5	59.08	57.70	32.34	23.33	0.31	33.4
5	237.1	54.66	54.46	29.55	21.67	0.15	33.7
Outlet	296.5	49.50 50.34	50.64		20.03	0.00	

(b) File No. B2003061

$$G_r=349.8[\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}] \quad W_C=446.0[\text{kg}/\text{h}]$$

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

Sec.	z/d_i	T_r °C	T_b °C	T_{wi} °C	T_C °C	x	q kW/m ²
Inlet		78.85 78.72	78.85		51.64	1.00	
1	0.0			57.78			23.3
2	58.6	68.75	70.63	55.38	49.52	0.92	23.2
3	117.9	67.04	68.63	54.23	47.38	0.78	22.4
4	176.5	65.18	66.60	52.08	45.34	0.66	21.6
5	237.1	63.40	64.47	47.61	43.31	0.54	19.5
Outlet	296.5	61.84 60.24	62.53		41.51	0.44	

(c) File No. B2002273

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

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

Sec.	z/d_i	T_r °C	T_b °C	T_{wi} °C	T_C °C	x	q kW/m ²
Inlet		78.28 77.95	78.28		33.09	1.00	
1	0.0			43.18			29.3
2	58.6	64.63	65.90	39.01	30.65	0.78	24.8
3	117.9	62.02	61.85	37.03	28.55	0.54	22.7
4	176.5	59.75	57.94	35.44	26.66	0.35	21.0
5	237.1	54.57	54.29	33.14	24.85	0.17	22.4
Outlet	296.5	49.00 49.35	50.08		22.96	0.00	

(d) File No. B2003071

$$G_r=200.3[\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}] \quad W_C=347.0[\text{kg}/\text{h}]$$

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

Sec.	z/d_i	T_r °C	T_b °C	T_{wi} °C	T_C °C	x	q kW/m ²
Inlet		83.39 83.08	83.39		52.45	1.00	
1	0.0			57.58			16.4
2	58.6	71.56	72.45	55.00	50.53	0.90	13.8
3	117.9	69.28	70.38	53.69	48.89	0.76	13.2
4	176.5	67.30	68.28	51.91	47.35	0.63	13.0
5	237.1	65.44	66.02	48.73	45.78	0.51	11.4
Outlet	296.5	63.58 61.81	64.03		44.43	0.40	