非共沸混合冷媒 R22+R114 の
水平管内強制対流沸騰熱伝達*宮良明男^{*1}, 高松 洋^{*2}, 小山 繁^{*2}
米本和生^{*3}, 藤井 哲^{*2}Forced Convective Boiling of Nonazeotropic Refrigerant
Mixtures of R22 and R114 Inside a Horizontal TubeAkio MIYARA, Hiroshi TAKAMATSU, Shigeru KOYAMA,
Kazuo YONEMOTO, and Tetsu FUJII

Experimental results of forced convective boiling of nonazeotropic refrigerant mixtures of R22 and R114 inside a horizontal tube with internal spiral grooves are presented. Pure refrigerants R22 and R114 and three kinds of their mixtures containing about 25, 50 and 75 mol% R114 are tested in the ranges of mass velocity of 77 to 347 kg/(m²s) and of pressure of 0.6 to 7 bar. The axial distributions of refrigerant temperature and heat transfer coefficient for mixed refrigerants depend on the concentration, while those for pure refrigerants of R22 and R114 show similar behavior. An empirical correlation concerning the heat transfer coefficient of pure and mixed refrigerants is proposed as a function of the boiling number, Lockhart-Martinelli parameter and liquid heat transfer coefficient for a smooth tube.

Key Words: Phase Change, Convective Boiling, Heat Transfer, Refrigerant Mixture, R22, R114, Horizontal Tube, Internally Grooved Tube, Experiment

1. 緒 言

ヒートポンプの性能向上に関する研究の一つとして、フロン系非共沸混合冷媒の強制対流沸騰に関する研究が盛んに行われるようになってきた。水平平滑管内の実験的研究には、混合冷媒 R22+R12 の Mishra ら⁽¹⁾, 混合冷媒 R12+R13 の Singal ら⁽²⁾, 2種類の混合冷媒 R22+R12 および R22+R114 の Hihara ら⁽³⁾, 混合冷媒 R13B1+R152a の Ross ら⁽⁴⁾の研究などがある。Mishra ら, Singal らおよび Hihara らは、従来の純冷媒に関する整理式に基づき特定の組成比についての整理式を提案している。Ross らは沸騰熱伝達特性の詳細な検討を試みているが、まだ疑問点が多い。これらの実験はすべて電気加熱方式によるものである。

本報は、内面溝付き管で作られた温水加熱による対向流形の水平管内蒸発器における非共沸混合冷媒 R22+R114 の強制対流沸騰に関する実験的研究である。

記 号

Bo: ボイリング数 $=q/(G(h_v - h_L))$ c_p : 定圧比熱 d_i : 内管平均内径 d_o : 内管外径

G: 質量速度

 h : 比エンタルピー m_{ij} : 異種分子間相互作用パラメータ

P: 圧力

 P_r : プラントル数

Q: 各小区間での熱交換量

q: 熱流束

T: 温度

W: 質量流量

 x : クオリティ y : R114 のモル分率 $\bar{y}$: R114 の質量分率 Δz : 小区間の有効伝熱長さ α : 熱伝達係数 α_l : 液のみが管を満たして流れる場合の熱伝達係数 λ : 熱伝導率

* 昭和63年3月31日 第65期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和62年11月4日。

^{*1} 准員, 九州大学大学院総合理工学研究科 (〒816 春日市春日公園6-1)。

^{*2} 正員, 九州大学機能物質科学研究所 (〒816 春日市春日公園6-1)。

^{*3} ダイキン工業(株) (〒591 堺市金岡町1304)。

μ : 粘度 ρ : 密度 X_u : Lockhart-Martinelli のパラメータ

$$=(\mu_L/\mu_V)^{0.1}(\rho_V/\rho_L)^{0.5}[(1-x)/x]^{0.9}$$

添字

 b : 混合平均 L : 液 m : 混合物 r : 冷媒 s : 熱源水 V : 蒸気 w_i : 内管内壁面 w_o : 内管外壁面

1: 各小区間の入口

2: 各小区間の出口

2. 実験装置および実験方法

図 1 に実験装置の系統図を示す。装置は圧縮式ヒートポンプループである。凝縮器③および蒸発器⑧には、それぞれに熱源ユニット⑬および⑭から一定温度に保たれた熱源水が一定流量で供給される。なお、冷媒中への油混入量は圧縮機出口で約 1%，油分離器出口で 0.1% 程度と予想される。

図 2 に蒸発器の詳細を、図 3 に伝熱管（内管）の詳細を示す。蒸発器は二重管向流形で、冷媒は内管内を流れ、熱源水は内管と外管との間の環状部を冷媒と逆向きに流れる。内管は内面に深さ 0.15 mm、条数 60、リード角 30°の三角溝のついた外径 9.52 mm、平均内径 8.32 mm の銅製の内面溝付き管で、外管は半径 8 mm の半円の溝を掘ったポリカーボネイト製の角材を合わせて構成されている。全長は 4.8 m で、環状部が 0.4 m (有効伝熱長さは 0.37 m) の小区間に 12 分割されて

いる。各小区間の熱交換量の算出のため、出入口で熱源水の混合平均温度⑤を測定し、仕切り板⑦の位置で冷媒の温度③および圧力④を、各小区間の中央で内管外壁面温度⑥を上下左右の 4 点測定した（図 2 参照）。冷媒流量はタービン流量計で、熱源水流量は浮遊式流量計で測定した（図 1 参照）。冷媒の混合平均組成比（混合平均の質量分率 $\bar{y}_b$ およびモル分率 y_b ）は圧縮機出口の過熱蒸気をサンプリングし、ガスクロマトグラフで測定した。

表 1 に実験範囲を示す。実験は R22, R114 の純冷媒および約 25, 50, 75 mol % R114 の 3 種類の組成比の混合冷媒について行った。

3. 実験データの整理方法

図 4 に混合平均温度 T_b とクオリティ x を求める際の物理モデルを示す。管軸に垂直な断面で、気相内および液相内においては温度および濃度の分布がないとする。気液二相状態では、 x と蒸気の質量分率 $\bar{y}_v$ 、液の質量分率 $\bar{y}_L$ および混合平均質量分率 $\bar{y}_b$ には次の関係が成立する。

- ① Mixing chamber (refrigerant) ② Mixing chamber (heat source water) ③ Thermocouple (refrigerant)
④ Pressure tap ⑤ Thermocouple (heat source water) ⑥ Thermocouple (inner tube outer surface)
⑦ Partition plate

図 2 蒸発器

A-A Cross section

図 3 伝熱管（内管）

- ① Compressor ② Oil separator ③ Condenser
④ Sight glass ⑤ Cooler ⑥ Turbine flow meter
⑦ Expansion valve ⑧ Evaporator ⑨ Accumulator
⑩ Reservoir ⑪ Inverter ⑫ Heat source unit
⑬ Heat sink unit ⑭ Float-type flow meter

図 1 実験装置の系統図

表 1 実験範囲

Refrigerant	R22	R22 + R114			R114
Molar fraction of R114	0	0.23 ~ 0.24	0.46 ~ 0.49	0.73 ~ 0.75	1
Mass velocity kg/(m ² s)	153 ~ 347	153 ~ 337	107 ~ 296	204 ~ 266	77 ~ 291
Pressure bar	4.3 ~ 7.0	2.8 ~ 5.5	2.7 ~ 3.5	2.1 ~ 2.6	1.0 ~ 2.4
Inlet saturation temperature °C	-5 ~ 11	-11 ~ 9	-11 ~ 4	3 ~ 10	4 ~ 28
Inlet quality	0.15 ~ 0.27	0.16 ~ 0.29	0.13 ~ 0.21	0.17 ~ 0.20	0.05 ~ 0.19
Heat transfer rate kW	1.7 ~ 3.1	1.3 ~ 2.5	0.9 ~ 2.1	1.3 ~ 1.7	0.6 ~ 1.7

図 4 物理モデル

図 5 相平衡図

$$x = (\bar{y}_L - \bar{y}_b) / (\bar{y}_L - \bar{y}_v) \quad (1)$$

$\bar{y}_v$ および $\bar{y}_L$ は次の相平衡の関係から求まる。

$$\left. \begin{aligned} \bar{y}_v &= \mathcal{F}_v(P, T_b) \\ \bar{y}_L &= \mathcal{F}_L(P, T_b) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

また、長さ Δz の各小区間において次の熱収支の関係が成立する。

$$\begin{aligned} W_r[(1-x_1)h_{L1} + x_1h_{v1}] + Q \\ = W_r[(1-x_2)h_{L2} + x_2h_{v2}] \quad (3) \end{aligned}$$

ここで、 W_r は冷媒質量流量、 Q は熱交換量、 h は比エンタルピーであり、添字 1 および 2 は小区間の入口および出口を表す。蒸気および液の比エンタルピーは

$$\left. \begin{aligned} h_v &= h_v(p, T_b, \bar{y}_v) \\ h_L &= h_L(p, T_b, \bar{y}_L) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

の関係から求まる。蒸発器出口の冷媒の比エンタルピーは蒸発器の冷媒出口側に設置された混合室で測定した圧力と温度より求められる過熱蒸気の比エンタルピーと等しいとして、 W_r 、 $\bar{y}_b$ および局所の P と Q の測定値を与え、式(1)～(4)の関係を用いて、 x および T_b を蒸発器出口から上流の方向に順に求めた。式(2)および(4)の計算には修正 BWR 状態方程式⁽⁵⁾⁽⁶⁾を用いた。その際混合則における異種分子間相互作用パラメータ m_{ij} は測定データ⁽⁷⁾を参考に $m_{ij}=0.976$ とした。

図 5 に混合冷媒 R22+R114 の圧力 3 bar における相平衡図を示す。実線および破線はそれぞれ修正 BWR 式および Raoult の法則による計算値である。沸点温度に関して、両者の間には最大 6 K 程度の差異がある。

各小区間の内管内壁面の代表温度 T_{wi} は測定した 4 点の外壁面温度の算術平均値 T_{wo} と熱交換量 Q を次式に代入して求めた。

$$T_{wi} = T_{wo} - Q \ln(d_o/d_i) / (2\pi\Delta z\lambda_w) \quad (5)$$

ここで、 d_i は内管平均内径、 d_o は内管外径、 λ_w は内管の熱伝導率である。

各小区間での熱伝達係数 α は次式で定義した。

$$\alpha = q / (T_{wi} - T_b) \quad (6)$$

ここで、

$$q = Q / (\pi d_i \Delta z) \quad (7)$$

実験データの無次元整理の際、混合冷媒の液粘度は $\ln \mu_{Lm} = \sum_{i=1}^2 y_{Li} (\ln \mu_{Li})$ 、蒸気粘度は Wilke⁽⁸⁾の式、液熱伝導率は陳ら⁽⁹⁾の式、液比熱は $c_{pLm} = \sum_{i=1}^2 \bar{y}_{Li} c_{pLi}$ で求めた。

4. 実験結果および考察

図 6(a) および (b) に純冷媒 R22 および R114 の実験結果の代表例を示す。○印は熱源水温度 T_s 、□印は内管内壁面代表温度 T_{wi} 、△印は冷媒温度 T_r (測定値)、▽印は冷媒の混合平均温度 T_b (計算値)、●印は熱流束 q 、▼印は熱伝達係数 α 、◇印はクオリティ x である。セクション番号は冷媒の入口側から順に 1, 2, ..., 12 とした。 T_r は、圧力降下のために第 1 セクションから下流に向かってわずかに低下し、 $x \approx 1$ で上昇しはじめ T_s に近づく。 T_{wi} は下流に向かってわずかに低下し、 x が 1 になる直前で急激に上昇し T_s に近

づく。この T_{wi} の急激な上昇はドライアウトによる。
 $(T_s - T_r)$ は冷媒入口から流れ方向に増加し、ドライ
 アウト点近傍で最大となり、その後減少する。 q およ
 び α は第1セクションから下流に向かって次第に大
 きくなり、ドライアウト後急激に小さくなる。

図7(a), (b)および(c)にそれぞれ77 mol %
 R22+23 mol % R114, 51 mol % R22+49 mol %
 R114 および 25 mol % R22+75 mol % R114 の混合
 冷媒の実験結果の代表例を示す。記号は図6と同一で
 ある。 T_r は、液および蒸気の組成変化のため第1セク
 ションから下流に向かって次第に上昇するが、その上
 昇の仕方は組成比によって異なり、図7(a)の場合下
 に凸、図7(b)および(c)の場合上に凸となる。 T_{wi} は
 下流に向かって上昇し、 x が1になる直前でドライア
 ウトにより急激に上昇する。 $(T_s - T_r)$ の流れ方向変化
 は純冷媒の場合よりも小さく、その変化の仕方は組成

(a) 77 mol%R22+23 mol%R114

(b) 51 mol%R22+49 mol%R114

(a) R22

(b) R114

(c) 25 mol%R22+75 mol%R114

図6 実験結果 (純冷媒)

図7 実験結果 (混合冷媒)

比および冷媒と熱源水の流量により異なる。 α は、図7(c)ではドライアウト点まで徐々に増加するが、図7(a)では $x \approx 0.6$ までわずかに増加した後やや減少する傾向を示す。 q の分布は図7(a)~(c)で異なった傾向を示しているが、冷媒と熱源水の流量に依存すると考えられる。

ドライアウトを生じる前のデータについて、従来の実験式を参照し、熱伝達係数を各組成比ごとに次式で整理した。

$$\alpha/\alpha_l = C_1 Bo \times 10^4 + C_2 (1/X_{tt})^e \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 X_{tt} はLockhart-Martinelliのパラメータ、 Bo はボイリング数、 α_l は液のみが管内を満たして流れる場合の熱伝達係数で、ここでは平滑管に関する次式を用いた。

$$\alpha_l = 0.023(\lambda_L/d_i)\{G(1-x)d_i/\mu_L\}^{0.8} Pr_L^{0.4} \quad \dots\dots\dots (9)$$

表2および図8に係数 C_1 、 C_2 および指数 e の値と組成比との関係を示す。図中の○、△および□印は表2の値で、実線はそれらを近似する次式である。

$$C_1 = 1.60 - 8.08y_b + 22.0y_b^2 - 28.4y_b^3 + 14.2y_b^4 \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$C_2 = 6.71 - 13.0y_b + 28.2y_b^2 - 37.5y_b^3 + 20.0y_b^4 \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$e = 0.95 - 1.91y_b + 5.92y_b^2 - 6.67y_b^3 + 2.66y_b^4 \quad \dots\dots\dots (12)$$

表2 C_1 、 C_2 および e

Composition % R22 - R114	C_1	C_2	e
100 - 0	1.6	6.71	0.95
77 - 23	0.6	4.80	0.75
52 - 48	0.4	3.85	0.80
27 - 73	0.4	3.30	0.87
0 - 100	1.3	4.39	0.95

図8 C_1 、 C_2 および e

ここで、 y_b はR114の混合平均モル分率である。図9に式(8)および(10)~(12)による計算値 α_{cal}/α_l と実験値 α_{exp}/α_l との比較を示す。○および◇印は純冷媒R22およびR114、△、□および▽印はそれぞれ約25, 50, 75 mol% R114である。式(8)は実験結果を約±30%以内の誤差で整理する。なお、表3に整理に用いた α 、 Bo 、および X_{tt} の範囲を示す。

図10に内面溝付き管に対する整理式(8)と平滑管に対するHiharaら⁽³⁾の整理式との比較を $Bo = 5 \times 10^{-4}$ について示す。太線が前者に細線が後者に対応している。また、実線および破線はそれぞれR114およびR22、一点鎖線および二点鎖線はそれぞれ80 mol% R22+20 mol% R114および20 mol% R22+80 mol% R114に対応している。式(8)による計算値は、Hiharaらの式による計算値より、R22およびR114では2~4倍程度、混合冷媒では1.5~3倍程度高い。

図9 α_{exp}/α_l と α_{cal}/α_l との比較

図10 式(8)とHiharaらの式との比較

表 3 α , $Bo \times 10^4$ および $1/X_{tt}$ の範囲

Refrigerant	R22	R22 + R114			R114
Molar fraction of R114	0	0.23 ~ 0.24	0.46 ~ 0.49	0.73 ~ 0.75	1
α kW/(m ² K)	8.0 ~ 23.9	2.9 ~ 7.1	2.1 ~ 6.5	2.2 ~ 7.6	3.5 ~ 12.6
$Bo \times 10^4$	2.9 ~ 21.2	3.1 ~ 9.8	3.6 ~ 9.1	2.5 ~ 6.0	2.0 ~ 35.4
$1/X_{tt}$	1.5 ~ 26.4	1.4 ~ 103	1.9 ~ 83.5	2.4 ~ 67.7	1.8 ~ 59.3

いずれの式においても R22 が R114 より高い値を示し、混合冷媒はそれらより低い値を示す。

5. 結 論

内面溝付き管を伝熱管とした対向流形の水平管内蒸発器における非共沸混合冷媒 R22+R114 の熱伝達に関する実験を行い、以下の結論を得た。

(1) 非共沸混合冷媒では、冷媒と熱源水との温度差の流れ方向変化が純冷媒の場合に比べて小さくなる。ただし、その程度は組成比のみでなく冷媒と熱源水の流量に依存する。

(2) ドライアウトを生じる前の局所熱伝達係数の実験データを約±30%以内で整理する実験整理式を得た。

(3) 本実験で使用した内面溝付き管の熱伝達係数は、Hihara ら⁽³⁾の平滑管に対する整理式より、R22 および R114 で 2~4 倍程度、混合冷媒で 1.5~3 倍程度高い値を示す。

なお、本研究の遂行にあたり日本冷凍協会（創立 60 周年記念事業）および文部省科学研究補助金（61750189, 62603026）の援助を受けた。また、実験に際し、本学大学院生の高雷君および平良繁治君の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

文 献

- (1) Mishra, M. P., Varma, H. K. and Sharma, C. P., *Letters in Heat and Mass Transf.*, 8-2 (1981), 127.
- (2) Singal, L. C., Sharma, C. P. and Varma, H. K., *Int. J. Refrig.*, 7-5 (1984), 278.
- (3) Hihara, E., Tanida, K. and Saito, T., *Proc. 1987 JSME-ASME Joint Conf.*, 5 (1987), 119.
- (4) Ross, H., Radermacher, R., Marzo, M. DI and Didion, D., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 30-5 (1987), 979.
- (5) 斎藤, 平衡物性推算の基礎, (昭 55), 143, 培風館.
- (6) Nishiumi, H. and Saito, S., *J. Chem. Eng. Japan*, 8-5 (1975), 356.
- (7) Hasegawa, N., Uematsu, M. and Watanabe, K., *J. Chem. Eng. Data*, 30-1 (1985), 32.
- (8) Wilke, C. R., *J. Chem. Phys.*, 18 (1950), 517.
- (9) 陳・藤井・藤井, 九大生研所報, 第 82 号, (昭 62-3), 173.