代替冷媒 HFC134a の水平平滑管内蒸発熱伝達の実験*

高松 洋*¹ 桃木 悟*² 平岡 晋*³
中田 春男*⁴ 小山 繁*¹ 藤井 哲*¹

An Experiment on the Heat Transfer to Substitute Refrigerant HFC134a
Evaporating in a Horizontal Smooth Tube

Hiroshi TAKAMATSU, Satoru MOMOKI, Susumu HIRAOKA,
Haruo NAKADA, Shigeru KOYAMA and Tetsu FUJII

An experiment is performed on the heat transfer to CFC12 and its alternative HFC134a evaporating in a 6m-long, 7.9mm-ID smooth tube. A double-tube-type evaporator, where heating water flows countercurrently, is used as the test section. A comparison of measured local heat transfer coefficient between HFC134a and CFC12 is made by adjusting the heat flux distributions for both fluids. Also, by a comparison between both fluids in heat transfer coefficient vs heat flux diagrams, the heat transfer coefficient of HFC134a is shown to be about 25% higher than that of CFC12 for the same saturation temperature, mass velocity, heat flux and quality. Correlations proposed by Dhar et al. and Yoshida et al. also give a higher heat transfer coefficient for HFC134a than that of CFC12, although the difference is a little smaller than that of the experimental results. From the standpoint of the heat transfer in the evaporator, HFC134a is adequate as an alternative working fluid for CFC12.

Key Words: CFC Alternative, HFC134a, Heat Transfer, Evaporator,
Smooth Tube, Horizontal Tube, Experiment

1. 緒言

現在, 自動車用エアコン等に広く使用されているフロン系冷媒 CFC12 は, オゾン層破壊性のため, 将来使用が禁止される。HFC134a は熱力学的性質, 特に飽和の温度と圧力の関係が CFC12 に近いことおよびオゾン層破壊に寄与しないと考えられることから CFC12 の代替物質の有力候補と考えられている(例えば文献(1))。しかし, 代替物質を用いたシステムの開発には毒性, 化学的安定性, 環境破壊に対する影響などの物性の研究のみならず, システムの要素機器における特性の研究が不可欠である。ここでは, エアコン等の蒸発器への応用を想定して HFC134a の水平平滑管内蒸発熱伝達の実験を行い CFC12 の熱伝達と比較した結果について報告する。

2. 実験装置

図1に実験装置の系統図を示す。冷凍機油の影響を除

くため試験ループはポンプによる強制循環ループとした。容積式ポンプ(1)を出た冷媒は, 流量計(2), 予熱器(4), 試験蒸発器(5), 後部加熱器(6), 凝縮器(7), 補助凝縮器(8), ストレーナ(10)の順に循環する。試験蒸発器へは熱源ユニット(13)で一定温度に保たれた加熱用熱源水が供給される。系の圧力調節は主に液溜(9)を利用してループ中の冷媒の充填量を変えることにより行い, さらに後部過熱器での加熱量と凝縮器での冷却量により細かな調節を行なう。試験蒸発器入口の冷媒のエンタルピは予熱器への投入電力により調節される。

図2に試験蒸発器の詳細を示す。蒸発器は全長6.0mの二重管型で, 冷媒は内管内を, 熱源水は内管と外管の間の環状部を冷媒と逆向きに流れる。内管は内径7.9mm, 外径9.5mmの銅製の平滑管, 外管は半円型の溝を有するポリカーボネイト製の角材を合わせた構造になっており内径16mmである。管軸方向の局所熱流束算出のため, 環状部は長さ0.5m(有効加熱長さ0.46m)の12の小区間に分割されている。また, 蒸発器入口には長さ0.6mの助走区間が設けられている。

実験では, 試験蒸発器の出入口の混合器で冷媒の混合平均温度を, それぞれの小区間の中央の位置で内管の上

* 平成元年11月16日 熱工学講演会において講演, 原稿受付平成2年5月9日。

*¹ 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)。

*² 九州大学大学院。

*³ 正員, 昭和電工(株)(〒210 川崎市川崎区扇町5番3号)。

*⁴ ダイキン工業(株)(〒590 堺市金岡町1304番地)。

図1 実験装置

図2 試験蒸発器

下左右の外表面温度を $\phi 0.1\text{mm}$ の熱電対で計48点、小区間の出入口の位置で冷媒の温度を計13点、仕切られた小区間の出入口の混合器で熱源水の混合平均温度を計13点測定した。また、試験蒸発器入口の圧力および3つの小区間ごとの圧力降下を測定し、局所の圧力を内挿して求めた。冷媒および加熱用熱源水の流量はそれぞれ質量流量計および歯車式体積流量計で測定した。

冷媒の飽和温度は圧力から算出したが飽和域では冷媒の測定温度と 0.1K 以内で一致した。熱伝達係数 α は次式で定義した。

$$\alpha = q / (T_{wi} - T_{sat}) \quad (1)$$

ここに、 q は各小区間での伝熱管内面平均熱流束、 T_{wi} は伝熱管内表面の周方向平均温度、 T_{sat} は飽和温度である。また、局所の冷媒の混合平均エンタルピは、蒸発器の入口または出口での過冷液または過熱蒸気の混合平均温度より求めたエンタルピを基準として熱収支より算出した。HFC134aに関しては、飽和温度と圧力の関係は朴ら⁽²⁾の式より、エンタルピはPiaoら⁽³⁾の状態方程式から導出した式より求めた。CFC12の物性値は文献(4)に基づき算出した。

3. 実験結果および考察

図3(a), (b)に、それぞれ質量速度と飽和温度が等しい場合のHFC134a, CFC12の測定結果の代表例を示す。図で T_s は熱源水温度、 T_r は冷媒温度の測定値、 T_b はエンタ

ルピより求めた冷媒の混合平均温度、 T_{wi} は伝熱面温度、 x はクオリティ、 q は熱流束、 z/d は加熱長さを内管内径で無次元化した値である。向流式の蒸発器を用いているので、過熱蒸気域を除くと冷媒の下流に行くほど熱源水と冷媒の温度差が大きくなる。したがって、電気加熱による一様熱流束下での実験とは異なりクオリティの増加にともない熱流束も増加する。

図4(a), (b)は、2通りの質量速度の場合についてHFC134aとCFC12の熱流束分布がよく一致しているデータの熱伝達係数 α および熱流束 q をクオリティ x に対して示したものである。なお、図4(b)は図3の測定結果に対応している。いずれの場合もHFC134aの熱伝達係数の方が高くなっていることがわかる。

図5はある一定のクオリティにおける熱伝達係数を熱流束に対して示している。図5(a), (b)は質量速度 G が約 $115\text{kg/m}^2\text{s}$ の場合、図5(c), (d)は約 $303\text{kg/m}^2\text{s}$ の場合である。圧力はいずれも 0.64MPa 、蒸発温度は約 25°C である。図中の実験値は熱伝達係数と熱流束の測定値をクオリティに対して内挿して求めた。また、比較の目安として実験値を破線でつないで示している。一般には熱伝達係数に及ぼす熱流束の影響は質量速度およびクオリティが小さいほど大きいと考えられるが、本実験のように向流型の蒸発器を用いると全てのクオリティで広範囲の熱流束のデータを得ることができないため図には上述の傾向は認められない。しかし、いずれの場合もHFC134aの熱伝達係数はCFC12よりも25%程度大き

い値を示す。

図6(a)および(b)はそれぞれ図4(a)および(b)の条件の場合について、水平管内蒸発に関するDharら⁽⁵⁾の式および吉田ら⁽⁶⁾の式を用いて算出した熱伝達係数と実験値との比較を示す。前者は核沸騰が支配的と考えられるデータに基づいた式、後者は管壁全周が液で濡らされているデータに基づいた式である。計算に用いた物性値は付録に示す。本実験結果はいずれの式とも一致していないが、熱伝達係数の計算値はいずれもHFC134aの方がCFC12よりも高くなっている。しかし、その程度は実験値の方がやや大きい。

4. 結 言

フロン系冷媒HFC134aとCFC12の水平平滑管内蒸発熱伝達を実験的に比較した。その結果、質量速度、温度、クオリティおよび熱流束が等しい場合、HFC134aの熱伝達係数はCFC12よりも25%程度大きい値を示すことがわかった。したがって、蒸発熱伝達の観点からはHFC134aはCFC12の代替物質として十分使用できる。なお、本研究の遂行にあたり、文部省科学研究費補助金(重点領域研究, 課題番号63603024, 01603022)の援助を受けた。ここに記して謝意を表す。

図3 測定結果の例

図4 熱伝達係数と熱流束のクオリティに対する分布

図5 熱伝達係数と熱流束の関係

図6 従来の式による熱伝達係数の比較

付 録

図7(a)～(h)にHFC134aとCFC12の飽和状態での物性値の比較を示す。CFC12に関してはすべて文献(4)より求めた。HFC134aについては、密度、潜熱、比熱はPiaoら⁽³⁾の状態方程式より導出した式、飽和液の粘性係数および飽和蒸気の熱伝導率はShanklandら⁽⁷⁾の式より求めた。飽和液の熱伝導率はYataら⁽⁸⁾の測定値に、表面張力は岡田ら⁽⁹⁾の測定値に基づいている。また、飽和蒸気の粘性係数はLicht-Stechertの式(文献(10)で推奨)を用いて推算した。蒸発潜熱、液の熱伝導率および液の比熱はHFC134aの方が大きく、HFC134aの熱伝達係数が大きい原因と考えられる。

文 献

- (1) Spauschus, H.O., HFC134a as a Substitute Refrigerant for CFC12, *Int.J.Refrig.*, 11-11 (1988), 389.
- (2) 朴・ほか2名, フロン代替物質R134aの熱力学性質に関する研究, 第9回日本熱物性シンポジウム講演論文集, (1988), 235.
- (3) Piao, C. C., ほか2名, Thermodynamic Properties of HFC134a, *Proc.2nd Asian Thermophys. Prop. Conf.*, (1989), 531.
- (4) 日本冷凍協会編, 冷媒熱物性値表 R12 蒸気表, (1981).
- (5) Dhar, P. L., ほか2名, A New Correlation of Heat

図7 HFC134aとCFC12の飽和状態における物性値の比較

- Transfer Data Obtained with Nucleate Boiling of Refrigerants in a Horizontal Tube, *Letters in Heat and Mass Transfer*, 6-2 (1979), 171.
- (6) 吉田 駿・ほか 3 名, 冷媒の水平蒸発管内熱伝達に関する研究, 冷凍, 58-666 (1983), 331.
- (7) Shankland, I. R., ほか 2 名, Thermal Conductivity of a New Stratospherically Safe Refrigerant-1, 1, 1, 2-tetrafluoroethane(R-134a), *Proc. Purdue IIR Conf.*, (1988), 57.
- (8) Yata, J., ほか 2 名, Thermal Conductivity of R123 and R134a in Liquid Phase, *Proc. 2nd Asian Thermophys. Prop. Conf.*, (1989), 201.
- (9) 岡田 昌章・ほか 3 名, 代替フロン R123 および R134a の表面張力の測定, 第 10 回日本熱物性シンポジウム講演論文集, (1989), 59.
- (10) 佐藤 一雄, 物性定数推算法, (1982), 79, 丸善.