

# 非共沸混合冷媒を用いたマルチエアコンの冷媒組成分布の研究

## Studies on Dispersion of Refrigerant Composition for Multi-Air Conditioners with Non-Azeotropic Refrigerant Mixture

技 術 本 部 平 尾 豊 隆\*<sup>1</sup> 渡 部 眞\*<sup>2</sup>  
 エアコン製作所 坪 野 正 寛\*<sup>3</sup> 北 川 勝 敏\*<sup>4</sup>

フロン規制の強化により、現在空調、冷凍用に広く使われている HCFC-22 などの HCFC 系の冷媒も、1996 年から消費量が凍結され、2020 年には廃止が決定している。HCFC-22 の有力な代替冷媒である非共沸混合冷媒 R 407 C をマルチエアコンに用いた場合の、循環冷媒組成比とシステム性能、運転点の予測手法の確立に取り組んだ。この結果、室内暖房停止機には低沸点冷媒の比率の高い液冷媒が貯留し、停止台数の増加に従い循環冷媒組成の低沸点冷媒の比率が低下することが分かり、実験でもこれを検証した。また、システム内に分布する冷媒組成を解析した結果、システム内の冷媒は不燃域にあり、冷媒が漏れた場合の不燃性が確認できた。

Amendments to the Montreal Protocol made in Copenhagen in November of 1992 decree that HCFC refrigerants such as HCFC-22, which are at present widely used in air conditioning and refrigeration systems, are to be regulated beginning in 1996 and phased out by 2020. Predictions regarding steady state performance technology and the cycle composition shifts of multi-air conditioners with non-azeotropic refrigerant mixtures are presented in this paper. It is predicted that the ratio of low boiling point refrigerants in the composition of indoor units not in operation will increase. Therefore, the ratio of the low boiling point refrigerants in cycle refrigerants will decrease along with the increase in indoor units not in operation. The results of our predictions indicate that cycle refrigerants will be nonflammable.

### 1. ま え が き

HCFC-22 の代替冷媒である非共沸混合冷媒 R 407 C (HFC 32/125/134 a=23/25/52 wt %) は冷媒熱物性が HCFC-22 と類似しているため、システムの大幅な変更をしなくて済む利点があり、業務用エアコンの最有力候補となっている。しかし、R 407 C は構成冷媒の沸点が異なる非共沸混合冷媒のため、サイクル内に特定冷媒の偏在が生じやすく、循環冷媒組成比が R 407 C の組成比からシフトする問題がある。

組成比がシフトすると冷媒熱物性値が変化し、システムの性能、運転点に影響を及ぼすため、システム性能を予測する際、循環冷媒組成の予測が必要不可欠となる。また、構成冷媒の一つである HFC 32 は可燃性冷媒のため、その比率が増加すると可燃域に入り安全性の面から問題となる。

特に室内ユニットが複数台となるマルチエアコンでは、運転台数が増え余剰冷媒量が大きく変化するなどの特有の運転をするため、冷媒の偏在を著しく加速する恐れがある。このため運転条件に対する冷媒偏在の分布特性を十分把握する必要がある。

また、マルチエアコンでは運転条件のパラメータ数が膨大であること、実験で組成分布を調査する場合、冷媒をサンプリングすること自体が充てん冷媒量及び組成比に影響するなどの問題から、予測技術を確認する必要があるため、研究に取り組んだ。

### 2. 非共沸混合冷媒システムの特徴

一般に、空調システムは蒸気圧縮式冷凍サイクルを使用している。蒸気圧縮式冷凍サイクルは、圧縮機、凝縮器、絞り膨張機構（電子膨張弁など）、蒸発器の主に四つのコンポーネントで構成される。各コンポーネントは配管で接続され、この閉ループを冷媒が循環して作動する。

非共沸混合冷媒を用いた空調システムの主な特徴は、次の二つ

である。

- (1) 一定圧力下の気液二相状態においても、乾き度の変化に伴い冷媒温度が変化する。
- (2) システム内に特定の冷媒が偏在し、循環冷媒組成比が充てん組成比からシフトする。

このため、従来からの単一冷媒に対応した冷凍サイクル解析手法が使用できず、非共沸混合冷媒に対応した解析法<sup>(1)~(3)</sup>の研究を進めている。

マルチエアコンは図 1 に示すように、1 台の室外機に複数の室内機を接続し、それらの室内機が自由に個別発停できる空調システムであり、現在ビル空調の主流となっている。マルチエアコンでは、室内機の運転台数、冷暖房運転モードによりシステムに必要な冷媒量が異なるので余剰冷媒が発生し、これをアキュムレータに貯留させている。

本報では、特にマルチエアコンの特徴である室内停止機（以下、停止ユニットと称する）に偏在する冷媒組成比の解析法について述べる。また、研究対象冷媒を R 407 C とする。表 1 に示すように、R 407 C は沸点が $-50^{\circ}\text{C}$ 程度の HFC 32 と HFC 125（以下、低沸点冷媒と称する）及び $-26^{\circ}\text{C}$ に近い HFC 134 a（以下、高沸点冷媒と称する）から構成される。

### 3. 停止ユニットの冷媒組成解析

マルチエアコンでは、一つの室外機に接続された複数の室内機がそれぞれ個別の運転を行うが、停止中は冷房でも暖房でも室内膨張弁を全閉とするため室内熱交換器に冷媒が停滞する。特に暖房での停止は熱交換器内が液封されることになり、その保有する冷媒量が多大となるため循環冷媒組成に及ぼす影響が大きい。このため、特に暖房停止機の解析法について述べる。

#### 3.1 暖房停止ユニットのモデル化

##### (1) 暖房停止ユニット

\*1 名古屋研究所制御システム研究室

\*3 技術部技術開発グループ

\*2 名古屋研究所制御システム研究室長

\*4 技術部主務

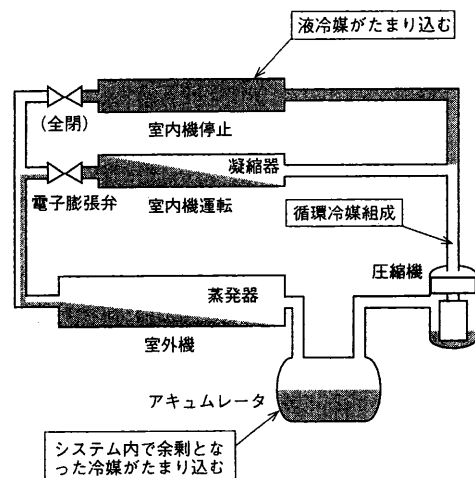


図1 マルチエアコン冷凍サイクル図 マルチエアコンは1台の室外機に複数の室内機を接続した構成であり、ビル空調の主流になっている。  
Schematic diagram of refrigerant cycle of multi-air conditioner

表1 R 407 C 構成冷媒の沸点  
Boiling points of HFC 32/125/134 a

|              | HFC 32 | HFC 125 | HFC 134 a |
|--------------|--------|---------|-----------|
| 沸 点 (°C)     | -51.8  | -48.6   | -26.2     |
| 充てん組成 (wt %) | 23     | 25      | 52        |

暖房運転時の停止ユニット熱交換器内には、圧縮機を吐出した循環ガス冷媒が流入する。流入したガス冷媒は周囲空気と熱交換し、凝縮した液冷媒が貯留して熱交換器内は液冷媒で満たされる。このため、停止してから定常（液封）に達するまでは、入口は過熱ガス温度、凝縮する部分（気液界面）は飽和温度、出口は過冷却液温度と長手方向に温度分布を持つ。

また、熱交換器は長い管と考えられ、低沸点冷媒の分圧が高沸点冷媒よりも高く、高沸点冷媒は手前で凝縮しやすいので、低沸点冷媒がより熱交換器の奥に流入しやすいと考えられる。

以上の考察を基に考えた暖房停止モデルを図2に示す。このモデルは計算フローを考えた過程1から4で構成される。熱交換器内を入口から循環組成ガス域、気液界面が存在する局所気液平衡域、過冷却液域の3領域に分割し（過程4）、局所気液平衡域のみ飽和液、飽和ガスが存在し、この飽和ガス冷媒が液化しそれだけ熱交換器内の乾き度が減少していくモデルとした。

## (2) 解析手法

基礎式は気液平衡式と過冷却域の物質収支式である。

以下図2を用いて説明する。

### ●過程1

微小領域  $V_x$  は気液平衡した飽和ガスで満たされる。微小領域のガス冷媒密度を  $\rho_{vx}$  とすると冷媒量  $dW_v$  は、次式となる。

$$dW_v = V_x \cdot \rho_{vx} \quad (1)$$

### ●過程2

微小領域のガスがすべて凝縮する。微小領域内で凝縮する冷媒組成比  $Y_{Lx}$  及び冷媒量  $dW_L$  は次式のとおりである。ただし、 $Y_v$  は式(15)（1回前の計算）から算出する。

$$Y_{Lx} = Y_v \quad (2)$$

$$dW_L = dW_v \quad (3)$$

ここで、熱交換器内の貯留液の冷媒組成比  $Y_{stPL}$  は次式となる。

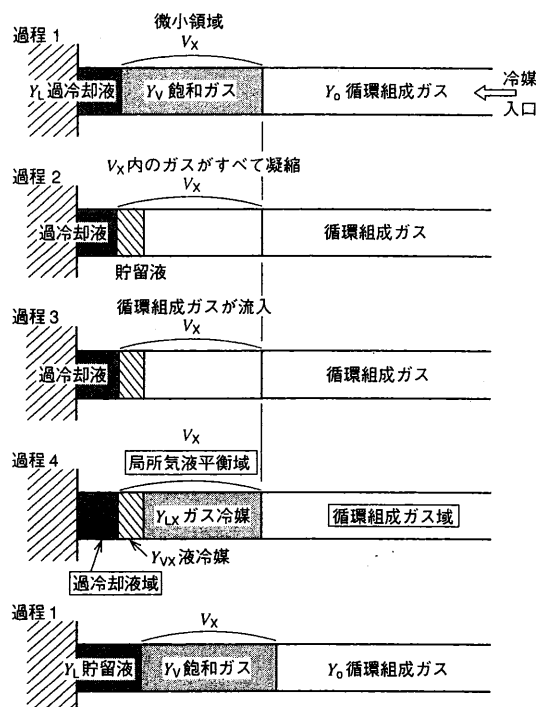


図2 暖房停止モデル図 熱交換器内を循環組成ガス域、局所気液平衡域、過冷却液域に分割するモデルとした。  
Model of indoor unit not in operation at heating mode

$$Y_{stPL} = (Y_{sc} \cdot W_{sc} + Y_{Lx} \cdot dW_L) / (W_{sc} + dW_L) \quad (4)$$

微小領域内の液、ガス容積は次式となる。

$$dV_L = dW_L / \rho_{Lx} \quad (5)$$

$$dV_v = V_x - dV_L \quad (6)$$

### ●過程3

微小領域に循環ガス冷媒（密度  $\rho_{vo}$ ）が流入する。 $V_x$  内のガス冷媒量  $dW_v$  は次式で表される。

$$dW_v = dV_v \cdot \rho_{vo} \quad (7)$$

微小領域  $V$  内の乾き度  $X_x$  は

$$X_x = dW_v / (dW_v + dW_L) \quad (8)$$

### ●過程4

微小領域内の気液冷媒組成比、密度は空気温度  $T_a$  で気液平衡が成立つとすると、次式となる。

$$Y_{vx}, Y_{Lx} = f(T_a, X_x) \quad (9)$$

$$\rho_{vx}, \rho_{Lx} = g(T_a, X_x) \quad (10)$$

次に凝縮液の質量保存則から次式が成立する。

$$dW_L + W_{sc} = \rho_{Lx} \cdot dV_v + W_{sc}' \quad (11)$$

停止ユニットの熱交換器内の乾き度  $X_{stp}$  は、次式となる。

$$X_{stp} = \frac{\rho_{vx} \cdot dV_v + W_{disv}}{(\rho_{vx} \cdot dV_v + W_{disv}) + (\rho_{Lx} \cdot dV_v + W_{sc}')} \quad (12)$$

熱交換器内の液冷媒組成比  $Y_{stPL}$  は式(4)で求められ、ガス冷媒組成比  $Y_{stpV}$  は、次式となる。

$$Y_{stpV} = \frac{Y_{vx} \cdot \rho_{vx} \cdot dV_v + Y_0 \cdot W_{disv}}{\rho_{vx} \cdot dV_v + W_{disv}} \quad (13)$$

よって、熱交換器内の冷媒組成比  $Y_{stp}$  は次式となり、

$$Y_{stp} = \frac{Y_{stPL} \cdot (W_{sc} + dW_L) + Y_{stpV} \cdot (\rho_{vx} \cdot dV_v + W_{disv})}{(W_{sc} + dW_L) + (\rho_{vx} \cdot dV_v + W_{disv})} \quad (14)$$

再び過程1となる。ただし、組成比  $Y_v$  は次式である。

$$Y_v = \frac{Y_{vx} \cdot \rho_{vx} \cdot dV_v + Y_0 \cdot \rho_{vo} \cdot dV_L}{\rho_{vx} \cdot dV_v + \rho_{vo} \cdot dV_L} \quad (15)$$

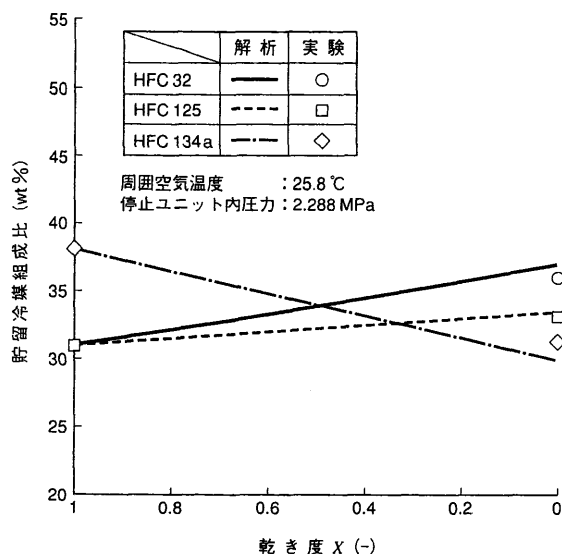


図3 停止ユニット組成比解析結果(暖房停止)  
暖房停止ユニットには低沸点冷媒の比率の高い液が貯留する解析結果が得られた。  
Results of composition analysis of indoor unit not in operation (heating mode)

以下同じ過程が繰返され、熱交換器内の乾き度  $X_{stp}$  が0になるまで(完全に液化するまで)上記の計算が行われる。

ただし、供給熱源が無限にあると仮定しているため、室温調節での停止(ファン回転)と通常停止(自然対流)とで差がないモデルとなっており、今後モデルの改良が必要と考える。

### 3.2 解析結果と実験の比較

暖房停止ユニットの解析結果の一例を図3に示す。解析条件は、熱交換器内がガス冷媒で満たされている(乾き度は  $X=1$ ) から一定循環組成比のガス冷媒が流入する条件で実施した。

この図は、周囲温度が  $25.8^{\circ}\text{C}$  の場合の解析結果である。縦軸は停止ユニットの冷媒組成比、横軸は熱交換器内の乾き度である。これらの図から乾き度の減少(液化の促進)に従って、停止ユニット内の低沸点冷媒(HFC 32/125)の比率が増加する結果が得られた。図では、乾き度0.5から0.3付近で低沸点冷媒と高沸点冷媒の比率の逆転が生じている。

乾き度0における実験値と比較し、解析値は定量的に良い一致を示したため、以降に述べる定常循環冷媒組成解析、及びシステムバランス点解析に使用可能と判断し、この解析モデルを使用した。

しかし、吐出ガスが凝縮液化する現象については、まだ不明な点もあり、今後ともこのモデル検証を実施し、改修を行う必要があると考える。

### 4. 循環冷媒組成解析手法

図4に循環冷媒組成解析フローチャートを示す。初めに循環冷媒組成を仮定し、停止ユニット、アキュムレータの余剰冷媒量、冷媒組成比の解析を行い、その後冷凍サイクルのバランス点計算を行う。これにより冷凍サイクル各点の冷媒状態量が決定される。

次に3章で述べた停止ユニット内の冷媒組成、アキュムレータの余剰冷媒量と冷媒組成比の解析を行う。さらに冷凍機油の溶解特性、及び冷凍サイクル各点の冷媒状態量から、二相域の気液速度比を考慮したシステム内の冷媒組成分布を求める。

これから循環冷媒組成が算出され、これが初めに仮定した値と等しくなるまで組成比を修正する計算を行うフローである。

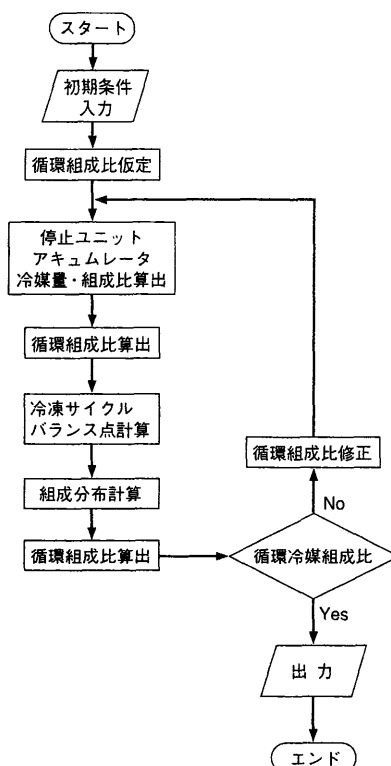


図4 非共沸混合冷媒を用いた冷凍サイクル解析フローチャート  
循環組成比のシフトを考慮してマルチエアコンのバランス点解析を行い、システム性能を算出する。  
Flow chart of computer program for refrigeration cycle with non-azeotropic refrigerant mixture

### 5. 循環組成、運転点解析結果

以上の解析から得られた非共沸混合冷媒を用いたマルチエアコンの冷媒組成分布と性能、運転点の予測結果の一例を図5、6に示す。

図5に暖房7台中1台運転での、システム内の組成分布の解析結果を示す。この図から、停止ユニット内の冷媒は低沸点冷媒(HFC 32/125)の割合が多く、逆にアキュムレータ内の冷媒は高沸点冷媒(HFC 134a)の割合が多い解析結果が得られた。実験値の比較は、圧縮機吐出部(循環組成)、停止ユニット電子膨張弁手前部、アキュムレータ液部の3点であるが、解析値と良い一致を示した。

図6に暖房時の室内機運転台数に対する性能、運転点の解析結果を示す。この図から、運転台数の増加に従って循環冷媒組成は低沸点冷媒(HFC 32/125)の比率が増加する結果が得られた。これは図5に示したように、停止ユニット内は低沸点冷媒(HFC 32/125)の比率の高い冷媒が充満し、アキュムレータには高沸点冷媒(HFC 134a)の比率の高い液冷媒が分布するが、運転台数の増加に対して停止ユニットの冷媒量は減少し、同時にアキュムレータ内の冷媒量は増加するためと考えられる。

この図において、室内機5台以上の運転で運転特性が変化しているが、これはここで圧縮機容量が最大値となるためである。これ以上運転台数を増加した場合、圧縮機容量が一定に対して凝縮器(室内機)容量が増加するので、吐出圧力が低下する。

図中○印は実験結果で、1台運転と7台運転(全数運転)を表示している。実験値との比較は2点だけであるが、定量的にほぼ

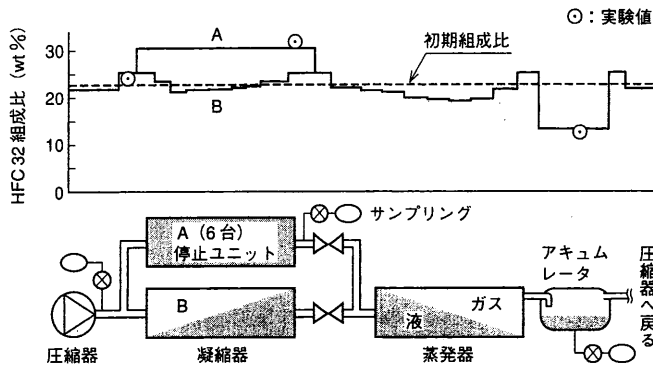


図5 システム内冷媒組成分布解析結果 (暖房7台中1台運転)  
マルチエアコン内に分布する冷媒組成比が解析可能になり、分布特性を把握できるようになった。  
Prediction results of dispersion of refrigerant composition of multi-air conditioner

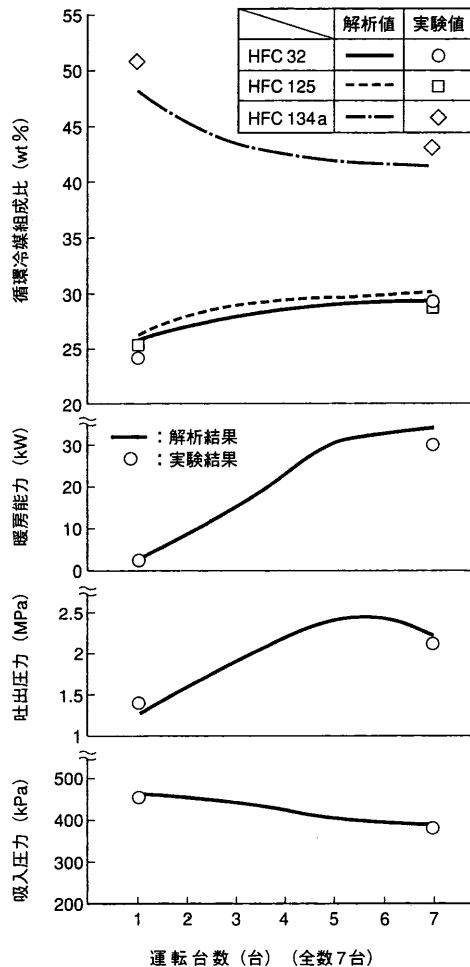


図6 室内運転台数に対する循環組成、性能、運転点解析結果 (暖房運転) 循環組成比のシフトを考慮して性能解析をするため、実験値と良い一致を示す解析結果が得られた。  
Results of balance point analysis of multi-air conditioner

良い一致を示した。

## 6. 冷媒可燃性予測結果

R 407 C は構成冷媒に可燃性冷媒 HFC 32 を含むので、その混合比率によっては可燃性冷媒となる危険性がある。そこで冷凍サイクル内各部の冷媒組成を予測し、冷媒が漏れた場合の不燃性について検討した。

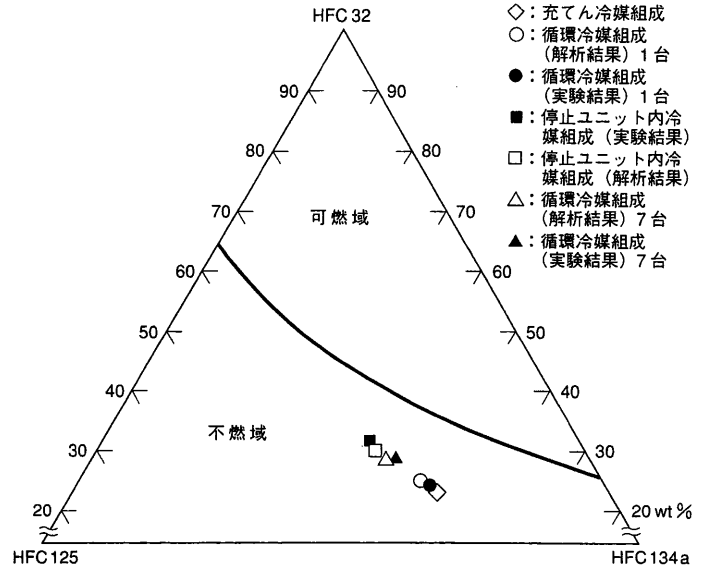


図7 可燃性予測結果 冷媒組成の解析結果は可燃域から7%以上離れており、不燃性が確認できた。  
Results of composition analysis for flammable

図7に暖房運転で運転台数を変化させてシステム内冷媒の可燃性を調査した結果を示す<sup>(4)</sup>。この図から、一番可燃域に近い冷媒は暖房停止ユニット内の液冷媒であり、可燃域まで HFC 32 の組成比で約9% (実測値で約8.3%) の結果となった。解析モデルの予測精度を考慮しても、システム中の冷媒が漏れた場合の冷媒可燃の恐れはないことが分かった。冷房運転でも同様に調査し、漏れ冷媒の不燃を確認した。

## 7. ま と め

非共沸混合冷媒を用いた空調機では、性能を支配する要因として循環組成が重要であり、特にマルチエアコンの冷凍サイクルでは、循環冷媒組成を支配する停止ユニット内の冷媒組成及びアキュムレータ内の冷媒組成を十分把握する必要がある。

本研究では、システム内に分布する冷媒の組成比を解析して、マルチエアコンの循環冷媒組成比と冷凍サイクル性能を予測する解析モデルを作成し、その妥当性の検証、及び冷媒が漏れた場合の冷媒不燃性を確認した。

今後、予測精度を向上させ十分なモデル検証をした後、HCFC-22 代替冷媒マルチエアコンの設計開発ツールとして活用していく。

## 記 号

Y : 組成比 V : 容積 X : 乾き度  
ρ : 密度 P : 圧力 W : 冷媒量

## 添 字

V : 気相 L : 液相 stp : 停止ユニット  
X : 流出冷媒, 微小領域 O : 循環冷媒組成  
sc : 過冷却 dis : 吐出ガス

## 参 考 文 献

- (1) 平尾ほか, HCFC-22 代替冷媒空調システムの研究, 三菱重工技報 Vol.33 No.2 (1996-3)
- (2) 平尾ほか, 非共沸混合冷媒の空調機バランス点解析と実験, 日本冷凍協会学術講演会論文集 (1993) p.49~52
- (3) 平尾ほか, 非共沸混合冷媒を用いた空調機の性能予測, 日本冷凍協会学術講演会論文集 (1995) p.5~8
- (4) 高市, HCFC 代替冷媒国際シンポジウム '96 テクニカルセッション論文集 (1996-12) p.1~4