

# 空調用熱交換器の高性能化を実現する熱流体技術

尾中洋次\*  
松本 崇\*\*

Thermal Fluids Technologies to Improve Heat Exchanger for Air-conditioning

Yoji Onaka, Takashi Matsumoto

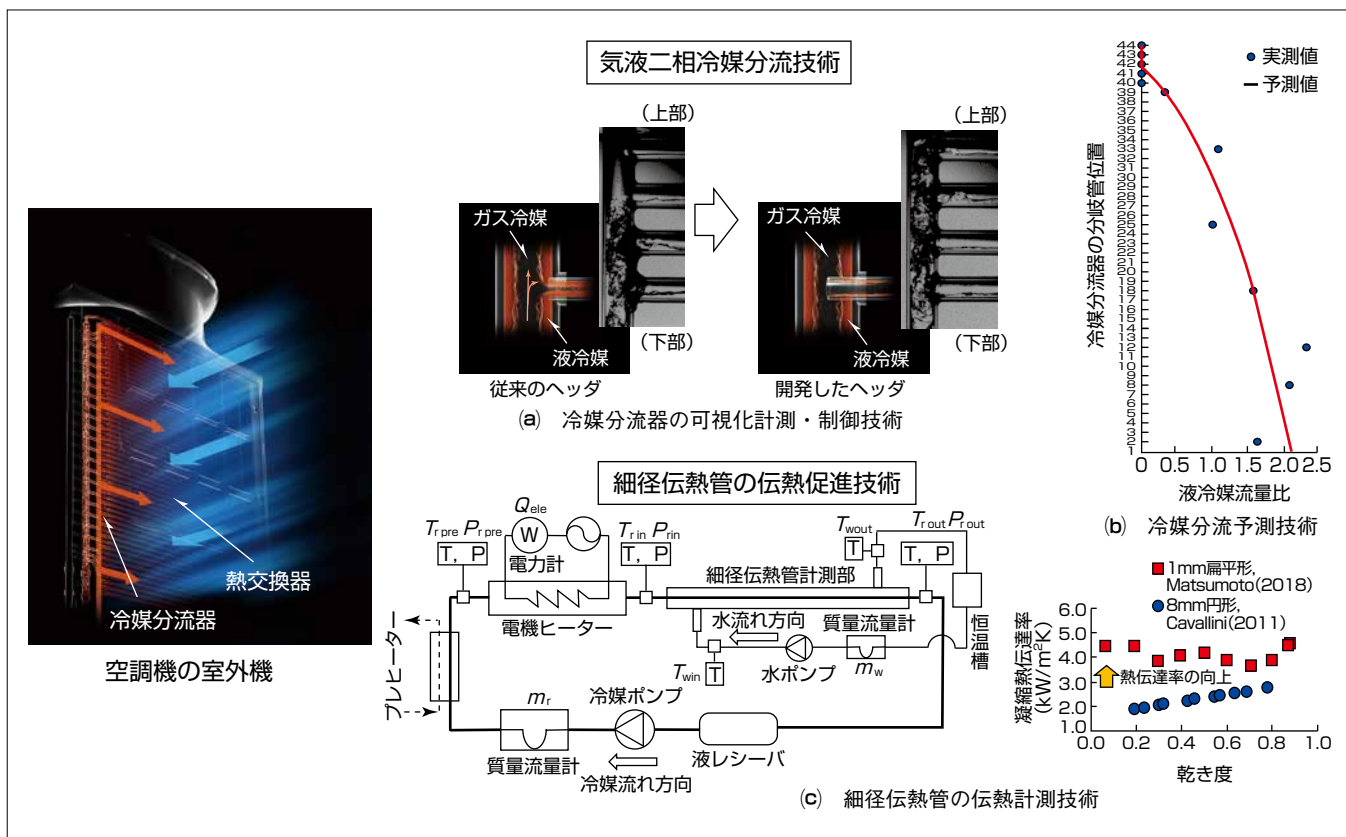
## 要 旨

三菱電機グループでは、家庭用電気機器から社会インフラシステムまで幅広い製品を世界各国に提供している。

主力事業の一つである冷凍空調機器はヒートポンプの技術が鍵となっており、機器に用いられている熱交換器は空調機器の性能に大きな影響を与える重要なデバイスの一つである。

熱交換器開発の技術動向としては、近年、欧州を中心とした温室効果ガスの規制強化や省エネルギー規制の強化に伴い、熱交換器内の冷媒量削減と性能向上を目的として、伝熱管(パス)の細径管化と多パス化が進展している。従来に比べて、パス数が増加したことで、複数のパスに冷媒を適切に分流する気液二相冷媒分流技術と、細径伝熱管の伝熱促進技術が重要となっている。

空調熱交換器の高性能化を実現する熱流体技術に関する当社の代表的研究成果として、気液二相冷媒分流技術では冷媒分流器の可視化計測技術、分流予測技術、分流制御技術、また細径伝熱管の伝熱促進技術では伝熱計測技術がある。冷媒分流器の可視化計測技術は、高圧の冷媒の流動現象の把握を可能にし、低流量の条件で、液冷媒が冷媒分流器の上部まで流動しないフラッディングが発生していることを明らかにした。これらの結果を基に、一次元分流予測モデルを構築し、様々な使用条件での冷媒分流器の設計を実現した。さらに、可視化による気液二相流の流動状態から、冷媒分流器の枝管を主管に挿入する新構造を採用することで、冷媒分流を改善し、熱交換器性能を約10%向上させた。



## 熱交換器の高性能化を実現する熱流体技術

空調機の室外機熱交換器を高性能化するために気液二相冷媒分流技術の開発と細径伝熱管の伝熱促進技術の開発を行っている。図(a)は冷媒分流器の可視化計測・制御技術、図(b)は冷媒分流予測技術の概要である。熱交換器の伝熱促進技術としては、細径伝熱管の熱伝達率を計測する基盤技術の開発を行っている。図(c)は開発した細径伝熱管の伝熱計測技術の概要である。

### 1. ま え が き

当社グループでは、家庭用電気機器から社会インフラシステムまで幅広い製品を世界各国に提供している。当社先端技術総合研究所は、当社グループの製品・システムの開発を支える基盤技術開発を担っている。主力事業の一つである冷凍空調機器は蒸気圧縮を使用したヒートポンプの技術が鍵となっており、特に冷凍空調機器に用いられている熱交換器は機器の性能に大きな影響を与える極めて重要なデバイスである。

本稿では、当社が継続的に開発を進めている空調用熱交換器の高性能化を実現する熱流体技術として、気液二相冷媒分流技術と細径伝熱管の伝熱促進技術について述べる<sup>(1)</sup>。

### 2. 熱交換器の技術動向

冷凍空調機器の冷媒回路の一例を図1に示す。機器は、主として圧縮機、熱交換器(蒸発器・凝縮器)、膨張弁の冷媒回路で構成されている。回路には代替フロンであるR410Aなどの高圧の流体を流動させ、熱交換器での凝縮と蒸発によって周囲空気との熱交換を行うことで、熱の移動を実現する。このため、熱交換器の高性能化は冷凍空調機器の性能を向上させる上で極めて重要となる。

熱交換器の技術動向として、近年、欧州を中心とした温室効果ガスの規制強化や省エネルギー規制の強化に伴い、熱交換器内の冷媒量削減と性能向上を目的として、伝熱管(パス)の細径管化が進展している。このため、従来に比べてパス数が増加したことで、複数のパスに気液二相状態の冷媒を適切に分流する気液二相冷媒分流技術の開発と、細径伝熱管の伝熱促進技術の開発が重要となっている。

### 3. 気液二相冷媒分流技術

気液二相冷媒分流技術に関して代表的な当社の研究成果として、冷媒分流器の可視化計測技術、分流予測技術、分流制御技術の三つについて述べる。

#### 3.1 冷媒分流器の可視化計測技術

空調機に用いられている冷媒分流器(Distribution Header)は図1の蒸発器の上流に配置され、複数の伝熱管に気液二相冷媒を最適に分流する役割を担っている。冷媒分流器内部では密度が大きく異なるガス冷媒と液冷媒が複

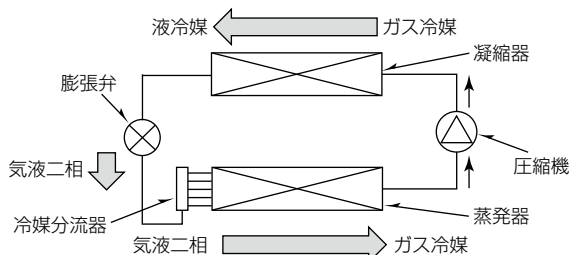


図1. 冷凍空調機器の冷媒回路

雑に影響する気液二相状態で流動する。空調機の冷媒は、主にR410AやR32が用いられており、運転条件によって蒸発器側で0.7~1.0MPa程度、凝縮器側で2.5~3.2MPa程度の高圧となる。

従来、水-空気などでの冷媒分流器の可視化研究は比較的なされていたが、高圧の冷媒での可視化計測に関する研究事例は少なかった。このため、空調機の実運転状況下での冷媒分流器内部の気液二相冷媒挙動の把握ができず、高性能化のアイデア創出や検証に時間を要していた。

当社は分流器内部の冷媒流動特性の可視化計測技術を開発した<sup>(2)</sup>。ここでは、分流器の中でも構造が簡素で、製造が比較的容易な垂直ヘッダ型の冷媒分流器を対象に、ヘッダ内部の可視化実験と各分岐管(以下“パス”という。)に流れる液冷媒流量の計測を行った。冷媒流動特性がヘッダ分流に与える影響を調査した結果について述べる。

構築した実験装置を図2に示す。実験装置は冷媒ポンプループに4分岐の垂直ヘッダをテストセクションとして接続し、ヘッダの各分岐管の下流に液冷媒流量計用の気液分離タンクを備えたものを用いた。各パスに流れる液冷媒流量は一定時間当たり溜(た)まる液冷媒量を測定することで求める。テストセクションに流入する冷媒の圧力、乾き度は、テストセクション上流の電気ヒーター及び冷媒充填量によって調整する。

図3は4分岐垂直ヘッダと可視化に用いた光学機器である。ヘッダの各パスに流れる液冷媒流量の測定とともに、ヘッダ内の気液二相冷媒流れを高速度カメラで観察する。冷媒での可視化を実現するためのヘッダは半透明のPVC(ポリ塩化ビニール)樹脂材で製作した。投影はヘッダの後方から透過光を当て、ヘッダ正面の位置から行った。

図4は構築した実験系を用いた4分岐垂直ヘッダ内部の分流特性を表している。高流量では液冷媒がヘッダ上部に

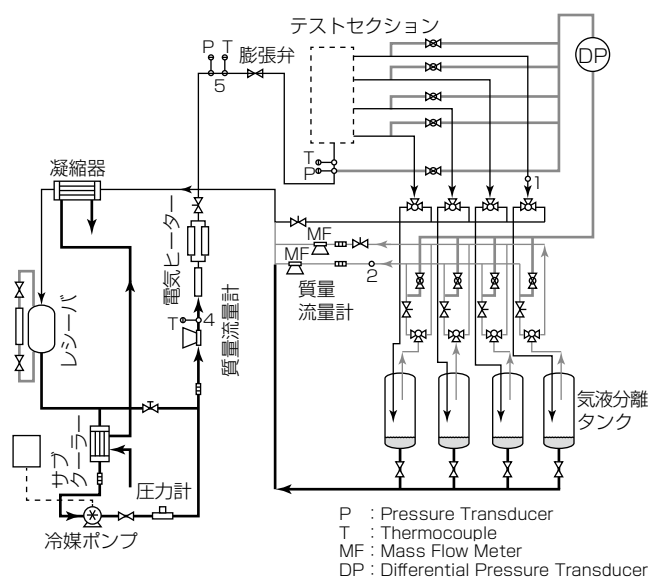


図2. 冷媒分流の可視化計測実験装置

行きわたっているが、低流量では、気液が分離し、液冷媒がヘッダの上部まで到達しないことが分かる。

### 3.2 分流予測技術

空調機は家庭用、店舗用、ビル用など幅広い負荷・運転条件と仕向け先に対応した設計が必要となる。このため、分流器設計では形状と冷媒状態の変化に対する汎用的な分流予測技術が必要になっている。ここでは、構造が単純で低コスト化に適するものの特性変動が大きいヘッダ型分流器の分流予測技術に関して、マクロな分流予測とマイクロな分流予測について述べる。

まず、マクロな分流予測について述べる。垂直ヘッダの分流偏差の大小といったマクロな傾向を予測することで初期検討の段階でヘッダ径の選定などを行う際に活用する。可視化によってヘッダ内部の液面位置が冷媒流量と相関関係があることを示したが、当社はこの点に着目し、ヘッダ内部の液面位置の予測にフラッディング定数Cを適用することで20パスを超える垂直ヘッダの液面到達率を予測する式(1)を提案した<sup>(3)</sup>。ここで、Cはガス冷媒と液冷媒の見かけ速度、密度、管径によって求めるWallisのフラッディング定数である。式(1)によって、垂直ヘッダの分流偏差の大小といったマクロ的な傾向を予測することを可能にした。

図5にフラッディング定数Cと液面到達率の関係を示す。式(1)によって垂直ヘッダの液面位置を±20%で予測可能にした。

$$H=0.3989\log_e C+0.4967 \dots\dots\dots (1)$$

次に、マイクロな分流予測技術について述べる。先に述べた

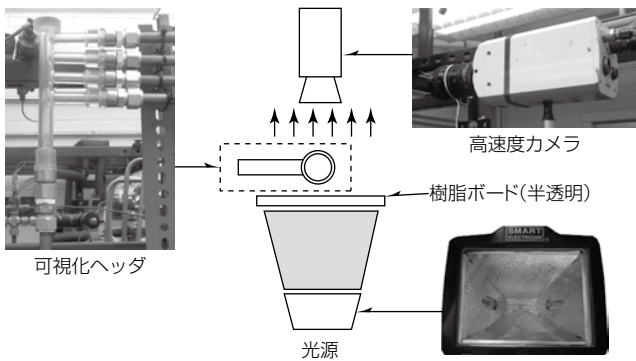


図3. 可視化実験時の光学機器とテストセクション

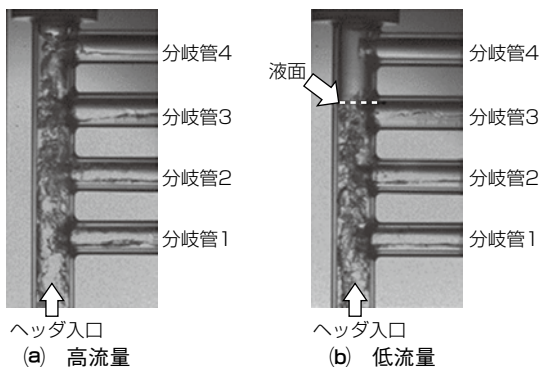


図4. 冷媒気液二相流の可視化結果

マクロな予測技術では、各パスに流動する液冷媒の流量などを予測できない。熱交換器の最適化設計には、各分岐に流れる冷媒流量などの情報が必要となるため、各部の分流特性を予測する必要がある。予測には、分流器の各要素の実験結果を基にした一次元モデル化や三次元数値解析によるものがある。ここでは、一次元モデル化について述べる。

垂直ヘッダの一次元モデル化に関しては、垂直ヘッダの上端部まで液冷媒が流入する条件で、ヘッダを垂直上昇管部、T分岐部、分岐管部の三つの要素に分けてモデル化を行っている<sup>(4)</sup>。空調機の幅広い運転条件では、ヘッダ上端部に液冷媒が到達しない条件が発生するため、同条件での実験・予測が重要である。当社は実験によって44分岐垂直ヘッダの冷媒分流特性を測定し、低冷媒流量時に液冷媒がヘッダ上部に到達しない条件での分流予測方法を新たに提案した<sup>(5)</sup>。

この計算方法を用いることで、図6に示すように、R410Aの44分岐垂直ヘッダの液冷媒流量比を±30%で予測でき、ヘッダ上部に液冷媒が到達しない条件を定性的に予測できた。

### 3.3 分流制御技術

3.1節と3.2節では、可視化計測技術と分流予測技術の開発について述べた。この節では、これらの開発技術を適

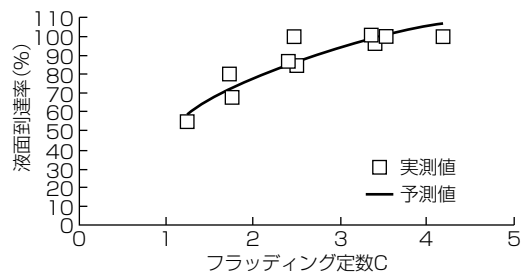


図5. フラッディング定数Cと液面到達率の関係

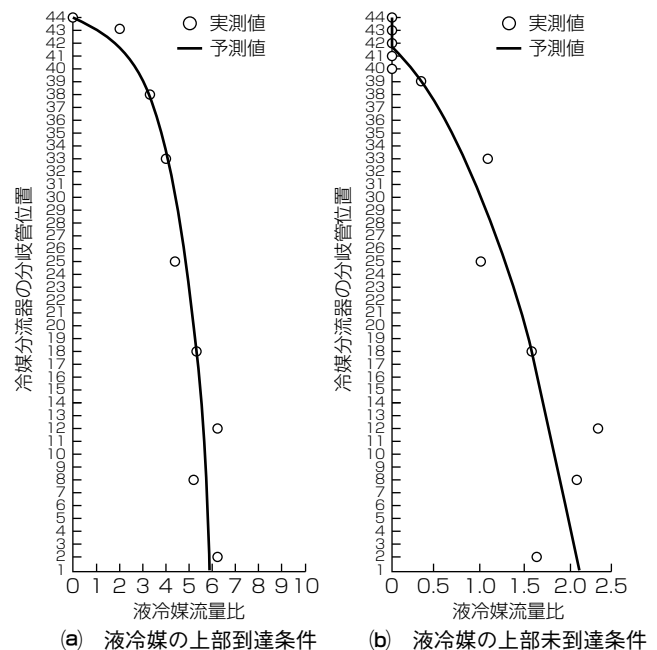


図6. 液冷媒流量比の実測値と予測値の比較

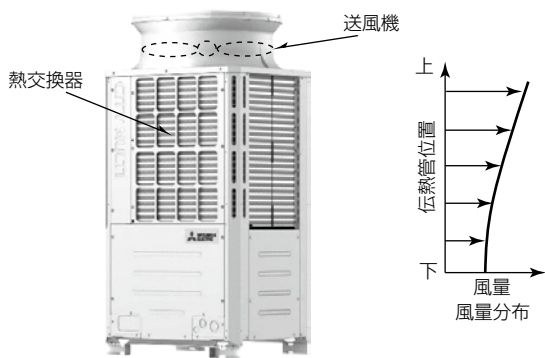


図7. ビル用マルチ空調機の室外機

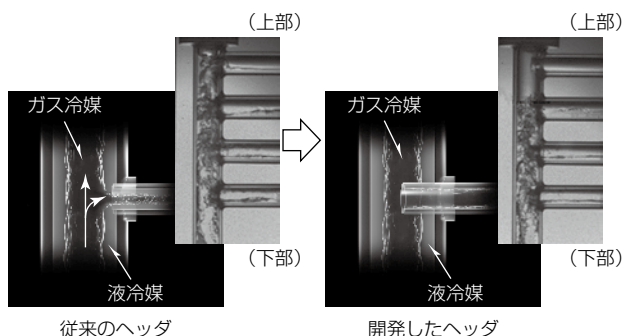


図8. 新構造の冷媒分流器

用して、ビル用マルチ空調機の室外機向けに新たに開発した新構造の冷媒分流器について述べる。一般に、ビル用マルチ空調機の室外機は図7に示すように送風機を筐体(きょうたい)上部に設ける“トップフロー型”を採用している。熱交換器を通過する空気の流れは送風機近傍で大きくなるため、熱交換器の上部に液冷媒を多く分流する必要があったが、単純な構造のヘッダ型分配器では、重力の影響で、液冷媒を熱交換器の上部まで流動させる設計が困難であった。

こうした課題に対応するため、当社はヘッダ型分流器の枝管を主管に挿入する新構造の冷媒分流器(図8)を開発した。新構造の冷媒分流器では、枝管を主管に液冷媒の相を貫くように挿入することで、主管を流れる液冷媒を飛散させ、主管の中心付近に流れる高速なガス冷媒に載せることで、ヘッダ上部に多く液冷媒を分流することを可能にした。これによって蒸発器の熱交換器の性能を約10%向上させた。

#### 4. 細径伝熱管の伝熱促進技術

当社グループでは、冷媒量の削減と熱交換器の性能向上のために、熱交換器に使用する伝熱管の細径化と扁平(へんぺい)アルミ管化(図9)を進めている。当社では、2015年に外径4mmの扁平伝熱管を、2017年には外径2mmの扁平伝熱管を用いた空調機器を製品化している。これら従来に比べて細径な伝熱管での冷媒の熱伝達現象について、更なる高性能化を目指し、伝熱計測技術の構築を進めている。

図10は従来伝熱管と、細径伝熱管の凝縮熱伝達率の実

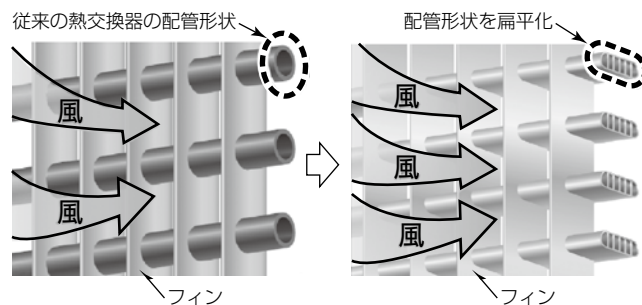


図9. 扁平アルミ管熱交換器

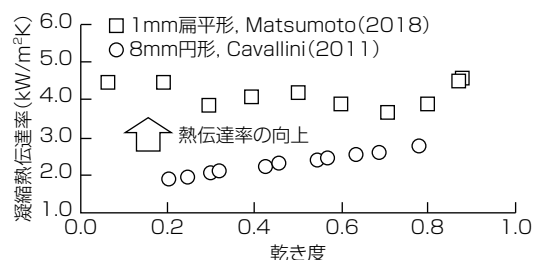


図10. 伝熱管細径化による冷媒凝縮熱伝達率の向上

験結果を比較したものである。伝熱管を細径化することで、凝縮熱伝達率を向上させることができ、熱交換器の高性能化が期待できる。

### 5. むすび

空調用熱交換器の高性能化に関連する熱流体技術として、気液二相冷媒分流技術と細径伝達管の伝熱促進技術について述べた。今後も、熱流体技術に関する、可視化計測技術、予測技術、制御技術の高度化を進め、機器のアイデア創出や設計適用を図り、多様な顧客のニーズや使用環境に対応する冷凍空調機器の開発に取り組む。

### 参考文献

- (1) 松本 崇, ほか: 冷凍空調機器の高効率化を実現する混相流技術, 混相流, **32**, No.1, 159~164 (2018)
- (2) Onaka, Y., et al.: The experimental study of two-phase flow distribution in vertical header, 5th IIR Conference on Thermophysical Properties and Transfer Process of Refrigerants, 105~112 (2017)
- (3) 松本 崇, ほか: 多分岐な垂直ヘッダ型分配器における気液二相冷媒分配一実験による分配特性計測および偏流様相と液冷媒上部不到達条件の整理一, 日本冷凍空調学会論文集, **34**, No.4, 405~412 (2017)
- (4) Watanabe, M., et al.: Two-Phase Refrigerant Flow Distribution in a multi-pass Evaporator with vertical Upward Main tube, Transaction of the JSRAE, 2003, **20**, No.1, 21~28 (2003)
- (5) 松本 崇, ほか: 垂直ヘッダ型分配器における気液二相冷媒分配の予測, 日本冷凍空調学会年次大会, B143-1 (2014)