空調機のエネルギー消費効率向上につながる 気液二相冷媒の分配技術

Development of Gas-Liquid Two-Phase Flow Distributor for Improving Energy Efficiency in Air-Conditioners

青木 泰高*1 Yasutaka Aoki
伊藤 隆英*2 Takahide Ito
市川 玄人*1 Gento Ichikawa
板本 貴雄*3 Takao Itamoto

世界各国で，環境負荷軽減の取組みとして空調機の省エネ規制強化が進行している。それに伴い，省エネ性を夏期と冬期だけでなく，春・秋に相当する中間期を加えた通年エネルギー消費効率で評価する方向に移行している。この動向に対する打ち手の一つが，熱交換器の複数流路への気液二相冷媒の分配適正化である。年間を通して熱交換器性能を十分に発揮させるため，低負荷条件から高負荷条件まで広範囲にわたり，気液二相冷媒の分配特性が変化しない新型分配器を開発した。

1. はじめに

空調機やヒートポンプ給湯機に対し，日本をはじめとした世界各国で省エネ規制の強化が進行している。省エネ性の評価指標は，機器の使用状況や能力可変機の普及を考慮し，これまでの夏期と冬期だけでなく，新たに春・秋に相当する中間期などの複数の温度条件を定め，各期の運転時間で重み付けをする通年エネルギー消費効率に移行している。

従来，空調機の省エネ性向上のために，圧縮機，熱交換器，送風ファンなどの主要な構成機器の高性能化に取組んできた。これに加え，主要構成機器の性能を通年で十分に発揮させる取組みの重要性も増している。その一つが，熱交換器の複数流路への気液二相冷媒の分配技術である。

2. 気液二相冷媒の分配技術の必要性

冷媒が熱交換器内を流れる際の圧力損失を低減することは性能向上につながるため，冷媒は複数の流路に分かれて流れる設計としている。熱交換器が蒸発器として働く場合（冷房時の室内側熱交換器，又は，暖房時の室外側熱交換器）には，膨張弁通過後の“気液二相”状態の冷媒を，熱交換器入口手前に設ける分配器にて複数流路に分配する。この複数流路への冷媒流量を，風速分布によって定まる各流路の熱負荷に応じて適切に分配しなければ，熱交換器性能を十分に発揮させることができない。図1に，この状況を模式的に示す。不適切な分配状態では，特定の流路に過剰な液冷媒が流れる一方，他の流路では液冷媒が不足して熱交換に寄与しない過熱ガス領域が増大し，熱交換器性能が低下する。特に業務用空調機の熱交換器では流路数が 10 前後と多く，流路分岐部前は複雑な気液二相流れであることから，適切な冷媒流量分配を実現することは容易ではない。

従来は，流路分岐部直前にオリフィスを挿入することで気液の混合を促進するなどの様々な工夫により，夏期や冬期の比較的空調負荷が高い定格条件において適切な冷媒流量分配となる

*1 技術統括本部 名古屋研究所
*2 技術統括本部 名古屋研究所 主席研究員 工博
*3 機械・設備システムドメイン冷熱事業部 空調機技術部 主席チーム統括

分配器仕様を実験的に決めてきた。しかし，冷媒流入条件が定格条件と異なる際には複数流路への冷媒流量の分配比率が大きく変化することもあり，中間期も含めた広範囲な条件にわたっての適切な冷媒流量分配が実現できているとは言い難かった。

従って，年間を通じて熱交換器性能を十分に発揮させるために，流入する気液二相冷媒の流量・乾き度・圧力等が変化しても，熱交換器の複数流路へ適切な冷媒流量分配が維持できる分配器の設計技術が求められている。

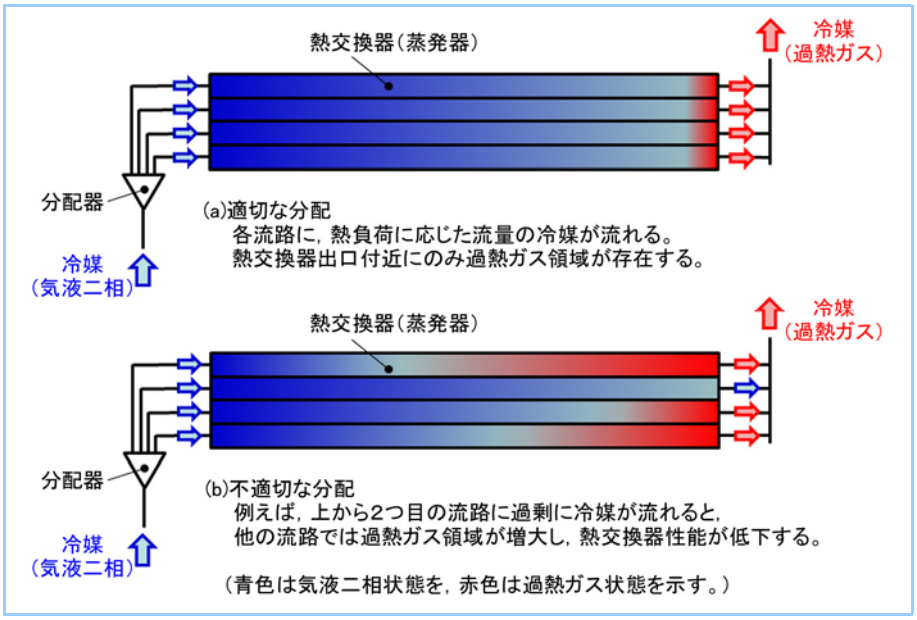

図1　気液二相冷媒の適切な分配と不適切な分配
不適切な分配状態では，過熱ガス領域が増大することを示す。

3. 品質工学の活用による流路形状最適化

分配器内部の流路形状の変更は流れの状況に影響を与え，熱交換器の複数流路への冷媒流量分配比率（分配特性）を変化させる。分配器の形状パラメータは分配特性に複雑に関連し，あるパラメータで分配特性が改善する調整法を見出したとしても，別のパラメータの値が異なると，悪化に作用する場合が発生することもある。そのため，品質工学（タグチメソッド）を活用し，関連しあう形状パラメータの影響を評価した。タグチメソッドは，少ない試験回数で，各パラメータの感度（分配量ばらつきに与える影響度合い）を把握することができる手法である。

3.1　分配器の構造

図2に，分配器の基本構造を示す。この分配器は，気液混合室と，その上面から放射状にのびる複数の分岐流路からなり，気液混合室で液とガスが混ざった均質な状態を作り出して各分岐流路へ導く構造である。分配器は重力による液冷媒の偏りを防ぐために垂直に設置し，冷媒は下から上へ流れる。また，気液混合室に流入してくる液冷媒の偏りを緩和して均質化を促すために，気液混合室の上流にはメッシュを設置して流動抵抗を与えている。なお，熱交換器に流入する空気の風速分布によって熱交換器の複数流路の熱負荷はそれぞれ異なるため，分岐後から熱交換器入口までの間に取り付けられる分配管の内径と長さを調節する（すなわち，流路抵抗を調節する）ことで，各流路の熱負荷分布に応じた冷媒流量を分配している。

本報では，8本の分岐流路をもつ分配器を対象とし，分岐後の分配管，及び，熱交換器の各流路の内径と長さは全て同一とした。この場合，適切な分配とは，8本の分岐流路に流れる冷媒流量が同一である状態をいう。

3.2　感度分析と形状最適化

分配器内部流路の形状パラメータは多くあるが，そのうち，流動状況に顕著な影響を与えると考えられる4つのパラメータを抽出し，タグチメソッド（L18　直交表）による感度評価を行った。各パ

ラメータは，①気液混合室内径，②分岐流路内径，③メッシュから気液混合室上面までの距離，④メッシュサイズである。従来形状を中心にそれぞれ3水準を設定している。

分配器に流入する冷媒の流量・圧力等の条件は，室内側熱交換器に用いられる分配器を想定し，夏期及び中間期の冷房運転に相当する条件とした。また，分配量のばらつき評価は，8本の分岐流路へ流れる液流量とガス流量を計測することで行った。

図3に，タグチメソッドによる評価結果（要因効果図）を示す。これは，各パラメータの分配量ばらつきに与える感度を表している。これより，気液混合室の内径が最も感度が大きく，気液混合室の内径を小さくすることが，分配量ばらつきの低減に効果があることが分かった。その他の形状パラメータについても，分配量ばらつきが小さくなる水準を選択することで，形状の最適化を行った。

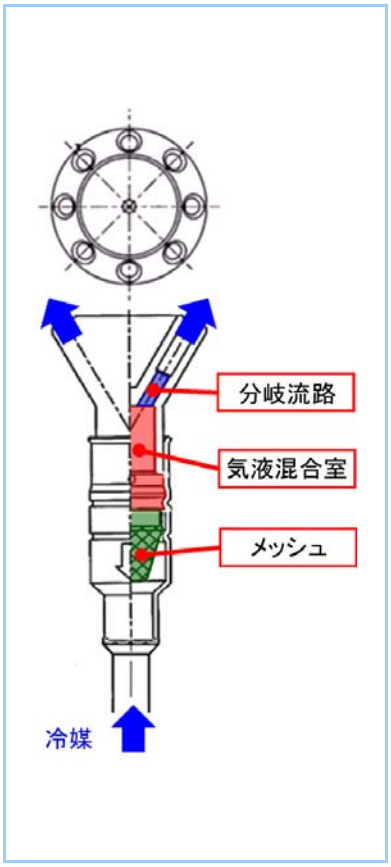

図2　分配器構造
気液混合室から分岐流路が放射状につながる分配器を示す。

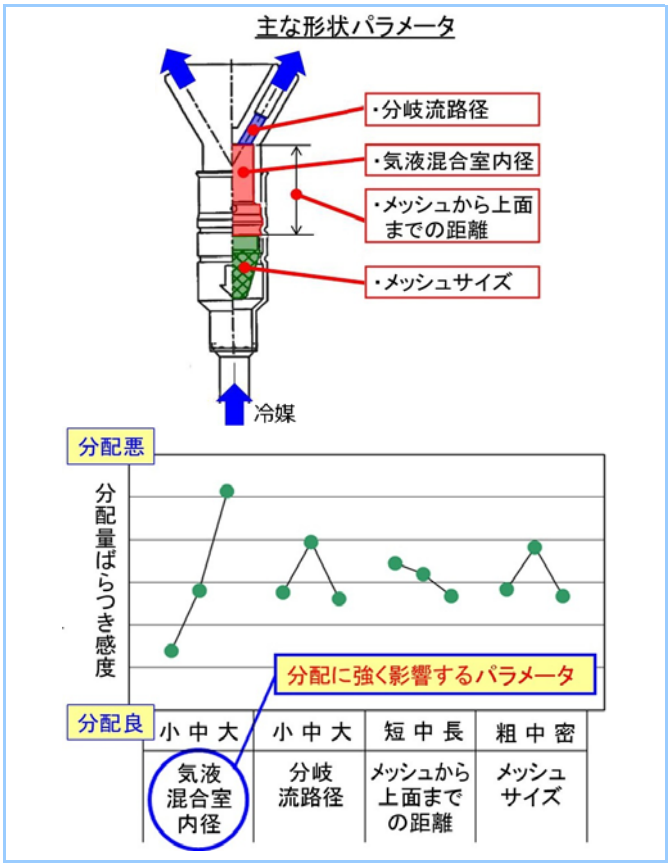

図3　要因効果図
主要な4つの形状パラメータが分配ばらつきに与える影響を示す。

4. 流動状況観察による分配量ばらつきの改善

タグチメソッドにより，分配量ばらつきが小さくなるパラメータを抽出したが，このパラメータが分配器内部の流動にどのような影響を与えているかを可視化で確認した。以下に，分配量ばらつきに与える感度が大きい気液混合室，及び，分配器への流入配管の2か所についての可視化結果について述べる。

4.1　気液混合室内の流動状況

流体は，実際に使用される冷媒 R410A である。冷媒 R410A は使用圧力が高いために，これまで分配器内部の流動状況を観察した例は少なく，実際にどのように流れているかが不明であった。今回は，気液混合室の部分を強度に優れた合成石英ガラスで製作することで，冷媒 R410A の流動状況を観察することができる可視化供試体を作成した。この可視化供試体の側面と背面より照明を当て，正面から写真撮影及び高速度カメラによる動画撮影を行った。流入冷媒の流量・乾き度・圧力等は，冷房時の低負荷～高負荷にわたる広範囲な条件を設定し，各条件ごとに鮮明な画像を得ることができた。なお，同時に8本の分岐管の流量を計測し，流動状況と分配量ば

らつきの関係も把握した。

図4は，可視化結果の一例で，従来形状の分配器において流入冷媒流量を変化させたときの結果である。可視化試験と同時に計測した各分岐流量計測結果より，可視化で安定した環状流が形成される領域では，分配量ばらつきが小さく，流量が低下してスラグ流のような間欠流の状態となると，分配量ばらつきが大きくなる相関関係が明らかとなった。また，低流量の場合には，液膜の空間的偏りや間欠的な流れが時間的に変化・変動しており，これが各分岐への冷媒流量を変化させている原因の可能性がある。気液混合室内径が異なる場合の観察結果も同様であった。図4の下部に，横軸を気相みかけ流速，横軸を液相みかけ流速で表した流動様式線図を示す。今回の観察結果から，間欠流から環状流への遷移は，一般的に知られている遷移線よりも流速が速い側に位置することが確認できた。この新しく得られた線図上で環状流の領域となるように気液混合室内径を設定することが，流入冷媒の条件変化に対して分配量ばらつきを小さくするための有力な設計指針となると考えられる。

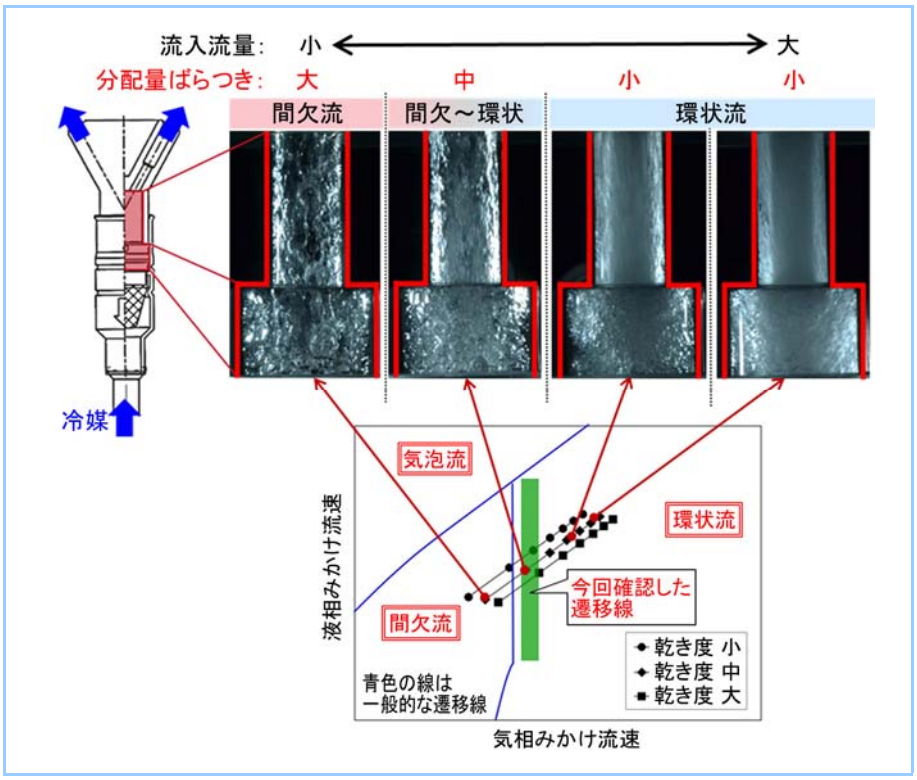

図4 気液混合室内の流動状況可視化結果
流動状況と分配量ばらつきの関係，及び，流動様式線図を示す。

4.2 流入配管形状

可視化試験から，液膜の偏りが分配量ばらつきに大きな影響を与えることが明確となったため，液膜偏りの発生原因となる分配器流入配管の形状について検討を実施した。分配器は，高さの限られた空調機内部に配置されるため，分配器への流入配管はL字状に曲がった形状となる。この場合，遠心力により液冷媒が外周側に偏った状態で分配器に流入することとなり，気液混合室の上流に設置したメッシュのみでは液冷媒の偏りを緩和しきれないことがあると想定される。また，低流量で間欠流となるような場合では，気液混合室での均質化も十分ではない。そのため，分配器に流入してくる時点で液冷媒の偏りを少なくすることを狙い，流入配管形状の変更を試みた。

図5は，従来のL字状配管と，改良型の水平管と垂直上昇管を組合せたT字状配管の流動状況可視化結果の例である。なお，この場合の流体は水－空気である。図5から分かるように，T字状配管では，垂直上昇管が短くても液冷媒が偏らずに内壁全周に存在している。

別途，流入配管をT字状配管に変更して各分岐流量を計測した結果，狙いどおり，分配量ばらつきが低減されることを確認している。

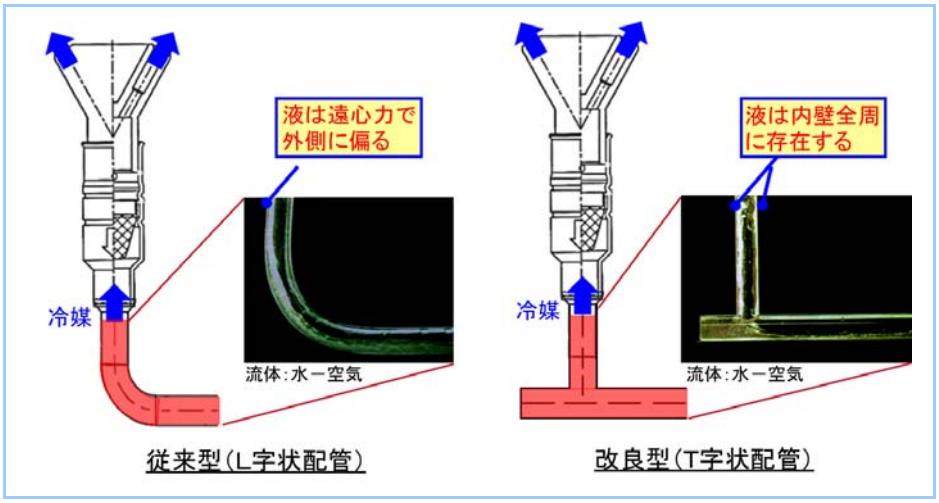

図5　流入配管内の流動状況可視化結果
流入配管形状の違いによる液冷媒の偏り状況を示す。

5. 新型分配器の分配量ばらつき改善結果

品質工学（タグチメソッド）による分配器内部流路形状の最適化，可視化試験により得られた流動様式線図による気液混合室内径設計，及び，T字状流入配管の採用を実施した新型分配器を試作し，流入冷媒の条件を変化させたときの各分岐流量の変化を計測した。流入冷媒条件は，流量・乾き度等をパラメータとした合計8ケースである。

図6に，8本の分岐流路への液冷媒分配量比率を示す。従来型分配器では，条件変化に対して液冷媒分配量比率も変化する。すなわち，ある条件で図1(a)のように適切な分配がなされていたとしても，別の条件となると図1(b)のように分配不適切な状態になるおそれがある。一方，新型分配器では，どのような条件でも液冷媒分配量比率はほぼ同じで変化しない。広範囲な条件にわたって適切な冷媒流量分配が実現できることを示している。

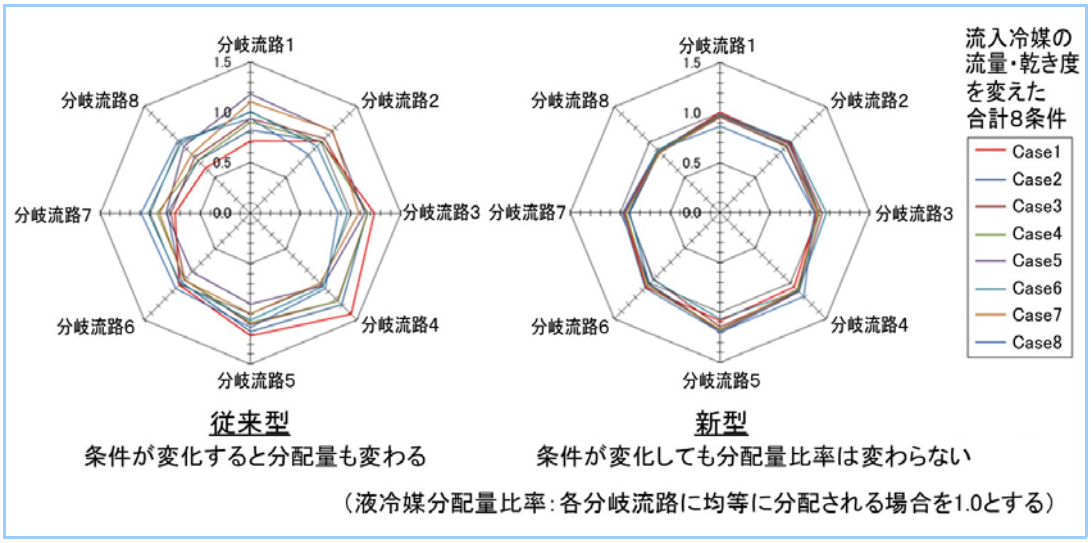

図6　分岐流路への液冷媒分配量比率
流入冷媒条件の違いによる各分岐流路へ分配される液冷媒量比率の変化を示す。

図7は，縦軸を分配量ばらつきとして示した図である。新型分配器は従来型に比べ，大幅に分配量ばらつきを低減できている。同図には，他社の空調機から分配器のみを取り出して当社条件で評価した結果も載せている。新型分配器は，分配量ばらつきを他社同等以下に抑えることが実現できている。

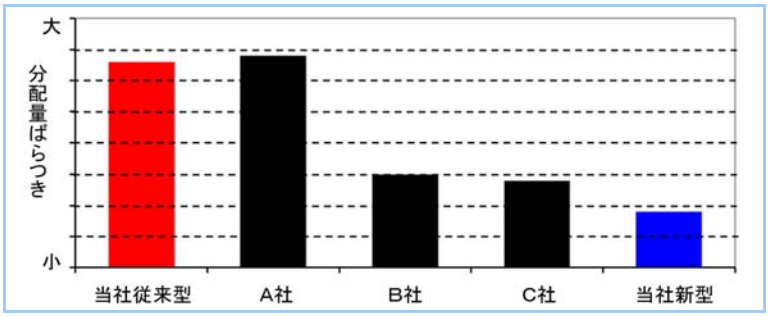

図7　分配量ばらつき改善結果
当社および他社の分配器の分配量ばらつきを示す。

6. 製品への適用状況

新型分配器を天井吊形室内機へ適用した例を図8に示す。天井吊形室内機は，業務用空調機の室内機の中で最も高さ制限が厳しく，適切な冷媒流量分配が困難な機種の一つであるが，新型分配器の採用により，年間を通じて熱交換器性能を十分に発揮させることで通年エネルギー消費効率の向上につながった。その他の省エネ性向上策の効果も合わせて，図9に示すように，天井吊形室内機は，小容量機から大容量機まですべての機種で日本国内の 2015 年省エネルギー法基準値をクリアした。

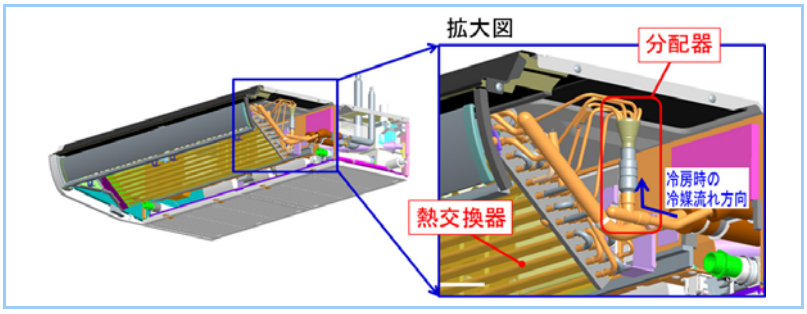

図8　天井吊形室内機の内部構造
天井吊形室内機に新型分配器を適用した例を示す。

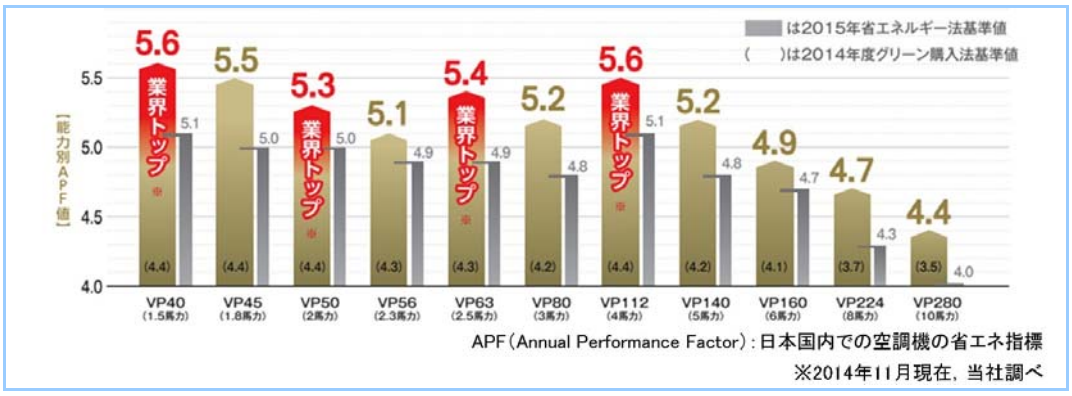

図9　天井吊形空調機の通年エネルギー消費効率
能力別の APF（通年エネルギー消費効率）のカタログ値を示す。

7. まとめ

品質工学（タグチメソッド）を活用して流路形状の最適化を行うとともに，分配器内部の流動状況を把握して気液混合室内径や流入配管形状に対する設計指針を得た。これらを反映し，条件が変化しても気液二相冷媒の分配特性が変化しない分配器を開発した。

今回開発した新型分配器は，2015 年1月に発売された天井吊形室内機に採用され，省エネ性の高い製品を市場に提供している。今後，天井埋込形4方向吹出し室内機や，室外機へも新型分配器の適用を進め，更にエネルギー消費効率を向上させた新製品を市場へ投入し，地球環境負荷低減に貢献していく。