

特集 RSエバポレータの開発*

Ultra-Thin and Light-Weight RS Evaporator

馬場則昌
Norimasa BABA
大原敏夫
Toshio OHARA

中村友彦
Tomohiko NAKAMURA

畔柳 功
Isao KUROYANAGI

神谷定行
Sadayuki KAMIYA

To develop an evaporator for car air conditioners, we 1) upgraded heat transmission performance by using extremely thin tubes and fins, 2) established a highly corrosion resistant thin plate material, 3) improved refrigerant distribution in the tank portions, and 4) adopted countermeasures for degraded water drainage performance due to the extremely thin fins. We succeeded in drastically miniaturizing the body size and reducing the weight from those of MS evaporators currently produced by DENSO CORPORATION, while maintaining equivalent cooling performance and corrosion resistance.

Key words : Evaporator, Cooling performance, Air conditioning, Aluminium

1. まえがき

近年、カーメーカからの車両乗員の居住性重視、燃費向上の要求によりカーエアコン用HVAC (Heating, Ventilating and Air-Conditioning) の主要部品であるエバポレータは小型・軽量化が強く求められている。RS (Revolutionary Super-Slim) エバポレータは従来のMS (Multi-Tank and Super Slim Structure) エバポレータ¹⁾ (ドロンカップ構造) に対し、

① チューブおよびフィンの微細化による伝熱性能の向上

② コア部とタンク部の分離による低圧力損失化 (以下、圧損) 達成

により高性能化が可能である。これにより、RSエバポレータは、従来の58幅 (MS) から38幅 (RS) と世界一の小型化、軽量化を達成した。

そして、この実現のためには、

① 高耐食薄肉材の確立

(軽量化のための薄肉チューブの開発)

② タンク内冷媒分配の改善

③ フィン排水性の改善

が必要不可欠であった。本論文では、RSエバポレータの製品化に向けた上記課題に対する改良の考え方・具体的対応方法を報告する。

2. 開発目標の検討

Fig. 1に各社のエアコンユニット寸法 (L) の動向を示す。近年乗員の快適性向上のため足回りのスペース確保の要求が増々強くなっている。

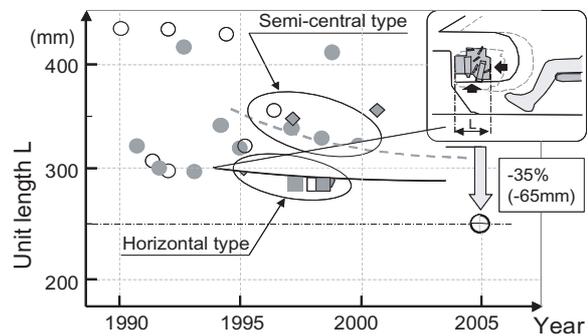


Fig. 1 Miniaturization requirement based on the size of the air conditioner unit

我々は他社動向から、ユニット小型化目標を-35% (2000年比) とし、構成部品であるエバポレータはユニット長さLの減少に直接結びつくため、薄幅化の目標値をユニット要求値と同じ-35%とした。

Fig. 2に当社および他社の小型化 (V/Q V:コア体積, Q:冷房性能) トレンドを示す²⁾。

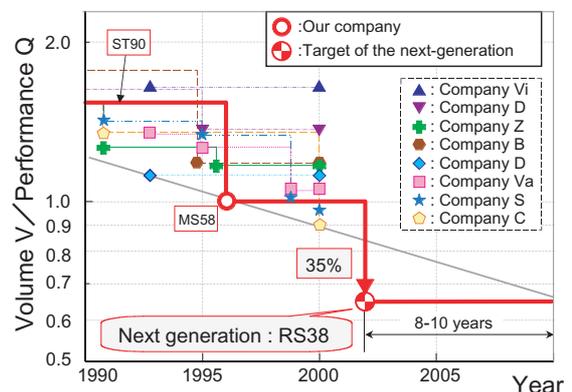


Fig. 2 Evaporator miniaturization trends

* Translated and reprinted with permission from SAE paper 2003-01-0527 © 2003 SAE International

1997年に他社に先駆けてMS58を市場へ投入したが、他社から同等製品が市場に供給され始め、その優位性は失われつつある。そこで、小型化-35%の薄幅化目標が達成されれば、小型化トレンドから今後8~10年間他社との優位性が確保できると考えた。

Table 1にエバポレータの開発目標値を示す。冷房性能はMS同等とし、薄幅化-35%、軽量化-40%で、このもとでの耐食性同等と非常に高い目標設定とした。

Table 1 Identifying the assignments to achieve the development goals

Point	Target		Current Product
	Numerals	Concept	
Performance	100	Retention of cooling performance to be equivalent to that of the current model	100
Width reduction	38	Size reduction of the air conditioner unit by 20 mm	58
Size reduction	65	Size reduction of the air conditioner unit by 20 mm	100
Weight reduction	60	Weight reduction of the air conditioner unit by more than 30%	100
Corrosion resistance	100	B10=750 h minimum (Single product unit : 830 h minimum)	100
Other characteristics	Equivalent to the current MS evaporator		—

3. 開発目標達成への課題抽出

コア厚さDが58mmに対し、ドロンカップ構造 (Fig. 3) でコア厚さDを38mmとした場合、Fig. 4より冷房性能は16%減少する。

	Drawn cup type (MS)	Tank-separated type (RS)
Core thickness		
Construction inside the tank		
Tubes and fins		

Fig. 3 MS and RS evaporator product

その内訳はタンク部の冷媒側圧損増加により7%減、薄幅化による伝熱面積減少により9%減少する。まず、冷媒側圧損増加による性能低下 (7%) について考える。

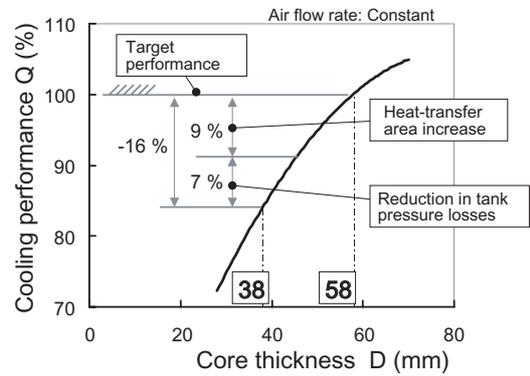


Fig. 4 Relationship between core thickness and cooling performance

Fig. 5より、ドロンカップ構造 (Fig. 3) でコア厚さDを58から38mmとすると冷媒側圧損は2倍となり、タンク部の圧損増加分はその78%を占める。タンク部は非熱交換部であることから、性能向上のためにはタンク部の内径を拡大し、冷媒側圧損を低減しなければならない。しかし、ドロンカップではタンクろう付のため一定のろう付代が必要となり、薄幅化によりタンク内径が小さくなる。そのため、Fig. 3のようなコア部 (チューブとフィン) とタンク部を独立させた構造を検討した。これによりタンク内径拡大による圧損低減ができ、7%の性能向上が可能となった。

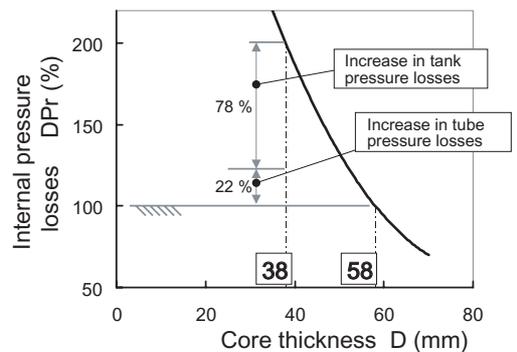


Fig. 5 Relationship between core thickness and internal pressure losses

次に、伝熱面積の低下による性能低下 (9%) に対しては、フィン高さの減少によるフィン効率の向上と、フィンピッチを密化することによって性能向上を図った。

Fig. 6にコア厚さ38mm、タンク別体構造でのフィン高さFHとチューブ厚さtに対する冷房性能Qと製品重量Wの関係を示す。

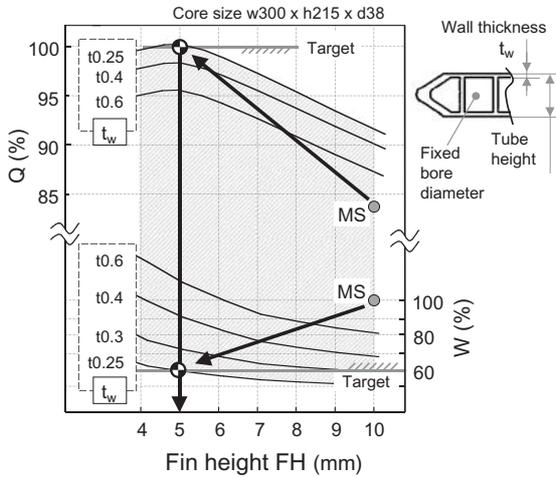


Fig. 6 Relationship between fin height FH, tube wall thickness t, cooling performance Q and weight W

これよりコア厚さ58mmと同等性能を満たすフィン高さは5mmである。また、通風抵抗はコア厚さ58mmのFP3.0と同一としているため、薄幅化による通風抵抗減少分はフィンピッチを密にし通風抵抗を合わせている。そのため、冷房性能100%を満たすのはフィン高さ5mm、フィンピッチ2.6mmとなる。

また、製品重量については、フィン高さを減少することによりチューブの使用本数が増え、チューブ重量が増大してしまう。よって、開発目標である従来品から40%の重量軽減を満たすチューブ肉厚は0.25mm以下が求められる。

以上のことより、冷房性能をMS同等（100%）および、軽量化（MS比40%）を同時に満たすためには、

① フィン高さ5mm（フィンピッチ密化3.0⇒2.6）、
チューブ肉厚0.25mm以下

② タンク部圧損低減のため、タンク別体構造の採用が必要不可欠である。これを製品化するためには、次のような課題を解決する必要があった。

- (1) チューブ肉厚0.25mm以下を実現するための高耐食性材料の開発
- (2) 別体構造を可能とする、タンク部内の冷媒分配改善
- (3) フィンピッチ密化に対する、フィン排水性の改善

以下、RSエバポレータ製品化に向けて、上記課題に対する具体的な取り組みおよび改善の方法について述べる。

4. 製品化への取り組み

4.1 高耐食薄肉チューブ材料の開発

エバポレータは凝縮水により湿潤環境となるため外部腐食環境は極めて厳しい。従ってチューブ板厚を薄くするためには材料の耐食性向上が必要不可欠である。³⁾⁴⁾

そこで当社で最も耐食性が優れる4層材において、ろう材中のSiの犠材へのエロージョンがあることが分かった (Fig. 7)。

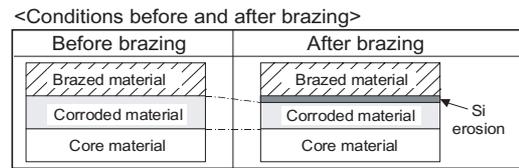


Fig. 7 Problem in corrosion resistance of quad-layer material

Siのエロージョンは犠材の体積を減少させるため、耐食性を悪化させている。よって、ろう材層の排除による耐食性の実力を把握するためにテストピースによる腐食評価を実施した (Fig. 8)。

Evaluation of test pieces (sheets)

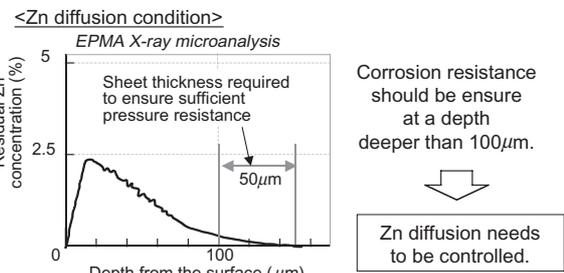
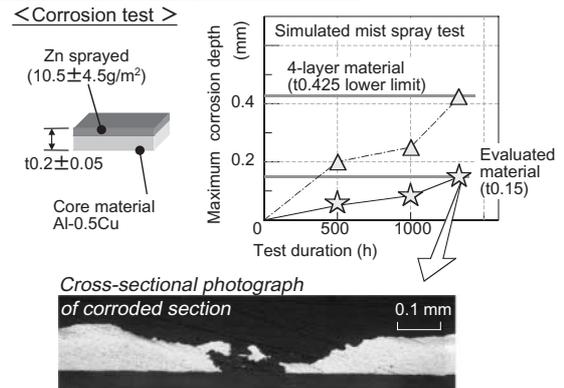


Fig. 8 Corrosion evaluation using test samples

開発材は芯材にZn溶射処理を施した、芯材+犠材

の2層材を用いて耐食性を確認した。その結果、板厚が0.15mmでも開発材は現状4層材(t0.44)と同等の耐食性を持ち、非常に優れた高耐食材であることを確認した。

しかし、拡散深さが140μmあり、実機において耐圧強度確保のため必要となす最低板厚50μmが確保できないことが分かった。このため、耐食性寿命予測を行い、耐食性確保に必要なZn拡散条件を算出し、制御可能か検討を進めた。以下に腐食モデルおよび耐食性寿命H算出の考え方を示す (Fig. 9)。

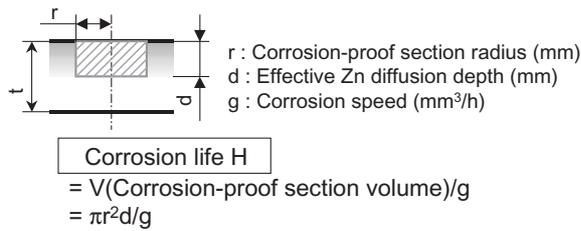


Fig. 9 Corrosion model

耐食性寿命Hは犠牲体積 (Zn拡散深さdと防食距離r) と腐食速度gから求まる。防食距離rは表層の残存Zn濃度、表層と芯材との電位差を用いて理論式から求まる。また、腐食速度gは表面Zn濃度、腐食環境によっても変化するため、実機評価と同じ溶液中で、表面Zn濃度をパラメータとしたテストピース評価により求めた。これら防食距離r、腐食速度gにより、耐食寿命目標H=830hを満足する表面Zn濃度C、拡散深さdの関係をFig. 10に示す。

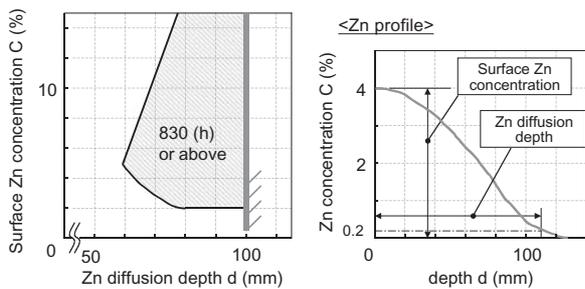


Fig. 10 Relationship between surface Zn concentration C and Zn diffusion depth d required to satisfy the target corrosion life of H = 830 h

図中のハッチング部が耐食性寿命830h以上を確保する領域であり、製品を成立させるためにはこの領域と

強度からの拡散深さ限界100μm以内を満たす領域 (ハッチング部) に表面Zn濃度と拡散深さを制御しなければならない。表面Zn濃度が1.8%以下になると拡散深さが100μm以上必要になることから、表面Zn濃度1.8%以上での成立性を検討する。ところで、残存Zn濃度Cと拡散深さdはろう付温度Tおよびろう付時間tによって決定される。残存Zn濃度Cの減少と拡散深さdを低減させるためには1)低温ろう付化 (Tの減少)、2)ろう付け時間tの短縮が必要である。前者の低温ろう付けでは、ろう付性が著しく悪化するため、後者のろう付け時間tの短縮による拡散深さの制御による検討を進めた。従来のろう付け時間を基準速度: 1倍速とし、2倍速、4倍速 (ろう付け時間は従来の1/4) でのZn拡散濃度と深さを評価した。

結果をFig. 11に示す。チューブ初期Zn溶射量は量産性を考慮して6~15g/m²とした。ろう付速度を早くすればするほど、拡散深さdが小さくなることが分かる。Zn溶射量6~15g/m²において2倍速以上であれば表面Zn濃度は2.9%以上となり、かつ拡散深さを100μm以内に制御できることが分かった。また量産性を考慮し、ろう付け速度は拡散の深さが浅く、かつろう付け工程の短時間化による生産性向上の効果をより多く得るため4倍速とした。

<Result of Zn diffusion evaluation on actual equipment>

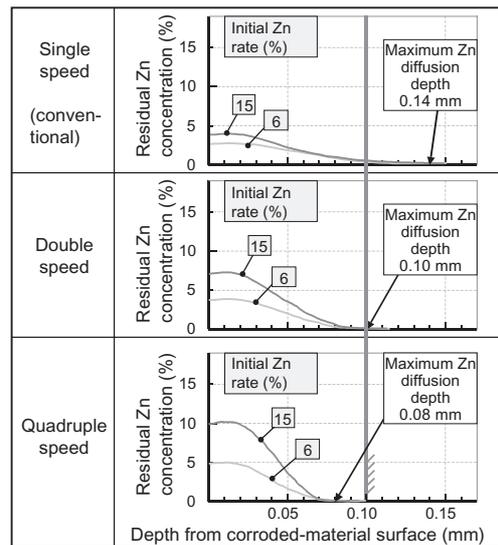


Fig. 11 Influence of shortened brazing time on Zn diffusion

この仕様での実機耐食性を確認するため、Zn溶射量 (公差上下限) での耐食性評価を実施した (Fig. 12)。

<Mist spray test results>

Zn spray rate (g/m ²)	830	1000	2000
6 (lower limit)	✓	✗	✗
15 (upper limit)	✓	✗	✗
MS	↔		

Fig. 12 Results of corrosion resistance evaluation

薄肉Zn溶射材 (t=0.25) は公差上下限においてMS4層材 (t=0.44) と同等以上の耐食性を有し、目標830h (B10=750h) 以上を満足することを確認した。

4.2 冷媒分配の均一化検討

理論上ではQ=100%の性能であるタンク別体構造のプロト品での冷房性能Qは同体格のMSに対し、Q=93%と大幅に目標未達であった。この原因究明のため出口空気温度の温度分布を測定すると、MSの最大空気温度差 $\Delta t=3^{\circ}\text{C}$ に対しRSは $\Delta t=8^{\circ}\text{C}$ であり、均一な温度分布が得られていないことが分かった。さらにRSの出口平均温度はMSに対し $+1.9^{\circ}\text{C}$ であり、この平均温度の増加が冷房性能7%の性能低下に相当し温度分布の悪化が性能低下の主要因であることが分かった。この温度分布悪化の詳細調査のためにコア表面の温度測定を実施した (Fig. 13)。

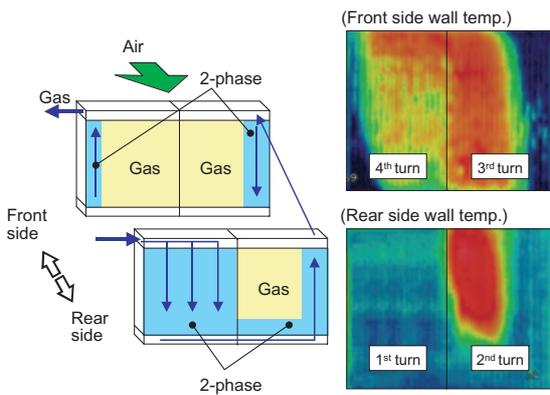


Fig. 13 Identification of the causes of uneven temperature distribution

冷媒の流れは風下側に位置する第1, 第2ターンから連通穴を介し風上側に位置する第3, 第4ターンへと流れる。温度分布の不均一は第2, 3, 4ターンで見られ、この温度分布の重ねあわせにより出口空気温度の温度差を生じていることが分った。そこで、各ターンでのタンクからチューブに冷媒が流れ込む挙動が

ら改良の指針を得るためタンク内の可視化を行った。この可視化により、タンク内の冷媒挙動を観察した結果をFig. 14に示す。

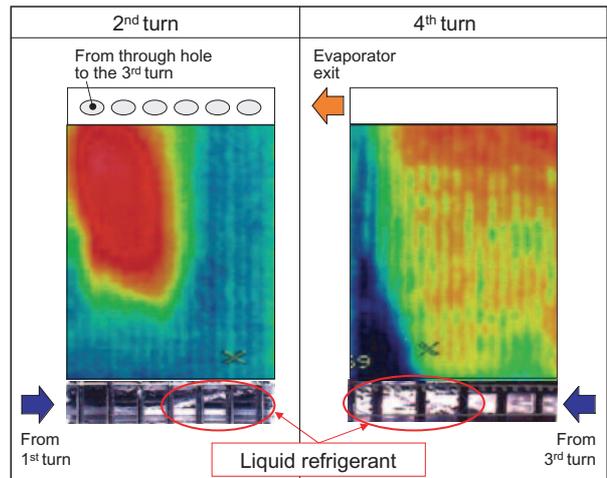


Fig. 14 Visualized refrigerant behavior at the second and fourth turns

冷媒挙動の注目点として、冷媒が下タンクから上タンクへ流れる第2, 第4ターンで液冷媒の偏りが見られた。これらのターンの表面温度分布とを照らし合わせてみると明らかに液冷媒の偏っている部分の温度が低くこの偏りが温度差の原因であった。これは、ガス冷媒より重い液冷媒が下タンク内下面を流れタンク端部に集まったと考える。また、第3ターンは、第2ターンの冷媒の偏りがそのまま均等連通穴を通過していることから、第2, 第4ターンタンク内での液冷媒の偏りを低減することが温度分布を均一可能と考え、検討を行った。分配改良の手段として作りやすさの点からタンク内に挿入する絞りプレートでの対応を試みた。その可視化による結果をFig. 15に示す。

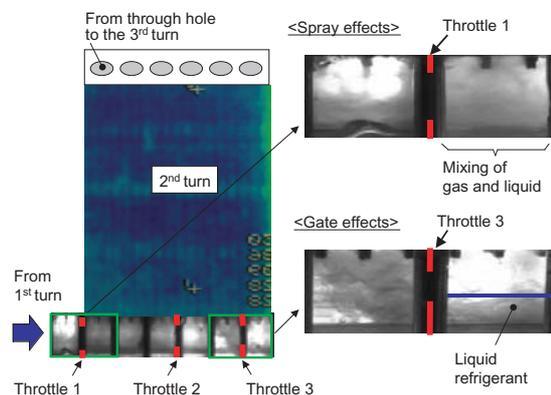


Fig. 15 Effects of the throttles

絞りによる効果として、1)堰の効果2)スプレー効果の2点あることが分かった。1)は堰止めによるタンク内面下端を流れる液冷媒の偏りを低減する効果である。図中、絞り3前から流入する液冷媒を絞り3にて堰き止めることで、液冷媒が減少している効果が確認できた。2)は当初、予測していなかったが、絞り開口のエッジにより、気液が混合されスプレー状となりこれにより、気液分離が抑制される。この効果は、絞りを通過する流速が早い程(図中の絞り1)有効であり、効果範囲は約50mm程度であることが確認できた。これら二つの効果により図中表面温度分布が均一化できる。Fig. 16にRSエバポレータの絞りの構成を示す。

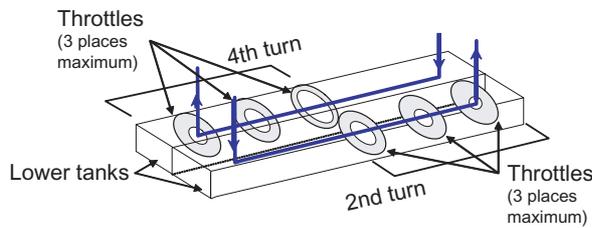


Fig. 16 Throttle layout

絞りは、第2、第4ターンの下タンクに設定した。対応個数はエバポレータのコア幅により異なる。当社最大コア幅(300mm)に対しては、上記、二つの効果を得るため、第2、第4ターンに各3ヶ、計6ヶにより対応した。Fig. 17に最終品での実機温度分布結果を示す。エバポレータの常用範囲での出口温度分布は最大温度差 $\Delta t=3^{\circ}\text{C}$ 以下を可能とし冷房性能 $Q=100\%$ を達成した。

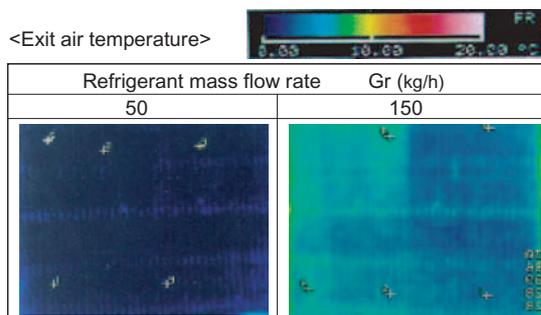


Fig. 17 Exit temperature distribution of the final model

4.3 排水性改善の検討

チューブとフィンの微細化および冷媒分配の改善により目標性能を満足したものの、フィンピッチ密化に伴うLo風量からHi風量への切り替え時の課題として、

水飛び性の悪化が認められた。水飛び性の悪化は車室内への水の飛散だけでなく、ヒータへの凝縮水の付着により窓曇りの発生を招き、品質上重要視される。水飛び性の要求値は実用上、2.5m/s以上の風速変化でも凝縮水が飛散しないことが求められる。しかし、RSエバポレータは要求値に対し1.2m/sの風速変化で凝縮水が飛散し、大幅に目標未達であった。そこでLow風量時の凝縮水の挙動に原因があると考え、MSとRSの比較を行った (Fig. 18)。

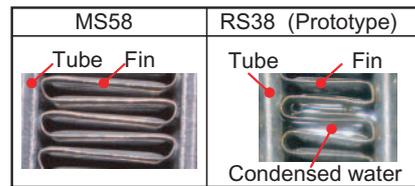


Fig. 18 Behavior of condensate at low air flow rate

MSではほとんど認められなかったフィン間の凝縮水が、RSでは多くの領域で観察された。フィン間に保持された凝縮水は急激な風速変化に耐えられないため、RSにおいては小さな風速変化で凝縮水が飛散してしまうと考えられる。また、凝縮水の挙動調査よりフィン間保水が発生する原因であることが分かった。それをFig. 19に示す。

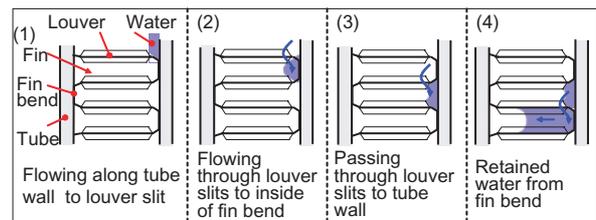


Fig. 19 Condensed water flow mechanism

凝縮水は断続的にチューブの壁面を伝い、ルーバの切れ部を乗り越えながら流れ落ちる。その流れ落ちる過程で、凝縮水がR部内側から表面張力によって引き寄せられ、フィン間の保水が発生することが認められた。さらに、一旦フィン間に保持された凝縮水が排水されずにとどまってしまうと、凝縮水の流れを障害し、その周辺のフィン間の保水が増大し水飛び性悪化の要因となることが分かった。

そこで我々は、以下の2点の仮説をたて、フィン間の保水を防止する検討を行った。

- ① ルーバの非切れ部を短くし、より薄い液膜で凝

縮水を流下させ、フィン間の保水を抑制する。

- ② ルーバを流れる風量を増大させて、一旦フィン間に保持された凝縮水を排水させる。

まず、ルーバの非切れ部の影響を検証するために、非切れ部が0.4mm、0.25mmのフィンを用意し凝縮水の挙動を調査した。その結果をFig. 20に示す。

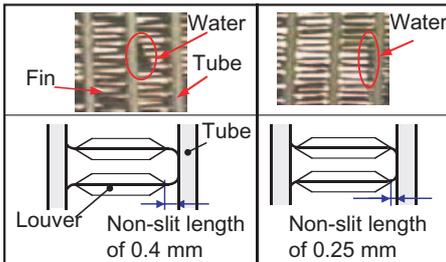


Fig. 20 Effect of non-slit louver portion on behavior of condensed water

非切れ部を減少させると、断続的に薄い液膜状になってルーバ切れ部を乗り越えながらチューブ壁面を伝って流れ落ちることが認められた。また、フィン間が完全に保水されず、フィンの中央部まで凝縮水が引き寄せられ、その後排出される現象が確認された。これは、より少ない凝縮水を断続的に薄い液膜状で流すことにより、凝縮水が完全にフィンを満たさず、フィン間保水の抑制が可能であることを示唆している。

次に、②を検証するため、プロトタイプフィンルーバ間の風速分布をCFD (Computational Fluid Dynamics) により求めた (Fig. 21)。

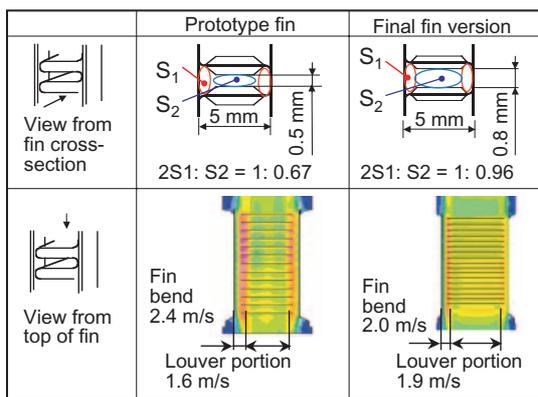


Fig. 21 Flow rate of air through louvers along with condensed water behavior

このモデルは風の流れる方向に並行な断面をとったものであり、Low風量時にフィン間を流れる風速分布

を示している。ここで、これらの風速分布を、フィンR部とフィンルーバ部に分割し、算出した平均風速を併記している。プロトタイプの風速分布はルーバ間の風速がフィンR部に対して低い。これはフィンR部とルーバ部の通過断面積の割合が1 : 0.67と、ルーバ部の通過断面積が小さいためR部に風が流れやすくなり、ルーバ間の風速が低下し、ルーバ間に水が溜まりやすくなると考えられる。

そこで、ルーバ間の風速を増加させるために、ルーバピッチを小さくし、ルーバ間の通過断面積を増大させたフィンを用意した。このフィンは前述の非切れ部の縮小も併せて行ったものであり、CFD解析と凝縮水の挙動を調査した。その結果、フィン間の風速分布はより均一になり、ルーバ間の風速を増大させることができた。また、凝縮水の挙動は断続的に薄い液膜状で流れており、かつフィン間の保水がほとんど発生していないことが分かった。2.5m/s以上の風速変化でも凝縮水の飛散しない状態をつくりあげることができた。

なお、最終仕様の広範囲なフィンピッチにおける伝熱特性の検証を行った (Fig. 22)。

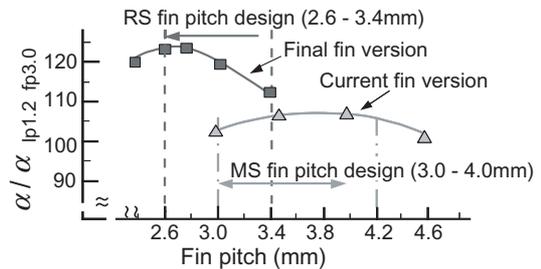


Fig. 22 Specific heat transfer coefficient of final fin version

ルーバピッチの微細化およびフィン間保水量の減少から熱伝達率の増加が認められた。RSでは伝熱特性の高いフィンピッチ2.6~3.4を使用範囲とし、水飛び性および伝熱性能向上を両立したフィン仕様を設定することができた。

5. むすび

以上、RSエバポレータを開発したので以下にまとめると。

- (1) 従来比1/4のろう付時間でZn拡散を制御することができ、t0.25mmにてt0.44mm同等以上の耐食を有する薄肉材を開発した。
- (2) チューブとタンクの別体構造の課題であった不

均一温度分布に対し絞りの効果により均一化が図れ、チューブとフィンの微細化をあわせて小型化-35%、軽量化-40%（当社MS比）を達成した。

- (3) ルーバ間の風速を増大させることにより、保水量を低減させ、風速変化量+2.5m/sでも凝縮水が飛散しないフィン仕様とした。水飛び性および伝熱性能向上を両立したフィン仕様を確立した。
- (4) 当社品質基準を満足し、かつ開発目標をすべて達成した。Photo 1に示す本製品は2002年8月から量産を開始した。

<参考文献>

- 1) Development of High Performance Evaporator SAE technical paper series 980058 Sadayuki Kamiya etc.
- 2) The Latest Heat Exchanger Technology For Vehicle Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology for The process Industries UEF July 18-23, 1999, Toshio Ohara
- 3) Development of Corrosion Resistant Brazing Sheet for Drawn Cup Type Evaporators Part2 SAE technical paper series 930149, Yasuaki Isobe etc.
- 4) Development of Quad-layer Clad brazing Sheet for Drawn Cup Type Evaporators Part2 SAE technical paper series 2001-01-1253, Toshiya Nagasawa etc.

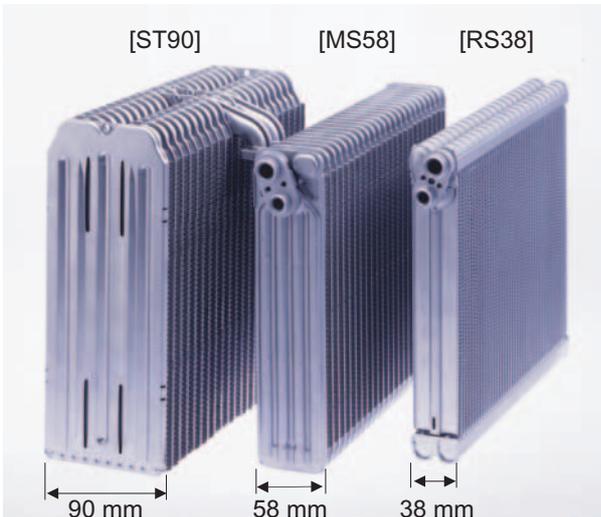


Photo 1 RS38 and our current products



<著 者>



馬場 則昌
(ばば のりまさ)
冷暖房開発3部
A/C用エバポレータの開発に従事



中村 友彦
(なかむら ともひこ)
冷暖房開発3部
A/C用熱交換器の腐食技術開発に従事



畔柳 功
(くろやなぎ いさお)
熱システム開発部
ペルチェ素子を用いた空調の開発に従事



神谷 定行
(かみや さだゆき)
熱機器生産開発部
A/C用熱交換器の生産技術開発に従事



大原 敏夫
(おおはら としお)
冷暖房開発3部
工学博士
熱交換器の技術開発に従事