

1304 空調熱交換器の汚損・腐食防止対策

The method of keeping the performance of heat exchanger of train air conditioning unit

正 [機] ○渡邊 耕司 (JR 東海) 正 [機] 大塚 智広 (JR 東海)
正 鳥居 昭彦 (JR 東海) 岡島 弘 (扇屋塗料㈱)
井本 治朗 ((有) アイ・エス・ピー)

Koji Watanabe, Tomohiro Otsuka, Akihiko Torii Central Japan Railway Co.
Hiroshi Okajima, Ougiya TORYO Co. Jiro Imoto, ISP inc.

In recent high speed trains in Japan, air conditioning units are installed under the carriage. In this condition, the fins of heat exchangers get much dust and easily corrode because of the dirt and oxidants in the air. This paper describes how to prevent corrosion of aluminum fins.

Keyword: heat exchanger, air conditioning unit, high speed train, corrosion

1. はじめに

新幹線など、在来線用の特急車両も含めて高速化にともない、従来は屋根上に設置していた空調装置を床下に設置することが多くなってきている。これは、高速走行時の安定性の確保のため、低重心化が主目的である。一方で新幹線のような 200km/h 超の速度域で走行する場合は空調のルーバーが生じる空力騒音が問題となり、低騒音化の目的もあげられる。

半面、床下は空調装置の設計上、車外空気温度が高く、ほこり等の影響も受け、必ずしも空調装置の設置に適した場所ではないことも事実である。

本稿では、熱交換器の汚損防止および熱交換器フィンの腐食防止についての研究成果について発表する。

2. 新しい熱交換器の開発

2.1 開発の経緯

今回調査対象としたのは当社 300 系車両で、1992 年から東海道新幹線「のぞみ」号として運転が開始された車両である。東海道新幹線は 1964 年の開業以来この形式で 3 形式目であるが、前 2 形式 (0 系、100 系) までは空調装置は屋根上配置であった。300 系は 50km/h の速度向上を実現し、最高速度は 270km/h である。この速度向上に際し、低重心化と空調ルーバーによる騒音低減のため、空調装置は床下配置とされた。床下配置となったことから室外温度も高く、熱交換効率の低下も予想され、容量も 61.6kW (53,000kcal/h) と大きく設計されている。

一方で、床下に設置されていることから熱交換器表面に塵埃が付着し、熱交換効率が低下するので、定期的に清掃および洗浄を行っている。

2.2 現状調査

熱交換器フィンの汚れの原因を探るため、まず現状の熱交換器の状況および汚損原因物質の特定をすすめた。

分析にあたっては下記の通りすすめた。

(1) X線吸光分析

各試料をエポキシ樹脂に定着化し、炭素を蒸着後、X線をあてて金属原子ごとに異なる吸収波長特性を用いて表面付着金属成分を検出する。

(2) 赤外線吸光分析

試料を有機溶剤に分散させ一昼夜放置した後、ろ過を行い、ろ液を臭化カリウム (KBr) 板に塗布した後、赤外線を照射して表面付着有機物の成分を分析する。

(3) 光学顕微鏡による観察

光学顕微鏡を用いて具体的に汚損物質を観察した。

(1)の結果を table 1 に示す。

熱交換器表面に付着した汚損物質は大部分が繊維状のほこりで、直径は 5 μ m 程度のもので長さは 1mm くらいのものであった。金属元素としては Cl, Fe 分が多く、Al, Ca, Cu 分が検出される。Fe と Cu 分はブレーキパッドの摩耗片と考えられる。Al と Cl, Ca 成分は後に述べるように、熱交換器フィンの腐食生成物と考えられる。(2)により検出される有機物としては水分の多い非常に酸化された油脂類と考えられる。

光学顕微鏡写真を fig.2, 3 に示す。意外なほど細い繊維状のほこりが多く、土砂よりもむしろ家庭のほこりに近い印象を受ける。

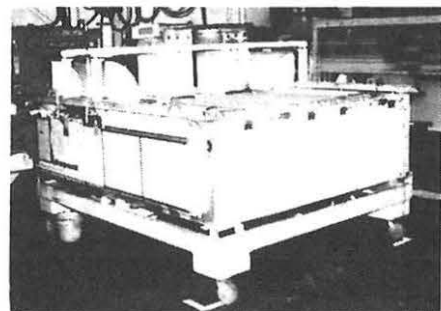


fig. 1 TAU-31B air conditioning unit for series 300 Shinkansen

table 1. test results of infrared absorption test

No	部 位	形状	成分	粉粒状物質										備考
				X線吸光分析結果										
				Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Cu	
1	フィルタ	5mm× φ20μm	衣服類, 木材系	◎	△	—	○	—	△	—	—	○	△	酸化 Al 成分が多い
2	上部フィルタ	5mm× φ20μm	鳥の羽, 衣服類	◎	○	△	○	△	○	—	△	◎	△	鉄錆が多い
3	熱交フィン	1mm× φ5μm	鳥の羽, 衣服類	◎	△	—	○	—	△	—	—	○	△	鉄錆, Al, Cl が多い
4	コンプレッサ	2mm× φ10μm	ほこり状	◎	◎	△	○	△	○	△	△	◎	○	鉄錆, Al 多い
5	ファン吸込部	砂状	不明	◎	◎	—	△	△	○	△	△	◎	△	鉄粉多い
6	ファン吹出部	砂状	不明	◎	◎	—	△	△	○	△	△	◎	△	鉄粉多い
7	100 系熱交フィン	白い結晶粉末	不明	◎	—	△	◎	—	—	—	—	△	—	塩化 Al 分が多い 屋根上設置

記号 ◎: 強く検出する, ○: 検出, △: 微量であるが検出する, —: 検出せず

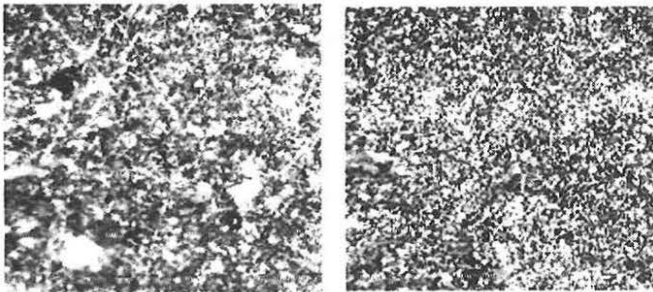


fig.2,3 magnified view of contaminants on the fin of heat exchanger (magnification ×100)

表面の拡大写真を fig.4 に, また, 断面の拡大写真を fig.5 に示す。

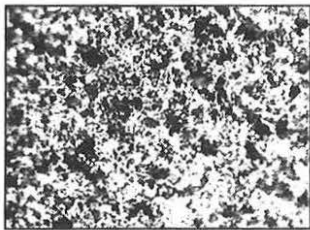


fig.4 surface

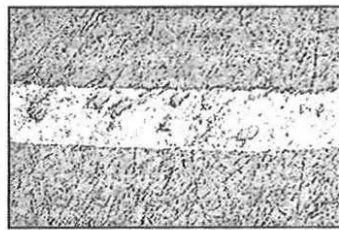


fig.5 cross sectional view
both pictures' magnification ratio is 100

次に, 実際に定期点検で交換される熱交換器を分解調査した。表面は腐食が広がっており, 腐食生成物である塩化アルミニウム (AlCl_3) および酸化アルミニウム (Al_2O_3) が表面を覆っているのがわかる。一部では厚さ 0.2mm 程度におよんでいる。また, 断面を見るとわかるように, 孔食およびアルミ特有の糸状腐食が進行しており, 一部では破断寸前の状況であることがわかる。

腐食生成物は熱伝導率が純アルミの数百倍におよびその保熱効果で熱交換器全体としての効率が落ちていることが考えられる。また, 表面がざらつくことによりさらにほこりを付着させていることも想像できる。

2.3 表面処理法の検討

今回の開発にあたり, 熱交換器フィン表面に何らかの表面処理を行い, 腐食防止を図るとともに汚れが付着しても簡単な水洗いやジェット噴射程度で汚れが取れるようなものとするように考えた。また, 表面処理法としては, 高温で行う処理法はばらつきが多く, 電気的な処理法も電気の流れにくい個所の処理ができずムラができることから避けることとし, 表面処理法としては次の3種類を検討した。

(1) クロム酸処理

重クロム酸カリウム溶液中にフィン进行浸し, 乾燥させる。

(2) 燐酸亜鉛処理

燐酸塩溶液中にフィン进行浸し, 表面に燐酸亜鉛および燐酸アルミニウム皮膜を形成する。主として鉄材の防錆処理として発達した。

(3) アルマイト処理

硫酸溶液中に浸し, 電流を流す ($\text{DC}1.0\text{A}/\text{m}^2$, $\text{DC}10\text{V}$)。上述の通り, 処理ムラができる可能性があるが, 耐食性が高く, 実験する価値はあると判断した。

また, これらの表面処理後, さらに防錆処理としてクリヤー塗装を行い, その効果も確認することとした。

なお, 現状の表面処理法は, 熱交換器の通風をよくするため親水性を確保する目的で PVA 処理が行われている。これは, フィン表面にポリビニルアルコールを塗布したものである。防錆処理として表面をコーティングするような処理は行われていない。

2.4 テストピースによる試験

まず, 現車の空調装置に用いられているのと同じ材料に表面処理を施し, 塩水噴霧試験によりどの程度腐食が進むか, 予備実験を行った。

〔テストピース〕

材質	A-1050P
大きさ	150(w)×70(H)×0.4(t)
テスト数 N	3 を基本とする
塩水噴霧時間	24, 48, 72, 96, 168h

試験の結果、PVA 処理品は無処理品と同等かあるいは悪い結果で、48hを超えると確実に孔食が進んだ。これはPVA 自体には腐食性はないが、原料の酢酸が残存し、これが水と反応して酸性化するためと考えられる。なお、塗装系のZAP 処理^{*}は168hを超えても腐食は認められなかった。

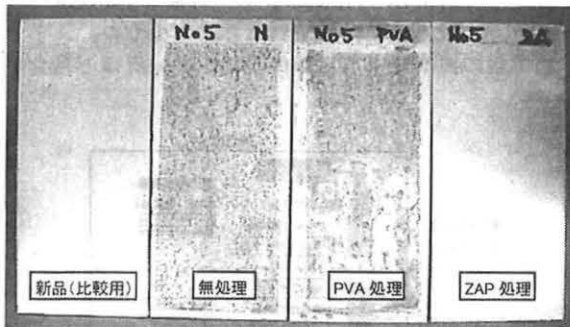


fig.6 test results of the salt spray test

次に、ZAP 処理の優位性が明らかとなったので、実際に(1)～(3)の表面処理を施し、塩水噴霧試験を行った。

これらの試験の結果、次のことがわかった。

- ① 塗装前の化成処理で比較した場合、クロム酸処理が最良であり、ついで燐酸亜鉛処理が良好であった。
- ② 塗装では、すべて耐食性の向上が認められる。
- ③ PVA 処理品は耐食性がない。
- ④ アルマイト処理品はクロム酸処理や燐酸亜鉛処理品にくらべて耐食性が劣り、またコスト面や品質面からもやはり問題があると判断した。

2.5 実機試験

テストピースによる試験結果から、表面処理としてクロム酸処理および燐酸亜鉛処理がよく、また防錆保護皮膜として水性アルキド樹脂クリヤ塗装がよいと判断した。また、保護皮膜は熱交換器の性能を低下させることが懸念されるため、膜厚は $5\mu\text{m}$ を目安とした。処理はディッピング処理であるので、膜厚は液の希釈率により自由に設定できる。

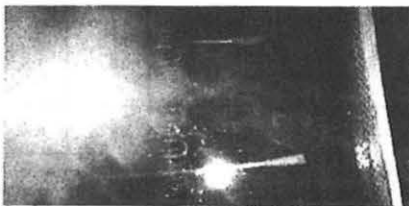


fig.7 heat exchanger under phosphating process

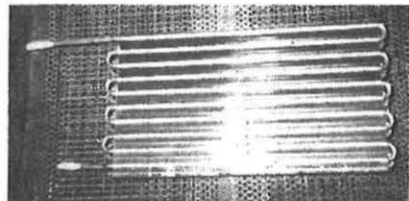


fig.8 processed heat exchanger

実際の熱交換器を使って上記の処理を行い、塩水噴霧試験機に投入し経過を観察した。48h 経過後の結果を次に示す。

table 2. test results of applying the surface treatment on the heat exchanger of the real air conditioner

結果			
		クロム酸処理+クリヤ塗装	燐酸亜鉛処理+クリヤ塗装
	外観状態	良好	白錆は少ないが黒変が目立つ
	判定	◎	△
		順位	1
		順位	2
		順位	3

2.6 熱交換器性能確認試験

以上で最適な表面処理方法がわかったので、実際に熱交換器を空調装置に搭載し、性能確認試験を行った。

試験条件は次の3点である。いずれも装置を恒温室に設置し、定格電圧、定格周波数、定格風量のもとに運転を行い、下記状態になってから30分以上経過し、負荷が安定したときの冷房能力・冷媒圧力等を測定する。

(1) 標準性能試験条件

冷 房	室内熱交換器吸込空気乾球温度	$28.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$
	室内熱交換器吸込湿球温度	$23.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$
	室外熱交換器吸込空気乾球温度	$33.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$
暖 房	室内熱交換器吸込空気乾球温度	$21.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$
	室外熱交換器吸込空気乾球温度	$7.0 \pm 1.5^\circ\text{C}$
	室外熱交換器吸込空気湿球温度	$6.0 \pm 1.5^\circ\text{C}$

(2) 過負荷試験

冷 房	室内熱交換器吸込空気乾球温度	$35.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$
	室内熱交換器吸込湿球温度	$28.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$
	室外熱交換器吸込空気乾球温度	$45.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$
暖 房	室内熱交換器吸込空気乾球温度	$24.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$
	室外熱交換器吸込空気乾球温度	$21.0 \pm 1.5^\circ\text{C}$
	室外熱交換器吸込空気湿球温度	$15.5 \pm 1.5^\circ\text{C}$

(3) 低温試験

冷 房	室内熱交換器吸込空気乾球温度	$20.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$
	室内熱交換器吸込湿球温度	$14.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$
	室外熱交換器吸込空気乾球温度	$20.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$
暖 房	室内熱交換器吸込空気乾球温度	$21.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$
	室外熱交換器吸込空気乾球温度	$0 \pm 1.5^\circ\text{C}$
	室外熱交換器吸込空気湿球温度	$-1.0 \pm 1.5^\circ\text{C}$

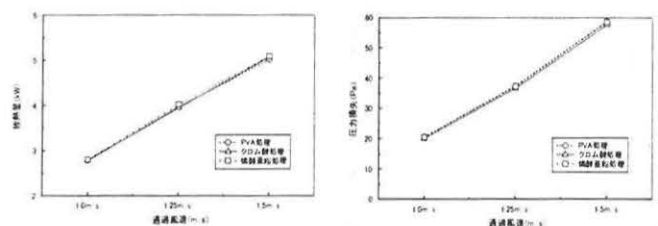


fig.9 performance of new heat exchanger as condenser
(l: heat discharge r: pressure loss)

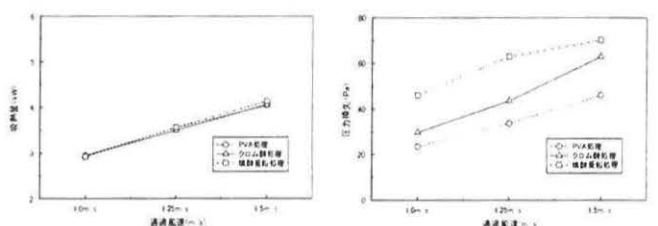


fig.10 performance of new heat exchanger as evaporator
(l: heat absorption r: pressure loss)

^{*} 軽金属用の耐食性プライマーを塗布する処理

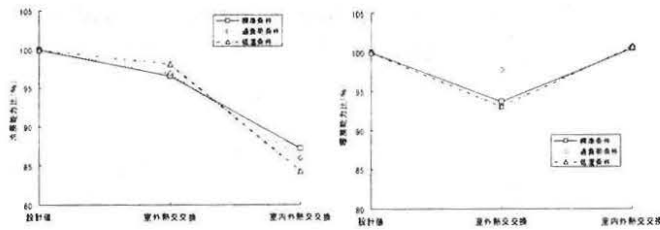


fig.11 performance of new heat exchanger
(l: cooling r: warming)

fig.9 をみると、ファンによる送風の圧力損失はほとんど差がなく、同一風速において放熱特性および吸熱特性は現行品とほぼ同等と判断できる。一方、冷房能力については、室外熱交換器のみを交換した場合は能力低下は小さいが、室内熱交換器まで交換した場合は冷房能力が低下する。これは、冷房時は室内熱交換器は蒸発器となり、結露を生じて通風が悪くなるためである。今回の表面処理法はクリアーコーティング皮膜が若干親水性が低く、新たに親水性皮膜を追加することにより最終的な現車試験を行った。

2.7 現車試験

ほぼ最終的な表面処理方法として、開発中の皮膜処理に加え、最終的に親水性皮膜処理を行って防汚・防食皮膜とすることとした。最後の親水性皮膜処理により皮膜厚さが増大し、熱交換効率が落ちるのを防ぐため、前工程までの皮膜を薄くした。また、将来的に防食皮膜と親水性皮膜を一緒に処理できる1コートタイプに変えていく予定である。

追跡調査にあたっては15ヶ月間、現車に搭載し、途中3回の追跡調査と最終的に全検時に取り外して汚損および腐

食状況を調査した。その結果、

- ① 腐食状態に関しては明らかに表面処理による優位性が出ていた。現行のPVA処理品は表面から0.03mm程度まで腐食が進んでいる。
- ② フィンに付着しているゴミ類としては、砂が多く、特に現行のPVA処理品の表面に付着しているのが目立った。対策処理では付着物は非常に少ない。
- ③ 顕微鏡の観察ではゴミ類付着物が多い所ほど腐食が激しい。

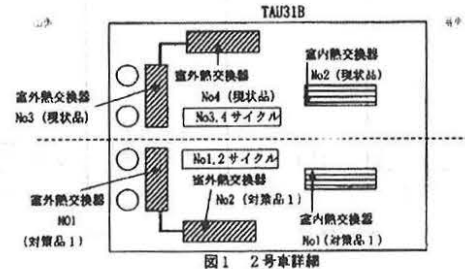


fig.12 new and conventional heat exchangers of TAU31B

3. 結論

室外熱交換器の付着物の状態から現状品については、現表面処理の親水性により表面に水溶解部ができ、その上に砂、ほこり類が付着し、腐食を増長させると考えられる。また、この腐食が進むと腐食部に初期以上のほこりが溜まりさらに腐食が進むと考えられる。今回開発した新型熱交換器では化成処理による耐食性の増加とともに水に溶けない親水性処理により、ほこりの付着が少なく、腐食が進まない限りほこりの付着も増加しないと言える結果が得られた。

table 3. test results of the field test

			テープ付着物と汚れの状態				アルミニウムフィンの腐食状態					
			付着物の内容		汚れ度		腐食の内容		腐食比較評価点			
区 分		処理内容	部位	2 回目	3 回目	2 回目	3 回目	2 回目	3 回目	1 回目	2 回目	3 回目
2号車	No.1	クロム酸処理	右側	砂、ホコリ類、鳥の羽	砂、ホコリ類、鳥の羽、植物の種	◎	◎	微小な孔食が発生	孔食の広がりがある	10 点	9 点	7 点
			左側	砂、ホコリ類、木屑、鳥の羽	◎	微小な孔食が発生		10 点		8 点		
	No.2	クロム酸処理	右側	砂、ホコリ類	砂、ホコリ類、植物の種	◎	◎	微小な孔食が発生	微小な孔食が発生	10 点	7 点	7 点
			左側	砂、糸ゴミ、ホコリ類、鳥の羽	◎	微小な孔食が発生		10 点		7 点		
	No.3	現状品	右側	砂、糸ゴミ、ホコリ類、鳥の羽	砂、糸ゴミ、ホコリ類、植物の種	◎	◎	孔食の広がりがある	孔食の広がりがある	10 点	6 点	5 点
			左側	砂、糸ゴミ、ホコリ類	◎	微小な孔食が発生		10 点		7 点		
	No.4	現状品	右側	砂、糸ゴミ、ホコリ類、鳥の羽	砂、糸ゴミ、ホコリ類、植物の種	○	△	孔食の広がりがある	孔食の広がりがある	10 点	5 点	5 点
			左側	砂、ホコリ類、鳥の羽	○							
5号車	No.5	硫酸亜鉛処理	右側	砂、ホコリ類、鳥の羽	砂、ホコリ類、植物の種	◎	◎	微小な孔食が発生	微小な孔食が発生	10 点	9 点	7 点
			左側	砂、ホコリ類	◎	微小な孔食が発生		10 点		8 点		
	No.6	硫酸亜鉛処理	右側	砂、糸ゴミ、ホコリ類	砂、ホコリ類、植物の種	◎	◎	微小な孔食が発生	微小な孔食が発生	10 点	7 点	7 点
			左側	砂、糸ゴミ、ホコリ類、木屑	◎							
	No.7	現状品	右側	砂、糸ゴミ、ホコリ類	砂、ホコリ類、植物の種	◎	◎	孔食の広がりがある	孔食の広がりがある	10 点	7 点	5 点
			左側	砂、ホコリ類	◎	孔食の広がりがある		10 点		5 点		
	No.8	現状品	右側	砂、糸ゴミ、ホコリ類	砂、ホコリ類、植物の種、木くず	◎	△	孔食の広がりがある	孔食の広がりがある	10 点	6 点	5 点
			左側	砂、糸ゴミ、ホコリ類	◎							

汚れ度記号 ◎:あまり汚れてない、 ○:やや汚れが目立つ、 △:汚れが酷くなっている、 ×:汚れが酷く機能性も低下している。