

# 特集 アルミ合金製熱交換器の防食技術\*

## Corrosion Engineering for Automotive Aluminum Heat Exchangers

磯部 保明  
Yasuaki ISOBE

竹内 桂三  
Keizo TAKEUCHI

Recently, reduction of component weight for gas mileage improvement in automobile applications has become a subject of great importance for environmental protection.

This paper describes some applications of corrosion protection technologies and corrosion evaluation technologies for automotive heat exchangers made from aluminum alloys. Corrosion environments discussed in this paper are de-icing salt splash on radiators and condensers, engine coolant water in radiators and heater cores, and condensate solutions on evaporators.

**Key Words** : Automotive Heat Exchanger , Aluminum Alloy , Corrosion , Corrosion Protection , Corrosion Evaluation

### 1. はじめに

20世紀に終わりを告げようとしている今日、地球環境保全に対する関心が世界的に高まり、さまざまな分野で取り組みに熱を帯び始めている。自動車産業においても環境保護の活動は活発で、リサイクルを始め、自動車の燃費向上、ハイブリッドカーや燃料電池車の開発などが進められ、21世紀には自動車のパワーソースが様変わりすると思われるほどである。

このような中、自動車部品の軽量化は燃費向上に直結し、エネルギー資源の節減、CO<sub>2</sub>排出量の低減につながる重要な課題である。軽量化を実現する手法には、設計合理化、機械効率向上などと共に軽量材料の使用が挙げられ<sup>1)</sup>、部品のアルミニウム(以下、アルミと略す)合金化はその有力な手段の一つである。

自動車用熱交換器(Fig.1)は1960年代に初めてアル

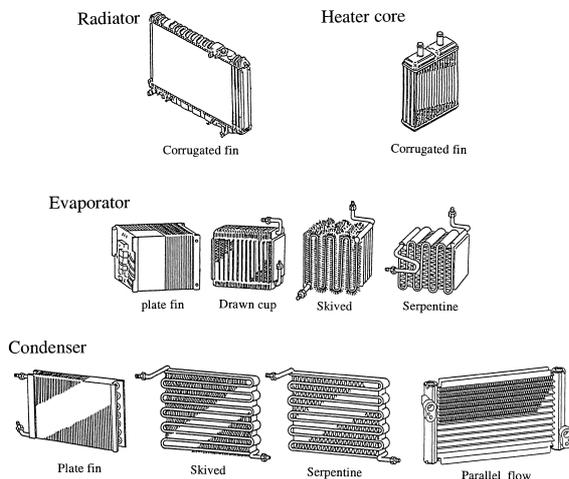


Fig.1 Types of automotive heat exchangers

ミ合金製が登場して以来、軽量化、小型化が要求されるためアルミ化は着実に進み、国内でのアルミ化率は1996年度実績ではラジエータ、ヒータコア、エバポレータ、コンデンサがそれぞれおよそ55%、50%、100%、100%であり、1999年度はラジエータ、ヒータとも90%以上に達するものと予想される<sup>2)</sup>。

さて、熱交換器のさらされる腐食環境のうち最も一般的と思われる中性塩化物水溶液において、アルミ合金は電気化学的に卑であることに加え、孔食型の腐食形態を示す。これらはアルミ合金製熱交換器を設計する際、腐食挙動や損耗に十分な検討と防食処方が必要であることを示唆している。加えて熱交換器では材料の薄肉化が製品の軽量化や性能向上への寄与が大きいことから、防食が重要なキー技術となる。

熱交換器では、冷却媒体の通路管を貫通する腐食が製品の機能を損なう致命的な損傷となるので、その寿

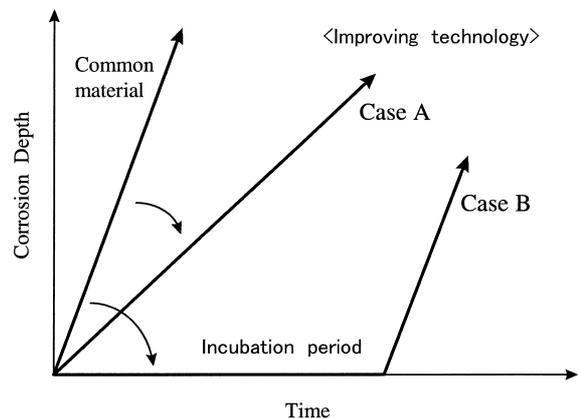


Fig.2 Schematic diagram of the concept of improving technologies of corrosion resistance

命延長が防食の最大の目的である。その管材の腐食深さを縦軸にとり、経時変化の模式図で防食の基本的な考え方を表わすと、Fig.2に示す2方法にまとめられる。すなわち、通常の方法に対し、腐食速度を低減する方法(Fig.2のA)、あるいは、腐食の潜伏期間を設ける方法(Fig.2のB)である。材料自体の耐食性を向上させるのがAに、また犠牲腐食材を配置する陰極防食や、樹脂コーティングはBに相当すると言えよう。熱交換器の構造、環境によって上記A、Bの採用可否や効果の程度が異なるのはもちろんであるが、加えて現在、ほとんどの熱交換器は約600に加熱されるろう付工程にて一体接合されるので<sup>3)</sup>、防食技術を開発する際にはこの加熱の影響を充分考慮する必要があり、また逆に有効活用した例もある。

本稿では自動車用熱交換器がさらされる環境別に防食技術の現状と課題について述べることにする。

## 2. 熱交換器の腐食環境

熱交換器のさらされる環境を大別するとTable 1に示すようになる。かつてはエアコンの冷媒にCFC12が用いられていたが、これは水分、熱により分解し、生成した塩酸による腐食への配慮が必要であった。

1990年代に入り、オゾン層破壊問題への対応により代替フロンであるHFC134a化が進められた。このHFC134aは分解しても塩酸を生成しないため、今日、エアコンの内部は防食に関する配慮をほとんど要しない。従って現状では融雪塩水の被水(以下、塩害と略す)する部位、エンジン冷却液に接する部位、および結露する部位の腐食が重要視されており、以下これらの環境に関して熱交換器材料の薄肉化実現のための防食技術と、これを支える基盤技術である腐食評価法の考え方について考察する。

Table 1 Environments of automotive heat exchangers

Heat Exchanger	Outer side	Inner side
Radiator	De-icing salt solution	Engine coolant
Heater core	Air	Engine coolant
Condenser	De-icing salt solution	Refrigerant (HFC134a)
Evaporator	Condensate solution	Refrigerant(HFC134a)

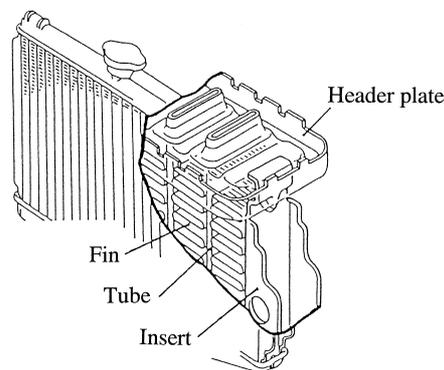


Fig.3 Example of heat exchanger structure

### 2.1 塩害環境

融雪塩を大量に散布する北米五大湖周辺、北欧<sup>4)</sup>などの地域では、路面から跳ね上げられた水に多量のCl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>が含有し、これが被水するラジエータとコンデンサの腐食を促進する<sup>5,6)</sup>。

ラジエータを例に、熱交換器の構造をFig.3に示すが、熱交換媒体が通過するチューブは肉厚が0.2~0.4mmと極めて薄い<sup>7)</sup>。この肉厚で目標市場寿命(例えば15年)まで貫通腐食がないように防食上の配慮がなされている。

現在、最も一般的なのが陰極防食法である。これはFig.2のBの考え方である。具体的にはFig.3に示されるフィンにZn、Sn、Inなど、アルミ合金を電気化学的に卑化する元素を添加し<sup>8)</sup>、自然電極電位をチューブに対し50~200mV程度卑とする設計がなされる。Znの添加されたフィンに接合した場合のチューブの防食効果のレベルを、フィンがない場合と比較してFig.4に示す。犠牲陽極フィンを採用するとチューブの孔食の深さ方向への進行を抑制できる。

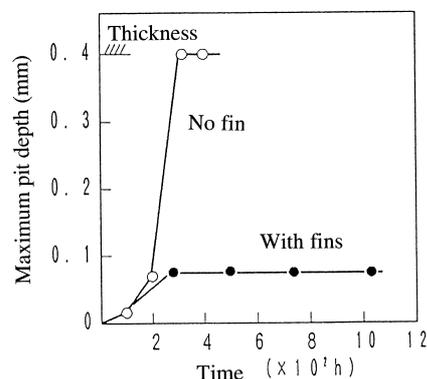


Fig.4 Effect of sacrificial anodic fin for radiator tube in CASS test

コンデンサのようにチューブ表面にZnをアーク溶射などでコーティングする手法も一般的である<sup>9)</sup>。この場合、ろう付加熱時にZnがチューブ内部に拡散することを利用し、Al-Zn合金層すなわち犠牲陽極層を効果的に形成させる。

また、ろう材に添加されたSiがろう付加熱時に芯材に拡散することを利用し、芯材/ろう材界面に微細な $\alpha$ Al(MnFe)Si化合物を析出させ、自然電極電位の低いいわゆるアノードックバンドを形成させることにより耐食性を向上させる手法が報告されている<sup>10)</sup>。

Table 2 Typical corrosion test methods

Name	Test condition	Ref. standard
Salt spray test	5 %NaCl solution (pH:6.5~7.2)	JIS Z 2371
	35 ± 2°C	JIS H 8502
	Continuous spray (1~2ml/80cm <sup>2</sup> /h)	ASTM B 117
CASS test	5 %NaCl+0.26g/l CuCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O (pH:3.0)	JIS H 8681
	50 ± 2°C	JIS H 8502
	Continuous spray (1~2ml/80cm <sup>2</sup> /h)	ASTM B 368
SWAAT test	①Spray:Artificial sea water (ASTM D 1141) pH:2.8~3.0, 49(or35)°C	ASTM G 85-A3
	②Wet:Relative humidity ;over 98 % 49(or35)°C	
	③Cycle:Spray(30min.)→ Wet(90min.)	
JASO method	①Spray: 5 %NaCl solution pH:6.5~7.2, 35 ± 2°C	JASO M 610-92
	②Dry: Relative humidity ;20~30%, 60°C	
	③Wet: Relative humidity ;over 95%, 50°C	
	④Cycle:Spray(2h)→ Dry(4h)→ Wet(2h)	

さて、Fig.4はCASS試験での結果であるが、CASS法は試料表面にCuが析出すること、pHが低いことなど市場の環境とはかなりかけ離れた加速評価法といえる<sup>11)</sup>。従来はTable 2に示すうち、SST、CASSなど連続噴霧の方法が採用されてきた<sup>12)</sup>。しかしながら、塩害を再現性よく迅速に評価したいという要求から、SWAAT、JASO法などが採用されつつある。これらは腐食液にCu<sup>2+</sup>を用いず乾湿サイクルで腐食を促進している点で一步実環境に近づいたといえるが、それぞれ腐食形態の再現性や加速性が不十分と思われる。

Table 2に示す試験法の腐食液は5%程度の海水レベルのNaCl水溶液が主に用いられるが、必ずしも高濃度の塩水で促進性が得られるわけでもなく<sup>13)</sup>、通常の1/10程度の塩濃度が適切との報告もある<sup>14)</sup>。低濃度塩水はすきま部での塩濃度電池形成による腐食促進にも有効と考えられる。また、Cl<sup>-</sup>に対するSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>添加により腐食形態、分布に差が生じる<sup>15)</sup>ことから、市場を再現する試験法は、0.5%程度のNaCl水溶液をベ

ースにNa<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>を添加し、噴霧、湿潤、乾燥を適切に組み込んだ試験条件が実環境に近いと筆者は考える。

塩害を正しく評価したいという要求は今に始まったことではないが、材料の高耐食化と開発期間の短縮化などにより、より迅速で再現性の高い評価法の研究開発が現在も望まれるところである。

## 2.2 エンジン冷却液環境

ラジエータ、ヒータコアの内面側はエンジン冷却液に接する。エンジン冷却液には通常、凍結防止用のエチレングリコールと腐食抑制剤(インヒビタ)が添加されているロングライフクーラント(LLC)が使われる。

しかしながら、中近東や沖縄のような気温の高い地域ではLLCが用いられず、水道水、井水がそのまま使用されるようである<sup>5)</sup>。この場合、腐食因子としてはCl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、溶存酸素と共に系内他部品から溶出したCu<sup>2+</sup>が挙げられる。主に中性液環境であるため、孔食抑制の基本的な考え方は、塩害の項でも述べた陰極防食法(Fig.2の考え方B)である。

幸い、アルミ合金圧延材ではクラッド技術が確立されているので、Fig.5のようにチューブ内面に芯材より孔食電位が卑なAl-Zn合金を犠牲陽極層としてクラッドする材料が国内では一般に用いられてきた。Fig.6に犠牲陽極層クラッド材の効果の一例を示す。現在でも犠牲陽極層への添加成分やその添加量、および層厚さなどが芯材の材質に合わせて種々検討されている。

北欧では気温が低いのでLLCが正しく管理されるためか、犠牲陽極層が用いられなかった。ただし、最近では海外自動車メーカーも犠牲陽極層クラッドの採用に傾いているようである<sup>16)</sup>。

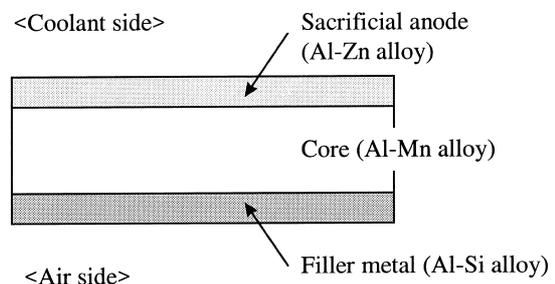


Fig.5 Schematic diagram of cross sectional tube stock

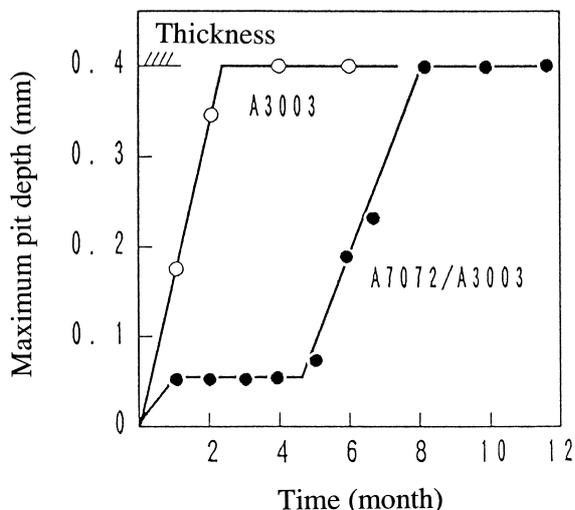


Fig.6 Sacrificial anodic effect of A7072 clad

近年、当社のラジエータ、ヒータコアで採用されたMg拡散強化型チューブ材<sup>17)</sup>について述べる。本材料は内張材にMg、芯材にSiを添加し、ろう付加熱により内張材のMgを芯材に拡散させ、Mg<sub>2</sub>Siを微細析出させることにより、強度向上を図った材料である。

さらなる強度向上を期待して添加した芯材Cu量の、強度と耐食性に及ぼす影響について考察した。冷却液側の耐食性を評価する浸せき試験に用いた腐食液の組成は市場の回収冷却液を分析し、設定した( Table 3<sup>12)</sup>中のND液)。浸せき試験は通気条件、温度サイクルは88 で8時間および室温で16時間を1サイクルとした。

Table 3 Water side corrosive solution for radiator and heater core

Solution name	Chemical composition (:ppm)					pH
	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	
ASTM	100	100	100	-	-	9.0
GM	100	300	200	1	-	9.5
OY	195	60	-	1	30	3.0
ND	300	100	-	10	-	5.5

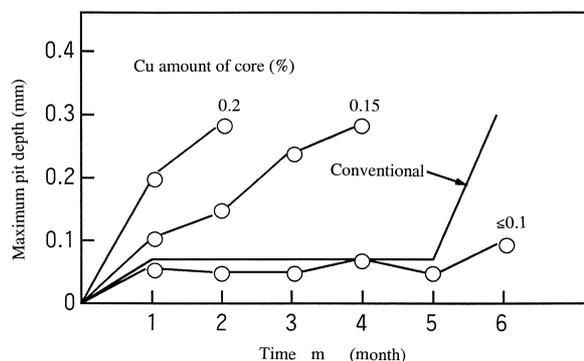


Fig.7 Time variation in the maximum pit depth in immersion test of ND corrosive solution

開発材各種の試験結果をFig.7に示す。芯材中のCu添加量が0.1%以下の場合、孔食が芯材に及ばない期間が従来材とほぼ等しく良好な耐食性を示したものの、0.15%以上では耐食性が劣っていた。一例として芯材にCuを0.2%添加した材料を使用したチューブ材の腐食試験後の断面を顕微鏡観察すると、明らかな粒界腐食が認められた(Fig.8)。

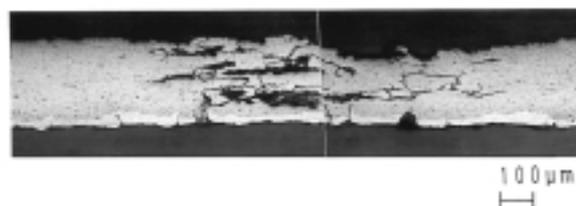


Fig.8 Corrosion on the tube stock containing 0.2% Cu material in the ND immersion test

ろう付加熱後、芯材にCuを0.2%添加した材料の内張材表面から深さ約50 μmの部分を実験しTEM観察すると、粒界に析出物が存在していた(Fig.9)。この析出物は電子線回折によりCu<sub>2</sub>Mg<sub>8</sub>Si<sub>6</sub>Al<sub>5</sub>化合物であることが同定できた(Fig.10)。

従って、粒界腐食メカニズムはFig.11に示すように、材料がろう付加熱後冷却される際に、粒界にCu<sub>2</sub>Mg<sub>8</sub>Si<sub>6</sub>Al<sub>5</sub>化合物が析出する過程で、その近傍にCu欠乏帯(PFZ)が生じ、この欠乏帯が電気化学的に卑であるため腐食が粒界に沿って進行したと推定される。この推定メカニズムを立証するためには各相の自然電極電位の測定が有効であるが、チューブ材そのもので

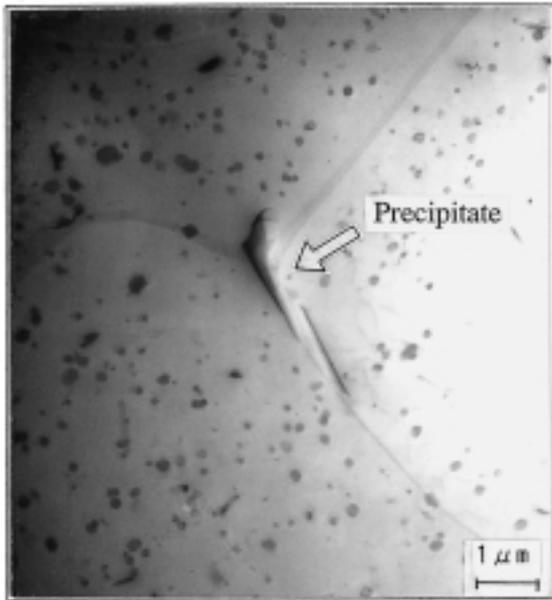


Fig.9 Transmission electron micrograph of precipitate at grain boundary

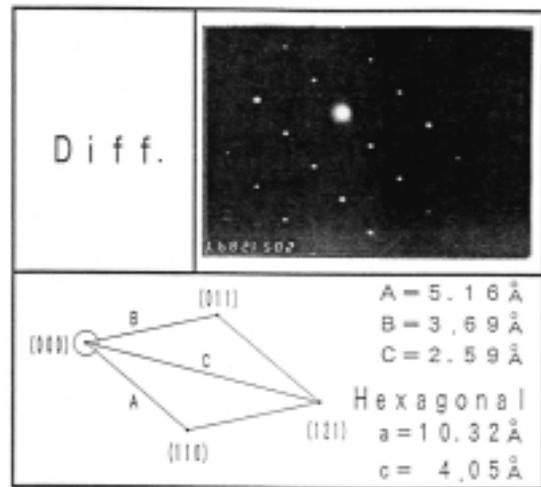


Fig.10 Electron diffraction of precipitate at grain boundary

の測定が極めて困難であるため、各相のバルク材を作製し、これらを測定に供した。

その結果、粒内マトリクス、欠乏帯および  $\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6\text{Al}_5$  化合物の 3.5% NaCl 中の自然電極電位はそれぞれ -640mV (Ag/AgCl 電極基準、以下同じ)、-700mV および -480mV であった。つまり析出物が最も貴で、欠乏帯が最も卑であるので、粒界腐食は上述の推定メカニズムに従って進行したものと理解できる。

以上の結果を基に Fig.2 の考え方 A に相当する技術開発を行い、耐食性の良好なチューブ材を開発できた。

ところで、冷却液環境を対象とした腐食評価法には各地域の水質が調査され<sup>6)</sup>、Table 3 に示すような腐食試験液が考案され、実使用されている<sup>12)</sup>。アルミ合金は pH4 ~ 9 の範囲では、いわゆる不動態化するので、希薄塩化物水溶液中での孔食を発生、促進させるには  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、溶存酸素の存在が必須となる。その点、Table 3 中では ASTM 液の加速性が最も小さい。

一方、 $\text{SO}_4^{2-}$  の添加量と  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$  比、および液導電率が腐食形態に差をもたらす。特にラジエータやヒータコアの内面にクラッドされた犠牲陽極層の効果の及ぶ距離は溶液の導電率の低下と共に狭まるので<sup>18)</sup>、導電率の低い液を用いると芯材の孔食発生時期が早ま

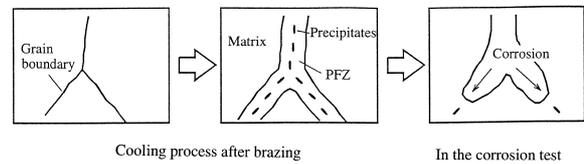


Fig.11 Schematic diagram of intergranular corrosion mechanism

る。また、実際の冷却系としての循環流速、温度サイクルも腐食の形態、速度に影響を与える。現在はこれら実環境条件を反映した循環試験が腐食評価に用いられている。

さて、実使用される LLC の pH はおよそ 8 ~ 10 に設定されている。これは鉄系材料の防錆効果を狙った処方であると思われるが、数ある LLC のうち、経年変化し pH が上昇する類のものはアルミ合金にとって注意が必要となる。主に欧米で用いられてきたホウ酸イオン ( $\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$ ) を主成分とする LLC の中には特に低濃度の場合、アルミ合金に対し腐食性が生じるが<sup>11)</sup>、この原因には pH 上昇が示唆されている<sup>19)</sup>。

pH10 のアルカリ溶液中では高温 (80 ) 時に、室温時とは逆に犠牲腐食層の自然電極電位が芯材よりも貴になるケースが報告されている<sup>20)</sup>。また、弱アルカリ溶液中でアルミ合金の表面に生成する擬ペーマイトの皮膜により犠牲陽極効果が阻害される可能性があることから<sup>21,22)</sup>、アルカリ溶液中での防食技術が模索されている。

国内外を見渡すと無数のLLCが現存するが、このようなエチレングリコールの添加された淡水系でのアルミ合金の腐食挙動にはいまだ不明な点が多い 特に、インヒビタが複合的に作用する場合の腐食要因の明確化は、新しい防食法の開発、材料の開発に必須であり、今後の研究が期待される。

2.3 結露環境

冷媒が蒸発するためエバポレータの表面には凝縮水が結露する。この結露水膜中には大気中の腐食性イオンが混入するものの、液導電率は非常に低く、水道水レベルである(Table 4)<sup>33)</sup>。このような腐食環境では前述したフィンの犠牲陽極効果が及ぶ範囲が限定され、冷媒通路管の外表面全体を防食できない場合が発生する。従って、エバポレータの防食には冷媒通路管材料自体の耐食性を向上させること(Fig.2の考え方A)が第一に考えられるべきである。

Table 4 Chemical composition of condensate solution from evaporators in various countries

Location	pH	Conductivity (S/m)	Concentration (ppm)		
			Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Nagoya(Japan)	4.2	7.0	0.6	19	1.8
Florida(USA)	6.6	—	1.0	4.8	—
Bangkok(Thailand)	6.7	14.2	0.9	22	4.1
Muscat(Oman)	6.7	—	2.8	3.5	—

ドロンカップエバポレータでは管材に、ろう材/芯材/ろう材の3層クラッドのプレート材が用いられる。1990年代に入り、当社が採用した高耐食3層クラッドプレート材について以下述べる。

芯材の耐食性を向上させるには、カソードポイントとなるFe、Siの含有量を低減すること<sup>24)</sup>、0.2%程度のTiを添加することが効果的であることを見出した<sup>24)</sup>。Al-Ti合金では鑄造時に包晶反応によって固溶Tiの濃度分布が形成されるが、Tiの拡散速度が極めて遅いため、この濃度分布は熱間圧延やろう付工程の加熱を経ても維持される(Fig.12)。低Ti濃度相は高Ti濃度相よりも自然電極電位が低い(Fig.13)ため、圧延により芯材断面中に層状に形成された低Ti濃度相が犠牲陽極効果を発現し、板厚方向への腐食速度を低減できる。腐食部断面をEPMAで分析すると、低Ti濃度相を腐食が進行していることが確認できた(Fig.14)。

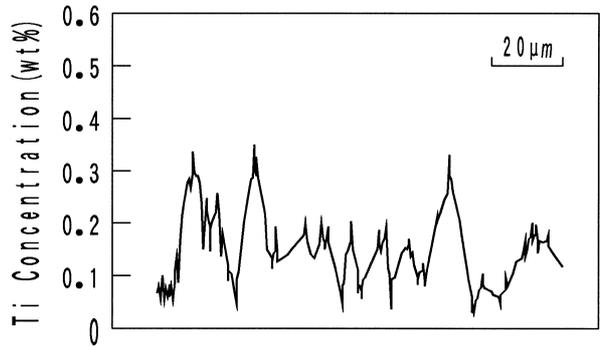


Fig.12 Ti concentration profile of Al-Mn alloy containing 0.15% Ti by EPMA (transverse section)

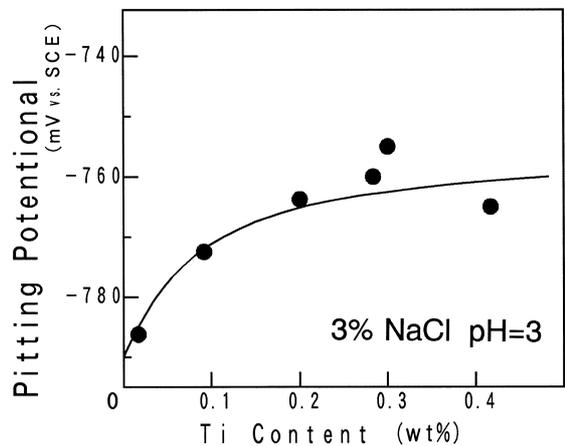


Fig.13 Pitting potential of Al as a function of Ti content

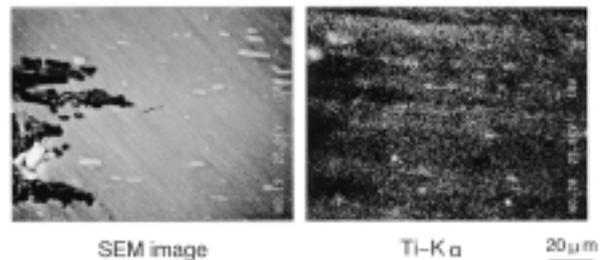


Fig.14 Ti ditribution (EPMA) in a transverse section of the developed alloy

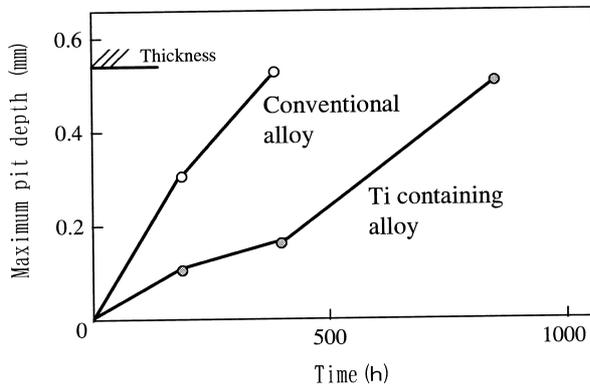


Fig.15 Time variation in the maximum pit depth in CASS test

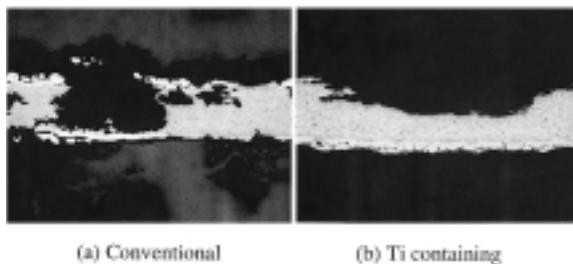


Fig.16 Pitting corrosion damage in evaporator sheets following 500 hours CASS exposure

以上のことより、Fe、Siを低減し、Tiを添加した高耐食プレート材は従来材(A3003)に比べ、約2倍の耐食性を確認した(Fig.15, Fig.16)<sup>23)</sup>。

また、芯材に微量のCuを添加しておき、ろう付加熱時に拡散によるCuの濃度勾配を形成させ、芯材中央部の自然電極電位を表層に対し貴にする方法も効果が確認されている<sup>25)</sup>。

一方、このエバポレータのプレート材はプレス加工で歪を受け、ろう付加熱中に溶融したろう材中のSiが結晶粒界に沿って芯材に拡散し、融点が低下して溶融するいわゆるエロージョンが発生する(Fig.17)<sup>24)</sup>。これにより芯材の実質肉厚が減少すると同時に、表層ろう材の凝固時に形成された共晶部があたかも粒界腐食のように腐食し、耐食性を著しく阻害している。

加工硬化材を用いればエロージョンを極めて低く抑えられることは既知であるものの、プレス加工時に割れが発生し適用が難しい。芯材中の析出物をコントロールすることにより、エロージョンを低減した結果が報告されており<sup>24)</sup>、これも耐食性改善の一つといえる。

今後は陰極防食法のみならず、表面処理などの新しい考え方に基づく防食法の実用化が期待される。

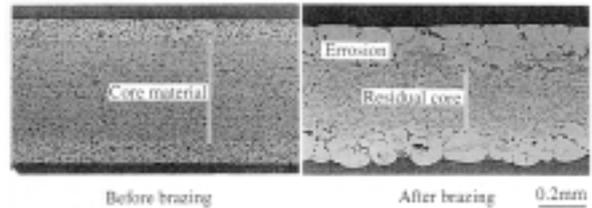


Fig.17 Example of Si erosion at brazing

ところで、これらエバポレータの腐食評価法には従来、CASSや泥付湿潤試験<sup>26)</sup>などが用いられてきた。しかしながら、前述したように、東南アジア、中近東など気温の高い地域では年中エアコンを使用するため、エバポレータ表面が乾燥する期間がほとんどなく、高温湿潤環境によって腐食が促進される<sup>23)</sup>。また、排気ガス成分の混入により $SO_4^{2-}$ 、 $NO_3^-$ が存在し、液導電率が低いことが特徴である(Table 4)。

前述したエバポレータ材料の高耐食化も基本的には陰極防食法であり、液導電率の違いは陰極防食効果に差を生じさせるため、市場環境を模擬するならば導電率の低い腐食液を選定すべきであろう。筆者らはこの環境を模擬した複合サイクル試験を考案した<sup>23)</sup>。この試験法はCASSに比べて加速性に劣るものの、試験後の腐食形態は実環境のそれに似ており、再現性は良好な評価法と考える。したがって、サイクル条件、添加イオンの最適化により加速性向上が望まれるところである。

### 3. おわりに

自動車用アルミ合金製熱交換器がさらされる環境のうち、塩害、エンジン冷却液、結露を取り上げ、近年実用化されている防食技術および材料開発と、これら熱交換器材料の開発を支える基盤技術としての腐食評価法開発を概説した。

パワーソースが変わっても、自動車が人の移動媒体として存在する限り熱交換器の需要はなくなることはない。しかしながら、環境保全、軽量化といった熱交換器に対するニーズは今後ますます高まるであろう。高性能材料の開発はこれらニーズに材料面で応じるものであるが、その開発期間の短縮、実環境における品質や寿命の正確な評価、予測といった点では腐食研究の果たすべき役割は重要である。腐食評価法の開発、新しい防食技術の開発、実環境での腐食モニタリング、さらには腐食理論に基づくシミュレーション技術など、自動車用熱交換器材料分野の命題は多い。

<参考文献>

- 1) 渡辺靖彦, 杉山敬一: 自動車技術,49,[5](1995)5.
- 2) 磯部保明: 「地球環境を支援する自動車のアルミ化とLCA」, 軽金属協会(1998)p29.
- 3) 竹内桂三, 磯部保明, 外山猛敏: 軽金属,48(1998)446.
- 4) 腐食防食協会編: 「腐食防食データブック」, 丸善,(1995)p442.
- 5) 大塚雅彦: 自動車技術,39(1985)892.
- 6) 下河部龍治: 軽金属,41(1991)284.
- 7) 池田洋: 金属,66(1996)166.
- 8) 磯部保明: 材料と環境,44(1995)306.
- 9) K.Isikawa, H.Kawase, H.Koyama, Y.Hasegawa, K.Negura, and N.Nonogaki: SAE Tech. Paper, No. 910592 (1991)
- 10) R.A.Woods, A.C.Scott, and J.F.Harris: SAE Tech. Paper, No.910591(1991)
- 11) 浦本松信: 軽金属学会第39回シンポジウム(1991)29.
- 12) 正路美房: 住友軽金属技報,38(1997)169.
- 13) 当摩建: 軽金属学会第37回シンポジウム(1990)8.
- 14) 磯尾裕幸, 中山元, 明石正恒: 腐食防食'94講演集, 腐食防食協会(1994)349.
- 15) 黒田周, 当摩建: 軽金属,48(1998)282.
- 16) R.Krishnakumar, K.Kroetsch, and R.Ahrens: SAE Tech.Paper, No.980056(1998)
- 17) 伊東章郎, 岩井克夫, 長良敏夫, 宮木美光, 藤本日出夫, 瀧川淳: 軽金属,44(1994)246.
- 18) 加藤健志, 山内重徳: 住友軽金属技報,35(1994)67.
- 19) 上村富士雄 秋葉繁: CALSONICWORLD,4(1997)80.
- 20) 岡田光司, 荻原吉章, 竹内宏明: 軽金属学会第92回春季大会講演概要(1997)319.
- 21) 池田洋, 正路美房: 住友軽金属技報,35(1994)43.
- 22) 田中宏和, 池田洋: 軽金属学会第92回春季大会講演概要(1997)317.
- 23) Y.Isobe, K.Takeuchi, M.Tanaka, M.Mori, S.Yamauchi, and K.Namba: SAE Tech. Paper, No. 930149(1993)
- 24) S.Yamauchi, Y.Shoji, K.Kato, Y.Suzuki, K.Takeuchi, and Y.Isobe: SAE Tech. Paper, No. 930148(1993)
- 25) 正路美房, 田部善一: 住友軽金属技報,30(1989)8.
- 26) 服部武, 酒井茂男, 阪口幸浩: 軽金属学会第37回シンポジウム(1990)48.

<著者>



氏名: 磯部 保明  
 所属: 材料技術部  
 業務: 熱交換器用金属材料開発および腐食研究に従事. 工学博士



氏名: 竹内 桂三  
 所属: 材料技術部  
 業務: 材料開発および要素技術開発に従事.