アルミニウムによるラジエータの設計

下河部龍治*

The design of radiator with aluminum

Tatsuji SHIMOKAWABE*

1. はじめに

近年の車両動向からみた自動車用ラジエータへの設計要求を紹介し、世界的に普及しつつあるアルミラジエータの設計方法について述べる。

2. 近年の車両動向

これから数年の車両動向を車のクーリング性能に対し重要である項目について整理すると、次のように推測される。

① 地球環境保護への対応：排気ガス規制、北米を初めとする世界的な燃費規制、フロン規制、材料のリサイクル化。

② 車の高性能化：一部ではあるが大排気量エンジンの増大、DOHCの一般化、各種電気負荷の増大やパワステの一般化によるエンジンアイドル負荷の増大、車両の操安性・音振性能の大幅向上。

③ 交通事情の悪化（大渋滞の一般化）：日本の特殊事情として大渋滞での冷却性能確保が重要である。特にエアコン性能で不満が出ないようにコンデンサーの冷却に十分配慮が必要となる。また、エンジンルーム内の温度が上昇するため各種部品の耐熱耐久性の確保も大変重要となる。

④ 長寿命化要求：1年または2万kmから5年または10万kmへのメーカー保証期間延長。

⑤ 全世界での適合性要求：従来は世界統一仕様で同一の物を日本で生産し、完成車として輸出または現地ノックダウンとして生産することが主体であったが、現在は現地生産が主体に変わってきた。現地で採算性を維持するには現地部品の採用は不可欠である。このためには現地に適合した仕様で設計生産する必要があり世界を熟知することがこの面からも大変重要となってきた（図

1）。

以上の動向は今後の車両冷却性能に大きく影響する要因であり今後注目を続ける必要がある。また、この他に忘れてならないこととして一般ユーザーの車両に対する期待値の向上がある。ベテランドライバーの増大とこれに応えようとするカーメーカーの努力により急激に車両は変化してきた。この状況は今後もずっと継続するものであり、熱交換器や冷却システム開発の目標値を常に時代遅れにならぬよう見直すことが今まで以上に求められている。部品メーカーが単に部品としての研究をしていた時代はすでに終わり、自分の製品を含むシステムとして常に研究開発する必要がある、これができないメーカーは今後生き残れないであろう。

3. ラジエータへの要求性能

エンジンの高回転化および出力の増大、ターボ付ディーゼルエンジン等により車両走行によるエンジンの冷却水放熱量が増大する傾向にある。車両走行以外にオルタネーター、パワステポンプ等補機駆動の負荷も増大しエンジン発熱量増大の原因となっている。フロン規制によるコンデンサー放熱量の増大も冷却性能へ影響することが予測されている。また、車両空気抵抗係数（Cd）の低下およびスタイリング向上の要求からラム圧（走行風）は減少し、エンジンルームの過密化と重なりラジエータの通気性は低下している。これらの状況から一般的な設計手法として冷却ファンをモーター駆動するF.F車ではエンジン負荷が大きい登坂走行で電動ファンとラジエータを設計している。またF.R車はエンジン直付ファンを用いるのが一般的であり、この場合にはファンスピードはエンジン回転数で決まるので、エンジン回転の最も低いアイドルでファンとラジエータの大きさが決まってしまうことが多い。また、エアコン性能の成立、

* カルソニック(株)熱交換器設計部（神奈川県）。Heat Exchanger Engineering Dept., Calsonic Corp. (Aikoh-gun, Kanagawa)。

受理日：平成3年2月4日

図 1 社会情勢と車両動向

エンジンルーム内雰囲気温度の制御，エンジンやオートマチックトランスミッションの油温，燃費・動力性能等を総合的に考え冷却システムの開発が行われている（図 2）。

4. ラジエータ軽量化および長寿命化要求

燃費向上の手段としてまず部品の軽量化が考えられるが，AlはCuに対し約1/3の比重であり軽量化に有効である。アルミラジエータは従来の銅ラジエータに対し乾燥重量で約4割の軽量化を可能にした。今後燃費向上のため，さらに軽量化する必要がある小型化・材料の薄肉化等の軽量化をしていかざるを得ない。一方，メーカーの保証期間延長によりさらに信頼性向上および性能劣化防止に対し大幅な向上が要求されている。特に腐食による性能劣化の点では後述のように一般的には銅ラジエータが劣っており，アルミラジエータの耐食性が期待されている。以下，アルミラジエータの構造を簡単に述べ，放熱性能設計，アルミラジエータの耐食性設計および耐久強度について述べる。

Classification	Heat exchanger	Heat transfer
Engine cooling	Radiator	Water to air
	Engine oil cooler	Oil to air Oil to water
Power train	Automatic transmission oil cooler	Oil to water
	Differential oil cooler	Oil to air
Intake system	Inter cooler	Air to air Air to water
Air conditioner	Heater	Water to air
	Evaporator Condensor	Freon to air

図 2 自動車用熱交換器の種類

5. アルミラジエータの構造

フィン、チューブ、ヘッダープレートの部品で構成されている部分をコアという。コア両側にヘッダープレートとシールパックを介し固定されたタンクがある。シールパックはEPDMゴム、タンクはナイロン66にガラス30%を入れている（図3）。

ラジエータの基本機能は、冷却水を循環し、空気の通過により放熱することである。その他に注水口を使い冷却水の注水、ドレーンコックでの排水、シュラウド等部品のラジエータへの取付およびラジエータ自身の車体への取付等の機能がある。

図4に当社製アルミラジエータの材料構成を示す。フィン材に3003+Zn、チューブ材に3003を使い、フィンとチューブの接合には4343のろう材を使う。当社製銅ラジエータは、フィンに純銅に近いC1100+Sn、チューブに黄銅C2680+Pを使い、フィンとチューブの接合に異種金属の半田を使っている。熱伝導率でフィン材はアルミニウムが銅より劣るが、チューブ材とろう材はアルミニウムが優れている。強度は引張強さで比較するとアルミニウムはフィンで1/2、チューブで1/3であるが、ろう材は5倍である。したがってアルミフィンの板厚を銅より厚くすることで放熱性能の改良を計れる。また、アルミチューブの板厚を銅より厚くすることで強度を向上させている。

6. 放熱性能設計

一般的に熱交換器の放熱量は図5のように与えられ

図3 アルミラジエータの構造

る。放熱量を増加させるためには、(1)式の熱通過率 K を大きくする必要がある。この K 値は(2)式で示され、 K 値に対する寄与率は(2)式の第3項が90%を占めており、この項の空気側熱伝導率 α_a およびフィン効率 ϕ を改善することが効果的である。空気側熱伝導率 α_a を向上させるため、一般にコルゲートフィンにはルーバーが設けられているが、ルーバーの中の空気流れおよびルーバーから空気への熱伝導を解析し、ルーバーピッチ、ルーバー角度等の形状見直しをすることで放熱性能および通気抵抗の改善をすることができる。

フィン効率を改善するにはフィン材の熱伝導率の向上、フィン板厚を厚くする、フィン高さを低くする等が考えられる（図6）。フィン板厚を厚くしたりフィン高さを低くすることは、通気抵抗を大きくする要因にもな

種 類	部 材	導電率(%IACS) (熱伝導率*)	比重	引張強さ (kgf/mm ²)	溶融範囲 (°C)
アルミラジエータ	フィン (3003+1.5%Zn)	40~50 (0.37~0.46)	2.7	11.0	643~654
	チューブ (3003)	50 (0.46)	2.73	11.0	643~654
	ろう材 (4343)	40 (0.37)	2.7	(20以上)	577~615
銅ラジエータ	フィン (C1100+Sn)	86~90 (0.81)	8.9	23.8	1065~1082
	チューブ (C2680+P)	26 (0.28)	8.46	31.5	904~935
	半田 (Pb-35%Sn)	9.7 (0.09)	9.5	4.3	183~248

*(cal/°C·cm·s)

図4 ラジエータに使用される材料例と特性比較

$$Q = K \cdot A \cdot \Delta T \quad (1) \text{式}$$

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_w \cdot \frac{A_w}{A}} + \frac{d}{\lambda_t \cdot \frac{A_w}{A}} + \frac{1}{\alpha_a \left\{ 1 - \frac{A_f}{A} (1 - \phi) \right\}} \quad (2) \text{式}$$

$$\phi = \frac{\tan h \frac{2\alpha_a}{\lambda_f \cdot b} \cdot l}{\frac{2\alpha_a}{\lambda_f \cdot b} \cdot l}$$

Q : (W)	放熱量
K : (W/m ² K)	熱通過率
A : (m ²)	全放熱面積
ΔT : (K)	気水温度差
A_w : (m ²)	チューブ放熱面積
A_f : (m ²)	フィン放熱面積
α_w : (W/m ² K)	水側熱伝達率
α_a : (W/m ² K)	空気側熱伝達率
λ_t : (W/mK)	チューブ熱伝導率
λ_f : (W/mK)	フィン熱伝導率
d : (m)	チューブ板厚
b : (m)	フィン板厚
l : (m)	フィン高さ/2
ϕ :	フィン効率

図5 熱交換器の放熱量(Q)の算出法

り限界がある。車体フロントエンドやエンジンルーム通気抵抗とファンの能力によってラジエータの通過風量が決まるため、ラジエータの通気抵抗も低いほど実車では放熱性能が向上する。したがって放熱性能の他に経済性、ラジエータ重量も考えフィン板厚とフィン高さの最適値を検討する必要がある。

通気抵抗を下げる方法にチューブの扁平化がある。この場合チューブ管内流速が上がるので放熱性能も向上する。しかし、通水抵抗も上がり、エンジンヘッド等からの溶解物質によるチューブ目づまりも考えられるので、チューブの板厚の薄肉化およびチューブ本数を増やす等により、チューブ内断面積を増やす処置が必要である。チューブの薄肉化は、内圧強度、耐食性に影響するので、チューブ材の開発も必要となり、フィン材の熱伝導率の向上と共に今後の材料開発に大きな期待が寄せられている。

7. 耐 食 性

アルミ材の腐食形態は、一般的に孔食（ピッチングコ

図6 矩形フィンの板厚、材質とフィン効率

ロージョン) であることはよく知られている。これに対し銅は面食（サーフェスコロージョン）を示し、この2種類の材料腐食特性には大きな違いがある。

7.1 フィンの耐食性

フィンに対して銅の特性は、板厚減少を生じさせラジエータの性能の低下につながる。また、銅ラジエータはチューブとフィンの接合に半田を使用しているため、この半田の腐食によりフィンがチューブより早く離れ熱伝達を著しく低下させる。もちろんこのような現象は、特に腐食環境の厳しい場合に限られる。

これに対しアルミニウムでは上記環境においてフィンの腐食は遅く板厚減少はほとんどない。また、フィンとチューブはアルミニウムで接合されているため、はく離も発生しない。したがって性能の経時低下は銅に比べきわめて少ない。

図7は特に腐食環境の厳しい地域から回収したラジエータの性能低下を調査した結果であり、アルミラジエータの性能信頼性の高さを示している。

7.2 チューブの耐食性

チューブに対してアルミ材の孔食特性は、黄銅製チューブに対し板厚方向での速度は速く、チューブ貫通による水洩れが発生しやすいことになる。この水洩れは、即ラジエータの機能停止につながり車両が走行不能になってしまうため、最も設計上注意が必要である。また、チューブは内面（水側）と外面（空気側）の両面から同時に腐食が進行した場合でもラジエータとしての十分な強度を確保する必要がある。それらの問題を解決するのが最大の課題であり、我々は銅製ラジエータ以上のチューブ耐食性を有することを目標とした。

9

図7 ラジエータ性能と走行距離

7.3 アルミラジエータのろう付法

エバポレーター、コンデンサーで使われている材料構成は冷媒にフロンガスを使用しているため、内面に対する配慮はそれほど必要としないが、ラジエータの場合は冷却水（LLC）が管理されないという実態からむしろ最大の配慮が必要となる。

アルミコルゲートラジエータのろう付工法としてVB、FB、VAW、NB工法があるがVB、FB、VAWは、防食性が不十分であり、クロメート処理や電着塗装など行っているのが一般的である（表1）。

一方、NB工法は大気圧のN₂ガス雰囲気中でフラックスを使ってろう付を行うため、Znの蒸発飛散を大幅に押えることができ、防食の材料設計が容易である。ま

図8 フィンとチューブの電位差¹⁾

た、フラックスを使う為安定したろう付性が得られることおよび洗浄工程が不用であり品質、コスト面も有利である。

7.4 材料設計

NB工法の特徴を生かし、耐食面からチューブおよびヘッダープレートは、3層クラッド材とし、内面はAl-Zn合金の犠食腐食層、外面はAl-Si合金のろう材層から構成されている。またチューブの外面に対しては、フィン材にZnを添加することにより、フィン材を犠食腐食させチューブを保護している。図8および図9にチューブおよびヘッダープレートの材料構成を示す。このような材料構成にすることにより、他のろう付工法で行われているクロメート処理および塗装等の表面処理を行わなくても市場で十分な耐食性をもたすことができる。

(1) 内面（水側）の材料設計

表1 ろう付工法の比較

Brazing process		NB	VB			FB	VAN
Anti-corrosion surface treatment		Without	←	Chromic acid chromating	← + ED coating	ED coating	Phosphate chromating
Flux		Non-corrosive (K ₃ AlF ₆ -KAlF ₄)	Without	←	←	Corrosive flux (ZnCl ₂)	Without
Post-braze treatment		Without	←	←	←	Need	Without
Furnace	Atmosphere	Innert GAS (N ₂)	High vacuum (10 ⁻² ~10 ⁻³ Pa)	←	←	Air	Innert GAS (N ₂)
	Energy	Electric power	←	←	←	Gas or electric power	Electric power
Anti-corrosion	Outer surface	◎	△	○	◎	○	△
	Inner surface	◎	△	○	○	△	△
Product cost		○	○	△	×	△	○
Waste water treatment		○	○	△	△	×	○
Brazing		○	○	○	○	○	△
Total evaluation		◎	△	○	○	△	△

◎ : Very good ○ : Good △ : Not bad × : Bad

図9 ヘッダープレートの電位差¹⁾

エンジン冷却水に用いられている各地域の水質を調査した結果の代表例を図10に示す。調査地域は日本国内、北米、中近東、東南アジアで合計800地域より水道水、井戸水等を回収し分析調査した。アルミニウムの腐食要因は、数多く報告されているがラジエータが使用される環境では Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Cu^{2+} 、pHが主な要因と見なすことができる。調査結果では、日本の沖縄と中近東で Cl^- 、 SO_4^{2-} が多い。このように冷却水の水質が悪く、しかも防錆クーラント（LLC）をほとんど使用しない地域でも十分な耐食性を維持するため、水側にAl-Zn合金をクラッドし、芯材を保護している。

チューブ内面のAl-Zn合金層のZn濃度は図11に示す腐食試験結果より、素材で1%以上あれば面食状態となり防食効果があることが判明し1%と設定した。また、ろう付時のZn拡散深さは、ろう付性とろう付後の耐食性および犠牲腐食層が腐食した場合のチューブの残存強度から最大0.13 mmに規定した（図12）。

ヘッダープレートの内面は図13に示すように樹脂タンクとヘッダープレートとのシール部に構造上隙間部がで

Test specimen

Brazing

873 K×10 min

Test method

Dipping corrosion test
test period: 3 months図11 クラッド材のZn濃度と腐食深さ³⁾

きるため、冷却水が滞留し隙間腐食が発生することが知られている。隙間腐食を抑制するにはチューブ材と同様のAl-1%Zn合金のクラッドが有効であるが、さらに改良し、0.5%のMgを添加することにより腐食電位を約20 mV下げている。その結果を図14に示す。Mgの添加

図10 世界各地のエンジン冷却水・水質調査結果¹⁾

図12 ろう付後の Zn と Si 濃度変化

図13 樹脂タンクとヘッダープレートとのシール部構造 (隙間腐食)¹⁾

量は、1%以上でろう付性が悪化するため、0.5%とした。

(2) 外面 (空気側) の材料設計

ラジエータの外面の腐食環境を定量的に調査する方法としては当社は、各地域を走行したラジエータの付着物を調査することによって、その環境を推定した。図15にその結果を示す。海洋地域 (沖縄等) と融雪剤を使用している地域 (5大湖周辺等) で塩素イオン (Cl^-) 硫酸イオン (SO_4^{2-}) が多く検出された。これらの地域が最も厳しい腐食地域で自動車保有台数の多い地域と一致している (図16)。また、冬期の走行安全性向上のため、融雪剤の使用量は年々増加している (図17)。また、中近東では土壤に多くの Cl^- , SO_4^{2-} が含まれており他地域の2~3倍検出された。ラジエータの外面には、これらの腐食成分が付着する上、高温多湿地域は、昼夜の気温差により、結露状態が繰り返され、アルミ材料に対して、厳しい腐食環境となっている。

このような市場環境での防錆対策として、フィンにZnを添加し、チューブ外面を防食している。Znの添加量は、図18に示す試験結果より、1.5%以上で腐食深さが約100 μm で平衡状態となることから1.5%とし、フィン材としては、ろう付時のフィンの強度を考慮し、AA3003+1.5%Zn合金とした。

Test specimen

A: AA3003 ← Al+0.5% Mg+1.0% Zn

B: AA3003 ← Al+1.0% Zn

C: No clad (AA3003)

Test method

TEMP: 361 K × 8h × R.T. × 16h

図14 クラッド材の隙間腐食抑制効果³⁾ 図15 ラジエータ付着物調査結果¹⁾

7.5 腐食評価法と試験結果

アルミラジエータの耐食性評価として一般的に使われている CASS 試験, SST 試験は我々の調査では市場との相関が低く不適當である。そのため、ラジエータの内

図16 腐食環境と自動車市場⁴⁾ 図17 北米の融雪塩使用量⁵⁾

面と外面の腐食環境を前述のように世界の広範囲に渡って調査し、それぞれの環境に合わせた加速試験法を開発し評価している。

(1) 内面腐食試験結果

試験装置および試験方法を図19に示す。本装置はASTM基準に準じたものであり、実車に使われている部品で構成されている。腐食液は、世界各地の水質を調査し、最も悪い水（腐食性の高い水）よりも、さらに腐食促進性の高い水に調合されている。この腐食液をOY水と呼ぶが、ASTM水、GM水等と比べても腐食促進性が高くなっており、また市場での腐食形態をよく再現することが確認されている。

腐食試験結果を図20に示す。NB工法アルミラジエータは1か月後、チューブ内面の腐食深さはZn拡散最大深さ0.13 mmに対して約0.10 mmまで達するが、その後3か月まで腐食深さの増加は進まず、全面腐食形となり、6か月後板厚を貫通する孔食に達する。またVB工法にアルミラジエータは、腐食時間に対して、ほぼ直線的に腐食が進行して約3か月で板厚を貫通する。したがってNB工法アルミラジエータの寿命は、VB工法の約2倍となる。VB工法は真空中でろう付を行うため犠牲

図18 フィン材のZn濃度とチューブ腐食深さ³⁾ (試験方法I) 図19 内面腐食試験装置・方法¹⁾

図20 内面腐食試験結果

表 2 外面腐食試験法

Test method I	Test method II
Simulates areas where snow melting agents are used.	Simulates hot and humid areas with wide daily temperature fluctuation.
<div>Contents of a cycle</div> <ol style="list-style-type: none"> 1. Spraying 5% salt solution (308 K×4 h) 2. Drying (333 K×2 h) 3. Humidifying (323 K×95%×2 h) 	<div>Contents of a cycle</div> <ol style="list-style-type: none"> 1. Spraying the corrosive solution (323 K×15 min) 2. Humidifying (323 K×95%×30 min) 3. Drying (323 K×75 min)

図21 試験方法 I 結果

図22 試験方法 II 結果

図23 市場走行期間とチューブの外面腐食深さ

図24 市場走行期間とチューブの内面腐食深さ

腐食による防食に必要な Zn 成分が蒸発飛散し、防食が不十分となる。

(2) 外面腐食試験結果

外面腐食環境の調査結果より、市場環境に合わせた 2 種類の腐食試験法を開発した。試験方法を表 2 に示す。Test Method I は主に寒冷地における融雪剤地域をシミュレートしたものであり、Test Method II は、塩分が付着し高温多湿地域で結露が生じる環境をシミュレートしたものである。

図21および図22に試験結果を示す。いずれの結果もチ

ューブ外面の耐食性に関して犠牲腐食フィンの腐食抑制効果は、NB 工法アルミラジエータに効果的に働いていることを示している。

7.6 市場回収品調査

世界各地から市場走行品を回収し、市場における耐食信頼性を確認した。図23および図24に回収品の調査結果を示す。調査結果より、腐食環境の厳しい各地市場での腐食深さは、いずれも内面の Zn 拡散層内であり、また外面においてはフィンの犠牲腐食効果により、チューブの腐食は 0.10 mm 以内であった。

図25 ラジエーターに入る外力

8. 耐久強度

自動車の走行によって、ラジエーターに働く外力は、路面の凹凸による振動入力、冷却水系の圧力、冷却水の温度変化による熱衝撃などがあるが、これらの外力に対するアルミラジエーターの設計方法について述べる（図25）。

ラジエーターには路面振動による50 Hz以下の振動入力が多い。2～5 Gも加速度が加わる車両では、ラジエーターの取付方法によってはチューブに疲労限界以上の応力が発生する恐れがある。また、ラジエーターを取付ける車体側の変形は大変複雑であり、チューブにねじれ応力の発生も考えられるのでソフトマウントで取付けすることが好ましい。また縁石乗り上げ時に衝撃力が入り、チューブにき裂が発生することもありラジエーター全体の剛性確保が大切である。

冷却水の温度膨張による圧力（系統圧）とウォーターポンプの吐出圧によってラジエーター入口に圧力がかかる。エンジンの始動停止と走行時のエンジン回転の変動で、ラジエーターに繰返し内圧がかかる。特にラジエーターキャップがラジエーター以外に取付けられている場合はエンジン回転数により圧力が変動するので注意を要する。アルミラジエーターはチューブとフィンのろう付やチューブとヘッダープレートのろう付に半田より強度が優れているアルミニウムを使っているため、繰返しにかかる内圧

には銅ラジエーターより耐久性があるのが一般的である。

サーモスタット開閉によりエンジンから急激に温水がラジエーターに入ってくると冬場ではラジエーター最外端のチューブとレインフォース間に温度差が発生し最外端のチューブのヘッダープレートとの付根に熱膨張による応力集中が発生する。特にエンジン出口側にサーモスタットがある場合、サーモスタットがハンチングし易く、ラジエーターに大きな熱衝撃を加える。（サーモスタットがエンジンの入口側にある場合このハンチングはほとんど発生しない）。サーモスタットの中にはハンチング防止のため特殊な工夫が施されている物も多くあるが、ラジエーター自身でも各種工夫により応力集中を避けている。

9. おわりに

NB工法による当社開発のアルミラジエーターは、アルミ材の腐食機構を考慮した新材料の採用により、複雑な世界各地のラジエーターを取り巻く環境に十分耐えられることが、1983年の生産開始以来約1千万台の生産実績によって実証されている。

また、エンジン冷却系に使用される他の熱交換器（ヒーターコア、トランスミッション等各種オイルクーラー）のアルミ化も急速に進められている。しかし銅・黄銅製熱交換器で材質、工法等の改善が行われており、熱交換器の今後のアルミ化拡大のためには、尚一層の材料、工法開発および冷却システム開発を行う必要がある。特に材料開発が性能・重量・コスト等多面からのニーズが高く不可欠のものであり材料メーカー各位と一層の共同研究を進めて行きたいと考えている。

参考文献

- 1) 野澤：国際シンポジウム「自動車部品へのアルミ材料の利用」。
- 2) 改訂自動車用ラジエーター，日本自動車部品工業会，P50。
- 3) Y. Ando, et al: S.A.E Technical Paper 870180, (1987)。
- 4) 沼田：自動車技術，39 (1985)，NO. 4, 340。
- 5) 持館：防食技術，38 (1989)，NO. 12, 665。