解 説

アルミニウムのろう付

川瀬 寛*

Aluminum brazing

Hiroshi KAWASE*

1. はじめに

アルミニウムは、その表面に生成する酸化皮膜が強固で、ち密なため一般にはろう付が困難とされていた。

しかし、酸化皮膜を除去、破壊する手段として、フラックスが開発されてから、ろう付技術が工業的にかなり応用されるようになった。当初は、航空機エンジンのオイルクーラー等、特殊分野に応用されていたが、その後自動車、その他車両関係の熱交換器、主としてクーラー用として利用されるようになってから飛躍的に伸びたことはいままでもない。

近年では、真空中あるいは窒素ガス雰囲気中でろう付する、いわゆるノンフラックス法や、これらの雰囲気と少量の非腐食性フラックスを組合せた特殊なろう付法が開発されるに至り、ますます多くの分野で実用化されている。

本稿では、現在自動車用熱交換器の大量生産に最も貢献している、ろう付プロセスを中心として、その技術、応用例について解説する。

2. ろう付の分類

アルミニウムのろう付は、厳密にいうと表1に示すご

とく、接合温度とろう材の種類によつて2種類に分類される。Zn, Sn, Pb等の低融点金属をろう材とする場合には「軟ろう付」、Al-Si系合金をろう材とする場合には、「硬ろう付」と称し、一般には前者を「はんだ付」後者を「ろう付」と呼ぶ場合が多い。

本解説では、以下一般的呼び方を採用することにし、Al-Si系をろう材とする「ろう付」についてのべるこ

図1 アルミニウムろう付法の分類

表1 アルミニウムの各種接合法の比較

接 合 法		接合温度 (°C)	アルミニウム母材の溶融の有無	ろ う 材	
日本語名	英 語 名			成 分	母材との融点差
軟 ろ う 付	SOLDERING	420°C以下	無 し	Zn, Sn, Pb, Cd	大 き い
硬 ろ う 付	BRAZING	420°C以上	無 し	Al-Si(Mg, Bi, Zn)	中 位
溶 接	WELDING	660°C以上	有 り	Al, Al-Si, Al-Mg	小 さ い

注：『軟ろう付』を『はんだ付』と呼ぶ場合は、『硬ろう付』を単に『ろう付』と呼ぶ。

* 古河アルミニウム工業(株) (東京都)。Furukawa Aluminum Co., Ltd. (Tokyo)。

受理日：昭和61年5月9日。

にする。

ろう付の方法には、図1に示す多くの種類があるが、自動車熱交換器の製造に利用されている方法について、その歴史と用途例を図2に示す。

これらのろう付方法と、それによつて得られた熱交換器は、次のような特長を有しているため、最近ではかなり広い分野に応用されている。

- 1) 多くの接合部を有した複雑な構造の物を容易に接合できる。
- 2) ほとんど熟練を必要としない。
- 3) 連続炉を用いることで、大量生産が可能である。
- 4) 高強度熱処理合金の接合が可能である。
- 5) 薄肉材でもコルゲート状に加工すると接合が容易にできる。
- 6) 接合物の熱伝導性が良いため、熱交換特性の良い熱交換器を設計できる。
- 7) 接合部の応力分布が良好なため疲労強度が高い。

3. ろう付用アルミニウム合金

アルミニウム合金は、非熱処理系(1×××, 3×××, 4×××, 5×××)と熱処理系(2×××, 6×××, 7×××)に分けることができる。前者の中でろう付用母材として適しているのは1×××系(純Al)、3×××系(Al-Mn合金)あるいは5×××系(Al-Mg合金)のうちMg添加量の少ない合金である。

Mgが多くなると酸化皮膜が厚く成長しやすく、その影響で、ろうの濡れ性を低下させることがある。

後者の中では、6×××系(Al-Mg-Si合金)が一般的に使用されている。2×××系(Al-Cu合金)は融点が低くなるのでろう付には適さない。7×××系(Al-Zn-Mg合金)の中では、融点の比較的高い合金が強度を必要とする部品、例えばユニオン、ナット等のコネクター部品に用いられている。表2に、アルミニウム合金のろう付性と熔融温度範囲をそれぞれ示す。フラックスを用いるろう付の場合で、ランクAおよびBの合金は問題なく使用されている。

ろう付法		年度	昭和	35	40	45	50	55	60	現在
フラックス	トーチ									
	浸漬									
	炉中									
	乾燥空気炉中									
	ノコロック									
フラックスレス	高真空									
	低真空									
	V A W									

図2 アルミニウムろう付法の歴史

表2 アルミニウム合金のろう付性

合金	ろう付性	熔融温度範囲(°C)
1050	A	646~657
1100	A	643~657
2014	D	510~638
2017	D	513~641
2024	D	502~638
3003	A	643~654
3004	B	629~654
5005	B	632~654
5050	B	624~652
5052	C	593~649
5083	D	579~641
5056	D	568~638
5154	C	593~643
6061	B	593~652
6N01	B	615~652
6063	A	616~654
6151	B	588~649
6951	A	616~654
7003	B	615~650
7075	D	477~635
7N01	B	607~646

注：A ろう付性は良好である。

B ろう付性はAよりやや劣る。

C 予備試験で適当な条件を決める必要がある。

D ろう付は勧められない。

ただし、Mgが0.8wt%以上添加されている3004、5050、7N01などはノンフラックスろう付、例えば真空ろう付や最近開発された非腐食性フラックスろう付には適さない。

ろう付に用いるろう材はAl-Si系合金で、それ自体単独で、線あるいは板として使用する場合と、3003あるいは6951等のアルミニウム合金を芯材として、これにクラッドするブレイジングシートとして用いる場合がある。

ろう材は、その種類と記号がJIS(Z-3263)で規格化されており、主としてBA4045と4047がトーチろう付用として用いられている。

母材の種類に対して、適正なろう材の選択とろう付温度については、図3を参考にすればよい。ただし、ここでろう材4245(Al-10Si-4Cu-10Zn)は、1980年度改訂のJISから除外された。

ブレイジングシートは、写真1に示すように、ろう材が全板厚に対して5~15%の比率でクラッドされており、芯材と皮材とは完全に金属接合されている。

ブレイジングシートの種類と記号、化学成分、機械的性能等は規格化されているのでJIS Z-3263を参照されたい。

図3 アルミニウム母材の固相温度および適正ろう付温度に対応するろう材

写真1 ブレージングシートの断面

表3 6951の機械的性質

時効条件	引張強さ (kg/mm ²)	耐 力 (kg/mm ²)	伸 び (%)
な し	12	6	23
室 温 3 日	21	9	22
室 温 1 カ月	22	10	20
120°C, 300時間	28	22	20
150°C, 100時間	28	24	16
180°C, 10時間	29	23	14

4. 高強度のろう付合金

非熱処理系材料をろう付に用いると、焼鈍された状態になり引張り強さは9～13 kg/mm²になる。

前にのべたように熱処理系(6×××, 7×××)のあるものは、ろう付温度(約600°C)から適切な冷却工程をとることによって容易に溶体化され、さらに自然時効あるいは人工時効することによって高い強度が得られる。

6×××系については6063, 6951および6061がろう付用として使用可能であるが、なかでも6951は溶融温度が他に比べて高く、ろう付性も良好である。

6951をろう付温度の600°Cで10分間加熱し、空冷後それぞれの条件で時効硬化させた時の機械的性能を表3に示す。室温時効1カ月で約22 kg/mm²の引張強さを示し、非熱処理材に比べて約2倍の強度が得られる。

ただし、6951の固相線温度は約616°Cで、これは一般に使われている1100や3003の固相線温度より20°C以上低いので、ろう付温度の管理が重要である。

6×××系よりさらに強度が高い合金として7×××系があるが、一般には融点が低く、ろう付には適さない。

しかし、その中でも7N01と7003は固相温度が607°C以上であるから、ろう付温度を605°C以下で管理できれば十分に使用可能である。固相線を越えた温度でろう付すると、外観は一見変化がないようでも、ミクロ組織をよく観察すると写真2に示すような粒界が溶融する、いわゆるバーニング現象を起こす。

7N01の特徴は、ろう付後の焼入性が6×××系よりもさらに優れており、その後の自然時効により強度が非常に高くなることである。

7N01を590°Cで5分間加熱し、空冷後それぞれの方法で時効硬化させた時の機械的性能を表4に示す。このデータからわかるように7N01はろう付加熱後に特別な熱処理をしなくても、ある期間たつと強度が高くなるという特徴を有するので、写真3に示すようなカークーラー用配管継手に多く利用されている。

ただし、この合金をろう付して使用する場合、使用時に引張応力が掛かり、しかも厳しい腐食環境にさらされると写真4に示すような応力腐食割れが生ずる場合があるので十分注意しなければならない。その対策としては、ろう付後徐冷するとか、使用時に引張応力が掛からない構造にするとか、あるいは部品を塗装し腐食環境を

写真2 ろう付時オーバー加熱した7N01のマイクロ組織
(粒界の溶解現象→バーニング, $\times 160$)

表4 7N01と6061の時効後の機械的性質

合金	時効	引張強さ (kg/mm^2)	耐力 (kg/mm^2)	伸び (%)
7N01 ⁽¹⁾	なし	20	8	26
7N01 ⁽¹⁾	室温 3 日	29	15	22
7N01 ⁽¹⁾	室温 7 日	32	17	22
7N01 ⁽¹⁾	室温 1 カ月	34	19	21
7N01 ⁽¹⁾	室温 3 カ月	36	21	21
7N01 ⁽¹⁾	室温 6 カ月	38	22	21
7N01 ⁽¹⁾	T 6 処理	36	33	13
7N01 ⁽²⁾	T 6 処理	38	33	13
7N01 ⁽³⁾	T 6 処理	32	24	14
6061 ⁽¹⁾	T 6 処理	18	8	17
6061 ⁽²⁾	T 6 処理	34	29	12
6061 ⁽³⁾	T 6 処理	13	6	20

(1) $15\sim 30^\circ\text{C/min}$ の速度で空冷

(2) 22°C/sec の速度で水冷

(3) 0.6°C/min の速度で空冷

写真3 カークラーの配管部品

写真4 7N01 の応力腐食割れの断面マイクロ組織($\times 40$)

しや断するとかの方法がとられている。

5. ろう付方法

5.1 フラックスろう付

アルミニウムのろう付を成功させるためには、いかに酸化皮膜を破壊、除去し、ろうの濡れ性を良くするかにかかっている。それにはフラックスが最も効果的である。

フラックスは、一般的には塩化物が主体であるが、最近では、弗化物単独というフラックスも現れてきた¹⁾。

塩化物系主体のフラックスは、吸湿性と腐食性が強いいため、ろう付後速やかに除去しなければならない。

一方、弗化物単独のフラックス、たとえばAICANが開発したフルオロアルミン酸カリウム塩(主成分 KAIF_4)は、ろう付温度においてのみ活性となり、アルミニウム表面の酸化皮膜に対して有効に作用するものである。

しかも常温で吸湿性と腐食性が全くないため、塩化物系フラックスのように、ろう付後これらを除去する必要がない点が大きな利点である。

次にろう付方法について具体的に説明する。

トーチろう付は、図4に示すようにトーチバーナーにより、継手部分を加熱してろう材を熔融し接合する方法で、先の写真3に示した小物部品あるいは熱交換器の補修などに利用されている。フラックスは水に溶いてペースト状(70 wt%溶液濃度以上)で使用するが、ろう付後は湯洗、酸洗等の後処理を行い完全に除去しなければならない。

浸漬ろう付は図5に示すように熔融フラックス中に組立品を浸漬することによって接合する方法で、他のろう

図4 トーチろう付

図5 浸漬ろう付

図6 炉中ろう付

写真5 炉中ろう付で接合したコンデンサーコア

付に比べて最もろう付性が良いとされている。

この方法は産業プラントの大型熱交換器の接合や導波管など通信機器部品、また自動車用熱交換器としてはクーラーのドロンカップ型エバポレーターのろう付に利用されている。

炉中ろう付は、図6に示すようにフラックス溶液(50～70 wt%)を接合部品全面に塗布した後、空気炉中で加熱することにより接合する方法で、これは大量生産に達している。

この方法では、写真5に示すようなカークーラーコンデンサーが多量に作られている。コンデンサーは一般に押出多孔チューブ(1050)、プレージングシート(BA12)のフィン、パイプ(3003)そしてハーフユニオン(7N01)から構成されている。

Alcoa 393 プロセスとして知られている低露点ろう付は、半密閉タイプの炉を用い、これに乾燥空気を導入し、 H_2O や O_2 など、ろう付に悪影響を与える酸化性ガスをできるだけ少なくして、ろう付性の向上を図る方法である。このような状態でろう付する場合には、一般の炉中ろう付で用いるフラックス量の1/5以下でろう付可能である。図7に炉内の露点とフラックス濃度との関係を示す²⁾が、実際には露点を $0^\circ C$ 以下に管理し、フラックス濃度40～50 wt%で量産するのが現実的である。

一方 Alcan Nocolok プロセスとして最近注目をあびているろう付は、 N_2 ガスで炉内を非酸化性にし、フラックスとして少量のフルオロアルミン酸カリウム塩を用いることに特徴がある。

フラックスは、水に溶かしスラリー状にして、部品に付着させ用いるが、これらを完全に乾燥した後で炉に装入しなければならない。フラックスの実際使用量は3～10 g/m²で、ろう付後残渣として残つても、外観的にはほとんど目立たない。しかも吸湿性がなくアルミニウムを腐食させないので後洗浄をする必要がない。

フラックスを用いる炉中ろう付法の工程上の比較を表5に示す。Alcan Nocolok 法はフラックス使用量が少ないこと、かつその残渣を除去する必要がないので、排水公害の問題も無く、今後の有望プロセスとして期待されている。

ただし、Mg 含有量が1%以上のアルミニウム合金を用いる場合、ろう付性が劣るという欠点があるので、今後この点の改良が望まれる。

5.2 フラックスレスろう付

フラックスは、それ自体高価であることと、フラックスの洗浄工程や、その排液処理が避けられないなどの問

図7 フラックス濃度と露点との関係

題が多い。そのためフラックスを使わないろう付法が積極的に研究されて、現在では真空ろう付法と N_2 ガス雰囲気中によるろう付法（例えば VAW 法）が実用化されている。

真空ろう付法は、真空炉が非常に高価であるが、次のような長所があるので、製造コストは一般の炉中ろう付法に比べて低くなるといわれている。

- 1) フラックス塗布、後処理工程を省略できる。

- 2) 炉および治具類の寿命がのびる。
- 3) 残留フラックスによる腐食問題が解消される。
- 4) 作業環境が良好である。
- 5) ドロンカップのように複雑な熱交換器のろう付に適している。
- 6) 大気、排水の公害処理設備を必要としない。

真空ろう付のプロセスは、ゲッター材として Mg を利用すること、その効果を最大限発揮させるためとアルミニウム表面の酸化を防止するために真空炉を用いる以外はフラックスろう付プロセスと大きな違いはない。

真空炉は種々の型式があるが、一般には真空を保持できるような剛性を有する真空室、排気装置、加熱部と電源、温度制御装置、真空密封用シール（仕切弁）などからなっている。

真空ろう付炉は、その構造、型式などによっていくつかのタイプに分けられるが、大まかには次のように分類される。

① 炉の形態による分類

- 縦型炉……バッチタイプの炉が多い
- 横型炉……タクトによる連続が可能

② 圧力による分類

- 高真空 ($\leq 10^{-4}$ Torr)
 - 高真空炉
 - 高真空キャリアーガス炉

表5 ろう付法の工程比較

工 程	炉中ろう付	Alcoa 393	Alcan Nocolok
素材 ↓ 加工 ↓	ろう付用アルミニウム合金各種材料	ろう付用アルミニウム合金各種材料	ろう付用アルミニウム合金で Mg 含有量が 1% 以下の各種材料
組立 ↓ 脱脂	溶剤・アルカリクリーナー・弱アルカリクリーナー脱脂で可能	溶剤・アルカリクリーナー・弱アルカリクリーナー脱脂で可能	溶剤・アルカリクリーナー・弱アルカリクリーナー脱脂で可能
フラックス塗布 ↓	水に若干溶解 スラリー状 50～60%	水に若干溶解 スラリー状 10～20%	水に不溶解 スラリー状 5～10%
乾燥 ↓	水分除去省略可能	水分除去必須 150～200°C	水分除去必須 150～200°C
ろう付（雰囲気： ↓ 露点： 温度：）	：大気中 ：— ：605±5°C	：乾燥空气中 ：-20±10°C ：605±5°C	： N_2 ガス中 ：-40±10°C ：600±5°C
フラックス洗浄 ↓	湯洗→水洗→酸洗→水洗	湯洗→水洗→酸洗→水洗	不要
表面処理 ↓	防食処理不要 ¹⁾	防食処理若干必要	防食処理必須

¹⁾ フラックスからの Zn 拡散のため

- 低真空 ($>10^{-4}$ Torr) { 低真空炉
低真空キャリアーガス炉

ここで、高真空炉と低真空炉の違いは排気系によるもので、 10^{-4} Torr 以下の圧力を得るためには、機械式ポンプの他に、油拡散ポンプの併用が必要となる。

低真空炉は通常、機械式ポンプだけで排気し、 10^{-2} Torr 程度の圧力である。

③ 加熱方式による分類

- 外熱型炉……発熱体が真空室の外側周囲にある
- 内熱型炉……発熱体が真空室内にある

外熱型炉は真空室をとり囲むように発熱体が配置され、熱は真空室の壁を通してワークに伝わるため、熱壁 (Hot Wall) 型炉ともいう。

内熱型炉は、真空室の内部に発熱体が配置されており、発熱体からの熱が直接ワークに輻射、伝導するので温度の応答性が速い。この熱輻射はワークだけでなく、周囲の炉壁にも及ぶため、発熱体と炉壁の間にモリブデン、ステンレス鋼などによる反射板 (リフレクター) が設けられており、炉壁が昇温することはない。そのため、この型式の炉を冷壁 (Cold Wall) とも称している。

このように真空炉にはいろいろな種類があるが、現在自動車用熱交の量産には、内熱型の半連続タイプが多く使われており、高真空でろう付するのが一般的である。

ただし、フィンとチューブの簡単ならう付や、犠牲陽極材に添加してある Zn の蒸発を抑制したい場合には、低真空キャリアーガス炉が用いられている。

先にのべたように、ゲッター材として Mg は、粉末の状態で炉内に置く場合と、ろう材の中に添加する場合があり、実際には後者がほとんどである。

ただし、炉の状態によつては、Mg 粉末の投入も併用されることがある。

Mg は Al よりも酸化しやすく、かつ蒸気圧が高い金属なのでろう付温度直前で蒸発し、母材やろう材表面をおおっている酸化皮膜を破壊したり、雰囲気中の微量水分あるいは酸素分子を除去する。これをゲッター効果と称し、Terrill は次の反応式を提案した³⁾。

質量分析計で測定した我々の結果⁴⁾を写真 6 に示すが、 550°C 付近からろう材中の Mg が急激に蒸発し、上記 (1), (2) の反応が起こることを確認している。ろう材に添加する Mg は 0.5~2.0 wt% が標準であるが、その添加量とろう付性との関係を図 8 に示す⁵⁾。Mg 添加ろう材は JIS で規格化されており主としてブレージングシートのろう材として利用されている。

これらブレージングシートを用いて真空ろう付法で組

図8 Mg 添加量がろう付性におよぼす影響
(ろう付条件: 真空度 10^{-4} Torr
温度 615°C
時間 11分)

写真6 質量分析計による Mg 蒸発挙動

写真7 真空ろう付で接合した自動2輪用ラジエーター

立てたラジエーターの一例を写真7に示す。

次に N_2 ガス雰囲気でのろう付については、現在実用化されているVAW法を例として説明する。

この方法の基本はろう材のぬれ性および流動性を向上させるためAl-Siのろう材に、ごく微量の特殊元素（例えばBi, Be, Sb, Baなど）を適度に添加し、熔融ろうの表面張力やろうの濡れ性を良好にし、 N_2 ガス（他の不活性ガスでも可）雰囲気中でろう付することを可能にしたものである⁶⁾。このろう付法のポイントの1つは、材料の前処理である。通常の圧延材では、その表面にろうの濡れを阻害する酸化皮膜が存在するが、フラックスろう付ではフラックスの作用、真空ろう付ではMgのGetter効果によって皮膜は破壊、除去されるが、このプロセスでは人工的に除去してやる必要がある。

酸化皮膜の除去には化学的な方法（エッチング）および機械的な方法があるが、一般には前者が用いられる。

第2のポイントはろう付雰囲気管理である。基本的には露点 $-65^{\circ}C$ 以下、酸素濃度5 ppm以下が必要であり、このような非酸化性雰囲気としては不活性ガスが適切で、工業的には最も安価な N_2 ガスが用いられる。

上記の雰囲気管理については、量産では炉の管理、投入材料やそれに使う治具等に付着する水分管理などを徹底して行わなければならない。

ただし、この方法の利点は真空ろう付の輻射とは加熱方式が異なり、主として対流によるものであるから、昇温が早く、しかもファンによる攪拌が可能のため、温度分布を均一にできるといわれている。

その他、不活性ガス雰囲気ろう付法には、KD206法や、素材にあらかじめニッケルメッキを施して行うBorg-Warner法が開発されたが、いずれも実用化はされていない。

5.3 その他のろう付

特殊なろう付方法として図1にも示したが、自動フレ

写真8 Uベント部のはんだ付

ーム法、誘導加熱法、ブロック加熱法、熔融ろう浸漬法などがある⁷⁾。

誘導加熱法は、ガスの炎を用いることなくして、局部的に加熱できるのが長所で、しかも急速加熱が可能である。接合部の周囲に高周波誘導コイルを配置し、その磁場から誘導されて渦電流が接合部に生じ、それ自体が発熱しろう付される。

熔融ろう浸漬法は、あらかじめ接合部にフラックスを塗布し、水分を完全に蒸発させた後、熔融させたろう材中に浸漬することによりろう付する方法である。

その他、はんだ付の分野に入るが、自動車熱交の接合に多く利用されているZn主成分の高温はんだについて若干説明する。パイプと薄板のフィンからなり、拡張によってパイプとフィンを機械的に接合する熱交換器は、Uベントの部分をZn主成分のろう材（例えば95Zn-5Al）を用い写真8に示すようにはんだ付を行う。この時用いるフラックスは $ZnCl_2$ を主成分とするものであるが、フラックスを用いない方法としては図9に示す超音波を用いる方法もある。

超音波振動によるキャビテーション現象によって、酸化皮膜を破壊、除去し接合するものである。この方法はかなり有望なプロセスと期待されていたが、日本ではほとんど実用化されていない。その理由はキャビテーションによってステンレスのポットが侵食されたり、超音波の振動子自体の寿命も短いなど、大量生産には向かなかったものと思われる。

一方、 $ZnCl_2$ を主成分とした反応フラックス法が自動

図9 超音波はんた付装置

車熱交換器の量産に実用化されている。これは米国の Modine 社が開発した方法で、押出チューブとコルゲートフィンからなる最も簡単な構造に適している。材料的にはブレージングシートを使わなくてよいことが最大の長所である。プロセスとしては、 ZnCl_2 を主成分とするフラックスと Zn 粉末をケトン類の有機溶剤と混合し、その中に接合しようとする熱交換器を浸漬する。これを 500°C 位の炉に装入してやると次式の反応によつて

Zn が析出し、これがろう材として接合部を形成する。実際には上の反応だけではろう材の絶対量が不足するので Zn 粉末を添加して不足分を補っている。

5.4 異種金属とのろう付

アルミニウムと他金属をろう付するには、特別な前処理を必要とする。例えばアルミニウムと鉄とのろう付は、鉄側にニッケルメッキあるいは亜鉛やアルミニウムを溶融メッキすることにより可能である。あるいはろう付雰囲気を不活性ガスか真空にすることにより鉄の酸化を防ぎ、ろう付が可能となる。写真9にブレージングシートと鉄製チューブのろう付例を示す。これは N_2 ガス雰囲気で行ったもので、ろうの流動が非常に良好である。

その他の金属についても鉄と同様に適切な条件下であればろう付可能な場合があるので、これらの条件をまとめて表6に示す。ただし、これらは実際の使用時に当つて、接合部で電食が起りやすいので塗料あるいは絶縁物皮膜等で保護する必要がある。

6. ろう付熱交換器の耐食性

カーエアコンのコンデンサーを例にとつて現状の耐食性について説明する。

写真9 冷蔵庫用エバポレータープレート

表6 アルミニウムと他金属とのろう付

金 属	ろう付性 ¹⁾	備 考
鉄, 鉄合金	A	鉄にニッケルめっきあるいは、アルミニウムの溶融めっきを行えばよい
ニッケル, インコネル	A	アルミニウムと直接にろう付可能
チ タ ン	A	アルミニウムの溶融めっきを行えば可能
ベリリウム	B	アルミニウムのろう材を用いて直接ろう付可能
モ ネ ル	B	直接ろう付可能であるがもろい合金層が生ずる
銅, 真ちゅう	C	困難である
マグネシウム	D	接合部にアルミニウム-マグネシウムのもろい合金層が生ずる

A : ろう付性は良好である。

B : ろう付性は A よりやや劣る。

C : 予備試験で適当な条件を決める必要がある。

D : ろう付けは勧められない。

コンデンサーは、写真5に示したように純アルミの押出チューブとブレージングシートのフィンから成っており、その接合部近傍は図10の左のように孔食が発生しやすい⁸⁾。すなわち、接合部近辺の電位関係を調べると図の右のように、チューブの1050がアノードとなり溶出やすくなるのがわかる。この対策としては、チューブの材質を電位の高い3003や Al-Cu 系の合金に変えることと、フィンに Zn, Sn あるいは In などの元素を添加して、電位を下げフィン側をアノードとすることが考案され、実際にこれらが試みられている^{8), 9)}。しかし、フィンから離れた部分は、電流が届かずその効果が十分に得られないことがある。

ところで、 ZnCl_2 を含有するフラックスで炉中ろう付したコンデンサーは、全面腐食となり、ある期間内では孔食とならないため、フレオンが漏れて機能が停止してしまうというクレームはほとんど起つていない。これは

図10 ろう付熱交換器

図11 50 wt%溶液のフラックス (FL3) を用いてろう付したコンデンサチューブにおける Zn 拡散状態

ろう付時に ZnCl_2 がアルミニウムと反応して、表面に Zn が析出すると同時に、図11のように Zn 拡散層が生成し、この層がアノードとなつて優先的に腐食するためである¹⁰⁾。このように炉中ろう付は、適正なフラックスとその使用量（濃度）を選定すれば、厳しい腐食環境下に置かれても全面腐食となり、熱交換器で最も問題となる孔食の発生が起らないという利点がある。そのため今でもコンデンサーやラジエーターのろう付法として利用されている。

最近では、チューブに Zn メッキをあらかじめ行い、非腐食性フラックスでろう付する方法が開発され¹¹⁾、上記の炉中ろう付に替ろうとしているが、Mg を含むアルミニウム合金のろう付性が悪いという問題点が残されている。

以上、耐孔食性の点でも、各ろう付法とも一長一短があるが、今までのべてきた各種ろう付法の中でも、今後とも自動車用熱交換器の製造に利用されていくと考えられる4種類のろう付法の比較をまとめて表7に示す。

7. おわりに

自動車用熱交換器の製造には、アルミニウムとそのろう付法はなくてはならない技術となつている。

しかし、ろう付法には各種の方法があり、それぞれ一長一短があるため、いまだ一本に統一できないのが現状である。これは日本だけではなく欧州も全く同じような状況であり、最近では真空ろう付に固執していた米国ですら、他のプロセスの研究を盛んに行つている。

ただ今後自動車熱交換器の最後の砦であるラジエーターを本格的に採用しようとするには、今までの技術を踏まえ低コストの材料を用いた、低コストのろう付法の開発が必要と思われる。なぜならば、ラジエーターのアルミ化はコスト面、性能面で既存の銅ラジエーターとの競争になるからである。日本では、銅ラジエーターのコスト低減に対する研究がかなり進んでおり、簡単にアルミ化をゆるささない状況にある。このような状況下でアルミ化を推進させるためには、今までのように素材メーカー

表 7 各種ろう付法の比較

	フラックスろう付法		フラックスろう付法	
	炉中ろう付	Nocolok ろう付	真空ろう付	VAW ろう付
ろう材 (ブレージングシート の皮材)	Al-Si 系合金	Al-Si 系合金	Al-Si-Mg 系合金	Al-Si 系合金 (微量 Bi, Be 添加)
材料適用範囲	特に制限無し	Mg 含有量 0.5% 以下	Zn, Mg の蒸発に注意	若干 Zn は蒸発する
ろう付炉 (設備費)	空気炉 (安価)	雰囲気炉 (安価)	真空炉 (高価)	雰囲気炉 (中間)
炉の管理, 維持, 補修	面倒 (フラックスによる腐食)	容易	面倒 (リーク問題 Mg の除去等)	比較的容易
昇温速度 (加熱方式)	速い (対流)	速い (対流)	遅い (輻射)	速い (対流)
前 処 理	脱脂 → (エッチング) ^{a)}	脱脂 → (エッチング) ^{a)}	溶剤脱脂	脱脂 → エッチング ^{b)}
後 処 理	湯洗 → 酸洗 (フラックス除去必要)	不 要	不 要	不 要
許容クリヤランス	大きい	大きい	小さい	やや小さい
ろう付性	良 好	良 好	やや悪い	やや悪い
ろう付コスト	高 価	安 価	中 間	安 価
公 害 問 題	フラックス除去時の排水処理	前処理時の排水処理	有機溶剤の排気処理	前処理時の排水処理
最大の持長	Zn 拡散層による耐孔食性良好	ろう付品質が良好	作業環境良好, 工程短縮	Zn の蒸発が少ない
そ の 他	フラックスが高価で使用量多い	一定サイズの多量生産に向いている フラックスは高価だが使用量少ない	バッチタイプの真空炉は多目的, 多品種少量生産に向いている	素材の前調整, 管理が重要

a) 省略可能

b) アルカリあるいは酸によるエッチングが必要

単独の研究から脱皮し, 素材メーカー同士あるいは素材メーカーと熱交メーカー等との共同開発が必要と思われる。

参 考 文 献

- 1) W. E. Cooke: 軽金属溶接, Vol. 16 (1978) 365.
- 2) J. R. Terrill: *Metal Progress*, 12 (1969) 70.
- 3) J. R. Terrill: *Welding Journal*, Vol. 50, 12 (1971) 833.
- 4) 川瀬, 石川: 軽金属溶接, Vol 21, 2 (1983) 61.
- 5) 川瀬, 山口: 軽金属溶接, No. 123 (1973) 115.
- 6) 福井: 住友軽金属技報, January (1980) 76.
- 7) BRAZING ALCOA ALUMINUM.
- 8) 石丸, 三浦: 軽金属, Vol. 33, 3 (1983) 157.
- 9) US Patent 4,410,036.
- 10) 川瀬: 軽金属溶接, Vol. 19, 6 (1981) 246.
- 11) A. Sugihara: *SAE Technical Paper* 830021 (1983).