

アルミニウムろう付技術の変遷*

伊藤 泰永**

History of Aluminum Brazing Technology*

Yasunaga Itoh**

1. はじめに

(アルミニウムろう付技術の工業化について)

1914年から1918年にかけての第一次世界大戦における戦闘機のエンジン冷却には銅製のラジエータが用いられており¹⁾、その後1930年代の終わりにかけてはアルミニウム製の熱交換器が用いられた記録はない。アルミニウムろう付技術の工業化に関しては、古い資料をたどると次のような記載がある。Hoglund, G. O. がミネソタ大学の助教授を経て1928年に入社したアルコア社と、航空機製品を手がけていた米国ユナイテッドエアプロダクト社との共同により浸漬ろう付法(ディップろう付法)の開発が進められ^{2)~4)}、1936年にハネウェル社の航空事業部門であるギャレットエアリサーチを設立したCliff Garrettらによって、1939年にFig. 1のBoeing B-17ターボスーパーチャージャーシステム⁵⁾にオールアルミニウム製のインタークーラが組み入れられた⁶⁾と記述されている。残念ながら写真は現存していないが、これが世界初のアルミニウム製熱交換器であると推定される。そして1940年代に入ると、アルミニウムのろう付法はトーチろう付、浸漬ろう付及び炉中ろう付の三つに分類され⁷⁾、航空機を中心にアルミニウム製ろう付製品の利用が拡大していった。

一方、国内では1954年に住友金属工業の航空機器事業部門(現在の住友精密工業)が浸漬ろう付による航空機用熱交換器の開発に着手し、1956年にFig. 2の空冷エンジン・オイルクーラを完成させた⁸⁾。このオイルクーラが国内初のアルミニウム製熱交換器であるとされている。

以上が国内外におけるアルミニウムろう付技術工業化の第一歩であり、その後は自動車、鉄道などの輸送機器をはじめとして、医療機器、電子部品、化学プラ

ントなど様々な分野にてアルミニウムろう付製品が活用されるようになった。ところが今日に至るまでの間、加熱炉を用いたろう付技術は新しい手法の開発によって何度も大きく変貌した。本報ではアルミニウムろう



d. AUTOMATIC ENGINE CONTROL. - Should engine control cables be shot away, four of the controls will automatically assume predetermined positions: throttles, wide open; superchargers, 65 percent power; intercoolers, cold; and propellers, 1850 rpm. Functioning of the automatic control at one unit will not affect placement of controls at other units, or of similar controls on other engines.

Fig. 1 Description relevant to the intercoolers in the Pilot's Manual for Boeing B-17 flying fortress.⁵⁾

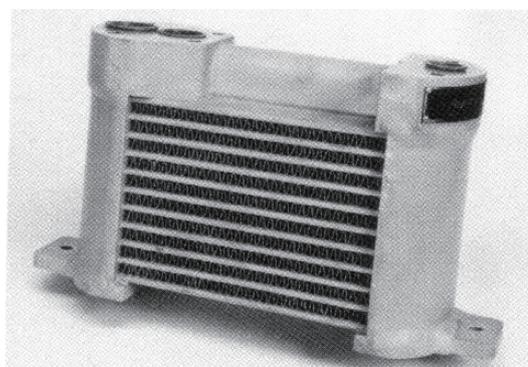


Fig. 2 Air-cooled engine oil cooler for T-34.⁸⁾

* 本稿の主要部分は、軽金属溶接, 55 (2017), 168-179に掲載。

The main part of this paper has been published in Journal of Light Metal Welding, 55 (2017) 168-179.

** (株)UACJ 技術開発研究所 第七研究部

Research Department VII, Research & Development Division, UACJ Corporation

付技術の変遷とそれらにおけるキーテクノロジーについて概説する。

2. ろう付技術の変遷とキーテクノロジー

加熱炉によるアルミニウムろう付技術と主要製品の変遷を整理すると **Table 1** のようである。以下ではそれぞれのろう付技術とキーテクノロジーについて述べる。

2.1 浸漬ろう付法及び炉中ろう付法

アルミニウムをろう付接合するには、アルミニウムのろう材及び相手材の酸化皮膜を破壊・除去することが不可欠であり、トーチろう付を含めて、初期の頃の

ろう付ではいずれも腐食性の強いフラックスを使用していた。ろう付用フラックスの成分例を **Table 2** に示す⁹⁾。フラックスは成分によって反応温度が異なり、ろう付する母材やろう材の成分に応じて使い分けられる。Table 2 に示すフラックスの使用により、2000系合金、Mg含有量の多い5000系合金及びCu含有量の多い7000系合金を除く多くのアルミニウム合金のろう付が可能となり、溶融したフラックスが継手の隙間に侵入して酸化皮膜を破壊するとともに、溶融したろう材の表面張力を低下させてろうの流動を促進するため、接合性は優れている¹⁰⁾。

フラックスの機能に関しては完全に解明されているとは言えないが、フラックスによる酸化皮膜の破壊・

Table 1 Changes of the aluminum brazing process and the main products.

HX : Heat exchanger

Brazing process	Flux	Furnace atmosphere	Year						
			1940s	1950s	1960s	1970s	1980s	1990s	2000s
Furnace brazing	Corrosive flux	Air (Dry air)	Aircraft HX						
			Automobile HX						
Dip brazing	Corrosive flux	Air	Aircraft HX						
			Automobile HX						
			Railroad HX						
			Industrial HX						
Vacuum brazing	Non-flux	Vacuum (10 ⁻⁴ ~10 ⁻² Pa)	Aircraft HX						
			Automobile HX						
			Railroad HX Industrial equipment HX Electric devices HX						
Nocolok [®] brazing	Non-corrosive flux	Nitrogen (O ₂ <1000 ppm)	Automobile HX						
			Aircraft HX Railroad HX Electronic devices HX						

Table 2 Components of the flux for the aluminum brazing.⁹⁾

Composition of flux (%)																				Brazing temperature (°C)	Application alloy		
CdCl ₂	NaCl	KCl	LiCl	SrCl ₂	BaCl ₂	AgCl	ZnCl ₂	SnCl ₂	Mixture of fluorides	PbCl ₂	NH ₄ Cl	SbCl ₂	NaF	KF	LiF	CaF ₂	MgF ₂	AlF ₃	ZnF ₂			CdF ₂	
-	35	35	20	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	Al
-	20	25	-	-	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	Al
-	38	-	-	-	55	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	3	2	-	-	-	-	Al
-	28	51	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	Al
-	5	48	37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-	3	-	-	610	Al
-	26	54	-	-	-	-	12	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	588	Al
-	5	48	37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-	-	3	-	538	Al
-	28	54	-	-	-	-	11.95	0.05	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	510	Al-Mn
-	30	36	18	-	-	-	9.9	-	-	0.1	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	588	Al-2.5Mg-0.25Cr
15.95	24	52	-	-	-	-	-	0.05	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	593	Al-Mn
12.9	29	50	-	-	-	-	-	-	-	0.1	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	593	Al-2.5Mg-0.25Cr
-	-	56	36	-	-	0.1	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	510	Al

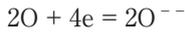
除去の機能は次のアノード／カソード反応で説明されており¹¹⁾，白金電極との電位差の測定から4秒程度で酸化皮膜が除去されることも確認されている¹²⁾。

<アノード反応>



(アルミ母材の溶出 → 酸化皮膜の剥離)

<カソード反応>



(酸化皮膜の破壊)

フラックスを製品に塗布して大気炉内で加熱接合する炉中ろう付に比べて，浸漬ろう付では溶融させたフラックス中に製品を浸漬するため，フラックスが継手間隙に進入して酸化皮膜を破壊するとともに，フラックスが熱伝達媒体となり，大型の製品を短時間に均一に昇温できる利点を有している¹³⁾。そのため1960年代にはFig. 3のような化学プラント用大型熱交換器が国内外で盛んに製造されるようになり¹⁴⁾，同時期には鉄道車両向け熱交換器の生産も活発化した⁸⁾。また，炉中ろう付による自動車用カーエアコンの生産が始まったのもこの頃からである¹⁵⁾。

浸漬ろう付と炉中ろう付は，航空機用熱交換器を皮切りとして，自動車用熱交換器から日用品に至るまで様々なろう付製品を世の中に送り出してきたのであるが，接合性に優れる反面，生産性と環境面で幾つかの

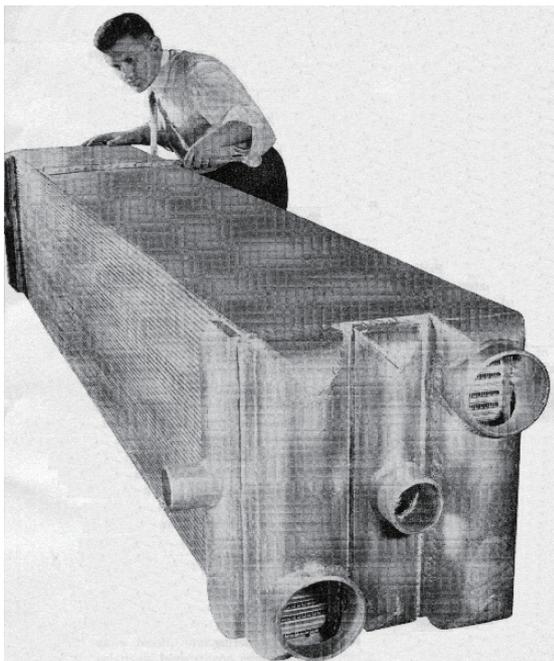


Fig. 3 Large heat exchanger brazed by the dip brazing.¹⁴⁾

課題を有している。例えば，フラックスはアルミニウムに対して強い腐食性を有するため，接合後にフラックスを除去しなければならない欠点がある。また，浸漬ろう付の場合は溶融フラックスに対する様々な管理も必要であり，フラックスの除去に加えて生産性を損ねる懸念もある¹³⁾。これらを改善すべく，炉中ろう付法においてFig. 4のように露点を低下させた乾燥空気によってフラックスの使用量を減じたり，反応性の低いフラックスを使用する試みも行われたが¹⁶⁾，フラックス除去の回避には至らずに利用は拡大しなかった。

以上のように，炉中ろう付及び浸漬ろう付に関する技術は，フラックスの開発に始まりフラックスの改良と除去・管理の技術など，フラックスに関する課題が大半を占めている。フラックスは6000系の高強度合金を安定して接合できることから現在でも航空機部品を中心に使用されているが，1960年代後半に米国のGE社でフラックスを使用しない真空ろう付法¹⁷⁾が開発されたのを契機として，1970年代から1990年代にかけて急速に真空ろう付に置き換わっていった。これがアルミニウムろう付技術における最初の大きな転換期であった。

2.2 真空ろう付法

加熱炉内を高真空にすることで，フラックスを使用

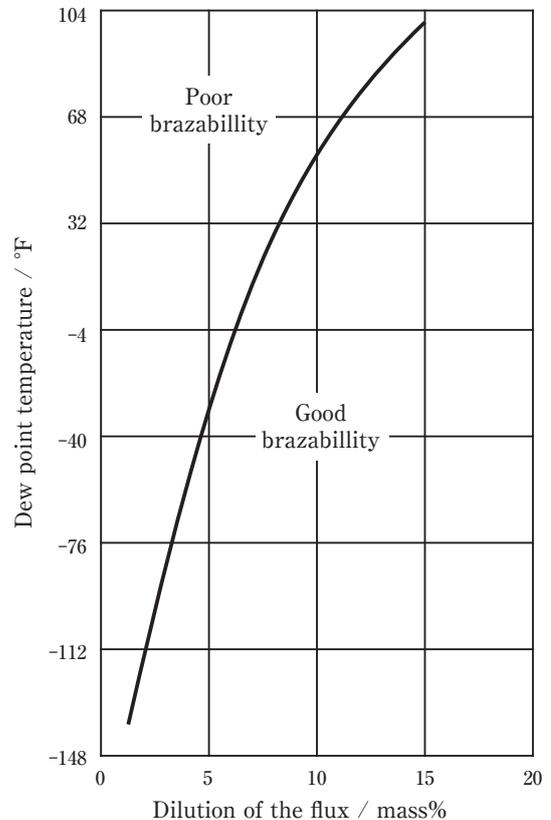
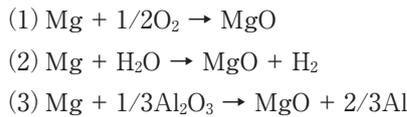


Fig. 4 Relation between dew point and dilution of the flux on brazability.¹⁶⁾

しないで接合する真空ろう付法に関しては、米国では既に1940年代に開発されていたようである¹⁸⁾。真空ろう付は当初、炉内を 1×10^{-5} Pa台に排気することで接合の可能性を確認し、続いてMgを酸素のゲッター材として使用することで $1 \times 10^{-2} \sim 10^{-3}$ Pa台の圧力でも接合できるように改善して工業化に至った。即ち、真空ろう付法においてはMgがフラックスの代替として機能し、その作用については次の反応であるとされている¹⁹⁾。



(1)と(2)がMgによる酸素及び水蒸気の除去を意味し、(3)は酸化皮膜の還元を意味している。Mgは製品と共に炉内に置いて蒸発させても、あるいはろう材やブレージングシート的心材中に添加しても効果を発揮することから、(1)～(3)のメカニズムは概ね妥当と考えられる。但し、Mgの使い方としてはろう材中に添加するのが最も効果的である。その理由をFig. 5に示す²⁰⁾。Fig. 5はカップ型の試験片を真空炉内で加熱し、560℃、575℃及び585℃まで加熱したカップ壁の断面であり、写真の上側がカップの外側、下側がカップの内側を示している。575℃のカップ外側ではろう材表面に激しい凹凸を生じているが、これは溶融を開始したろう材からMgが激しく蒸発（沸騰）したために生じたものである。この激しい蒸発によってろう材表面の酸化皮膜は

機械的に分断され、至近距離に相手材があれば、蒸発したMgが相手材の酸化皮膜にも作用して濡れ性を向上させる。

一方、Fig. 5のカップ内側ではろう材に凹凸が生じず、ろう材は575℃の段階で溶融・流動している。密閉度の高いカップ内側ではMgの蒸発が緩慢となり、ろう材はAl-Si-Mgの三元共晶（融点551℃）によって溶融が進行し、カップ外側よりも早期に溶融と流動を開始するからである。ところがカップ内側ではMgの蒸発が緩慢で酸化皮膜の機械的分断が進まず、さらには溶融ろう中の高いMg濃度によって表面張力も低下している。そのためFig. 6に示すようにカップ内側のろうがカップの外側へ流出し、カップ内側でのフィレット形成が劣る結果を招く²⁰⁾。真空ろう付においては製品内部のフィレット形成能が劣る原因となるため注意が必要である。なお、これと似たような偏った流動は、後述のノコロックろう付法において二種類のろう材のSi濃度やZn濃度に差をつけた場合にも発生するが、フィレット形成に偏りを生ずるほどではなく、真空ろう付の場合とメカニズムは異なる。

炉中ろう付あるいは浸漬ろう付から真空ろう付への転換によってろう付の工程は簡略化され、多くの場合、生産性は向上した。また、炉中ろう付や浸漬ろう付と同様に6000系合金のろう付が可能であり、航空機、自動車、鉄道、産業機器などすべての分野において真空ろう付への転換は急速に進んだ。自動車用熱交換器では、1970年代にFig. 7²¹⁾のような真空ろう付によるド

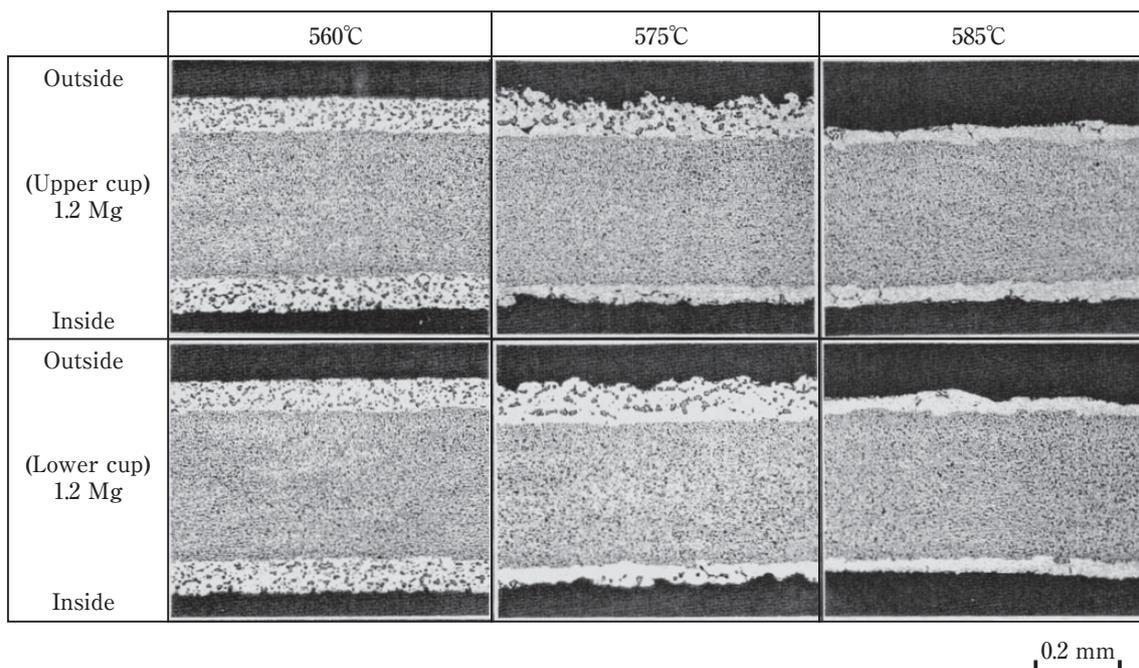


Fig. 5 Cross sections of the cup specimen composed of Al-10Si-1.2Mg filler metals.²⁰⁾

ロンカップ型エバポレータが登場し、日本国内でも1980年代にかけて急速に普及した。オイルクーラもCu-Ni合金製あるいはステンレス製からアルミニウム製への移行が真空ろう付法によって進展した²²⁾。その他、航空機や鉄道車両用熱交換器、化学プラント用の大型熱交換器についても浸漬ろう付から真空ろう付への転換が図られた²³⁾。

しかしながら、真空ろう付では溶融したろうが継手の隙間を埋める能力（間隙充填性）が炉中ろう付及び浸漬ろう付に比べて低下し、大型の製品では加熱に長時間を要するようになった。それにより、真空ろう付で

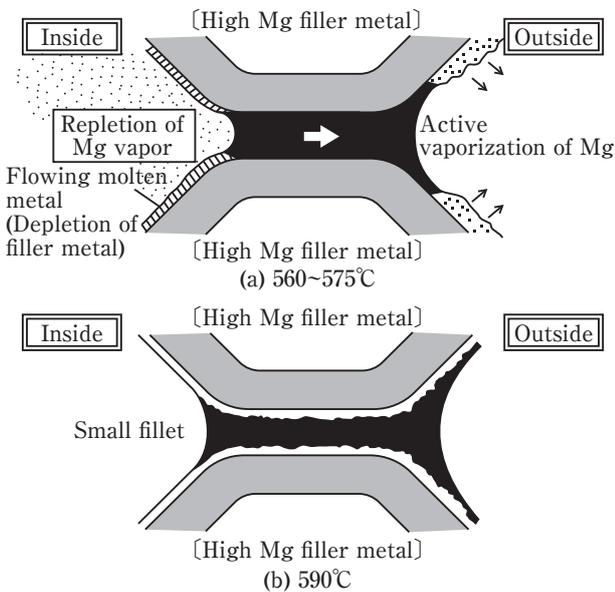


Fig. 6 Schematic illustration of the fillet formation mechanism at the brazed joint of the cup specimen.²⁰⁾

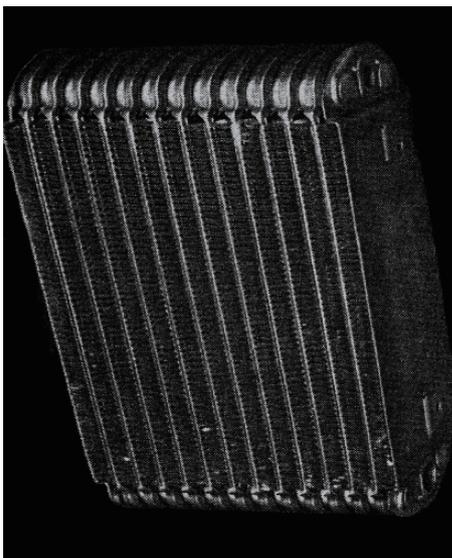


Fig. 7 Philco-Ford Corporation vacuum brazed aluminium air conditioner evaporator of the packed-block construction.²¹⁾

は精密な継手精度が要求され、材料面での工夫も必要になった。接合性の低下を補うためにろう材の量を多くすると、溶融ろうによる母材や心材の侵食が問題となる。

侵食の機構を図解するとFig. 8のようである²⁴⁾。加熱に長時間を要する大型製品のろう付では、ろう材が溶融する前にろう材中のSiが心材中に粒内拡散し、ろう材中にSi粒子の枯渇する領域 (depleted zone²⁵⁾) が生ずる。これによりろう材量が減少する一方で、Si濃度の上昇によって心材の融点が低下する。一方、ろう材が溶融して以降の溶解 (dissolution) と浸透 (penetration) は、従来エロージョン (erosion) と呼称されている侵食現象を支配している機構であり、それらは加熱時間の長短によらず発生する。ろう付における溶解は母材や心材が溶融ろう中に溶出する現象であり、ろう材がAl-Siの二元系で心材が純アルミニウムあるいはAl-Mn系であれば、継手における侵食量は、継手に形成されたフィレット中のSi濃度、フィレット体積及びろう付到達温度の三つの因子によって一義的に決定される²⁶⁾。ただし、形成されたフィレット中のSi濃度は加熱前のろう材Si濃度とは一致しないので注意が必要である²⁷⁾。溶解は特に薄肉のフィン材に対して甚大な影響を及ぼすため、ろう材量の適正化とろう付温度の管理が重要である。また、溶融したろうが特定の部位を流動する場合には、Fig. 9のように溶解による溝 (dissolution groove) を形成することがある。この溝は温度上昇に伴ったろう材中の液相の発生とその流動によって連続的に溶解速度因子を変えながら成長するため^{24), 28)}、ろうの流動方向にプラスの温度勾配をつけないように加熱することで溶解溝の成長を最小限にとどめることができる。以上、溶解に関しては材料因子よりもろう付時の温度因子が支配的となる。

心材中へのろうの浸透は粒内浸透 (sub-boundary penetration) と粒界浸透 (grain boundary penetration) の二つに分類される。粒内浸透は心材の結晶粒内に細かく存在する亜結晶粒界にろうが急速に進入する現象であり、ろうの侵入後は溶解と拡散 (diffusion) によって結晶粒は短時間でAl-Siのa相として均一化する²⁹⁾。粒内浸透が薄肉のフィン材で起きるとフィンの座屈が発生し、チューブやヘッドの心材で粒内浸透が起きると有効なろう材量が不足して洩れ不良を招くこともある。一般的に亜結晶粒界はろう付温度に達するまでの間に消失するが、ろう付前に3~15%程度の低加工を加えた材料においては残留しやすくなり、加工度の他に、心材成分や均質化処理条件³⁰⁾、さらにはろう付時の温度履歴も影響する。一方、粒界浸透は心材の結晶

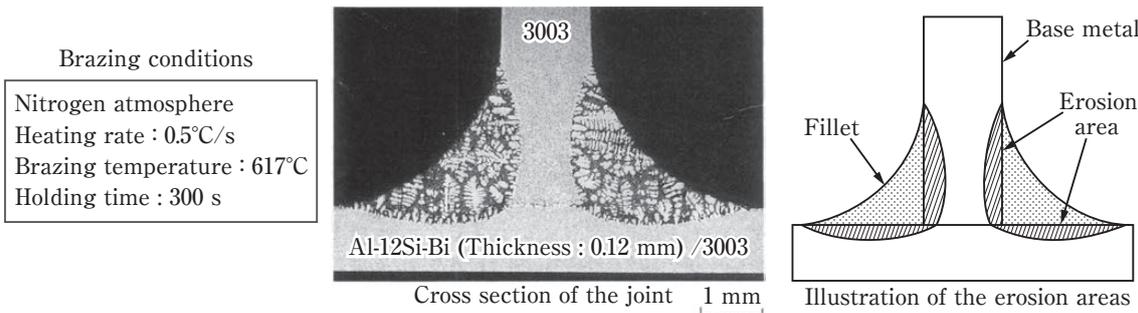
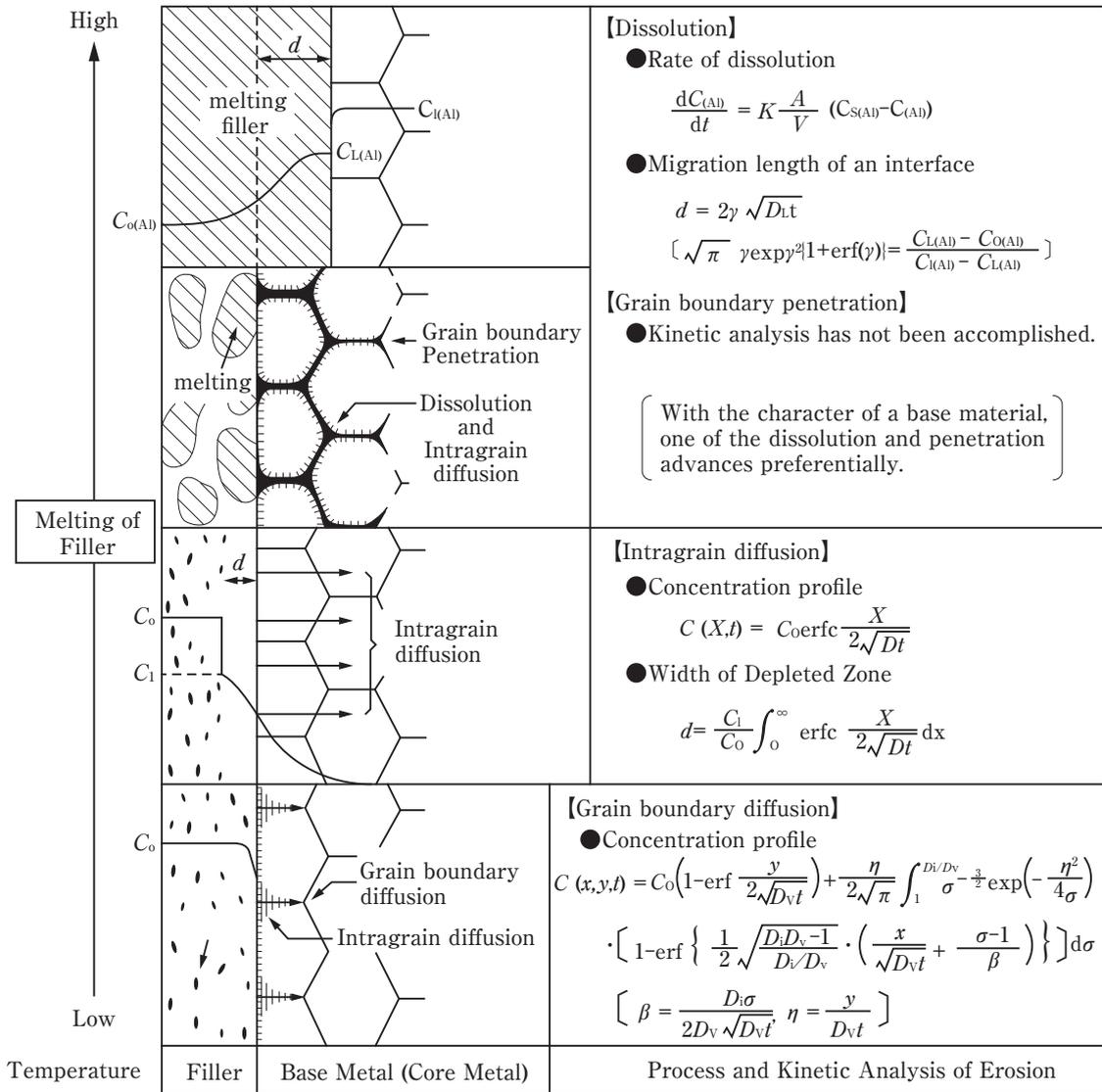


Fig. 8 Mechanism of erosion.²⁴⁾

粒径が小さい場合に発生しやすく³¹⁾、心材や母材におけるろう付前の結晶粒径あるいはろう付加熱時に再結晶する粒径が細かくならないように材料の製造条件を調整する必要がある。以上、浸透に関しては材料因子が支配的である。なお、溶解と浸透に関してはすべてのろう付法に共通する問題であり、心材中にSi, Cu, Mg, Znなどの低融点化元素を多く含む場合には特に注意が必要である。

炉中ろう付や浸漬ろう付と比べて加熱処理時間が長く、空隙充填性も劣る欠点を補うために、加熱技術やろう材についても様々な工夫がなされた。加熱技術については、例えば、高真空を保ちつつ生産性を向上させる連続式真空炉³²⁾、加熱シミュレーションと正確な温度制御³³⁾などが挙げられる。ろう材については、例えば、Bi添加効果の検証³⁴⁾や、実験的な試みとしてMg量の調整による製品内外部での溶融時間差の改善³⁵⁾な

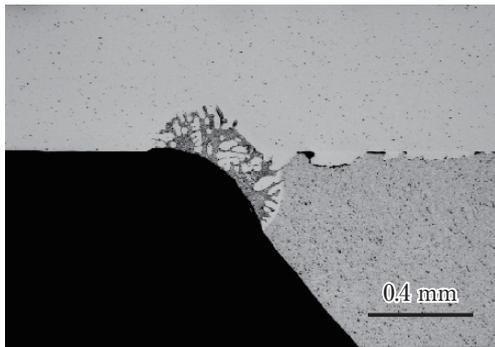


Fig. 9 Dissolution groove occurred in a brazed joint.

どがある。また、耐食性に関しては炉中ろう付の頃からZn拡散処理が用いられていたが^{36), 37)}、真空ろう付では加熱中にZnが蒸発して電位勾配が逆転する(材料表面が貴になる)ため好ましくない。そこでSnやInを利用した犠牲防食^{38)~41)}や、Ti添加による層状腐食効果の付加^{42), 43)}が図られた。

真空ろう付はアルミニウムろう付製品の利用拡大に大きく貢献し、材料技術にも顕著な進歩をもたらした。ところが、1970年代終盤に米国Alcanから発表された非腐食性フラックスによる新しい炉中ろう付法⁴⁴⁾が、1980年代以降において自動車用熱交換器の製造方法の主流となった。これがアルミニウムろう付技術における二度目の大きな転換期であった。

2.3 ノコロックろう付法

ノコロックろう付法(Nocolok[®](*1) Flux Brazing Process)の開発と実用化の歴史については小笠原⁴⁵⁾が詳述しているので、本報では応用技術に関する点を中心に紹介する。ノコロックフラックスは $KAlF_4$ と K_3AlF_6 の共晶組成を利用したものであり、状態図はFig. 10で示される。フラックスは560℃程度で熔融し、塩化物系フラックスと同様に酸化皮膜を破壊・除去する。ノコロックフラックスの最大の特徴は、アルミニウムに対して非腐食性のため、ろう付後の洗浄が不要な点にある。フラックスの反応性が低いので炉内雰囲気窒素などの不活性ガスを使用するのが必須であるが、露点と酸素濃度には厳しい管理を必要としない。真空ろう付に比べて炉の費用が安くなり、窒素ガスが熱伝達媒体となるため短時間での加熱が実現され、生産性が大きく向上する。フラックスを塗布する前に脱脂処理は必要であるが、化学エッチングは必要としない。以上の特徴から、1980年代の中頃から自動車用熱交換器の生産方法として急速に普及し、ラジエータが

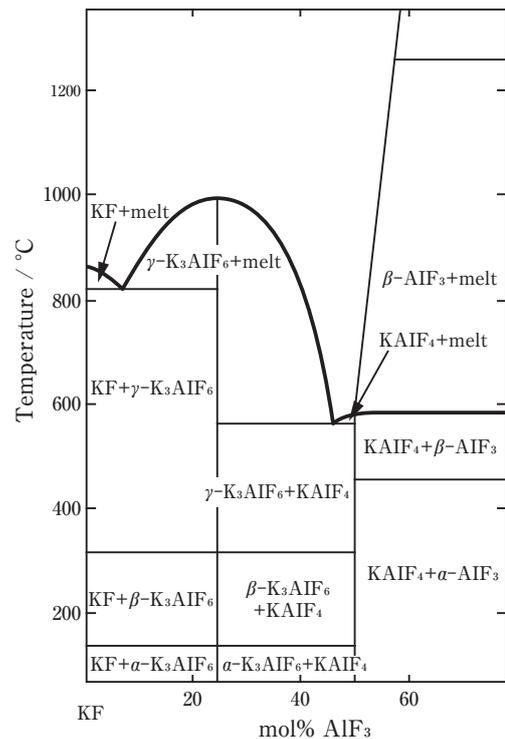


Fig. 10 KF-AlF₃ phase diagram.

銅製からアルミニウム製に置き換わるきっかけにもなった⁴⁶⁾。

ノコロックろう付法の採用による最大の成果は防食技術の革新にある。防食の基本となるのはFig. 11及びFig. 12⁴⁷⁾に示されるZnによる犠牲陽極処理(Zn拡散処理)であり、Zn拡散処理はラジエータにかぎらず、ヒータ、コンデンサ、エバポレータ等すべての自動車用熱交換器で用いられている。Zn拡散処理以外にも、熱交換器の外側では犠牲陽極フィンによる防食⁴⁸⁾、ラジエータやヒータの内側ではFe、Ni添加によるアルカリ腐食の防食⁴⁹⁾や心材Mnによる電位ギャップの形成⁵⁰⁾など様々な工夫が施されている。さらには、ろう材量や加熱速度など、ろう付施工に関する部分も細かく調整された^{51), 52)}。その結果、Fig. 13のように最近の20年間に於いてチューブ材の肉厚はおおよそ1/5にまで薄肉化された⁵³⁾。材料の薄肉化による軽量化に加えて、接合性が向上したことから材料と熱交換器の設計自由度が増し、熱交換器の性能も向上した。その成果として、例えばラジエータの性能指標(=熱交換性能/熱交換器重量)はFig. 14のように飛躍的に向上した⁵⁴⁾。

ノコロックろう付法における防食技術のひとつの革新として、Zn置換フラックスの実用化がある。従来のコンデンサ用押出多穴管チューブ表面にはZn溶射が施されていたが⁴⁸⁾、Znを含むフラックス成分 $KZnF_3$ (トリフルオロ酸カリウム)によってZn拡散層を形成する

脚注*1

NocolokはRio Tinto Alcan Inc.の登録商標です。

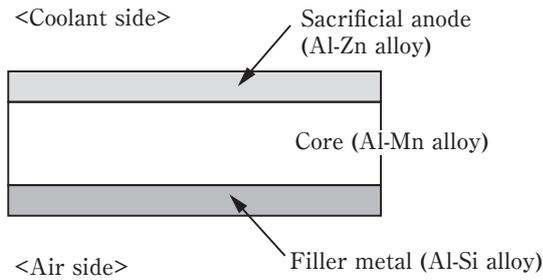


Fig. 11 Schematic diagram of the cross sectional tube stock.⁴⁷⁾

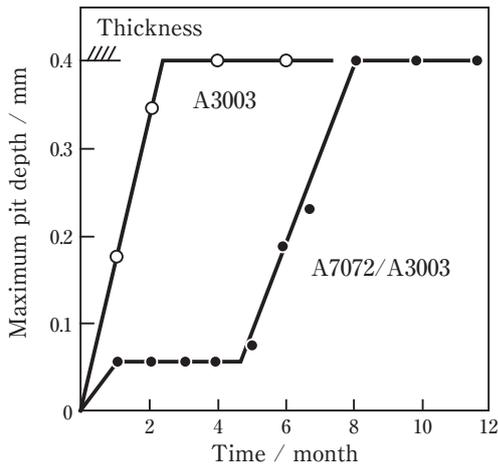


Fig. 12 Sacrificial anodic effect of A7072 clad.⁴⁷⁾

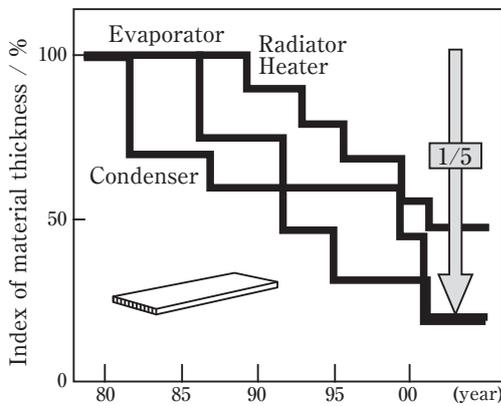


Fig. 13 Gage down changes of tube materials thickness.⁵³⁾

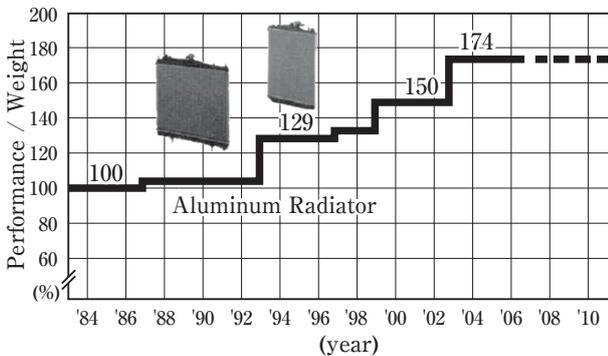
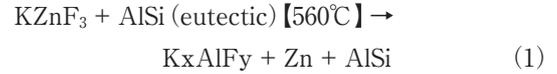


Fig. 14 Performance/Weight changes of the aluminum radiator.⁵⁴⁾

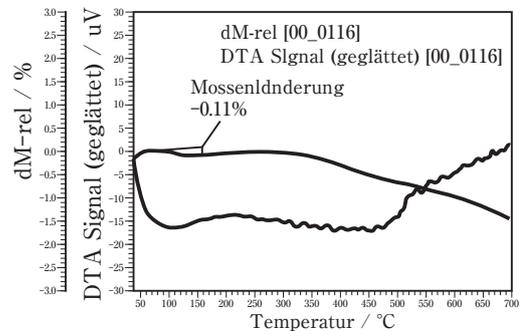
ことで、コストダウン及びZn量の低減と均一化が実現された。Zn置換フラックスの反応は凡そ次式と推定され、Fig. 15に示されるようにアルミニウムとの反応によりフラックス成分を自己生成し、放出されたZnが材料中に拡散して犠牲腐食層を形成する⁵⁵⁾。



一方、接合面では、まずフラックスとバインダの開発に進展が見られた。ノコロックSilフラックスはSi粉末とノコロックフラックスを混合したものであり、Fig. 16のようにSi粉末とアルミニウムの素地とを反応させて生じるAl-Si融液によって接合する⁵⁶⁾。Si粉末ではなく、Al-Si粉末による接合の試みもある⁵⁷⁾。K₂SiF₆ (ヘキサフルオロ珪酸カリウム)は次式によって金属Siを生成し、Fig. 17のように接合させる^{55), 58), 59)}。

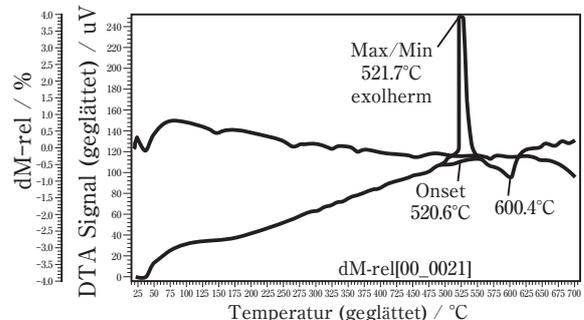


これらの手法はブレージングシートを用いずに接合できる利点があり、既に一部で実用化されている。ま



Datum/Zelt: 21.01.00 09:08:08 Probe: MPA02002 KZnF3 329 mg
 Bediener: Hal Referenz: Pt1legel mg
 Labor: SBS-S-TCA Atmosphäre: Luft 1/mln
 Kommentar: Pt20/min Nulldate: 01PT1099

(a) Only the flux is heated.



Datum/Zelt: 03.01.1001445:12 Probe: GE0046 KZnF3+Al 1:1 41.2mg
 Bediener: PP Referenz: Al203-Tiegel mg
 Labor: SBS-S-TCA Atmosphäre: Stickstoff 1/mln
 Kommentar: Al203,20/min Nulldate: 01AL1298

(b) Both the flux and the aluminum are heated.

Fig. 15 DTA profile of KZnF3 flux.⁵⁵⁾

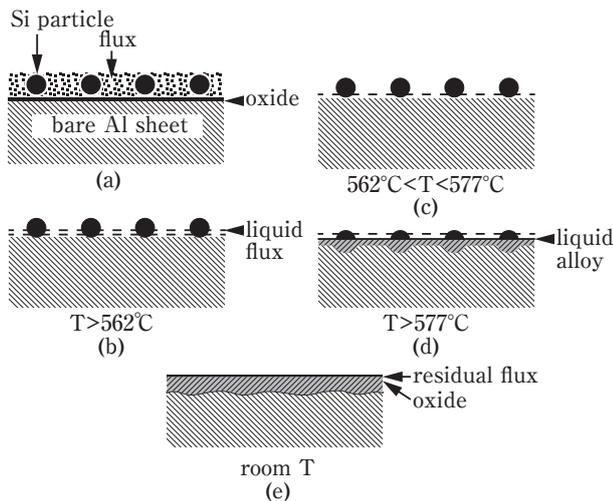


Fig. 16 Reaction process of Nocolok Sil flux.⁵⁹⁾

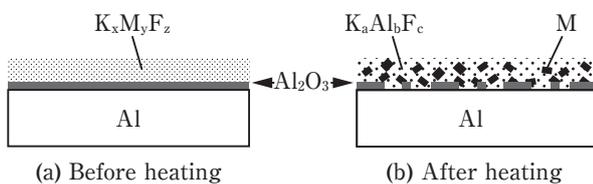


Fig. 17 Reaction of K_2SiF_6 flux.⁵⁹⁾

た、上記のZn置換フラックスを含めて、効率的に使用するにはフラックスあるいは金属粉末とフラックスの混合物を予めろう付部材に均一に塗布しておくことが望まれる。そこで密着性と熱分解性に優れた樹脂バインダの開発と実用化も進んでいる⁶⁰⁾。ノコロックフラックスの性質として、Mgとの反応によりフラックスの機能が低下するため、6000系合金などMgを多く含有する材料を使用できない欠点がある。Mg含有量0.6%以下の合金であれば、ノコロックフラックス塗布量を多くすることで接合はできるが、フラックス残渣が大量になるため実用には適さない。そこでMgとの反応で融点の低い錯化合物を作るべく、 $CsAlF_4$ を応用したCs含有量2%のノコロックフラックスが開発されている⁵⁵⁾。Cs含有系フラックスは他にも多種類あるが、いずれもノコロックフラックスに比べて価格の高いことが難点である。

前述のごとく材料の薄肉化が進展する一方で、Znの拡散を制限して犠牲腐食層を薄くする必要性が高まった。それにはろう付の到達温度を変えずに加熱速度と冷却速度を上げること、即ち、急速加熱と急速冷却が必要になった。より物理的に表現すると、アルミニウム中でのZnの拡散係数をDとしたとき、Dを時間(t)で積分した「 $D \cdot dt = \Sigma D \cdot t$ 」を小さくする必要があった。古くからろう付では「均熱」の概念が重要視され、製品がろう付温度に達してから「保持」が必要との観念が

支配的であった。換言すると、熱伝導場において平衡状態となるような加熱が指向されていたが、 $\Sigma D \cdot t$ を極限的に小さくするには、少なくとも昇温過程では均熱を度外視するとともに、熱的に非平衡のまま加熱を終了する必要もある。元々、熱交換器は熱伝導性の良いアルミニウム合金で構成され、熱伝導性に優れた構造で成り立っている。また、限られた区間におけるろうの流動は数秒以内に完遂することから、アルミニウム製熱交換器のろう付は熱的平衡状態を必ずしも必要としない。冷却過程において温度上昇する部位が存在しても構わないとも言える。ノコロックろう付の急速化は熱交換器メーカーだけでなく、加熱炉メーカーや熱処理メーカー等でも様々な取組みが行われている^{61), 62)}。

ノコロックろう付法の採用によって自動車用熱交換器の生産性は向上し、耐食性も著しく改善された。その結果、熱交換器を構成する部材の薄肉化が年々進み、熱交換器の軽量化と高性能化が大きく進展した。ノコロックろう付は航空機用熱交換器でも一部採用されており、最近では空調家電用熱交換器にも波及している。ノコロックろう付法の優位性は今後も健在であり、材料及び接合技術の開発と実用化は一層進むものと考えられる。しかし一方で、自動車用熱交換器における材料の薄肉化はすでに限界レベルにあるとも考えられ、今後の行方を占うと、これまでの延長線上にない別のイメージも彷彿される。

3. ろう付技術が生み出した異色の製品

新製品や新技術の開発はニーズから始まることが多い。ところがろう付技術開発に携わっていると、稀にはあるが「これをろう付してみてもどうか?」と思うことがある。社会のニーズが技術を進化させ、次々に新製品を生み出す中で、進化した技術が製品を生み出した珍しい事例を紹介する。

1980年代、住友精密工業では化学プラント用大型高圧熱交換器を対象として浸漬ろう付から真空ろう付への転換が進められていた。その技術転換に材料メーカーとして協力する中で、大型ろう付製品の加熱技術を学ばせて頂いた。それは物温フィードバックによる極めて正確な温度制御であり、大型で複雑な構造をもった製品を最短時間で目標の温度域に収束させる加熱技術であった⁶³⁾。制御室のモニター画面に映し出された情報は、実際の大型製品を対象としたCAE (Computer Aided Engineering) とも言えるものであり、当時接着剤で接合していた大型ハニカムパネルのろう付接合版を発想する契機となった。

アルミニウム合金製ろう付ハニカムパネルの基本構成を Fig. 18 に示す。ハニカムコアと面板は 6951, 枠材は 6N01 あるいは 6063 で, Al-Si 系ろう材により真空ろう付で接合する。比剛性が高く, 溶接接合も可能なことから建築構造物^{(64), (65)}, 船舶⁽⁶⁶⁾ 及び自動車⁽⁶⁷⁾ 等の構造用材料として実用化開発を進めた。この内, 鉄道車両での開発経緯を Table 3 に示す。Fig. 19 は 1987 年から宮崎実験線で走行試験を開始したリニア MLU002 の超

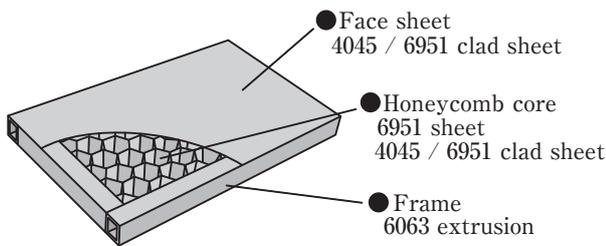


Fig. 18 Component materials for the brazed honeycomb panel.

Table 3 Development history of the aluminum brazed honeycomb panel for the railroad vehicles.

Year	Application	User company
1987	SCM support frame for Mag-Lev train MLU002, Miyazaki experiment line	Railway Technical Research Institute
1992	Body structure of next-generation shinkansen STAR21(953-1)	East Japan Railway Company
1995	Body structure of next-generation shinkansen 300X(955-5,6)	Central Japan Railway Company
1997~	Body structure of series 500 shinkansen	West Japan Railway Company
2003	Body structure of Mag-Lev train MLX01-1, Yamanashi experiment line	Central Japan Railway Company
2007~	Pantograph covers on N700 shinkansen	Central Japan Railway Company

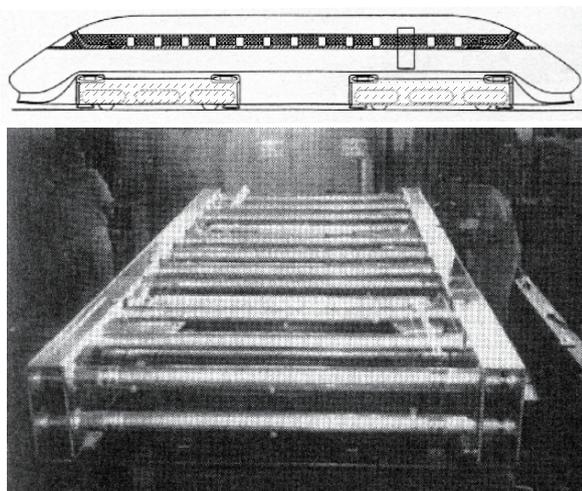


Fig. 19 SCM support frame (hatching area).⁽⁶⁸⁾

電導支持枠である⁽⁶⁸⁾。左右両側の箱桁がろう付ハニカムパネルの溶接構造物であり, Fig. 20 の FEM 解析と Fig. 21 の強度試験の結果はよく一致し, 疲労強度は予想を上回る結果を示した。これ以降, 次世代新幹線の STAR21 と 300X, リニア山梨実験線 MLX01-1 の構体(車両の側壁, 床, 天井を構成する一次構造物)に採用された。強度試験はその都度実施しており, 鉄道車両構体への適用性が系統的に評価された^{(69)~(71)}。その後, 1997 年から営業運転を開始した Fig. 22 の 500 系新幹線の構体と, 2007 年に登場した Fig. 23 の 700 系新幹線のガイシオオイ(パンタグラフを保護するカバーと騒音防止の翼)に採用されて現在に至っている。500 系新幹線及び N700 新幹線用のハニカムパネルは Fig. 24⁽⁷²⁾ のように全数を超音波検査して出荷されるのであるが, 500 系新幹線用パネル製造当時に技術を担当していた筆者の記憶では, 検査対象となったパネルのハニカムコアと面板の接合部(フィレットを形成させる部位)に欠陥は全く見当たらなかった。パネルの上下面を合わせて概算で 634 km もの長さとなるが, フィレット切れが一

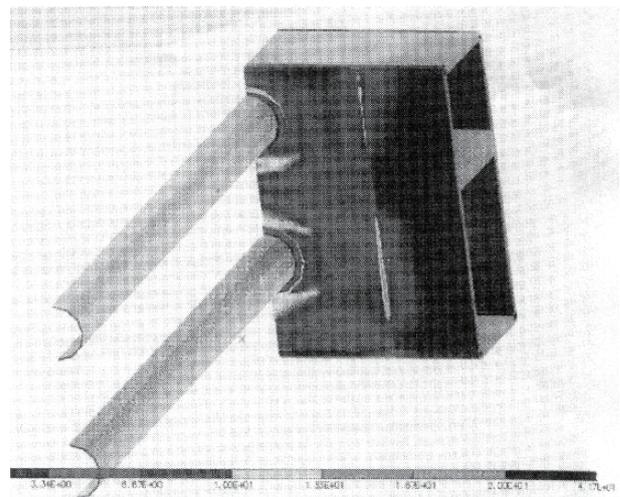


Fig. 20 FEM analysis of a beam joint.⁽⁶⁸⁾

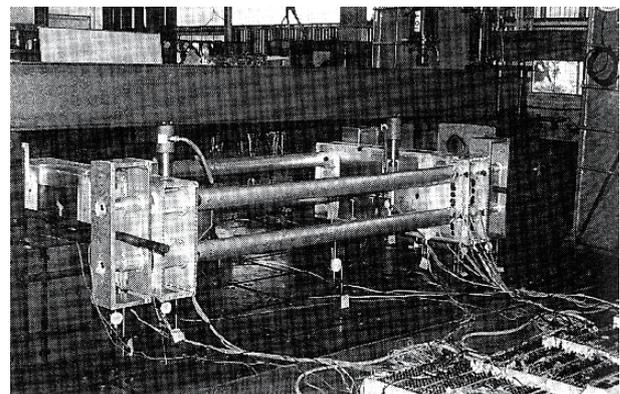


Fig. 21 Strength test of the beam joint.⁽⁶⁸⁾

ケ所もないという結果は、大面積での平坦性あるいは所定の曲率を確保する複合治具の利用に加えて、多点物温フィードバックによる正確な温度制御を実施し続けた成果であると考えている。

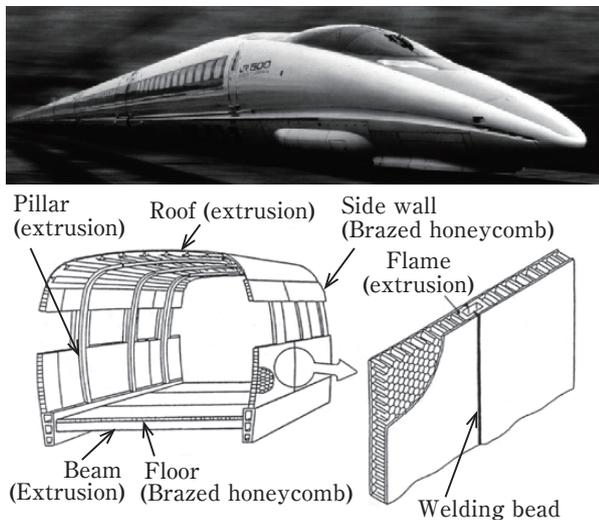


Fig. 22 Body structure of series 500 Shinkansen.

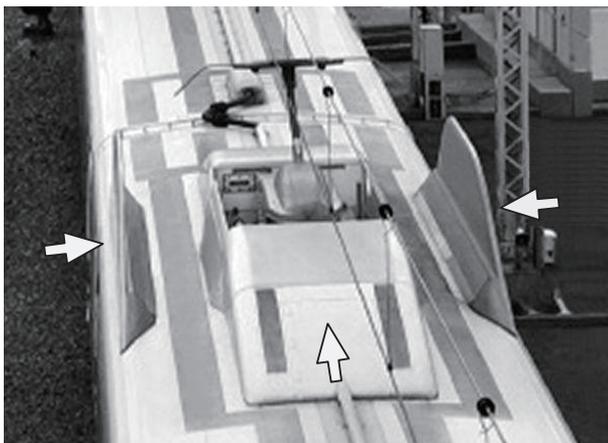


Fig. 23 Pantograph covers on N700 Shinkansen (Arrow parts: usage of brazed honeycomb panels).

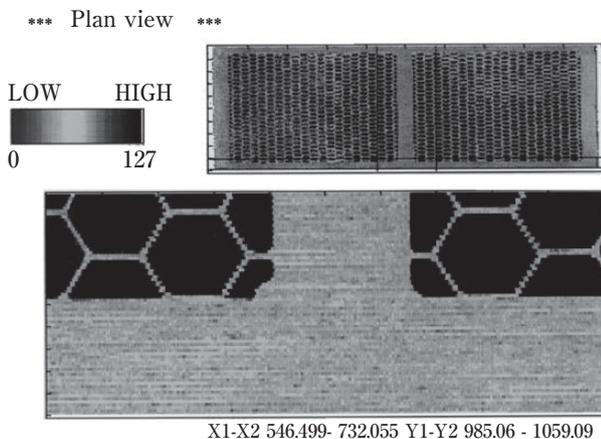


Fig. 24 Ultrasound inspection result of the brazed honeycomb panel for series 500 Shinkansen.⁷²⁾

ろう付ハニカムパネルは、ろう付接合材が輸送機の一次構造材として適用された極めて珍しい製品である。ろう付接合には、細かな接合部を一度に、ほぼ同時に接合できる特長がある。ろう付部の疲労強度を基礎的な試験片で評価する試みもあるが⁷³⁾、ひとつの、あるいは狭い面積のろう付継手が構造物の要点に用いられることはない。例えば応力の集中するボルト締結部位には、十分な面積の埋込部材を設置して応力を緩和すればよい。細部を同時に接合できる利点を生かした設計と精密な製造を実施することで、ろう付接合が熱交換器の製造技術にとどまらないことを示唆した事例であると考えられる。なお、真空ろう付技術による大型高压熱交換器は1993年に小山田記念賞を受賞し、またろう付ハニカムパネルは1991年に軽金属協会技術賞を、1993年には全国発明賞を拝受した⁷⁴⁾。

4. 今後の展望

2016年9月にドイツの連邦参議院が2030年までに内燃機関を搭載した新車の販売禁止を求める決議を採択し、2017年7月にはフランスと英国の両政府が2040年までに内燃機関を搭載した新車の販売を禁止する方針を示した。一方、米国ではカリフォルニア州のZEV規制が2018年から強化され、中国でも規制強化によってPHVとEVの販売が拡大している。EVを中心とする環境適合車の拡充は世界的な潮流となってきた。

パワートレインの電動化にともなって自動車では熱マネジメントの重要性が増しており、熱交換器も多様な形態へと変化しつつある。例えば、トヨタ自動車の三代目プリウスのPCU (Power control unit) には、Fig. 25のアルミニウム製パワー半導体用冷却器が搭載された^{75), 76)}。電子部品と隣接する熱交換器であり、フラックスを使用しない真空ろう付法で製造された。真空ろう付法はMgを含有した高強度材を使用できる利点もあるが、生産性と耐食性に課題が残っている。そこで、ノコロックろう付法と同様な不活性ガス雰囲気中でのフラックスフリーろう付法が注目されている^{77), 78)}。

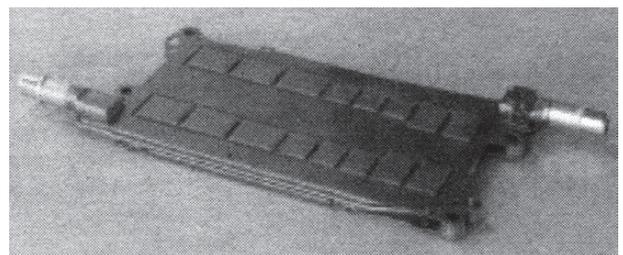


Fig. 25 Aluminum direct cooling device for the power semiconductors.⁷⁵⁾

不活性ガス雰囲気中でのフラックスフリーろう付法は、酸化皮膜の破壊機構が真空ろう付法やノコロックろう付法と異なるため、材料構成や雰囲気制御に一層の工夫が必要である。フィレットの形成には時間的な因子を考慮する必要もある⁷⁹⁾。接合の難度は高いが、自動車用熱交換器に限らずマイクロ熱交換器や構造部材などにも幅広く適用できるろう付方法であり、実用化が期待される。

前述のとおり、アルミニウム製熱交換器のろう付は米国での開発に端を発し、その後の二度に渡る大きな転換期も米国からの授かり物でもたらされた。それらの恩恵と国内技術者のたゆまぬ努力のおかげで、日本のメーカーによる自動車用熱交換器の生産は地球を席卷する勢いで拡大した。一方、鉄道車両用熱交換器と産業用大型熱交換器も技術力の高さが世界各地で評価されている。今やアルミニウムろう付の利用技術において、日本が世界のトップに君臨する存在になったとすれば、そろそろ独自に開発したろう付技術やろう付材料⁸⁰⁾などで世界をリードしてよい時期を迎えているとも言えるだろう。

三度目の転換期。それがいつ訪れるのかはわからないが、外国からの授かり物を待つのか、自ら生み出すかの選択は、ろう付技術者の意思に委ねられているのではないだろうか。

参考文献

- John Coltman: Metal Progress, **45** (1941), 211-224.
- Hogland.G.O.: "Brazing the Aluminum Alloys", American Welding Soc., Chicago, October (1939), 23-27.
- Herbert A. and M.E.Trought: "BAUXITE AND ALUMINUM", Minerals Yearbook, (1939), 633-653.
- Merton J. Peck: "Inventions in the Postwar American Aluminum Industry", Harvard University, (1962), 279-298.
- Pilot's Manual for Boeing B-17 flying fortress, Mid-Atlantic Air Museum Store, (1935)-, 1-23.
- Richard A. Leyes and William A. Fleming: "The history of north american small gas turbine aircraft engines", Smithsonian Institution, (1999), 613.
- Mike A. Miller: Welding J., **25** (1946), 102s-114s.
- 住友精密工業五十年史, (1961-2010), 327-333.
- 島田三郎: 軽金属溶接, **12** (1974), 267-275.
- R. A. Wood and I. B. Robinson: Welding J., **53** (1974), 440s-445s.
- M. F. Jordan and D. R. Miner: J. Inst. Metals, **85** (1956-57), 33-40.
- 大沢直: 日本金属学会誌, **37** (1973), 94-97.
- 岩崎省介, 安孫子哲男: 軽金属溶接, **23** (1985), 551-554.
- Paul B. Dickerson: Metal Progress, **87** (1965), 80-85.
- 石丸典夫, 三浦達夫: 軽金属, **33** (1983), 157-164.
- J. R. Terril: Metal Progress, **96** (1969), 70-73.
- M. M. Schwartz, F. B. Gurtner and P. K. Shutt: Welding J., **46** (1967), 423-431.
- O. R. Singleton: Welding J., **49** (1970), 843-849.
- J. R. Terril, C. N. Cochran, J. J. Stokes and W. E. Haupin: Weld J., **50** (1971), 833-839.
- 伊藤泰永, 難波圭三: 軽金属, **41** (1991), 3-10.
- J. E. Tomlinson: Sheet Metal Ind., **51** (1974), 766-771.
- 井関源三郎: 軽金属溶接, **20** (1982), 112-119.
- 田淵宗明, 中村昌一: 軽金属溶接, **12** (1974), 401-407.
- 伊藤泰永, 難波圭三: 住友軽金属技報, **30** (1989), 53-63.
- J. R. Terril: Welding J., **45** (1966), 202s-209s.
- 前田興一, 伊藤泰永, 難波圭三: 住友軽金属技報, **35** (1994), 57-64.
- 伊藤泰永, 難波圭三: 軽金属学会第76回春季大会講演概要集, (1989), 253-254.
- 村瀬崇, 柳川裕: 軽金属溶接, **47** (2009), 18-25.
- 鈴木寿, 伊藤吾郎, 小山克己: 軽金属, **34** (1984), 708-716.
- 山内重徳, 加藤健志: 軽金属, **41** (1991), 238-244.
- 杉山禎彦, 難波圭三: 軽金属溶接, **23** (1985), 555-561.
- 江口勇: 軽金属溶接, **14** (1976), 276-282.
- 堀田昭三: 軽金属溶接, **48** (2010), 459-462.
- 竹本正, 岡本郁男: 軽金属, **32** (1982), 646-653.
- 前田興一, 伊藤泰永: 住友軽金属技報, **33** (1992), 135-143.
- 馬場義雄, 直江正久, 萩原理樹: 住友軽金属技報, **12** (1971), 139-150.
- 池田洋: 住友軽金属技報, **21** (1980), 101-108.
- 川瀬寛, 山口元由, 石川和徳: 軽金属, **29** (1979), 505-512.
- 田辺善一, 馬場義雄, 宇野照生, 萩原理樹: 住友軽金属技報, **27** (1986), 1-9.
- T. Fukuda, H. Ikeda, Y. Hasegawa and T. Nagasawa: 住友軽金属技報, **42** (2001), 49-56.
- T. Nagasawa, Y. Hasegawa, H. Ikeda and T. Fukuda: 住友軽金属技報, **42** (2001), 57-63.
- S. Yamauchi, Y. Shoji, K. Kato, Y. Suzuki, K. Takeuchi and Y. Isobe: 住友軽金属技報, **34** (1993), 140-146.
- Y. Isobe, K. Takeuchi, M. Tanaka, M. Mori, S. Yamauchi and K. Namba: 住友軽金属技報, **34** (1993), 245-252.
- W. E. Cook, T. E. Wright and J. A. Hirschfield: 軽金属溶接, **16** (1978), 365-371.
- 小笠原明徳: 軽金属溶接, **50** (2012), 2-7.
- 藤吉達也: 軽金属溶接, **38** (2000), 181-187.
- 磯部保明: 材料と環境, **48** (1999), 469-475.
- 池田洋: 住友軽金属技報, **41** (2000), 134-146.
- 田中宏和, 池田洋: 軽金属学会第97回秋季大会講演概要集, (1999), 123-124.
- 江戸正和: 軽金属溶接, **47** (2009), 102-109.
- 正路美房: 住友軽金属技報, **48** (2007), 87-94.
- 山下尚希, 正路美房: 軽金属, **59** (2009), 344-349.
- 手島聖英: 軽金属溶接, **50** (2012), 15-21.
- 石原聡: 軽金属溶接, **45** (2007), 426-430.
- 江部陽一: 軽金属溶接, **42** (2004), 435-439.
- R. S. Timsit and B. J. Janeway: J. Mater. Res., **8** (1993), 2749-2752.
- 兵庫靖憲: 軽金属溶接, **45** (2007), 420-425.
- 川勝一郎, 安部正勝: 軽金属溶接, **39** (2001), 472-479.
- 久富裕二: 住友軽金属技報, **49** (2008), 172-178.
- 谷中一郎, 太田康夫: 軽金属溶接, **46** (2008), 557-564.
- 西村誠, 金子正文, 川瀬寛: 軽金属溶接, **41** (2003), 356-362.
- 神田輝一, 小西英一郎: 軽金属溶接, **42** (2004), 440-445.
- 三井浩次郎, 安孫子哲男, 上田文生, 難波圭三: 軽金属, **43** (1993), 171-178.
- 山口進吾, 奥戸行一郎, 横谷英之, 小堀徹: 住友軽金属技報, **33** (1992), 173-181.
- 山口進吾: 溶接技術, **45** (1997), 110-114.
- 金子幸雄, 竹内勝治, 青景和成, 萩原理樹: 住友軽金属技報, **35** (1994), 228-238.

- 67) 伊藤泰永：住友軽金属技報, **39** (1998), 136-141.
- 68) 小田和裕, 阿座上雅芳, 加藤健一, 永岡齊, 奥戸行一郎, 難波圭三：軽金属, **41** (1991), 728-732.
- 69) 服部守成：電気車の科学, **46** (1993), 26-31.
- 70) 服部守成：アルミニウム, **3** (1996), 148-154.
- 71) 石丸靖男, 服部守成：溶接技術, **45** (1997), 115-122.
- 72) 伊藤泰永：軽金属溶接, **37** (1999), 151-157.
- 73) 低温接合委員会：軽金属溶接, **45** (2007), 471-478.
- 74) 難波圭三, 伊藤泰永：アルミニウム, **4** (1997), 485-491.
- 75) 森昌吾, 藤啓司, 柳本茂, 古川裕一：軽金属, **61** (2011), 119-124.
- 76) 納康弘, 田中克征：軽金属溶接, **50** (2012), 8-14.
- 77) 三宅秀幸, 江戸正和：軽金属, **65** (2015), 396-402.
- 78) T. Yamayoshi, Y. Itoh and A. Fukumoto：VTMS, (2017), 79-86.
- 79) 山吉知樹, 伊藤泰永：軽金属学会第129回秋季大会講演概要 (2015), 261-262.
- 80) 黒崎友仁, 村瀬崇, 寺山和子, 石雅和, 戸次洋一郎, 二宮淳司, 新倉昭男：軽金属学会第132回春季大会講演概要 (2017), 107-108.



伊藤 泰永 (Yasunaga Itoh)
(株)UACJ 技術開発研究所 第七研究部