ここまで来た溶接・接合技術

⑥ ろう付, その技術変遷と課題*

恩澤 忠男**, 雀部 謙***

恩澤 忠男

雀部 謙

Brazing: Technical Review and Problem*

by Tadao ONZAWA** and Ken SASABE***

キーワード: ろう付, 銀ろう, ニッケルろう, アルミニウムろう, チタンろう, 雰囲気ろう付, 液相拡散接合, セラミックス, 宇宙航空ろう付, はんだ付

1. はじめに

ろう付技術について、現在までの技術を振り返りながら現状について述べ、これからの課題について提案するという大きなテーマをいただいたが、筆者らの能力ではとても確かな展望は不可能であると同時に、ろう付全体についてそれを行うのは、あまりにも範囲が広すぎる。しかし、ここでろう付について技術変遷を顧みることも意義があると考え、紹介してみることにした。なお、正確さを欠くことはお許し願いたい。

本稿の構成としては、まず簡単にろう付現象の概念とろう付の簡単な歴史、そのあと各種のろうの発展と現状を述べて、さらに液相拡散接合や雰囲気ろう付、航空宇宙関係及びエレクトロニクスにおけるはんだ付などトピックス的事項を紹介し、最後にろう付技術の現状のまとめとこれからの課題について考えてみた。

2. ろう付現象の概念

ろう付は、日本では溶接法の1種として分類されているが、AWSでは「welding, brazing and soldering」と記述されているようにろう付以外の溶接法とは一応区別されている。日本のJISではろう付とはんだ付を総称してろう接と呼び、「ろう又ははんだを用いて、母材をできるだけ溶融しないでぬれ現象で接合する、ろう付及びはんだ付の総称」、またぬれ(現象)は「母材表面に溶融し

たろう、はんだ又はフラックスが広がること」のように定義されている。

これらのことを平易にいえば、母材の融点より低い融点を持つ金属又は合金(ろう)を用い、まず母材を十分加熱して母材の熱でこのろうを溶かし、ぬれさせて接合する方法といえる。ここで大切なことは、ろうを直接加熱して故意に溶かさないことである。

また、母材上にろうが広がるためにはその表面に酸化皮膜などのない清浄な表面であることが必要である。このためにその酸化皮膜を除去し、かつ加熱中に再酸化を防ぐために、フラックスや還元雰囲気等が使用される。

なお、ろうの語源としては、ろうそくに用いられる「蠟」から来た言葉と思われる。一説にはドイツ語の Lot (solder) から来ているともいわれている¹⁾。

3. ろう付の歴史

ろう付技術の歴史は非常に古く、紀元前3400年にメソポタミア(いまのイラク付近)で銀ろうや金ろうが用いられたことが分かっている²⁾。また、中国でも秦の始皇帝の兵馬俑で小型の金属製馬車の接合にろう付が用いられたことが見いだされている³⁾。

日本のろう付の歴史も古いようである。正倉院には古くからの幾多の宝物が保存されており、ろう付製品も見られるが、その技術がすべて日本のものとはいえない。桃山時代にはろう付による金属工芸品が作られており、これはまさに日本独自の製品と考えられる¹⁾。

現在非常に多くのろうがJISに規定されている。これらの規格の多くはAWSの翻訳に近いので、ほとんどが米国から来たといってもよい。しかし、銀ろうは日本でも古くから五分ろうや三分ろうとして使用されてい

*原稿受付 平成11年11月1日

**正 員 東京工業大学 Tokyo Institute of Technology

***正 員 金属材料技術研究所 National Research Institute for Metals

たり。銀ろうについては、次章で詳しく述べる。

4. 各種ろうの技術変遷と現状

4.1 銀ろう

銀ろうは、接合強度に加え良好な流動性や耐食性に恵まれ、アルミニウムとマグネシウムを除くほとんどすべての金属とセラミックスなどの非金属のろう付に利用できる万能ろうである。

日本の銀ろうは古くから飾り屋が使用しており、例えば三分ろう (77Ag-14Cu-9Zn) は銀1匁に「せば (6:4 黄銅)」板三分の割合で溶融して作っていた⁴⁾。したがって、日本の銀ろうは銀に黄銅を入れて合金にしたもので銀が主成分になっていた。一方、欧米では黄銅ろうが工業的に広く使われ、ぬれ性や融点を改善するために、銀が加えられている。

図1に (Ag+In) 量と融点 (液相線) の関係を示す。銀量が増えることによって融点が低下することが明瞭である。価格の高い銀をできるだけ減らしたろうを使用する方が経済的なため、低銀ろうの要望が高いが、図1に見られるように融点の上昇が避けられない。この融点を低下する合金成分元素としてカドミウム (Cd) とインジウム (In) が挙げられる。

Cd (図1中の×印) は非常に大きな融点降下作用があるが、有害であることから、Cd入りの銀ろうの使用を禁止しているところが多い。一方、In は価格が高いことが難点となっている。

近年、雰囲気用のろうが AWS 規格では多くなっている。基本的には Zn 及び Cd フリーのろうがそれにあたる。また、規格にはなっていないが、セラミックス接合用の Ti 入りの銀ろうも、かなり普及し使用されるようになってきた。

4.2 ニッケルろう

ニッケルろうは Ni に Si, B, Cr, P など添加して融点を下げ、ぬれ性を向上させたもので、高温強度が高く耐熱性及び耐食性が優れている。ステンレス鋼、ニッケル基およびコバルト基合金などの耐熱・耐食ろう付用に開発されたものであるが、ステンレス鋼と色調を合わせやすので、最近は食器などでも広く使われている。図2に

図2 ニッケルろうの系統図

図1 Ag+In 量と液相線温度の関係

現在のニッケルろうの系統図を示す。基本的には、Ni-B-Si系と、Ni-P系に分類され、他の元素は性質向上のため添加されている。

ニッケルろうはアメリカが発祥の地であるが、もともとは硬化肉盛用に使われていた合金をろう付にも使うようになったものであり、純粋にろう付用として開発されたものではない。したがって、基本的に凝固組織は硬く、接合部にもろい相を形成しやすい。脆化相を縮小・消失させた信頼性の高い継手を得るためには、接合間隙をできるだけ狭くし、加熱時間を長くしたり後熱処理などが行われている。

耐熱性や耐食性を活かして、高価な貴金属ろうに代るろうとして、とくに原子力や航空宇宙関係で注目され、さまざまな改良が試みられてきたが、耐食性や耐熱性を損なわずに脆化相を作らない系はまだ開発されていない。しかし、継手の性質解明や脆化相ををなくす試みが英国とドイツを中心にして70年代以降精力的に行われた結果、「じゃじゃ馬を手なずける」ようにして使えるようになった。ヨーロッパでは適正なろう付温度、ろう付時間および接合間隙の関係を表す TETIG (Temperature-Time-Gap の略) ダイアグラムで脆化相を形成しない条件を見つける方法が提案されている⁵⁾。

ニッケルろうがわが国に導入されたのは、60年代中頃で、高度成長に突入した時期であり、原子力発電や航空機産業が脚光を浴び、ニッケルろうが注目された。しかし、ニッケルろうを必要とする産業が欧米追随型であったため、主として米国のスペックの借用で用が足りてしまい、身を粉にして自分で研究する程には切実な問題意識は生まれえなかった。しかし、80年代後半になると航空・宇宙関係もほとんど自立し、わが国独自の評価方法も提案されるようになった⁶⁾。

ろう自体が本来硬いので通常は粉末状で使う。粉末は表面の酸化物の影響を無視できず、脆化相とともに厄介な問題である。しかし、比較的最近アモルファス状の箔を作ることができるようになり、酸化物がほとんどないろうを必要最小限供給することが可能になって、脆化相と酸化物の両方が同時に好転して、継手の性能も向上した。

4.3 アルミニウムろう⁷⁾

アルミニウムろう付製品の代表は、各種の熱交換器類で、クーラー用コンデンサ、エバポレータなどが大量生産されており、最近ではラジエータのアルミニウム化も急速に進んだ。

アルミニウムとその合金は安定な酸化皮膜を形成するので、溶融ろうとアルミニウム母材との良好な金属接合を得るために使用するフラックスは、この安定な酸化皮膜を電気化学的に除去できる能力が要求され、歴史的には塩化物とふっ化物を混合したいわば強力な腐食性を持

つフラックスが使用されてきた。このため、古典的な小型少量生産用のトーチ法、塩化物+ふっ化物系フラックス使用の炉内ろう付などではろう付後のフラックス洗浄は不可欠の工程となっていた。

その後、公害及び洗浄コストの問題から真真空ろう付、雰囲気ろう付など酸素濃度と水分濃度を抑制した炉内ろう付法が1970年代後半から急速に発達し、フラックスを用いることなくろう付ができる無洗浄プロセスとして確立されてきた。なお、真真空ろう付はMgゲッターを使用するフラックスレス方法である。

さらに、1980年代後半から非腐食性フラックス法(ノコロック法)が真空法に代わって発展してきた。この方法は、 $KAlF_4$ を主体としたふっ化物系フラックスを用い、露点と酸素濃度を制御した窒素ガス雰囲気中でろう付を行う。フラックス残渣が水に不溶性で腐食性を持たないため後の洗浄工程が必要ないなど、多くの利点がある。

いずれも、製品の信頼性、コスト、環境問題などへの対応によるもので、現在、大量生産用に採用されているろう付法は、塩化物系フラックス法、真空法及び非腐食性フラックス法の3つに大別できる。

なお、図3にはフラックスろう付とフラックスレスろう付に大別した分類を示す。

4.4 チタンろう

チタンは軽いわりに強度が高く、また耐食性が優れている。非鉄材料ではアルミニウム、銅に次ぐ重要な材料である。我が国では耐食材料として化学機械などの用途が多い。また、最近ではめがねフレームなど民生品にも多く使用されている。米国では航空宇宙産業が早くから発展し、強度の高いチタン合金が種々開発された。

チタンのろう付には、銀系、アルミニウム系のろう材が古くから使用されている。特に純銀はろう材として定評がある^{8,9)}。これらのろうは現在でも広く使用されているが、問題としては継手強度が低く、耐食性が十分でない。

チタン系のろうは、チタンやジルコニウムと銅やニッケルの共晶を利用したろうが早くから開発されてい

図3 アルミニウムのろう付法の分類

表1 主なチタンろうの組成，ろう付温度，せん断強さの例

分類	組成	ろう付温度 (℃)	せん断強さの例 (MPa)
Ag 系	Ag	970	117
	Ag-15Cu	920(1m)	370
	Ag-20Cu-2Ni-0.4Li	920	300
	Ag-3Li	800	160
	Ag-15Mn	980	137(Ti-6-4)
	Ag-30Al-5Cu	680	431(Ti-6-4)
Al 系	3003+4004**	610	206*
Ti 系	Ti-10Cu-25Ni	1000	258
	Ti-15Cu-20Ni	950	354
	Ti-37.5Zr-15Cu-10Ni	850(5m)	350*
	Ti-25Zr-50Cu	900(10m)	1050(Ti-6-4)*

注 1) ろう付温度の()内はろう付時間 (mは分)
2) せん断強さ中の(Ti-6-4)は Ti-6Al-4V 合金、他は CPTi
3) *は引張強さ。**は Al プレージング・シート

図4 チタンろうによる Ti-6Al-4V 合金の
ろう付部の組織

る^{10,11)}。このろうは耐食性が良好で、継手強度も高く母材に匹敵する。しかし、難点としては、加工性が悪いことと、融点が高いことにある。表1に主なチタンろうの組成，ろう付温度，せん断強さの例を示す。

加工性については、熔融凝固したろうはもろく硬いので、箔にすることが難しい。そのためチタン、ニッケル、銅などの箔をろう組成に応じて厚さを変え、積層させた積層ろう¹²⁾と、急冷凝固法によってアモルファス化した箔や粉末がある¹³⁾。しかし、急冷凝固法の場合、チタンはセラミックスとの反応性が強いのでノズルの選択が難しい。現在、石英ガラスが黒鉛が使用されている。

一方、従来のチタン系ろうは融点が高く、ろう付温度が1000℃を超え、Ti-6Al-4V 合金などではβトランザス温度以上になるため母材がぜい化する。したがって、従来のα+βチタン合金には使用できなかった。

10年ほど前850℃程度の低融点のろうが開発された¹³⁾。組成としては、Ti-Zr-Cuの3元系とTi-Zr-Cu-Niの4元系ろうで、図4にろう付部の組織例を示

す。ろう付温度はTi-6Al-4V合金のβトランザス温度より低いため、母材の元の比較的細かい組織がそのまま保たれている。また強度も高く、Ti-6Al-4V合金のろう付継手の引張試験結果ではβトランザス温度以下の950℃で母材破断になっている。また、疲労試験結果もかなり良好な値を示している。

チタンは、これからも広く使用されると思われ、現在はチタン用ろうは銀ろう系も含めて、広く研究されるようになってきた。

4.5 セラミックス及び超硬合金

セラミックスの特徴は、高温で高い強度を持っている点にあり、他に優れた耐食性、耐摩耗性、高硬度、耐酸化性、低熱膨張係数、高い電気抵抗を持っている。現在、構造用セラミックスにはアルミナ、ジルコニア、炭化けい素、窒化けい素、サイアロンなどの単一材と炭化けい素ウィスカーを含有したアルミナなどの複合材がある。

セラミックスの接合法は、以前「ハーメチックシール(気密封入)」と呼ばれ、古くはガラスに対する金属導線の封入であったが、その後金属とセラミックスの気密封着を指す言葉になった¹⁴⁾。この方法は主として電子管工業の発展に伴って進歩したもので、ドイツで初期に開発され、その後米国で大規模な開発が進められた。接合方法は現在の方法と同じで、メタライズ法と活性金属法になる。

その後、自然界には存在しない窒化物系のセラミックスも開発され、ニューセラミックスあるいはファインセラミックスと呼ばれる構造用セラミックスが広く実用化されるようになった。

セラミックスと金属の接合には、現在もろう付が最も広く使用されている。構造用セラミックスは非常に安定な化合物で液体金属をぬれさせるのが非常に難しいため、セラミックスにろうをぬれさせることが最も基本的な事項になる。

その方法は二つあり、一つはメタライズ法でセラミックス表面にぬれやすい皮膜を作る方法、もう一つは活性金属法でぬれを活性化させる元素をろうに添加する方法で、比較的最近発達した技術である。

メタライズ法でアルミナに対して最も広く使用されている方法がモリブデン-マンガン法(Mo-Mn法)である。この工程をまとめたのが図5の左側に示した¹⁵⁾。この方法は活性金属法に比べて工程が複雑であるが、作業工程がよく知られていること、自動化が容易であることなど多くの利点があり、現在も多く使用されている。

活性金属法はろう中にチタンやジルコニウムなどの活性金属を入れてろう付する方法(図5の右側)で、ろう中のチタンがセラミックスと反応し、セラミックス表面をろうがぬれて広がる。現在用いられている活性金属ろうは銀ろう系が多い。

図5 Mo-Mnメタライズ法と活性金属のろう付手順

セラミックスと金属の接合では両材料の熱膨張係数の大きな差が問題になり、実際セラミックス-金属のろう付継手には複雑な残留応力の分布が存在する。この残留応力の軽減がセラミックス-金属のろう付の鍵となっている。その一つは熱膨張係数がセラミックスと近い金属を使用する方法で、これが最も効果的である。

他の方法は、継手部に適切な中間層を入れることである。中間層としては、それ自体の変形によって応力を軽減するもの、最も応力の集中したところからセラミックスを分離させるものなどの方法である。中間材として他に、セラミックスから金属に徐々に組成を変化させた傾斜機能材料もある。

超硬合金は1種類あるいは2種類以上の硬い炭化物の粉末を金属バインダーを用いて焼結した材料で、主に切削用チップとして使用されている。6~10%のコバルトが入ったタングステンカーバイド(WC)がその代表である。金属とろう付する時に注意しないといけないのが、セラミックスの場合と同様熱膨張係数が大きく違う点である。

5. ろう付関連のトピックス

5.1 雰囲気ろう付

炉内を大気から遮断し、その中で還元性ガス、不活性ガス、中性ガスなどの雰囲気中で保護してろう付を行うのが、保護雰囲気ろう付で、炉内を真空にして行う場合を、真空ろう付といい、総称して雰囲気ろう付という。

図6は大型真空炉で、図7は小型の真空炉で、写真に見られるようにろう付後炉心管部を取り出し、急速冷却ができるようにしたものである。

雰囲気ろう付は、無酸化雰囲気中でフラックスを用いないことから、銅ろうやニッケルろうなど高融点で大気中

図6 大型真空炉（日本発条㈱提供）

図7 小型真空炉（炉心管を水冷することにより急速冷却が可能）（東京プレイズ㈱提供）

のろう付が難しいろうが使用でき、ボイドなどの欠陥の少ないろう付部が得られる。また、フラックスを用いるろう付のように湯洗や酸洗いなどの後処理は一般に不要である。場合によっては母材の熱処理や表面処理（光輝処理）も同時に行うことができる。

装置は複雑で大型化するが、完全に自動化することもでき、大量生産向きで、他の特徴としては、温度管理が容易で、全体加熱のため、熱ひずみや変形が少なく、同時に多数箇所のろう付ができること、真空雰囲気では脱ガス作用によって継手部の品質が向上し、気密性の高いろう付ができるなどが挙げられる。

このように雰囲気ろう付には種々の特徴があるが、最大の特徴としては、ろう付条件さえ確定できれば、操作は簡単で、安定したろう付部が容易に得られるため、熟練作業者を特に必要としないことである。そのため、最近雰囲気ろう付が多く使用されるようになってきた。

雰囲気ろう付、特に水素雰囲気ろう付では、露点（水素の純度の指数、特に水分のレベル）が重要であるが、一般に触媒や吸着剤を用いて露点の低い雰囲気を作るより、真空にして酸素分圧や水蒸気分圧を下げる方が楽で

ある。特に、Ti, Zr, Mo, Nbなどはわずかの酸素や窒素などのガスがあっても、もろくなる材料では真空ろう付は最適である。

一方、真空ろう付では蒸気圧の高い元素、特に銀ろうではCd, Znが蒸発しやすい。したがって、Znの入らない銀ろうがAWS規格では多くなっている。

なお、金属の酸化物は高温に加熱されると分解する。この現象を解離と呼び、これは真空度によって支配されるため、鉄鋼材料などでは表面の酸化皮膜が真空ろう付では容易に解離し金属に還元されることになる。Al, Ti, Beなどの安定な金属酸化物は、かなり高真空 (10^{-10} torr 程度) でも解離されない。このような酸化物の場合は、フラックスによって除去する。

5.2 液相拡散接合

液相拡散接合は耐熱超合金において母材と同等の接合部が得られるという点で、最もすぐれた接合法と考えられる。その原理を簡単に説明すると、図8に示すようになる。インサート材(ろうに相当)は母材組成に類似したもので、母材より融点が低くなるように融点降下元素を含んだものを使用する。加熱しインサート材が溶けるまではろう付と同じであるが、その温度に保持していくと、インサート材中の融点降下元素が母材中に拡散し融点が上昇して等温凝固し、接合部組織が母材と一体化される。

このような接合法は特に最近考えだされたものでなく、1950年代にチタンの接合にニッケルや銅の薄い箔を用い、チタンと共晶反応を起こさせ、その温度に保っていると、ニッケル、銅が母材に拡散し、等温凝固を起こすことが発表されている^{16,17)}。現在でもチタンの接合方法の一つにこの手法が用いられている。その後、これを耐熱超合金に適用した活性拡散接合(activated diffusion bonding)¹⁸⁾、TLP接合(transient liquid phase bonding)¹⁹⁾などが開発されてきた。

この方法が成功するかどうかのポイントはインサートメタルの組成とその供給方法にあり、粉末状、アモルファス状の他にレーザー溶接などで母材表面に薄層を作ることもされている。材料が単なる铸造合金から、一方向凝固材、単結晶材、さらには酸化物などの分散強化合金と発展してくると接合方法は一層難しくなっていくが、この液相拡散接合のみが、これらの材料の接合を満足に行える方法と考えられている。

現在、ガスタービンやジェットエンジン等の耐熱合金や鉄系材料など、この接合法は広く適用されている。今後適用範囲が広がっていくものと思われる。

なお、この方法は米国では拡散ろう付(diffusion brazing)と呼ばれている。

5.3 航空宇宙関係のろう付技術

ジェットエンジンにろう付を使う試みは、1944年頃にドイツで行われたようである。85Ag-15Mn合金でシートをろう付したタービンプレードと静翼がひそかに製造された。戦後、米国がこのろうを持ち帰ってジェットエンジンを試作したところ、エンジンが過熱したときにろう付部がはずれてしまうこと以外はすべてうまくいったということである。その後、1948~1949年にカーチス・ライト社で軽量で高出力のジェットエンジンを開発する計画が立てられ、部品の75%がろう付でつくられた²⁾。その頃のエンジン部品はすべて铸造材や鍛造材、あるいは棒材から機械加工でつくられていた。溶接も使われてはいたが、技術はまだ未熟であり、変形が大きな問題であった。

わが国での航空宇宙関係のろう付は、エンジン部品の補修に耐熱ろう付が利用されたのが始まりのようである。1945年の敗戦により航空機に関する研究や製造が禁止され、1952年に解禁されたが、はじめは米軍装備の修理から始まった。その後主として米国からのライセンスによる生産で技術を修得し、現在はほぼ肩を並べるようになっている。

ジャンボジェット機が登場して空の大量輸送時代が到来すると、そのエンジンの補修だけでも大量のろう付が行われ、金ろうの屑で羽田に金山ができるのではないかという冗談が飛び出す勢いであった。実際、定期検査でタービンプレードに亀裂が発見されると始めは新品と交換していたが、ろう付で補修再使用することによりブレード1枚数十万円の節約になり、1機あたり年間数億円の節約になるというから、金山の冗談もあながち荒唐無稽とは言えないのかもしれない。

航空機関係では真空炉による炉中ろう付が中心で、用途や母材の種類に応じてAu, Ag, Ni, Co, Cu, Al基合金が使われている。耐熱部品ではニッケルろうで問題が

図8 液相拡散接合法の接合原理

ない場合はニッケルろうを使うが、問題がある場合には金ろうやパラジウムろうを使う。寸法精度が要求される部品や薄肉材などの接合に欠かせない接合技術であり、ジェットエンジンではチューブ、燃焼器、コンプレッサー静翼、タービンブレード、タービンシール、ハニカム構造などに多用されている。最近では拡散ろう付も実用的に使われている。

宇宙関連機器でも航空機と同様に、開発の初期はすべて米国からのライセンス頼りであった。しかし、現在運用されている H2 ロケットはすべて自主技術によるもので、欧米と肩を並べるものとなっている。

宇宙開発は 20 世紀の最も華々しい技術上の成果の一つであるが、ろう付にとっても最も華々しい利用のされ方といえるかもしれない。スペースシャトルや衛星投入に使われる大型ロケットは液体水素と液体酸素を混合して爆発的に燃焼させて推力を得る液体燃料/液体酸素エンジンであるが、エンジンの主要部分がろう付で組み立てられている。

5.4 エレクトロニクスにおけるはんだ付

20 世紀中葉に出現したコンピュータは、人類史上最大の技術的エポックの一つであろう。それから 50 年、真空管からトランジスタ、IC を経て LSI の時代になると電子機器は飛躍的に発展し、その組み立て技術の中心的役割を担ってきたのが、はんだ付である。

図 9 は真空管から ULSI に至る演算素子の変化と技術計算用コンピュータの演算速度の変化を示したものである。コンピュータと同じく、家庭用電子機器の高機能化・高性能化・小型化も主として集積回路の高度化に依拠して発展しており、それぞれの世代の代表的な家電製品を図 9 に同時に示した。

回路の高集積化・高密度化により接続端子数が増加し、端子の間隔は狭くなり、はんだ付は微細化との戦いを強いられた。現在ではピッチ間隔 0.25mm のはんだ付も行われており、微細化はとどまるところを知らない。

図 10 は、はんだ付による部品装着様式の変遷を示し

たものである。1960 年代は真空管の時代であり、部品のリード線を一つずつ手作業でコテはんだ付で接続した。

1947 年にトランジスタが出現すると（わが国で市場に出たのは 1955 年ころ）、電子機器は一気に小型化した。次いで、IC さらに LSI に、1980 年代にはさらに大規模化して VLSI となった。

1975 年ころからプリント配線板が使われ、リードを配線板の孔に挿入してはんだ付されるようになった。はんだ付は次第に一括フロー方式が主流となって行き、1985 年代になると高密度実装の要求が強くなり、表面実装（SMT）が行われるようになった。プリント基板上に印刷でハンダを供給し、リードなしのチップ部品を配置して加熱はんだ付するリフロー方式が急速に普及した。「実装」という言葉はこの時期に一般的になった。「マイクロソルダリング」という言葉もこのころから使われるようになった。

1990 年代になると、実装密度のいっそうの向上を目指して、パッケージを省いたチップを露出した状態で搭載するベアチップ実装が行われるようになった。

6. ろう付技術の現状と今後の課題

R. L. Peaslee は 1991 年の AWS 年次大会の Adams Lecture でろう付の発展と現状を述べている²⁾。そこで、ろう付技術は自動車産業、熱交換機、航空宇宙産業で広く使われ、各産業の発展に大きく貢献したことを述べている。これを参考にろう付の発展と現状及び今後の課題について述べてみたい。

ろう付方法は手動による方法と自動による方法があるが、以前に比べて現在は圧倒的に自動化されている。この理由は安定した製品が大量に生産されることにある。アルミニウムろう付で述べたが、自動車工業ではより長い寿命と高い品質保証のため、アルミニウムの真空ろう付が広く行われている。その理由はフラックスを使用した場合、後処理後の残留フラックスによる腐食の問題が

図 9 技術計算用コンピュータの演算速度の変遷

図 10 はんだ付方式の変遷

ある。しかし、最近是非腐食性のフラックスを使用し、窒素ガス中でろう付を行い、フラックス除去の必要がなくなった方法も開発されている。

ろう付の他の大きな特徴として、非常に多数箇所ある接合部を一度に接合できることである。特に熱交換器は接合部が多く、このろう付の長所を生かせる製品である。その材料は多岐で、銅及び銅合金、アルミニウム、鉄系材料やチタンなど広く使用されている。今後もさらに広い分野に用いられると考えられる。

一方、ろう付の自動化を発展させた一つは、ベルトコンベア方式により、水素やアルゴン等の還元及び保護雰囲気下のろう付装置の開発、普及が大きい。雰囲気中で重要なことは水分に関係した露点の問題である。露点を下げる精製技術と同時に他からの混入を防ぐことが重要である。現在の装置はそれらの点で優れたものが普及している。図 11 に装置の外観を示す。

抵抗圧接時にろうを接合部に入れて接合する抵抗ろう付も、電気・電子産業では広く用いられている。接合部にろうを挿入することによって接合性をより安定にできるためといえる。

セラミックスのろう付も近年多くなっている。その難

しは前に述べたように、ろうのぬれ性と熱膨張係数の点にあり、これを克服することが重要である。セラミックスと金属の接合例を図 12 に示す。

セラミックスの接合については一時期非常に多くの研究があったが、バブルの崩壊と共に急激に少なくなってきた。しかし、これは構造物セラミックスの接合研究がかなり出尽くしたことも一つの原因と考えられる。しかし、セラミックスは非常に範囲が広く、超伝導体、強誘電体、熱電素子など機能性セラミックスを中心に接合の研究²⁰⁾は発展すると考えられる。

一方、セラミックス同様超硬のろう付も現在実用面で非常に広く行われている。ここでも熱応力を緩和することが重要で、いろいろな方法が試みられている。しかし、これらの方法は各企業の大きなノウハウとなっている。

航空宇宙関係では、わが国で開発された H2 ロケットの液体水素/液体酸素エンジンが挙げられる。これを図 13 に示す。主要な構造物である燃料噴射器、燃焼室、ノズルスカートはいずれも数百本のチューブを金ろうおよびパラジウムろうでろう付して組み立てている。燃焼時のスカートの内側は約 3000℃ の高温ガスにさらされるので、冷却するためにチューブ内に液体水素気流を流す。このため、ろう付部は極めて厳しい使用環境に置かれる。

21 世紀を目指して次世代超高速輸送機の開発が進められているが、エンジンも新概念のターボラムエンジンやスクラムジェットエンジンなどへ進化すると考えられ、それらに使われる材料は融接が不可能なものが多く²¹⁾、ろう付による接合が重要性を増してくるであろう。

図 11 ベルトコンベア方式による雰囲気ろう付装置
(東京プレイズ㈱提供)

図 12 高純度アルミナとコバル合金のろう付例 (直径約 15cm)

図 13 わが国初の液体燃料ロケットエンジン (三菱重工業㈱のパンプレットによる)

エレクトロニクスにおけるはんだ付の問題としては、微細化によるはんだ付部の信頼性と、鉛規制による環境問題に分けられる。

一つは、表面実装が本格的に導入されると、はんだの印刷性、ぬれ、ツームストーン現象、はんだボール、ブリッジ、マイグレーション、熱応力等々、それまでほとんど問題にならなかったことが一気に噴き出した。大型コンピュータは1プロセッサで接続点が数万・数百万点にのぼり、そのすべての接続点に非常に高い信頼性が求められるという世界であるのに対し、応力ひずみ曲線さえまともなものがなかったのがそれまでのはんだ付の世界であったから、はんだ付にとっては天下の一大事であった。

はんだ付にとってもう一つの大きな問題は、環境問題による鉛規制である。90年代初頭からPbフリーはんだの研究が各国で行われてきたが、現行のSn-Pb系はんだに代わるPbフリーはんだは未だ開発されていない。問題解決の困難さからか、欧米諸国での研究は以前ほどの活気がないが、我が国では1998年4月から主要メーカーが相次いでPbフリーハンダの全面導入を宣言し、一部実用化されている。これまで環境問題では後れを取ってきた我が国が、この面では世界でもっとも積極的のようである。

電子回路の小型化は機能ブロックのLSI化とモジュール化の繰り返しによって進み、LSIの高密度化はとどまるところを知らない。同時に、実装技術はますます重要な技術になり、はんだ付技術に対する要求もますます過酷になるのではないだろうか。

メソポタミア以来の歴史を持つはんだ付技術は20世紀最後の4半世紀に5000年の太平の夢を破られ、21世紀を迎えていよいよその真価を問われる大きな岐路にさしかかっていると言えるのかもしれない。

7. 終わりに

ろう付技術の発展と現状及び課題について書いてみた。普段ろう付に関係ない方でも読みやすいようにと心がけたが、若干統一性を欠いた感がある。これを機にろう付に少しでも関心をお持ちいただければと思っております。

なお、もう少しろう付関係の勉強をされた方は、参考文献に示した専門書²²⁻²⁴⁾をお読みいただければと思います。

参 考 文 献

- 1) ろう接便覧編集委員会編：「ろう接便覧」；産報 (1967) p. 3-5
- 2) Robert L. Peaslee : Brazing: Yesterday's Art Has Become Today's Science; W.J. 71-10 (1992) p.25-31
- 3) Hua zigui and Fan peili : The Ancient Welding Technique of The Bronze Chariot Unearthed at Qin Shi Huang's Tome ; The International Conference on Quality and Reliability in Welding, Hangzhou China (1984) A-1-1
- 4) 塩田隆蔵：銀ろうの種類；ふれいず技術特集編その2 (1972) p. 66-69
- 5) R. Johnson: Weld. J. Oct. 1989, 185-s.
- 6) 坂本ら：界面接合委員会 IJ-12-87
- 7) 竹本正：アルミニウムのろう付(1)；軽金属溶接, 37-8 (1999) p. 29-38
- 8) H.L.Meredith : Weld.J.,33 (1954) 537
- 9) N.A.DeCecco and J.M.Parks : Weld. J., 32 (1953) 84s
- 10) R.A.long and R.R.Ruppender : Weld. J., 38 (1954) 1087
- 11) 竹内他：チタン用硬ろう材としてのチタンおよびジルコニウム基共晶合金の研究 (第1報, 第2報)；日本金属学会1967年春季講演会講演
- 12) S.W.Lan: Laminated Brazing Filler Metal for Titanium and Titanium Alloy; Weld. J., 61-10 (1982) 23
- 13) 恩澤忠男他：Ti系アモルファスニッケルろうによるCPTi及びTi-6Al-4V合金ろう付継手の組織と強度；溶接学会論文集, 5-2 (1987) 21
- 14) ろう接便覧編集委員会編：「ろう接便覧」；産報 (1967) p. 497-50
- 15) H. Mizuhara and K. Mally: Ceramic-to-Metal Joining with Activate Brazing Filler Metal; Weld. J., 64 (1985) 26
- 16) J. F. Lynch: Brazing by the Diffusion-Controlled Formation of a Liquid Intermediate Phase; Weld. J., 38 (1959) 85s
- 17) R.R.Wells: Microstructural Control of Thin-File Diffusion-Brazed Titanium; Weld. J., 55 (1976) 208
- 18) G. S. Hoppin and T. F. Berry: Activated Diffusion Bonding; Weld. J., 49 (1970), 505s
- 19) D. S. Duvall, W. A. Owczarski and D. F. Paulonis: TLP Bonding: A New Method for Joining Heat Resistant Alloy; Weld. J., 53 (1974) 203
- 20) 亀原信夫：電子セラミックスのメタライズ特性向上と電極の界面現象に関する研究；学位論文 (1999)
- 21) 森野美樹：宇宙往還機における材料と接合；溶接学会誌, 62-8 (1993) 33-38
- 22) 恩澤他：ろう付・はんだ付入門；産報出版 (1991)
- 23) AWS編：Brazing Handbook; American Welding Society (1991)
- 24) 日本溶接協会貴金属ろう部会編：ふれいず技術特集編その1 (1970)～その10 (1996), 日本溶接協会