

ろう付技術とマルチマテリアル化

東京ブレイズ(株) ○松 康太郎

1. ろう付の概要

ろう付は非常に歴史のある接合技術で、古くは有名な古代エジプトのツタンカーメンの黄金マスクに金ろう付が使われていたと言われている。さらに近代では、第二次世界大戦後のジェットエンジンの開発でニッケルろうが発明され、現在そのニッケルろう付なしでは航空機のジェットエンジンはもちろん、自動車の EGR クーラーや触媒の製造も出来なくなるなど、なくてはならない重要な接合技術となっている。そのため、ろう付は「古くて新しい接合技術」と言われ、数ある接合方法の中で古代から現代に至るまで“ものづくり”には欠かせない技術である。

そのろう付とは、JIS Z 3001 の溶接用語によれば「ろう又ははんだを用いて母材を出来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けの総称を「ろう接」と言い、ろうを用いて行う接合方法をろう付」と定義されている。そして、ろうとは接合部を形成するための充填材料で、JIS では「ろう接用溶加材」と定義している。つまり、ろう付はマクロでは母材を溶融させて接合する溶融接合とは異なり、接合母材の間に別の接合材であるろう（以下はろう材と呼ぶ）を介して接合が行われるため、もともと異なる母材同士の接合に向いている。従って昨今マルチマテリアル化が注目されているが、ろう付はずっと以前からマルチマテリアル化に貢献している接合技術と言えるであろう。

2. ろう付の基礎

マルチマテリアル化のためのろう付に限らず、ろう付を正しく行い良好な継手を形成するためには、ろう付の基礎を十分に理解することが重要である。これは他の接合技術も全く同じであるが、過去に発生した重大な事故で、その製品にろう付が関わっていた例を見ると、ろう付の基礎が正しく理解されていなかった例が見られる。従って、ここでは改めてろう付の基礎と考え方について述べる。

ろう付の基礎を語る際に分かりやすいのが、AWS 発行の **Brazing Handbook** で述べられているろう付の 5 要素を学ぶことである。その 5 要素は次の通りであり、さらにその詳細を解説する。

I. Design (継手設計)

II. Base Metals (母材)

III. Filler Metals (ろう材)

IV. Source of Heat (加熱源)

V. Protective Cover (保護雰囲気・フラックス)

2.1 Design (継手設計)

良好なろう付継手を得るには、まず継手設計が重要になる。特にマルチマテリアル化、つまり異種材料同士のろう付を行う際、継手設計がその成否に影響することが非常に多い。異種材料同士の接合で最も考慮しなければならないことは、母材同士の熱膨張差による接合部の残留応力があげられる。ろう付は必ず加熱を伴う作業であるため、接合母材が異なれば熱膨張も異なるのが通常であり、ろう材が高温化で熔融・凝固した後冷却されるとその熱膨張差が接合部にそのまま残留応力として残る。その結果、接合部の強度に影響が出たり、最悪の場合は母材の変形や破壊にまで至ったりする場合がある。さらにろう材自体も熱膨張・収縮されるので、それを考慮しなければならない場合もある。これらを解決する方法は、継手設計以外にほとんどないのが現状である。

次に継手設計で重要なことは、隙間の管理である。この隙間も母材同士の熱膨張差に影響されることが少なくない。実際の隙間はどれくらいが最適かはろう材の種類によっても異なり、一般的には流れの良い純金属や共晶合金の場合は狭い方が多い。一方合金系のろう材で、特に液相線温度と固相線温度の差が大きい様なろう材は、隙間が大きくてもろう材が十分に隙間を充填してくれる場合がある。ただし、この隙間の大きさはろう材の充填だけに注目するべきではなく、ろう材層に出来る凝固組織の内容に注意することが必要である。具体的には凝固組織内の残留共晶組織や界面に形成される金属間化合物などが硬くて脆い組織であり、それらが接合部の強度に影響がある場合は隙間の管理は狭い方が良い。

また、ろう材の供給方法による設計の考え方も重要である。ろう付におけるろう材は、その熔融温度に達しても母材がろうの熔融温度に達しない限りぬれることはない。つまりろう付を行うことが出来ない。そこで設計上で重要なのは、加熱前にろうを供給するか、加熱中に供給するかである。前者は炉中ろう付などの場合で、接合部に適量のろうをセットしてから加熱する。この場合重要なのは加熱中にろうが重力で落下しない事である。一方、後者はトーチろう付などの場合なので、加熱中にろうを供給するため重力による落下の心配をしないで良い場合が多い。なお、ろうが母材にぬれて流れる方向には、表面張力の高い方(毛細管現象の働く方)、温度の高い方、重力の働く方を常にイメージして設計することが望ましい。

2.2 Base Metals (母材)

ろう付によりマルチマテリアル化を実現するためには、当たり前前に接合される母材について十分に理解しておく必要がある。異なる母材はその機械的性質や物理的性質が異なるため、それらがろう付にどのように影響するか、さらに接合体としてどのような影響があるかを考慮することが重要である。

先に述べているが、ろう付によるマルチマテリアル化において最も考慮すべき母材の性質は熱膨張である。それは、ろう付温度での熱膨張とその異種材料間での隙間管理が重要であり、データブックなどの熱膨張係数が最も簡単な判断材料となる。しかし、場合によっては母材単体で相変態が起きるため、熱膨張係数のみで判断することは出来ない。

その他にもろう付において母材で重要な性質は、構成成分による酸化被膜の強さや蒸発成分の有無があげられる。これらは加熱を伴うろう付の加熱源の違いによる施工方法に大きく影響する。簡単に言えば、ろう付施工に影響のない母材が選択されなければ、ろう付で良好な接合体を得ることは出来ない。

2.3 Filler Metals (ろう材)

ろう材は多種多様なものがあり、JIS でもその金属系により分類されている。

ろう付によるマルチマテリアル化を実現するためには、慎重にろう材が選択されなければならない。それは母材との相性はもちろん、接合体として求められる性質を満たさなければならない。表 1 に主な母材とろう材の組合せを示す。

表 1 主な母材とろう材の組合せ

	Al Al 合金	Mg Mg 合金	Cu Cu 合金	炭素鋼 低合金鋼	鑄 鉄	ステンレス鋼	Ni Ni 合金	Ti Ti 合金	Be,Zr,V その合金	W,Mo,Ta,Nb その合金	工具鋼
Al,Al 合金	BAISI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mg,Mg 合金	X	BMg	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cu Cu 合金	X	X	BAG,BAu,BCuP BNI,RBCuZn	-	-	-	BAG: 銀ろう, BAu: 金ろう, BCu: 銅ろう, BNI: ニッケルろう, RBCuZn: 黄銅ろう BAISI: アルミニウムろう BMg: マグネシウムろう				-
炭素鋼 低合金鋼	X	X	BAG,BAu,BNI RBCuZn	BAG,BAu,BCu, BNI,RBCuZn	-	-					-
鑄 鉄	X	X	BAG,BAu,BNI RBCuZn	BAG,BNI RBCuZn	BAG,BNI RBCuZn	-					
ステンレス鋼	BAISI	X	BAG,BAu,BNI	BAG,BAu,BCu, BNI,RBCuZn	BAG,BAu,BCu, BNI,RBCuZn	BAG,BAu BCu,BNI	-	-	-	-	-
NiNi 合金	BAISI	X	BAG,BAu, RBCuZn	BAG,BAu,BCu, BNI,RBCuZn	BAG,BCu,BNI RBCuZn	BAG,BAu BCu,BNI	BAG,BAu BCu,BNI	-	-	-	-
Ti Ti 合金	BAISI	X	BAG*	BAG*	BAG*	BAG*	BAG*	BAG,BNI BAISI*	-	-	-
Be,Zr,V その合金	X	X	BAG	BAG	BAG	BAG	BAG	Y	Y	-	-
W,Mo,Ta,Nb その合金	X	X	BAG	BAG,BCu,BNI	BAG,BAu,BCu, BNI	BAG,BAu BCu,BNI	BAG,BAu BCu,BNI	Y	Y	Y	-
工具鋼	X	X	BAG,BAu,BNI RBCuZn	BAG,BAu,BCu, BNI,RBCuZn	BAG,BAu,BCu, BNI,RBCuZn	BAG,BAu BCu,BNI	BAG,BAu,BCu, BNI,RBCuZn	X	X	X	BAG,BAu,BCu, BNI,RBCuZn

X: 推奨できない。ただし、特殊な方法で接合は可能
Y: 一般にない組み合わせ
*: 特殊なろうが使用される

また、ろう材は様々な形状で供給される。銀ろうや銅ろうなど加工性に優れるため、ワイヤー、リング、箔、ペースト（粉末+バインダー）どほぼすべての形状に加工が可能である。一方、ニッケルろうなどは非常に硬い材料であるため加工性が良くない。そのため、ほとんどの場合がペースト（粉末+バインダー）で供給される。中にはアモルファスで箔状に加工される場合があるが、一般的に高価でさらに微量の B が添加されるのがほとんどである。

ろう材の供給される形状により継手設計が限定されることがあるので、ろう付による部

品設計ではこれらを同時に考慮する必要がある。

2.4 Source of Heat (加熱源)

ろう付は加熱を伴う作業であるため、必ず加熱源が必要となる。加熱源は様々あるが、加熱方法は大きく分けて 2 種類である。一つは大気（空気）中でろう付する場合で、その際は次に解説するフラックスが必要になる。もう一つは炉中ろう付で、大気（空気）をガスで置き換えて排除するか、真空状態にして大気（空気）を排除かである。それにより加熱源が異なる。

一般的なろう付加熱源は以下の通りである。

○大気ろう付

- ・ トーチ、バーナーなどの燃焼ガス
- ・ 高周波誘導加熱
- ・ 抵抗加熱、 他

○炉中ろう付

- ・ 雰囲気炉（連続式、バッチ式）
- ・ 真空炉（バッチ式、半連続式）、 他



図 1 連続式水素炉

2.5 Protective Cover (保護雰囲気・フラックス)

金属の表面には必ず酸化被膜があり、ろう付ではその酸化被膜を除去しなければろう材と母材が接触してろう付を完成させることが出来ない。そこで金属表面の酸化被膜を除去する方法は大きく分けて 2 種類ある。一つは大気ろう付でフラックスによる化学反応を利用して酸化物を除去する方法である。もう一つは水素などの還元雰囲気で酸化物を除去する方法である。下図にそのイメージを記す。

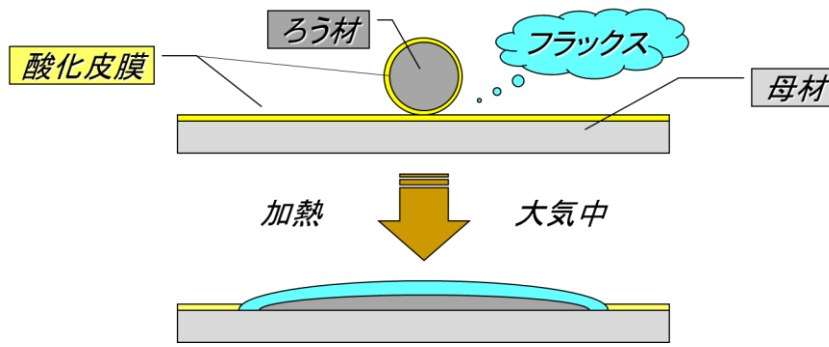


図2 フラックスによる酸化物除去のイメージ

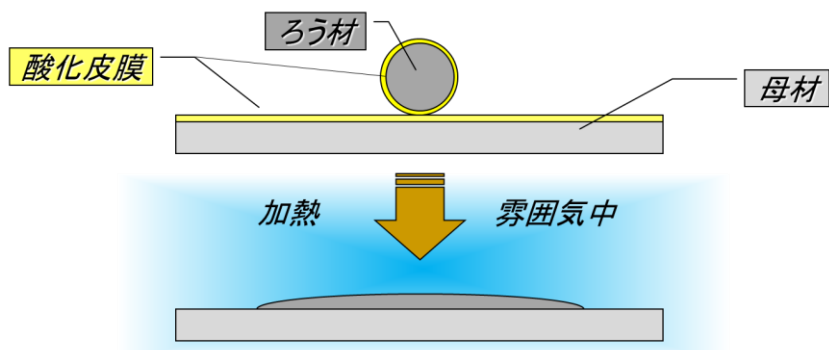


図3 還元雰囲気による酸化物除去のイメージ

フラックスと還元雰囲気は日本溶接協会やAWSで規格化されている。

表2 ろう付用フラックス (WES 5602)

種類	形態	ろうの種類	活性温度 ℃	参 考			
				適 用	推奨される母材	フラックスの 主な成分 ¹⁾	
FB1	A	アルミニウム合金 ろう	540～615	トーチろう付, 炉内ろう付 ディップろう付	アルミニウム, アルミニウム合金	塩化物, ふっ化物	
	D		560～630	トーチろう付, 炉内ろう付		ふっ化物	
FB2	A	マグネシウムろう	480～620	一部のマグネシウム合金の ディップろう付	マグネシウム合金	塩化物, ふっ化物	
FB3	A	銀ろう りん銅ろう	565～870	一般用	ろう付可能な鉄, 非鉄金 属およびその合金, 超硬 合金 ただし, アルミニウムお よびマグネシウムを含ま ない合金	ほう化物, ふっ化物	
				ペースト			
	C	銀ろう	565～925	FB3Aに類似 耐熱および長時間加熱性が ある		ほう酸, ほう化物	
	D	ペースト スラリー	銀ろう, りん銅ろ う, 金ろう, 黄銅 ろう, ニッケルろ う	760～1,205		トーチ, 炉内, 高周波ろう 付, ニッケル合金, 超硬合 金, より高温の活性温度を もつ	ふっ化物, ほう素
	K	液体	銀ろう, りん銅ろう, 黄銅ろう	760～1,205		トーチろう付専用, フラッ クス中を通過した燃焼ガス にて供給	液体状のほう化物
FB4	A	銀ろう, りん銅ろ う	595～870	強固な酸化物を有する金属 類のろう付	アルミニウム黄銅, アル ミニウム青銅, モネル, 少量のチタンその他の強 固な酸化物を形成する金 属を含む合金	ほう酸塩, ふっ化物 塩化物	

注1 フラックスの成分はWES 5602の表にはないが、筆者が表中に追加した。

表3 ろう付用雰囲気 (AWS)

No	種類	露点	標準組成 (%)				用途	
		℃	H ₂	N ₂	CO	CO ₂	ろう	母材
1	燃料変成ガス (低水素)	室温	1-5	87	1-5	11-12	B _{Ag} BCuP ,RBCuZn	銅, 黄銅
2	燃料変成ガス (脱炭性)	室温	14-15	70-71	9-10	5-6	B _{Ag} BCuP BCu RBCuZn	銅, 黄銅, ニッケル, モネル 中炭素鋼
3	乾燥燃料変成ガス	-40	15-16	73-75	10-11	-		銅, 低炭素鋼, ニッケル合金, モネル, 中高炭素鋼
4	乾燥燃料変成ガス (脱炭性)	-40	38-40	41-45	17-19	-		
5	分解アンモニアガス	-54	75	25	-	-	B _{Ag} BCuBN BCuP RBCuZn	銅, 黄銅, 炭素鋼, Cr含有合金
6A	液体又は精製した N ₂ +H ₂	-68	1-40	70-99	-	-	B _{Ag} BCuBNi BCuP RBCuZn	銅, 黄銅, 炭素鋼, ニッケル ニッケル合金, 中高炭素鋼
6B	液体又は精製した N ₂ +H ₂ +CO	-29	2-20	70-99	1-10	-		
6C	液体又は精製した N ₂	-68	-	100	-	-		
7	高純度水素	-59	100	-	-	-	B _{Ag} BCuBNi BCuP RBCuZn	銅, 銅合金, 炭素鋼, Ni,Cr含有 合金, ステンレス鋼, W,Co
8	加熱蒸気	無機物の加熱蒸気, (Zn,Cd,Li及び蒸発性フッ化物)					B _{Ag}	黄銅
9	高純度不活性ガス	-60	Ar又はHe 100				B _{Ag} BCuBNi BCuP RBCuZn	銅, 炭素鋼, Ni,Cr含有合金 ステンレス鋼, Ti,Zr,Hf
9A	高純度不活性ガス+水素	-60	(1-10)H ₂ - (90-99) Ar or He					

3. まとめ

ろう付は元々異材接合に向いている接合方法であるが、ろう付によるマルチマテリアル化を達成するためには、上記で解説したろう付の 5 要素を正しく理解して作業することが最も重要である。