

薄肉アルミニウムブレージングシートのろう付性試験方法 (低温接合委員会共同試験報告)

Testing Methods of Brazability for Thin-thick Aluminum Brazing Sheets (Committee Reports)

低温接合委員会

Technical committee of Brazing

1. 背景と目的

アルミニウムブレージングシートは、多点一括接合の有効性等から熱交換器のろう付に多用されており、そのアルミブレージングシートのろう付性試験方法としては、 紛軽金属溶接構造協会(現(一社)軽金属溶接協会) 規格 LWS T 8801:1991¹⁾が規定され活用されてきている.

しかし、近年の小型軽量化動向にともなって、特に、自動車熱交換器分野においては材料の薄肉化が進んでおり、ラジエータ用チューブ材等で代表的となっている0.2 mm板厚付近の薄い材料における上記規格の「すきま充填試験」では、アルミニウムブレージングシートに変形(反り等)が発生し正規な値が得られない等の課題がある.

そこで、低温接合委員会では、薄肉アルミニウムブレージングシートのろう付試験法(すきま充填試験法)の確立し、さらには LWS T 8801:1991改正に向けて共同試験を実施した。

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材のクラッド構成及び板厚、調質を表 1 に、各構成部材の化学成分を表 2 に示す。また、製造工程を図 1 に示す。ここで、ブレージングシートのクラッド構成としては、薄肉高強度材において多く適用されている心材 3N33 と、ろう材は4045を片面に配置を基準とし、比較心材に3003材、比較ろう材に4343、4047材を用いた。各構成部材の化学成分は JIS (JIS Z 3263:2002) の中央値狙いとした。板厚は0.1、0.2、0.4、0.8 mm とし、ろう材厚さは40 μ m 一定として、各板厚におけるクラッド率で調整した。何れも概ね狙いの値が得られている。調質は O 材及びH14材の 2 種類とした。また、ブレージングシートと組付けてろう付される単体材としては、3003材 O 材調質を用いた。

表 1 供試材

		表门	供試材		
No.	心材	ろう材	ろう材厚 <i>μ</i> m	板厚 mm	調質
1	2002		41	0.2	0 材
2		4045	40	0.2	H14
3	3003	4045	42	0.8	O材
4			40	0.8	H14
5	3N33	4242	37	0.2	TT1.4
6		4343	40	0.8	H14
7			39	0.1	O材
8			38	0.1	H14 O 材
9			37	0.2	
10		4045	39	0.2	H14
11		4043	40	0.4	0 材
12			41	0.4	H14
13			41	0.8	0 材
14			40	0.8	H14
15		4047	36	0.2	H14
16		4047	42	0.8	1114
17	3003	_	_	1.0	0 材

No. 17はプレージングシートと組付けろう付される単体材である

2.2 試験方法

本評価で使用したブレージングシートのすきま充填試験片の模式図を図 2 に示す 11 . ブレージングシートのろう材を上面として水平に設置し、その一端から50 mm の位置に各種径(例えば、 $\phi1$, 2 mm)のステンレス製のスペーサーを挟んで、ブレージングシートと垂直に固定したアルミニウム母材との間に一定のクリアランスを設定する。ろう付熱処理を実施した後、同部位のろう充填長さを測定することで、ろう付性の定量的な評価が可能となる。本ろう

		化 学 成 分 (%)										
構成部材		Si	Fe	Cu	Mn	Ma	Cr	Zn	Ti	その他		Al
		51	re	Cu	10111	Mg	CI	ZII	11	個々	合 計	Al
	3003	0.24	0.34	0.13	1.23	0.0	0.0	0.0	0.02	0.0	0.0	残部
心	3003	0.6以下	0.7以下	$0.05{\sim}0.2$	1.0~1.5	_	_	0.1以下	_	0.05以下	0.15以下	残部
材	3N33	0.30	0.37	0.57	1.17	0.0	0.0	0.0	0.02	0.0	0.0	残部
		0.6以下	0.7以下	0.3~0.7	1.0~1.5	_	_	0.25以下	_	0.05以下	0.15以下	残部
ろ う 4 材	4343	7.40	0.20	0.01	0.01	0.0	0.0	0.0	0.02	0.0	0.0	残部
	4343	6.8~8.2	0.8以下	0.25以下	0.10以下	_	_	0.2以下	_	0.05以下	0.15以下	残部
	4045	10.2	0.20	0.01	0.01	0.0	0.0	0.0	0.02	0.0	0.0	残部
		9.0~11.0	0.8以下	0.30以下	0.05以下	0.05以下	_	0.1以下	< 0.2	0.05以下	0.15以下	残部
	4047	12.1	0.20	0.01	0.01	0.0	0.0	0.0	0.02	0.0	0.0	残部
	4047	11.0~13.0	0.8以下	0.30以下	0.15以下	0.10以下	_	0.2以下	_	0.05以下	0.15以下	残部

表 2 構成部材の化学成分(上段:実績,下段:JIS (JIS Z 3263:2002))

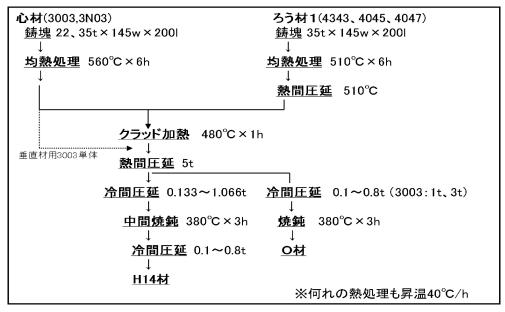


図1 供試材の製作工程

付試験法は試験片の形状から逆 T 字型すきま充填試験と呼ばれる場合もあり、再現性も良好であるため、ブレージングシートのろう付性評価方法として一般的に用いられている.

なお, ブレージングシートの板厚が薄い場合は, 組み付け時の変形を防止するため, 水平板の下にステンレス製の補強板が設置される.

3. 最適試験片形状の検討

3.1 ろう付時の試験片変形挙動の観察

予察試験として図2に示した従来形状にて板厚0.2 mm のブレージングシートのろう付時の変形挙動を調査した. 水平板には No. 9 サンプル (4045ろう, O材) を使用し,

その下に補強板として板厚1.0 mm の SUS304製ステンレス板を設置し、 $\phi 2 \text{ mm}$ のスペーサーロッドを介して3003材の垂直板とステンレスワイヤで固定した。本サンプルを窒素ガス雰囲気にて600°Cで2分保持するろう付相当熱処

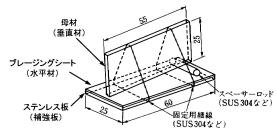


図2 すきま充填試験片の模式図

20 軽金属溶接 Vol. 53 (2015) No. 4

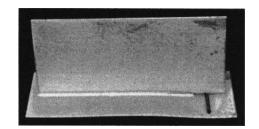
理を実施した. ろう付後のサンプルの外観観察結果を図3 に示すが、水平板が上側に大きく反って変形している様子 が確認された.

次に本サンプルについて, 垂直板下部の水平板変形量を 測定した結果を図4に示す. 水平板は長手方向中央部の変 形量が最も大きく、同部位では垂直板とのクリアランスが 初期より約0.4 mm 低下していた. そのため板厚が薄いブ レージングシートの場合、この水平板の変形を抑制しない と正確なすきま充填性の測定が困難と考えられる.

3.2 変形メカニズムと改善策の検討

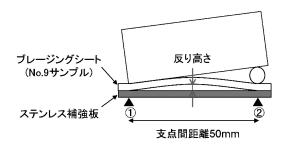
水平板の変形原因としては、ろう付時の昇温過程におけ るアルミニウムとステンレスの熱膨張差によるものとフィ レットが形成後に発生する溶融ろうによる吸引力によるも のが考えられる. 両者の影響を調査するためろう付過程に おける試験片の変形挙動を可視炉で観察した結果を図5に 示す.

温度上昇に伴い水平板の上側への変形量が増加し、ろう が溶融する前の約550℃において水平板の反り高さはほぼ 最大まで達していることが確認された. その後, ろうが溶 融し、600℃まで到達してから550℃まで冷却する過程に おいて水平板の変形挙動にほとんど変化は見られなかっ た. したがって、ろう付昇温時に垂直材端部とスペーサー



ろう付加熱後の外観観察結果 図 3 (従来形状、No. 9 サンプル)

ロッドの接触部が拘束部となり、ステンレス補強板に対し て熱膨張率が高いアルミニウムブレージングシートが変形 したと推定される. そこで、ステンレス板との熱膨張差を 低減するため補強板をアルミニウム材に変更して、その効 果を確認した. なお. ブレージングシートの溶融ろうとア ルミニウム補強板がろう付時に接合されるのを防止するた め、本試験では補強板として Mg を1.0 mass%程度含有す る3004合金板を使用した. Mg 含有材が入手困難な場合は アルミニウム補強板の表面に BN を主成分とする離型剤等 を塗布して補強板側への溶融ろうの流動を防止することも 有効である. 本試験片について同様にろう付中の変形挙動 を観察した結果を図6に示す、補強板をステンレスからア



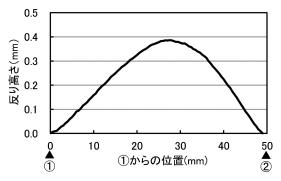
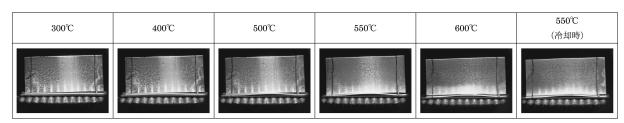


図4 ろう付加熱後の水平板の変形量測定結果



従来試験片形状のろう付熱処理中の変形挙動観察結果 (ステンレス補強板)

300°C	400°C	500°C	550°C	600°C	550℃ (冷却時)

図6 アルミニウム補強板使用時のろう付熱処理中の変形挙動観察結果(3004補強板)

ルミニウム板に変更することでろう付昇温中のブレージン グシートの変形が著しく抑制されることが確認された.

ただし、ろう溶融後の600℃では水平板中央部で溶融ろうの吸引力に起因すると考えられる上反り変形がわずかに確認された。そのため水平板の構造強度を向上する試験片形状の改善も検討した。具体的には図7に示すように水平板の中方向端部をコの字状に折曲げる加工を施し、ろう付中の変形抑制を図った。その効果を確認するための予察試

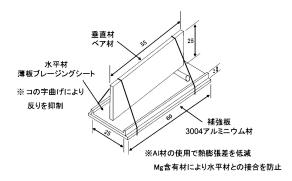
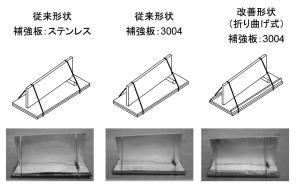


図7 改善試験片形状の模式図



ろう付熱処理後の外観観察写真

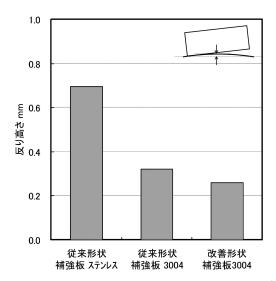


図8 改善試験片形状がろう付後の反り変形量に及ぼ す影響調査結果

22 軽金属溶接 Vol. 53 (2015) No. 4

験として、No. 9 サンプルについて従来形状と改善形状で 各試験片のろう付後の水平板反り高さに及ぼす影響につい て比較調査を実施した. その結果を図8に示すが、補強板 にアルミニウム材を使用し、水平板をコの字状に折曲げた 改善試験片形状が最もろう付後の反り変形量が小さく、改 善効果が大きいことが確認された.

以上のように、薄肉のブレージングシートのすきま充填性を適正に評価するにはろう付時に水平板の変形をいかに抑制することが重要になると考えられる。その改善策としては、熱膨張差低減のために補強板をアルミニウム材とすることに加え、水平板の端部を折り曲げ加工し、試験片の構造強度を向上させることが有効であるとことが確認された

4. 本試験

前項の検討により、補強板としてアルミニウム材を使用することでブレージングシートとの熱膨張差を無くし、さらにブレージングシートを折り曲げて剛性を高くすることで、薄板ブレージングシートにおいても材料の変形が抑えられ、すきま充填長さの評価が可能となることが確認できた。そこで、一般的にブレージングシートとして使用される様々な材料構成、板厚の材料について、上記の対策を適用したすきま充填試験を実施し、その効果を確認した。

4.1 試験方法

供試材 No. $1\sim16$ については①改善形状(図 9a)で、 比較として供試材 No. 5, 10, 12, 15については②従来形状 (図 9b) ですきま充填試験を実施した.

①改善形状

水平材:供試材 No. 1~16 t×29×60 mm

巾方向両端の各2mmをコの字に折り曲げ

垂直材: JIS A 3003 t×25×55 mm

補強板: JIS A 3004 1 mm前後×30×60 mm

②従来形状

水平材: 供試材 No. 5, 10, 12, 15 t×29×60 mm, 折り曲げ無し

垂直材: JIS A 3003 t×25×55 mm

補強板:ステンレス $1 \text{ mm前後} \times 30 \times 60 \text{ mm}$ いずれも支点間距離は50 mm, スペーサーロッドのサイズは $\phi 2 \text{ mm}$ とした. フラックスの塗付量は 5 g/m^2 とした. なお、供試材 No. 7 と No. 8 は板厚が0.1 mm である

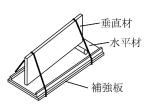


図 9a すきま充填試験 改善形状

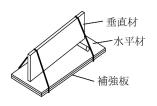
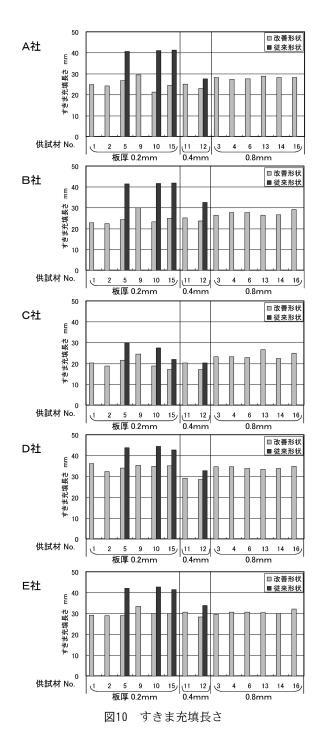


図 9b すきま充填試験 従来形状

が、事前の改善形状による評価により、折り曲げ部が破損して適正な評価ができないと判断されたため、本試験からは除外した。また、板厚0.8 mm については材料の折り曲げが困難なため、改善形状におけるコの字曲げは行わず、補強板の変更のみで評価を実施した。

ろう付加熱は $A \sim E$ 社の 5 社で各社が保有するろう付炉で実施した. 温度条件はろう材が4343の供試材は615 $\times 2$ 分,ろう材が4045の供試材は600 $\times 2$ 分,ろう材が4047の供試材は585 $\times 2$ 分とした.

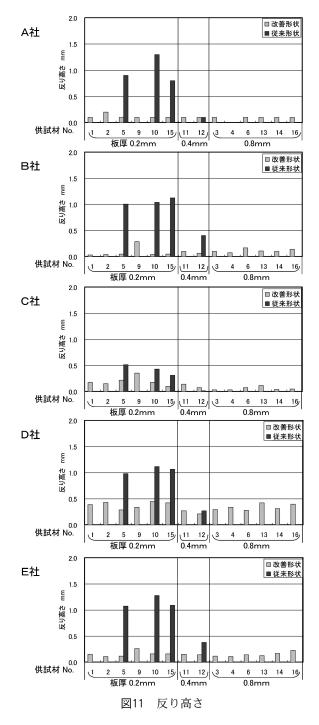
ろう付加熱後の試験片について, すきま充填長さと反り 高さを測定した.



4.2 本試験結果

図10に試験を実施した各社毎のすきま充填長さの測定結果を、図11に反り高さを示す。A 社の測定結果を見ると、改善形状におけるすきま充填長さは板厚0.2、0.4、0.8 mm のいずれにおいても $20\sim30$ mm となり、板厚の影響を受けずにほぼ同等の値となった。また、反り高さも低い値に抑えられ、ろう付加熱による試料の変形は少ない結果となった。ろう材の厚さはいずれの供試材においても40 μ m と一定であるため、すきま充填長さがほぼ一定の値となるのは妥当な結果であると考えられる。

一方、比較として実施した従来形状におけるすきま充填



軽 金 属 溶 接 Vol. 53 (2015) No. 4 23

長さは、板厚0.4 mm では改善形状と同等のすきま充填長さであったが、板厚0.2 mm ではすきま充填長さは40 mm を超え、反り高さが0.5 mm 以上であった.これはろう付加熱途中の変形により、本来のすきま充填長さを評価できていないことを示す結果であり、改善形状の結果とは大きく乖離するものとなった.

B~E 社の測定結果についても A 社と同様の傾向を示す結果となっており、板厚0.2 mm において反りが抑えられ、板厚0.4,0.8 mm と同等のすきま充填長さとなった. なお、A~E の各社のすきま充填長さの値を比較すると、同じ材料においてもその値は異なっている. これは各社がそれぞれ異なるろう付炉で加熱しているため、到達温度を同じ条件にそろえて試験しても昇温速度やろう付雰囲気等の諸条件が異なるためと推定される. したがって、本試験においては各社間のすきま充填長さの絶対値の差については議論しないこととする.

以上より、薄肉材におけるすきま充填試験の改善策について、板厚0.2 mm の材料については試験全体において反りの抑制に対して効果的となった。板厚0.4 mm の材料については各社間で反り低減の効果に差が見られるが、可能であれば改善策により評価した方が良いと判断される。一方、板厚0.8 mm の材料については、改善策を施さなくても従来形状で評価は可能との結果であった。

5. 考 察

5.1 反りに及ぼす水平材と補強板の熱膨張差の影響

補強板にステンレス板を使用した場合、ろう付昇温中に水平材との熱膨張差が原因で反り変形が発生したと考えられた。そこで、昇温中に水平材とステンレス製の補強板の長さが熱膨張によってどの程度変化するかを計算により求めた。熱膨張による水平材および補強板の変化量 ΔL は以下の式で求められる。

 $\Delta L=L\times \alpha \times \Delta T$

L:長さ

α:線膨張係数

△T:温度差

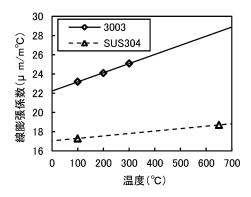


図12 3003と SUS304の線膨張係数^{2),3)}

水平材の線膨張係数は心材に使用されている3003の値とし、ステンレス板の線膨張係数は SUS304の値とした.線膨張係数^{2),3)}は、図12に示されるように直線で近似できることから、3003と SUS304の各温度における線膨張係数はそれぞれの直線式から求めた推定値を使用した. Lは垂直材端部からスペーサーロッドまでの距離50 mm とした. 加熱温度は、室温を20℃とし、600℃までの加熱を想定した. 図13に温度と熱膨張による変化量の関係を示す. 温度上昇に伴い、水平材とステンレス板の熱膨張による変化量の差が大きくなっていくことがわかる. この差が水平材の反り変形を引き起こした要因と考えられる. したがって、補強板をアルミニウム板に変更した場合は、水平材との熱膨張差が解消されるので、反り変形が著しく抑制されたと考えられる.

5.2 反りに及ぼす水平材の断面形状の影響

水平材の断面形状を折り曲げ方式に変更することは、反り変形をさらに抑制させるのに有効な手段であった。その要因としては、水平材の両端を折り曲げたことによる曲げ剛性の向上と推定された。折り曲げ前後の曲げ剛性の違いを明確にするためには、断面2次モーメントを比較すればよいと考えられる。そこで、折り曲げ前後の断面形状における断面2次モーメントを算出した。図14に断面2次モーメントの計算に用いた断面形状、図15に断面2次モーメントの計算結果を示す。折り曲げ後の断面2次モーメントは折り曲げ前よりも44倍大きくなっていることがわかる。したがって、水平材を折り曲げ方式にすることで

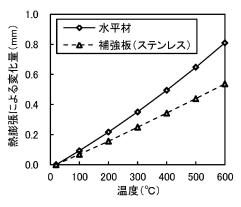
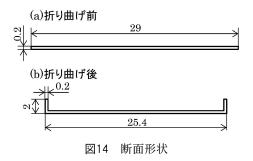


図13 温度と熱膨張による変化量の関係



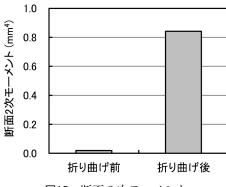


図15 断面 2 次モーメント

断面2次モーメントが大きくなり、溶融ろうによる吸引 力が働いても変形が抑制され、反り量のさらなる低減に寄 与したと考えられる.

6. まとめ

薄肉ブレージングシートのすきま充填試験を行う際に問 題となる反り変形を低減するため,以下の方法を検討し, 改善効果が明確に確認された.

- (1) 水平材と補強板の熱膨張差の発生を防ぐため、補強 板にアルミニウム板を使用することで、反り変形が著しく 抑制された.
- (2) 水平材の曲げ剛性を向上させるため、断面形状を折 り曲げ方式とすることは、反り変形をさらに抑制させるの に有効な手段であった.

本試験の結果をもとに当委員会では LWS T 8801:1991 の改正に取組む予定である.

参考文献

- ろう付性試験方法 LWS T 8801:1991
- 2) 日本アルミニウム協会編:アルミニウムハンドブック (第7 版), 2007, p33.
- 3) 長谷川正義: ステンレス鋼便覧, 1973, p104.

低温接合委員会参加委員

	氏	名	所 属	執筆者
委員長	高山	善匡	宇都宮大学	
委員	江戸	正和	三菱アルミニウム㈱	0
	小笠原	原明徳	日本軽金属㈱	
	神田	輝一	㈱関東冶金工業	
	高祖	正志	住友精密工業㈱	
	小久傷	保貴訓	日本軽金属㈱	0
	澤村	貞	日本アルミット㈱	
	澁谷	季弘	㈱神戸製鋼所	
	鈴木	次男	㈱マーレフィルターシス	
			テムズ	
	瀧川	淳	元㈱神戸製鋼所	
	鶴野	招弘	㈱神戸製鋼所	0
	目黒	弘	日本ソルベイ㈱	
	柳川	裕	㈱UACJ	0
	榎本	正敏	(一社)軽金属溶接協会	
オブザーバ	竹本	正	大阪大学	
事務局	笹部	誠二	(一社) 軽金属溶接協会	

氏名50音順