

# 自動車用アルミニウム材の補修基盤技術に関する試験結果 (自動車用アルミ接合委員会共同試験報告)

Test results about basic repair technologies on aluminum materials for automobile

自動車用アルミ接合委員会 補修ワーキンググループ

Technical Committee of Aluminum Joining for Automobile
Working Group for Repair Technology

# 1. はじめに

自動車の国内生産量は年間約1000万台で、その内、国内新車販売台数は約500万台である。国内の自動車保有台数約7500万台の中、毎年約500万台が登録抹消され、中古車輸出等を除けば約400万台が廃車されている。廃車1台あたりの総重量の内、約80%がリユース、リサイクルされ、残20%相当が当初はシュレッダーダストとして埋立廃棄処分されていた。その処分場スペースの問題やフロン類、エアーバッグ類の適正処理の必要性から、平成17年(2005年)には自動車リサイクル法が施行され、平成13年(2001年)施行の資源有効利用促進法とあいまって、廃棄物最終処分量の削減に取組まれた結果、2013年度には400トン(基準年度(1990年度)比99.9%削減)までに減少している。

ところで、自動車1台あたりのアルミ使用量は、1990年の約80kgから昨年2014年には約2倍の160kgへと着実に増加し、自動車分野の年間製品需要量はアルミ製品全体の約40%(160万トン)を占めるに至っている。その約80%は鋳造・ダイカスト品で、溶接/接合などによる組立が必要となる圧延品は漸増中である。その製造時の組み立て技術の開発もさることながら、上記観点から補修技術の確立も必定であり、その一助となるべく、当協会では自動

車用アルミ接合委員会内に平成24年度 (2012年度) より 補修ワーキンググループを発足させ取り組んでいる. 本稿は, 平成24年度~平成25年度に実施した活動成果の一端 を紹介するものである.

# 2. 補修技術の取組み内容

補修としては、板金、溶接、塗装等があるが、ここでは 板金加工時の加熱と溶接の各基盤技術に着目し、前者は液 化石油ガス(プロパンガス(LPG))炎による加熱時の薄 板アルミパネル材の熱影響や変形、後者は重ねすみ肉継手 における溶接施工性に関する試験調査や開発に取組んだ.

# 3. 供試材

供試材には、加工硬化型のA5052P-H32と熱処理硬化型のAA6022P-T4の2種類を用いた。その化学成分の規格値等は表1のとおりで、板厚はいずれも1.0~mm である。

## 4. 試験方法

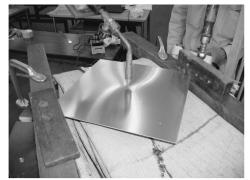
### 1) 加熱試験方法

250 mm 角サイズの供試材を水平に配置し、その表面中央直上に、ロボットアーム先端に LPG を加熱源とする火口を取り付けて、加熱した、その状況を写真1に示すが、供試材の2角を重石で軽く固定し、炎形状を図1のよう

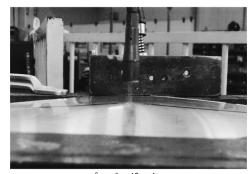
X :														
A A #		化学成分(mass%)								機械的性質*				
合金名・ 調質	規格	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	その他	Al	引張強さ N/mm²	耐力 N/mm²	伸び %
5052-H32	JIS	0.25 以下	0.40 以下	0.10 以下	0.10 以下	$^{2.2}_{\sim 2.8}$	$0.15 \\ \sim 0.35$	0.10 以下	_	0.15 以下	残部	216以上 265以下	155以上	5 以上
6022-T4	AA	$0.8 \\ \sim 1.5$	$0.05 \\ \sim 0.20$	$0.01 \\ \sim 0.11$	$0.02 \\ \sim 0.10$	$0.45 \\ \sim 0.7$	0.10 以下	0.25 以下	0.15 以下		残部	275	155	31

表1 供試材の化学成分

<sup>\* 5052</sup>は規格値、6022は標準値を示す。



板上面からの加熱 板裏面で熱電対による温度計測



プロパンガス炎 板は加熱側に凸変形

写真 1 加熱状況

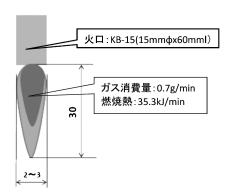


図1 プロパンガス火炎サイズ (mm)

に調整して炎先端から2mm内側(火口先端から28mmの位置)に供試材表面が位置するように火口の高さを設定した.

板の温度は、加熱面とは反対面の中央点ならびにそこから板角に向けて20 mm,60 mm,125 mm の距離の各位置の合計4点にK型熱電対を配置し、計測した.加熱点裏面に位置する中央点の計測温度を目安に目標温度に到達するであろう直前に、火口を高く引き上げ、その後、材料が室温になるまで放冷した.試験した加熱条件は表2のとおりで、温度保持時間を設定したものについては、所定の温度に到達するであろう直前に火口を取付けたロボットアームを上下作動させ熱源からの距離制御により、その温度維持を図った.なお、用いた熱電対は、板表面にポンチングにより浅く凹形状を形成した面にその先端を押当てて固定

表 2 加熱条件

保持時間	到 達 温 度					
	250°C	300℃	350℃	400°C		
0 s	0	0	0	0		
120 s	0	_	_	0		

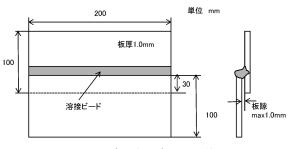


図2 重ねすみ肉継手形状

した.

アルミニウム材の熱影響の程度は、板断面の板厚中央部の硬さ分布にて評価することとし、マイクロビッカース硬さ計にて荷重 $100 \, \mathrm{g}, \, 1 \, \mathrm{mm} \, \mathrm{ピ}$ ッチの条件にて測定した。

変形量については、板の凸面(今回は全ての場合、加熱面側が凸面となる変形を呈した)を上にして定盤上に置き、板各部位の高さの計測値から変形量を算出した。測定位置は、熱電対押当てのために軽くポンチングした時の凹凸変形の影響を回避するために、中央点から2mmずらした位置から20mm間隔で板縁に平行なマス目を描き、その交点の位置での変形量をデジタルマイクロメータにより計測した。計測は、中央点から62mm四方の範囲内を20mmピッチで行うことを基本としたが、一部の試験片においては、変形域の広さに留意し、122mm四方の板全面で行った。

#### 2) 溶接試験方法

用いた重ねすみ肉継手のサイズは図2に示すとおりで、溶接姿勢は下向きである.溶加材はA5356-WY-1.2及びA4043-WY-1.2の2種類とし、溶接機には交流パルスミグ溶接機((㈱ダイヘン製DW300+)を用いた.溶接速度は、実施工の手動溶接を前提として40cm/minを基本とし、条件の再現性の点からロボットによる溶接とした.その他溶接条件の基本諸元は、表3に示すとおりである.

溶接試験は、表4に示す母材と溶加材との組合せによる4種類の継手にて行い、先ずは溶接外観に影響する溶接条件因子の探索を実施し、その後、条件の適正化により外観特性を満足させた継手の引張強度特性の調査へと進めた.

# 〈外観特性に影響する溶接条件因子の探索〉

以下に示す2段階で進めることとし、第1ステップでは、上下板隙0 mm,0.5 mm 及び1.0 mm の3水準における各溶接施工因子の外観特性に与える影響を調査し、第2

表 3 溶接施工基本条件

因 子	設 定 値
シールドガス	アルゴン,流量17.5 <i>l/</i> min
ノズル高さ	14 mm
ワイヤの突出し長さ (チップ先端から被溶接材までの距離)	20 mm
トーチ前進角	10°
トーチ倒れ角度	20°
電源の極性比率(EN 比)	10% (4043-WY), 20% (5356-WY)

表4 継手組合せの種類

母 材	溶加材	
内 47	A4043-WY-1.2	A5356-WY-1.2
A5052P-H32	0	0
AA6022P-T4	0	0

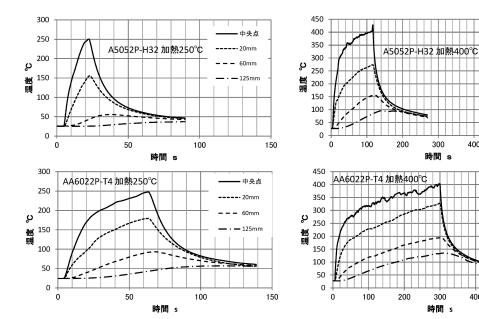
ステップではその改善のための条件の最適化に取組んだ. より具体的には以下の通りである.

#### 第1ステップ

補修溶接現場でのことを考慮し、ビード外観性(上下 板のブリッジング性)と裏溶込み(目視での明らかな裏 波)の両立の可能性を、種々の条件因子(溶接速度、ワ イヤの狙い位置, トーチの倒れ角度, 極性比率等) から 取り組んだ.

# ② 第2ステップ

第1ステップでの結果をもとに、外観特性を効率よ く両立させうる条件因子を抽出し、溶接施工条件の最適 化に取り組んだ.



250℃, 400℃加熱時の各材料,各位置の温度計測結果

#### 〈継手の引張強度特性の調査〉

外観特性をほぼ満足した継手に関し、重ねすみ肉継手の 引張試験を行い、その継手強度特性を調査した.

#### 試験結果

#### 1) 加熱試験結果

計測温度データの代表例として到達目標温度250℃及び 400℃の場合を図3に示す. それを元に板の各位置におけ る最高到達温度を図4に、そして到達目標温度400℃の場 合の加熱中央点の昇温特性を図5に示す.

これらから、以下のことがわかる.

- ① 中央点の温度が同じでも周囲の到達温度は, AA6022P-T4 の方が A5052P-H32よりも高くなる傾 向がある.
- ② 中央点の目標温度に到達するまでの加熱昇温時間は、 AA6022P-T4 の方が A5052P-H32よりも長くなる傾 向がある.

これらのことは、AA6022P-T4の方が A5052P-H32の 場合よりもいわゆる熱集中性が低いということを意味して おり、加熱投入された熱が被加熱材料の高熱伝導度のため に、周囲に熱が拡散しやすく加熱点の温度が昇温しがたい ためと思われる.

次に、中央加熱点を含む板断面の硬さ分布を図6に示す. 250℃加熱の場合にはいずれの材料においても熱影響によ る軟化はほとんど認められないが、400℃加熱の場合には 中央部近傍に軟化が認められる. この400℃加熱のデータ を用いて、各位置における最高到達温度と硬さとを対応さ せると図7のようになり、軟化し始める温度は、 AA6022P-T4の場合で260℃, A5052P-H32の場合で290 °Cという値がえられた. なお、AA6022P-T4 の400°C加熱 材の冷却時の350℃までの平均冷却速度を計測すると、

時間s

時間s

中央点

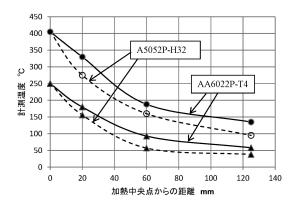


図4 到達目標温度250℃,400℃の場合の各位置の最 高到達温度の材料間比較

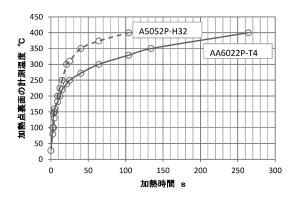


図5 400℃加熱時の昇温曲線

19.2℃/s と比較的低く, 仮に加熱時に固溶されたとして も, 冷却時に強度に寄与しない相が析出する過時効とな り, その後の室温時効においても硬さは回復しなかったも のと考えられる.

次に、加熱による変形であるが、いずれの材料、加熱温度の場合とも写真 1 に示すように加熱時には加熱側に凸変形を呈し、その後室温にまで冷却されても同方向の変形が残留した。中央点を $250^{\circ}$ Cx0s( $250^{\circ}$ Cでの保持時間はなし)及び $350^{\circ}$ C×120sに加熱した場合の変形分布の状況を、図8に示す。これらから、中央点の加熱到達温度が同じであっても、AA6022P-T4の方がA5052P-H32よりも、変形量を有する領域が広いという傾向が観察された。これは、前述の温度分布の傾向と呼応するものであり、材料の熱伝導度の差異に起因したものと推測される。つまり、熱伝導度の高いAA6022P-T4の方が、A5052P-H32よりも、熱が周囲に逃げやすいために加熱点の温度を同一にするためには、より多くの熱量を投入する必要があり、より広い範囲で高温・高変形量をもたらしたものと考えられる。

### 2) 溶接試験結果

# 〈外観特性に影響する適正溶接条件因子の探索〉

#### ① 第1ステップ

継手試験体の外観評価に際し、その評価基準(表溶接ビードのブリッジング性、裏の溶込み性ならびにこれらの総

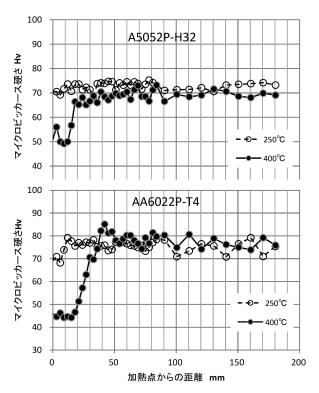


図 6 各材料加熱後の硬さ分布 (中央加熱点250℃, 400℃の場合)

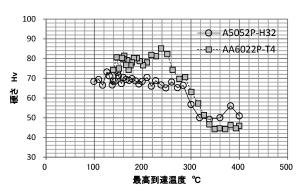


図7 中央部400℃加熱時の場合の各部位における最 高到達温度と硬さとの関係

合評価)を図9のように設定し、評価を行なった。各溶接施工因子の影響を断面マクロ等から整理すると写真2のようになる。それぞれの評価の総合評価結果をまとめると表5に示すように、板隙0.5 mm以内では評価基準を満足させることは比較的容易であるが、目標とした1.0 mmまでとなると困難であるとわかった。

ビードのブリッジング性と裏の溶込み性をそれぞれ満足する各溶接施工因子の方向性をまとめると表 6 のようになる。表ビードのブリッジング性は入熱抑制方向で,裏の溶込み性は入熱増加方向で満足させることで可能となるが,板隙  $0\sim0.5$  mm の範囲であれば両立する条件は存在するが,板隙 1.0 mm までの広い範囲となると,満足する条件範囲は極めて狭いか,ないということである.

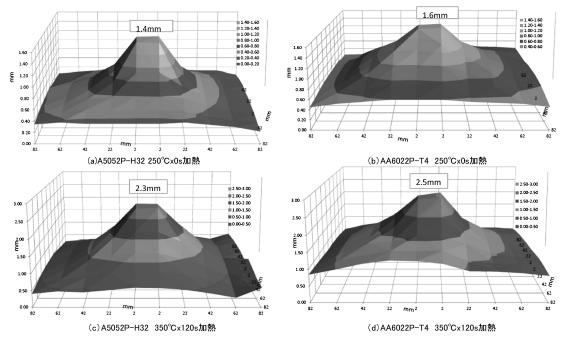


図8 各加熱条件における板変形例

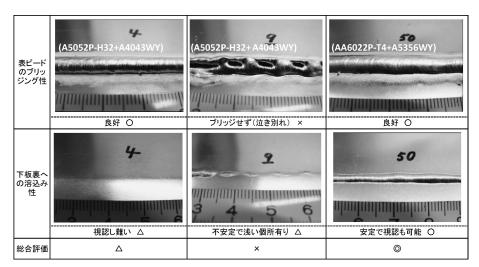


図9 外観評価基準

そこで、板隙量が  $0\sim0.5\,\mathrm{mm}$  と $0.5\sim1.0\,\mathrm{mm}$  とで施工条件を別設定にすることを前提に、種々の条件因子の中でも、容易にセッティング変更が可能で且つ、板隙量に十分に対応可能な因子を選定することとした。着目したのは電源の極性比率で、写真 3 に示すようにブリッジング性・溶込み性ともに大きく影響することがわかり、第 2 ステップにて探索することとした。

## ② 第2ステップ

本試験に用いた溶接機は、薄板への適用性を考慮した交流パルスミグ溶接機であり、溶着量確保によるビードのブリッジング性と薄板への適度な溶込み制御を可能とすることを得意とするもので、極性比率のツマミーつで管理できるというメリットを有している。つまり、下板への溶込みを十分に確保できる電極マイナスの極性比率ゼロ(直流)

での電流値を探り、それをベースとして固定した上で電極マイナスの極性比率 (EN 比率)を上げて、特性の両立化可否を検討することとした.

その結果は、各組み合わせの板隙ごとに示すと図10のようになる。これによると、最適な EN 比率は母材の種類よりも溶加材の種類の影響を受けやすく (EN 比率: A5356WY の場合>A4043WY の場合)、また、板隙量が増えるにしたがってその EN 比率を上げる必要がある。いずれにしても、板隙1.0 mm の場合であっても、電源極性の EN 比率を最適化すれば、両特性を満足させることができるとわかった。

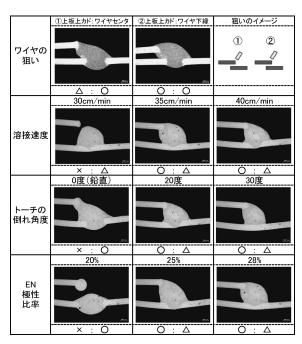
#### 〈継手強度特性の調査〉

重ねすみ肉継手から試験片幅20 mm の寸胴型引張試験 片を作製し、引張試験を行った、破断荷重を試験片幅で除

6 軽金属溶接 Vol. 54 (2016) No. 1

した値を引張強度(N/mm)とし、チャック間距離におけ る破断時の伸びを破断伸びとして A5356-WY の場合を図 示すると図11に示す結果が得られた.

これから、大半の継手では溶加材の種類にかかわらず母 材熱影響部で破断するために、A5052P-H32継手では190 ~200 N/mm, AA6022P-T4 継手では200~210 N/mm と ほぼ一定の引張強度が得られる. しかし, 板隙1.0 mm の 場合には母材の種類にかかわらず、ボンド部近傍で破断す る場合が頻繁に生じ180 N/mm 程度の引張強度へとやや 低下すると同時に、破断伸びも3~5%程度とやや低くな ることがわかった. ただし, 裏への溶込みが浅くなってい る場合も一部重畳しているので、この強度低下原因の明確 化が必要である.



溶接施工各因子とブリッジング性・溶込みと 写真2 の関係(評価結果は「ブリッジング性:溶込 み性]として表記)

# 結果の検討

#### 1) 加熱試験結果の検討

材料の熱集中性の差異に関して直接的には各材料の熱伝 導度が影響するが、ここでは簡易的にそれと相関性の強い 電気伝導率を室温で測定した. その結果, A5052P-H32 では35.1% IACS, AA6022P-T4では45.5% IACS の値が えられ、A5052P-H32 の方が AA6022P-T4 よりも熱伝導 度は低くなると考えられ、熱集中性が高くなる傾向が裏付 けられた.

ところで現実の加熱作業においては、加熱点の周囲に濡

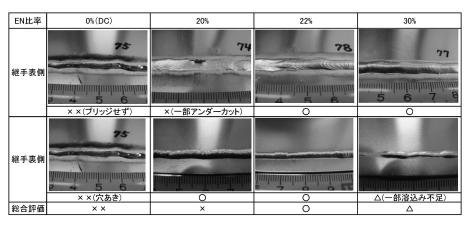
表 5 各板組継手における板隙量と溶接外観特性結果

素材	溶加材	板 隙 量			
<b>米</b> 彻	(各)加约	0 mm	0.5 mm	1.0 mm	
A5052P-H32	A4043-WY-1.2		0	×	
A3032F-H32	A5356-WY-1.2	0	0	Δ	
AA6022P-T4	A4043-WY-1.2	0	0	Δ	
AA0022P-14	A5356-WY-1.2	0	0	Δ	

表ビードのブリッジング性と裏溶込みの両立性:◎容易,△か なり困難,×困難

表 6 各特性を満足させるための溶接施工因子の制御 方向

溶接施工因子	継手表側 ブリッジング性	継手裏側 溶込み性		
電流	↓ (低減)	↑ (増加)		
溶接速度	↑(中速適正化)	↓(低速化)		
ワイヤの狙い位置	↑(上板カド上側)	↓(上板カド下側)		
トーチの倒れ角度	↑(傾ける)	↓(鉛直側)		
極性(EN)比率	↑ (交流化)	↓(直流化)		
上記因子の制御方向	板への入熱抑制方向	板への入熱増加方向		



電源の極性比率 (EN 比率) と溶接外観特性

母材	溶加材	板隙	電源の極性比率(EN比率)					
13,10	\E\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\	小人下	0%	10%	20%	30%	40%	
	A4043-	0mm						
A5052P	WY-1.2	1mm		1				
-H32	A5356- WY-1.2	0mm						
		1mm				<b>*</b>		
	A4043-	0mm	1					
	WY-1.2	1mm		1		4		
AA6022P -T4		0mm			<b>\</b>			
	A5356- WY-1.2	1mm	- (	5				

図10 各継手組合せにおける板隙量と電源極性比率 (EN 比率) との関係 (断面マクロ)

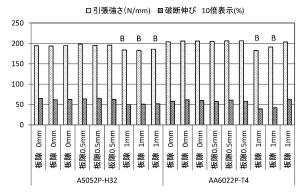
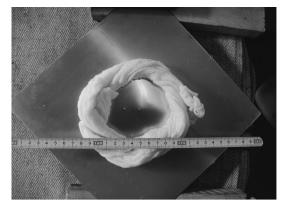


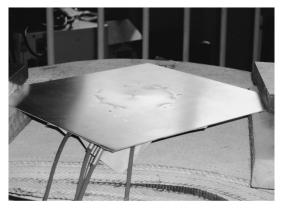
図11 重ねすみ肉継手の引張強度特性 (A5356-WY) (B:上板側ボンド部破断を示す. その他は熱 影響部破断)

れタオルを鉢巻状に配置してその中心部を加熱するということがしばしば行われているとのこと。その効果を調査検討するために、ここではAA6022P-T4を用いて、目標到達温度250℃、保持時間120sの加熱試験を行った。その状況を写真4に示すが、濡れタオルは加熱中央点から半径60mmの位置に円周状にセットした。加熱時の温度計測プロファイル及び変形量分布の測定結果を図12に示す。

これから、濡れタオルの配置により、加熱ガスの滞留化のためか加熱時の昇温速度をわずかではあるが速めると同時に、温度の維持安定化にも効果をもたらすことがわかる。また、濡れタオルの配置位置より内側での加熱点周囲の温度は、その低下が著しく、図13に示すように、温度勾



(a)濡れタオル配置状況



(b)加熱後、濡れタオル除去後の板変形状況

写真4 濡れタオルの配置状況と加熱冷却後の板の変 形状況

8 軽金属溶接 Vol. 54 (2016) No. 1

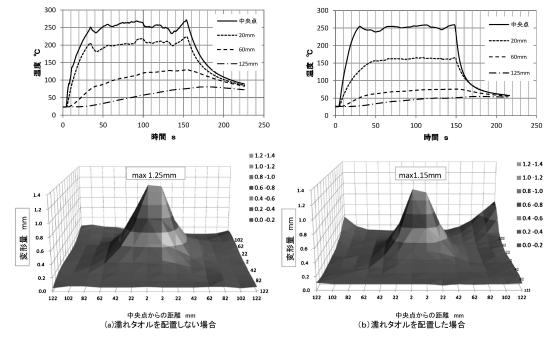
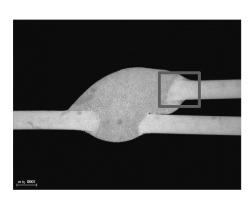
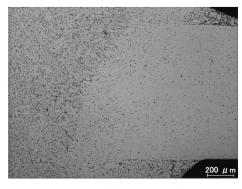


図12 濡れタオル配置有無の温度分布・変形分布に与える影響 (A6022P-T4:250℃×120 s)



断面マクロ



上写真の口枠内のミクロ組織

写真 5 板隙 1 mm での破断位置となったボンド部の マクロ及びミクロ写真

配が急峻になっていることがわかる。因みに、濡れタオルの配置位置である60 mm の位置での最高到達温度は約160 となり、濡れタオル配置なしの場合の約80 となった。なお、温度分布と変形分布とを照合すると、変形は約 $100 \sim 150 \text{ }$  公以上の範囲で生じやくなっていると推定さ

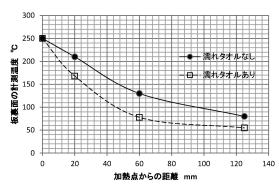


図13 板中央を250℃に加熱した場合の温度分布に 与える濡れタオル配置の影響

れ,濡れタオルの配置は変形範囲を狭くすると同時に、その中央部の最大変形量も1.25 mm から1.15 mm へとわずかではあるが減少をもたらすこともわかった.

以上のことから、濡れタオルの配置は、加熱目的である 補修のための変形量確保という意味では逆効果とも考えら れるが、熱集中効果と温度の安定化効果はそれを十分に相 殺する効果をもたらすものと推察される.

## 2) 溶接試験結果の検討

板隙1.0 mm の継手の引張強度の低下原因を探索するために、先ずは破断部位である上板側の熱影響による軟化程度やボンド部近傍の断面ミクロ組織の観察を行なった. 断面マクロ及びボンド部のミクロ組織を写真5に、硬さ分布を図14に示す. これらから、ボンド部は熱影響により軟化はしているものの異常な組織等は観察されなかった.

次に、下板裏への溶込みに関しては、板隙1.0 mm の場合で十分な溶込みがある場合でも継手強度の低下を来している場合もあれば、逆に板隙0.5 mm 以内であっても溶込

みが十分ではないものでも継手強度の低下が認められない場合もあり、溶込み因子が継手強度低下の直接原因とは考えられないと推察された.

そこで、引張破断部位を詳細に観察すると、写真6に示すように、板隙が1.0 mmで継手強度が低下した場合でも、破断はボンド部ではなく母材熱影響部で生じていることが確認された。また、破断部近傍母材部が引張試験機の引張軸方向に曲げられており、その曲げ程度は板隙が大きいほど大きくなっている。つまり、板隙量の増加に伴い、引張軸心のズレが大きくなり、その結果、ラップ端部近傍の材料には曲げ応力と引張応力がより多く重畳し、材料の引張強さに到達して破断したものと考えられる。引張試験機には引張方向の荷重のみ計測されるので、見掛け上、継手の引張強度が低くなったものと推定された。なお、破断位置も曲げ応力が最大となるボンド部近傍にシフトしたも

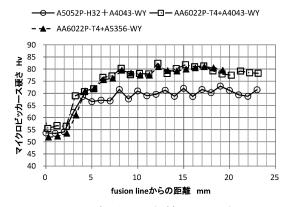


図14 重ね継手上板材の硬さ分布

のと考えられる.

### 7. まとめ

以上の結果をまとめると以下のことが明らかとなった. 〈加熱特性〉

- ① 最高加熱限界温度は、素材強度の熱軟化の観点から A5052P-H32, AA6022P-T4 ともに250℃にとどめる べきで、JIS Z 3604に示す加熱限界温度が確認された。
- ② 両材料の加熱特性を比較すると、A5052P-H32の方が AA6022P-T4よりも熱集中性に優れ、より狭い範囲で変形が生じるという傾向が認められた.
- ③ 補修現場で使用されることがあるという濡れタオルの 配置は、熱集中性と温度保持安定化に効果があるとわ かった.

#### 〈溶接性〉

- ① すみ肉継手の表ビードのブリッジング性と下材裏への 溶込みの両立は、板隙量0.5 mm までは一つの条件設 定で比較的容易であるが、板隙1.0 mm の場合には電 源極性の EN 比率の別途の最適化を図れば可能である.
- ② 板隙量が1.0 mm と大きくなると、引張軸方向のズレによる曲げが引張に顕著に重畳されることとなり、見掛け上、継手の引張強度の低下を来たすとわかった.
- ③ 上記①②を考慮すると、板隙量は現実的には0.5 mm 以内に抑えることを目標にするのが得策と考えられる.
- ④ 下材裏への溶込みは、継手強度の観点からは、目視による深い溶込みを得る必要はなく、触って膨らんでいることがわかる程度で十分である。

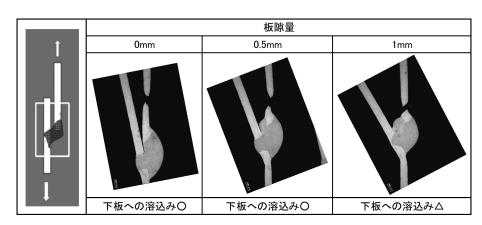


写真6 引張せん断破断後の断面マクロ(左図の引張イメージの中央枠内の破断後の写真)

# 平成24~25年度の補修ワーキンググループメンバ(敬称略)

		氏	名	所 属	協力関係者	備考
委員	長	廣瀬	明夫	大阪大学大学院工学研究科		
主	査	大久伊	呆通則	日本大学生産工学部	長谷川利之,福本 崇(当時学生), 酒井祐二(当時学生)	• A5052P-H32材提供 • 温度・変形の計測
委	員	波多	曉	㈱ダイヘン	川宿田匠,野崎 実(以上㈱ダイヘンテクノス)	• アークロボット溶接機提供と試験協力
委	員	吉野	_	㈱ヤシマ	梅澤健太,斎藤 強	• LPG 加熱機器提供 • 試験立会協力
委	員	高橋	博	千葉県自動車車体整備協同組合	並木孝義 (東伸自動車)	• 補修実務面からのアドバイス
委	員	岩瀬	哲	㈱神戸製鋼所		• AA6022P-T4 材提供
委	員	田中	晃二	(株)UACJ 当時,住友軽金属工業(株)		
委	員	岡田	俊哉	㈱UACJ 当時, 古河スカイ㈱		
委	員	榎本	正敏	(一社)軽金属溶接協会		
事務	易局	笹部	誠二	(一社)軽金属溶接協会		