実用講座

アルミニウム薄板接合構造の継手強度*

藤原 昭文**, 笹部 誠二***

藤原 昭文

笹部 誠二

Welded Joint Strength of Aluminum Thin Structures*

by FUJIWARA Akibumi** and SASABE Seiji***

キーワード

機械式接合, 摩擦攪拌接合, フレーム構造アルミニウム, 薄板接合, 自動車の軽量化, アーク溶接, レーザー溶接

1. まえがき

アルミニウム合金の薄肉構造体で思いつくものは何であろうか? 多くは, 軽さが要求されるものであり, 航空機機体, 鉄道車両構体のような輸送機器が思い出される。これらほどの歴史はないが, 10年程度前から, 自動車ボディに用いられるようになってきた。

従来から, 自動車はエンジンや一部の足回り部品で軽量化のためにアルミニウム合金が使用されてきたが, 近年の環境改善に対するニーズの高まり, 特に, 欧州自動車工業界の CO₂ 排出量規制に適合するための燃費向上が必須となって来たことが, その背景にあるとのことである。

次にこれらの構造体の接合方法について簡単に述べる。アルミニウム合金は一般的な鋼に比べて溶接性が劣る。航空機の場合, リベット, ネジ等の機械式締結が一般に用いられる。次の鉄道車両構体では, 抵抗スポット溶接法にてスタートしたが, その後の押出性・強度・溶接性のバランスを考えた材料 (6N01押出型材) が開発されてからは, もっぱら, アーク溶接が用いられている。

上記に対して自動車ボディではどうであろうか? 自動車ボディは従来, 鋼で抵抗スポット溶接にて造られてきているが, アルミニウムの場合はこのスポット溶接性がかなり悪い。そこで自動車ボディの接合にあたっては, 設計面からの配慮を含めて, 抵抗スポット溶接, ミグ・ティグなどのアーク溶接, レーザ溶接から接着接合, 接着と抵抗スポット溶接の併用であるウェルドボンド, リベットやカシメ等の機械式接合, さらにこの機械式接合と接着の併用のリブボンド等, さらに, 試験的ではあるが摩擦攪拌接合等, きわめて多数の手法が試みられ

ており, したがって薄肉のアルミニウム構造のほとんどを知ることができる。そこでここでは, この自動車ボディの接合方法を紹介することにより, 薄肉アルミニウム合金の接合技術の講座としたい。

なお, アルミニウムの特徴として押出型材が多用される。これも断面は複雑なものもあるが, 自動車に使用されるものは本来軽量化であるから, 当然薄肉パネルによって構成されるものが多く, また, 接合課題もほとんど共通である。したがって, 本講座では薄板および薄肉の型材を総称して薄肉のアルミニウム合金として同列に取り扱う。

2. 自動車ボディへのアルミニウムの適応例

2.1 自動車ボディへのアルミニウム適用形態

上述したように近年は, 主に板材と押出材を中心とし, 一部鋳造品などにより構成されたアルミニウム合金車体を持つものが検討, 適用されるようになってきた。その代表的な構造例¹⁾を図1に, また, 代表的な車種名とそれに用いられた接合方法を表1に示す²⁾。同表中のRSWは抵抗スポット溶接, SPRはセルフピアシングリベット, M.C.はメカニカルクリンチングを示す。合計10種の接合法が用いられている。また, その方法は車の製造年によって大きく変化している。最も顕著な場合であるAudi社

図1 Audi A2 のスペースフレーム構造体

*原稿受付 平成14年1月15日

** 和歌山工業高等専門学校 Wakayama National College of Technology

***正 員 (株) 神戸製鋼所 Member, Kobe Steel Ltd.

表1 ボディへのアルミ適用代表車種名と適用接合方法

メーカー	車種	接合法				
		溶融接合			機械式接合	
HONDA	NSX	RSW	MIG			
AUDI	A8	RSW	MIG		SPR, M. C.	
RENAULT	SPIDER		MIG, TIG		RIVET	BONDING
LOTUS	ELISE					RIV. -BOND
CHRYSLER	PROWLER		MIG			RIV. -BOND
GM	EV1	RSW				WELD-BOND
AUDI	A2		MIG	LASER	SPR	

M.C.: Mechanical Clinching

表2 Audi A8 と Audi A2 の接合工法と溶接長、打点数

	Audi A8	Audi A2
セルフピアッシングリベット	1100点	1800点
ミグ溶接	70m	20m
レーザ溶接	—	30m
抵抗スポット溶接	500点	—
メカニカルクリンチ	178点	—

表3 代表的なパネル用アルミ合金の種類と機械性質

合金名・調質	化学成分(代表値) (wt%)	機械的性質(代表値)			備考
		引張強度 (MPa)	耐力 (MPa)	伸び (%)	
2008-T4	-0.8Cu-0.3Mg-0.6Si	250	125	28	米国:インナ用
2036-T4	-2.6Cu-0.4Mg-0.2Mn	340	195	26	米国:インナ用
6111-T4	-0.9Si-0.8Mg-0.7Cu	220	150	28	米国:アウタ、インナ用
6016-T4	-1.3Si-0.4Mg	235	130	28	欧州:アウタ、(インナ)用
6022-T4	-0.9Si-0.4Mg	235	130	28	米国:アウタ、インナ用
6K21-T4	-1.0Si-0.6Mg	235	130	28	日本:アウタ、インナ用
6181-T4	-0.9Si-0.8Mg	260	140	28	欧州:インナ用
5023-T4	-5.5Mg-0.3Cu	290	130	33	日本:アウタ、インナ用
5022-T4	-4.5Mg-0.3Cu	280	125	29	日本:アウタ、インナ用
5182-T4	-4.5Mg-0.4Mn	275	130	28	汎用合金:インナ用
5754-T4	-3.1Mg-0.4(Cr+Mn)	250	110	25	汎用合金:インナ用
5052-T4	-2.5Mg-0.3Cr	195	90	25	汎用合金:インナ用

の A8 (1994年) と A2 (2000年) における差異を比較して、表 2 に示す³⁾。新しい A2 では、抵抗スポット溶接が皆無となり、ミグ溶接が大幅に減る一方、レーザ溶接が新規に適用され、機械式接合がすべてセルフピアッシングリベットに統一されている。

2.2 自動車用アルミニウム合金

まず、車体用の板材を表 3³⁾に示す。構造用材にしる外板用材にしる成形性が重要なというまでもない。成形の段階までは加工硬化が重要なため低耐力の方が好ましいことが多い。製品になってからは、外板には耐デント性が重要なためベークハード（塗装後の焼き付け時に耐力と強度が上昇）性のいい 6000 系合金が使われる。

内板にはリサイクル性を重視し、外板と同じ 6000 系が用いられる場合もあるが、5182 かあるいは成形性重視で 5022 などの 5000 系を用いる場合もある。将来はリサイクル性を重視し 6000 系に統一されると考えられている。なお、6000 系でも 6111 はベーク後の耐力と引張強さがもっとも高く成形性もよいが、Cu（銅）の含有率が高く溶接性と耐食性、特に後者が問題とされることがあり、Cu を減らし強度と成形性を下げて、より耐食性と溶接性を改善する方向に進みつつある。6016 は耐力不足のため、より高耐力側に改良されつつある。これらの動きを総合すれば、同表中の 6022 程度の機械的性質に収斂すると考えられている。

現在のアルミニウム合金製ボディでは、スペースフレーム構造が採用されることが多い。この場合には、従来のサイドシル、サイドメンバのような閉断面に押出材が多用される。自動車用押出材一覧を表 4 に示す。すでにバンパやドア補強にも押出材がよく用いられているが、一

表4 溶接構造用押出材とその機械的性質

材料／調質	強度 (Mpa)	耐力 (Mpa)	伸び (%)	クラック性
6063 T 5	185	145	22	△
6N01 T 5	265	225	14	×
6061 T 6	310	275	17	×・△
7003 T 5	325	260	17	○

表5 各種材料の物性値

材料	融点 (K)	平均比熱 (0℃-融点) (J/g)	潜熱 (J/g)	熱伝導率 (J/cm ² Ksec)	線膨張率 at 20℃ (1/K)
Al	930	1.04	389	2.2	2.36×10 ⁻⁵
軟鋼	1797	0.65	270	0.5	1.17×10 ⁻⁵
Cu	1356	0.43	212	3.9	1.68×10 ⁻⁵
Fe	1812	0.67	270	0.75	1.12×10 ⁻⁵
SUS	1736	0.59	270	0.12	1.77×10 ⁻⁵

般には高強度材が用いられる。ボディでは加工性や溶接性を重視し、6063が多いようである。

2.3 アルミニウムおよびアルミニウム合金の物理的性質

アルミニウムの熱的性質を軟鋼などのいくつかの合金や金属のそれと比較して表 5³⁾に示す。同表にあるようにアルミニウムの融点は低いが、比熱と潜熱が大きくまた特に熱伝導率が高いため、溶接時には高密度の入熱が必要となる。また、線膨張率が大きいことが溶接変形を大きくする。これらの熱的性質が溶接性の低下をもたらしている。このようなことから、前記の表 1, 2 に示すように種々の接合方法が試みられ、また、それが変遷しているのが現状といえる。

そこで、以下に各接合方法の特徴、課題および改善策

を示す。

3. 各接合方法の特徴・課題と改善策

3.1 抵抗スポット溶接

フードなどの蓋もののインナパネルとレインフォース類を接合するのに既に多く適用されているが、構造体の接合となると板厚はそれよりも厚く1.5~3mm前後となり、溶接に必要な電流値は高くなる。たとえば、材厚が2mmの場合、 $5\sqrt{t}$ (t : 材料厚) のナゲット径をえるための電流値は図2のようになり、材厚1mmの場合の20%程度の増加が必要となる。その継手の引張りせん断破断荷重は図3のように、材厚1mmの場合の約2倍の荷重がえられる。一方、材料間を比較すると6000系合金は、5000系合金よりも高い電流が必要となると同時に、熱影響による軟化のために継手強度は10%前後低下するようになる。なお鋼の同板厚の場合と比較すると概略50%弱の破断荷重となっている。

図2 溶接電流値と破断径の関係 (2mm)

図3 引張破断径と引張せん断強度の関係 (5182)

疲労特性については、図4⁶⁾のように板厚の効果は認められるものの材種による影響は比較的少なく、また鋼の同板厚の場合と比較すると概略50%の疲れ限度となっている。

さて、構造材への適用に際しては、継手強度のバラツキが大きな課題となるが、材料表面の酸化膜の厚さ^{7,8)}や塗油状況⁹⁾、連続打点による電極先端の圧壊状況⁹⁾やこれらにも起因する散り発生時の通電径急拡大による電流密度の低下¹⁰⁾、施工時の材料隙間⁷⁾・打角⁷⁾などが通電の安定性に影響を及ぼすと言われている。これら各種要因に起因する通電中の通電径変化などを、従来の実験式に代わって数学的な熱伝導モデルを用いてチップ間電圧などをモニタリングすることでナゲット径を瞬時に推定し¹⁰⁾、インプロセス制御をおこなうという手法が重鉛めつき鋼板に適用され始めている¹¹⁾。アルミニウム合金への適用装置の出現が期待される場所である。一方、溶接欠陥の疲労強度への影響も論じられており、表面の亀裂サイズについては、0.46mm以下にする必要があるとの一つの目安が提言されている¹²⁾。

3.2 アーク溶接

アーク溶接はミグとティグに大別されるが、継手部の要求品質や生産性などの特徴をもとに適宜使い分けをする必要がある。各種材料の継手の機械的性質は、表6にしめす様に自動車に多用される重ねの片面すみ肉継手の強度は、素材厚で除した応力で表現すると突合せ継手の60%程度の引張強さしかえられず、また疲れ限度も25%程度となる。これは、引張り時に偏心による曲げが加わり、ルート部にひずみが集中し溶接金属部でのせん断破断となりやすいからである。ここで破断荷重をP、材厚をt、試験片幅をl、被溶接材内破断における継手効率(対素材強度)を η 、素材の引張強さを σ_M 、すみ肉継手の

図4 引張せん断継手における疲労特性

表6 各種継手における引張強さ (5182)

継手形状		突合せ継手						重ねの片面すみ肉継手			
溶加材		4043			5356			4043		5356	
後熱処理	°C×30 min	なし	175	200	なし	175	200	なし	200	なし	200
引張り強さ	N/mm ²	304	304	275	304	304	304	196	88	196	196
0.2%耐力	N/mm ²	147	147	147	147	147	—	—	—	—	—
伸び	%	20	17	11	22	22	22	2	1	3	3
破断位置*	M, D, B	M, D	D	D	M	M	M	D	D	M, B	B

* M: 母材破断 D: 溶接金属部破断 B: 溶接境界部破断

表7 重ね片面すみ肉継手において母材部で破断させるためのど厚の大きさ係数 β

溶加材	5356	4043
母材		
5182-O	1.70	2.73
6N01-T5	1.02	1.63

ただし継手効率 η を5182の場合1.0, 6N01-T5の場合0.6とした。また、のど厚破断応力 σ_s は以下の値を用いた。

	係数 ⁽²⁾	5356 (N/mm ²)	4043 (N/mm ²)
前面すみ肉	1.00	234 ⁽³⁾	145 ⁽³⁾
重ね両面すみ肉	0.81	190	117
重ね片面すみ肉	0.68	159	99

図5 重ねすみ肉継手の引張試験後の外観

ど厚を $\beta \times t$, 溶接金属部内破断におけるのど応力を σ_s とすると次式のような関係になる。

$$P = 1 \times t \times (\eta \times \sigma_M) \quad \text{被溶接部材内での破断の場合}$$
$$= 1 \times (t \times \beta) \times \sigma_s \quad \text{溶接金属部内での破断の場合}$$

被溶接部材で破断させるためのすみ肉のど厚サイズの係数は、 $\beta \geq ((\eta \times \sigma_M) / \sigma_s)$ となる。ここで、被溶接材に5182, 6N01, 溶加材に5356, 4043を用いた場合の β を算出すると表7^(13,14)のようになる。

なお、5000系母材への4043溶加材使用は図5のように破断時の変形が少なく、溶接金属部の延性に難点があり、特に塗装ベーキング等で200℃近辺まで上昇するとその影響が顕著となるので溶加材選択には留意が必要である。

重ねすみ肉継手の強度に関し、電流過多であったり、溶接速度が過少であったりすると下材への溶け込みが深くなるものの、余盛が落ち込みのど厚が確保できない場合、即ち前述の β が小さくなることから強度はかえって低下をきたす。この対策の一つとして交流ミグ溶接電源を採用すれば、ワイヤ送給量が同一のままで溶け落ちが抑制でき、のど厚が厚く確保されるために継手強度を高く保持できるようになる。表8は、その余盛形状と継手強度との関係を示したものであるが、ルート先端の融合不良も実のど厚を低下させることにもなるので、これら両方を同時に満足させる必要がある。

3.3 レーザ溶接

レーザ溶接は、通常のアークよりもエネルギー密度が高いことから、母材への熱影響が少なくなり継手効率がミグ溶接の場合よりも10ポイント程度高くなる⁽¹⁵⁾。この効果

図6 溶加材添加によるギャップ補完効果

図7 重ね継手の強度(CO₂レーザの場合)(1mm板、溶加材添加なし)

は6N01合金など熱処理型合金や加工硬化の調質材には有利に働く。その他、入熱が少なくなる⁽¹⁶⁾ことにより溶接変形も少なくなる⁽¹⁵⁾などのメリットがある。フードのヘミング部のインナとレインフォースとの接合^(17,18)には従来より適用されているが、ボディの組立には、AudiのA2に始めて適用された。アセンブリラインへの適用となると、組立時の合わせギャップ精度の確保がポイントとなり、施工時に工夫が凝らされているものと推定される。NedCarのACCESS(コンセプト車)のサイドシルとフロア材との重ね継手では、はめあい角度の制御にて0.3mm以内にそのギャップ精度を確保している⁽¹⁹⁾。他のギャップ補完技術として、溶加材を添加する方法があり突合せ継手の例ではあるが、図6のように溶加材無しでは0.1mmが限度であるのに対して、溶加材を最適化した上で添加すれば板厚の40%まで許容限度を拡大することができる⁽²⁰⁾。とはいえ、組付け精度の点からは重ね継手が無難な方式と思われ、板厚1mmでの例ではあるが、図7のように、突合せ継手強度の70%程度の値がえられている⁽²¹⁾。さらなる強度向上のためには、ビート幅を広くして破断経路を長く取るとか、高強度な溶加材を添加して強度そのものを上げるなどの処置が、必要となろう。

さて、アセンブリへの適用という点においては3次元

表8 交流パルスミグによる溶込み形状と継手強度

ワイヤ ¹⁾ 送給量 m/min	極性比率 % ²⁾	溶接電流 A	断面の溶込み	引張強さ N/mm ²	伸び %
5.2	0	85		214	6
6.5	0	110		130	2
	40	—		210	6

¹⁾ A5183WY-1.2φ ²⁾ EN/EP

図8 各種メカニカルファスナーの継手強度
(5023-T4, RSW：抵抗スポット, TLC: TOG-L-LOC®, SPR：セルフピアッシングリベット)

図9 SPRとRSWのL-N線図比較
(5023-T4, 1mmt, 荷重方向は引張せん断, 荷重比は

図10 FSWの接合概念図

溶接への適用が容易であることを考慮すると、CO₂ レーザよりもファイバ伝送可能な YAG レーザの方が有利であると考えられる。装置上の課題でもある YAG の高出力化、発振効率の向上等への開発は、装置メカにおいて鋭意実施されている。従来のランプ励起に替わって発振効率の高いダイオード励起による機種が発表されており、ビーム品質の改善や大出力化にもメリットを発揮すると言われ²⁾、アセンブリへのさらなる適用を促進するものと推定される。

3.4 機械式接合

機械式接合には種々な方法があり大別すると、素材の変形のみで接合力を受け持つ TOG-L-LOC®やTOX®など

のメカニカルクリンチング、そしてリベットなどの別物を介するセルフピアスリベット (SPR)、ブラインドリベットなどのリベッティングおよびボルト・ナット類による締結などとなる。欧米などではこれらの方法が多用されているが、それは抵抗スポット溶接の信頼性や生産性(連続打点性)に対する課題が十分に克服されていないとの思いや熱影響がないために強度特性、とりわけ疲れ限度に対する向上が期待されているからと推定される。TOG-L-LOC®, SPR と抵抗スポット溶接の継手特性を比較すると図8²³⁾図9のように、確かに疲れ限度に優位性が認められる。なお、機械式接合は、一般に引張せん断方向の荷重には強いが剥離方向には弱いと言われるが、い

いわゆる延性比（剥離強さ/引張せん断強さ）をとると、TOG-L-LOC[®]は40%弱であるが、SPRは70%程度で抵抗スポット溶接に比較して同等以上の値となっている。

さて、今後の適用が期待される SPR に関して、特にその接合原理からして材料とリベットとの摩擦力を如何に安定的に維持するのが継手強度のバラツキを抑制するポイントと考えられる。塗油下での継手強度は無塗油下でのその約70%となり²⁰⁾、抵抗スポット溶接の場合よりも塗油下での継手強度の低下が大きい。接合前に脱脂処理してその強度を管理しても、使用時に油や水などの浸入が防止できないのであれば、むしろ塗油下での継手強度で設計の方が経年変化など気にしなくてもよいので合理的かもしれない。あるいは、油などの進入が予想できる場合はピアッシング側の位置をその雰囲気外とするような設計にすると、塗装などで防止するなどの事を考慮する必要があるものと思われる。

3.5 摩擦攪拌接合 (FSW)

摩擦攪拌接合は、1991年 TWI（英国溶接研究所）が開発した方法であり、そのツールは図10²⁵⁾のように掻き混ぜ棒を先端に配し、その掻き混ぜたものを外部に逸散させないように、と同時に被接合材表面を摩擦発熱させるためのいわゆるショルダを配置した丸棒状のものである。そのツールを、接合する材料の開先に肉厚方向から回転

させながら突っ込み、材料を摩擦発熱させ、塑性流動により金属を掻き混ぜながら後方に移動させるべく接合方向に進行させて接合する方法である。したがって、材料を溶融するほどにまで高温にする必要はなく、凝固による収縮をとまわらないために変形が少なくなる、熱影響が少なく継手強度が低下しにくい、また凝固割れの点で溶接できなかった材料が接合可能になるなどのメリットがある。また、入念な脱脂処理や酸化膜の除去は不要となるなどアルミニウム合金にとっては画期的な接合方法である。

ここで、エネルギー吸収体用の 6000 系 T5 形材 (3mm 厚)

表9 各種材料における継手性能（突合継手）

	母 材		溶接部		継手効率	
	引張強さ MPa	耐力 MPa	引張強さ MPa	耐力 MPa	引張強さ比	耐力比
5052-O	200	96	200	96	1.00	1.00
5052-H34	262	214	206	108	0.79	0.50
5083-O	289	145	289	145	1.00	1.00
5083-H32	318	227	298	150	0.94	0.66
6063-T5	186	145	145	96	0.70	0.66
6N01-T5	274	235	198	121	0.72	0.51
6061-T4	240	145	200	138	0.83	0.95
6061-T6	310	275	193	124	0.62	0.45

図11 各種溶接法による突合せ継手の機械的性質
(母材：6000系形材-T5 3mm)

図12 結合方式の改善

図13 アルミ構造体の結合部剛性

突合せ継手における引張性能を、YAG、ミグ、ティグと比較すると図11²⁰⁾のようになる。破断位置はいずれも熱影響部であるが強度は、従来のミグ、ティグに比較して高くなるものの、YAGと同等レベルかと推定される。なお、FSWは比較した他の方法のように溶加材(5356)を添加する必要がないが、接合部の硬さが熱影響軟化部よりも唯一高くなるので、破断は他方法と同様に熱影響部位で起きている。

なお、本方法のデメリットとしては、材料を強固に保持する必要があるためクランプ治具が大掛かりになることや、それに起因して3次元接合が容易でないことなどがあげられるが、現在も鋭意改善に取り組まれている。

4. 設計による型材溶接継手の性能向上

型材は強度や耐力の必要性からT5調質で用いられることが多い。なお、6061の場合は強度と靱性の両方を求められる場合が多いので水冷であるT6調質で用いられることが多い。それらが溶接された場合の耐力は母材の約0.5から0.6倍程度にまで低下する。代表的な例を表9に示す。

また、型材の形状によってはすみ肉溶接等で、欠陥が出やすい場合も起こりうる。一般的には継手近傍が曲げモーメント極大位置になることが多いため、変形が継手軟化部に集中し、強度不足や吸収エネルギー不足を生じる恐れがある。これらに対して、溶接後の熱処理により、軟化部の耐力と強度の向上を図る方法も考えられているが、電着塗装後の加熱温度条件ではそれらの効果は小さく、現実的には設計的な配慮で対策とする方が有効な模様である。

その設計による改善案の例を示す。図12²¹⁾は継手位置の工夫によって、軟化部の一部を最大モーメント部から外し、さらに、すみ肉継手から突合せ継手に変更することにより欠陥を低減する等の改善を図ろうという提案である。

また、型材同士でL、T等の形状にする際に、単純にセットオン継手を構成すれば型材の構成パネルの局部変形²²⁾のため剛性不足が生じるようである。そこで、継手部のみは板材で構成することによって高剛性を得るという、図13のような例²³⁾も報告されている。

また、当初より部分的に鋳造品を用い、複雑形状のみならず、高剛性が必要な部位にもそれを適用し、衝突時に、靱性が問題となる可能性のある鋳造部は、十分に剛性を高め、そこは破壊せず、隣接する展伸材の塑性変形で衝突エネルギーを吸収するという提案などもかなり以前からなされている。

参 考 文 献

- 1) Wulf Leitermann, Peter Watzold, Karl-Heinz von Zengen: Der Aluminium-Space-Frame des Audi A2, ATZ
- 2) 江間：第183回塑性加工シンポジウムテキスト，塑性加工学会，1998
- 3) Dr. Klaus Koglin: Large series production of an all

- aluminium car, 軽金属学会50周年記念シンポジウムテキスト，p9, 2001
- 4) 松井：最近の自動車用アルミニウム板材と加工技術の進展(20014365)，自動車技術会展示会材料フォーラム，2001.5，自動車技術会
- 5) アルミニウム合金構造物の溶接施工管理テキストI. 材料編，p18，第3版(1992)，軽金属溶接構造協会発行
- 6) 自動車技術会：自動車ボディ材料の各種接合継手疲労強度データより抜粋，1994，軽量化接合構造専門委員会編集
- 7) 宗藤：第4回金属成形セミナーテキスト，1986.9
- 8) 笹部：アルミニウム合金の抵抗スポット溶接，溶接技術，1993, No.3, p68
- 9) 溶接学会：抵抗溶接品質モニタ・品質制御システム分科会資料
- 10) 松山：溶接学会，アルミスポット溶接分科会資料，MPW-36-94(1994)
- 11) 藤井，後藤，龍堂，井原：抵抗溶接品質監視装置の開発，溶接学会全国大会講演概要，第53集('93-9)，p408
- 12) 杵淵，岩瀬，高橋：アルミニウム合金抵抗スポット溶接部の疲労特性評価，自動車技術会学術講演会前刷集，No.88，('99.10)
- 13) 寺本：アルミニウム合金における前面すみ肉溶接の静的強度と破壊特性，軽金属溶接，Vol.69('68)，No.9, p429
- 14) American Welding Society: Welding Hand Book, 8th. ed, 1987
- 15) T. Matsumoto, S. Izuchi: Laser Welding of Aluminum Alloy Plate, Extrusion and Casting, SAEpaper No. 960160, Detroit, February, 1996
- 16) 寺崎：溶接による座屈発生条件に関する基礎研究，溶接学会軽構造接合加工研究委員会ワーキンググループ報告書，1998-3, p44
- 17) 高橋：自動車ボンネットへのYAGレーザ溶接の適用，レーザ熱加工研究会誌，Vol.3(1996)，No.2
- 18) 西尾，久野：アルミボディ部品のレーザ溶接技術開発，軽構造接合加工研究委員会，1997-4
- 19) R. J. A. Frielin: New Solutions for Lightweight Bodies, IBEC97, Vol.27, p84
- 20) 松本，井土：アルミニウム合金材のレーザ溶接技術，溶接学会全国大会講演概要集，第57集('95-10)，p444
- 21) 井土，松本：アルミニウム合金のレーザ溶接性，軽金属学会第86回春期講演概要集，p259(94)
- 22) M. Bea, J. Raupach: Recent trends in high power laser technology, レーザ熱加工研究委員会，創立20周年記念講演会，1999-3
- 23) 岩瀬，今村，笹部：アルミニウム合金における抵抗スポット溶接とメカニカルファスナの静的特性比較，機会学会，機会材料・材料加工技術講演会(M & P '96)，1996-11
- 24) 岩瀬，笹部：各種アルミニウム合金へのセルフピアスリベットの適用，自動車技術会，学術講演会前刷集，No.86('99-10)
- 25) Chris Dawes, Wayne Thomas: Friction stir joining of aluminium alloys, BULLETIN 6, 1995, TWI
- 26) 小西，江間，吉田：自動車車体へのアルミ材適用の状況とその周辺技術，日本機械学会関西支部第253回講習会，製品開発を加速する軽量化設計技術と応用テキスト，2002.1
- 27) 今村，米澤，橋村：アルミ合金製角パイプ結合部の強度特性，自動車技術会論文集，Vol.28(1997)，No.4, p83
- 28) 藤原，柏木：幅の異なる中空矩形断面型材T継手の剛性簡易推定法，日本機械学会論文集 Vol.65, No.632
- 29) 波入，千葉，佐藤，佐伯：アルミ車体結合剛性に関する一考察，自動車技術会，学術講演会前刷集，No.9839227, 1998-10