解説

自動車ボデーシート用アルミニウム合金

田中 孝一*・藤倉 潮三*

Aluminum alloys for automotive body sheet

TANAKA Takakazu* and FUJIKURA Chōzō*

1. はじめに

自動車の軽量化は燃料経済性の向上、排ガス規制、安全対策、騒音対策など各種対策による重量増加の回避、省資源対策などの点から自動車工業における重要な技術課題とされている。この自動車の軽量化対策の一つの方策として、すでにわが国でもエンジン部品へのアルミニウム合金鋳物の採用、熱交換器のアルミニウム化などが進められてきているが、最近、欧米ではボデーシート、バンパーなどの構造部品のアルミニウム化が精力的に検討され、アルミニウム合金製フード、トランクリッド、フロアシート、バンパーなどの装着車種が次第に拡大されつつあることが報ぜられている。

欧米における自動車材料としてのアルミニウム材料のこのような動向は、自動車の軽量化問題にアルミニウム業界が巨大市場の開発を目的として対応したものとうかがえる。

自動車材料のアルミニウム化にとって材料価格、自動車の製造価格に対する材料転換の影響など経済的な要因は、その成否を支配するものと考えられるが、これを有利に導くためにはアルミニウム材料のプレス成形、接合、表面処理、自動車部品としての機能を満たすための強度改善およびこれらのための材料開発など多くの技術的課題が検討されなければならない。

いつぼう、わが国においては欧米の最近の自動車のアルミニウム化の動向に相当する具体的な報告は現在のところ見当たらないが、わが国の乗用車は欧米の大型車種に比して重量、燃費の点で有利であること、最も厳しい排ガス規制が他国に先がけ優先的に実施されていることのほか、国内の鉄鋼材料に対するアルミニウム材料の相対的価格差などの問題に起因して、欧米とはじやつかん様相を異にしているものと考えられる。しかし、欧米のこれまでの経緯をみると、自動車の軽量化への関心が高

まるにともなつて、種々の自動車用アルミニウム新合金の開発およびこれに必要な加工技術の開発が積極的に行なわれている。

このような自動車のアルミニウム化に関する最近の動向は単に自動車のアルミニウム化の問題にとどまらず、今後のアルミニウム材料の技術開発、用途開発を推進していくうえで、重要な示唆を与えるものとしても意義が大きいと考える。このような理由から最近種々提案されている自動車用アルミニウム合金のうち、種々の加工技術と最も関係の深いと考えられる自動車ボデーシート用アルミニウム合金の開発状況およびこれらの合金の特性についてまとめた。

2. 合金の種類と機械的性質

乗用車のボデーをアルミニウム化しようとする最初の試みは1923年にさかのぼるが、経済的な理由もあつてその後、レーサーなどの限られた範囲で3004, 6061, 5052などが使われていた¹⁾。市販される乗用車ボデーへのアルミニウム材料採用の歴史は欧州において古く、2, 3例を挙げるならば、ダイムラーベンツ社では1955～1956年のベンツ300 SL, 190 SL, のボデーの大部分がアルミニウム材料で製造され、メルセデスベンツ 600 には1963年以来、アルミニウム製トランクリッドが使用されている²⁾。ブリティッシュレイランド社では、1930年代のローバー Rover P 3 のフード、トランクリッド、ドアに5154 Aを採用し、1948年に発表されたランドローバーには5251を使用している。さらに1970年以後 Rover 2000/3500 には2117が使用されている³⁾。フランスではAG 3(5754X)を使用したディナパンアードが1954年に工業的に製造されている⁴⁾。最近では、1985年に燃費を40%以上改善しなければならないという規制の施行が予想されることもあり、米国においても、1974年にアルミニウム製ボデー車コルベットの試作評価がおこなわれている⁵⁾。さらに、

* 古河アルミニウム工業㈱(日光市)。Furukawa Aluminum Co., Ltd (Nikko)。

第1表 自動車ボデーシート用合金の組成¹⁾

合 金 名	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
2036	0.50	0.50	2.2~3.0	0.10~0.40	0.3~0.6	0.10	0.25	0.15
2117	0.8	1.0	2.2~3.0	0.20	0.20~0.50	0.10	0.25	—
2002	0.35~0.8	0.30	1.5~2.5	0.20	0.50~1	0.20	0.25	—
X5020	0.30	0.7	1.3~1.9	0.1~0.5	2.4~3.2	0.2	0.2	0.1
5182	0.20	0.35	0.15	0.20~0.50	4.0~5.0	0.10	0.25	—
X5085	0.3	0.4	0.15	0.2	5.8~6.8	0.2	0.2	0.1
6151	0.6~1.2	1.0	0.35	0.20	0.45~0.8	0.15	0.25	0.15
6009	0.6~1.0	0.5	1.15~0.6	0.20~0.8	0.40~0.8	0.10	0.25	0.10
6010	0.8~1.2	0.5	0.15~0.6	0.20~0.8	0.6~1.0	0.10	0.25	0.10

1) 範囲のないものは最大値を示す。

第2表 フードあるいはトランクリッドへのアルミニウム合金板の採用状況

自動車メーカー	搭載車種	パ ネ ル	製造内容	材 料		軽 量 化 効 果	
				アウター	インナー	減少量(kg)	減少率(%)
クライスラー (米)	フェザー ダスター	フ ー ド トランクリッド	量 産	(鋼 板) (鋼 板)	5182-SSF 5182-SSF	6.4 4.5	
	チャージャー XL	フ ー ド トランクリッド	試 作	5182-SSF (鋼 板)	5182-SSF 5182-SSF	19.1 6.8	
GM (米)	トロネード ¹⁾ (オールズモバイル)	フ ー ド	量 産	(鋼 板)	5182-0	14.1	28
	— (シボレー)	フ ー ド	試 作	2036-T4	5182-0		
BLMC (英)	ローバー 2000/3500	フ ー ド トランクリッド	量 産	2117-T4 2117-T4	2117-T4 2117-T4	13.6 10.3	56 57
アルファロメオ (伊)	アルフェタ	フ ー ド	試 作	2002-T4	2002-T4 (鋼 板)	8.9(6.2) ²⁾	58(40)

1) 文献²⁸⁾には明示されていないがトロネードと推定される

2) カッコ内はインナーが鋼板の場合

トロネード、シベット、キャデラック、ムスタングⅡ、グラナダ、ダートライト、フェザーダスターなどの量産車種へのアルミニウム合金製パネルの装着実施、あるいは予定が発表されており、量産車種へアルミニウム合金製パネルが次第に浸透しつつあることを知ることができる。

2.1 合金の種類

最近、新しいアルミニウム合金として発表、登録されるものの多くは自動車材料を対象としたものであり、自動車市場に対するアルミニウム材料メーカーの関心の大きさをうかがうことができる。ボデーシート用合金として提案されている合金の種類と組成を第1表に示す。これらは後に述べるように自動車用鋼板に相当する機械的性質をもつものであるが、現在までのところAl-Cu-Mg系熱処理合金である2036-T4、これに類似する2117-T4、Al-Mg系非熱処理合金5182-Oの使用実績が最も多く報告されている。第2表はボデーシートとしてアルミニウム合金製フード、トランクリッドの量産あるいは試作での

採用状況を示したものである。

2036-T4は強度的には5182-Oより優れるが成形性に劣る。しかし5182は成形の際Al-Mg合金特有のひずみ模様が発生し外観を損なうので⁶⁾、ひずみ模様の発生しない2036-T4がアウターパネルに、5182-Oがインナーパネルに使用されている。その後、詳細は公表されていないが材料の製造法の改善によりひずみ模様の発生を防止した5182-SSFがレイノルズ社から、5182-H₃E 22がアルコア社から発表されており、チャージャーXLではこれを用いてアウター、インナーパネルともに5182を使用している。

成形により加工硬化した2036-T4、5182-Oは後の塗料焼付工程の加熱でやや軟化するが、成形性を害することなく、塗料焼付条件の加熱により、時効硬化するAl-Cu-Mg合金にSiを添加した2002がペシネーより発表されている⁷⁾。

さらに最近アルコアは6009、6010と称する二種類の合

金を提案し、これらは2036, 5182のそれぞれの強度と成形性の関係を改善することに成功したと発表している⁹⁾。パネルのインナーに5182に代え6009を、アウトターの2036に代え6010を推薦している。これにより板厚の減少が可能となるほか、両者とも同一系統のAl-Mg-Si合金であるためパネルのスクラップ価格の低下をおさえることができ、鋼板に比して高価なアルミニウム合金板の経済性を償うことができるとしている。アルミニウム材料の特徴としてスクラップの再生による資源の有効活用、省エネルギーなどの効果が大きいことが挙げられているが、このような合金組成の選定は今後の合金開発の方向を示唆するものと考えられる。

2.2 機械的性質

ボデーシート用アルミニウム合金の機械的性質を鋼板と比較して第3表に示す。これらの合金は従来使用されている薄鋼板とほぼ同等の引張強さを有しており、ほぼ28～34 kg/mm²の範囲におさまっている。第3表の合

第3表 自動車ボデーシート用合金の代表的機械的性質

合金調質	引張強さ (kg/mm ²)	耐力 (kg/mm ²)	全伸び (%)
2036-T4	35	20	24.5
2002-T4	33	18	30
X5020-T4	35	21	25
5182-O ¹⁾	28	13	25.5
5182-SSF	28	13	26.5
X5085-O	31	15	28
6151-T4	28	17	23
6009-T4	23	13	24
6010-T4	29	18	23
リムド鋼板	36	21	40
キルド鋼板	29	16	40

第1図 アルミニウム合金板の強度—延性バランス (1.0 t)

金は非熱処理合金、熱処理合金にわけられるが、いずれの場合も硬化に有効な添加元素量を多くすることにより、さらに引張強度を向上させることは可能である。しかし、一般に強度の上昇に伴って、材料の製造が困難になる。あるいは延性が低下し、成形性が阻害されるなどの問題を生じる。第1図に各種アルミニウム合金系について引張強さと延性の尺度としての伸びの関係を示す⁹⁾。Al-Mg系、Al-Cu-Mg系合金が比較的すぐれた延性を示すが鋼板には及ばない。

ボデーシート用アルミニウム合金は、非熱処理合金では強度的には中間調質材が有利であるが延性が低下し、成形加工が困難となるので軟質材(-O)が、熱処理合金では強度に優れた高温時効材より成形性に優れた自然時効材(-T4)が使用される。第2図に2036, 6151の室温における時効硬化曲線を示す¹⁰⁾。自動車用材料としての多量の材料を安定して製造するため、熱処理合金の溶体化処理には連続焼入炉が使用されるが、焼入感受性も材料組成選択のための考慮すべき点として挙げられる。従来、成形用アルミニウム材料としては強度の低い軟質合金が多く使用されてきたが、強度と延性のバランスを考

第2図 2036, 6151合金の室温時効による硬化

第3図 各種アルミニウム合金の引張加工による機械的性質の変化

第4図 塗料焼付加熱を想定した加熱温度による耐力の変化 (1時間加熱, 3週間室温時効後に測定)

慮した成形用アルミニウム合金材料の開発はなお今後の重要な課題でもあろう。

自動車の組立製造工程ではプレス成形, 塗装の焼付など材料の機械的性質に影響をおよぼす加工工程が含まれる。したがって, 素材としての性質のほか, たとえば, フード, トランクリッドなどの最終強度に, このような加工工程がどのような影響を及ぼすかを理解しておく必要がある。第3図はプレス加工によってうける材料の変形を引張加工に代表させて引張加工度による機械的性質の変化を示したものであり, また, 第4図はさらに塗料焼付などの加熱の影響について示した¹⁰⁾。

3. 成形性

アルミニウム材料は家庭用器物, 家電製品部品, 包装容器などに広く使用され, 代表的成形用材料として挙げられる。これらの成形加工はいずれも深絞り成形を主とする加工であるのに対し, 鋼板を使用して行なわれる自動車ボデー部品の成形は張出成形分の大きい複合成形によ

第5図 自動車部品のプレス成形性評価法と特性の関係

つて行なわれる。すなわちダイに付けられた絞りビードによりかなり強く材料が固定されると同時に, ポンチの進行によって材料が張出され所要の形状に成形される。自動車部品のプレス成形品形状は車種, 部品の種類により種々変化するため, 成形用材料としての合金開発とともに, 材料の成形限界と適切な成形条件を把握しておくことが必要である。また材料特性値 (成形性指標) から成形性を予知することも重要である。

自動車部品のプレス成形性評価の関係を第5図に示す⁶⁾。材料特性値として, 第5図に示すもののほか, わが国ではエリクセン値, コニカルカップ値が実用材料の評価に採用されている。特にわが国では薄鋼板についてはプレス成形性評価法およびこれを活用した材料の成形性改善において数多くの優れた研究成果が得られている。現在わが国が品質の優れた成形用鋼板の最大の輸出国に至った原動力の一つとして評価されている。しかしアル

第4表 2036-T4, 5182-0, 鋼板の成形性の諸指標

材 料・板 厚			2036-T4 (0.91 mm)			5182-0 (0.94 mm)			1010鋼板 (0.91 mm)		
試 験 方 向			L	L T	45°	L	L T	45°	L	L T	45°
全 伸 び			22.7	25.0	24.2	25.2	28.0	26.8	44.9	42.0	40.2
一 様 伸 び			19.8	20.0	20.4	21.0	23.5	23.0	25.5	24.0	23.5
n 値			0.245	0.246	0.241	0.338	0.334	0.338	0.226	0.230	0.229
r 値 ¹⁾			0.65	0.81	0.77	0.70	0.90	0.71	0.94	1.46	1.58
Δr			-0.04			-0.09			-0.38		
限界絞り比 LDR			0.08			2.14			2.12		
オルゼンカップ値			無 潤 滑			8.4 mm			11.2 mm		
			潤滑剤使用			9.9 mm			11.9 mm		

1) 伸び15%における値を示す。

第6図 各種アルミニウム合金の張出成形性と全伸び, n 値, r 値の関係

ミニウム材料については今後の成果にまたなければならぬ部分を多く残している。

3.1 成形性指標

2036および5182の成形性に関する諸指標を鋼板と比較して第4表に示す⁴⁾。一部には鋼板とほぼ同等の値を示すものがあるが、概して低い値を示す。特に伸びが劣ることが特徴的であり、これが張出成形性を多く含む自動車ボデーの成形性にアルミニウム合金が劣る大きな理由に挙げられると考える。 r 値は引張試験における幅方向のひずみに対する厚さ方向のひずみの比を表し、深絞り性を示す特性値とされ、また n 値は引張変形における材料の加工硬化指数でひずみ分布の均一性に対応し、張出成形性を示す値とされている。鋼板においてはこれらの値と各成形性との間に良好な対応性が得られている。アルミニウム合金において得られる値を鋼板の値と比較することにより、アルミニウム合金のおおよその成形性が評価できるが、鋼板とアルミニウム合金とは圧延—再結晶集合組織の形成機構が異なるためアルミニウム合金の成形性との関係は鋼板の場合ほど十分ではない。たとえば第6図は1XXX, 2XXX, 3XXX, 5XXX系合金15種類について複合材形性のシミュレーティブな試験値であるエリクセン値と r 値, n 値, 全伸びとの関係を示したものであるが¹¹⁾, r 値, n 値との対応性は悪く伸びとの相関性が高い。アルミニウム合金については成形性指標測定法の検討も含めて、今後なお解明すべき問題が残されている。

3.2 成形限界

最近、成形限界曲線を用いて実験的に成形性を評価することが行なわれる。この方法は予め材料に格子円を描き成形実験を行ない、材料の破断限界とひずみ量との関係を求めるものである。Heckerの方法によつて得られた主な自動車ボデー用アルミニウム合金の成形限界曲線の比較を第7図に示す¹⁰⁾。Heckerは種々のアルミニウム合金の成形限界曲線を求め、アルミニウム合金の成形性は鋼板に比して曲げ性、張出し性いずれにおいても劣る¹²⁾。したがって自動車部品としてのアルミニウム合金

滑、しわ押え力などの適切な管理が必要としている。

3.3 形状性

成形用ダイの設計において配慮すべき問題に成形品のスプリングバックがある。スプリングバック量は耐力の増加、弾性率の減少に従つて増加する。したがって、鋼板に比して弾性率が約1/3のアルミニウム合金の場合はスプリングバックが大きくなることが避けられず、これを

第7図 各種ボデーシート用アルミニウム合金の成形限界図

第8図 自動車フードアウトパネルの形状性におよぼす雄形絞りビードの影響

第9図 “Roped Hem” 法

のプレス成形においては厳しい形状のデザインを改め潤滑考慮した成形ダイの設計が必要となる。また、2036-T4と5181-SSFを比較すると耐力の高い2036が5182の2倍のスプリングバックを起こすことから¹³⁾、合金選定も重要な因子であると指摘されている。

アルコアはミニパネルと称する実物の約 $\frac{1}{3}$ の大きさの模型パネルの成形性試験を行ない¹⁴⁾、ダイ形状と成形品の関係を得ている。第8図はその一連の検討結果の一つであるが¹⁵⁾、絞りビードの曲率半径とビードの高さを調整することにより鋼板用ダイ本体の形状修正を行なうことなく、パネルの成形が可能であり、良好な形状性が得られるとしている。

3.4 パネルの成形加工

成形限界の点ではアルミニウム合金は軟鋼板に比して特に張出し成形性に劣るため、いずれも深絞り成分を大きくした成形条件を採用する必要がある。すなわち金型

では表面仕上げを良好にし、コーナー部の曲げ半径を大きくとり、ビードを狭く、さらにブランク形状を適切にとり、しわ押え力を減ずることなどが必要である。

また、2036-T4、5182-Oともに90°、180°いずれの密着曲げも割れを発生する危険があり、曲げ半径は90°曲げ180°曲げの場合とも板厚と同程度とされている。このため、アウターパネルとインナーパネルとを結合する際に行なわれるヘミング加工では、割れを回避する方法として第9図に示すような“roped hem”法が提案されている¹⁶⁾。これは従来行なわれてきたヘム加工と形状が異なるため外観を向上させる必要があることも指摘されている。

4. 接 合

自動車の組立製作においては種々の接合法が採用されており、鋼製自動車の組立では特に抵抗スポット溶接が多用されている。鋼板に比しアルミニウム合金板の場合は電気伝導度が大きい、融点が高い、酸化膜が形成されやすいなどの性質をもつため、剪断強度が低い、電極チップの寿命が短いなどの欠点が指摘されてきた。このためアルミニウム合金に適した抵抗スポット溶接条件の選定、電極チップへの表面処理¹⁷⁾などの検討が行なわれており抵抗スポット溶接継手の性能改善、作業性の改善に対する努力が続けられている。また、抵抗スポット溶接と接着剤との併用（ウエルドボンド法）あるいは、クリンチング、ヘミングなどによる機械的結合によるアルミニウム合金板間の接合、あるいは鋼板とアルミニウム合金板間の接合の検討もおこなわれている。第5表にアルミニウム合金ボデーパネルの接合法の例を示す。

次にアルミニウム合金板の代表的接合法について述べる。

4.1 接着

第5表 アウター、インナーパネルの主なる接合法

アウター、インナーの材料	塔 載 車 種	パ ネ ル	接 合 方 向			
			スポット溶接	クリンチング	ヘミング	接 着 ¹⁾
アルミニウム合金板	チャージャーXL	フ ー ド	○			
	(GM シボレー)	フ ー ド	○	○		
	ローパー	フ ー ド	○		○	
	アルフェタ	フ ー ド	○		○	○
鋼板との共用	フェーザースター	フ ー ド		○		
		トランクリッド			○	○
	チャージャーXL	トランクリッド			○	○
	トロネード	フ ー ド	○ ²⁾	○		
	アルフェタ	フ ー ド			○	○

1) 他の接合法との併用 2) インナーパネルの部品接合用に用いている

第6表 種々のアルミニウム合金に対する接着剤の初期強さ¹⁾

材 料	適 応 場 所	接 着 剤	せん断強さ (kg/cm ²)
2036-T4	アウターパネル	ビニルプラスチック B	52— 66
X5020-T4	〃	〃	52— 66
6151-T4	〃	〃	56— 66
5085-H111	インナーパネル	〃	49— 59
鋼 板	—	〃	56— 73
2036-T4	アウターパネル	焼付型エポキシ A	126—175
X5020-T4	〃	〃	126—168
6151-T4	〃	〃	140—189
5085-H111	インナーパネル	〃	126—147
鋼 板	—	〃	140—189

1) 1×4 in の板を用い 0.5×1 in の重ね継手による。

第7表 接着強さ、耐久性による材料表面の潤滑油付着量の影響

接 着 剤	材 料	潤滑油 種 類	油付着量 (mg/in ²)	初期強さ (kg/cm ²)	残 留 接 着 力 (%)		
					高温高湿試験湿度 85%, 75°F, 3ヶ月	高温高湿試験湿度 100%, 125°F, 3ヶ月	5%塩水噴霧試験 95°F, 3週間
エポキシ E	2036-T4	なし	—	228	71	76	41
		No.1	0.34	136	58	54	53
		No.2	0.20	131	63	57	56
ビニルプラスチック B	2036-T4	なし	—	65	99	96	23
		No.1	0.34	52	100	84	39
		No.2	0.20	55	92	91	22
エポキシ E	鋼 板	なし	—	162	81	27	66
		No.1	0.34	258	88	32	70
		No.2	0.20	260	84	40	71
ビニルプラスチック B	鋼 板	なし	—	72	71	50	31
		No.1	0.34	47	94	84	63
		No.2	0.20	65	73	61	78

アルミニウム合金製ボデーパネルの接合に接着剤はかなり広範囲に使用される傾向にある。接着剤の使用は応力集中の緩和、振動防止のほか、絶縁、シール効果をもち、異種金属材料との接合も簡便に行ないうる。

接着剤による接着力、耐久性は種類、メーカーによつて異なり、また材料表面の清浄度、粗度および耐食性に影響される。焼付硬化条件も組立工程によつては選択しうる範囲に制約をとまなう場合もある。

第6表に代表的アルミニウム合金に対する接着剤の接着力を示す¹⁸⁾。通常、部材の成形後に接着がおこなわれるが、成形潤滑剤を適当に選択することにより、第7表に示すように鋼板の場合と同様潤滑剤付着のまま接着を行ない、鋼板の接着強度と同程度の接着強度が得られる¹⁸⁾。後に述べるように抵抗スポット溶接、メカニカルクリンチングなどと併用することにより、継手性能を改善することができる。

4.2 抵抗スポット溶接

アルミニウム合金板の抵抗スポット溶接は、多くの場

第10図 抵抗スポット溶接継手のせん断強さとナゲット径の関係

第11図 2036-T4 抵抗スポット溶接継手の疲労強さと接着剤併用の効果

第12図 2036-T4 (0.040 in.t) の抵抗スポット溶接継手の疲れ寿命におよぼす内部クラックの影響

第13図 5182-0 (0.032 in.t) の抵抗スポット溶接継手の疲れ寿命におよぼす表面割れの影響

合、单相または3相式交流溶接機が使用される。鋼板の場合に比して鍛圧力が大きく、溶接時間が短く制御が厳しくなる。溶接電流は3～4倍を必要とするため冷却系の改良が必要となり、溶接機が大型にならざるをえないようである。

実験室的にはチップドレッシングを行なうことなく連

続して2,000点以上のスポット溶接が可能であるとも報告されているが¹⁹⁾、実際にボデーパネル、トラック運転台の生産に採用した経験では、400～600点の溶接後のチップドレッシングを行なわなければならなかったという報告もある²⁰⁾。

抵抗スポット溶接継手の剪断強度を求めた結果を第10図に示す²¹⁾。アルミニウム合金板の場合スポット溶接そのものの強さは鋼板に比してかなり低い値しか得られないが、接着剤を併用したウエルドボンドでは第11図のように鋼板を上回る接合強度が得られている²²⁾。第12図は2036-T4の抵抗スポット溶接部に内部割れが存在する場合、しない場合の継手の疲労曲線を示し²²⁾、第13図は5182の抵抗スポット溶接継手の疲労強さにおよぼす表面割れの影響を示している。内部に発生する割れはほとんど疲労強さに影響しないとしているが、なお詳しい検討が必要と考えられる。

アルミニウム合金板の抵抗スポット溶接の実施要領の手引は米国アルミニウム協会 (Aluminium Association) から発行されている²³⁾。シボレー (GM) では電極が太くなるため、フランジ部の面積およびその内側の空間を広くとらねばならないとして、鋼板と比較して第14図のような部分的な形状の設計変更が必要であることを指摘している¹³⁾。

1) フランジ長さの増 2) 内部領域の増大
第14図 アルミニウム板での部分的な設計変更

4.3 ウェルドボンド

接着剤とスポット溶接を併用したウェルドボンドによる継手の強度は接着剤のみを使用した継手の強度と同等、場合によつて劣る場合もあるが、常にスポット溶接のみの継手強度よりは優れていると報告されている。アルコアはビニールプラスチゾルあるいはエポキシ樹脂を用いてウェルドボンドの継手強度について検討し、種々の環境下での耐久性試験ではビニールプラスチゾルを用いた継手が良好な結果を示し、疲労強さの点では変性ポリサルファイドエポキシ接着剤を用いたものが接着剤のみの継手よりも優れた結果が得られたと報告している²⁴⁾。また、接着剤を用いてスポット溶接を行なうと、接着剤による反応が材料に対する前処理的効果をもち強度の改善に寄与するとの報告もある²⁵⁾。

4.4 溶融溶接

一般にアルミニウム合金構造物の接合に使用されるTIG、MIGなどの溶融溶接も部品、ブラケットの取付

第8表 ボデーシート用合金 MIG、TIG 溶接と電極線の選択¹⁾

母材	電極線		
2036	4047	4043	
X5020	4145	2319	
5182	5356	5183	5556
6151	5356	4043	

1) Aluminum Association 資料による。

第9表 ボデーシート用合金の TIG 溶接継手の代表的機械的性質 (余盛有りの場合)

母材	引張強さ (kg/mm ²)	耐力 (kg/mm ²)	伸び (%)
2036-T4~2036-T4	33	20	13
5182-0~5182-0	27	13	21
2036-T4~5182-0	27	13	14
5020-T4~5020-T4	31	21	8
5085-H111~5085-H111	32	14	20

第15図 MIG スポット溶接継手の疲労曲線

け、シーミングなどに用いられている²⁶⁾。

一般に2036のような合金は溶接性の悪い合金とされているがボデーシートのような板厚 1 mm 前後の材料ではMIG、TIGなどの溶接が可能である。ボデーシート合金を溶接する場合の標準的な電極線の種類を第8表に示す²⁷⁾。第9表に MIG 溶接による突合せ継手の機械的性質を、第15図には MIG スポット溶接の疲労強さを示す²²⁾。

4.5 機械的結合法

第5表に示したアウター、インナーパネルの接合法実

	接合強度	簡便度	信頼性	速度	必要部品	レジストリー	変更必要度	コスト	結果
接着	+	-	-	-	+	+	+	-	4
接着との併用	+	-	-	-	+/-	+	+	-	4/5
ヘミング	+	+	+	+	+	+	-	-	6
リベッティング	+	+	+	-	-	-	-	+	4
スティッチング	+	+	-	+	-	+	+	+	6
ボルディング	+	-	+	-	-	-	-	-	2
スポットクリンチング	+	+	-	+	+	+	+	+	7
新設計のフード									
ヘミング	+	+	+	+	+	+	+	+/-	7/8
サンドイッチ溶接	+	-	+	+	-	+	+	+/-	5/6
クリンチプレート溶接	+	+	+	+	-	+	+	+/-	6/7
超音波溶接									?

第16図 接合法とその評価

施例に見られるように鋼板とアルミニウム合金板が共用される場合には溶接が不可能であるため、材料の組合せを問わないヘミング、クリンチングなどの機械的接合がおこなわれる。

GM 社では第16図に示すように7種類の接合方法を8種類の項目で評価をおこなった結果スポットクリンチングが最良と判断している²⁸⁾。この方法の利点として余分な部品が不要であること、適切な接合位置を選定して適切な強度が与えられること、安価な設備で簡単に変更できることを挙げている。シボレーではエネルギー消費量が小さいこと、再研磨間の打点数が200,000~400,000と多いことが利点である反面、接合強度に方向性があること、スポット溶接の2倍近い点数が必要であることを指摘している¹⁹⁾。

5. 塗装および耐食性

元来、アルミニウム合金板は鋼板に比して耐食性に優れるため、アルミニウム合金板に対して鋼板と同様の方法で塗装を行なってもアルミニウム合金板自体の耐食性については問題ないと報告されている。量産、試作車でのアルミニウム合金パネルの塗装の事例をすでにいくつか挙げるができるが、塗料、塗装方法、条作などの詳細な点についての公表は少ない。

5.1 塗装

アルミニウム合金製パネルの採用については比較的古い歴史をもつブリティッシュレイランド社のローバーの塗装は車種によつて多少異なる²⁰⁾。すなわち、ランドローバーではアルミニウム合金パネルに取付けられる鋼製部品を非水リン酸浴で処理したのち、エッチング性プラ

イマーに浸漬し、パネルに付け、パネルはトリクレン脱脂後、アルクロム1200自動スプレー、水洗、乾燥、アルキドメラミン塗料吹付けの順に行なわれている。レンジローバーの場合はリン酸処理、電着プライマー処理、熱硬化性アクリル塗料塗装が行なわれている。ローバー2000/3500では組立完成後塗装を行なっており、その工程はリン酸処理、電着プライマー処理、下塗スプレー塗装、熱硬化性アルカリ塗料の静電塗装である。

インナー、アウターのいずれかが鋼板であるようなアルミニウム—鋼板複合パネルでは前処理に通常のリン酸浴を使用すると浴中の Al イオンが過剰となり良好な塗装ができなくなる。このため、ふつ化物を含む改良リン酸浴を使用することにより処理が可能となるが、ふつ化物は不安定であるため合金変更などの場合には含有量など十分な管理が必要となる。アルミニウム合金部材が全処理面積の5%を超える場合にはふつ化物を含む前処理浴を使用することにより現在の鋼板用塗装ラインの使用が可能である。

第10表は組立工場での塗装の補修方法の例を示したものである²⁹⁾。

5.2 耐食性

自動車用アルミニウム合金の耐食性はいずれも鋼板より優れており、次に述べる接触腐食に対する考慮が払われていれば全く問題はないとされている。合金間で比較すれば5XXX系合金より2XXX系合金は耐食性に劣るがこの差は問題でなくボデーシート用材料として十分な耐食性を有している。単独の耐食性試験による耐食性評価は困難であるといわれ、通常、数種類の耐食性試験の結果により総合的に評価される。第11表は耐食性試験

第10表 組立工程で発生する傷の補修方法

作 業 工 程	アルミ合金板の場合	鋼 板 の 場 合
1. 傷 検 査	薄く油を塗布して蛍光灯で検査	薄く油を塗布して蛍光灯で検査
2. やすりがけ	ダブルカット刃 (22刃/in, 52刃/in) の丸端自在やすり使用	丸端自在やすり (12刃/in) を使用
3. やすり目除去のためのグラインダー研磨 回 転 板 裏 打 材 寸法, 回転数 潤 滑 剤	#180アルミナ紙やすり 発 泡 材 径 6 ~ 8", 2000 ~ 3000 rpm グリース棒使用	#50~120アルミナ布やすり ゴ ム 径 6 ~ 8", 3000 ~ 4000 rpm 不 要
4. 仕上げをさらによくするための追加作業* 回 転 板 回 転 数 潤 滑 剤	径 6 ~ 8" の研磨剤を混入したナイロン 2000 ~ 3000 rpm グリース棒を使用してもよい。	酸化アルミナを混入したナイロン剛毛 2000 ~ 300 rpm 不 要

* 経験者の場合、この作業は不要

第11表 フォード社の推薦による耐食試験塗装方法

A 電着プライマー M 64 J

1. 粘 度	入手のまま		
2. 電着電圧	ボンデライト412	アルミ材	130v
	"	鋼 板	170v
	ボンデライト EP1	アルミ板	200v
	"	鋼 板	130v
3. 電着時間	30秒		
4. 電着浴温	70°F		
5. 水 洗	脱イオン水		
6. 焼 付	試料温度 360°F, 13分間		
8. 塗 膜 厚	0.7 ~ 0.9 mils (アルミ板), 0.7 mils (鋼板)		

B 中 塗 り

中塗塗料 M 65103

スプレー塗装 膜厚 0.7 mils

焼 付 試料温度 275°F 8 分間

研 磨 #400研磨紙で膜厚 1.0 mils に研磨。但し、水浸漬試験片は一部を基地（材料）まで研磨

C 上 塗 り

上塗塗料 M 503103 A を入手のまま（#2ザーンカップ値26秒）塗布

焼 付 試料温度 265°F 17分間 膜厚 2.0 mils

D 亜鉛クロメート下塗り

亜鉛クロメート下塗塗料 TTP-645 を異種金属組合せ材にのみ使用

第12表 線書き傷を有する塗装材の耐食試験結果^{1),2)}

合 金	5%NaCl 連続塩水 噴 霧 試 験試験 (95°F-250 hr)	MASTMAASIS 試験 (40サイクル)	100%恒湿試験 (125°F 3 ヶ月)	水 浸 漬 試 験 (500 hr)
ボンデライト 412 処理の場合				
2036-T4	4 A	4 A	5 A	5 A
X5020-T4	5 A	4 A	5 A	5 A
6151-T4	5 A	4 A	5 A	5 A
X5085-H111	5 A	5 A	5 A	5 A
鋼 板	3 A	2 A	2 A	5 A
ボンデライト EP-1 処理の場合				
2036-T4	5 A	4 A	3 A	5 A
X5020-T4	5 A	4 A	4 A	5 A
6151-T4	5 A	4 A	4 A	5 A
X5085-H111	5 A	4 A	4 A	5 A
鋼 板	3 A	2 A	2 A	5 A

- 1) 文献) による
- 2) テープ試験に評価を示す
- 5 A 塗料剥離なし
- 4 A 線書き傷に沿ってわずかに剥離の痕跡あり
- 3 A 線書き傷の両側 1/16" にわたって剥離
- 2 A 線書き傷の両側 1/8" にわたって剥離

のための塗装方法の例で³⁰⁾, アルコアがフォード社の推薦によるとしているものである。例として人工欠陥を有する各種ボデーシート用合金の試験結果を第 12 表に示す³⁰⁾。

5.3 接触腐食

ボデーパネルにアルミニウム合金板を使用する場合、鉄鋼材料との併用を避けることは実際には不可能であり、したがって異種金属との接触腐食防止が考慮されなければならない。異種金属との接触腐食は両者の電位差、環境、接触面積などに影響される。第13表にボデー

第13表 自動車ボデーシート用合金の電極電位¹⁾

合 金	電位 (V) ¹⁾ -0.1N 甘汞電極
亜 鉛	-1.00
X5085-H111	-0.855
1100, 3006, 6061, カドミウム	-0.830
6151-T4	-0.800
X5052 T4	-0.755
2036-T4, 2117-T4	-0.730
自動車用鋼板	-0.585

1) 53 g/l NaCl + 3 g/l H₂O₂ (25°C) 溶液中で測定

シート用合金の電極電位を示す³¹⁾。アルミニウム合金板—鋼板複合パネルでの接触腐食防止には亜鉛メッキ鋼板, アルミナイド鋼板, カドミウムメッキ鋼板の使用が効果的であり, ネオプレン, ポリサルファイドなどのガスケットシール剤の使用も有効である。また, 亜鉛を含む塗料, 亜鉛クロメートグラマーも有効であるが, アルミニウム合金板側への塗布だけでは効果は小さいと報告されている³¹⁾。

6. パネルの剛性と耐へこみ性

自動車ボデーパネルの機能的強度としてパネル剛性, 耐へこみ性が重視される。このような特性は材料の性質デザイン, パネルの支持方法によつて影響される。最近自動車の軽量化を目的として板厚の減少, 軽量材料への転換が考慮されるに伴つて, パネル強度の評価法, 解析の検討も多く行なわれている。アルミニウム合金板がパネル材料として使用された場合も, 鋼板製パネルと同等以上のパネル強度が要求される。ここではアルミニウム合金パネルについてこれまでに行なわれた検討報告の主なものについてまとめた。

6.1 パネル剛性

パネル剛性に対してはパネルの大きさ, 形状, 材料の耐力, 弾性率, 板厚が影響する。

D. G. Adamsは有限要素法を用いて強度解析をおこない, アルミニウム合金板と鋼板のトランクリッドの形状と剛性の関係を第17図のように示している³²⁾。この曲線は図中に示す大きさのトランクリッドの剛性 1.5 (lb/たわみ0.01")を得るに必要な長さ方向および横方向の曲げ半径を示している。たとえば, 長さ方向の曲げ半径を 600 in としたとき, 横方向の曲げ半径 500 in の鋼板パネルと等しい剛性のアルミニウム合金パネルを得るためには横方向の曲げ半径は 100 in と小さくしなければならない。このことはスプリングバックの大きいアルミニウム合金板にとつて成形上好都合であるが, しかし, 後に述べる耐へこみ性と剛性との間には逆比例の関係があり, 両者の均衡を得るには, 板厚を増加しなければならない

第17図 アルミニウム合金板, 鋼板パネルの等剛性曲線

第18図 5182-O の板厚による剛性の変化

第19図 チャンネル形状と剛性の高さを求めた試料の断面形状

ことが指摘されている³³⁾。

アルミニウム合金の弾性率は合金の種類にかかわらずほぼ一定であるので, 材料としての剛性に影響する因子は耐力と板厚に限られる。第18図は曲げ半径 500 mm で弯曲させた 5182-O, 2036-T4 の板の剛性を鋼板と比較したものである。材料だけの単純な比較によれば鋼板と

第20図 チャンネル断面高さの変化による剛性の変化

第21図 アルミニウム合金板、鋼板の動的耐へこみ性

同等の剛性を得るためには板厚を約40%増加させなければならない³⁴⁾。また、インナーパネルのリップをモデル化して第19図に示す断面を有するチャンネルを作製し、合金の種類、板厚、チャンネルの高さと剛性の関係を求め、第20図に示した。チャンネルを高くすれば板厚の増加を押えることができるが、成形性との関係も考慮しなければならないであろう。

6.2 耐へこみ性

一定のクラウンを与えたアルミニウム合金パネルの動的荷重に対するへこみ性を第21図に示す。DiCello らによれば異なる二種類の材料の耐へこみ性には

$$(\sigma_{v1})^2 t_1^4 / S_1 = (\sigma_{v2})^2 t_2^4 / S_2$$

なる関係を示しており、Sはパネルの剛性を表わす。したがって鋼製パネルと同等の耐へこみ性を得るにはパネ

ルの形状にも影響するが、材料としては板厚と耐力の選定を要する³⁵⁾。C. E. Burley らの結果によれば、2036-T4を使用したパネルの場合、10~13%の板厚の増加によって鋼製パネルと同等の耐へこみ性が得られると報告している³⁶⁾。

7. おわりに

最近、欧米ですすめられている自動車のアルミニウム化の動向のなかで、アルミニウム材料の合金およびその加工技術の開発がどのように展開されているかを最近の報文のなかからまとめた。

自動車のアルミニウム化については単に材料転換の問題ではなく、まず、自動車の経済性、機能の面からその実現性の評価が検討されなければならないことはすでに多くの識者の指摘するところである。特に他国に比して、最近騰勢を続ける石油価格のアルミニウム地金価格への影響が最も大きいといわれるわが国においては、従来のアルミニウム開発製品のように自動車のアルミニウム化も欧米に追随しようという安易な期待は許されないのであろう。より厳しい開発に対する姿勢が問われることは必至である。わが国においても着実な、現実的手法を求め、自動車技術者との協調を得ていくことがわれわれ技術者の責務であると考ええる。このことは単に自動車用材料に限らず、今後のアルミニウム合金、加工技術の開発において常に留意されなければならない問題であらう。

参考文献

- 1) W. C. Keith, J. M. Smith, W. C. Weltman: Aluminum vol. 2 (Aluminum Association), 343.
- 2) G. Huber: Aluminum and Automobile Internat. Cong. (Dusseldorf) (1976), paper No. 4.
- 3) Editor: Met. Prog. Nov (1976), 22.
- 4) S. Hsu, D. S. Thompson: Sheet Metal Ind. **51** (1974), 772.
- 5) K. M. Miska: Material Eng. March 1974, 67.
- 6) W. E. Swenson, J. Progorel: Automotive Eng. Cong. (SAE) (1976) paper, No. 760205.
- 7) R. Deshamps, R. Develay, J. Peyraud: J. Metals, Sept (1976), 15.
- 8) ALCOA: ALCOA'S New 6000 series Alloys Auto Body Sheet (1976).
- 9) 藤倉, 田中: 軽金属学会 第51回秋期大会講演概要集 (1976), 133.
- 10) W. A. Anderson, R. D. Blackburn, B. S. Shabel: Automotive Eng. Cong. (SAE) (1974) paper, No. 740077: Aluminium, **51** (1974), 775.
- 11) 山崎, 藤倉, 田中: 軽金属学会 第50回春期大会講演概要集 (1976), 93.
- 12) S. S. Hecker: an ASME publication, paper,

- No. 74-WA/Mat-2.
- 13) E. Bartell: Automotive Eng. Cong. (SAE) (1972) paper, No. 760057.
 - 14) R. C. Haddon: Aluminium, **51** (1975), 219.
 - 15) R. C. Haddon: Paper presented at MATCON conference, Oct. 1974.
 - 16) W. C. Weltman, Jr., R. M. Hart: Aluminium and Automobile Internat. Cong. (1976) paper, No. 13.
 - 17) M. A. Glagola, C. A. Roest: Automotive Eng. Cong. (SAE) (1976) paper, No. 760167.
 - 18) J. D. Minford, E. M. Vader: Automotive Eng. Cong. (SAE) (1974) paper, No. 740078.
 - 19) W. C. Weltman, Jr., E. W. Miguelucci: Alcoa body sheet alloy (1972).
 - 20) S. H. Jacobs: Aluminium and Automobile Internat. Cong. (1976) paper, No. 3.
 - 21) N. L. Person: Automotive Eng. Cong. (SAE) (1975) paper, No. 750463.
 - 22) G. C. Hsu, F. E. Lofin, W. B. Jenkins: Aluminium Ind. Products (ASM) (1974).
 - 23) Aluminum Association: Booklet T10 (1973).
 - 24) J. D. Minford, F. R. Hoch, E. M. Vader: Automotive Eng. Cong. (SAE) (1975) paper, No. 750462.
 - 25) D. R. Hart: Aluminium and Automobile Internat. Cong. (1976), paper, No. 6.
 - 26) E. G. Eichhorn, B. Robinson: Automotive Eng. Cong. (SAE) (1975) paper, No. 750476.
 - 27) Aluminum Association: Booklet T15 (1975).
 - 28) J. L. Aberathy: Automotive Eng. Cong. (SAE) (1976) paper, No. 760056.
 - 29) F. W. Baker, M. K. McGinnis: Automotive Eng. Cong. (SAE) (1976) paper, No. 760079.
 - 30) W. King, E. T. Englehart: Automotive Eng. Cong. (SAE) (1976) paper, No. 760166.
 - 31) W. King, G. Schwinski, E. T. Englehart: Automotive Eng. Cong. (SAE) (1976) paper, No. 750464.
 - 32) D. G. Adams: Automotive Eng. Cong. (SAE) (1974) paper, No. 740080.
 - 33) R. A. George, W. E. Swenson, D. G. Adams: Automotive Eng. Cong. (SAE) (1976) paper, No. 760016.
 - 34) 藤倉, 山崎, 田中: 軽金属学会第51回秋期大会講演概要集 (1976), 135.
 - 35) C. E. Burley, B. A. Niemeier, G. P. Koch: Automotive Eng. Cong. (SAE) (1976) paper, No. 760165.
 - 36) J. A. DiCello, R. A. George: Automotive Eng. Cong. (SAE) (1974) paper, No. 740081.