

特集 最近の特殊材料溶接

—材料別溶接プロセスの選択と施工のポイント—

アルミニウムダイカスト材の溶接・接合

中田 一博
大阪大学接合科学研究所

駒崎 徹
リヨービ(株)

1 はじめに

環境問題や燃費向上などの軽量化要求により、自動車にアルミニウム部品がより多く使われるようになってきている。とくにヨーロッパではアウディ社をはじめアルミニウムボディ車の製作が進んでおり、これらには多くのダイカスト部品が用いられている。写真1にアウディA2のBピラーを示すが、ダイカスト品にピアッシングリベット、レーザによる重ね合わせ溶接およびミグ溶接が用いられている¹⁾。

一般的にダイカスト材はガス（水素）含有量が多いために、熱処理を行うとブリストアと呼ばれるふくれが発生し、また溶接に際しては溶接部に多数のブローホール（気孔）が発生する。このため一般的にはダイカスト材の熱処理や溶接は不可能である。

		ダイカスト法	
		砂型鋳造法	ダイカスト法
展伸材			
ガス量 cc/100g	0.1	1	10 100
熱処理性	T ₆ , T ₇ 処理可能		ふくれ変形発生
溶接性	可能		ピンホール発生
耐圧性 (油圧)	100~150kg/cm ²		100kg/cm ² 以下

図1 アルミニウム鋳物の含有ガス量と諸特性²⁾

しかし、最近ではダイカスト金型内を減圧して鋳造する真空ダイカスト方法が開発され、ガス含有量の低減が図られてきている。写真1で用いられているダイカスト品は高真空ダイカスト材を用いた製品であり、通常ガス含有量は1から5 ml/100gAl程度と言われている。図1にダイカスト鋳物の含有ガス量とその特性を示す²⁾。一般的に溶接に適したガス含有量は1 ml/100gAl以下と言われており、T₆処理などの熱処理の条件よりも厳しい。現状では高真空ダイカストにおいても1 ml/100gAl以下を達成することは難しく、溶接ができるかどうかの境界領域にあたる。また、アルミニウムダイカスト材の溶接・接合に関する研究そのものが少ないために、高真空ダイカスト材を含めたダイカスト材の溶接・接合についての基礎的なデータの入手が困難なことも問題となっている。

そこで本報では、アルミニウムの溶接では一般的に用いられているが、しかしダイカスト材への適用例は限られているミグ溶接と、最近注目されている固相接合である摩擦攪拌接合（FSW）による高真空ダイカスト材の溶接・接合特性について著者らの研究結果^{3)~10)}を紹介する。



写真1 アウディA2 Bピラーの接合部¹⁾

2 ミグ溶接^{3)~5)}

2.1 溶接方法

板厚 4 mm の高真空ダイカスト平板でガス量を 1.6 から 6.1 ml/100g Al の範囲で変化させたダイカスト材 (AC4C, ADC12 合金) を用いた。この程度のガス含有量の変化ではダイカスト材自体の強度、0.2% 耐力、伸びにはほとんど影響は認められなかった。

開先は I 型突合せ継手とし、開先面は機械加工により端面加工を行った。溶接前処理として溶接直前にアルコール脱脂を行った。溶加材の影響を調べるために溶接ワイヤ径 1.2 mm の Al-Si 系 A4043 および Al-Mg 系 A5356 を用いた。インバータ式直流パルスミグ溶接により、完全溶込みビードが得られるように A4043 では溶接速度 50 cm/min、平均溶接電流 160 A、A5356 では溶接速度 35 cm/min、平均溶接電流 125 A とした。溶接条件が異なるのは溶接ワイヤの溶融速度の違いが大きいためである。シールドガスにはアルゴンガスを用いた。

2.2 ミグ溶接部外観

写真 2 にダイカスト材 AC4C の溶接ビード外観を代表的な展伸材である A5052 圧延材 (4 mm 厚) と比較材として示す。A5052 では含有ガス量が非常に少ないので、溶加材に依らずビード表面にはリップル線が、またボンドから熱影響部にかけてはクリーニング域が明瞭に形成されている。一方、ダイカスト材ではガス量 1.6 ml/100g Al の場合はアークも安定しており、クリーニング域は狭くはなっているが連続して形成されている。またビード表面も比較的きれいである。しかし 3.5 ml/100g Al では溶接

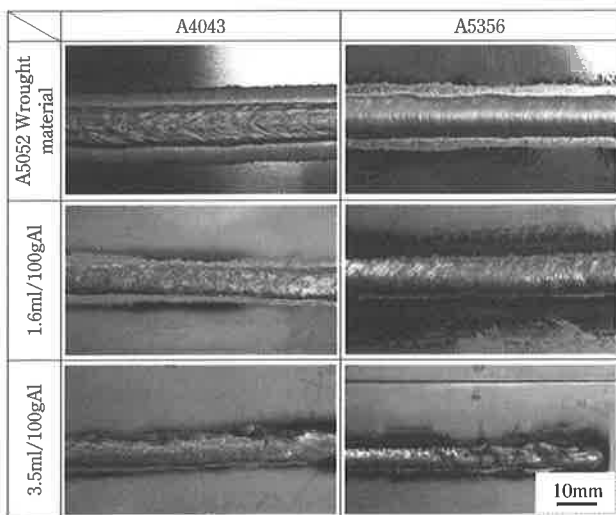


写真 2 ミグ溶接部外観写真

ビードの形成は可能であるが、アークにふらつきが見られ、クリーニング域の形成もほとんどなくなる。

これは溶接中にダイカスト材の溶融に伴い溶融池内へ含有ガスの突出が起こり、アークが不安定となったためである。含有ガス量がさらに増加するとアークが消える現象 (消弧) が起こり、溶接が困難となる。

また、溶接ワイヤの比較では A4043 の方が A5356 よりも安定した溶接ビードの形成が可能であった。さらに、A5356 では黒色のスマットが多く発生した。これは、Al-Mg 系合金の A5356 が溶融した場合蒸気圧の高いマグネシウムが選択的に蒸発し、アーク周囲の空気と接触して酸化物等の微粒子から成るスマットを生じやすいためである。とくにガス突出時にアルゴンガスシールドが破れるためにより多くのスマットが生じる傾向にある。

2.3 ブローホールおよび溶接ビード断面形状

X 線透過写真およびビード断面を写真 3 に示す。A4043 ではビード全体に細かいブローホールが存在している。これに対して A5356 では小さなブローホールは比較的少ないが、逆に大きなブローホールが増加する傾向にあった。アークの安定性や Al-Si 系合金よりも Al-Mg 系合金の固溶水素量が多い¹¹⁾ などが考えられるが、今後の検討が必要である。

また、大きなブローホールは余盛部に形成される傾向にあり、溶融池内の対流で小さなブローホールが合体浮

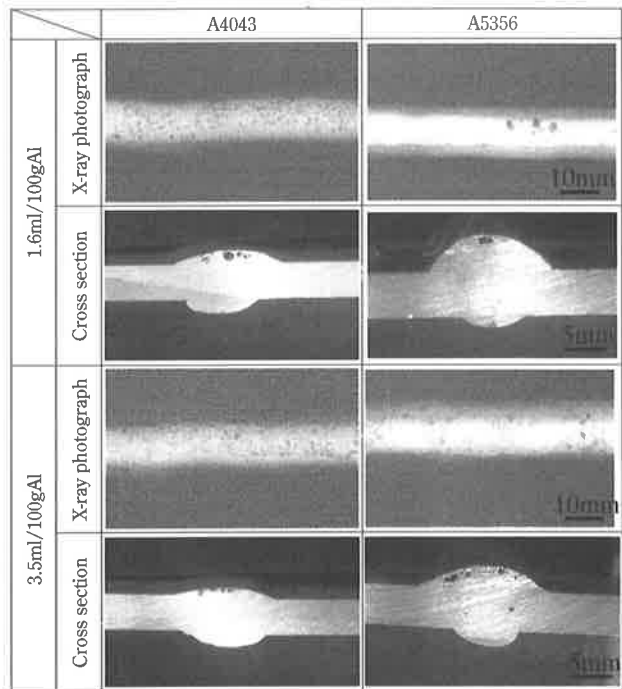


写真 3 ミグ溶接部の X 線透過写真及びマクロ写真

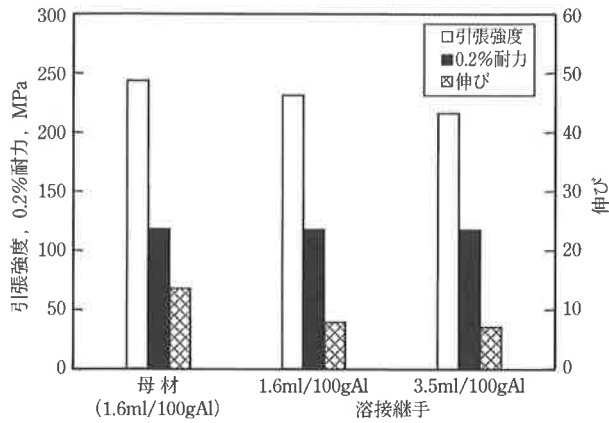


図2 ミグ溶接継手強度特性に及ぼすAC4Cダイカスト材ガス含有量の影響

上して表面近傍に集まりやすいことを示唆している。ブローホール内の残留ガス分析結果では70~90%が水素であり、残りの大部分は窒素（もしくは一酸化炭素）ガスであり、さらに極少量のメタンや炭酸ガスおよびアルゴンを含んでいた。これらは母材であるダイカスト材含有ガス成分とほぼ同様であった。

また、Al-Si系合金のA4043は、Al-Mg系合金のA5356よりも粘性が低く、流動性に富むために余盛高さが低く、扁平なビード形状を呈した。

2.4 含有ガス量の継手強度への影響

A4043を使用したAC4Cミグ溶接継手強度特性に与えるダイカスト材含有ガス量の影響を母材と比較して図2に示す。いずれも余盛・裏波ビードを削除した平滑試験片である。引張破断強度の低下は12%と比較的小さく、また0.2%耐力はほぼ一定であった。これに対して伸びは52%と大きく減少した。これはガス量の増加にともない降伏後の塑性域での伸びが減少し、引張破断強度もそれにとまない低下したことを示している。

写真4に引張試験破断面を示す。母材では破面上にディンプルが多く観察され延性破面を示している。しかし、

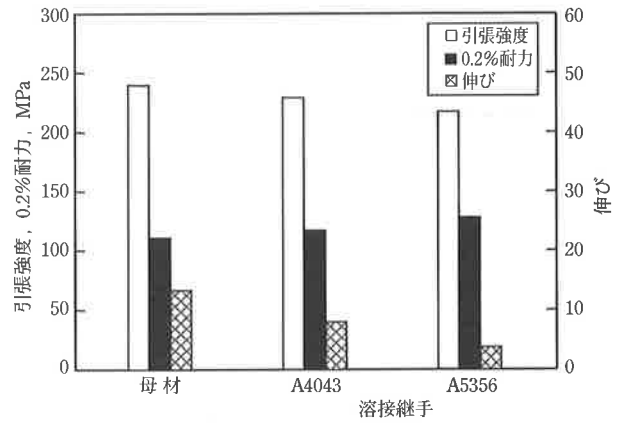


図3 ミグ溶接継手強度特性に及ぼす溶接ワイヤの影響 (AC4C)

溶接ビードでは破面上に多数のブローホールが認められ、ガス量の増加とともにブローホールの径も大きくなっており、これらのブローホールの存在が伸びおよび引張強度の低下を招いたことが分かる。

2.5 溶加材の継手強度に対する影響

図3は溶接ワイヤによる継手強度特性の違いを母材と比較して示す。いずれも余盛・裏波ビードを削除した平滑試験片である。ダイカスト材はAC4Cの含有ガス量1.6ml/100gAlである。A4043に比べ、A5356を用いると0.2%耐力は上昇するが、破断強度、伸びは著しく低下する。これはAl-Mg系合金であるA5052から溶接部に過剰のマグネシウムが溶融混合するために溶接ビード組成が変化して金属間化合物 Mg_2Si が生成し、これが結晶粒界にAl-Si- Mg_2Si_3 元共晶として多量に形成する¹²⁾。これらの脆い金属間化合物の存在によって粒界が脆化するために、とくに伸びがいちじるしく低下する。

2.6 ブローホール削減方法

溶接ビード部のブローホールの削減には母材であるダイカスト材の含有ガス量を減らすのがもっとも効果的である。図4（次ページ）はADC12ダイカスト材の含有ガ

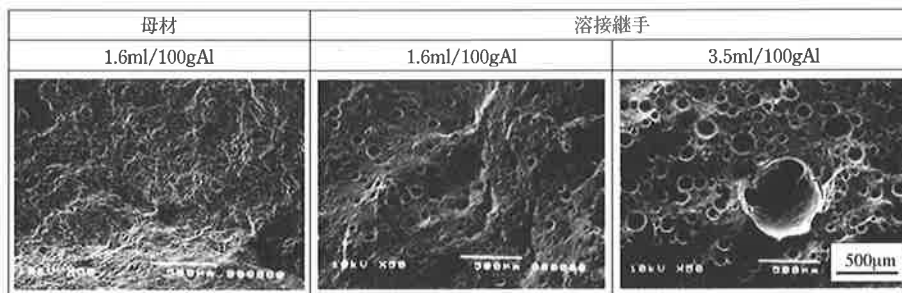


写真4 ミグ溶接継手引張破断面SEM写真 (AC4C/A4043)

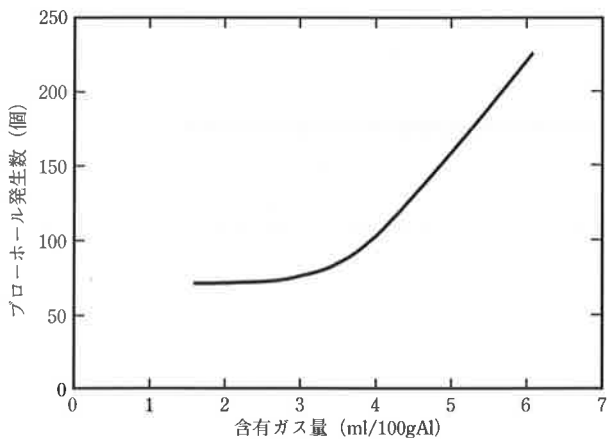


図4 ミグ溶接ビード部のブローホール発生数に及ぼすADC12ダイカスト材ガス含有量の影響 (A4043)

ス量と溶接ビード部のブローホール数との関係を示す。ガス量が6.1ml/100gAlから2.6ml/100gAlまで低下するにともない、ブローホール数は約30%にまで減少する。しかし残念ながら高真空ダイカストの限界である1.6ml/100gAl程度までガス量を低下させてもそれ以上のブローホールの減少は得られなかった。

このため、さらなるブローホールの低減のためには溶接プロセスからの対策が必要になる。最近のミグ溶接機では、インバータ電源により溶接電流パルス波形の高速・精密制御が可能になっている。この特長を生かして写真5に示すように100Hz前後の波形の異なる2つの中周波パルス電流ユニットを1から50Hz程度の低周波で切り替える方式の低周波パルスミグ溶接法が開発されており、適当な周波数により溶融池が振動し、溶融池内のガスの放出を促進させる効果があることが知られている¹³⁾。写真5にはガス量1.6ml/100gAlのADC12ダイカスト材に対する低周波パルスミグ溶接部のX線透過写真を同時に示す。通常の中周波パルス（切替無し）と切替周波数5Hzおよび30Hzのものである。切替無しの場合の中周波パルス（一般的なパルスミグ溶接）では、全体的にブローホールが分散して存在しているが、5Hzではいちじるしく減少し、さらに切替周波数が30Hzになるとブローホールは5Hzよりも増加するが、通常の中周波パルスと比較すると依然として減少していることが分かる。この低周波パルスミグ溶接によるブローホール減少効果はガス量6.1ml/100gAlにおいてより顕著であり、5Hzではガス含有量1.6ml/100gAlの通常パルスミグ溶接ビードよりも低いレベルのブローホール量になった。溶融池振動に対する単純な上下振動モデルによる溶融池の固有振動数解析では固有振動数は約30Hzであり、ガス放出促進により効果的な異なる振動モードが5Hz前後の周波数において存

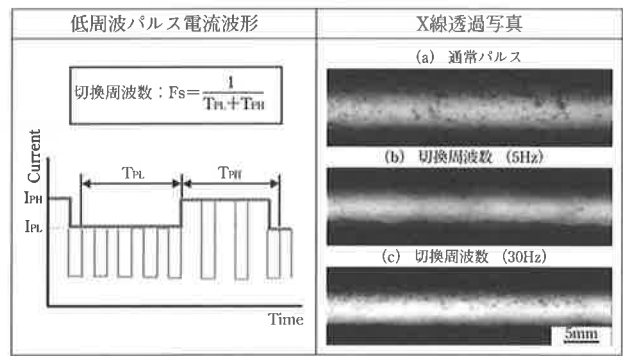


写真5 低周波パルスミグ溶接電流波形制御とADC12ダイカスト材ミグ溶接部X線透過写真 (A4043)

在するようである¹³⁾。

3 摩擦攪拌接合(FSW)法^{5)~10)}

FSWは被接合材に回転ツールプローブを差し込み、突合せ面に沿って移動させることによって接合させる方法であり¹⁴⁾、溶融させることなく素材を塑性流動させる接合方法であるため、溶接によるブローホールの発生や熱変形が少なく、含有ガス量の多いダイカスト材には有利な接合方法である。写真6（次ページ）はツール回転速度1,500rpm一定で、接合速度を変化させたときの接合部外観およびX線透過写真を示す。接合速度が500mm/minまでは欠陥の無い良好な接合部が得られている。しかし、接合速度が750mm/minに増加すると内部にトンネル状の空洞欠陥が発生し、さらに1,000mm/minでは接合部表面に溝状欠陥を形成する。これは接合速度の増加にともない単位接合長当たりの入熱量（摩擦発熱量/接合速度）が減少して、接合部の温度上昇が不足し、プローブ周囲での金属の塑性流動が抑制されるためである⁹⁾。ちなみに良好な接合部の熱電対で計測された最高到達温度は約400℃であり、ADC12合金の固相線温度520℃からもかなり低い温度であった。

接合部断面組織を写真7（次ページ）に示す。プローブが通過したあとの接合部は回転プローブにより攪拌された部分（攪拌部）であり、その組織は、母材ダイカスト材の粗大な針状・板状の共晶シリコンをとともなう铸造 dendrite 組織が破壊され、共晶シリコンもいちじるしく微細粒状化しており、非常に細かい組織になっている。断面組織の母材部分にはダイカスト材特有の铸造欠陥である破断チル層が認められる。これは铸造時に金型壁で凝固したチル層が金型壁からはがれて溶湯中に巻き込まれ、そのままの状態ダイカスト材在中に取り込まれたものである。母材の強度や伸びはこの破断チル層の存在によって大幅に低下する。FSW攪拌部ではこのよう

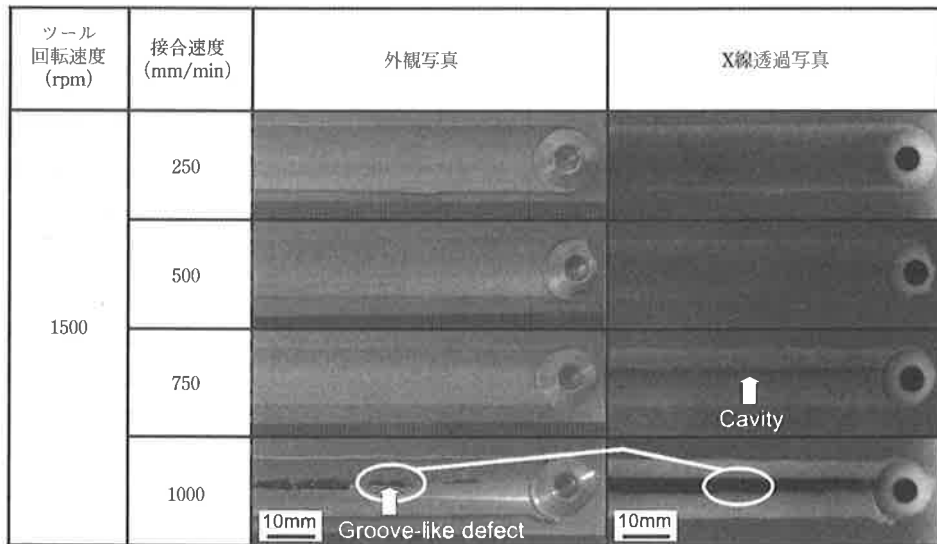


写真6 ADC12ダイカスト材のFSW接合部外観とX線透過写真

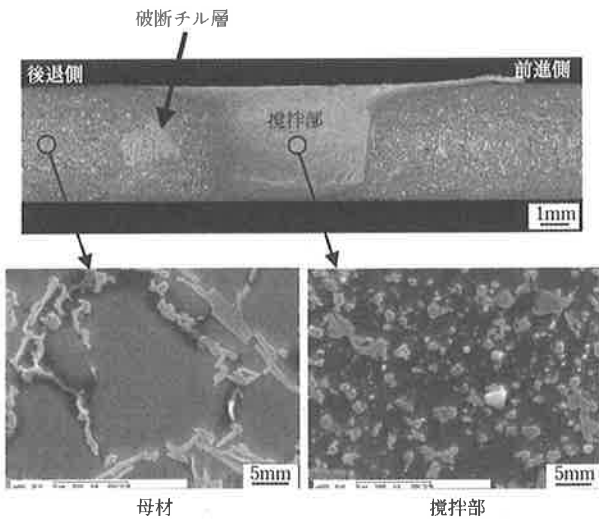


写真7 ADC12ダイカスト材のFSW接合部断面および攪拌部マイクロ組織

な破断チル層も消滅するために、組織の微細化効果と合わせて、表に示すように攪拌部の機械的特性はいちじるしく改善される。また、疲労強度も大幅に改善されることが確認されている。このため、単なるダイカスト材の

表 ADC12ダイカスト材のFSW接合部の機械的性質

	引張強度 (MPa)	伸び (%)	疲労強度 (MPa, 10 ⁷)	硬さ (HV)
母材 ダイカスト材	130-250 (平均190)	1.0-3.7 (平均2.2)	145	90-110
FSW接合部	300-340 (平均314)	4.7-10.3 (平均7.8)	195	110-120

接合法としてのみならず、鋳造材の改質法としても注目されている。

4 おわりに

高真空ダイカスト法を使用したアルミニウムダイカスト材の代表的な溶接・接合法として、熔融溶接であるミグ溶接と固相接合である摩擦攪拌接合を取り上げ、その溶接・接合部の特徴について著者らの研究結果を中心に紹介した。詳細は参考文献をご参照願いたい。

参考文献

- 1) 2003 GIFA
- 2) 鈴木：総合鋳物 '83.7.4