実 用 講 座

アルミニウム合金およびマグネシウム合金の溶接*

The Welding of Aluminium Alloys and Magnesium Alloys

松 本 二 郎**

by Jiro Matsumoto

キーワード：アルミニウム，マグネシウム，アーク溶接，
電子ビーム溶接，レーザ溶接，スポット溶接，
フラッシュバット溶接，摩擦溶接，超音波溶接

1. は じ め に

アルミニウムおよびその合金（以下アルミニウム合金と銘記する）は建築土木、車両、船舶、化学、食品、電気、原子力、航空宇宙産業や家庭器物など多くの工業分野に広く用いられている。またマグネシウム及びその合金（以下マグネシウム合金と銘記する）は資源的には豊富であるもののその需要は極めて少なく、アルミニウム合金の需要の1%にも満たない。その需要内容はアルミニウム合金の添加剤や化学工業用（化学還元材、電気化学用）であったが、最近ではコンピュータ、OA 機器、ステレオ、ビデオ、自動車部品、航空機部品等に使用されるようになってきている。これらの非鉄合金は、一般の金属材料に用いられているほとんどの接合法により接合できるようになってきている。しかしながら、合金の種類によっては接合が難しいものや、接合法が確立してないものもある。したがって接合法の特徴や限界を良く知ると共に、合金の選定に配慮する必要がある。

2. アルミニウム合金材料の種類および一般的特性

アルミニウムは柔らかく、展伸性に富んでいるが、用途によってはさらに強度を高めるなどの性質を改善する必要がある。その場合、種々の元素を添加し

てアルミニウム合金とされて使用されている。

このアルミニウム合金を大別すると板、形材、管、棒、線、条、鍛造材などの展伸材と、金型鋳物、砂型鋳物、ダイカストの鋳物がある。アルミニウム合金の大分類を表1に示す。

この展伸材と鋳物はそれぞれ非熱処理合金と熱処理合金に大別される。非熱処理合金というのは製造のまま、あるいは圧延、引抜きなどの冷間加工をしてそのまま使用できる合金である。熱処理合金というのは焼入れ、焼戻しなどをし、それぞれ所望の強度を得るものである。ただし、熱処理合金の場合でも、熱処理によって得られる強度よりさらに高い強度を得るためには、冷間加工をする場合がある。また、非熱処理合金の場合でも焼きなまし、安定化処理などのような熱処理を行う場合がある。

2.1 アルミニウム合金の特徴および溶接性

アルミニウムの物理的性質および化学的性質を表2に示すが、主な特徴は次の通りである。

- ・比重が小さい（鉄や銅の約1/3）にもかかわらず比強度（強さ／比重）が大なる物が得られる。
- ・合金になると加工性が良い。
- ・銅を含まない合金は耐食性が良好。大気で自然に保護性の酸化皮膜が形成される。
- ・低温での機械的性質良好で鋼のように脆性を示さない。
- ・非磁性である。
- 一方溶接上から見た短所は次の通りである。
- ・熱伝導が鋼の約4倍、比熱が鋼の約2倍、熔融潜

*原稿受付 平成3月11月27日

**正 員 ㈱日軽技研 Member, Nikkei Techno Research Corp.

表 1 アルミニウム合金の分類

展伸材	非熱処理型合金 熱処理をせず に使える	純アルミニウム (1000 系) Al-Mn 系合金 (3000 系) Al-Si 系合金 (4000 系) Al-Mg 系合金 (5000 系)
	熱処理型合金 規定の熱処理 をして使う	Al-Cu-Mg 系合金 (2000 系) Al-Mg-Si 系合金 (6000 系) Al-Zn-Mg 系合金 (7000 系)
鋳物材	非熱処理型合金 熱処理をせず に使える	純アルミニウム Al-Si 系合金 Al-Mg 系合金
	熱処理型合金 規定の熱処理 をして使う	Al-Cu-Si 系合金 Al-Cu-Mg-Si 系合金 Al-Mg-Ci 系合金

表 2 各種金属の物理・化学的性質

性質	アルミニウム	マグネシウム	鉄	銅	溶接に及ぼす影響
溶融温度(°C)	660	650	1540	1083	アルミニウム・マグネシウムとも灼熱温度以下で溶けるため溶接温度の判定が難しい
比熱(cal/g/°C)	0.25	0.22	0.11	0.1	
熱伝導度 (cal/cm/sec/°C)	0.53	0.38	0.18	0.94	
線膨張係数 (10 ⁻⁶ /°C)	24	27	12.3	16.7	マグネシウムは最も割れ易く、次いでアルミニウムが割れ易い
酸化皮膜	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	CuO Cu ₂ O	アルミニウム、マグネシウムとも非常に酸化しやすい。 酸化膜の融点はアルミニウムで 2050°C、マグネシウムでは 2800°C である。
水素の最大溶解量 と融点における溶 解量の比	61	2.5	6.7	2.1	アルミニウムは非常にブローホールが発生しやすい。
比抵抗 (10 ⁻⁶ Ω/cm)	2.75	4.5	10	1.72	

熱が約 1.5 倍であるので融点が高いのにもかかわらず、局部的に溶融させるのが難しい。しかも多量の熱量を急速に供給する必要がある。

・上記のために熱処理合金や加工硬化合金は溶接熱の影響を受け易く機械的性質の劣化を招き易い。

・酸素との親和力が大きく Al₂O₃ を形成し易い。この酸化膜は薄い硬く、緻密で高融点 (約 2050°C) のために母材同士および母材と溶加材との融合を妨げることがある。したがって溶接中に溶融池を不活

性ガスで十分シールドする必要がある。

・膨張係数が鋼の約 2 倍、凝固収縮率が約 1.5 倍であるため溶接歪や溶接割れを起しやすい。

・電気伝導度が銅の約 60% と大きいので抵抗溶接では大容量の電源が必要である。

・溶融アルミニウムの水素ガス吸収量が多いのにもかかわらず固相での溶解度が小さいので気孔 (ブローホール) 発生が多い。

以上のような特徴を持っているが、アルミニウム

表3 アルミニウム合金の溶接性（主に割れ性）

合金系	合金名	溶接性
純アルミ	1060, 1100	1~2
Al-Cu	2219, 2014	Al-Si 系溶加材を使用すれば1~2 共金系では3.
	2117, 2024	4~5
Al-Mn	3003, 3004	1
Al-Si	4032	1
Al-Mg	5005	1~2
	5052	1
	5083	1
Al-Mg-Si	6063	2~3
	6061, 6N01	2~3
Al-Zn-Mg	7N01	2~3
	7075	4~5

1 は良好, 5 は悪い.

合金の溶接の難易度を示すと表3のようになり, Al-Cu 系および Al-Zn-Mg-Cu 系合金の溶接は一般に不可能であると考えられている。鋳物合金も溶接は可能であるが、ブローホールが発生しやすいとか割れが起りやすい問題はある。

3. マグネシウム合金材料の種類および一般的特性

マグネシウム合金はアルミニウム合金と同じように展伸材と鋳物合金があるが、種類はそれほど多くなく板材として4種類、押出材として6種類、合金鋳物として8種類がある。各合金によって強度、耐食性および溶接性は異なるが、アルミニウム合金に比べていずれの性質も悪い。マグネシウム合金の溶接で問題となるのは、非常に酸化され易いため、フラックスや不活性ガスを使用して酸化を防止する必要がある。また割れが発生し易いため凝固温度範囲の広い溶加材を使用したり、高速溶接をしたり、予熱をする必要がある。

3.1 マグネシウム合金の特徴および溶接性

マグネシウム合金の物理的性質および化学的性質を表2に示したが、その特徴は次の通りである。

- ・比重は1.8でアルミニウムの2/3、鉄の1/4であり、比強度は大きい。
- ・寸法安定性、くぼみ特性、機械加工性はアルミニウム合金より優れている。
- ・振動吸収性に優れている。
- ・化学的に非常に活性であるが、その耐食性は軟鋼よりは優れている。

表4 マグネシウム合金の溶接性

合金系	合金	溶接性
Mg-Al3Zn1	Mp1	1~2
Mg-Zn1Zr	MP4	2~3
Mg-Zn3Zr	MP5	2~4
Mg-Al2Zn	MP7	2~3

1 は良好, 5 は悪い.

- ・200℃付近で他の金属材料より厳しい加工が可能である。
 - ・低温での機械的性質が良好で鋼のように脆性を示さない。
 - ・非磁性である。
 - 溶接上から見た短所は次の通りである。
 - ・非常に酸化しやすいのでアルミニウム合金の溶接より注意する必要がある。
 - ・酸化膜の融点が高いために、酸化膜の巻込みが起り易い。
 - ・溶接割れ感受性はアルミニウム合金より高い。
- 展伸材の溶接性の難易度を表4に示す。

4. 接 合 法

金属の接合法を大別すると図1に示すように

- (1)機械的接合法(リベット、ボルト締め、ねじ込み、焼きばめ)
- (2)接着剤による接着法
- (3)溶接法がある。そして溶接法は融接、圧接、ろう接の3種類に分類される。

融接は接合しようとする母材部を溶融点以上に加熱溶融・凝固させて接合する方法であり、接合に対して圧力を加えることはしない。この融接では母材を溶融させるために相当な高温に熱する必要がある。加熱熱源によりガス溶接、アーク溶接からレーザ溶接までいろいろな種類に分類される。

圧接は融点以上に加熱するものもあり、また熱を加えず常温で行うものもあるが、いずれの場合も加圧して接合する方法である。超音波溶接、爆発溶接および冷間圧接等はほとんど加熱しないで接合する方法である。これら以外は、ほとんど母材の溶融点以上の温度に加熱して接合する方法である。加熱の方法には継手部に直接電流を流して接合部の温度を上げる抵抗溶接、フラッシュバット溶接、酸素アセチレンを用いるガス圧接、高周波を用いる高周波溶接、接合面の摩擦熱を利用する摩擦溶接がある。

ろう接は母材よりも溶融点の低い合金をろう材と

して母材を溶融することなく、継手の狭い間隙を毛管現象により接合面に行き渡らせて接合する方法である。そしてこのろう接はろう材の溶融点により約450°C以上の硬ろうとそれ以下の軟ろうに分けられ、前者をろう付け、後者をハンダ付けと呼んでいる。

4.1 イナートガスアーク溶接

この溶接法には図2に示すごとくティグ溶接とミグ溶接があるが、アルミニウム合金およびマグネシウム合金の主な溶接法であり、これが今後とも中心で利用されていくことは間違いないと考える。しか

しながら、その中身は最近の技術革新により大きな変化を遂げている。すなわち制御素子が可飽和リアクトルからサイリスターへまた最近ではパワートラジスターによるインバータへ変化してきており、これからはほとんどインバータ化すると考えられている²⁾。これらのことより高速応答による溶接現象へのフィードバックあるいは最適の溶接条件を確保するための溶接電流の制御並びに溶接機の大幅な小型軽量化に結びついている。

ティグ溶接は、一般にアークのクリーニング作用

図1 接合法

図2 イナートガスアーク溶接法

図3 ティグ溶接のような外観

(酸化膜除去作用)を利用するために交流が使用されているが、インバータ制御の場合はプラス・マイナスの切り替えが短いためアークが途切れなくなり、高周波が不要となった。したがって電波障害や機器の誤動作を誘引する雑音源が無くなったことからロボット化が可能になった。一方ミグ溶接は、今までもロボット化が行われてきており、板厚4 mm以上の溶接に利用されてきたが、制御装置の改善により板厚1 mm前後の溶接も可能になってきた。また数ヘルツのパルスを重ねさせることによって図3に示すティグ溶接のようなうろこ状の外観も出せるようになってきた。また、ミグ溶接で最も問題となっているスパッタ発生も少なくなってきた。

なお、ミグ溶接を採用すべきかティグ溶接を採用すべきか、簡単な判断基準を表5に示す。

4.2 電子ビーム溶接

この溶接法はアルミニウム合金の物理的性質を考えた場合、非常に好ましい方法であるが、マグネシウム合金の場合はマグネシウムの蒸発が起りやすいので余り推奨できない。この溶接法は装置が複雑で、高価であること、接合面の開先精度が要求されること、前処理の管理が重要であること、真空中でないとその利点を活かさない欠点がある。さらに放射線を発生するので管理が大切である。アルミニウム合金の溶接には利用されているが、マグネシウム合金の溶接にはほとんど利用されてないと言って良い。

4.3 レーザ溶接

レーザ溶接は鉄鋼材料の接合には実用化させているが、アルミニウム合金およびマグネシウム合金の接合の実用化は少ない。

金属材料の溶接に利用できるレーザの種類としては、現在のところCO₂レーザ、COレーザ、Nd:YAGレーザの3種類であると考えられているが、いずれ

表5 ティグ・ミグ溶接法の使い分け

	ティグ溶接	ミグ溶接
板厚	薄板用(3 mm 以下)	厚板用(1 mm 以上)
溶接速度	低速	高速
狭箇所部位	適	劣る
姿勢溶接	容易	可
溶接ひずみ	大	中

も一長一短がある。現時点でアルミニウム合金およびマグネシウム合金のレーザ溶接が実用化されていない大きな理由は次のようなことが考えられる。

- ・ブローホールが多数発生しやすいので、強度がどの程度得られるか確定できない。
- ・割れが発生しやすい。
- ・溶接部の外観がイナートガスアーク溶接で得られるような滑らかさがない。
- ・重ね溶接の場合は材料の密着度、突合せ溶接の場合は開先精度が要求される。

以上のような欠点はあるものの、熱エネルギーは電子ビーム溶接とほとんど同じで、非常に大きいため溶接速度を速くすることが可能であり、したがって溶接部の熱影響が少ない。このようなことから変形が非常に少ないので利用価値がある。

このような利点を活かして、アルマイトの処理工場³⁾で採用したり、自動車会社がミグスポット溶接の替りに採用している例がある⁴⁾。

また上記の問題点を解決すべく共同研究も行っている所である⁵⁾。

4.4 抵抗スポット溶接

アルミニウム合金の抵抗スポット溶接は非常に利用されている。例えば道路標識はほとんどこの方法で製作されているし、鉄道車両や航空機関係にも大いに利用されている。またアルミニウムフェンスの

組立にも利用されている。マグネシウム合金も抵抗スポット溶接は可能であるが、実用化は非常に少ない。これらの合金の抵抗スポット溶接は可能であるものの、一般に難しいと考えられているのは次のようなためである。

- ・アルミニウム合金は固有抵抗が低く、熱伝導が大きいので大電流・短時間通電が必要である。鉄鋼材料に比べて約3倍の電流が必要で、通電時間は約1/2以下であることが必要である。

- ・アルミニウム合金は容易に酸化膜を生じ、その電気抵抗は大きく、また均一でないため、安定したナゲット径（溶接部の大きさ）が得られにくく、強度のバラツキが大きい。

- ・凝固時の体積収縮率が大きく、合金の種類によっては割れや空洞などの欠陥が生じ易い。

- ・高温で急激に軟化するため、圧痕の深さ、板の浮き上がりが大きい。

- ・アルミニウム合金と電極材料である銅合金では固有抵抗の差が少ないためにピックアップ（汚損）が生じ易く、連続打点数が少ない。

- ・マグネシウム合金は割れが生じ易い。

このようなことから、アルミニウム合金を溶接する場合は、大容量で精密な制御が可能な溶接機が必要である。特に自動車にアルミニウム合金が利用されるかどうかは、この抵抗スポットの連続打点向上にかかっていると言っても過言ではない。鉄鋼材料の連続打点数は5000点以上であるのに対してアルミニウム合金は500点ぐらいである。このようなことから近年連続打点向上のために各研究者とも非常に努力している所である⁹⁾。

マグネシウムの抵抗スポットの実用化として自動車のシリンダヘッドカバーに、この改良した通電かしめが応用されている⁷⁾。

4.5 フラッシュバット溶接

フラッシュバット溶接は被溶接材の突合せ端面が接触した際に、その接触部に流れる電流によるジュール熱および接触部が熔融・飛散後に発生するアーク熱を利用した突合せ溶接法である。マグネシウム合金には利用されてないが、アルミニウム合金は自転車のリム、2輪車および普通自動車のホイールリムに利用されている。今後益々利用されると考えられるが、騒音とフラッシュの飛散を解決する必要があるが、最近これらを改善したコールドアブセット溶接が実用化されつつある。

4.6 摩擦圧接

摩擦圧接によれば、アルミニウム合金同士はもちろん異材との接合が可能である。溶接条件は回転数、加圧力、アブセット圧および加圧時間等であり、今まで説明した溶接法とは異なる。

母材の前処理は他の溶接法に要求されるほど厳しくはない。継手の強さとしては非熱処理合金でほぼ母材の軟質材程度になるが、熱処理合金では70～95%の継手強さが得られる。アルミニウム合金は空気分離装置等でステンレスとの異材継手で利用されているが、マグネシウム合金は研究段階であると考え⁹⁾。

4.7 ウエルドボンド

抵抗スポット溶接単独の継手では応力集中が発生し易く、特に疲れ強さが低く問題となることがある。このような場合応力分布を均一にすることによる強度の向上および耐密性においてウエルドボンドは有効である。またこの方法を用いることによって抵抗スポット打点数を少なくすることも可能である。航空機関係では利用されているが、車両・自動車関係では研究は行われているものの実用化はされてない⁹⁾。

4.8 高周波溶接

高周波溶接は主に電線管の製造に極めて広く利用されている方法である。高周波の給電方式によって図4に示すように誘導溶接と直接通電溶接と称されているが、いずれも高周波電流の持つ(a)表皮効果(金

図4 高周波溶接電流の供給方式

属の表面に電流が集中する) (b)近接効果(回路を囲む面積ができるだけ小さくなるように電流が分布する)を利用して接合する。溶接に利用されている周波数域は8~450 KHzであるが、アルミニウム合金の場合も肉厚によって異なるものの10~450 kHzが使用されている。この方法を採用すれば押出し性の劣る合金やクラッド材をパイプの製造に比較的簡単に利用可能である。

4.9 超音波溶接

金属板の表面を微視的に見ると平滑でなく、重ね合わせると突起した部分が接触している。そしてこの重ね部分は静加圧と振動による滑りによって接触部の酸化皮膜が破壊除去され、清浄な両面同士が互いに接触するとともに、弾性変形や塑性変形、さらに温度上昇が加わって接触面間に原子間引力が作用し合うまで近接し接合に至る。この超音波溶接はスポットおよびシームの形態で行われ、アルミニウム合金の箔や薄板の溶接、コンデンサー用アルミニウムケースとリード線の溶接、アルミニウムと銅の異材の溶接、その他シリコンウエーハとアルミニウム線の溶接にも利用されている。マグネシウム合金も溶接可能であるが実用化はされていない。

5. お わ り に

以上アルミニウム合金およびマグネシウム合金の

溶接について説明したが、いずれの合金も一般に利用されている溶接法が十分利用できることが理解していただけたと考える。特にアルミニウム合金はかなりの分野で応用されている。ところがマグネシウム合金の場合は溶接は可能であるが、実際に応用される分野が少ないために、その実用例が少ない。今後マグネシウムの資源の豊富さまた軽量化を考慮してその利用拡大を考えれば、自ずとその溶接法の研究が盛んになるものと考ええる。

参 考 文 献

- 1) 軽金属学会：“アルミニウムの溶接”，1984.
- 2) 原田他：“アルミニウム合金の低周波パルスミグ溶接法とその効果”，溶接技術，Vol. 39, 1991. No. 9.
- 3) 松本二郎：“アルミニウム合金のレーザ溶接の実際”，技術情報センター，1992年，9月24日
- 4) 日刊工業新聞：平成4年10月22日
- 5) 社団法人軽金属溶接構造協会：アルミニウムレーザ溶接研究会，1992年10月発足.
- 6) 社団法人軽金属協会：自動車のアルミ化技術ガイド，接合編，平成3年9月
- 7) 松本二郎：未発表
- 8) 加藤数良：“AZ 31合金とSUS 304の摩擦圧接”軽金属学会大84回春期大会(1993.5)概要集.
- 9) 社団法人軽金属溶接構造協会：“アルミニウムの各種接合法の最近の進歩”，平成3年11月27日

Second Annual Summer School of the Institute for Mechanics and Materials
THE MECHANICS-MATERIALS LINKAGE
University of California, San Diego
July 25-August 5, 1994

Julie Bennett, Institute for Mechanics and Materials, University of California, San Diego, 9500
Gilman Drive, La Jolla, CA 92093-0404, Tel: (619) 534-6307, Fax: (619) 534-8908, or email: imm
@ames.ucsd.edu.