

マグネシウム合金のレーザ溶接技術

Laser Welding of Magnesium Alloy

吉澤 正 皓 Masaaki YOSHIZAWA

マグネシウム合金は、既存の実用金属の中でも軽量かつ高強度である。現在的高速鉄道車両にはアルミニウム合金が使用されている。将来においてアルミニウム合金よりも軽量であるマグネシウム合金を鉄道車両構体に用いるための研究が各所で行われている。鉄道車両製造には溶接が必須技術である。アーク溶接、抵抗スポット溶接が鉄道車両製造における溶接方法の主流である。このほかに近年ではレーザ溶接やFSW も広く使用されている。当解説ではマグネシウム合金のレーザ溶接について解説する。

1 はじめに

当社の製造する鉄道車両の大半はステンレス鋼製である。これは主に通勤車両として使用されている。対して特急車や新幹線車両においては軽量のアルミニウム合金が使用されている。

車体が軽量であることは鉄道車両において重要な開発目標の一つである。近年、アルミニウム合金より軽量のマグネシウム合金を鉄道車両用の材料として使用する動きがある。マグネシウム合金は密度がアルミニウム合金の約2/3であり、大幅な軽量化が見込まれる。

マグネシウム合金はアルミニウム合金同様に圧延材、押出型材の製作が可能である。現在、アルミニウム合金製車両はダブルスキン押出型材を溶接により組み立てている。マグネシウム合金製車両についてはさまざまな構造を検討中である。

マグネシウム合金の溶接については種々の方法が検討されている。具体的にはアルミニウム合金製車両の主な溶接法であるMIG溶接、TIG溶接、このほかにFSW、レーザ溶接等である。

種々の溶接法の中でレーザ溶接には施工上の利点として低ひずみ、高速溶接がある。これらをマグネシウム合金製車両の製造で実現するため、マグネシウム合金の溶接性の確認実験を実施した。この結果を「マグネシウム合金のレーザ溶接技術」として解説する。

2 マグネシウムの物性

鉄道車両構体を構成する材料の熱物性を表1に示す。ただし、合金の種類によって物性値が異なるため、主な構成元素で示した。

表1よりアルミニウムとマグネシウムでは、ほぼ同じ融点、比熱であることがわかる。ただし、マグネシウムの熱伝導率はアルミニウムの約2/3程度である。マグネシウムと鉄では融点、比熱、熱伝導率に2倍以上の差がある。マグネシウムは熱物性としてはアルミニウムに近い性質がある。

表1 熱物性⁽¹⁾

材質	融点 (℃)	沸点 (℃)	比熱 (J/kg・℃)	熱伝導率 (W/m・℃)
Fe	1536	2860	456	78
Al	660	2520	917	238
Mg	649	1090	1038	156

レーザ溶接では表1の熱物性に加えて、材料固有のレーザ波長に対する吸収率という性質が重要である。これは、レーザを材料に照射したとき、どれだけのエネルギーが吸収されるかを示すものである。ここではYAGレーザやファイバレーザ、半導体レーザの波長に近い1000nm付近のデータを表2に示した。

表2より、たとえば鉄の場合は吸収率が約40%であるから、投入したレーザのエネルギーの約40%が熱となり加工に寄与する。三種の金属を比較するとマグネシウムは鉄とアルミの中間に位置する吸収率を有していることがわかる。

表2 レーザ波長 1000nm 付近の吸収率⁽²⁾

材質	Fe	Al	Mg
吸収率	約 40%	約 10%	約 25%

マグネシウムの吸収率はアルミニウムに比べて2倍以上であり、なおかつ2つの材料の熱物性は同程度であることから、マグネシウムはアルミニウムよりレーザによって加熱が容易であると考えられる。また、マグネシウムと鉄を比べた場合、熱物性、吸収率に大きな差がある。

次章においてはマグネシウム合金と、実際に鉄道車両構体に使用されるステンレス鋼について溶接性の比較を行う。両合金の諸物性は省略するが、マグネシウム合金とステンレス鋼の物性の関係はマグネシウムと鉄と同程度である。

3 マグネシウム合金の溶接性

3. 1 マグネシウム合金の溶け込み

レーザ溶接におけるパラメータは溶接時に容易に変更可能なレーザ出力、溶接速度、加工ガス流量や、装置側の構成を変更する必要があるビーム径、ガスノズル径・角度等がある。

まず初めに溶接速度とガスノズル径をパラメータとした時のマグネシウム合金の溶け込みについて調査した。表3に結果の断面マクロ写真を示す。材料は板厚が3mmのマグネシウム合金である。継手はビードオンプレートとした。溶接部近傍は溶接前にワイヤブラシにより酸化被膜を除去した。使用したレーザは波長940nmの半導体レーザである。レーザ出力は3kW、ガス流量は純Ar 15L/minに固定した。

表3 マグネシウム合金の溶け込み

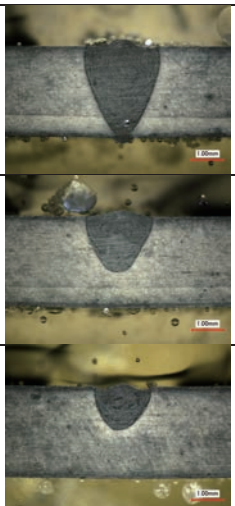
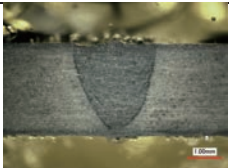
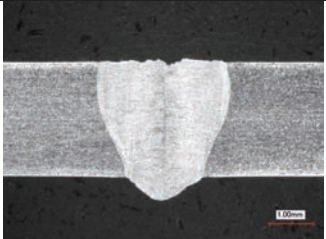
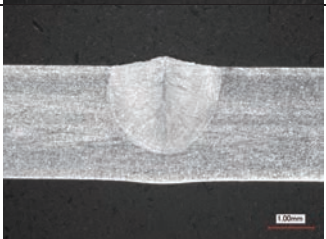
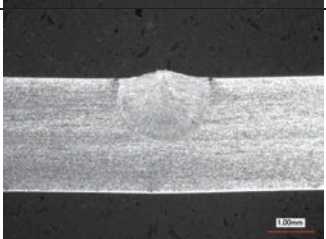
溶接速度 (m/min)	ガスノズル 径φ4	ガスノズル 径φ12
4.0		
5.0		
6.0		
8.0		

表3よりガスノズルが細いほうが、比較的溶け込みが深い傾向にあることがわかる。この傾向はステンレス鋼板の場合においても同様である。3mm板を貫通溶接するには、およそ4.0m/min未満の溶接速度が必要であると考えられる。

板厚3mmのステンレス鋼において、同様にレーザ出力3kWで溶接した場合の断面マクロ写真を表4に示す。ここでは溶接速度をパラメータとしている。なお、ガス流量は純Ar 30L/minである。

表4の中で最も速い溶接速度3.0m/minにおいては、およそ1mm程度しか溶け込み深さが得られていない。3mmの厚さを貫通溶接するためには0.6m/minの溶接速度が必要となっていることがわかる。

表4 マグネシウム合金の溶け込み

溶接速度 (m/min)	ガスノズル 径φ4
0.6	
0.9	
1.5	
3.0	

これらの断面マクロ写真から求めた溶接速度ごとの溶け込み深さの比較を図1に示す。なお、溶込み深さ3mmの位置のステンレス鋼板のプロットは、貫通溶接されているため参考の点である。グラフを横軸方向に見ていくと、Mg合金がある溶込み深さを得ようとした場合、ステン

レス鋼板に比べて5倍程度速い溶接速度でよいとわかる。

表2のレーザ吸収率ではマグネシウムは鉄の半分程の吸収率であったが、マグネシウム合金はステンレス鋼よりも高速で溶接が可能であることがわかった。

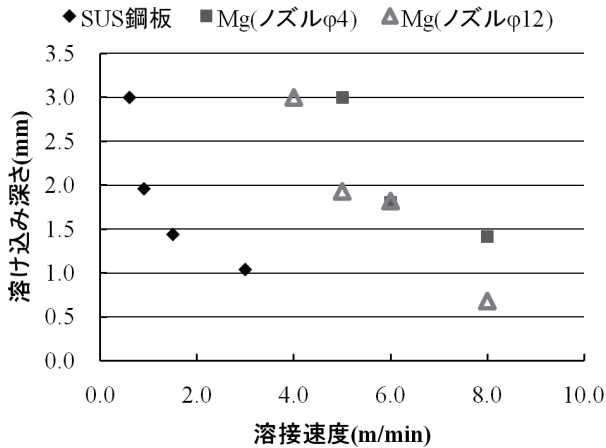


図1 溶け込み深さの比較

3. 2 マグネシウム合金の酸化被膜

アルミニウム合金のレーザ溶接では母材に比べて融点の高い酸化被膜が溶接を阻害する。またアーク溶接においても溶接欠陥を発生させる原因となる。マグネシウム合金の表面に存在する酸化被膜も同様に、レーザ溶接にとって有害である。しかし、実際に酸化被膜を除去しない状態でレーザ溶接を行った例は少ない。ここでは引き続き前節の半導体レーザを用いて、マグネシウム合金表面の酸化被膜を除去した場合としない場合でどのような結果となるかを確認した。

継手形態は突合せとして、溶接予定線の前半は酸化被膜をワイヤブラシにより除去し、後半は材料のままとした。板厚は3mmである。溶接条件はレーザ出力3kW、溶接速度5.0m/min、ノズル径φ4である。図1によると約3mmの溶込みが得られる条件である。

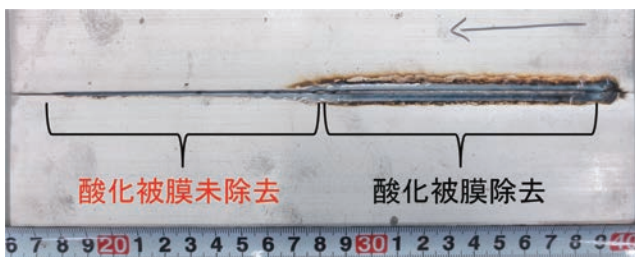


図2 突合せ継手の外観

レーザは紙面右から左に向かって進行している。初めに酸化被膜を除去した区間を通過する。ここでは溶接ビードが形成されビード止端の周囲にヒュームが付着して

いる。後半の酸化被膜を除去していない区間では、溶接ビードが形成できていない。わずかに板の表面の一部と、ルート面が若干溶融しただけである。レーザ出力は一定のまま、一定速度で溶接を行っているわけであるから、この差異は酸化被膜の有無が原因にほかならない。

酸化被膜を除去していない部位に照射されたレーザは一部が材料に吸収されるが、材料を溶融させる程では無い。大部分は反射し空間中に拡散していったと考えられる。酸化被膜の除去はレーザ溶接に際して重要なことがわかる。

4 マグネシウム合金の溶接継手の例

図3は厚さ3mmの板を突合せ溶接（裏当て有り）した断面マクロ写真である。レーザ装置は半導体レーザである。第3章で述べたようにマグネシウム合金はステンレス鋼に比べて高速で溶接することが可能である。その反面、突合せ溶接では裏波や一部母材の蒸発等により、ビード表面が落ち込みやすい。

溶込みは裏当て板にまで達しており十分であるが、ビード表面に若干のアンダカットが発生している。このアンダカットを低減する方法としては溶接条件や光学系、またはワイヤの添加が考えられる。

ここではワイヤを添加する方法について述べる。ワイヤを添加する方法にも種々ある。レーザによる溶融池に対して常温のワイヤを送給する方法、ワイヤに電流を流しジュール発熱により融点直下まで加熱し、送給するホットワイヤという方法、またはレーザとアークを併用したレーザアークハイブリッド等である。

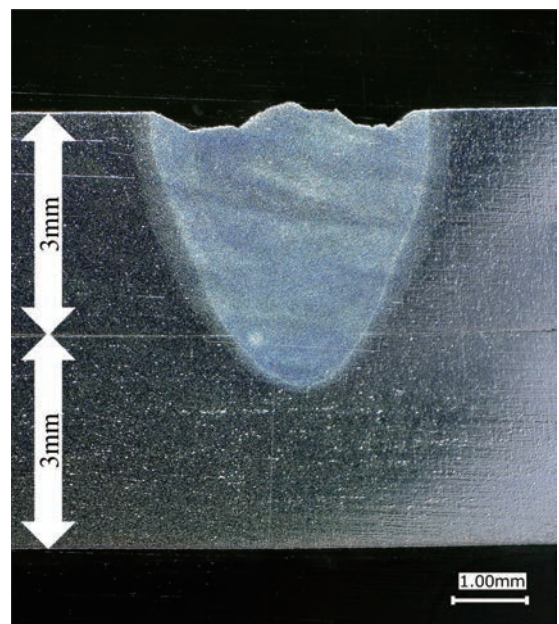


図3 半導体レーザによる突合せ溶接（裏当て有）

図4に半導体レーザーにおいて常温のワイヤを添加し溶接した断面マクロ写真を示す。図3に比べてカットは減少している。余盛りが低いが、現在溶接条件の調査中であり今後改善を行っていく予定である。

この方法の場合、レーザーのエネルギーにより母材およびワイヤを溶融させなければならない。そのため、入熱量が増加してしまう。また、ワイヤの狙い位置、ビーム径、溶接速度とワイヤ送給速度の関係等、通常のレーザー溶接に比べてパラメータが増える。現在は、溶接速度とワイヤ送給速度の比であるワイヤ送給比を主なパラメータ設定し実験を継続して行っている。

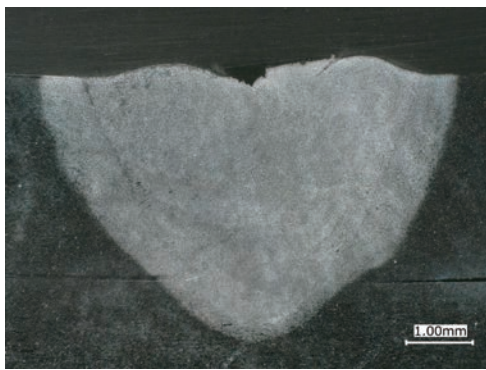


図4 ワイヤを添加した例（半導体レーザー使用）

図4の方法に対してホットワイヤ法では、先に述べたようにジュール熱によりワイヤを融点近くまで加熱させるため、レーザーはほとんど母材を溶融させるだけで良い。また、通常のワイヤ送給に比べて溶着金属の量を制御しやすいという利点がある。ホットワイヤ法による溶接部の断面マクロ写真を図5に示す。使用したレーザーはファイバレーザーである。熱影響の範囲も小さく、なおかつ非常に整った余盛りを形成している。

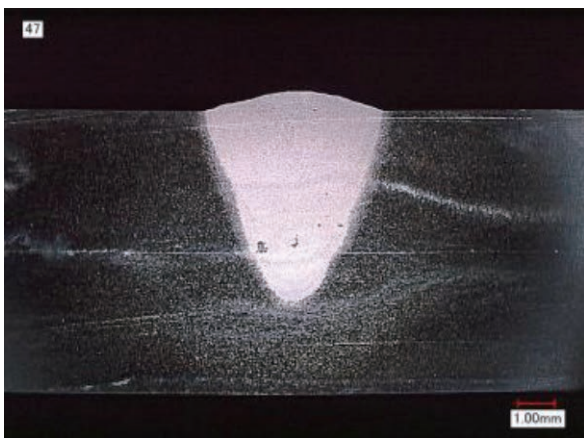


図5 ホットワイヤによる溶接例（ファイバレーザー）

5 おわりに

マグネシウム合金とステンレス鋼との溶込みの比較、およびワイヤを添加したいいくつかの実験を実施し、基礎的なマグネシウム合金の溶接性を確認した。

マグネシウム合金はステンレス鋼よりも高速で溶接が可能な合金であることがわかった。また、酸化物がレーザー溶接に与える影響について確認した。ワイヤを添加した溶接試験ではホットワイヤの有効性を確認した。

今後は溶接条件の最適化を行い、より実際の構造物に近い試験体での実験を行いたいと考えている。

参考文献

- (1) (一社) アルミニウム協会：「アルミニウムハンドブック（第6版）」，29，（2001），（株）昭栄社印刷所
- (2) 中田一博：「マグネシウム合金の溶接」，溶接技術，121，（2012），産報出版（株）

著者紹介



吉澤正皓
生産本部
技術部（接合技術センター）