マグネシウム合金を中心としたエコマテリアルの接合技術の開発

武藤　睦治*、宮下　幸雄*、小林　直樹**、清水　正人***

A Study on Welding Technologies for Magnesium Alloy and Eco-materials

by

MUTOH Yoshiharu , MIYASHITA Yukio, KOBAYASHI Naoki and SHIMIZU Masahito

抄録

マグネシウム合金 AZ31B を供試材とし、MIG、TIG およびレーザといった各種溶接法による接合実験を行った。MIG 溶接は、マグネシウム合金用に電源特性を調整した溶接機を用いて、まず、ビードオンプレートにより接合条件を求め、シールドガスの影響について検討した。ビードオンプレートの結果をもとに、突合せ接合体を作製した。TIG 溶接では、ワイヤ供給装置にサーボモータを組込み、精密な制御を可能とした。突合せ溶接により、母材程度の強度を示す接合体が作製できた。また、シールドガスの影響についても調べた。レーザ溶接では、突合せおよび重ね接合について検討した。突合せ接合では、ワイヤ供給装置を組込み、厚さ 1㎜ 以下の板材の突合せおよびすみ肉・肉盛り溶接を可能とした。溶接条件を検討し、母材程度の強度を示す突合せ接合体を作製することができた。重ね接合では、高レーザ出力条件においては、上下両板材を安定して溶融することが困難であり、低レーザ出力条件で接合体を作製することができた。Mg 合金／Al 合金異材レーザ重ね接合を仮定し、有限要素法解析により、各レーザ出力および溶接速度における界面温度分布を求め、溶接条件を検討した。解析に必要なパラメータの導出方法を確立し、解析に基づく、Mg／Al 異材接合の指針を得る手法を示した。

1．　緒言

実用金属中最も軽量であるマグネシウム合金は、我が国では現在、主に携帯用電子機器などを中心に実用化が進んでいる [1]。自動車などの輸送機器の構造用部材にマグネシウム合金を適用した場合には、車体軽量化にともなう燃費の向上が期待されるため、高効率動力源の開発のみでは達成できない、低燃費自動車の実現が期待される [2]。米国や欧州では、すでに自動車部品のマグネ化が進んでおり、適用例も多い [3]。また、マグネシウム合金の有する、優れたリサイクル性も注目されており、実際に、国内の需要も増加傾向にある [4]。マグネシウム合金の需要拡大にともない、接合技術の開発が重要となる。マグネシウム合金の接合に関して、数は多くないが、これまでに、MIG 溶接 [5]、TIG 溶接 [6]、レーザ溶接 [7]、電子ビーム溶接 [8]、摩擦圧接 [9]および FSW（摩擦攪拌溶接）[10]など各種溶接法に関する研究報告がある。ところが、実際の産業界に目を向けると、我が国ではマグネシウム合金の構造材としての実用実績が少ないために、マグネシウム溶接に関して十分なノウハウを蓄積している企業はほとんどなく、まして、地域的な取り組みは現在のところ行われていない。新潟県、とくに県央地域は、全国の中でも金属加工技術が優れており、マグネシウム合金に関しても県全体として取り組みつつある。したがって、溶接・接合技術の確立を、他地域に先行して行うことにより、この地域を日本におけるマグネシウム加工の中心地とすることができる。

本研究では、MIG、TIG およびレーザといった、

*　長岡技術科学大学
**　（有）小林製作所
***　フジイコーポレーション（株）

各種溶接法によるマグネシウム合金溶接手法の基礎的な知見を得るため、以下に示す研究体制で研究を行った。

①MIG 溶接

主に、長岡技術科学大学の設備で実施した。（株）ダイヘン溶接メカトロカンパニーの協力により、Mg 合金用に電源特性を調整した溶接機および適切な溶接ワイヤを準備し、溶接実験を行った。溶接速度、溶接電流を制御し、ビードオンプレートによる溶接条件の導出を行い、さらに、突合せ継手を作製した。

②TIG 溶接

主に、（有）小林製作所の設備で実施した。協力企業に既存の TIG 溶接機を用いて行った。まず、ワイヤ供給装置にサーボモータを組込み、精密なワイヤ供給制御を実現した。また、溶接速度や溶接電流などを変化させ、適切な溶接条件を求めた。さらに、シールドガスとして、Ar ガスおよび Ar／He 混合ガスを用い、その影響を調べた。接合体は、主に、突合せ溶接により作製し、その強度を評価した。

③レーザ溶接

突合せ溶接および重ね溶接について行った。突合せ溶接は、主に、フジイコーポレーション（株）の設備で実施した。とくに、薄板の溶接について、協力企業に既存のレーザ溶接機を用いて行った。レーザ溶接機には、Mg 合金の肉盛・すみ肉溶接を行えるようにフィラー供給装置を取付けた。レーザ出力や溶接速度を変化させ、適切な溶接条件を求めた。また、突合せ溶接により作製した接合体の強度試験を行った。重ね接合に関しては、新潟県工業技術総合研究所レーザ応用研究室に設置されている 4kWYAG レーザ装置を用いて、長岡技術科学大学を中心に行った。溶接条件を導出するとともに、得られた接合体について引張りせん断試験を行い、接合体強度を評価した。

他方、構造材料として使用される場合、異材との接合技術が重要となる。例えば、自動車車体に関しても、アルミニウム合金や鋼材との併用は避けられない。しかし、Mg 合金と異種金属の接合に関しては、これまでにごくわずかな研究報告しかない[11)~13)]。そこで、将来の Mg 合金需要拡大を見据えた、レーザによる Mg 合金／Al 合金異種金属接合を有限要素法解析により検討した。

2．研究内容

2.1 MIG 溶接

溶接機は、（株）ダイヘン溶接メカトロカンパニーの協力により、Mg 合金用に電源特性を調整した MIG 溶接機を用いた。供試材には板厚 2.5㎜ の AZ31B 押出材を、溶接ワイヤには直径 1.2㎜ の AZ61 を用いた。JIS による、AZ31B および AZ61A の化学組成規格を表 1 に示す。治具に試験片を固定し、治具が取り付けてある直動ステージを任意の速度で動かすことにより、実験を行った。本実験では、トーチ位置を試験片表面から 5㎜ の位置とし、前進角は付けなかった。なお、シールドガスには、流量 16l/min の Ar ガスを用いた。

ビードオンプレートにより得られた溶接条件を図 1 に示す。同図に示すように、溶接条件範囲が小さく、過度な入熱により、容易に溶落ちもしくは蒸発が生じた。これは、Mg の融点（923K）と沸点（1443K）が近似していることや、表面張力および粘性が他の金属材料と比較して著しく低いことが原因と考えられる。 ビード断面観察より、ビード幅とビード深さの関係を求めた結果を図 2 に示す。同図より、溶接電流が 100A の場合、溶接速度が 30㎜/s 以下において幅および深さのいずれも大きく変化している。

表１　AZ31B および AZ61A マグネシウム合金の化学組成規格(JIS).

	Al	Zn	Zr	Mn	Fe	Si	Cu	Ni	Ca	others	Mg
AZ31B	2.5～3.5	0.50～1.5	…	>0.2	<0.03	<0.10	<0.10	<0.005	<0..04	<0.30	Re.
AZ61A	5.5～7.2	0.50～1.5	…	0.15～0.40	<0.03	<0.10	<0.10	<0.005	…	<0.30	Re.

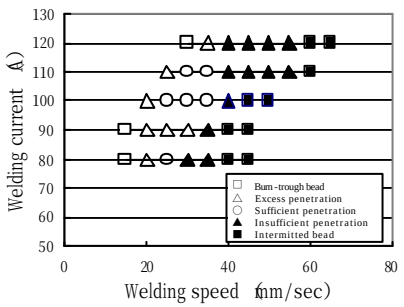

図１　ビードオンプレートによる溶接条件.

ビードオンプレートの結果をもとに、突合せ溶接を行った。突合せ部を中心に、4㎜ 幅の裏当て板を用いて、同様に溶接実験を行った。得られた溶接条件を図 3 に示す。また、例として、溶接電流 90A、溶接速度15㎜/s の条件で得られた接合体のビード外観を図4 に示す。得られた接合体をJIS Z3121 を参考にレーザにより引張り試験片形状に加工し、接合体強度を調べた。例として、溶接電流 90A において得られた突合せ接合体の引張り試験結果を図 5 に示す。なお、試験片表面および裏面のビード凸部は、研削加工してから試験に供した。いずれの接合体も、接合部で破断しており、破断面の観察から、溶接速度 15 ㎜/s および20㎜/s において接合された接合体は、裏側への溶融が不十分であり、未接合部が存在していた。他方、裏側まで溶接されていた、接速度10㎜/s で作製した接合体においても、接合体強度は母材強度の 55%程度であった。したがって、裏側への溶落ちを防ぎつつ、さらに、入熱量を増加させる必要があり、溶接条件は、さらに検討を要する。

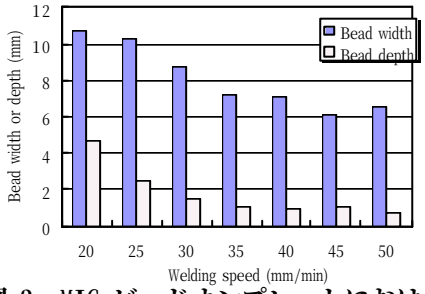

図 2　MIG ビードオンプレートにおけるビード幅および深さ（溶接電流100A）.

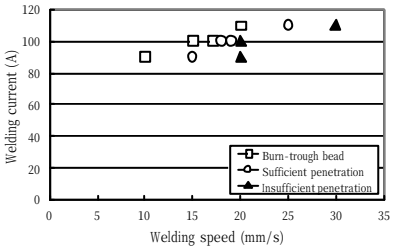

図 3　MIG 突合せ継手溶接条件.

図 4　MIG 突合せ継手ビード外観観察例（溶接電流；90A，溶接速度；15㎜/s）.

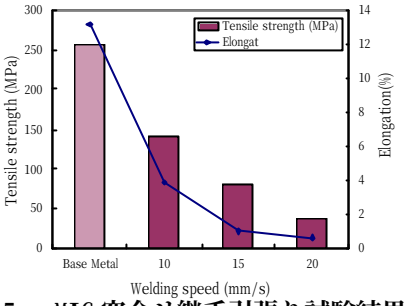

図 5　MIG 突合せ継手引張り試験結果（溶接電流；90A）.

3.2　TIG 溶接

実験に使用した溶接機は、Panasonic 製交流直流両用 300A インバータ TIG 溶接機である。精密なコントロールを可能にするため、サーボモータを組み込んだワイヤ供給装置を開発し、TIG 溶接機と組み合わせることで、実験を行った。溶接実験は、治具に固定した試験片は動かさずに、溶接トーチ取り付けた直動テーブルの送り速度を制御して行った。トーチ位置、溶接電流および溶接速度を変化させて実験を行った。供試材は板厚 3.5㎜ の AZ31B、溶接ワイヤには直径1.2㎜ の AZ61 を用いた。突合せ部に沿った幅 2㎜ の溝を加工した銅板を当て板として用いた。本報告では、シールドガスに Ar／He 混合ガスを用い、Ar ガスでバックシールドを行った結果について示す。

溶接速度を 100㎜/min で一定とし、溶接電流を変化させて突合せ継手を作製した。引張り試験の結果を図 6 示す。溶接電流100A および 115A の場合には、ビードが裏まで達していなかったため、接合強度が低いと考えられる。他方、適切な接合体が得られた溶接電流 120A 以上で接合された接合体の試験結果を比較すると、強度および伸びのいずれも、溶接電流の増加、すなわち、入熱量の増加にともない増加する傾向を示した。なお、本実験で最高強度を示した、溶接電流 130A で溶接した接合体の強度は、母材強度のおよそ 93%程度であった。引張り試験後の破断部の観察より、溶接電流 125A および130A で溶接された接合体は、母材熱影響部で破断していたが、溶接電流120A 以下で溶接された接合体は、溶接部で破壊が生じていた。接合部断面をエッチング処理し、組織観察を行い、溶融部と熱影響部の幅を測定した結果を溶

接電流についてまとめて図 7 示す。また、例として、溶接速度；100mm/min、溶接電流；130A で得られた突合せ継手の断面観察例を図 8 に示す。同図より、溶接電流の増加にともない、ビード幅は増加するが、溶接電流が 120A より大きい場合には、逆に、溶接電流の増加にともない、ビード幅は減少している。以上の結果より、試験片裏側までビードが出ている条件では、溶融部と熱影響部幅が小さいほど、高い強度を示す接合体が得られると考えられる。

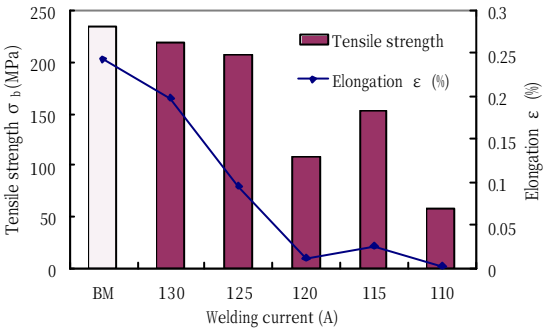

図 6 引張り試験結果
（溶接速度；100mm/min）.

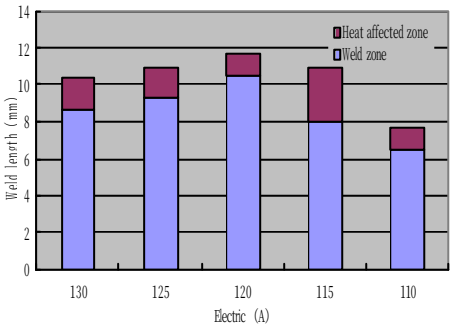

図 7　TIG 突合せ継手溶融部および熱影響部幅
（溶接速度；100mm/min）.

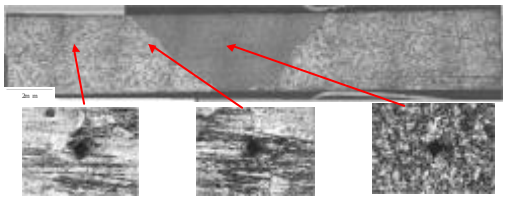

図 8　TIG 突合せ継手断面観察例
（溶接速度；100mm/min，溶接電流；130A）.

3.3 レーザ溶接

3.3.1　突合せ溶接

突合せ溶接では、厚さ 1mm 以下の薄板について検討した。実験には住友重機機械工業（株）の Nb-YAG レーザ装置を用いた。溶接機には、フィラーワイヤ供給装置を取付け、すみ肉溶接も可能とした。厚さ 0.5mm の AZ31 をすみ肉溶接した例を図 9 に示す。また、板厚 0.6mm の AZ31 について作製した突合せ継手について引張り試験を行った結果を図 10 に示す。同図より、ばらつきはあるが、AZ31 母材強度程度の接合体は、薄板についても作製できた。

3.3.2　重ね溶接

重ね溶接実験には、最高出力 4kW の YAG レーザを用いた。レーザ加工ヘッドは固定し、治具を取り付けた XY テーブルを移動させることで溶接速度を変化させ、接合実験を行った。板厚 1mm の AZ31B を供試材とし、重ね幅 30mm で固定して実験を行った。シールドガスには、流量 40l/min の Ar ガスを用いた。また、蒸発金属の飛散による保護レンズの損傷を避けるために、前進角を 20 ° として実験を行った。本報告では、焦点位置を試験片表面とした場合の結果についてのみ示す。

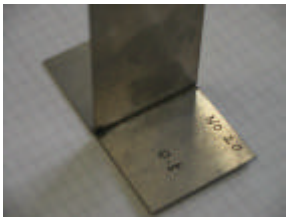

図 9　レーザすみ肉溶接接合体.

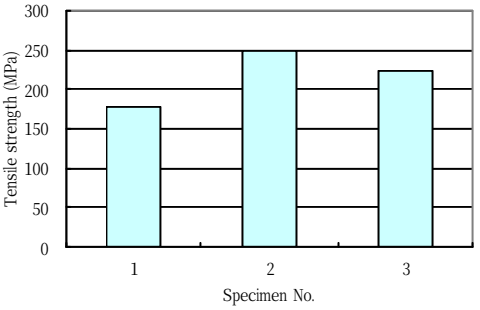

図 10　レーザ突合せ接合体引張り試験結果.

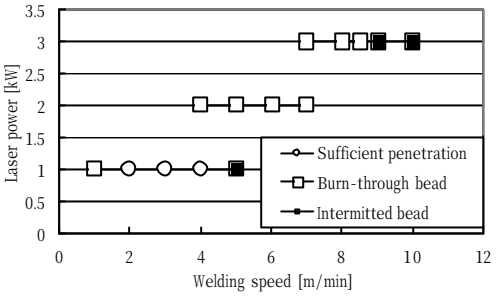

図 11　レーザ重ね溶接条件.

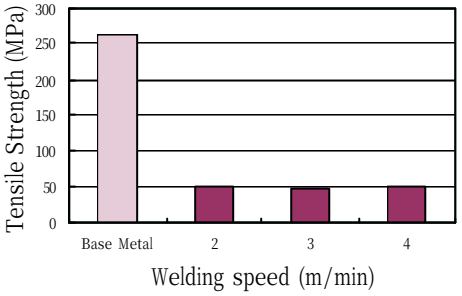

図 12　レーザ重ね接合体引張りせん断試験結果.

溶接実験により得られた接合条件を図 11 に示す。同図より、レーザ出力 1kW の場合のみ、接合体が得られたが、2kW および 3kW では接合体を作製することができなかった。レーザ出力が 2kW および 3kW の場合には、下部の試験片を溶融させる程度の溶接条件では、上部試験片の溶融状態が不安定となり、上部試験片ビード部に局所的に空孔が生じた。本実験で得られた 3 本の試験片を試験片形状に加工し、引張りせん断試験を行った。なお、ビード部は未加工状態で試験に供した。引張りせん断試験の結果を図 12 に示す。接合体は、いずれも、接合部で破断していた。図 12 より、今回得られた接合体の強度は、母材強度の 20%程度であり、さらに、溶接条件を検討する必要がある。

3.4　Mg 合金／Al 合金異種金属接合のための有限要素法解析

Mg 合金と Al 合金のレーザによる異種金属重ね接合を仮定し、有限要素法により界面の温度分布を求め、接合条件について検討した。本解析には汎用有限要素法解析ソフト ABAQUS を用いた。溶接条件は、Mg 合金および Al 合金のいずれも板厚 1mm とし、重ね幅 30mm で Al 合金側よりレーザを照射した。レーザ出力を 1.5kW～2.5kW、溶接速度を 0.3m/min～0.5m/min の間で変化させて解析を行った。解析には、レーザの入熱効率および熱伝達係数が必要となる。そこで、予備実験を行い、繰返し解析によりこれらの値を求めた。解析を行った例を図 13 に示す。同図は、レーザ出力 1.5kW、溶接速度 0.4m/min である。このような解析から、界面の温度分布を求めた例を、溶接速度で整理して図 14 に示す。同図より、レーザ出力 1.5kW の場合には、溶接速度 0.4mm/min 以上では入熱量が不足し、界面の温度が Al および Mg の融点に達していないことがわかる。したがって、ちょうど、Al および Mg 両材料の融点近傍の温度を示す、溶接速度 0.4 もしくは 0.3m/min 付近が、最適な接合条件と考えられる。しかし、Mg／Al の組合せは金属間化合物を生成するため、過度な溶融は接合体強度を低下させると考えられる。したがって今後は、実験により各溶接条件における実際の界面状態を把握し、そのような温度分布を実現するための溶接条件を本研究で示した解析手法を用いることによりさらに検討する必要がある。

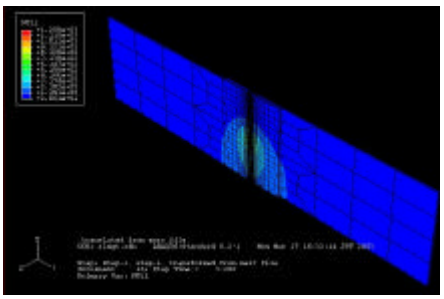

図 13　レーザ異材接合界面温度分布 FEM 解析結果（レーザ出力；1.5kW，溶接速度；0.4 m/min).

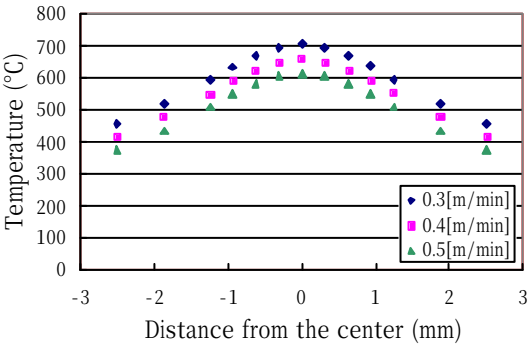

図 14　接合体中心位置における界面温度分布（レーザ出力；1.5kW).

4. 結言

Mg 合金 AZ31B を用いて、各種溶接法により溶接実験を行った。得られた結果を以下に要約する。

（1） MIG 溶接は、まず、溶接機およびワイヤーの問題を調査し、Mg 合金用に電源特性を調整した溶接機により接合実験を行った。ビードオンプレートにより、接合条件を検討し、さらに突合せ継手を作製し、引張り試験を行った。Mg 合金は、溶落ちが著しく、溶接条件範囲が小さい。本実験で得られた突合せ継ぎ手は、継手効率が 55%程度であり、さらに溶接条件の検討が必要である。

（2） TIG 溶接は、まず、ワイヤ供給装置にサーボモータを組込み、精密な制御が行えるように工夫した。シールドガスの影響を調べた結果、MIG 溶接と同様に、He を用いた場合には、Ar を用いた場合よりも溶接条件が低入熱側となることがわかった。これは、シールドガスの熱伝導特性に起因すると考えられる。突合せ接合体について引張り試験を行った結果、同じ溶接速度で比較すると、高入熱条件で作製した接合体の方が、高強度を示した。なお、本実験では、継手効率 93%を示す、十分な強度を有する接合体を作製することができた。

（3） レーザ溶接では、突合せおよび重ね接合について検討した。突合せ接合では、ワイヤー供給装置を工夫し、薄板の突合せ、すみ肉・肉盛り溶接を可能とした。作製した突合せ接合体について引張り試験を行った結果、母材程度の強度を示し、良好な接合体が作製することができた。重ね接合に関しては、高レーザ出力条件において、上下両板が溶融せず、上部板のみの溶融・蒸発が生じやすく、接合条件範囲がきわめて小さかった。得られた接合体について行った引張りせん断試験の結果、接合体の見かけの強度は、母材の引張り強度の 20%程度であった。今後は、さらに溶接条件の検討を行うとともに、試験片の密着性を向上させる治具の工夫が必要と考えられる。

（4） Mg 合金／Al 合金の異材重ね接合を仮定し、有限要素法解析により接合条件を検討した。解析に必要なパラメータは、予備実験および繰返し解析より求めた。レーザ出力 1.5kW～2.5kW の範囲において、界面の温度分布から、接合条件を検討した。本解析手法と、実際の接合実験を組み合わせることにより、異材接合手法の指針を得ることができる。

参考文献

1) ”マグネシウム技術便覧”、日本マグネシウム協会編、カロス出版、(2000).

2) S. Schumann and H. Friedrich, Materials Science Forum, 419-422, pp.51-56(2003).

3) 例えば；Frank Lehnert, Stefan Kalke, Jürgen Scheer, Ludwig Seethaler and Frank T. H. Dürnenburg, Proceedings of 59th Annual World Magnesium Conference, Motreal, Canada, May 19-21, 2002, pp.72-83(2002).

4) "2002 年マグネシウム需要見通し"、小原久、日本マグネシウム協会提供資料.

5)例えば；上山智之、仝紅軍、中田一博、溶接学会全国大会講演概要集第 71 集, pp.254-255(2002).

6)例えば；朝比奈敏勝、時末光、軽金属、45-2, pp.70-75(1995).

7) 例えば；平賀仁、井上尚志、鎌土重晴、小島陽、溶接学会論文集、19-4, pp.591-599(2001).

8) 朝比奈敏勝、大久保通則、時末光、軽金属、44-4, pp.210-215(1994).

9)例えば；朝比奈敏勝、加藤数良、時末光、軽金属、41-10, pp.674-680, (1991).

10）佐藤裕、粉川博之、朴勝煥、軽金属学会第 103 回秋期大会技術懇談会（2）資料、pp.21-26(2002).

11）加藤数良、朝比奈勝俊、時末光、軽金属、45-5, pp.255-260.

12）森田美知太郎、片山聖二、松縄朗、溶接学会全国大会講演概要集第 69 集、pp.90-91, (2001).

13) 平野聡、岡本和孝、土井昌之、岡村久宣、稲垣正寿、青野泰久、溶接構造シンポジウム2002講演概要集、pp.428-434(2002).