

AZ31 マグネシウム合金板の抵抗スポット溶接接合強度

福田 泉* 吉田 修二** 田中 裕一*

Fracture Strength of Resistance Spot Welded Joint for AZ31 Magnesium Alloy Sheets

Izumi Fukuda*, Syuji Yoshida**, Yuichi Tanaka*

Abstract This paper describes the fracture strength of resistance spot welded joint for AZ31(Mg-3%Al-1%Zn) magnesium alloy sheets. Cross tensile strengths of the joints for various kinds of welding conditions were investigated at a crosshead speed(v) of 1 mm/min using an Instron-type testing machine and the surface profiles near spot welded joints were also observed by 3D laser scanner. It was found that the fracture strength were related to welding current, air pressure for pressing welding electrodes and resistance welding time, and it was also relative to the crater depth generated at spot welded joint.

キーワード : AZ31 マグネシウム合金板, 抵抗スポット溶接, 接合強度

Keywords : AZ31 magnesium alloy sheet, resistance spot welding, fracture strength of welded joint

1. 緒言

マグネシウム合金は実用金属材料の中で最も軽量であり、比強度が大きいことから、軽量化を目的とする構造設計には魅力的な材料である。これらの優位性により、ノートパソコンをはじめ IT 情報機器等の筐体として用途が拡大している。また、マグネシウム合金の自動車、車いす等福祉機器等の構造部材としての適用も期待が高まっている⁽¹⁾。一方、マグネシウム合金の堅実な利用拡大を図るためには溶接を施したのちの溶接接合強度が十分に保証されていなければならない。抵抗スポット溶接接合継手に関しては、薄鋼板スポット溶接継手の引張せん断強さの推定⁽²⁾、連続スポット溶接時における電極損耗過程に関する検討⁽³⁾及び軟鋼と Al-Mg 合金の抵抗スポット溶接⁽⁴⁾等の報告がある。しかしながら、マグネシウム合金板の抵抗スポット溶接接合強度の研究報告は少ないのが現状である。

そこで、本研究は実用材として比較的多く利用されている AZ31 マグネシウム合金板を取り上げ、供試材の力学的性質及び抵抗スポット溶接継手部の引張による接合強度について調べる。実験に際して、AZ31 板の抵抗スポット溶接部の引張接合強度に及ぼす溶接条件の影響について調査する。さらに、抵抗スポット溶接したのちの表面形状の 3D

レーザースキャナ解析を行い、接合強度と比較して関連性を調べることで、非破壊による溶接部強度の推測ができることの可能性の有無についても検討する。

2. 実験方法

2.1 十字引張試験片の製作

ここで受入れた供試材は、熱間押出加工された AZ31 (Mg-3%Al-1%Zn) マグネシウム合金の板(長さ 1 000mm, 幅 300mm, 厚さ 1 mm)である。供試材から所定の寸法(長さ 50mm, 幅 15mm, 厚さ 1 mm)になるようにシャーで切断したのちフライス加工により端面を削り、溶接接合強度を調べるための短冊状試験片を製作した。図 1 に示すように、試験片の 2 箇所十字引張試験による溶接接合強度測定時の保持具の位置決めのために直径 $\phi 5.7$ mm の穴をボール盤で開けた。

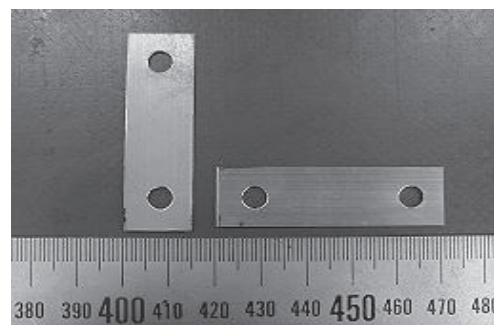


図 1 十字引張試験用短冊状試験片

* 機械知能システム工学科
〒866-8501 熊本県八代市平山新町 2627
Dept. of Mechanical and Intelligent Systems Engineering,
2627 Hirayamashinmachi, Yatsushiro-shi, Kumamoto, Japan
866-8501

** 技術センター
〒866-8501 熊本県八代市平山新町 2627
Technical Practice Center,
2627 Hirayamashinmachi, Yatsushiro-shi, Kumamoto, Japan
866-8501

2.2 抵抗スポット溶接

抵抗スポット溶接を実施するに際しては、東亜精機製抵抗スポット溶接機 SLP-35A を用いた。電極は図 2 に示すような P 形チップで先端直径が 4 mm のものを使用した。抵抗スポット溶接作業を行うに当たっては図 3 に示す短冊状試験片の位置決め用治具を使用し、試験片を十字型溝穴に垂直にクロスさせた状態で溶接し十字引張試験片⁽⁵⁾を製作した。ところで、溶接時に発生する溶接熱により短冊状試験片がそるように変形してしまう恐れがある。そこで、図 3 中の左側に示すような試験片押え板で、治具と短冊状試験片を押えることで試験片が変形するのを防止している。

抵抗スポット溶接を行うに際して、溶接継手部近傍の酸化膜などによる電気抵抗をできるだけ少なくするために、溶接に先立ち試験片の接合面近傍はエメリー紙#600 番で乾式研磨を行った。

溶接条件としては、①溶接電流 (I) : 7000~10000 A, ②空気圧(電極チップ押え力) (p) : 0.8atm~ 2.0atm, ③通電時間 (t) : 3~20cycle (1 cycle = 1/60sec) の範囲で変化させたが、以上に挙げた 3 つの溶接条件を様々に組み合わせることにより抵抗スポット溶接を行い、溶接接合強度の変化に及ぼす溶接条件の影響を調べた。

2.3 十字引張試験

本研究の目的の一つは、マグネシウム合金板の抵抗スポット溶接継手の十字引張試験による接合強度を様々な溶接条件で調べることにより、良好な溶接条件を導き出すこと



図 2 電極チップ（先端直径 4 mm）

試験片押え板 試験片位置決め用治具

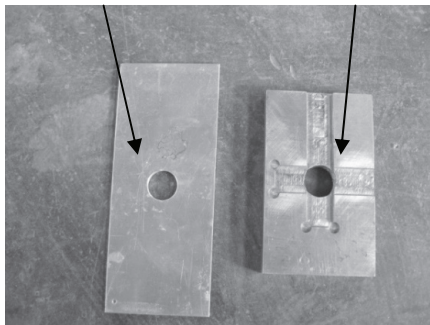


図 3 抵抗スポット溶接時に短冊状試験片の位置決め用治具

である。溶接継手の接合強度は JIS Z3137（抵抗スポット溶接継手の引張試験方法）に準拠して十字引張試験⁽⁵⁾を行い、そのときの最大荷重を接合強度 P_{max} とした。

引張試験は、島津製作所製オートグラフ AG-250kNG(実験時 5kN ロードセルを使用)を用いた。十字引張試験時のクロスヘッドの引張速度 v は 1 mm/min, 試験温度 T は室温 (293 K) で一定とした。十字引張試験では単純に分離破断するときの引張強度（破断強度）を測定することが目的なので試験時の最大荷重（単位：N）を測定し、溶接継手の接合強度とした。

図 4 は溶接接合部の引張試験を行うときの十字試験片を保持するための治具の写真であり、図 5 は十字引張試験の様子を示している。

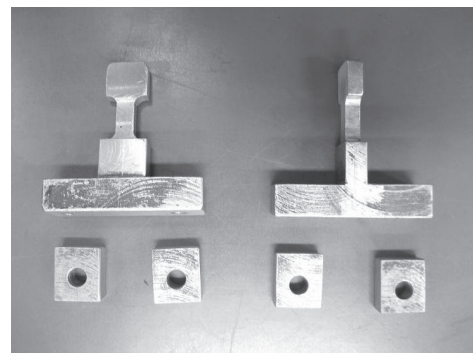


図 4 十字引張試験用治具



図 5 十字引張試験の様子

2.4 溶接接合部の表面くぼみ形状の計測

抵抗スポット溶接後に溶接接合部に形成された表面くぼみ形状を計測するため KEYENCE 製 LK-GD500 3D レーザースキャナを利用して 3D 画像によりくぼみ近傍の表面性状を観察した。3D レーザースキャナで取り込んだデータはソフトウェア「NAZCA3D」で数値データとして取り出し、溶接部の深さ、形状をグラフ化処理してまとめた。本研究の目的の一つは、スポット溶接接合部の表面性状と接合強度とを比較し、その関連性を検討することである。そのために、ここではおおよその表面形状を測定し、表面形状と接合強度との定性的な関連性について捉えられればよいものとする。

る．そこで3Dレーザースキャナの計測条件の設定については，測定範囲を任意で溶接接合部がすべて含まれるようにした．実際の計測範囲は約40mm×40mmであり，計測点の間隔は0.05mmで一定とした．すなわち，計測ポイント数は約125×125点である．

また，溶接電流 $I=8500\text{A}$ に関してはマイクロメータにより溶接接合部の板厚の計測を行った．マイクロメータの計測は各試験片の溶接部のクレタの3箇所を計測しその平均値を溶接接合部の板厚とした．

3. 実験結果と考察

3.1 AZ31 供試材の引張性質

本実験に用いた供試材は，熱間押出加工により製作されたAZ31マグネシウム合金板である．押出材であるため，押出方向に対して異方性があるものと考えられる．そこで，押出方向に対して $\phi=0^\circ$ ， 45° 及び 90° の引張試験片（長さ40mm；標点距離14mm，幅3mm，板厚1mm）を採取して，室温で引張試験を行い，力学的性質の違いに及ぼす押出方向の影響の有無を調べた．図6は引張試験により得られた公称応力-公称ひずみ曲線を示す．押出方向，すなわち $\phi=0^\circ$ の場合の降伏応力は178MPaであり，圧延方向に対して $\phi=45^\circ$ 及び 90° の114MPa及び96MPaと比べてかなり大きい，逆に破断伸びは若干小さくなっている．引張強さはいずれの方向に対して約230MPaとほぼ等しい．ここで評価項目として取り上げる溶接接合強度は，抵抗スポット溶接によりAZ31板2枚の接合面が溶融すること，また未溶融部の引張強度には引張強さが影響しているため，板の異方性の影響はないものと考えてよい．

3.2 抵抗スポット溶接部の接合強度

図7は溶接電流 $I=8000\text{A}$ ，空気圧 $p=1.2\text{atm}$ の場合に

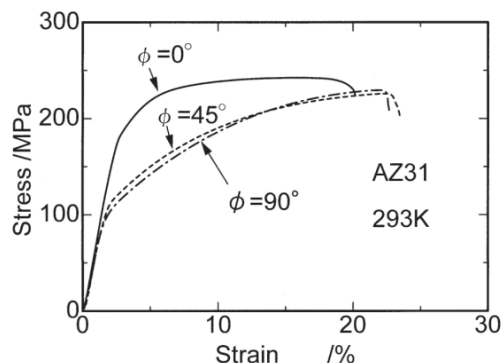


図6 実験に用いたAZ31マグネシウム合金の押出板の応力-ひずみ曲線に及ぼす押出方向の影響

おける引張試験の(a)前及び(b)後の抵抗スポット溶接十字試験片の写真を示している．通电時間(t)の違いによりくぼみ深さが異なる様子が写真から確認することができる．ところで，今回行った十字引張試験から得た実験データの中で，接合強度が最も大きかった溶接条件は，空気圧 $p=1.2\text{atm}$ ，溶接電流 $I=8000\text{A}$ ，通电時間 $t=5\text{cycle}$ (0.083sec)で，その接合強度 P_{max} は469Nであった．次に大きかった溶接条件は， $p=1.2\text{atm}$ ， $I=10000\text{A}$ ， $t=4\text{cycle}$ (0.067sec)で，その接合強さは437Nであった．図8と図9はそれぞれの溶接条件における荷重-クロスヘッドストローク関係を示したもので，今回の実験で400N以上という比較的良好な接合強度が得られたものをピックアップして取り上げている．また，溶接条件によっては溶接の際にエネルギーが過大であったために図10(a)に示すように母材であるマグネシウム合金板が貫通してしまったもの，あるいは図10(b)のようにエネルギーが過小であったためにわずかしき溶融されないものまで見受けられた．

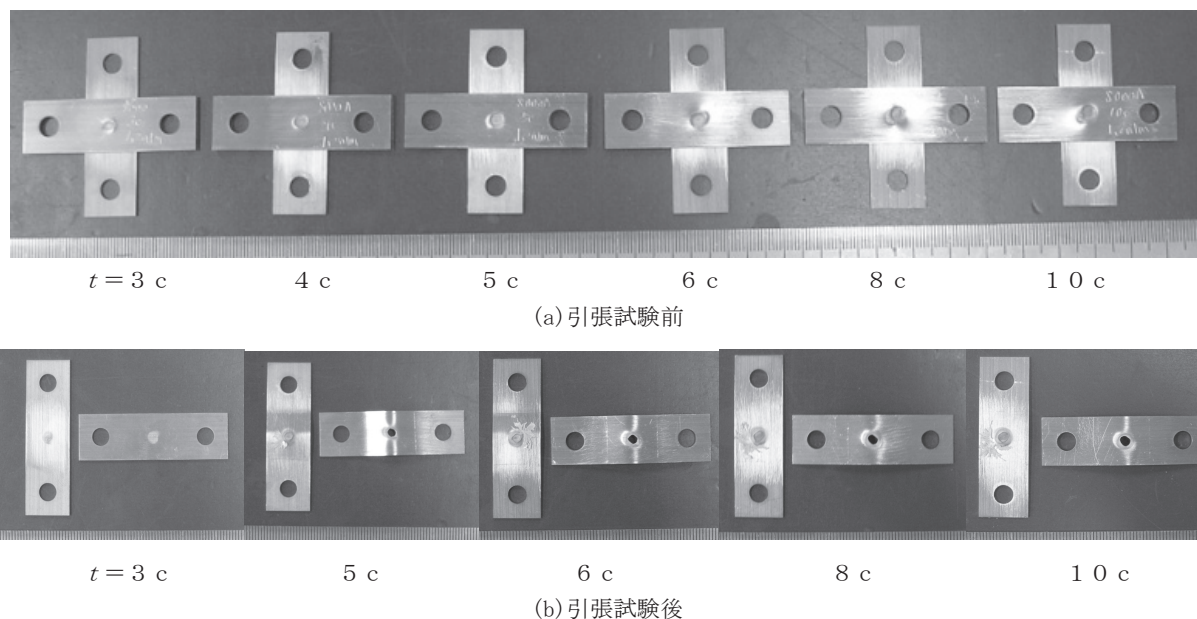


図7 引張試験前後の抵抗スポット溶接十字試験片の様子 ($I=8000\text{A}$ ， $p=1.2\text{atm}$ の場合)

次に, 十字引張試験により得た荷重-クロスヘッドストローク曲線から求めた接合強度をパラメータとして溶接条件毎にまとめたものを図 11 から図 13 までに示す。

図 11 は空気圧 p を 1.2atm としたときの接合強度 $P_{\max}$ に及ぼす溶接電流 I の影響を示す。通電時間 t が 3, 4 cycle (0.05, 0.067sec) と短いとき, 溶接するのに大きな電流を必要とするため接合強度 $P_{\max}$ のピークが得られるのは溶接電流 I が 9000~10000A のところである。一方, 通電時間 t が 5~10cycle (0.083~0.167sec) と長くなると, $P_{\max}$

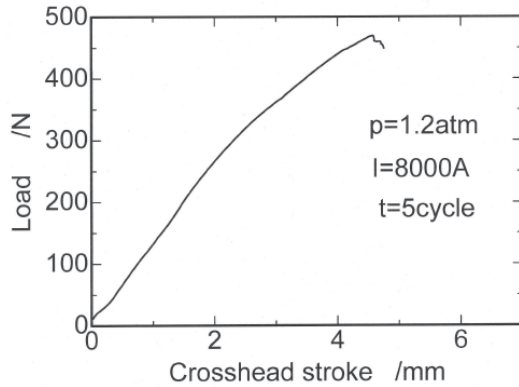


図 8 荷重-クロスヘッドストローク曲線
($p=1.2\text{atm}$, $I=8000\text{A}$, $t=5\text{ cycle}$ の場合)

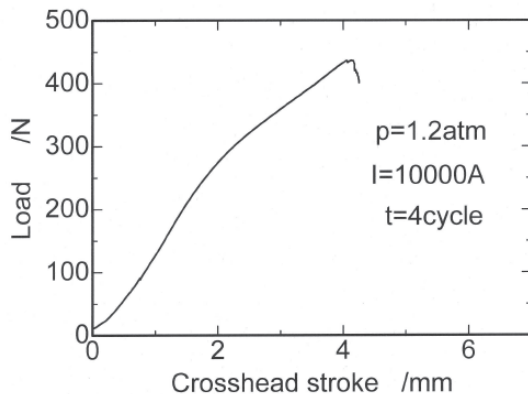
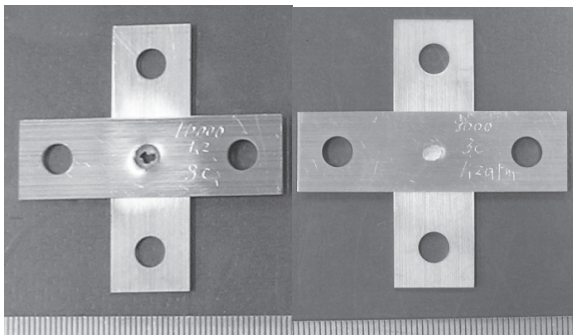


図 9 荷重-クロスヘッドストローク曲線
($p=1.2\text{atm}$, $I=10000\text{A}$, $t=4\text{ cycle}$ の場合)



(a) 過大 (b) 過小

図 10 エネルギー過大(a)及び過小(b)の場合の溶接接合材

のピークは I が約 8000A と低い方へ移行する。

図 12 は溶接電流 I が 8000A, 通電時間 t が 5 cycle (0.083 sec) のとき, 接合強度 $P_{\max}$ に及ぼす電極押え空気圧 p の影響を示している。 $p=0.8\text{atm}$ のとき $P_{\max}$ は 0 であるが p の増加とともに増大し 1.2atm でピークを示す。さらに p が増すと $P_{\max}$ は低下する傾向を示すようになる。これはマグネシウム合金板の押え力が低いと母材板間の隙間の電気抵抗

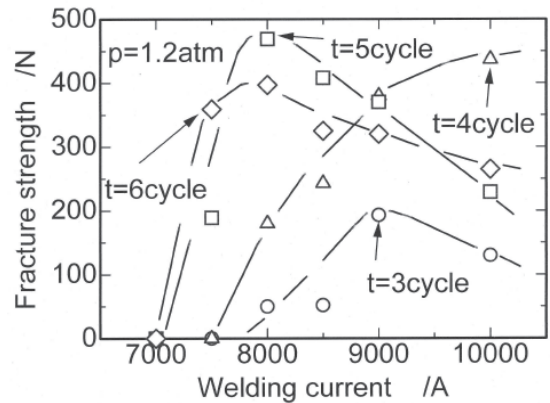


図 11 溶接接合強度 $P_{\max}$ に及ぼす溶接電流 I の影響
($p=1.2\text{atm}$)

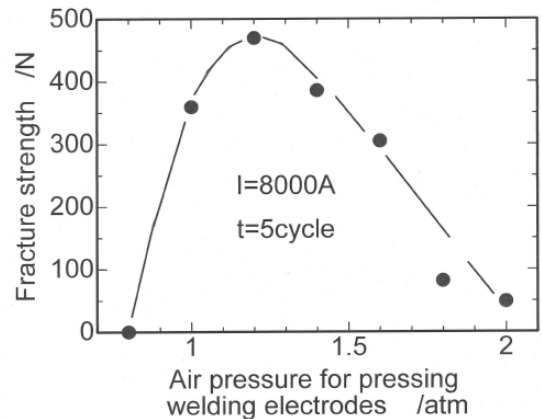


図 12 溶接接合強度 $P_{\max}$ に及ぼす空気圧 p の影響

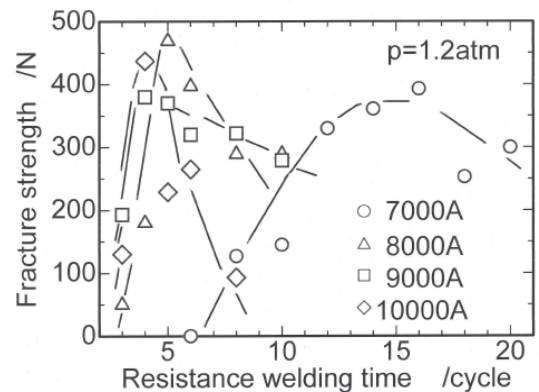


図 13 溶接接合強度 $P_{\max}$ に及ぼす通電時間 t の影響
($p=1.2\text{atm}$)

が増すことにより発生する抵抗熱が増大することにより溶融量が増加し過ぎ、また押え力が高過ぎると、板間の電気抵抗が下がり通電し易くなるために抵抗熱の発生が小さくなったからと考えられる。以上のことから本実験では電極押えの空気圧は1.2atmが最適であると考えられる。

図13は $p=1.2\text{atm}$ のときの接合強度 P_{max} に及ぼす通電時間 t の影響を示している。 P_{max} は t が長くなるにつれて増加し、通電電流 I が比較的大きい8000~10000Aでは4, 5 cycle (0.067, 0.083sec)のときピークをとり、それ以上の t になると減少傾向を示すようになる。これは通電時間 t が短い場合にはエネルギー不足による溶融不足となり、また t が長くなるとエネルギーが過大となり溶融量が増えて、その溶融金属が溶融接合部より外側に飛び出し接合部の板厚が薄くなったためであると考えられる。なお、通電電流 I が低い7000Aでは最大接合強度 P_{max} のピークは t が14~16cycle (0.233~0.267sec)と長くなる傾向がある。

図14には十字引張試験後に得られた試験片の破断面から、溶融が十分である場合(a)と溶融が不十分である場合(b)のときの破断様式の違いを示している。溶融が十分である場合は、図(a)に示すように亀裂が入りせん断破断をしていた。このことは溶融が十分である場合には溶接部の板厚によって接合強度が変化することが考えられる。一方、溶融が不十分である場合は図(b)に示すように引張りによる分離破断を示した。このことは溶融不十分である場合は溶接接合部の溶融面積によって接合強度が変化すると考えられる。

実際に抵抗スポット溶接を行う場合は、通常、複数箇所を溶接し固定するので、スポット溶接1点(面積が約 12.5mm^2)での溶接継手の接合強度が400Nを超えた今回の実験結果であると、AZ31マグネシウム合金板のスポット溶接の実用性は十分にあると言える。

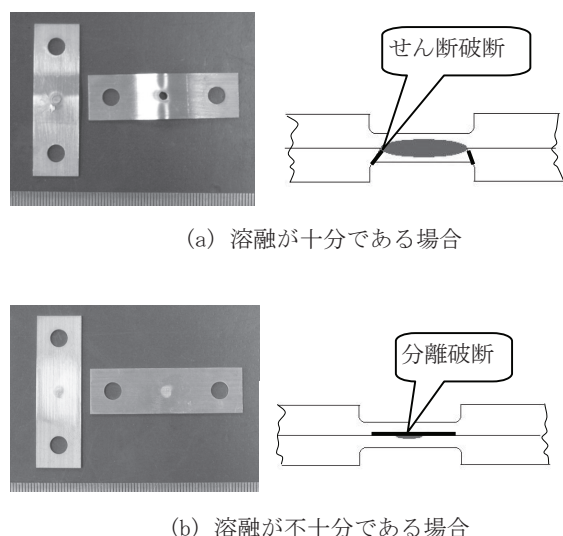
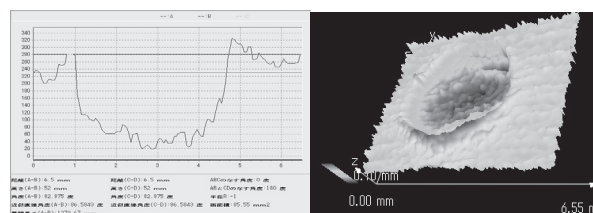


図14 溶融十分と溶融不十分の十字引張試験片の破断様式の違い

3.3 3Dレーザースキャナによるくぼみデータと接合強度との関係

ここでは溶接部近傍の表面性状(くぼみの形状)を3Dレーザースキャナで取り込んだデータから断面形状図と3Dサーフェイス画像(b)に解析した結果について1例($I=8000\text{A}$, $p=1.2\text{atm}$, $t=5\text{ cycle}$ (0.083sec))を図15に示している。今回3Dレーザースキャナを用いてクレータの深さを計測したが、図15のように多少読み取りづらくなっている。そのために板面の凹凸とクレータ面の凹凸の中間を取ることで平均のクレータ深さとした。

図16は、 $I=8000\text{A}$, $p=1.2\text{atm}$ の溶接条件に対して、溶接部の十字引張接合強度に及ぼす溶接電流通電時間の関係を示している。図16より、通電時間が3 cycleのとき数十Nの接合強度であるが通電時間が増すにつれて増大しおよそ5 cycleのときに最も高い接合強度 $P_{\text{max}}=469\text{N}$ を示した。しかしながら、それ以上の通電時間になると逆に漸減する傾向を示すようになった。この理由としては、通電時間を長くするにつれ溶融金属が増えて溶融金属の一部が接合部よりはみ出したために溶け込み深さが深くなる結果となり、次第に溶接部の板厚が薄くなり接合強度が低下したことが挙げられる。図16は、以上のことを裏付ける結果を示している。



(a) くぼみの断面形状 (b) 3Dサーフェイスプロフィール

図15 抵抗スポット溶接部近傍のくぼみの断面形状図(a)と3Dサーフェイスプロフィール(b) ($I=8000\text{A}$, $p=1.2\text{atm}$, $t=5\text{ cycle}$)

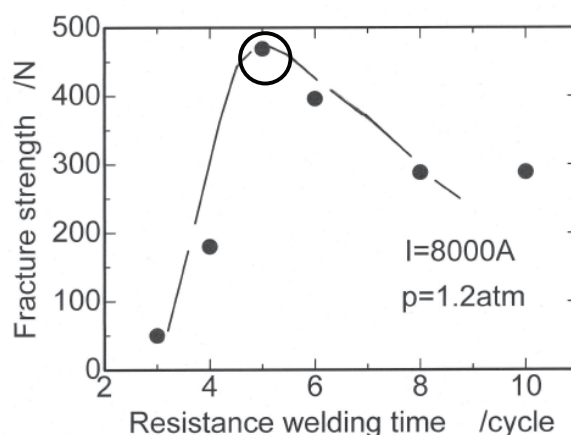


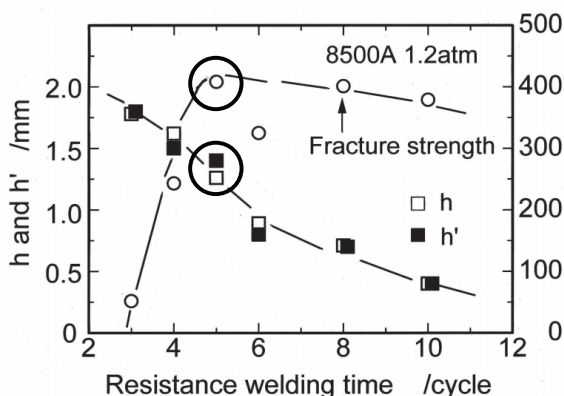
図16 接合強度に及ぼす通電時間の影響 ($I=8000\text{A}$, $p=1.2\text{atm}$)

表 1 溶接接合強度に及ぼす通電時間の影響と溶接部の平均板厚の関係（ $I=8500\text{A}$ ， $p=1.2\text{atm}$ ）

通電時間 t (cycle)	マイクロメータによる溶 接部の板厚 h (mm)	3D スキャナによるクレ ータ深さ d (μm)	3D スキャナによる溶接 部の板厚 h' (mm)	誤差 (%)	接合強度 $P_{\max}$ (N)
3	1.78	100	1.8	1	51.8
4	1.62	250	1.5	7	243
5	1.26	300	1.4	11	408
6	0.89	600	0.8	10	325
8	0.71	650	0.7	1	401
10	0.4	800	0.4	0	379

次に溶接電流 I が 8500A ，空気圧 p が 1.2atm のとき，溶接接合強度 $P_{\max}$ とマイクロメータ及び 3D スキャナで計測した溶接部板厚 h 及び h' と通電時間 t との関係を表 1 及び図 17 に示す．ここで 3D スキャナにより計測した溶接部板厚 h' は元の母材 2 枚を重ね合わせた板厚 2mm から 3D スキャナで読み取ったクレータ深さ d のデータを 2 倍して差し引いたものである．表 1 より h' と h の値はほぼ同じ値を示していることが分かる．誤差も最大で 11%，最低で 0% と極めて小さいと言える．以上の結果は，3D レーザースキャナで計測して求めた板厚データはクレータの深さを高い精度で計測できていることを示唆している．

また，前に挙げた図 16 及び図 17，表 1 から言えることは最大の接合強度が得られるのは通電時間 5 cycle のときであり，そのときの溶接部板厚は約 1.3mm であった．それ以上の板厚になると溶融不足になり引張破断面は引張応力による分離破断，それ以下の板厚になると十分な溶融金属が得られ，十字引張試験時の破断はせん断力の作用を受けたせん断破断となるので，板厚の減少が進むにつれてせん断破断の面積が小さくなることになり，結果として接合強度は低下してしまう．

図 17 溶接接合強度 $P_{\max}$ と溶接部の板厚 h ， h' ー通電時間 t の関係（ $I=8500\text{A}$ ， $p=1.2\text{atm}$ の場合）

4. 結言

AZ31 マグネシウム合金板のスポット溶接接合部の十字引張試験及び溶接接合部の板厚を 3D レーザースキャナによ

って計測解析を行った結果は，次のとおりである．

- (1) 接合強度には電極押え空気圧，通電時間及び溶接電流が大きく影響している．最大接合強度が得られた溶接条件は，空気圧 1.2atm ，通電時間 5 cycle，溶接電流 8000A であった．そのときの溶接接合強度は 400N を上回った．
- (2) 3D レーザースキャナにより，ある程度の誤差はあるものの抵抗スポット溶接部のクレータ深さ（溶接部の板厚）を計測できた．最大接合強度と溶接部板厚との関係について調べた結果，接合強度は溶接部のクレータ深さ（溶接部板厚）に関係していることが示唆された．以上のことから非破壊での接合強度が推測できる可能性があることが分かった．

今後の課題としては，AZ31 合金板の抵抗スポット溶接接合強度に対する溶接条件の影響，特に初期の電極間隙がスポット溶接接合強度に及ぼす影響について，更に詳しく調べることである．

謝 辞

本実験に用いた AZ31 マグネシウム合金板を提供していただいた三協立山アルミ株式会社に厚く御礼申し上げる．

（平成 23 年 10 月 11 日受付）

参考文献

- (1) 村井勉：「マグネシウム合金の押し加工と型材の利用」，塑性と加工，第 48 巻，第 556 号，pp. 379-383 (2007) ．
- (2) 樺沢真事・船川義正・小川和洋・田村学：「薄鋼板スポット溶接継手の引張せん断強さの推定」，溶接学会論文集，第 14 巻，第 4 号，pp. 754-761 (1996) ．
- (3) 松田広志・松田恭典・樺沢真事：「連続スポット溶接時における電極損耗過程に関する検討」，溶接学会論文集，第 15 巻，第 1 号，pp. 31-37 (1997) ．
- (4) 渡辺健彦・土井悠平・柳沢敦・小沼静代：「軟鋼と Al-Mg 合金の抵抗スポット溶接」，溶接学会論文集，第 23 巻，第 3 号，pp. 491-495 (2005) ．
- (5) 日本工業規格，「JIS 便覧」スポット溶接継手の引張試験方法，Z3137-1990