実用講座

表面処理鋼板の溶接技術の現状と課題*

松田 広志**, 小野 守章**

松田 広志

小野 守章

Spot and Laser Weldability of Coated Steel Sheets*

by MATSUDA Hiroshi**, and ONO Moriaki**

キーワード

Galvanized Steel Sheet, Galvannealed Steel Sheet, Laser Weldability, Spot Weldability

1. はじめに

自動車のスリップ防止を目的として路面に散布される凍結防止剤は自動車の腐食を大幅に促進する。1980年代に欧米において自動車の耐食性ガイドラインが制定されて以来、亜鉛めっきを主体とする表面処理鋼板の使用比率が増加した。くわえて、近年地球環境問題に関連して自動車の長寿命化のニーズから今後も適用の拡大が見込まれる。しかし、表面処理鋼板は溶接施工性および溶接部の品質に問題を有することが知られており、溶接プロセス面および材料面から問題解決に向けた検討がなされてきた。

本稿では、亜鉛めっき薄鋼板を対象としたスポットおよびレーザー溶接の技術動向を概説する。

2. スポット溶接性

スポット溶接法は、自動車車体の組み立て工程における主要な溶接法である。スポット溶接性を考える場合、所定の継手強度を確保するために安定して溶接部を得ることが重要である。亜鉛めっき鋼板の場合、裸鋼板と比べて溶接部を安定して得るための条件が厳しくなる。具体的には、(1) 所定の継手強度を確保するのに必要なナゲット径を得るための適正溶接電流範囲が高電流側にシフトし、かつ狭レンジ化する、(2) 電極の交換・ドレッシングなしに連続して溶接した時に所定のナゲット径を得られる溶接点数が著しく短くなる（短電極寿命、連続打点性の低下）ことが問題となる。

ここでは、適正溶接電流範囲と連続打点性に関して、

安定した溶接部を得るために裸鋼板と比較して何が変わるのか、また何が問題であるのかについて、これまで報告されている知見をもとに簡単に説明する。

2.1 適正溶接電流範囲

適正溶接電流範囲とは、要求特性を満たす溶接部が確保可能な電流範囲のことで、通常、下限を最低限必要とされるナゲット径を形成する最小電流値、上限を散りの発生限界電流値もしくは電極と鋼板が溶着する電流値とされる場合が多い。実用的には図1に示すように¹⁾、適正溶接電流範囲を加圧力、通電時間を変化させた条件範囲で求め（ウェルドロブ）、溶接条件設定の指標としている。実際の組み立てラインでは1つの溶接機で十数箇所の溶

図1 ウェルドロブの一例¹⁾

*原稿受付 平成16年1月19日

**正 員 JFEスチール(株) Member, JFE Steel Corporation

図5に、亜鉛めっき鋼板の連続打点試験結果の一例を示す⁵⁾。亜鉛めっき鋼板の連続打点性は裸鋼板よりも劣り(図5は5000点までの結果であり、Zn-Ni電気めっき鋼板と裸鋼板は同等に見えるが、一般に裸鋼板は数万点溶接可能であるのに対し、Zn-Niはそれ以下である)、そのめっき種によっても大きく異なることがわかる。亜鉛めっき鋼板での連続打点性低下の主因は、めっき層の亜鉛と電極の銅との合金化による電極損耗が著しいことである。また、その影響に関しては、電極損耗速度のみでなく、その損耗形態や損耗時におけるナゲット形成能の変化などにより影響を受けると考えられている。

表1に、図5に示した材料を溶接した場合の電極先端の損耗程度、図6に電極先端径とナゲット形成能の関係を示す⁵⁾。裸鋼板の場合、電極損耗速度が遅くかつ電極先端拡大時におけるナゲット形成能の変化量が小さいこと

図5 亜鉛めっき鋼板の連続打点試験結果の一例⁵⁾

表1 電極先端の損耗程度⁵⁾

Number of weld	Zn (30/30)	Zn-Fe (44/44)	Zn-Ni (30/30)	CR
500	1.70	3.00	4.60	0.00
1 000	4.70	4.75	5.25	2.30
3 000	5.35	5.50	5.50	2.75
5 000	5.75	6.00	6.25	3.00

Unit: mm

図6 電極先端径とナゲット形成能の関係⁵⁾

から、連続打点性に優れる。これに対して、純亜鉛めっき鋼板では、電極損耗が速いことに加えて、電極損耗時のナゲット形成電流が著しく上昇するために、連続打点性が劣る。Zn-Fe電気めっき鋼板の場合、電極の損耗は裸鋼板と比べて著しいものの、電極損耗時のナゲット形成電流の上昇量が小さいことから、純亜鉛めっき鋼板と比べて連続打点性に優れるものと考えられている。

電極損耗は、冷延鋼板の場合、溶接時における電極先端部への繰返し熱履歴による電極先端の軟化とその層が塑性変形して電極先端外周部から外側へ変形・排出されることにより進行する⁶⁾。これに対して、亜鉛めっき鋼板では、電極材料自身の軟化による電極外周部への排出以外に、電極の銅とめっき中の亜鉛の合金化による損耗の加速(合金相の剥離・電極外周部からの排出)が問題となる。

電極損耗速度の影響に関しては、純亜鉛めっきの場合、電気亜鉛めっきと溶融亜鉛めっきで電極寿命が異なることが知られており⁷⁻¹¹⁾、その原因に対するいくつかの検討結果が報告されている。一つは、めっき層表面に形成するAl酸化物が溶接時に電極-鋼板間で過大発熱を引き起こし、電極の損耗を促進するというメカニズムである⁷⁻⁹⁾。また、めっき皮膜中のAl含有量の差が連続打点性に影響を与えるとの報告もなされている^{10, 11)}。図7に、めっき皮膜中のAl含有量と電極寿命の関係を示す¹⁰⁾。Zn-Fe合金化溶融亜鉛めっき鋼板の場合には、めっき皮膜中Al量は影響しないが、純亜鉛めっき鋼板の場合にはめっき皮膜

図7 めっき皮膜中のAl含有量と電極寿命の関係¹⁰⁾

図8 電極先端のFe-Zn層中Fe量と電極寿命の関係¹⁰⁾

中Al量の増加により、連続打点性が低下していることがわかる。これは、めっき皮膜中Al量が増加すると、めっき鋼板界面にFe-Al合金相が形成し、図8に示すように溶接中のめっき層への鉄の合金化が抑制されるため、めっき層が熔融状態で電極と接している時間が長くなり電極損耗が進むと考えられている。

また、亜鉛めっき鋼板の電極損耗に関しては、上述した電極損耗速度の変化のみでなく、その形態の影響も指摘されている。図9に、各種亜鉛めっき鋼板での電極損耗形態、図10に各種めっき鋼板における電極損耗形態の分類を示す¹²⁾。電極先端ではめっき層の一部が堆積し、剥離する過程が繰り返し生じているが、めっき種によってその状況は異なることがわかる。この差は、めっき層の融点やめっき層と電極、鋼板との密着力などの違いにより生じると考えられており、Zn-Fe合金化溶融亜鉛め

図9 各種亜鉛めっき鋼板での電極損耗形態¹²⁾

1) 凸型			冷延鋼板
2) 不定形凸型			合金化処理亜鉛めっき
3) 凹型～フラット型			GI、EG、電気めっき
4) 混合型			めっき面 片面めっき 差厚めっき 鉄面 薄めっき面

図10 各種めっき鋼板における電極損耗形態の分類¹²⁾

き鋼板では凸型の損耗形態が電極-板間の実質的な接触域を制限し、連続打点性が優れる主因と考えられている。

図11に、電極先端の損耗形態を模擬した電極によるナゲット形成状況を調べた結果を示す¹³⁾。フラット型、凹型と比較して凸型電極ではナゲット形成開始電流が電極先端径の増大に対して最も変化が少なく、連続打点性に有利であることがわかる。Zn-Fe合金化溶融亜鉛めっき鋼板溶接時に生じる電極先端の凸部はFe-Zn合金層であり、その融点は電極材料自身とは異なるものの、損耗形態が連続打点性に優れることに影響を与えていることを示している。

3. レーザ溶接性

近年、自動車車体の軽量化および高剛性化を目的として、欧米を中心にレーザー溶接法の実用化が進められている¹⁴⁻¹⁷⁾。レーザー溶接を適用する部位は、重ね溶接継手が多く、表面処理鋼板を使用すると溶接時に多量のスパッタが発生するため溶接治具や部材に付着することや光学系が劣化するなど溶接施工上の問題を有すること、また品質面からは溶接部にブローホールなどの溶接欠陥、継手強度が低下する等の問題を有することが知られている¹⁸⁻²⁵⁾。

表面処理鋼板のレーザー溶接におけるこれら問題点の解決に資するために、欠陥発生機構について考察するとともに、スパッタ発生量、静的継手強度並びに疲労強度に及ぼす亜鉛めっき量の影響、最後に溶接欠陥とその対策について概説する^{18, 19)}。

3.1 スパッタ発生現象および溶接部形態

板厚0.8mmのアルミキルド鋼板を原板として、亜鉛めっき量20~60g/m²のZn-Ni電気めっき鋼板およびZn-Fe合金化溶融亜鉛めっき鋼板を用いた。レーザー溶接は、加工点出力2kWのCO₂レーザーを2枚重ねにした鋼板上に照射して行った。なお、以下に示す亜鉛めっき量は、鋼板間に存在する亜鉛めっき量の総重量で表示した。

図12(a), (b)は、レーザー溶接時の外観写真撮影結果を示す。裸鋼板(a)は、スパッタの発生は殆ど観察されないが、亜鉛めっき量が40g/m²を越える場合(b)には多量のスパッタの発生が観察された。図12(c), (d)は、レーザス

図11 電極先端の損耗形態を模擬した電極によるナゲット形成状況¹³⁾

トロポ法を用いてレーザー溶接部でのスパッタ発生現象および溶融池挙動の観察結果である。裸鋼板 [c] を溶接した場合には、レーザービームにより形成されたキーホール周辺の溶融金属が安定に流れ、キーホールを埋めながら溶接部が形成されていく状況が観察されスパッタの発生は殆ど観察されなかった。一方、亜鉛めっき量 40 g/m^2 の表面処理鋼板 (d) では、キーホールに対応する位置に溶融金属と思われる高輝度の粒子が観察され、それらが外部に高速で飛散する状況が観察された。この現象から、

図12 スパッタ発生およびキーホール挙動観察結果⁽¹⁹⁾

図13 亜鉛めっき量とスパッタ重量比の関係⁽¹⁹⁾

高速溶接時で溶融池が小さい場合、溶融池の融液は、レーザー照射によって溶融池およびキーホール内に噴出した亜鉛蒸気とレーザー照射による蒸発反張力の相乗作用によって吹き飛ばされ、スパッタとして飛散したことが推察される。

次いで、溶接前後の試験片の重量差からスパッタの重量を測定した。図13は、亜鉛めっき量とスパッタ重量比の関係を示す。なお、スパッタ重量比は、スパッタの少ない裸鋼板の溶接金属総重量に対するスパッタ重量の比率として定義した。スパッタの発生は、非定常現象であるためばらつきが認められるが、亜鉛めっき量の増加とともにスパッタ重量比が増加する傾向が認められた。なお、亜鉛めっき量 60 g/m^2 ではスパッタ重量比は最大約40%にも達する場合があった。

その結果、裸鋼板では欠陥は観察されないが、図14に示すように亜鉛めっき量 40 g/m^2 以上の表面処理鋼板では、スパッタとして多量の溶融金属が飛散したため溶接部には板厚を貫通するようなブローホールが多数形成された。

3.2 重ね溶接継手強度に及ぼす亜鉛めっき量の影響

亜鉛めっき量を変化させて重ね溶接継手を作製し、静的および疲労強度を測定した。静的・疲労試験片は、試験片幅20mmおよび重ね代40mmとし、重ね代の中央部に試験片全幅方向に溶接ビードを配置した。疲労試験

図15 亜鉛めっき量と継手強度比の関係⁽¹⁸⁾

図14 表面処理鋼板レーザー溶接部の横断面組織

図16 スパッタ重量比と継手強度比の関係⁽¹⁸⁾

は、電気油圧サーボ式疲労試験機を用いて周波数 20 Hz で荷重制御、片振り引張（加重比 $R<0.2$ ）の試験条件で実施した。

図15は、亜鉛めっき量と継手強度比の関係を示す。なお、継手強度比は裸鋼板と表面処理鋼板の継手強度の比率として定義した。亜鉛めっき量の増加に伴い継手強度比は大幅に低下する傾向が認められた。例えば、亜鉛めっき量 20 g/m^2 では裸鋼板継手の約90%と高い値を示したが、 60 g/m^2 以上で約30%まで低下する。

これは、めっき量の増加に伴い、スパッタの発生に起因するブローホール欠陥が増加したことが主な原因と考えられるが、この他の原因として、亜鉛の蒸気化およびレーザ照射により湯流れが乱されることにより欠陥が発生する場合も継手強度の低下要因となると考えられる。したがって、スパッタの発生が非定常現象であるためばらつきは大きい、スパッタ重量比と継手強度比の間には図16に示すように、負の相関関係が認められた。

図17は、亜鉛めっき量の異なる重ね継手の繰返し荷重範囲 ΔL -破断寿命 N_f 線図を示す。亜鉛めっき量 20 g/m^2 までは裸鋼板継手と同等の破断寿命を有するが、亜鉛めっき量が 40 g/m^2 以上ではそれより短い破断寿命となった。

3.3 重ね溶接における欠陥抑制法

表面処理鋼板の重ね溶接における欠陥抑制法として、鋼板間に間隙を設けることが知られており、既に R.Akhter¹⁹⁾、C.Bagger ら²⁰⁾の研究例がある。しかし、欠陥

図17 溶接継手の疲労強度と亜鉛めっき量の関係¹⁹⁾

図18 隙間量とスパッタ重量比の関係¹⁸⁾

が回避される限界間隙量および亜鉛めっき量依存性等、定量的な検討例が少ない。そこで、鋼板間に厚さ $5\sim40\mu\text{m}$ の金属箔を挿入して間隙を設けて溶接を行い、スパッタ重量および継手強度を測定した。

図18および図19に、板間隙量とスパッタ重量比および継手強度比の関係を示す。スパッタの飛散・ブローホール形成挙動は非定常現象であるため、データにばらつきが見られるものの、亜鉛めっき量に依らず板間隙量の増加に伴いスパッタ重量比が低下し、継手強度比が上昇する傾向が認められた。

図19に示す継手強度比が90%を越える板間隙を限界間隙量と定義した。限界間隙量は、図20に示すように亜鉛めっき量とともに増加する結果が得られた。例えば、亜鉛めっき量が 40 および 90 g/m^2 の場合には、限界間隙はそれぞれ約 20 および $40\mu\text{m}$ であった。R. Akhter ら¹⁹⁾は鋼板間隙による溶接欠陥防止の効果を考察している。すなわち、スパッタの抑制の可否は、レーザ照射によって気化した亜鉛蒸気量と鋼板間隙からの排出量との釣り合いから決められるとし、亜鉛の蒸発により溶接欠陥が発生しなくなる鋼板の限界間隙量は式 (1)¹⁹⁾で表せる。

$$G = (2/\pi) [V_w t_{Zn} \rho_{Zn(s)}] / [2\rho_{Fe(L)} g v t_p \rho_{Zn(g)}]^{1/2} \dots (1)$$

式 (1) によると、限界間隙量 G (μm)、溶接パラメータ（溶接速度 V_w 等）および供試材の板厚 t_p 、亜鉛めっき厚 t_{Zn} 、材料物性値（Zn の固相密度 $\rho_{Zn(s)}$ および気相密度 $\rho_{Zn(g)}$ 、鉄の液相密度 $\rho_{Fe(L)}$ 等）によって決められることになる。この式に、溶接パラメータ値および供試材の各物性

図19 隙間量と継手強度比の関係¹⁹⁾

図20 亜鉛めっき量と限界間隙の関係¹⁸⁾

値を代入することにより近似的に式 (2) ¹⁸⁾ で表せる。

$$G \approx 300 V_w t_{zn} \dots\dots\dots (2)$$

たとえば、溶接速度 $V_w=0.05$ m/sec, めっき量 40 g/m² の場合には、許容間隙はそれぞれ約 $90\mu\text{m}$ となる。実験で求めた許容間隙に比較して計算値は数倍大きい値となっているが、隙間量の設定等の実験精度、鋼板の粗さ、材料物性値の温度依存性、溶接時の薄鋼板の熱変形による隙間の拡大などを考慮する必要があると考えられ、今後の研究課題である。

4. お わ り に

亜鉛めっき鋼板を対象とするスポットおよびレーザ溶接に関して、溶接施工技術および溶接部品質について概説した。種々の亜鉛めっき鋼板が実際に適用され 20~30 年が経過しており、溶接技術も開発されてきたが、今も課題は残されている。

スポット溶接に関しては、本文で述べた課題に対して、亜鉛めっきおよびその表層や溶接機の改良²⁶⁻²⁹⁾の検討・提案が行われてきたが、実用面からの課題もあり、材料、溶接機器両面からのさらなるアプローチが必要である。

レーザ溶接に関しては、約 $100\mu\text{m}$ の隙間を設ければ安定に溶接できることを示したが、実用的には一定量の隙間を設けることは困難である。その対策として、プレス成形行程でフランジ部に段差やエンボスを設ける工夫、レーザのパルス化と波形制御技術²²⁾ならびにレーザとアークとを併用したハイブリッド溶接技術³⁰⁾等、種々の提案がなされている。今後、これらのシーズ技術も含めて新たな技術開発が必要である。

参 考 文 献

- 鈴木, 長谷川, 三平: スポット溶接のかんどころ, 溶接技術, Vol. 48, No. 3 (2000), p. 66-71
- 斉藤, 高橋: 表面処理鋼板のスポット溶接, 溶接技術, Vol. 31, No. 3 (1983), p. 27-32
- 堀田, 岡: ナゲット形成能に及ぼすめっき層の影響—薄鋼板のスポット溶接における連続打点性支配因子の追求 (3) —, 溶接学会全国大会講演概要集, 第47集 (1990), p.148-149
- 山内, 高: 表面処理鋼板のスポット溶接性, 抵抗溶接研究委員会資料, RW-173-80 (1980)
- 高, 福井: 電気めっき鋼板の連続打点性, CAMP-ISIJ Vol.3 (1990), p.1502-1503
- 抵抗溶接現象とその応用 (I) スポット溶接・上, 溶接学会技術資料 No. 7, 溶接学会抵抗溶接研究委員会編 (1982), p. 192-195
- V. T. Natale: A Comparison of the Resistance Spot Weldability of Hot-Dip and Electrolytically Galvanized Sheet Steels, SAE Technical Paper Series 860435 (1986)
- M. Kimchi, K. Pickett, M. Gugel and C. White: Weldability and Electrode Wear During the RSW of Various HDG Steels, Sheet Metal Welding Conference VI, Oct. 1994 AWS-Detroit Section
- M. Gugel, C. White, M. Kimchi and K. Pickett: The Effect of Aluminum Content in HDG Coating on the Wear of RSW Electrodes, Sheet Metal Welding Conference VI, Oct. 1994, AWS-Detroit Section
- H. Matsuda et al.: Effect of Aluminum in Coatings on Spot Weldability of Hot-dipped Galvanized and Galvannealed Steel Sheets, Sheet Metal Welding Conference VIII, 1998 AWS-Detroit Section
- 松田, 松田, 樺沢: 溶融亜鉛めっき鋼板の電極寿命に及ぼすめっき皮膜中 Al の影響, 溶接学会論文集, Vol. 14 (1996), p. 47-54
- 斉藤, 高橋, 西: めっき鋼板のスポット溶接連続打点支配要因の解明, 製鉄研究, 327 号 (1987), p. 34-38
- 池田, 安田, 山口, 志賀: 合金化亜鉛めっき鋼板の抵抗スポット溶接 (第 1 報) —電極寿命に及ぼす電極先端損耗形態の影響—, 溶接学会全国大会講演概要集, 第47集 (1990), p. 152-153
- A. Selige and W. Prange: Production and Usage of Laser Beam Welded Sheet Metal, SAE Technical Paper, 870413 (1987)
- R. Imhoff, E. Beyer and K. Behler: Car Body Welding with Laser Radiation, International Symposium on Automotive Technology & Automation (20th.), (1989), 2253-2261
- 池本, 新見, 岩井: 自動車ボデーパネルのレーザ溶接, 溶接学会論文集, Vol. 10, No. 1, (1992), 196-201
- Y. Yamasaki, M. Yoshida, M. Kabasawa and M. Ono: Effect of Chemical Composition, Mechanical and Thickness of Base Steels on Formability of Laser-welded Blanks, Proceedings of the 19th Biennial IDDRG Congress, (1996), 501-510
- 小野, 海津, 大村, 樺澤: 亜鉛めっき鋼板のレーザ重ね溶接性, 溶接学会論文集, Vol. 15, No. 3, (1996), 438-444
- R. Akhter, Steen et al.: Laser welding of zinc coated steel, Proc. 5th. Conf. Lasers in manufacturing, (1988), 195-206
- C. Bagger and I. Miyamoto: Process Behavior during High Power CO₂ Laser Welding of Zinc Coated Steel, Proc. of LAMP'92, (1988), 195-206
- B. Spies: Fusion welding of thin zinc coated steel sheet with CO₂ laser, Dtsch Verlag Schweisstech, Vol. 127, (1989), 63-66
- 鷲尾: 亜鉛めっき鋼板の YAG レーザ溶接, ジョイテック, Vol. 8, No. 4, (1992), 70-76
- R. Imhoff, K. Behler and K. Beyer: Laser beam welding of zinc-coated sheets and quality control, 25th laser application technology in Automotive, (1992), 93-101
- 朝田, 井上, 竹添: 各種表面処理鋼板のレーザ溶接特性, 材料とプロセス, Vol. 3, No. 5, (1990), 1514-1515
- S. Katayama and A. Matsunawa: Laser Weldability of Zn-Coated Steels, Proc. of 6th CISFFEL (International Conference on Welding and Melting by Electron and Laser Beams), Toulon, France, Vol. 1, (1998), 233-240
- 松田, 樺沢, 杉本, 浦田: 亜鉛-マンガン合金めっき鋼板のスポット溶接性, CAMP-ISIJ Vol. 3 (1990), p. 1504-1505
- 小池ら: 合金化溶融亜鉛めっきの加工性, 溶接性に及ぼす Zn-Ni フラッシュめっきの影響, CAMP-ISIJ Vol. 3 (1990), p. 1528
- 堀田, 岡: 電極寿命に及ぼすめっき表面 ZnO 系皮膜の影響—スポット溶接性に優れた亜鉛めっき鋼板の開発 (1) —, 溶接学会全国大会講演概要集, 第52集 (1993), p.110-111
- 高橋, 斉藤: めっき鋼板のスポット溶接における連続打点向上技術の開発, 溶接学会論文集, Vol. 11 (1993), p. 56-61
- 小野, 真保, 吉武, 大村: レーザ・アークハイブリッド溶接法による薄鋼板重ね溶接特性, 溶接学会論文集, Vol. 21, No. 4, (2003), 515-521