

自動車・家電・容器用の薄板と表面処理鋼板の溶接技術

Welding Technology of Steel Sheets and Coated Steel Sheets for Automobiles, Household Electric Appliances and Beverage Cans

齊藤 亨⁽¹⁾ 高橋 靖雄⁽²⁾ 宮崎 康信⁽³⁾ 水橋 伸雄⁽³⁾
Tohru SAITO Yasuo TAKAHASHI Yasunobu MIYAZAKI Nobuo MIZUHASHI

崎山 達也⁽⁴⁾
Tatsuya SAKIYAMA

抄 録

自動車、家電及び容器の分野で多用されている薄鋼板の溶接技術は多様であり、又、そこで使用される薄鋼板の溶接性については適用対象と溶接法の組み合わせにおいてそれぞれ特有の評価観点と評価技術がある。各種高強度鋼板、表面処理鋼板、及び制振鋼板の抵抗スポット溶接性の評価における基本的な知見のいくつかを述べた。ホイールリムのフラッシュ溶接及びアプセット溶接、容器のマッシュシーム溶接については、溶接現象及び溶接性支配要因に関する最近の知見を解説した。又、テーラードブランクのためのレーザ溶接についても概観し、溶接条件、溶接部の成形性とその評価技術を紹介した。

Abstract

Various welding technologies are employed for steel sheet materials which are used in the fields of automobiles, household electric appliances and beverage cans. There are specific viewpoints and technologies for the evaluation of the weldability depending on the combination of materials and welding processes. This paper surveys some knowledge on the evaluation of resistance spot welding of high strength steels, coated steel sheets and vibration dumping sheets. With regard to flash welding and upset welding of wheel-rim and mash-seam welding of cans, recent progress on welding mechanism and dominant factors for the weldability is reviewed. Further, laser welding for tailored blanks is outlined and its welding conditions, formability of the welded portion and its evaluation technology are also described.

1. 緒 言

自動車、家電製品、飲料缶、建材などの薄板の適用分野では高度成長期以降、安全性、軽量化、耐久性、意匠性、快適性などの性能向上が、生産性の向上及び低コスト化との両立を図るなかで追求されてきた。こうした動向を受けて各種の高強度鋼板や表面処理鋼板が開発され、更に、制振鋼板といったこれまでにない新しい構成の素材が開発されてきた。又、溶接プロセスではDCバット溶接法、生産技術ではテーラードブランクといった新しい手法が登場した。これらは溶接技術に対して、鋼材の溶接性、溶接性評価技術、更には新しい溶接技術など多くの開発を迫るところとなった。

溶接技術の開発は多くの場合、個々の溶接プロセスにおける溶接現象の解明を出発点として進めてきた。溶接性に関する成果は現在多くの実用鋼材に反映されるとともに、溶接性評価技術の位置付け

の明確化や共通化が進み、又、溶接技術面でのいくつかの提案をみるに至った。本文ではこれらの中でいくつか主要なものについて紹介する。

2. 自動車用鋼板の抵抗溶接

自動車用鋼板においては1970年代後半から、車体の安全性と軽量化のための高強度鋼板、防錆性能向上のための表面処理鋼板の改良、開発が進められてきた。現在も抵抗スポット溶接が主要な溶接法であることに変わりはないが、近年ボディーや足廻りではレーザ溶接やアーク溶接、又、ホイールではDCバット溶接の実用化が進んでいる。

2.1 スポット溶接

スポット溶接では、高強度鋼板の使用における溶接部の強度に対する鋼材成分の影響の明確化と評価方法の確立、表面処理鋼板にお

*⁽¹⁾ 技術開発本部 鉄鋼研究所 接合研究センター 主幹研究員
 *⁽²⁾ 技術開発本部 鉄鋼研究所 接合研究センター
 主任研究員 工博

*⁽³⁾ 技術開発本部 鉄鋼研究所 接合研究センター 主任研究員
 *⁽⁴⁾ 技術開発本部 鉄鋼研究所 接合研究センター 研究員

いては、電極寿命が主要な課題である。

2.1.1 高強度鋼板

スポット溶接部の強度特性として、せん断引張強さ (TSS) 及び剝離方向の十字引張強さ (CTS) のそれぞれに対して次のような実験式が得られている。

$$TSS = A \cdot Dn \cdot t \cdot TS \quad \dots\dots (1)$$

$$CTS = B \cdot Dn \cdot t \quad \dots\dots (2)$$

(ここで、Dn : ナゲット径, t : 板厚, TS : 母材引張強度, A と B : 比例定数)

これらの式は、溶接部の強度を確保する上で、所定のナゲット径を達成することが基本であることを示している。ただし、剝離方向の強度に関しては、母材の強度に依存しないこと、及び、ナゲット内破断を呈する場合には、ナゲット外破断の場合の(2)式に比べて極端に強度が低下することに注意する必要がある。ナゲット内破断については鋼板の成分に関係するため、板厚0.8mmのP添加鋼板を主体に、成分元素と破断形態の関係を検討してきた(図1参照)。これより、成分限界を表す次の実験式が得られている(通常の保持時間 $T_h = 25$ サイクルの場合)。

$$C + Si/30 + Mn/20 + 2P + 4S \leq 0.24 (\%) \quad \dots\dots (3)$$

この結果は溶接部の硬化が関係することを示しており、板厚の増加や、電極保持時間の短縮は溶接後の冷却速度の緩和をもたらすため、当然成分限界を緩和することになる。後者の影響については直接図1に見ることができ、 $T_h = 5$ サイクルの場合は0.31%という成分限界が得られる。なお、図1は現場的な“ピールテスト”によって評価したものであるが、十字やU字引張試験との相関性を検証し、有効な評価方法であることが確認されている。

2.1.2 表面処理鋼板

一般にめっき金属は低融点の軟質金属であり、このためスポット溶接では電極-鋼板間及び鋼板-鋼板間の通路が拡大し、大電流、長時間の大入熱溶接条件を必要とする³⁻⁴⁾。図2に整理したように、めっき付着量の増加に伴って適正電流範囲が大電流域にシフトし、かつ狭くなる傾向と、めっきの種類の影響が見られる。表面処理鋼板の溶接では大電流・長時間通電という条件に加えて、めっき金属

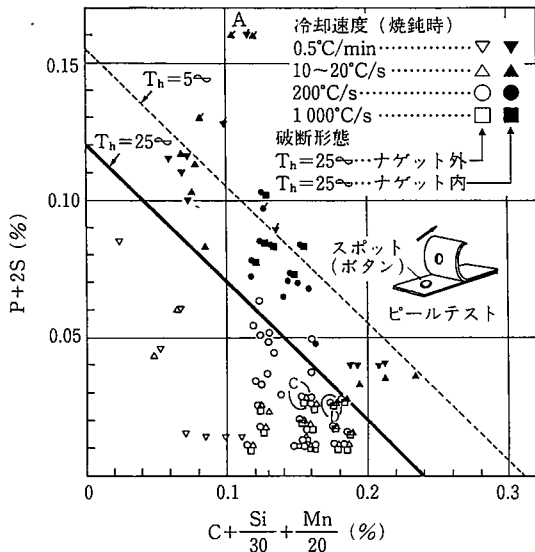


図1 鋼材成分とピールテスト破断形態の整理

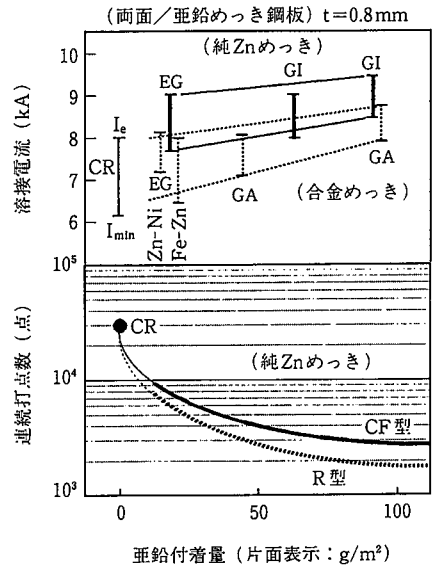


図2 亜鉛付着量と適正電流範囲、連続打点性の関係

と電極鋼の合金化により電極の損耗が激しくなるため、電極寿命が短くなる。電極寿命(連続打点性)は、図2に示すように、CF型及びR型いずれの電極形状においても、めっき付着量の増加に伴って低下する傾向を示す。電極寿命は基本的には電極損耗の速度に支配されるが(損耗速度支配型)、これに加えて次の2点の特異な支配現象を見出した⁵⁾。

電極先端面の損耗形態は凸型、凹型及びフラット型などが観察され、連続打点性はこの電極損耗形態の影響を受ける。Fe-Zn系合金の溶融めっき(45/45g/m²)と電気めっき(20/20g/m²)鋼板の比較例をみると、図3に示したように、溶融めっき材では連続打点数が $N_c \geq 6000$ 点、電気めっき材では $N_c = 1500$ 点であった。これは溶融めっき材では凸型損耗、電気めっき材では凹型損耗となることに原因している。電極面の損耗による凹凸はわずか0.1mm程度であるが、凸型の場合には電流密度の低下が少ないため連続打点性に好結果をもたらす。又、溶融めっき材の場合、電極先端にFe-Zn合金層が形成されるのに対し、電気めっき材ではこれが非常に少ないという対比が注目される。このように電極寿命には損耗形態の現象が見られるが、こうした差異をもたらすメカニズムについて詳細は明らかになっておらず、今後の課題となっている。

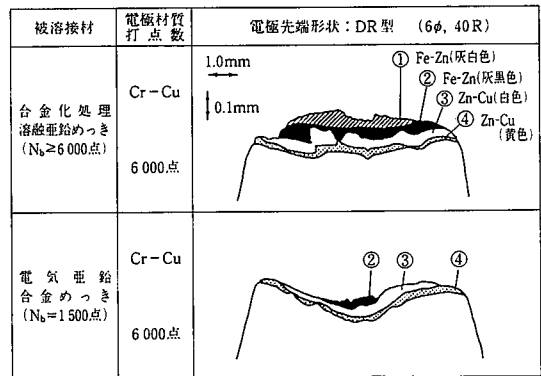


図3 溶接後の電極先端形状と合金層成分(断面)

更に、電極損耗の前後でウェルドロープ（適正溶接電流範囲）を比較すると、溶接初期に比べ電極先端径が拡大した溶接終期では大電流域にシフトする。この電流値のシフト量を示す値を電流余裕値（ ΔI ）と定義し、電気めっき鋼板の例（図4参照）をみると、連続打点性は電流余裕値（ ΔI ）と良い相関が見られる。ウェルドロープ支配型と呼べるこの現象は、めっき表面の電気的接触抵抗に関係することが明らかになっており、酸化皮膜などめっき層最表面の状況が重要な影響を与えることを示唆している。

電極損耗の問題はスポット溶接における最も基本的な課題であるが、以上のような鋼材に関する研究、開発に対して、溶接技術上の改善策として電極材質、複合電極、電極面への各種処理技術など多くの提案がなされてきた。しかしながら、いずれも種々の理由、簡便さ、適用範囲、効果、コストなどの総合的な判断の中で実用化に至っていない。

こうした状況を受け、新たにスピン電極法⁹⁾を開発し、提案してきた。本法では図5のように、電極を角度 θ 傾斜させ、任意の打点数ごとに回転角 α だけ回転させ、鋼板との接触面を順次移動させる。写真1に装置の外観を示す。 $\theta=10^\circ$ 、 $\alpha=60^\circ$ とした場合、合金化処理鋼板、電気亜鉛めっき鋼板、薄膜有機複合鋼板の同種打点、混合打点とも通常の約20倍の電極寿命が達成できることを確認した。又、アルミニウム合金板でも同様である。本技術についてはロボット・ガンへの適用も可能となり、今後の幅広い普及が期待される。

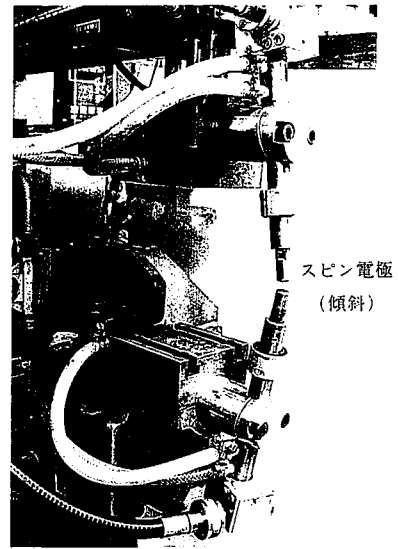


写真1 スピン電極の外観

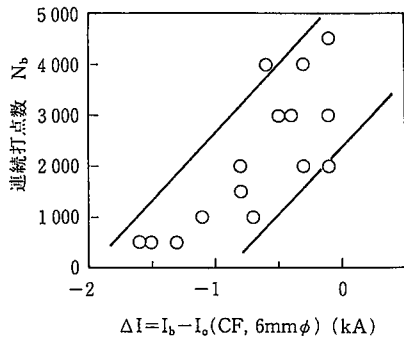


図4 電流余裕値と連続打点性の関係

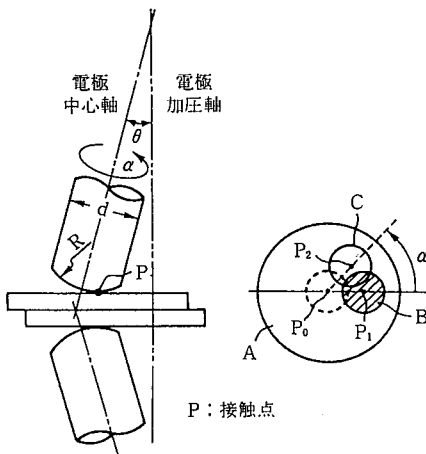


図5 スピン電極法の特徴(動作原理)

2.2 ホイールリムのフラッシュ・DCバット溶接

乗用車用ホイールは、円筒状のリムにディスクが組み付け溶接されて製作される。リムは厚さ3mm前後、幅200mm強、長さ1000mm強の熱間圧延鋼板のブランク板を溶接して円筒形にし、これにロール成形を施して毎分10個程度の割合で製造される。この溶接には従来からのフラッシュ溶接と、最近開発されたDCバット溶接の2種類の溶接方法が用いられている。

フラッシュ溶接法はフラッシュ過程と、その後のアプセット過程により継手が形成される。フラッシュ過程では、円筒状にして軽く突合された鋼板の両端部間で、局部的に短絡し、アーク電流が流れ、ジュール発熱とアークにより加熱される。このフラッシュ過程の後、圧力を加えて圧着させるアプセット過程で溶接を完了する。溶接自体の所要時間は2~3秒程度であり、生産性の高い溶接プロセスであることからリムの製造に使われてきた。

1970年ころから、自動車の軽量化ニーズにより、ホイールへの高強度鋼板の適用を進めるにあたり、溶接後の成形工程において接合界面で発生する割れが問題となった。割れ破面のSEM観察でSi, Alなどの複合酸化物（ペネトレータ）が存在すること（写真2参照）、成形工程においてこれが起点となって界面割れとなることが明らかとなった。このペネトレータはフラッシュ過程において端面に生成

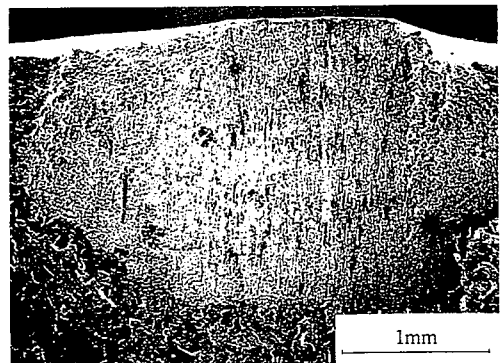


写真2 曲げ試験における接合界面割れ破面の例

された複合酸化物に帰因することを明らかにし、このため鋼材成分の影響について検討した。接合界面での割れ長さに対する鋼材成分との関係を示す評価式 (F_{eq}) を導出し、材料設計・選択の指針とした(図6参照)。この結果、Nb添加60kgf/mm²級高強度鋼板が実用化され、更なる高強度化への足がかりが確立された⁷⁾。

更に、溶接現象を解析して、接合界面の欠陥の低減を目的とした溶接制御技術、アプセットタイミング制御技術が開発された⁹⁾。これは不規則なフラッシュ現象に対し、フラッシュ電流をリアルタイムで演算処理しアプセットに移行する最適なタイミングを見出す技術である。又、それはフラッシュ過程で、部材端面が酸化される機会の大い薄板の溶接において、効果的な技術として提案された。

一方、1980年代に入り、直流電流によるアプセット溶接法、DCバット溶接法、のリム製造への適用が検討されるようになった。この溶接法は、部材の両端部を突合せに加圧力を与え、短絡電流によるジュール発熱を利用して突合せ部を加熱、軟化させて固相のまま圧接するものである。溶接時間が1秒前後と短く、フラッシュによる設備や製品の汚損がないという長所を持っている。しかし従来、この溶接法の適用は比較的小断面のものに限られており、又、高い信頼性の要求される部材の溶接には適用されておらず、特に高強度鋼板への適用は疑問視された。

DCバット溶接では、アプセット変形を大きくすることで、接合強度を高め得ることを見出し、アプセット変形による接合界面の拡大がポイントであることを明らかにした(図7参照)⁹⁾。これは接合界面の拡大過程で、酸化物介在物の分散微細化など接合界面の清浄化により、固相接合が促進されることを意味している。そして溶接条件としては、圧接温度が高く、接合界面の拡大変形が大きくなる条件を選択することが必要となる。すなわち、低い加圧力(～10kgf/

mm²)で突合せ面間の接触抵抗を積極的に利用すること、高電流密度(～150A/mm²)での短時間通電で、熱伝導ロスを少なくして、接触部を頂点とする急峻な温度分布を形成することが、有効である。又、こうした溶接条件で安定して溶接を実行するために、突合せ面の切断には優れた直線性が必要とされる。更に、このリムのような薄板形状の溶接の場合には、接触部が部分的に熔融することは避け難く、この部分ではフラッシュ溶接でのペネトレータと類似の複合酸化物が確かめられた。このことは、本溶接においても先の F_{eq} に基づいた材料設計が有効であることを示唆している。現在 DCバット溶接法により、60kgf/mm²級高強度鋼板が溶接されている。

3. 制振鋼板の溶接¹⁰⁾

各種騒音への対策として制振鋼板が使用される。制振鋼板は、鋼板間に、40～100μm程度の粘弾性樹脂を挟み込んだ構造の樹脂複合鋼板であり、自動車、家電、産業機械あるいは建材など多方面に使用されている。

制振鋼板の溶接技術はスポット溶接に代表される抵抗溶接が主体となる。しかし、制振樹脂は良好な絶縁体であり、電極で加圧しただけでは、通電路を形成することができないため、制振鋼板の抵抗溶接は困難であった。しかし、溶接施工技術上の開発と材料面の改良が進み、支障なく溶接ができるようになった。当初の溶接施工技術としては、加熱により樹脂が軟化する性質を利用したバイパス通電法が開発され実用化された。この方法は溶接打点数が比較的小ない部材(例えばオイルパン)に適用されている。

量産が前提であり溶接点数の多い部材に対しては、樹脂にステンレス鋼あるいはNiの粒子を混入し、導電性を付与した直接通電型制振鋼板が開発され実用化されている。図8は冷間圧延鋼板に対して、それと同厚の直接通電型制振鋼板又は冷間圧延鋼板をスポット溶接したときの溶接電流とナゲット径の関係を示す。直接通電型制振鋼板の場合、樹脂排除に時間を要するため低電流側では同一ナゲット径を得るために必要な電流は、冷間圧延鋼板同士の組合せに比べて高くなる。しかし8kA以上の高電流側では、直接通電型制振鋼板も冷間圧延鋼板も差のないナゲット径が得られ、溶接強度も同等の値となる。

このように、直接通電型制振鋼板は、材料面の工夫により、通常冷間圧延鋼板と同等の溶接性が得られるようになった。これに加えて、実際の生産の場においては安定した溶接性を得るため、2段通

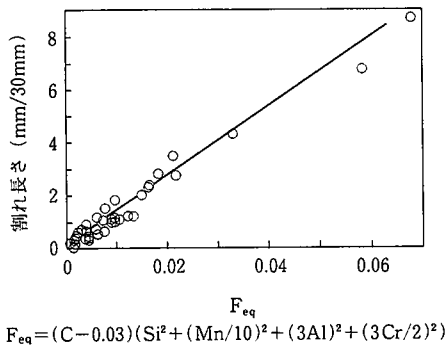


図6 溶接性評価式による接合界面割れ長さの整理

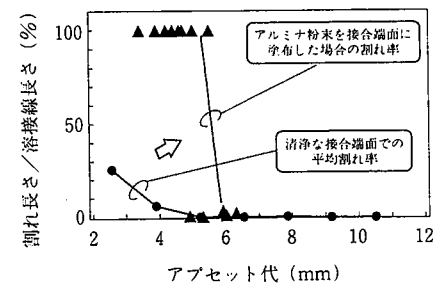


図7 接合界面割れに対するアプセット代の影響

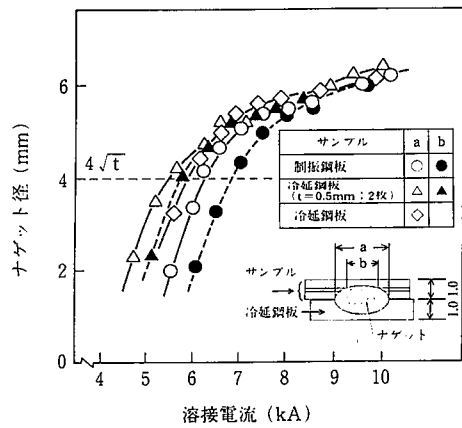


図8 ナゲット径におよぼす溶接電流の影響

電やアップスローブ通電など、溶接施工面での対策が有効であることを明らかにした。

スポット溶接以外では、部品を取り付けるためのナットプロジェクトンやボルトスタッドなどの抵抗溶接、アーク溶接及びアークスポット溶接についても、施工が可能な条件が見い出されている。

4. テーラードブランクのためのレーザ溶接

自動車車体の製造においては従来、個別に成形したパーツを溶接組立する技術と、一枚の大きなブランク材を成形する一体成形技術とが用いられてきた。前者では高い材料歩留りと、強度・耐食性における適材適所化が可能であり、後者では、良好な外観や高い部材剛性が得られ、プレス型と溶接設備の数を削減できるという長所がある。ブランク接合後に一体成形するテーラードブランク技術は、これら二つの技術の長所を両立させることを狙ったものであり、自動車車体の製造工程に広く浸透しつつある¹¹⁾。

ここでは、高能率な溶接が必要であると同時に、必然的に溶接部という局所的に異なる材質部分を含む鋼板、又、部分的に異厚材、異強度材を含む鋼板を成形するというプレス技術上の課題^{12,13)}を克服しなければならない。この点から適正な鋼材及び溶接施工条件の選定が重要となる。溶接法としては現在、レーザ及びマッシュシーム溶接法が用途に応じて使われているが、以下ではレーザ溶接について述べる。

レーザ溶接では、熱源のエネルギー密度が高いため、溶接ビード幅が狭く、溶接による材質変化の範囲を最小限にできる反面、冷却速度が大きいため溶接部が硬くなるという問題が生じる。溶接金属の硬化程度は主として鋼中の炭素量と冷却速度で整理することができる。そのため、図9に示すように、焼入れ性の低い極低炭素Ti添加鋼(以下IFS)では、低炭素Alキルド鋼(AKS)、及びこれにPを添加した高強度鋼(HSS)に比べ、最高硬さを低くすることができる。4kW程度の出力で溶接する場合、実用溶接速度である3~10 m/minの範囲で、IFS、AKSの溶接金属硬さは溶接速度にほとんど依存しない。

成形性は、エリクセン試験や液圧パルジ試験などで、概略評価できることが明らかになっている。図10に示すように、同種材を接合した鋼板は溶接ビードを横断して破断し、IFS、AKSでは溶接速度の増加と共に溶接ビード幅が狭くなると成形高さが高くなる。それに対し、HSSでは溶接速度が速くなっても成形高さの増加は少ない。成形高さは溶接ビードの幅と硬さの両者に依存していると考えられ、HSSでは幅の減少と硬さの上昇の、二つの効果が相殺していると考えられる。溶接ビードを横断して破断する場合は、溶接金属の破断限界歪みが母材より小さいため、これによって成形限界が決まるも

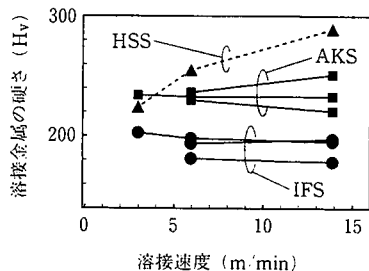


図9 溶接金属の硬さに対する溶接速度の影響

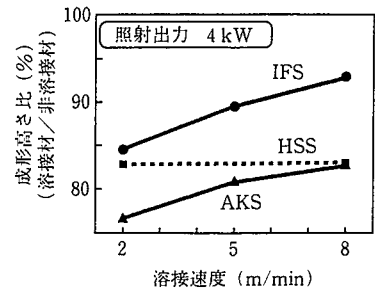


図10 エリクセン試験における溶接速度の影響 (同種鋼板の継手の場合)

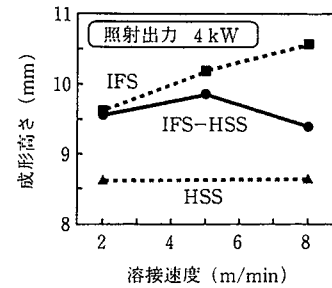


図11 エリクセン試験における溶接速度の影響 (異鋼種材継手の場合)

のと考えられる。

異鋼種を接合した鋼板での成形高さは、図11に示すように、それぞれを接合した鋼板の成形高さの中間に位置する。しかし高速で溶接して細い溶接ビードを形成しても、低強度の鋼板側に歪みが集中して溶接ビードに沿った母材破断が生じ、成形高さは向上しない。この場合には、溶接ビードを横断する各部位での強度バランスが成形性を支配していると考えられる。

レーザ溶接では溶融量が少ないため、突合せ部にすき間があると溶接ビード厚が著しく減少する。ビード厚が母材板厚の70%以下で溶接ビードに沿ってビードの中央で破断するようになり、成形性は極度に低下する。この場合も、成形性は強度バランスに支配されていると考えられる。溶接ビード厚の減少を防ぐにはフィラーワイヤの添加が有効である。ただし、フィラー中の炭素が溶接金属の硬さに影響を与えるため、特にIFSに対しては炭素の少ないフィラーを選択することが必要である。

エリクセン試験における割れは、溶接ビードと直角方向の横割れと、溶接ビードに沿った縦割れに分類された。これら成形における割れを、歪み一定モデルと荷重一定モデルで分類整理することも試みられており¹⁴⁾、自動車製造以外にも今後の展開が期待される製造技術である。

5. 容器材料の高速マッシュシーム溶接

飲料缶を始めとする各種食品用、塗料、燃料、化学製品、化粧品用缶など、スチール容器は身近な分野で用途が拡大している。缶胴と天地の蓋で構成される3ピース缶では、溶接、接着、はんだなどで缶胴シーム部の接合が行われるが、溶接は1缶あたりに使用する鋼材が少なく、生産性も高いという特徴を持っている。

ここでの溶接法は抵抗マッシュシーム溶接で、図12に示すように、絶えず新しい銅ワイヤを中間電極として溶接するため、電極の汚損

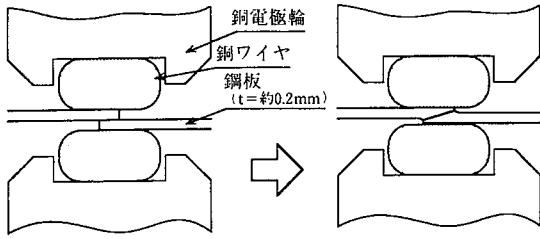


図 12 ワイヤシーム溶接法

がなく安定して良好な溶接ができるのが特徴である。板厚約0.2mmの材料に対し1分間に約600缶(50m/min)以上の速度で溶接される。又、溶接ラップ幅が約0.4mm程度になるよう微妙に調整することで溶接ラップ厚が板厚の1.4倍程度にマッシュされるため、缶エッジはほぼ一様に成形できるといった利点を持っている。

溶接部の溶接線方向の断面の一例を写真3に示したが(ぶりきの場合)、溶接電流の半サイクル単位で接合部が形成されたようすを見ることができる。気密性が最重視される飲料缶においては、溶接部はすきまなく連続に接合され、かつ耐食性、内面の補修塗装性から散り発生が少なくなければならない。したがって、材料の溶接性はこの間の電流範囲、すなわち、溶接部として十分な強度を確保できる電流を下限、散り発生電流を上限としたときの範囲(差)の広さを意味する。

この溶接性については図13に示すように、大略材料の接触抵抗によって整理できることを見出している¹⁰⁾。図14に示すように、ぶりきのように接触抵抗の小さなものは、電極輪下での通電域が広いため、鋼板界面で広く発熱し接合部の連続化が達成し易い。しかし、TFS-CT(Cr系ティンフリースチール)のように接触抵抗の高いものは、通電域が制限され鋼板界面で局所発熱がおこるため、板厚方向にナゲットが成長し散りが発生しやすくなり、又、接合部の連続性を確

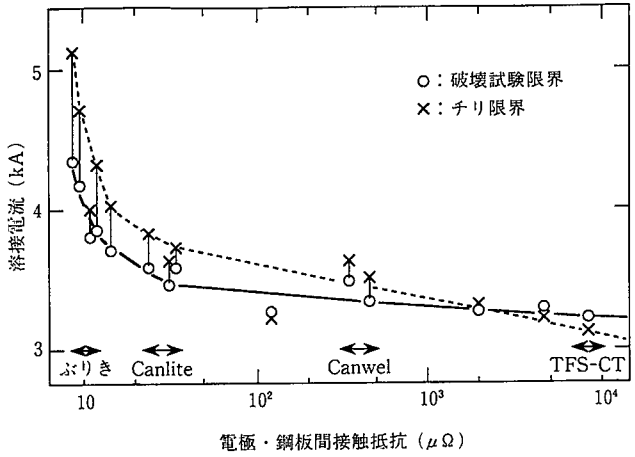


図 13 接触抵抗—電流範囲

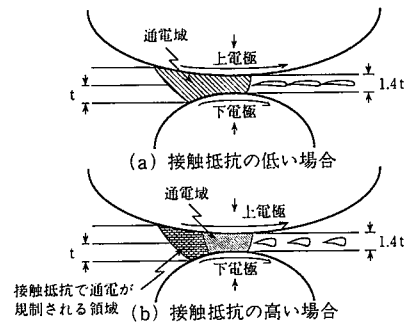


図 14 通電範囲模式図

保することも困難である。この点から溶接性に優れた比較的接触抵抗の低い新たなめっき鋼板の検討がなされ、耐食性と溶接性を両立した材料として、Canwel (Niめっき鋼板)、Canlite (薄Sn-Niめっき鋼板)が開発された¹⁰⁾。

溶接部の評価は各種の方法で行われており、標準化、統一化されるに至っていない。ハインテスト(引き裂き試験)が一般的であり、併せてロールバックテスト(フランジ曲げテスト)、コニカルテスト(拡缶試験)などがあり、溶接部強度、はくりなどを判断する評価方法となっている。表1に各種評価方法を比較検討した結果を示したが、評価方法により適正電流範囲の判定に差が生じ、ハインテストが最も厳しいことが分かる。しかし、例えばハインテストでの判定

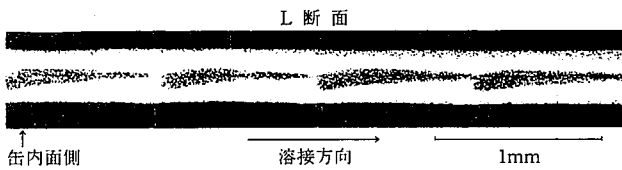


写真 3 溶接部断面(#10ぶりき)

表 1 各種評価法

素材名	試験項目	溶接電流 (任意単位)			
		1.0	1.1	1.2	1.3
ぶりき #10	ハインテスト $\theta=30^\circ$	×	×	×	×
	ハインテスト $\theta=45^\circ$	×	×	×	×
	ロールバックテスト	×	○	○	○
	コニカルテスト	△	○	○	○
Canwel	ハインテスト $\theta=30^\circ$	×	×	×	×
	ハインテスト $\theta=45^\circ$	×	○	○	○
	ロールバックテスト	○	△	○	○
	コニカルテスト	×	○	○	○
TFS-CT	ハインテスト $\theta=30^\circ$	×	×	×	×
	ハインテスト $\theta=45^\circ$	×	×	×	×
	ロールバックテスト	○	×	△	○
	コニカルテスト	×	×	×	○

が、缶としての機能上の満足度と一致するかという点については、見解が確立されていないなど、こうした評価方法の更なる検討が必要とされている。

溶接缶用材料は現在、極薄化（ゲージダウン）、高速溶接化（100 m/min）対応などますます厳しい特性を、更には低コスト化を要求されている。又、現在、TFS-CTのように、溶接不可とされているような各種材料に対する溶接技術の開発も急がれている。

6. 結 言

薄板及び表面処理鋼板に係わる溶接技術について近年の主要な展開、発展を概観し、紹介した。薄板及び表面処理鋼板は適用範囲が広く、そこでの溶接技術も多岐にわたっている。又、適用対象の多くは量産品であると同時に、高い品質が要求される場合が少くない。こうしたなかで、鋼材の開発と共に、溶接技術は、コストと品質を決めるキーテクノロジーの一つとして、今後多様な要請に対応することが求められている。概観したような既に提示されている課題も含めて、今後の発展が期待されるところである。

参 照 文 献

- 1) 西武史 ほか：製鉄研究, (307), p.56(1982)
- 2) Heuschkel, J.: Weld J. 26(10), p.560S(1947)
- 3) 斉藤亨 ほか：溶接技術, 31(4), p.27(1983)
- 4) 溶接学会, 抵抗溶接研究委員会編：抵抗溶接現象とその応用(1). No.8(1983)
- 5) 斉藤亨 ほか：製鉄研究, (327), p.34(1987)
- 6) 高橋靖雄 ほか：溶接学会論文集, 11(1), p.55, p.61(1993)
- 7) 日戸元 ほか：鉄と鋼, (68)9, p.95(1982)
- 8) 西武史 ほか：製鉄研究, (307), p.155(1982)
- 9) 宮崎康信 ほか：材料とプロセス, 3(3), p.752(1990)
- 10) 日本規格協会：制振材料<その機能と応用>(1992)
- 11) 池本公一 ほか：溶接学会論文集, 10(1), p.196(1992)
- 12) 西田新一 ほか：溶接学会論文集, 44(6), p.451(1975)
- 13) 安田克彦 ほか：溶接学会論文集, 2(3), p.521(1984)
- 14) 樋渡俊二 ほか：材料とプロセス, 7(5), p.1355(1994)
- 15) Ichikawa, M. et al.: 4th International Tinplate Conference. 1988, p.446
- 16) 朝野秀次郎 ほか：製鉄研究, (315), p.49(1984)