

ものづくりを支える最新の溶接材料と技術

(その2 自動車編 後編)

State-of-the Art Welding Consumables and Developments in Contribution to Steel Fabrication (Part 2, Second Part)

野瀬哲郎*、宮崎康信*、及川初彦*、
児玉真二*、古迫誠司*、石田欽也*

1 はじめに

自動車に使われる溶接・接合技術について、ここ10年間の文献を中心に紹介しつつ、現状の姿を提示することを試みており、前号(自動車編・前編)にて、自動車用鋼板とアルミニウム合金板の動向、スポット溶接技術の動向を解説した。

本号(自動車編・後編)では、自動車製造を支える溶接・接合技術の一環としての、アーク溶接技術、接着技術などの各技術の動向について紹介する。テーラードブランクのアーク溶接、FSW及びFSSW、機械的接合については、ふえらむ入門講座「鋼を接合する」シリーズ(Vol.16No.5～Vol.17No.1)を参照頂きたい。

2 アーク溶接

アーク溶接はサスペンションメンバやロアアーム等、板厚が2～3mmと比較的厚い足回り部材で多く用いられている。アーク溶接が採用される理由としては、連続溶接が可能であるために継手の強度・剛性を確保しやすいこと、溶接継手に対する自由度が高くパイプやブラケット等の付属部品の接合が容易であること等が挙げられる。図1にリアサスペンションメンバの構造例¹⁾を示す。プレス板など45部品の組み付け溶接で構成され、溶接総延長は8.1mに及ぶとされている。多数の部品を短い溶接ビードの繰り返しにより組み立てることが自動車溶接の特徴であり、溶接速度の向上に加え溶接始終端の品質確保も重要となる。また、複雑な形状をしたプレス部材の継手では鋼板間にギャップが生じやすくなるため、ギャップ溶接性に優れた溶接材料やプロセスが求められる。さらに、足回り部材は重要保安部材として耐久強度の確

保が要求される。近年では、高張力鋼板の適用による板厚低減ニーズと相まって、溶接部の疲労強度や耐食性といった継手性能向上に対する要求が急速に高まっている。

一方、ボディ部材に対しての適用箇所は比較的少ないが、スポット溶接の代わりに用いられる場合がある。例えば、高剛性と軽量化を両立するためには袋構造(閉断面構造)が有利となるが、図2に示すように、スポット溶接を適用するためには作業穴が必要となり、部材強度の低下要因となる²⁾。

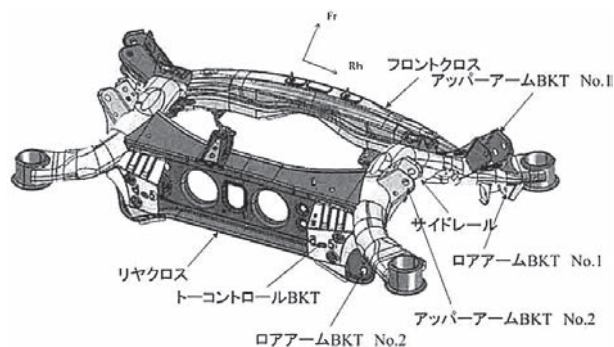


図1 サスペンションメンバの構造例¹⁾

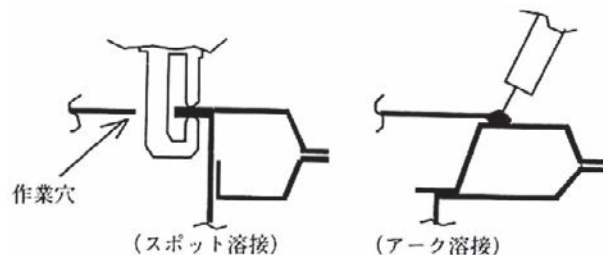


図2 袋構造部材の溶接例²⁾

* 新日本製鐵(株) 技術開発本部 鉄鋼研究所 接合研究センター

そこで、片側アクセス可能な溶接手法としてアーク溶接が採用されている。ボディ部材には1mm前後の薄鋼板が用いられるため、溶け落ち抑制可能な低入熱溶接技術が必要となる。

2.1 自動車の組み立てにおけるアーク溶接

自動車ではGMA溶接（GMAW：Gas Metal Arc Welding）が主に用いられるが、シールドガスの種類によりマグ溶接（MAG溶接：Metal Active Gas Welding）、炭酸ガス溶接（CO₂溶接）、ミグ溶接（MIG溶接：Metal Inert Gas Welding）、に分類される³⁾。

2.2 溶接電源

薄板を高速でアーク溶接するとアンダーカット等の不整ビードが発生しやすくなる。不整ビードを抑制するためには、アーク長を短縮した溶接条件が有効となるが、短いアーク長では溶接状態が不安定となりスパッタが増加する。このため、薄板高速溶接の安定化を目指した各種の低スパッタ電源^{4,5)}が開発されている。生産ラインの殆どでデジタル制御のインバータ電源が普及しており、パルスマグ溶接やショートアーク溶接による低スパッタ溶接が実現されている。各々の電源ではアークの発生や溶滴の離脱といったアーク溶接現象の素過程を溶接電源自身が検知するシステムを備えており、例えば図3に示すように、短絡時の異常放電に対しても独自の演算法により異常電圧を除去⁵⁾することによって、安定した溶滴移行のための電源波形制御を可能としている。

近年では、インバータ制御回路のスイッチング素子の高速化に加え、溶接制御に特化した専用素子も高性能化が図られており、電源波形制御のための演算速度が20nsに高速化さ

れたアーク溶接電源⁴⁾が商品化されている。

一方、溶接ワイヤの送給安定性も溶接現象に影響を及ぼす。通常、ワイヤ送給機から送り出された溶接ワイヤは数メートルのコンジットケーブルを通して溶接位置に供給されるが、コンジットケーブルのたわみやワイヤの摩耗屑によって送給速度が変動し、溶接が不安定になる場合がある。これに対しては、従来のプッシュ型のワイヤフィードと溶接トーチ直近に設置したプル型フィードを連動させることにより、ワイヤ送給性能の向上が達成されている。また、CMT（Cold Metal Transfer）電源⁶⁾に代表される、ワイヤ送給の前進後退と電源波形を同期制御する機種⁷⁾も増加しており、大幅な低スパッタ化が実現されている。

2.3 溶接ロボット

複雑な3次元形状をしたプレス部材を溶接するためには多数の曲線溶接や姿勢溶接が必要となる。そのため、理想的な下向き姿勢での溶接を保つように、ポジショナーやハンドリングロボットと溶接ロボットの協調制御^{8,9)}が行われている。制御可能なロボットの台数も増加しており、近年では4台のロボットを同時に使用する例も増えている。シームトラッキング機能に関しても溶接トーチの近傍にレーザセンサを搭載したロボットシステム⁹⁾により、±0.2mmの精度が確保できると紹介されている。一方、ロボットのコントローラで溶接電源の出力を一元的に制御する溶接電源とロボットの融合というコンセプト¹⁰⁾も提案され、実用化されている。各種の溶接工程に応じたきめ細かな電源波形制御を行い、スパッタの低減や安定した高速溶接が実現される。特に、溶接開始時にワイヤと母材の短絡を検知した後、ロボットでトーチを高速に引き上げることによって、アークスタート不良を回避するリフトスタート機能¹¹⁾は溶接回数の多い自動車部材では有効と考えられる。

2.4 溶接材料

自動車で使用される溶接ワイヤは、スラグやヒュームの発生が比較的少なくロボット溶接に適したソリッドワイヤが用いられている。シールドガスに関しては、古くはCO₂ガスが用いられていたが、近年では、スパッタやスラグの低減に有効なAr+20%CO₂（MAG）ガスの使用が主流となっている。

溶接ワイヤに関して近年、低スパッタ、高速溶接、ギャップ溶接性の向上といった取り組みがなされている。自動車のアーク溶接ではプレス成型した複雑な3次元構造の薄鋼板を組み合わせるため、高いプレス精度が要求されるが、限界があり、ルートギャップやねらい位置の変動が生じる。従って、溶接ビードのずれや溶落ちなどの溶接不良を引き起こしやすく、手直し作業の工数増加による能率低下、コ

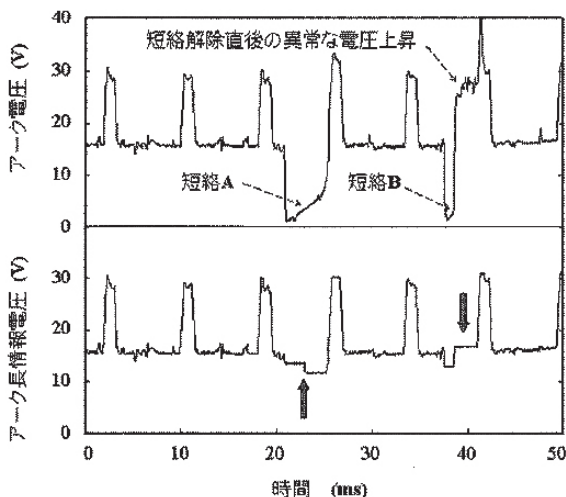


図3 インテリジェントフィルタによるアーク電圧補正⁵⁾

スト増となっている。さらに、作業効率向上のため、900～1400mm/min といった高速度での溶接が行われていることからアンダーカットやビードの凸型化、幅不足が生じやすい。これらの課題に対しては、溶接電流の通電の安定性に加えて、ワイヤの微量化学成分量を最適化することにより、ビード形状改善（幅広ビード）と高速溶接が実現されてきている。例えば、溶接ワイヤのSi量とS量を適正化することによって耐ギャップ性を向上させたワイヤ¹²⁾が実用化されている。Si量の増加による溶融金属の粘性増加により、図4に示すように板厚相当のギャップが存在しても良好な溶接が可能とされている。また、従来、コンタクトチップとワイヤ間の通電性を高めることでアークの安定性を確保すべくワイヤ表面に銅めっきが施されてきたが、銅めっきに代わる導電性物質のワイヤ表面への塗布によりアーク安定化を銅めっきなしで実現し、さらに溶接ワイヤに微量のSを添加することによって、溶鋼の粘性や表面張力を低下させ、幅広で扁平なビードが得られるようにした高速溶接性に優れたワイヤ^{13,14)}

が商品化されている（図5、6）。Sは凝固割れを助長する元素として知られているが、低C化を図ることにより割れ感受性を従来ワイヤ同等に保っている。

一方、高速溶接時のビード形成においては、鋼材成分の影響も重要となる¹⁵⁾。例えば、Si量の少ない鋼板ではビード形状が凸となりアンダーカットが発生しやすくなるのに対し、鋼材のSi量を増加させることにより高速溶接時のアンダーカット抑制、ビード形状の扁平化が可能と報告されている（図7）。

近年では、スパッタ低減の観点からパルスマグ溶接の採用が増えている。パルスマグ溶接では1パルス1ドロップ溶接を安定的に実現すれば、スパッタ抑制が可能となるが、パルス波形と溶滴移行の同期が崩れるとスパッタ増加の要因となる。このため、溶接材料や溶接条件に応じた適正なパルス波形の設定が重要となる¹²⁾。一方、溶接現象を安定化させる上で、溶融池や溶滴の表面張力や粘性といった高温物性が重要な支配因子となり、これらの物性値の定量化^{16,17)} にも取り組

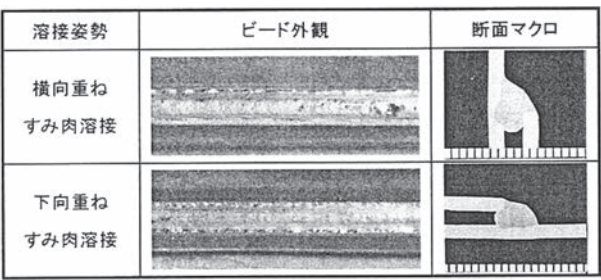


図4 ギャップ付き溶接の例¹²⁾

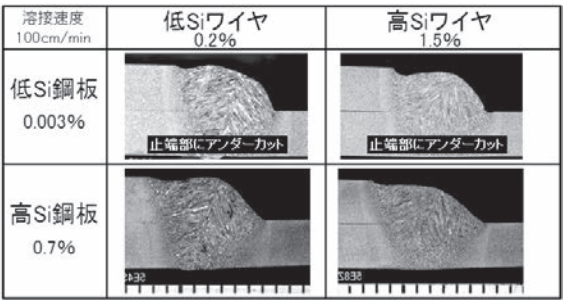


図7 ビード形状に及ぼす鋼材成分の影響

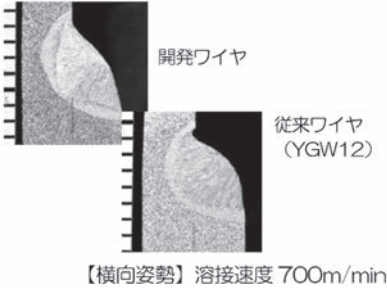
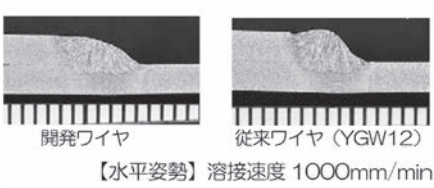


図5 溶接ビード形状を改善した溶接の例（水平、横向）

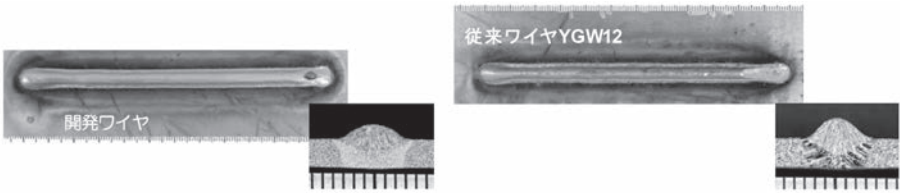


図6 スラグ付着状態とビード断面形状の比較例（ビードオンプレート溶接）

まれている。CO₂の増加による表面張力低下やSi、Ti等の脱炭元素添加による表面張力の増加が報告されており興味深い研究進捗である。

2.5 溶接部の疲労強度向上

繰り返し負荷を受ける足回り部材では溶接ビード止端部やルート部が応力集中部となり、疲労き裂発生が問題となることがある。自動車部材の疲労現象に対する研究は、(社)自動車技術会の疲労信頼性部門委員会などで行われており、継手疲労強度をCAEにて予測する方法¹⁸⁾などが検討されてきた。そこでは、止端部から板厚の0.3倍の位置におけるひずみ振幅を用いることによって、実用上十分な精度でき裂発生寿命予測ができることが示されている。一方で、ハイテン材の適用拡大に伴い、鋼材強度に見合った溶接部疲労強度の向上が求められるようになってきた。しかし、鋼材強度が増加しても溶接部には引張残留応力や高い応力集中が存在するため疲労強度は増加しないとされている。このため、継手の疲労強度向上に関する各種の開発が行われている。

溶接材料による取り組み例として、低変態温度溶接材料¹⁹⁾の適用が挙げられる。溶接材料の変態温度を室温近傍まで低下させ、室温近傍で変態膨張させることで溶接ビード周囲に圧縮残留応力を付与するものである。成分系としては、開発当初は橋梁などの厚板向けとして、高Cr-Ni系や高Ni系の高合金系が開発されてきたが、近年では自動車向けとして、高C系²⁰⁾で価格を抑えた溶接材料が提案されている(図8)。

また、溶接プロセスからのアプローチとして、ハイテン鋼板の継手疲労強度を高める一つの手段として、100% Arシールドガスを用いたミグ溶接法が提案されている^{21,22)}。一般に、鋼は100% Arシールドガスを用いたミグ溶接が不可能というのが常識とされてきた²³⁾。これに対し、同プロセスでは、図9に示すように専用のフラックス入りワイヤを組み合わせ

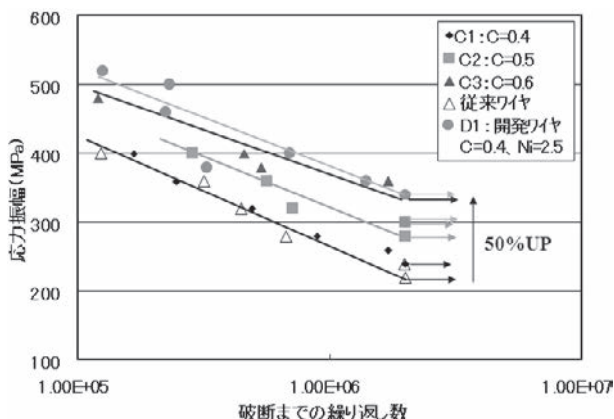


図8 低温変態溶材による780MPa鋼板継手疲労強度の向上

ることで100% Arシールドガスでの溶接を可能にしている。この溶接プロセスでは、応力集中係数を改善させやすい薄板を対象に、100% Ar特有のアーク特性を積極的に利用したビード止端形状の改善(図10)とC添加による低温変態化により圧縮残留応力の付与が可能としており、継手疲労強度改善が図られている。併せて、ミグ溶接による低スラグ化、低スパッタ化により塗装性も改善できるとしている。

また、その他の溶接プロセスからのアプローチとしてプラズマ・アークハイブリッド溶接²⁴⁾による溶接止端部の応力集中低減技術が提案されている。先行にGMA溶接トーチを、後行にプラズマトーチを配置することによって溶融池内の流動を制御し平坦な溶接ビードが得られるとされている。

一方、ワイヤピーニングやショットピーニングによって圧縮残留応力を導入する疲労改善方法が採られている。図11は溶接止端部に超音波ピーニング処理(UIT: Ultra Sonic Impact Treatment)²⁵⁾を施した例を示すが、超音波衝撃に

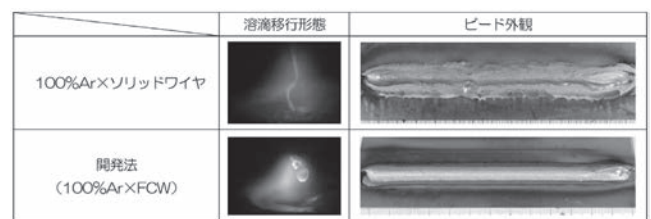


図9 100% Arシールドガスを用いたビード形状の比較

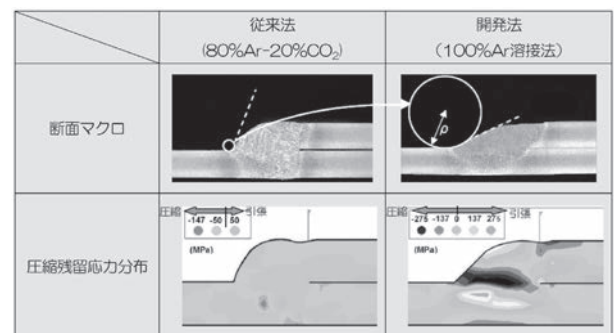


図10 100% Arシールドミグ溶接の断面マクロ形状と残留応力分布の比較

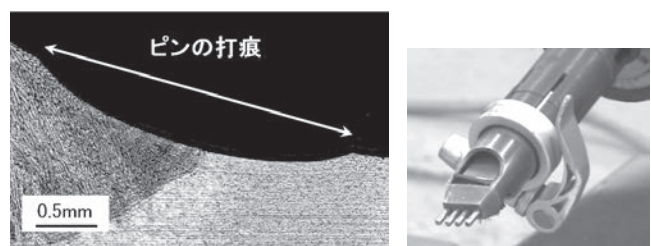


図11 UITによる溶接止端部処理の例(左: 止端処理部断面、右: UITツール)

よる圧縮残留応力の導入に加え、止端部形状の改善による応力集中低減も可能となる。ロボット等に組み込んだ自動処理技術を構築することによって自動車部材への適用が可能になると考えられる。

2.6 溶接部の耐食性向上

ハイテン化により鋼板の薄肉化が進むと、鋼板の腐食に対する余裕代が少なくなる。図12に示すように、溶接部は腐食の進行が早い²⁶⁾とされ、耐食性の向上が必要となる。自動車では部材を化成処理・電着塗装して使用するため、塗装性の向上が重要となる。塗装性低下の要因は溶接部に付着するスラグやスパッタ、ヒュームであるため、シールドガスの酸素源となるCO₂やO₂の混合比率を各々5%、3%以下に低下させることが有効とされている²⁷⁾。また、先に述べたS添加ワイヤ¹⁴⁾は溶融池の湯流れを改善することによって溶接止端部のスラグの付着を少なくなるとされている。

一方で、亜鉛めっき鋼板の適用も増えている。亜鉛めっき鋼板を使用することで犠牲防食効果が得られ溶接熱影響部の耐食性も向上するとされる。しかし、亜鉛めっき鋼板を溶接すると亜鉛の蒸発に伴うスパッタの増加やブローホールの発生が問題となる。特に鋼板を密着して配置する重ね隅肉溶接ではブローホール発生が顕著であり、継手強度の低下が懸念されるため、古くからブローホール抑制技術が検討されている。ブローホールを抑制するためには、溶融金属から円滑に亜鉛蒸気を排出させる(図13)ことが重要となり、溶融金属の表面張力や粘性を制御した溶接材料^{28,29)}が実用化されている(図14、15)。溶接プロセスとしては、溶接電源波形や溶接トーチのオシレーションを利用して溶融池を振動させること

によって亜鉛蒸気の排出が促進される³⁰⁾とされている。

2.8 ボディのアーク溶接

板厚の薄いボディの溶接では溶接入熱による溶け落ち抑制が課題となるため溶接入熱の低減が必要となる。溶接材料には低電流での溶接安定化が可能な細径ワイヤが使用される場合が多い。また溶接電源には専用の低入熱電源が使用されている。特に、ACパルス電源⁵⁾やCMT⁶⁾電源といった低入熱溶接電源の進歩が目覚ましく、ボディへのアーク溶接適用を可能にしたといえる。ACパルス電源ではワイヤの電源極性に適量のマイナス比率を持たせることによって薄板母材への

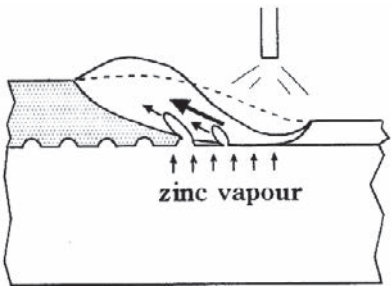


図13 優優池からの亜鉛蒸気排出³⁰⁾

	ビード外観/X線撮影
標準溶材	
ブローホール低減溶材	

図14 ブローホール低減材の適用例

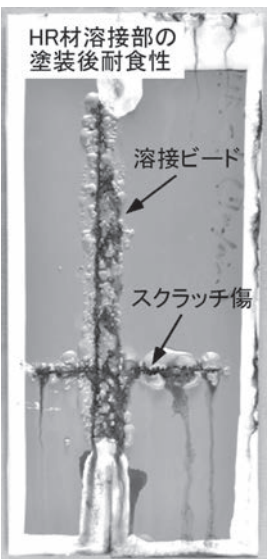


図12 溶接部の腐食試験結果

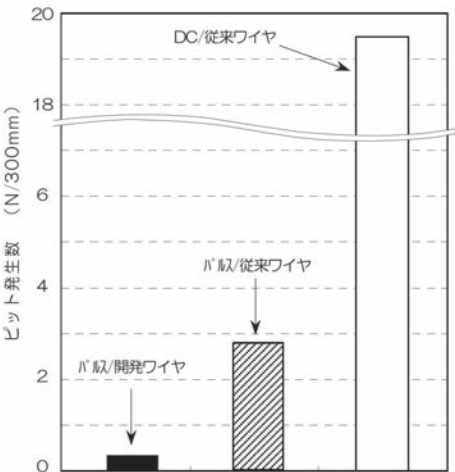


図15 パルスマグ制御と溶材成分設計によるピット低減例

投入熱量を減らしている。また、CMT電源⁶⁾ではワイヤ送給の前進後退と電流波形を同期させて制御し、溶接入熱の大部分を占めるアーク発生期間を短くすることによって溶接入熱の低減を図っている（図16）。いずれの電源もアルミニウムの溶接を対象に開発されたものであるが、ボディにおける薄板溶接ニーズに伴って薄鋼板への適用が広がっている。特に、CMT電源は大幅なスパッタ低減、低入熱化が可能であることから、CuSi₃ フィラーを用いた亜鉛めっき鋼板のアークろう付けや鋼板とアルミニウム板の異材接合への適用可能性が検討されている。鋼板とアルミニウムの溶接では接合界面に形成される脆弱な金属間化合物層が問題となるため、化合物層の抑制ならびに溶接部のぬれ性向上を狙ったアルミフラックスコアードワイヤ³¹⁾も開発されている。

一方で、足回り部材に比べてボディではより高強度なハイテン材が用いられている。ハイテン化に伴い母材の炭素当量も増加するため、母材成分そのものが溶接金属となるスポット溶接では靱性の低下により継手強度が低下する場合がある。これに対して、図17に示すように、適正な溶接材料を選定できるアークスポット溶接を適用することにより十字引張強度（CTS）が向上すると報告が出されている³²⁾。今後、高強度薄鋼板の継手強度の確保という観点からもアーク溶接の適用が期待される。

3 接着・ウェルドボンド

3.1 自動車分野における構造用接着剤の動向

自動車では約60年前にブレーキライニングの接着を皮切

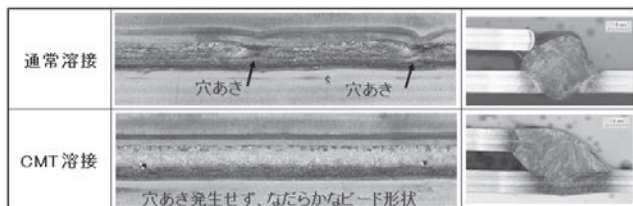


図16 薄鋼板の低入熱溶接

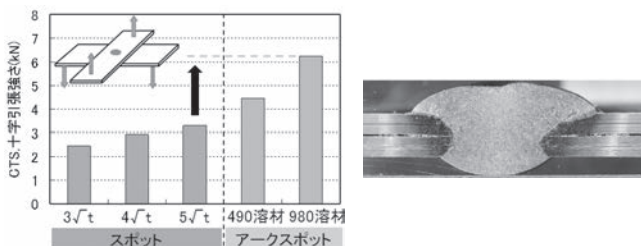


図17 アークスポット溶接による剥離強度向上
(左：CTS、右：アークスポット部断面)

りに、現在では多くの部位に接着剤が使用されている。主な使用目的は車体の剛性や衝撃吸収能の向上^{33,34)}、スポット溶接部の疲労強度向上である³⁵⁾。ウェルドボンドによる継手の疲労強度改善効果を図18に示す。その他の目的は、剛性向上に伴う板厚減や部品数削減による軽量化、溶融溶接が困難な異種材料の接合、スポット溶接点数削減、シール性付与など多岐にわたる。

3.2 接着剤に関する課題

自動車の接着剤（シーリング材）に関する重要課題について述べる。

3.2.1 環境対応

今後ますます環境にやさしい物質の利用と製造の在り方が追及されると考えられる³⁶⁾。対応すべき点として、まず、①脱塩ビ化がある。塩ビは例えばシーリング材として使用されているが、焼却時のダイオキシン発生や酸性雨の原因となる塩化水素発生、焼却炉の腐食発生を引き起こす可能性がある。法的な規制はないものの代替素材が検討され、アクリル樹脂が最適と考えられている。次に、②有害物質削減が挙げられる。代表例として欧州指令のELV規制があり、有害物質の鉛、水銀、カドミウム、六価クロムの原則使用禁止が2003年から適用されている。接着剤・シーリング材の使用において触媒や安定剤としてこれらの重金属類が使用されていたが、無害タイプへの置換が進められている。また、③低VOC（揮発性有機化合物）化もある。厚生労働省から人体に影響があると考えられるVOC13物質の室内濃度指針値が制定され、自動車工業会は2005年より車室内低VOC化に対する自主取り組みを開始した。内板用ボデーシーラーには、トルエン、

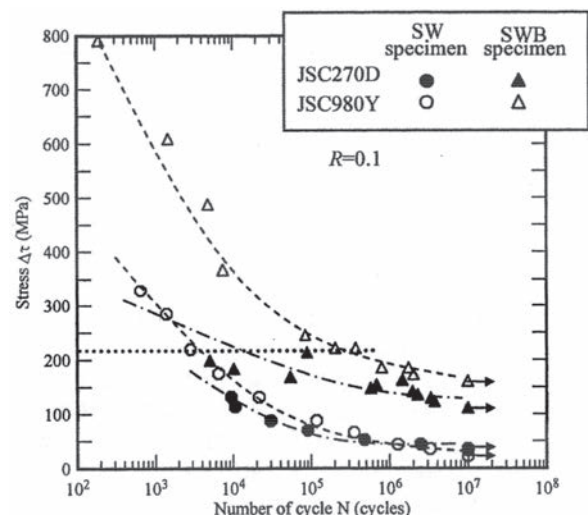


図18 スポット溶接継手とウェルドボンド継手の疲労強度比較³⁵⁾

キシレンなどのBTX類が塗布作業性を付与するために配合される2次可塑剤に含まれており、代替が進んでいる。最後に、④3C1B (3コート1ベーク) システムの適用が挙げられる。自動車工場のCO₂の主な発生源は塗装工場と铸造工場と言われる。従来の3C2Bシステムから焼き付け回数を減らす、さらに焼付けの温度低下や短時間化がVOC排出量とCO₂発生量の削減に有効である。ただし、接着剤・シーリング材の硬化不十分や電着塗装の密着不良、塗装仕上がり不良などが懸念され、低温・短時間でも物性を発現できる材料の開発が進められている。

3.2.2 耐久性

構造用接着剤の耐久性には、耐候性・耐熱・耐水・耐塩水など環境劣化によるものと、振動や応力負荷による動的な劣化によるものが複合作用する。例えばガラスとボディの接着部にはウレタン系接着剤が用いられるが、耐候性(紫外線に対する耐性)に限界がある。劣化を防止するためにガラスを透過する紫外線が接着剤に当たらないよう、ガラスとボディの間に黒色のセラミックコートが施されている。

一方、「水」に関する報告もある。川端らは、実際に市場を走行した(米国にて172,200km走行)車両を回収し、未使用の車両と比較し、接着部の水分量は走行車の方が若干多いが、ボディ剛性や車両から切り出した接着継手の引張せん断強度は同等である結果を報告した³⁷⁾。しかし自動車技術会の報告では、7年走行した車両の接着部引張せん断強度は劣化なしの条件に比較し50～70%に低下する結果が示された³⁸⁾。接着剤の種類や各車の水への対応の相違が結果に影響した可能性がある。

さらに接着剤の吸水劣化挙動を解析した報告もある。水室らは接着剤の加水分解に着目し、接着強度との相関を明らかにした³⁹⁾。具体的には、ウレタン成分を含む1液熱硬化型のエポキシ系接着剤で接着した冷延鋼板の試験片を用い、吸水前後の接着剤の状態変化を評価して「加水分解度合い(=カルボキシル基とアミド基のピーク強度比)」を求め、この指標の増加に伴い接着強度が低減することをつかんだ。高温多湿地域を7年走行した中古車両についても加水分解度合い調査し、接着強度の劣化を推定した。さらに継手の破壊形態にも着目し、吸水初期には水分が鋼板と接着剤の界面を優先的に拡散するため界面破断が支配的となるが、時間経過に伴い水分が接着剤の内部にも拡散し、加水分解が進展してバルク強度が低下するため凝集破壊に変化すると考察している。

3.2.3 めっき鋼板同士の接着

続いて、鋼板など被着体に起因する課題を述べる。日本国内の自動車用鋼板は防錆性や溶接性、プレス性に優れる合金

化溶融亜鉛めっき鋼板(GA鋼板)が使用され、欧州では一般に溶融亜鉛めっき鋼板(GI鋼板)使用される。GA鋼板同士を接着させた継手を用いた引張せん断強度はGI鋼板同士を接着させた場合の強度よりかなり低い。このとき、GA鋼板ではめっき合金層が破壊し、GI鋼板の場合は接着剤が凝集破壊する。このため日本では、構造部位への接着剤の適用が進んでいなかった。この課題を解決するため、加藤ら⁴⁰⁾は、接着剤の構造を海/島状とする接着剤を開発した。海部(マトリクス)には鋼板への応力集中緩和するため変性エポキシ樹脂を、島部には入力されたエネルギーを分散させるためゴム成分を分散させ、伸びと強度のバランスを良好なものとした。結果、GA鋼板の接着強度評価において接着剤の凝集破壊が起こり、強度レベルはGI鋼板のそれと同等とでき、車両構造部位への適用可能性を見出した。詳細は記述されていないものの、川端も同様な接着剤の開発を行い、めっき合金層の剥離を抑止している^{34,41)}。

3.3 異材接着

異種材料の接合で問題となるのは熱膨張率の相違であり、接着剤が膨張と収縮の差を吸収する必要がある。この課題に対応するため、ダウケミカルは伸びと強度の両方に優れた、2液型ウレタン接着剤を開発した⁴²⁾。この接着剤は弾性率の温度変化が従来レベルに比較し大幅に低減され、温度変化が激しい車両環境においても適用性が高められた。同時に接着剤は異材で懸念される接触腐食を防止するシール材としても機能する。この接着剤はBMW7シリーズのアルミルーフとスチールボディの接着を始め、他の車両の樹脂やガラスの接着にも適用されている。

4 おわりに

自動車製造を支える最新の溶接材料と技術について、前号(前編)に引き続き、アーク溶接技術、接着・ウェルドボンド技術を中心に、それぞれの開発状況、適用状況を踏まえて概説した。

衝突安全性のさらなる確保と環境負荷低減など、自動車産業を取り巻く環境の変化に呼応し、適用される素材もますます高強度化、高機能化されてきており、それらの素材を活かす溶接・接合技術もさらなる発展が期待されている。これからも時代のニーズにマッチする溶接・接合技術の提供を通じて、少しでも、ものづくりを支えていきたいと考えている。前号(前編)及び本編が、少しでも関係各位のお役にたてれば幸いである。

参考文献

- 1) 近藤正恒：溶接学会誌, 79 (2010) 8, 42.
- 2) 椛本厚司, 新明高史, 前田豊秀, 政近樹：溶接技術, 52 (2004) 2, 94.
- 3) 高橋邦明：溶接技術, 53 (2005) 11, 133.
- 4) 恵良哲生：溶接学会誌, 79 (2010) 6, 20.
- 5) 上山智之：溶接学会誌, 77 (2008) 2, 27.
- 6) 古川一敏：軽金属溶接, 43 (2005) 10, 465.
- 7) 藤原潤司：溶接技術, 59 (2011) 2, 5156.
- 8) 杉田真一, 小山伸二：溶接技術, 48 (2000) 2, 111.
- 9) 西川清吾, 真田孝史, 畠中貴志：技報 安川電機, 71 (2007) 3, 113.
- 10) 廣田幸伯：溶接学会誌, 79 (2010) 5, 77.
- 11) 廣田幸伯, 向井康士, 川本篤寛, 藤原潤司：溶接学会全国大会講演概要, 77 (2005-9), 142.
- 12) 大村大輔：溶接技術, 56 (2008) 2, 73.
- 13) 鈴木励一, 中野利彦, 興石房樹：神戸製鋼技報, 59 (2009) 1, 105.
- 14) 梅原悠, 鈴木励一, 中野利彦：神戸製鋼技報, 57 (2007) 2, 90.
- 15) 糟谷正, 石田欽也, 児玉真二：溶接学会全国大会講演概要, 86 (2010), 60.
- 16) 泉谷瞬, 岡崎喜臣, 細井宏一, 平田好則, 高原涉, 田中学, 沢登寛, 宮廻滋：溶接学会全国大会講演概要, 85 (2009), 134.
- 17) 小澤俊平, 高橋優, 児玉真二, 石田欽也：鉄鋼協会講演概要集, 89 (2011), 320.
- 18) 平田智弘, 中丸敏明, 赤崎智康, 宮武岳朗, 遠山敬助, 真柄秀一, 鯉淵興二：日本機械学会 M&M2004 講演概要集, (2004), 117.
- 19) 遠山敬助, 真柄秀一, 鯉淵興二：溶接学会全国大会講演概要, 72 (2003), F-39.
- 20) T.Kasuya, K.Sasaki：溶接学会論文集, 27 (2009) 2, 158.
- 21) 鈴木励一, 河西龍, 杵淵雅男, 北村充：溶接技術, 58 (2010) 3, 74.
- 22) Kasai, Umehara and Suzuki ; IIW2009 Doc.212-1149-09, XII-1970-09, IV984-09.
- 23) 松田福久, 牛尾誠夫, 才川至考, 丸山裕, 荒谷雄：溶接学会誌, 52 (1983) 3, 66.
- 24) 松下宗生, 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一：溶接学会全国大会講演概要集, 80 (2007), 12.
- 25) 野瀬哲郎：溶接学会誌, 77 (2008) 3, 210.
- 26) 高橋通泰, 内原正人, 迫田章人, 植木光彦, 新里文明：自動車技術会論文集, 28 (1997) 2, 143.
- 27) 内原正人, 高橋通泰, 迫田章人, 高隆夫：自動車技術会論文集, 28 (1997) 2, 149.
- 28) 木本勇, 小山汎司, 鈴木友幸, 斎藤亨, 松井仁志：溶接学会全国大会講演概要, 58 (1996), 53.
- 29) 鈴木励一, 中野利彦, 黒川剛志：神戸製鋼技報, 54 (2004) 2, 29.
- 30) 松井仁志, 塩野谷哲：溶接学会論文集, 16 (1998) 1, 45.
- 31) 松本剛, 笹部誠二, 岩井正敏：自動車技術会学論文集, 42 (2010) 2, 591.
- 32) 古迫誠司, 児玉真二, 宮崎康信：溶接学会全国大会講演概要集, 89 (2011), 60.
- 33) SCHULENBURG J O and KRAMER A : SAE Tech Pap Ser, (2004) 244, 5.
- 34) 川端博：自動車技術会学術講演会前刷集, (2008) 134, 1.
- 35) 藤井朋之, 東郷敬一郎, 島村佳伸, 山本崇博, 鈴木幸則：日本学術会議材料工学連合講演会講演論文集, 54 (2010), 227.
- 36) 小林敏雄：塗装工学, 43 (2008) 2, 55.
- 37) 川端博, BURR Scott and LUTS Andreas：自動車技術会学術講演会前刷集, (2010) 140-10, 1.
- 38) 中田芳裕：日本接着学会誌, 39 (2003) 12, 455.
- 39) 氷室雄也, 山本研一, 佐々木真二, 谷岡真一, 石田恭聡：自動車技術会学術講演会前刷集, (2010) 33-10, 11.
- 40) 加藤春也, 三石浩嗣, 柴田晴司：自動車技術会学術講演会前刷集, (2008) 134-08, 5.
- 41) 川端博, LUTZ Andreas：自動車技術会学術講演会前刷集, (2009) 106-09, 9.
- 42) ダウ・オートモーティブ：ポリファイル, 46 (2009) 9, 66.

(2012年2月13日受付)