

自動車ボディの接合技術における最近の課題とその対策技術—前編

Current Problems and the Answer Techniques in Welding Technique of Auto Bodies—First Part

古 迫 誠 司*
Seiji FURUSAKO
及 川 初 彦
Hatsuhiko OIKAWA

渡 辺 史 徳
Fuminori WATANABE
高 橋 靖 雄
Yasuo TAKAHASHI

村 山 元
Gen MURAYAMA
野 瀬 哲 郎
Tetsuro NOSE

濱 谷 秀 樹
Hideki HAMATANI

抄 録

自動車ボディには高い衝突安全性と同時にCO₂排出量削減のために軽さが求められることから、高強度鋼板の使用が増えている。こうした自動車ボディの組立てに使われる接合技術に関し、近年の技術動向と研究成果を紹介した。スポット溶接では、高強度鋼板継手の剥離試験(十字引張)時応力のFEM解析とその結果に基づいた十字引張強度向上溶接技術について、また溶接が困難である高板厚比3枚板組や中空部材の溶接技術について紹介した。

Abstract

Application of high strength steel for the auto body has been increasing, because lightness is required in order to reduce CO₂ emissions at the same time as the high collision safety. This paper focused on technology trend and research progress concerning welding techniques which are being used for the assembly of auto bodies. On the resistance spot welding, the following results were introduced: 1) stress analysis by FEM in case of cross tension test for joint using high strength steel sheet, 2) improvement technique of cross tension strength based upon the FEM analysis, 3) welding technique of three steel sheets with a combination of substantially different thicknesses and 4) welding technique of an open section component like a hydroformed one.

1. 緒 言

抵抗スポット溶接は、1900年頃、鍋の取手の接合で最初に実用化されたとされ、第2次世界大戦が終わった翌年の1946年には、既に自動車の車体製造に使われていたようである¹⁾。近年、自動車用鋼板の高強度化が進むとともに、高強度鋼継手での剥離(十字引張)強度(以下、CTS: Cross Tension Strength)の低さが指摘されるようになった。高強度化は車体軽量化と衝突安全性確保に必須の技術であるものの、CTSの低さは時として高強度化を阻害する。そこで、高強度鋼継手でCTSが低い理由について破壊力学的考察を行い、その結果に基づいてCTS向上溶接技術の開発を試みた。

一方、車体軽量化の要求はパネル類を薄厚化する流れを生み、現在、板厚0.55mmの鋼板も使われている。その結果、電極に隣接する薄鋼板の配された高板厚比3枚重ね板組の溶接では、総板厚によっては、薄板—厚板界面にナ

ゲットを形成することが困難となる場合がある。また、点接合であるスポット溶接では溶接点間の遊びのために部材の剛性が低くなることから、剛性向上を目的として、一体構造で閉断面を実現できるハイドロフォーム部品の適用が期待される。しかし、中空である部材に他の鋼板をスポット溶接しようとする、溶接中に電極が沈み込み、ナゲット形成に必要な電流密度の高さが得られなくなる。これらスポット溶接が困難な対象の溶接方法についても最近の研究成果を紹介する。

2. スポット溶接

2.1 高強度鋼板のスポット溶接継手の強度

車体の安全基準への対応と環境負荷低減、即ち高強度化と軽量化という相反する性能を両立するため、590MPa以上の高強度鋼の採用が拡大しつつある。現在では引張強さが1500MPa以上の鋼板も適用されており、その工法は熱間プレスが主流である²⁾。スポット溶接継手の強度は、図

* 鉄鋼研究所 接合研究センター 主任研究員 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

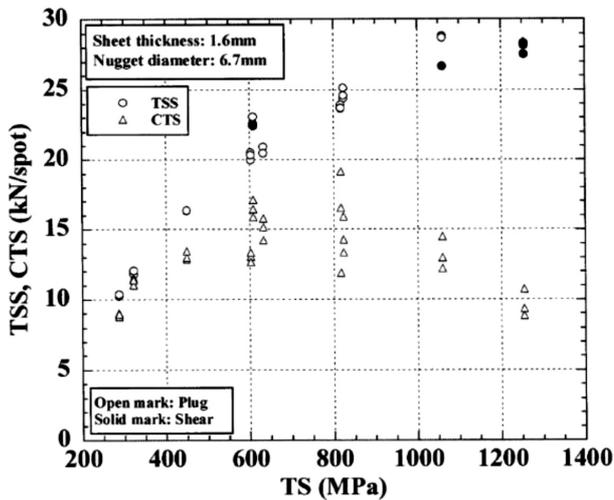


図1 スポット溶接継手のTSSとCTSに及ぼす鋼板の引張強さの影響
Effect of tensile strength of steel sheet on TSS and CTS of spot welded joints

1に示すように、引張せん断強さ(TSS)は鋼板強度の上昇に伴い増加傾向を示すが、十字引張強さ(CTS)は鋼板強度が780MPa以上で低下する³⁾。この原因として、高強度化に伴いナゲット端部への応力集中が増すこと⁴⁾、ナゲットの延性や靱性が低下することが考えられる。鋼板強度を確保するためにCなどの添加元素を増加すると溶接金属(ナゲット)の硬さは上昇し、硬さが上昇すれば靱性は低下する。さらに脆化元素としてPやSが知られ、これらが増加しても靱性は低下する。こうした元素の影響をまとめて表現した次の炭素等量式が知られている⁵⁾。

$$Ceq(\text{spot}) = C + Si/30 + Mn/20 + 2P + 4S \leq 0.24 (\%)$$

C, Si, Mnはナゲットの硬さ上昇に影響し、PやSは偏析に影響してナゲットの靱性を低下させると考えられる。右辺の閾値は十字引張試験での強度や破断形態の健全性を表現しており、 $Ceq(\text{spot})$ が上式の範囲であればナゲット外で破断(プラグ破断)し、CTSは高くなる。一方、鋼板成分の制御によるCTS向上が試みられている。佐久間らは、鋼板強度が同等でもC量の減少やSi量の増加に伴い溶接部強度が上昇することを報告している⁶⁾。C量が増加すると溶接部硬さが増し、ナゲット端の応力集中に対する破壊の感度が増すため、CTSが低下すると推定した。Siは焼入れ性元素であり、Siを増加すると焼入れ硬化する領域が拡大し、即ち、ナゲットから母材に掛けての硬さ変化が緩やかになることに起因し、CTSが向上すると推定した。

2.2 十字引張試験における破断解析

従来から知られる材料力学モデルでは、鋼板強度の向上とともにCTSも向上することが期待されるが、図1に示した実現象と一致しない。そこで、新たに破壊力学に基づいた十字引張試験の考察⁷⁾を行い、CTS支配因子の解明を試みた。

十字引張試験におけるスポット溶接継手の破断をナゲット周囲からのき裂進展問題と捉え、延性的な破壊から脆性的な破壊までを統一的に理解するために、弾塑性破壊力学モデルで検討した。弾塑性破壊力学では、引張負荷に対するナゲット周囲のき裂進展駆動力 J が、ナゲット端部の破壊靱性値 J_c に達すると、き裂が進展すると考えられる。そこで、十字引張試験における J 値の導出とナゲット端部の J_c 測定を試みた。

J 値を導出するために、弾塑性FEM解析での仮想き裂進展によるポテンシャルエネルギー変化から J 値を算出する手法⁸⁾を十字引張試験に適用した。スポット溶接継手の十字引張試験では、十字に重ね合わせた鋼板の中心を溶接した試験体に鋼板同士を剥離する負荷をかけるため、ナゲットにかかる応力は軸対称ではなく、 90° 周期の4か所で高くなる。仮想き裂はこのうちの1か所から進展させることとした。解析では継手の対称性から1/2のモデルを作成した。この開発した手法により、 J 値のナゲット径およびき裂進展方向についての依存性を評価することとした。ナゲット径は板厚 t (1.2mm)の平方根を基準として $3\sqrt{t}$ 、 $4\sqrt{t}$ 、 $5\sqrt{t}$ の3水準とし、またナゲット内破断とプラグ破断それぞれの初期き裂進展に対応する、界面方向(板面と平行)と板厚方向の仮想き裂をモデル化した。

荷重4kNにおける最大主応力分布図を図2に示す。図中の破線が溶融境界であり、ナゲット端部の仮想き裂が変形時に開口していることが確認できる。この開口によるポテンシャルエネルギー低下量をき裂面積で除して J 値を算出した。荷重5kNにおける2種類のき裂について算出した J 値のナゲット径依存性を図3に示す。本図より、両き裂方向において、ナゲット径が大きくなると、同一荷重における J 値が小さくなることが判る。また、ナゲット径 $3\sqrt{t}$ における解析結果では、界面方向にき裂を進展させた場合の J 値の方が板厚方向にき裂を進展させた場合の J 値よりわずかに大きい。しかし、ナゲット径が $4\sqrt{t}$ 、 $5\sqrt{t}$ と大きくなると、反対に板厚方向にき裂を進展させた場合の J 値の方が大きくなる。

これら解析結果は、ナゲット径が大きくなるとCTSが

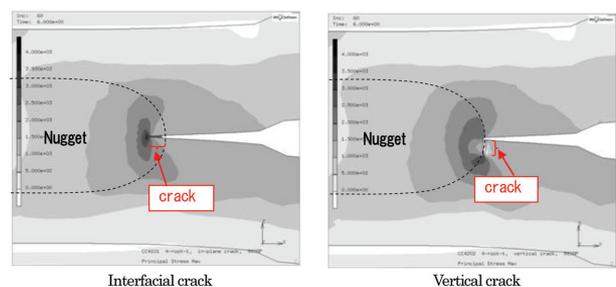


図2 4kN載荷におけるナゲット端部の変形状態と最大主応力分布図
Deformed state and distribution of maximum principal stress at edge of nugget under the load of 4kN

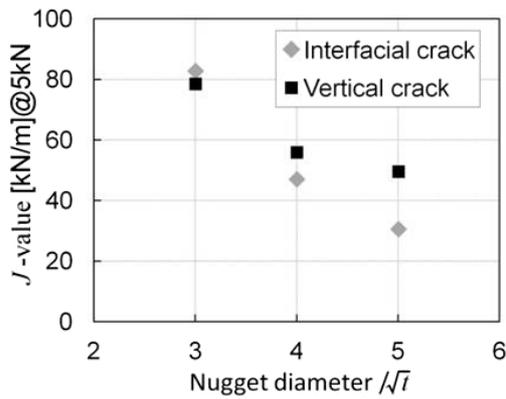


図3 5kN载荷におけるJ値のナゲット径依存性
Dependence of J -value on nugget diameter under the load of 5kN

増加し、破断形態がナゲット内破断からプラグ破断へ移行する実験結果に対応しており、 J 値という概念が十字引張試験の解析に有効であることを支持している。従って、ナゲット端部の J 値を抑制する、あるいは破壊靱性 J_c を高くすることでCTSを向上可能であると考えられる。

ところで、これまでにスポット溶接部のき裂進展のクライテリアとなる局所の J_c については報告されていない。そこで、ミニチュアCT (Compact Tension) 試験片を用いる方法を採用し、成分系が異なる2種類の980MPa級鋼におけるナゲット端部の J_c を評価した。さらに両鋼板のスポット溶接継手のCTSを測定し、得られた J_c と比較した。加えて、両試験片の破面形態も比較した。

供試材には0.13%Cと0.30%Cの980MPa級鋼板(板厚1.4mm)を用い、同種材同士のスポット溶接継手(ナゲット径 $4\sqrt{t}$)を作製した。溶接には、サーボモータ加圧式・単相交流定置式スポット溶接機を用いた。交流周波数は50Hzであり(次節以降も全て50Hz前提)、1 cycle = 20msである。加圧力3.4kN、通電時間16 cycleにて、電流値を調節して $4\sqrt{t}$ のナゲットを形成した。

作製した継手のナゲット端部から、図4、5に示すように、インチサイズCT試験片の1/25サイズ(厚さ(B)=1mm, 幅(W)=2mm)で試験片を切り出した。低荷重で剥離する圧接部(コロナボンド部)を予き裂として用いた。き裂開口負荷は、試験片の穴に通したワイヤーを引張試験機に取り付けて、 $200\mu\text{m}/\text{min}$ で引っ張ることで与えた。試験片の破壊荷重からJIS G 0564に基づいて導出した K_Q が、破壊靱性値 K_c と等しいとして、 K_c は0.13%Cの材ナゲットで $84\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 以上、0.30%C材ナゲットで $29\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ と導出された。また、 K_c 値から変換された J_c 値はそれぞれ $30\text{kN}/\text{m}$ 以上、 $3.7\text{kN}/\text{m}$ と見積もられた。破壊後の0.30%C材試験片は、図6に示すように、ナゲット端部は粒界割れ、ナゲット内部はへき開破面を呈した。

それぞれの鋼種を用いた継手のCTSは0.30%C材が6.6kN、0.13%C材が2.4kNとなり、その比は0.38であった。破壊靱性試験結果での破壊応力比 $[J_c(0.30\%C)]/J_c(0.13\%C)]^{1/2}$ (J の平方根は応力に比例)は0.35であり、このCTS比に近い値となった。0.30%C材の十字引張試験片の破面は、ナゲット端部で粒界割れ、ナゲット内部でへき開破面を呈した。

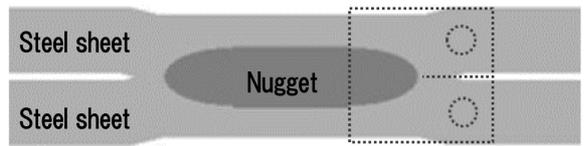


図4 試験片採取位置
Specimen preparation position

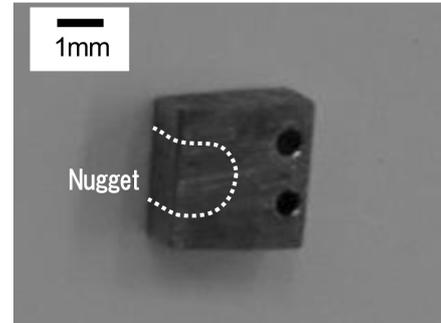


図5 ミニチュアCT試験片の外観
Appearance of miniature CT specimen

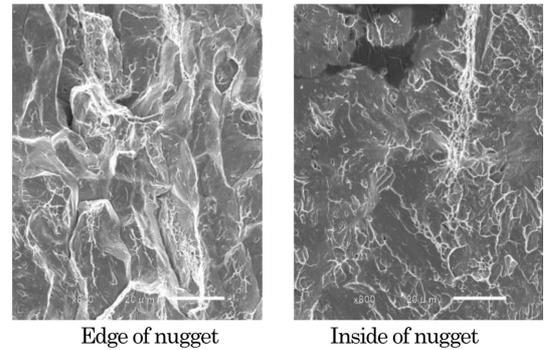


図6 試験後のミニチュアCT試験片破面のSEM写真
(0.30mass%C)

SEM images of fracture surface of miniature CT specimen after testing (0.30mass%C)

SEM images of fracture surface of miniature CT specimen after testing (0.30mass%C)

このように、ミニチュアCT試験片を用いた破壊靱性試験結果と十字引張試験結果の比較により、 J_c が低い溶接部はCTSも低くなる傾向、そして両試験における破面形態が一致する傾向が確認された。したがって、両試験で同様な破壊現象が生じたと考えられ、この結果はCTSがナゲット端部の破壊靱性に支配される可能性を示唆している。従って、ナゲット端部の破壊靱性 J_c を向上させることでCTSも向上することが期待される。

2.3 後通電によるCTS向上

2.1で述べたように、剥離方向の継手強度は母材強度が780MPaを超えると減少する。そこで浜谷らは、本通電後に短時間の冷却時間を設けて後通電するプロセスに取り組

み、この条件の工夫によって高強度鋼継手のCTSを向上できることを見出した⁹⁾。この後通電プロセスでは、従来知られた、十分な冷却時間を経てから(溶接部がマルテンサイト変態を完了してから)焼き戻すテンパー処理とは異なり、短時間の冷却とするため、生産性の大幅な低下は無いものと考えられる。以下に後通電プロセスについて詳述する。

供試鋼には、板厚2mmのAlめっきホットスタンプ(以下、HSと省略)材を用いた。試験片はJIS Z 3137に規定された十字引張試験片の形状に準拠した。溶接には定置式の単相交流スポット溶接機を用い、加圧力は5kN一定とした。通電パターンは2段階通電方式とし、ナゲットを形成する本通電とナゲットを改質する後通電に分離した。本通電と後通電の間には無通電とする冷却(クール)時間を設け、このクール時間を変化させた。本通電時にナゲット径は $5\sqrt{t}$ (t :板厚)が形成されるよう、予備試験において電流(I_1)を8.2kA、通電時間を19サイクル(電源の交流周

波数50Hz)に決定した。後通電時の電流(I_2)は予備試験で I_1 の90%に決定し、また後通電時間は5サイクルまたは20サイクルとした。

クール時間がCTSに及ぼす影響を図7に示す。CTSはクール時間6サイクルでピーク値を示し、また、クール時間を35サイクルと長くした場合でも、後通電時間の増加によりCTSは向上することが判る。このCTS向上の原因を探るため、ナゲット端部の凝固偏析の状態をFE-EPMA(電界放射型電子線マイクロアナライザ)で分析した。Mn, Si, Pなどの偏析が確認されたが、ここではPを図8に例示する。後通電を実施しない場合や、図8(a)に示すCTSが向上しなかった後通電条件ではPの凝固偏析がナゲットに維持されていた。一方、図8(b)に示すCTSが高かったクール時間6サイクルの条件では、同部位のPの偏析が大幅に軽減されたことが判る。これは本通電時に凝固偏析した元素が後通電工程で拡散したことが一因と推定され、前節で述べたように、ナゲット端の靱性が向上し、ひいてはCTS向上効果が発揮されたと考えられる。

この凝固偏析緩和の効果は谷口¹⁰⁾も支持している。なお、ナゲット内の硬さレベルは後通電有り無しで同等であり、従ってCTS向上は焼き戻しによる効果ではない。一方、後通電によりHeat affect zone (HAZ) 軟化の程度やその領域幅は拡大傾向を示した。そのHAZ軟化幅拡大のCTSの影響代(向上効果)を破壊力学的考察に基づき推定し、4%程度と見積もった¹¹⁾。従って、後通電によるCTS向上の主因は凝固偏析の緩和による靱性改善といえる。

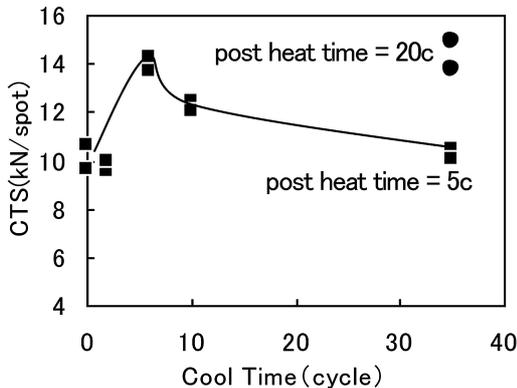


図7 クール時間のCTSへの影響(HS材、板厚2.0mm、ナゲット径 $5\sqrt{t}$)

Effect of cool time on CTS (HS, sheet thickness 2.0mm, Nugget diameter $5\sqrt{t}$)

2.4 高板厚比3枚重ね鋼板のスポット溶接

自動車のボディではサイドパネル等において、鋼板を3枚重ねてスポット溶接される部位が存在する。中には、外板が薄板軟鋼、内板のレインフォースが厚板高強度鋼とな

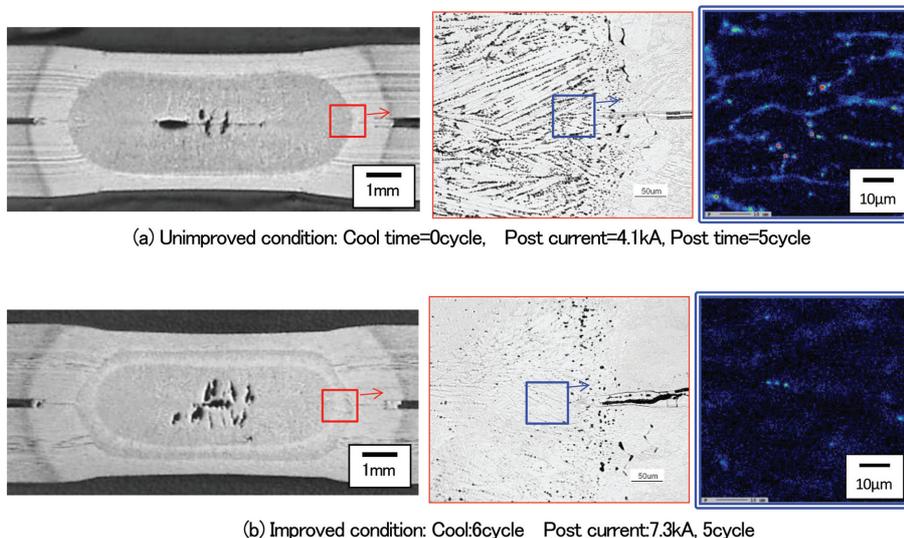


図8 後通電条件がナゲット端部の組織および凝固偏析(P)へ及ぼす影響
Effect of post heat condition on micro-structure and solidification segregation at edge of nugget

る、即ち、高板厚比となる3枚重ねの板組があり、溶接が困難となるケースが見られる¹²⁾。ここでいう板厚比とは、総板厚を最薄板厚で割った値である。3枚重ねスポット溶接でのナゲットを図9(a)に示すが、高板厚比の溶接では、図9(b)の様に薄板—厚板界面でのナゲットが形成されにくい。これは、スポット溶接では、水冷電極による抜熱により、通電初期の鋼板表面での接触抵抗による発熱を除けば、溶融が総板厚の中心から周辺部へ拡大していくプロセスを経るためである。さらに実部材の精度を考慮した、鋼板間に隙間がある場合の溶接条件設定が必要である。実際の適正溶接電流範囲は図10に示すような範囲となり、1段通電溶接では狭い条件範囲となる場合が多い。

上記の課題を解決する手法として、板間の隙間がない場合には、薄板側の電極先端径を小さくした上で通電中の加圧力と電流値を変化させる方法が提案されている¹³⁾。また、電極や加圧力は変更せずに、図11に示すパルス化入り2段通電法¹⁴⁾が提案されており、この方法について概説する。これは、まず第一通電で、比較的高電流で薄板

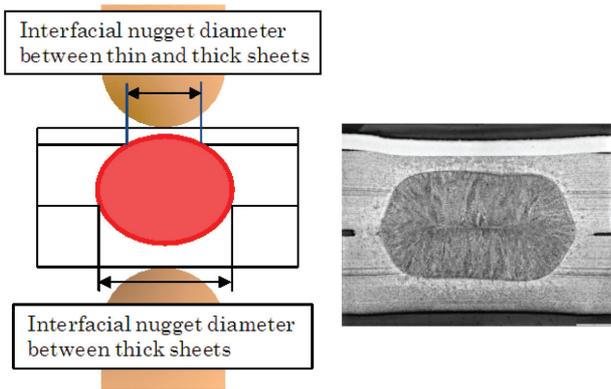


図9 3枚重ねスポット溶接
Three sheets spot-welding

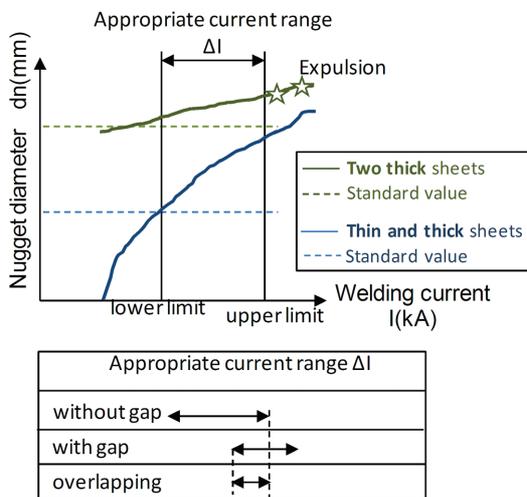


図10 3枚重ねスポット溶接の適正電流範囲
Weldability lobe of three sheets spot-welding

—厚板界面の接触抵抗を利用した発熱を行い、次に、第二段通電で低電流のパルス化入り通電により、薄板—厚板界面および厚板—厚板界面の両方のナゲットを散り無く安定的に成長させることを狙う。低加圧で有効となる接触抵抗を積極的に利用せず、高加圧でもできるため、板間隙がある場合においても、この手法は有効である。

そこで、本技術を適用した実験を行った。供試材は板厚0.6mmの軟鋼および板厚1.6mmの980MPa級高強度鋼2枚の3枚重ねで、それぞれの板間には1.4mmのスペーサーをスパン40mmで配置した。溶接機としてサーボモータ加圧式単相交流溶接機を、電極は先端R40、先端径6mmのクロム銅製ドームラジヤス電極を用い、加圧力は3.43kNとした。適正電流範囲を決定する薄板—厚板界面の溶融径を評価するため、この界面でたがね試験を実施し、プラグ径を評価した。

その結果を図12に示すが、横軸は1段通電（通電時間 $t_1 = 18\text{cycle}$ ）ではその電流とし、2段通電（第1通電時間 $t_1 = 18\text{cycle}$ 、第2通電時間 $t_2 = 8\text{cycle}$ ）やパルス化入り（ $t_1 = 18\text{cycle}$ 、 $t_2 = (5\text{cycle通電}-2\text{cycle無通電}) \times 5$ ）では2段目の電流とした。1段通電や、2段通電の場合は、薄板—厚板界面のプラグ径が基準値に到達してから散り発生するまでの適正電流範囲が1kA未満であるのに対して、パルス化入りとすると、適正電流範囲は3kA以上、板間

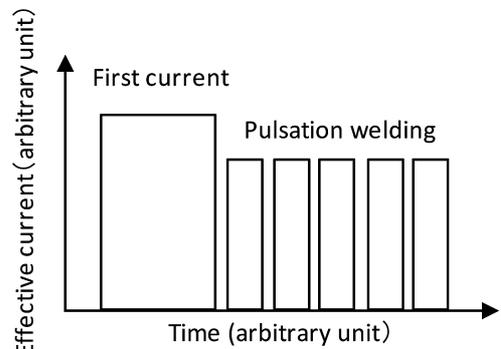


図11 通電パターン模式図
Image of welding current pattern

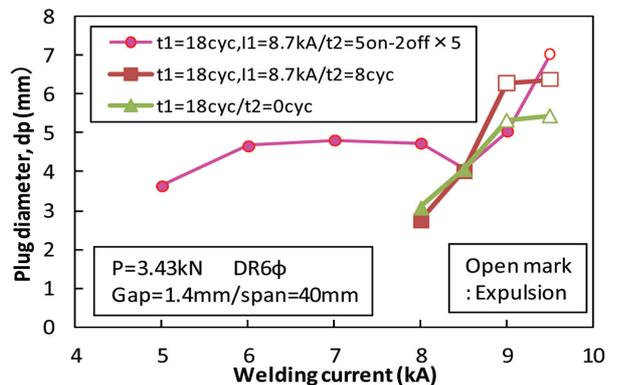


図12 通電条件を変化させた場合のウェルドローブ
Weldability lobes by different welding current patterns

の隙間なしの場合は約1.8kA確保できた。

2.5 中空部材へのスポット溶接

車体のスポット溶接においては、2枚以上の鋼板を溶接電極で挟み加圧しつつ通電する、いわゆるダイレクトスポット溶接が主流である。しかし閉じ断面構造となる部位があり、この場合、電極を通過させる作業穴を設け、被溶接部をダイレクトスポット溶接することがある。穴部の剛性低下を補うため、鋼板の板厚増加や補強部材の追加などの対策を講ずれば、車体の重量増加を招く。そこで野間らは、部材の穴を無くし、板厚減少(軽量化)と剛性確保の両立を試みた¹⁵⁾。このとき、一方の鋼板面から2つの電極で加圧通電する、2点同時のインダイレクトスポット溶接が検討された。片側から電極加圧するため、加圧力が過大であると溶接部が沈み込んで鋼板同士の接触面積が増大(電流密度は低下)し、熔融溶接が困難となる。また電流が高いと分流に伴う電極間局所の電流密度も上昇し、割れや爆飛に至る。

対策として、加圧力は適度に低くし、さらに鋼板に凸状の座面を設け、その部位に通電パスを限定し、低電流であっても電流密度は高め、熔融溶接を実現した。一方、閉じ断面構造の好例であるハイドロフォーム部材をフロントピラーに適用したケースでは¹⁶⁾、既存設備を用いて溶接条件、アース電極の位置および打点順序を最適化し、安定した溶接品質を確保している。新日本製鐵においても、中空の部材と板状部材のインダイレクトスポット溶接技術の開発に取り組んだ。中空部材の板厚が1.6mm、板状部材の板厚が0.7mmの条件において、種々検討した結果、先端形状を工夫した電極と直流電源を組合せることにより、特別な通電・加圧パターンとせずとも、板間の隙間あり、分流(既溶接点)ありの条件においても熔融溶接を実現した。

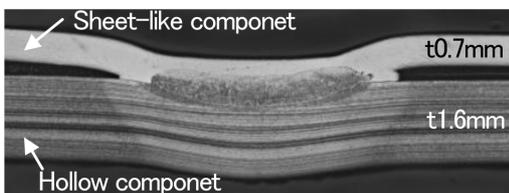


図13 中空部品と板状部材のインダイレクトスポット溶接部断面

Cross section of indirect spot weld for hollow and sheet-like components

そのときの溶接部断面例を図13に示すように、十分なサイズのナゲットが形成されたことが判る。

3. 結 言

自動車用材料として980MPa以上の高強度鋼の採用が進んでおり、同時に特性改善のために鋼板成分や組織の改善がなされている。さらには、部材の断面構造や板組・板厚比も変化しており、それぞれの条件に適したスポット溶接技術の開発が求められている。本報では各課題とその対策を紹介したが、今後も課題の本質を明らかにし、それを反映した対策技術の提示を目指したい。

参考文献

- 1) 奥田滝夫:スポット溶接入門.産報出版,1986
- 2) Euro Car Body. VW資料.2008
- 3) 及川初彦,村山元,崎山達也,高橋靖雄,石川忠:新日鉄技報.(385),36(2006)
- 4) 山崎一正,佐藤浩一,徳永良邦:溶接学会論文集.17(4),553(1999)
- 5) 西武史,斎藤亨,山田有信,高橋靖雄:自動車高張力薄鋼板のスポット溶接性評価研究.製鉄研究.(307),56(1982)
- 6) 佐久間康治,及川初彦:新日鉄技報.(378),30(2003)
- 7) 渡辺史徳,古迫誠司,浜谷秀樹,宮崎康信,野瀬哲郎:溶接学会溶接構造研究委員会,溶接構造シンポジウム2011講演論文集.2011,p.271
- 8) 三好俊郎,白鳥正樹:日本機械学会論文集(A編).47,424(1981)
- 9) 浜谷秀樹,渡辺史徳,宮崎康信,田中智仁,真木純,及川初彦,野瀬哲郎:溶接学会全国大会概要,第89集,44(2011)
- 10) 谷口公一,池田倫正,遠藤茂:溶接学会全国大会概要,第90集,240(2012)
- 11) 渡辺史徳,古迫誠司,宮崎康信,野瀬哲郎:溶接学会全国大会概要,第90集,238(2012)
- 12) 坂野律男:溶接学会誌.81(3),11(2012)
- 13) 池田倫正,沖田泰明,小野守章,安田功一,寺崎俊夫:溶接学会論文集.28(1),141(2010)
- 14) 高橋,及川:特許第4728926号
- 15) 野間一浩,加藤慎也:溶接技術.110(2004.1)
- 16) 長谷川芳春,藤田浩史,遠藤岳晴,藤本雅昭,田辺順也,吉田正樹: Honda R&D Technical Review. 20(2),106(2008.10)



古迫誠司 Seiji FURUSAKO
鉄鋼研究所 接合研究センター 主任研究員
千葉県富津市新富 20-1 〒 293-8511



渡辺史徳 Fuminori WATANABE
鉄鋼研究所 接合研究センター 研究員



村山 元 Gen MURAYAMA
鉄鋼研究所 接合研究センター 主任研究員



濱谷秀樹 Hideki HAMATANI
名古屋技術研究部 主幹研究員
工博



及川初彦 Hatsuhiko OIKAWA
鉄鋼研究所 接合研究センター 主幹研究員
工博



高橋靖雄 Yasuo TAKAHASHI
鉄鋼研究所 接合研究センター 主任研究員
工博



野瀬哲郎 Tetsuro NOSE
鉄鋼研究所 接合研究センター所長
工博