

高張力薄鋼板の継手特性向上を実現する 抵抗スポット溶接技術

Development of Next Generation Resistance Spot Welding Technologies Improving the Weld Properties of Advanced High Strength Steel Sheets

谷口 公一 TANIGUCHI Koichi JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部 主任研究員 (副課長)
沖田 泰明 OKITA Yasuaki JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部 主任研究員 (課長)
池田 倫正 IKEDA Rinsei JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部 主任研究員 (部長)・博士 (工学)

要旨

車体への高張力薄鋼板適用に際して、高い衝突安全性を実現するためには、組立溶接法として最も多く利用されている抵抗スポット溶接技術による継手特性向上が重要である。パルススポット[®]溶接は、溶接通電パターンに短時間高電流通電を活用し、短いタクトタイムで超高張力薄鋼板の溶接継手強度向上を実現した。インテリジェントスポット[®]溶接は、溶接中に加圧力および溶接電流を変化させることで、高張力薄鋼板の適用とともに増加する高板厚比三枚重ね溶接を容易にした。

Abstract:

The new technologies of resistance spot welding, which has been widely used for auto body production, are significant to realize the high collision safety of car body. Pulse Spot[®] welding, utilizing the high current conduction with short periods in the weld current pattern can enhance the weld joint strength of high strength steel sheets without extending the weld time. Intelligent Spot[®] welding, varying the force and welding current during welding, enables to mitigate the limitation of the three sheets lap welding which is more frequently performed with increased application of high strength steels.

1. はじめに

自動車の環境負荷低減を目的とした車体軽量化が進められる中、乗客安全性向上との両立を実現するため、自動車車体に対する各種高機能高張力薄鋼板の適用が検討されている。車体の組立工程においては、これらの鋼板をより有効に活用するための溶接技術が重要になっている。そこで、JFE スチールでは各種の高機能高張力薄鋼板を提供するとともに、車体組立用の溶接技術についても積極的な研究開発を進め、各種高張力薄鋼板の自動車車体への適用を目指している。自動車車体の組立溶接には、抵抗溶接、アーク溶接およびレーザ溶接などが主に用いられているが、最も多く使用される溶接法は抵抗スポット溶接であり、高い施工性を有することから今後も重要な溶接技術として位置付けられている。

本報では、JFE スチールが開発した車体組立用抵抗スポット溶接技術として、今後の高張力薄鋼板のさらなる適用拡大に寄与すると期待されるパルススポット[®]溶接技術¹⁻⁵⁾、インテリジェントスポット[®]溶接技術⁶⁻⁸⁾について報告する。

2. パルススポット[®]溶接技術

2.1 高張力薄鋼板の溶接における課題

車体の衝突安全性を向上させる上では、抵抗スポット溶接継手の破断強度の確保が不可欠であるが、高張力薄鋼板においては、はく離方向の破断強度である十字引張強さ (Cross tension strength, CTS) が低下する懸念が指摘されている。図 1 に板厚 1.6 mm の引張強さ 590~1 180 MPa 級薄鋼板の二枚重ね継手の、ナゲット径 5 mm における引張せん断強さ (Tension shear strength, TSS)、十字引張強さおよび破断形態を示す。引張せん断強さは鋼板引張強さの増加とともに増加する傾向にあるが、十字引張強さは 980 MPa を超えると逆に低下する傾向にある。また、十字引張試験において、980 MPa 級以下の鋼板は母材または熱影響部で延性的に破断するプラグ破断であるのに対し、980 MPa 級を超える鋼板ではナゲット (溶融凝固部) で脆性的に破断する界面破断を示し、継手強度を低下させている。

高張力鋼板での界面破断の要因としては、十字引張試験時のナゲット端部での応力集中、およびナゲットの C、P による靱性低下が指摘されており⁹⁻¹¹⁾、十字引張強さの劣化を解決する方法としてテンパー通電法が提案されている¹²⁾。抵抗スポット溶接によって得られるナゲットは硬いマルテン

2014 年 2 月 15 日受付

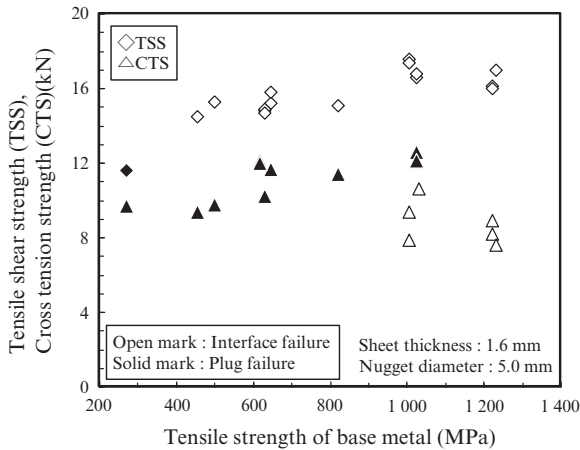


図1 母材強度に対する抵抗スポット溶接継手強度および破断形態 (ナゲット径: $4\sqrt{t}$)

Fig. 1 Weld joint strength and failure mode of resistance spot weld in each tensile strength of base metal

サイト組織となるが、得られたナゲットに後通电（テンパー通电）を付与することでマルテンサイト組織を焼もどするという方法である。しかし、テンパー通电法では、ナゲットが軟化するために継手の引張せん断強さが低下すること、十分な焼もどし効果を得るためには後通电前の冷却時間が1s程度必要になること、加えて、ナゲット径が小さくなるとテンパー電流で再熔融が生じるため焼もどし効果が得られないという施工性の課題があった。

そこで、JFE スチールではテンパー通电法よりも短時間で抵抗スポット溶接継手の十字引張強さを向上させ、かつ引張せん断強さの低下が生じない溶接法として、短時間・高電流通電の発熱を活用した抵抗スポット溶接技術「パルススポット®溶接」¹⁻⁵⁾を開発した。

2.2 短時間・高電流通電における溶接部の発熱形態

短時間・高電流通電による溶接部の発熱形態を、板厚1.6mmの1180MPa級高張力鋼板の二枚重ね板組みの数値シミュレーションにより検討した。数値シミュレーションソフトウェアはSwantec Software and Engineering ApSのSORPAS®を用いた。計算ではナゲットを形成する本通电、無通电状態で加圧保持する冷却、ナゲットを再加熱する後通电について解析した。溶接条件は、本通电電流6kA、本通电時間16cycles/50Hz、冷却時間100cycles/50Hz、後通电電流20kA、後通电時間1cycle/50Hz、電極加圧力4.41kNとした。

図2に、温度分布および電流密度の解析結果を示す。本通电終了直後では、ナゲット部で最も温度が高く、電流密度は溶接部においてはほぼ均一な状態である。これに対し、十分に冷却した後に20kA、1cycleの後通电直後では、ナゲットよりもナゲット周辺の電極近傍部が高温に加熱されてお

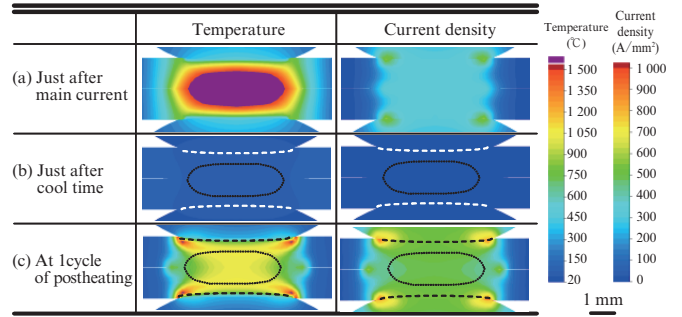


図2 高電流短時間通电による温度分布変化と電流密度分布変化⁵⁾

Fig. 2 Temperature distribution and current density distribution by short-time high-current post-heating⁵⁾

り、電流密度分布も電極接触部近傍で最も高くなった。1 cycleの通电では水冷電極による溶接部冷却効果が発現しにくい状態であり、かつ、極めて高い電流を流したことにより電極近傍で集中的な発熱が生じたものと考えられる。

2.3 パルススポット®溶接による継手強度向上機構

2.2節で述べた短時間・高電流通電によるナゲット周辺での優先的発熱現象を活用して、テンパー通电よりも短い時間で継手強度向上を可能とする抵抗スポット溶接技術「パルススポット®溶接」を開発した。図3にパルススポット®溶接の溶接電流パターンを示す。ナゲットを形成する本通电の後に、冷却と短時間・高電流のパルス通电を2回繰り返す溶接電流パターンとすることで、本通电で得られたナゲットを効率的に短時間再加熱することを可能にしている。

パルススポット®溶接の効果を板厚1.6mmの1180MPa級高張力鋼板の二枚重ね溶接で検討した。溶接条件は、本通电を電流5.5kA、通电時間14cycles、パルス通电を電流9kA、通电時間3cycles、冷却時間8cyclesとし、加圧力は3.5kNとした。写真1に、従来溶接（本通电のみ）とパルススポット®溶接によって得られた溶接部断面マクロ組織を示す。エッチングはピクリン酸飽和水溶液である。パルススポット®溶接では従来溶接では現れないエッチングの濃淡

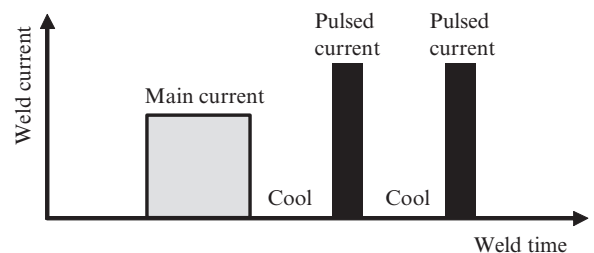


図3 パルススポット®溶接の溶接電流パターン

Fig. 3 Weld current pattern of Pulse Spot® Welding

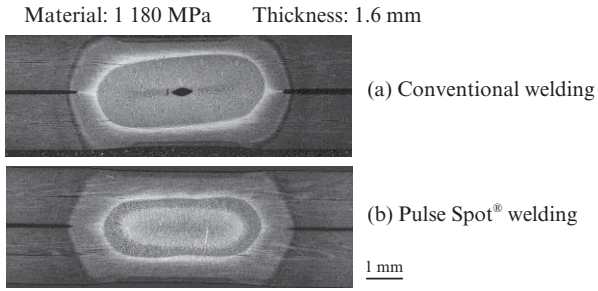


写真 1 溶接部の断面マクロ組織⁵⁾
Photo 1 Cross-sectional microstructures⁵⁾

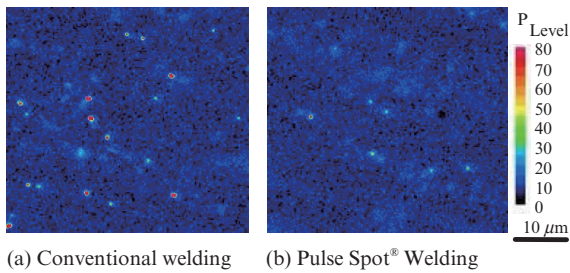


図 4 ナゲット端部における P 分布⁵⁾

Fig. 4 Distribution of phosphorous at the edge of the nugget⁵⁾

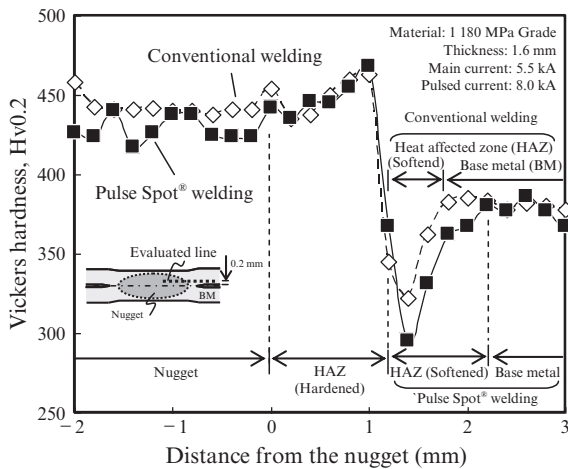


図 5 溶接継手の硬さ分布の比較

Fig. 5 Comparison of hardness distribution of weld joints

によるリング模様が観察された。

図 4 に、P の偏析状態を確認するために実施した EPMA (電子線マイクロアナリシス) マッピングの結果を示す。パルススポット® 溶接では従来溶接の場合と比較して P 偏析が軽減されており、この差異がエッチング状態の濃淡差を生じさせたと考えられる。パルススポット® 溶接では、パルス通電時の再加熱によってナゲット内の P が拡散したためと推定される。

次に、溶接部の硬さ分布の比較を図 5 に示す。両溶接方法とも同様な硬さ分布を示しているが、パルススポット® 溶

接では、従来溶接と比較して、母材マルテンサイト組織の焼もどしによって生じる溶接熱影響部での軟化領域が拡大する傾向が確認された。パルススポット® 溶接では、溶接熱影響部が加熱されやすい状態にあったと考えられる。一方、ナゲット硬さはほとんど低下しないことも確認された。

以上の結果より、パルススポット® 溶接では、(1) ナゲットの P 偏析軽減によるナゲット靱性向上、(2) 熱影響域拡大によるナゲット端部での応力集中緩和の二つの効果による継手強度向上が期待された。

2.4 パルススポット® 溶接による継手強度向上

パルススポット® 溶接による継手強度向上の効果を、板厚 1.6 mm の 1 180 MPa 級高張力鋼板の二枚重ね溶接継手にて評価した。図 6 に、パルス電流と十字引張強さの関係を示す。パルス電流値以外の溶接条件は前項と同様とした。従来溶接の継手強度 7 kN に対し、パルススポット® 溶接ではパルス電流 8 kA で継手強度 12 kN を示しており、顕著な継手強度向上効果が確認された。さらに、パルス電流 7 kA から 9 kA の幅広い範囲で継手強度は向上しており、溶接施工性も良好であることが確認された。

写真 2 にパルス電流 8 kA における十字引張試験後の破断状態を示す。従来溶接ではナゲット内にき裂が進展して破断していたが、パルススポット® 溶接ではナゲット内にはき裂が進展しておらず、良好なプラグ破断形態を示していた。ナゲット靱性向上およびナゲット端部での応力集中緩和の効果により、継手強度が大幅に向上したのと考えられる。

図 7 は、図 1 で継手強度を評価した板厚 1.6 mm の 980~1 180 MPa 級鋼板に対してパルススポット® 溶接を実施し、その破断強度を従来溶接と比較したものである。従来溶接では継手強度が低下した材料においても、パルススポット® 溶接により十字引張強さは向上することが示された。また、

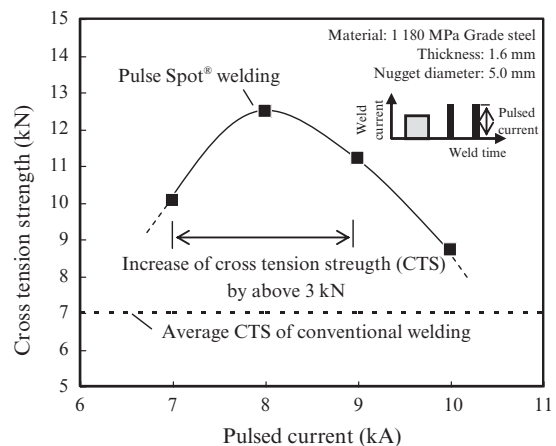


図 6 パルススポット® 溶接による十字引張強さの向上およびパルス電流範囲

Fig. 6 Increase of cross tension strength by Pulse Spot® welding and the effective conditions of pulsed current

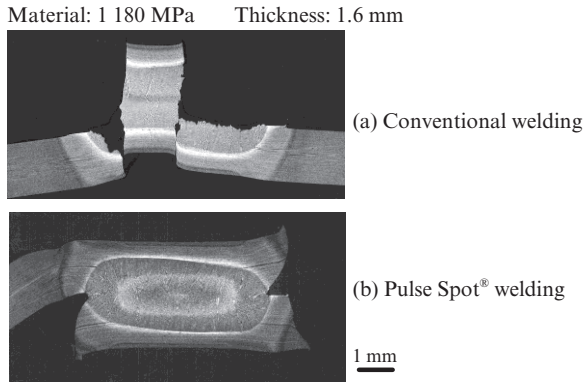


写真2 十字引張試験破断後の断面マクロ⁵⁾

Photo 2 Cross-sectional microstructures of fractured specimen after cross tension test⁵⁾

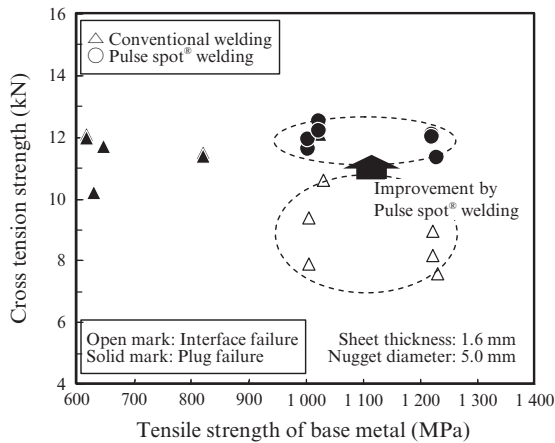


図7 パルススポット[®]溶接によるハイテンの十字引張強さの向上

Fig. 7 Increase of cross tension strength of advanced high strength steel sheets by Pulse Spot[®] welding

従来溶接では界面破断になっていた場合でも、プラグ破断に変化することが示された。

2.5 パルススポット[®]溶接の展開

パルススポット[®]溶接は、溶接継手強度の向上および破断形態の向上を可能とする技術である。さらに、従来の継手強度向上手法であったテンパー通電と比較して溶接時間を短縮でき、適正パルス電流範囲も広いことから施工性に優れた抵抗スポット溶接技術であるといえる。

本技術は、自動車車体の溶接組立ラインでの適用に向け、既に自動車会社との検討を開始しており高い評価を得ている。今後、車体軽量化に向けて高張力薄鋼板の適用拡大を考える上で、非常に有効な溶接技術になるものと期待される。

3. インテリジェントスポット[®]溶接技術

2章においては、高張力薄鋼板の抵抗スポット溶接継手の

十字引張強度を向上させる技術としてパルススポット[®]溶接技術を紹介したが、自動車車体には、高張力薄鋼板を含む多様な強度、板厚、表面処理状態の鋼板が用いられるため、溶接板組みは非常に多くの組合せとなり、その抵抗スポット溶接施工条件の設定には十分な配慮が必要となる。たとえば、センターピラーでは、外板（板厚 0.8 mm 以下の軟質鋼板、以後薄板と表記）、補強部材（板厚 1.0 mm 以上の高張力薄鋼板、以後厚板と表記）および内板（厚板）のような、板厚比（板組みの総板厚 / 板組みの中で外側に配置された薄板の板厚）の大きな三枚重ね板組みを溶接する必要がある。高板厚比の板組みの抵抗スポット溶接では、薄板-厚板間での熔融部形成が困難となり、一般的には板厚比は 4~5 以下に制限されている。

JFE スチールではこの問題を解決し、板厚比制限を緩和できる新しい抵抗スポット溶接技術として「インテリジェントスポット[®]溶接技術」⁶⁻⁸⁾を開発した。

3.1 溶接メカニズム

インテリジェントスポット[®]溶接技術は、溶接中の加圧力および溶接電流を多段制御することにより発熱位置を制御し、高板厚比の板組みの抵抗スポット溶接を可能とした技術である。本技術の加圧力・電流パターン、および熔融部形成過程を図8に模式的に示す。溶接過程は二段階に分割され、一段目は、低加圧力・短時間通電・高電流とすることで薄板-厚板間を十分に発熱させ、二段目に高加圧力・長時間通電とすることで、薄板-厚板間および厚板-厚板間のそれぞれに必要な径のナゲットを形成させるプロセスである。

一段目においては、十分に加圧力を低く設定した上で、

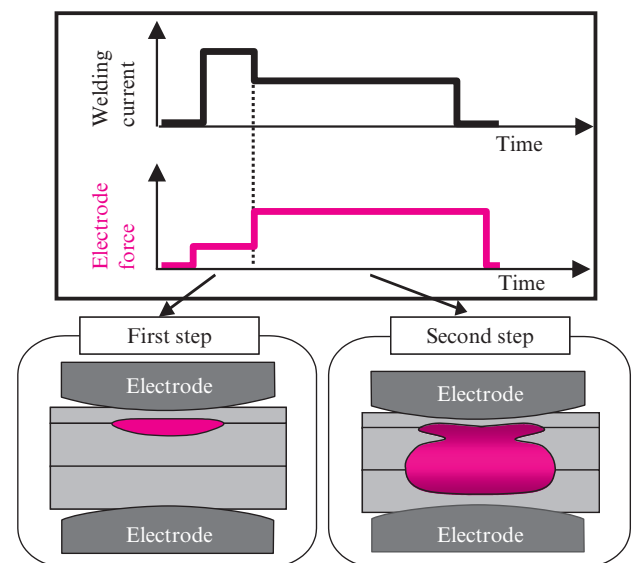


図8 インテリジェントスポット[®]溶接プロセス模式図

Fig. 8 Schematic illustration of Intelligent Spot[®] welding process for three-sheet-joint with higher sheet thickness ratio

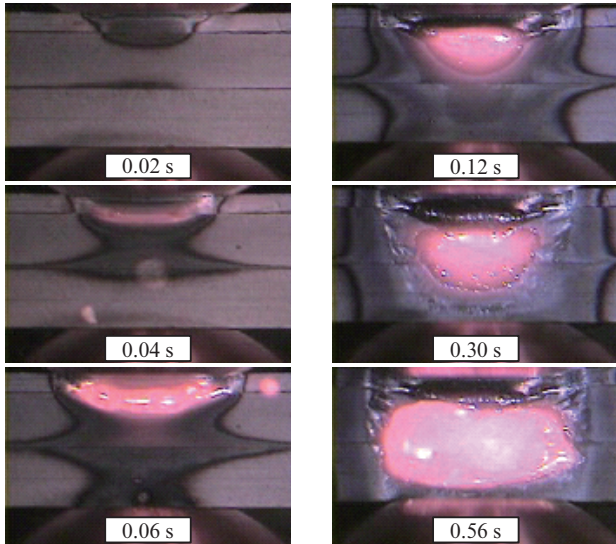
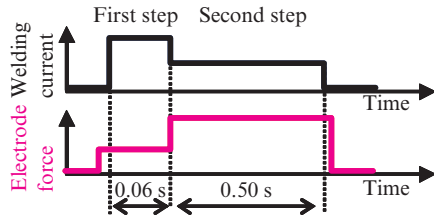


写真3 高速度ビデオにより観察したインテリジェントスポット®溶接ナゲット形成過程

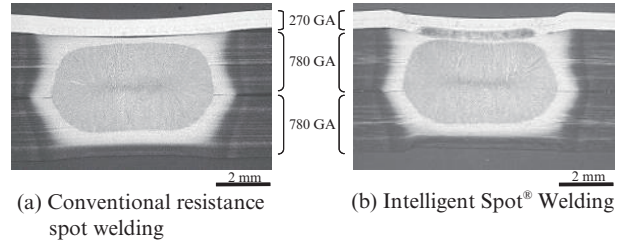
Photo. 3 Nugget formation process in Intelligent Spot® welding observed by high speed video camera

短時間・高電流の溶接条件とすることにより、薄板-厚板間における発熱・膨張を生じさせ、薄板-厚板間での板の浮き上がり、シートセパレーションを発生させる。薄板-厚板間では接触径が減少するため、電流密度は増加し、結果として、薄板-厚板間における発熱が促進される。その後、加圧力を増加させた二段目においては、薄板-厚板間の通電面積が拡大し、電流密度は減少するため、抵抗発熱と電極冷却の熱バランスにより厚板-厚板間で溶融部が形成される。以上のメカニズムにより、本溶接技術を用いることによって、高板厚比の板組においても各鋼板間に必要なナゲット径を得ることが可能となる。

写真3は板厚0.7 mmの270 MPa級合金化溶融亜鉛めっき鋼板(270GA)、および板厚2.3 mmの780 MPa級合金化溶融亜鉛めっき鋼板(780GA)を用い、0.7 mm-2.3 mm-2.3 mmの三枚重ね板組み(板厚比7.6)の鋼板端部を溶接し、本プロセスのナゲット形成過程を高速度ビデオカメラにて直接観察した結果である。低加圧力の一段目では薄板-厚板間における発熱が促進され、加圧力を増加させた二段目では、厚板-厚板間にて溶融部が形成される様子が明瞭に観察される。

3.2 高板厚比板組の溶接への適用

上記板組み(270GA:0.7 mm-780GA:2.3 mm-780GA:2.3 mm)の場合における、従来の抵抗スポット溶接とインテリジェン



270GA: 270 MPa Grade galvanized steel sheet
780GA: 780 MPa Grade galvanized steel sheet

写真4 高板厚比三枚重ね抵抗スポット溶接部の断面の比較⁷⁾
Photo. 4 Comparison of cross section macros of three sheets joint with high sheet thickness ratio⁷⁾

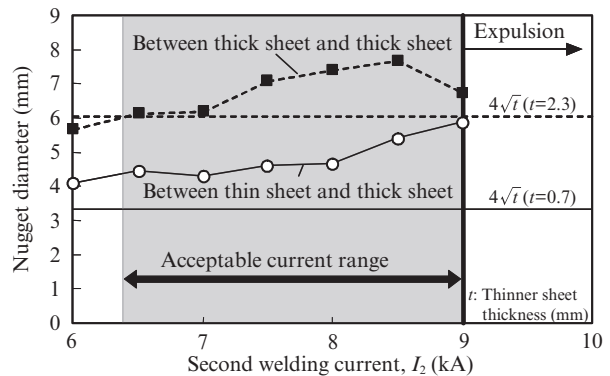


図9 インテリジェントスポット®溶接の適正電流範囲

Fig. 9 Acceptable current range of Intelligent Spot® welding

トスポット®溶接の溶接部断面マクロを**写真4**に示す。いずれも厚板-厚板間ナゲット径が、 $4\sqrt{t}$ (t :板厚)となる溶接条件での断面であるが、薄板-厚板間でのナゲット形成はインテリジェントスポット®溶接の場合のみ確認できる。

さらに、この板組みにおける本溶接技術の適正電流範囲を調査した結果を**図9**に示す。従来の抵抗スポット溶接では、スパッタを発生させずに薄板-厚板間に $4\sqrt{t}$ のナゲット径を得るのは困難な板組みであるが、本溶接技術を用いることで約2.5 kAの広い適正電流範囲が得られた。

次に、上述の三枚重ね板組みに、さらに、板厚2.3 mmの780 MPa級合金化溶融亜鉛めっき鋼板を加えて四枚重ね板組みとした場合の溶接事例について紹介する。この場合の板厚比は10.9である。**写真5**に溶接部断面マクロを示す。(a)は加圧力一定溶接の場合、(b)はインテリジェントスポット®溶接の場合である。(a)では、溶接電流を厚板-厚板間で散りが発生する電流にまで増加させたにもかかわらず、薄板-厚板間にはナゲットが形成されていない。一方、(b)のインテリジェントスポット®溶接では、三枚重ねの場合と同様、薄板-厚板間にも溶接部が形成されていることが確認できる。

なお、四枚重ね溶接の実用化においては、鋼板間の重ねギャップ量の制御、厚板側でのナゲット確保のための高加圧力溶接機の適用など、溶接施工上あるいは設備上の課題

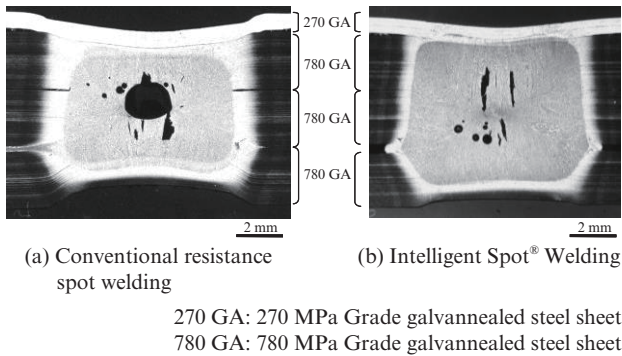


写真5 高板厚比四枚重ね抵抗スポット溶接部の断面の比較⁸⁾

Photo. 5 Comparison of cross section macros of four sheets joint with high sheet thickness ratio⁸⁾

についての検討が必要であると考えている。

3.3 インテリジェントスポット® 溶接の効果

高板厚比板組みにおける薄板-厚板間のナゲット形成の問題から、自動車メーカーでは三枚重ね溶接において板厚比を4~5程度に制限したり、千鳥加工して二枚ずつ溶接するなどの対策をとっており、生産性や設計自由度が犠牲にされる場合があった。また、制限範囲内ではあっても、高板厚比板組みの薄板-厚板間のナゲット径を確保するために、過大な溶接電流設定となりやすく、発生したスパッタは車体に付着し、その拭き取り工数が増加する問題もあった。

インテリジェントスポット® 溶接を適用することにより、現在未適用の板厚比が高い板組みでも溶接が可能となり、板厚比制限の緩和が可能で、千鳥加工の工数削減や設計自由度向上が期待される。また、板厚比制限範囲内の板組みの溶接においても薄板-厚板間のナゲット径を確保するための過大な電流設定が不要となるためスパッタの発生を低減することが可能であり、低スパッタ化技術としても期待される。

さらに、本技術は厚板-厚板間に必要な径のナゲットを形成する二段目の通電後の条件に制約はなく、パルススポット® 溶接技術との併用も可能である。インテリジェントスポット® 溶接とパルススポット® 溶接を併用することにより、センターピラーなどの構造部材における超高張力薄鋼板を含む高板厚比三枚重ねの溶接において、各鋼板間に必要なナゲット径を確保するとともに、高張力薄鋼板溶接部の継手引張強さを向上させることも可能といえる。

3.4 インテリジェントスポット® 溶接適用事例

本技術は、自動車メーカーとの共同研究開発の中で、車

体組立ライン適用時の各種外乱などの影響を考慮した検討も実施し、すでに実適用が開始されている。たとえば、高板厚比となるセンターピラー部に適用されており、スパッタ低減にも効果があることが確認されている。

4. おわりに

自動車車体に対して、各種の高機能高張力薄鋼板を有効に活用するためには、鋼板材質の高性能化とともに、プレス技術、溶接技術などの工法開発が重要である。本報告では、これらの中で、継手強度および施工性向上を実現する新スポット溶接技術の開発事例を紹介した。今後は、これらの溶接技術の実適用を推進し、高張力薄鋼板の適用拡大による車体軽量化による環境性能向上および衝突安全性向上に貢献していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 谷口公一, 沖田泰明, 池田倫正, 遠藤茂. 溶接学会全国大会講演概要集. 2010, 第87集, p. 96-97.
- 2) 谷口公一, 貞末照輝, 伊木聡, 池田倫正, 遠藤茂. 溶接学会全国大会講演概要集. 2011, 第89集, p. 4-5.
- 3) 澤西央海, 小椋智, 廣瀬明夫, 谷口公一, 池田倫正, 遠藤茂, 安田功一. 溶接学会全国大会講演概要集. 2011, 第89集, p. 8-9.
- 4) 谷口公一, 池田倫正, 大井健次. 溶接学会全国大会講演概要集. 2012, 第90集, p. 240-241.
- 5) 谷口公一, 澤西央海, 池田倫正, 小椋智, 広瀬明夫. まてりあ. 2014, vol. 53, no. 2, p. 63-65.
- 6) 沖田泰明, 池田倫正, 小野守章, 安田功一. 溶接学会全国大会講演概要. 2006, no. 78, p. 164-167.
- 7) 池田倫正, 沖田泰明, 小野守章, 安田功一. まてりあ. 2009, vol. 48, no. 02, p. 76-78.
- 8) 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. 2010, vol. 28, no. 1, p. 141-148.
- 9) 田中甚吉, 樺沢真事, 小野守章, 長江守康. 日本鋼管技報. 1984, no. 105, p. 72-81.
- 10) Ferrasse, S.; Verrier, P.; Meesemaeker, F. Welding in the World. 1998, vol. 41, p. 177-195.
- 11) 西武史, 齊藤亨, 山田有信, 高橋靖雄. 製鉄研究. 1982, no. 307, p. 56-62.
- 12) たとえば, 溶接学会抵抗溶接研究委員会編. スポット溶接・下抵抗溶接現象とその応用. 1982, p. 39.



谷口 公一



沖田 泰明



池田 倫正