

高張力薄鋼板の溶接継手強度を向上させる パルススポット[®]溶接技術の開発

谷口 公一¹⁾ 澤西 央海²⁾ 池田 倫正¹⁾
小 椋 智¹⁾ 廣瀬 明夫²⁾

1. はじめに

自動車の軽量化および衝突安全性向上を両立する材料として高張力鋼板の適用，特に，引張強さ 980 MPa 以上の高張力鋼板の適用が進んでいる．車体の組立工程において，これらの鋼板を有効に活用し，適用推進していくためには，溶接技術，プレス技術などの利用加工技術が非常に重要となる．

自動車車体の組立溶接には，抵抗溶接，アーク溶接，レーザ溶接などが用いられるが，最も多く使用される抵抗スポット溶接は 1 台当たり 3000～6000 点の溶接箇所がある．一方，車体の衝突安全性を確保する上では，各種車体部材における溶接部の強度確保が性能保証の面で重要となる．したがって，車体への高張力鋼板適用を進めるためには，抵抗スポット溶接部の継手強度向上技術の開発が必須といえる．

図 1 に板厚 1.6 mm の引張強さ 590～1180 MPa 級鋼板の二枚重ね継手における引張せん断強さおよび十字引張強さを，図 2 に十字引張試験時の破断形態の一例を示す．引張せん断強さは鋼板引張強さの向上とともに増加する傾向にあるが，十字引張強さは 980 MPa 以上では逆に低下する傾向にある．また，十字引張試験において，590 MPa 級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 級以上の鋼板ではナゲット（溶接凝固部）で脆性的に破断する界面破断を示し，継手強度低下の原因となっている．

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増大，およびナゲット内での P

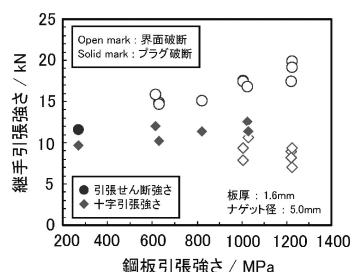


図 1 鋼板引張強さと引張せん断強さおよび十字引張強さの関係(板厚 1.6 mm)．

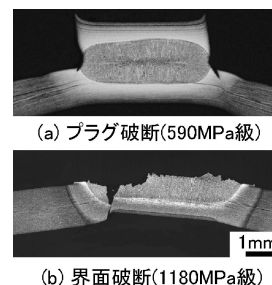


図 2 十字引張試験後の代表的な破断形態．

偏析の影響が指摘されており⁽¹⁾，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⁽²⁾．通常，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サイト組織となるが，得られたナゲットに後通電（テンパー通電）することでマルテンサイト組織を焼き戻しするという方法である．しかし，テンパー通電法では，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という問題があり，加えて，十分な焼き戻し効果を得るためには再通電前の冷却時間が 1 s 程度必要になること，また，ナゲット径が小さくなるとテンパー電流で再溶融が生じるため焼き戻し効果が得られないという施工性の課題もあった．

そこで，テンパー通電法よりも短時間で高張力鋼板の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」^{(3)–(6)}を開発した．以下，本開発技術について紹介する．

2. パルススポット溶接の溶接プロセス

(1) 短時間・高電流通電における溶接部の発熱形態

板厚 1.6 mm の 1180 MPa 級高張力鋼板の二枚重ね板組みについて，図 3 に示すような溶接電流パターンを加えた場合

* JFE スチール株式会社 スチール研究所 接合・強度研究部：

1) 主任研究員 2) 研究員

** 大阪大学 大学院工学研究科：

1) 助教 2) 教授

Development of Resistance Spot Welding Process to Improve Joint Strength of High Strength Steel Sheets Using High Short Current “Pulse Spot Welding”; Koichi Taniguchi*, Chikaumi Sawanishi*, Rinsei Ikeda*, Tomo Ogura**, Akio Hirose** (*JFE Steel Corporation. **Osaka University)

2013年10月31日受理[doi:10.2320/materia.53.63]

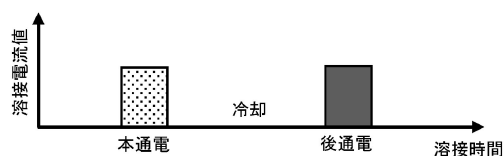


図3 テンパー通電の溶接電流パターン。

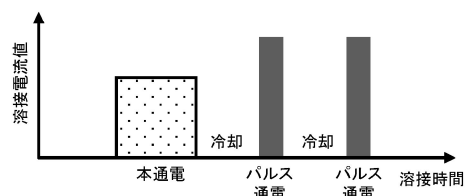


図6 パルススポット溶接の溶接電流パターン。

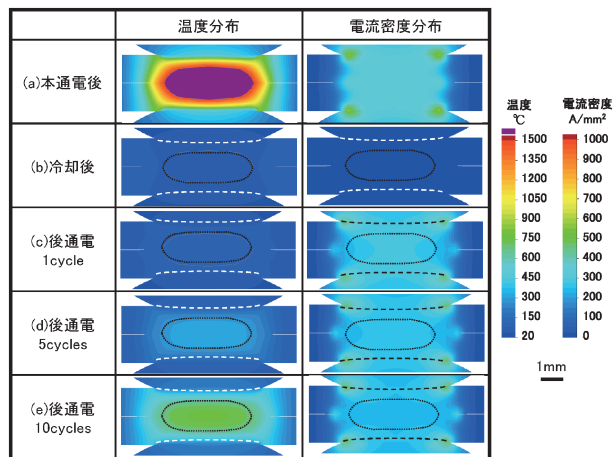


図4 後通電電流が6 kA の場合の溶接中の温度分布および電流密度分布(本通電電流：6 kA)。

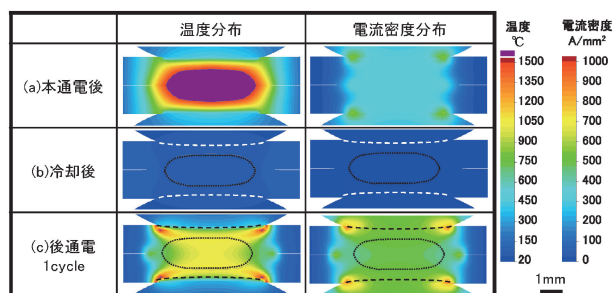


図5 後通電電流が20 kA の場合の溶接中の温度分布および電流密度分布(本通電電流：20 kA)。

の数値シミュレーションを行った。図中に示す各名称はナゲットを形成する本通電，無通電状態で加圧保持する冷却，ナゲットを再加熱する後通電である。溶接条件は，本通電電流6 kA，本通電時間16 cycles/50 Hz，冷却時間100 cycles/50 Hz，電極による加圧力4.41 kNとした。図4に，後通電電流6 kA の場合の本通電後の溶接中温度分布および電流密度分布の変化を示す。通電によって生じる抵抗発熱と電極および鋼板への伝熱による冷却効果のバランスにより，ナゲット部分が徐々に再加熱され，通電時間10 cycles ではナゲット部分が焼き戻し温度に達していることが確認できる。しかし，後通電を20 kA とした図5 の場合には，1 cycle 通電時にナゲットよりもナゲット周辺の電極近傍が高温に再加熱される結果となった。後通電電流6 kA の電流密度分布が比較的均一であるのに対し，20 kA の場合には電極接触部近傍で高く，かつ1 cycle 通電では電極による溶接部の冷却効果が作用し難い状態であるため，電極近傍がより加熱されたものと考えられる。

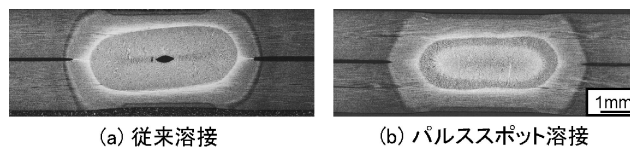


図7 従来溶接とパルススポット溶接の断面マクロ組織。

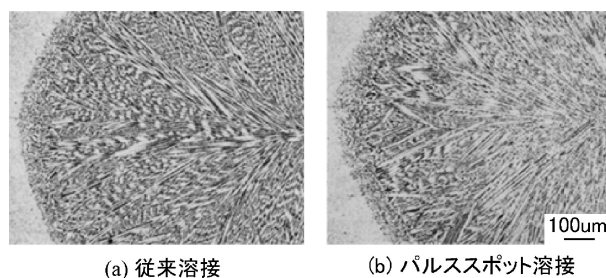


図8 ナゲット端部のミクロ組織。

(2) 新溶接プロセスによる継手強度向上機構

上述した短時間・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，テンパー通電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6に新溶接プロセスの溶接電流パターンを示す。ナゲットを形成する本通電の後に，冷却と短時間・高電流のパルス通電を2回繰り返す溶接電流パターンとすることで，本通電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1.6 mmの1180 MPa級高張力鋼板の二枚重ね溶接で検討した。溶接条件は，本通電を電流5.5 kA，通電時間14 cycles，パルス通電を電流9 kA，通電時間3 cycles，冷却時間8 cyclesとし，加圧力は3.5 kNとした。図7に，従来溶接(本通電のみ)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によるリング模様が観察されており，図8に示すナゲット端部におけるミクロ組織においてもその状態は確認された。

図9に，Pの偏析状態を確認するために実施したEPMA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，溶接部の硬さ分布を比較した結果を図10に示す。両

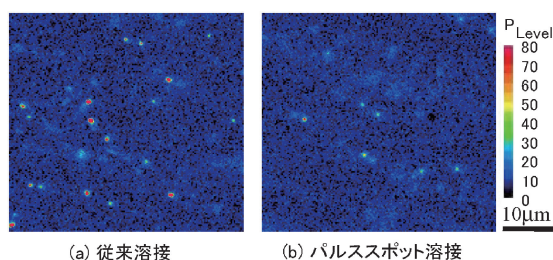


図9 ナゲット端部でのPのEPMAマッピング結果.

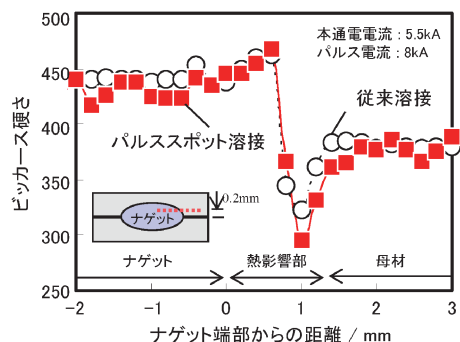


図10 従来溶接とパルススポット溶接の溶接部硬さ分布.

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き戻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易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。

3. 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1180 MPa級高張力鋼板の二枚重ね溶接継手にて評価した。図11に、パルス電流と継手十字引張強さの関係を示す。パルス電流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。

また、図12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ものと考えられる。

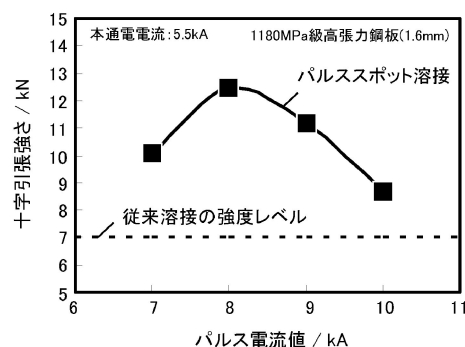


図11 パルススポット溶接における継手十字引張強さ.

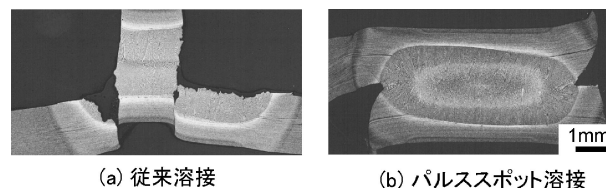


図12 十字引張試験後の溶接部の破断状態.

4. 実績と将来性

パルススポット溶接は、従来溶接に対して溶接継手強度の向上および破断形態の向上を可能とし、さらに、従来の継手強度向上対策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が広い施工性に優れた抵抗スポット溶接技術である。

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。

5. 工業所有権

本開発技術に関しては、基本特許として特許第5201116号を取得し、関連特許として10件を出願している。

文 献

- (1) 西 武史, 斉藤 亨, 山田有信, 高橋靖雄: 製鉄研究, 第307号, (1982), 56-62.
- (2) 例えば, 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), 39など.
- (3) 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, 第87集, (2010), 96-97.
- (4) 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, 第89集, (2011), 4-5.
- (5) 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, 第89集, (2011), 8-9.
- (6) 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, 第90集, (2012), 240-241.