# 自動車用超高強度鋼板の接合組立技術—スポット溶接—

# Assembly Technology of Welding and Joining for Ultra-high Strength Steel Sheet for Automobiles —Spot Welding—

古 迫 誠 司*	松 井   翔	銭 谷   佑	若林千智
Seiji FURUSAKO	Sho MATSUI	<i>Tasuku ZENIYA</i>	Chisato WAKABAYASHI
岡田 徹	嶋 田 直 明	富士本 博 紀	
Tohru OKADA	Naoaki SHIMADA	<i>Hiroki FUJIMOTO</i>	

抄 録

自動車にはますます高い衝突安全性と燃費効率が要求されている。これに応えるため高強度鋼板の適 用が拡大しており、同時に高強度鋼板のさらなる高強度化が望まれている。こうした高強度鋼板の適用拡 大に向け、溶接部の強度信頼性を確保することが必須である。そこで抵抗スポット溶接を中心に、高強度 鋼板の溶接強度向上を検討した研究の成果をまとめた。抵抗スポット溶接継手の剥離強度は溶接部のじ ん性に支配される。剥離強度の改善に対し、溶接部の凝固偏析の緩和とマルテンサイトの焼戻しが有効 である。また溶接部破断を抑制してハット形部材の曲げ特性を向上する手法として、このマルテンサイト 焼戻しを実現するスポット溶接の後通電、アークスポット溶接の利用、そしてスポット溶接とレーザ溶接 の併用について述べた。構造と溶接技術の観点から部材の曲げ特性を向上する手段として、稜線(曲げ R 部)にスポット溶接部を配置する新たなパッチワーク・テーラードブランク技術にも言及した。その他、 スポット溶接部に発生する LME (Liquid Metal Embrittlement)割れを電極形状の工夫により防止した例 や、EJOWELD®を活用した異材接合技術の開発についても示した。

#### Abstract

Ever higher collision safety and fuel efficiency are required for automobiles. In response to this, the application of high strength steel sheets is expanding, and at the same time, further strengthening of high strength steel sheets is desired. In order to expand the application of such a high strength steel sheet, it is essential to ensure its strength reliability of weld. Therefore, the results of research which examined improvement of welding strength of high strength steel sheet, mainly resistance spot welding, are summarized. Peel strength of the resistance spot welded joint is governed by toughness of the weld. Reducing the solidification segregation at the weld and tempering the martensite generated in the weld are effective for improving the peel strength. Post-heat to realize the martensitic tempering in the resistance spot welding, the use of arc-spot welding and the combined use of spot welding and laser welding are also described as a method to suppress the fracture of the weld and improve bending property of hat-shaped components. From the viewpoint of structure and welding technique, a new patchwork tailored blanking technique in which spot welds are placed on ridgeline (bending R portion) as a means to improve the bending characteristics of a component, is also referred to. In addition, examples in which LME (Liquid Metal Embrittlement) cracks generated in spot welds are prevented by devising electrode shapes and development of dissimilar material joining technology utilizing EJOWELD® are also shown.

#### 1. はじめに

自動車の衝突安全規制の強化と燃費改善を狙う軽量化に 応えるべく,車体に高強度鋼板の適用が急速に拡大してい る<sup>1,2)</sup>。車体に用いる高強度鋼板はプレス成形されて製品と なるため,強度に加え,優れた加工性を持つことが要求さ れる。強度と加工性は相反する特性であり,これらを両立 するため,CやMnといった元素の添加量を調整すること, さらに製造プロセスにおいて組織制御することが必要となる。一方,高強度鋼板の形状凍結性向上とプレス成形の加 工力低下を目的として,ホットスタンプ鋼板の採用も進む。 この鋼板においても,強度と焼入れ性を確保するため,同 様に C や Mn などが添加される。しかし,こうした元素の 添加は一般的に溶接性を阻害してしまう。例えば,鋼板の 強度が 780 MPaを超えると,鋼板強度の上昇に伴いスポッ ト溶接継手の十字引張強さは低下することが知られてい る<sup>3,4</sup>。溶接部の破断が起こると車体の衝突性能が不安定 になるため,種々の溶接強度改善策が提案されてきた。

本報では、高強度鋼板のスポット溶接継手強度を改善す る手法として、通電パターンの改善<sup>9</sup>について述べる。ま た高強度鋼板を用いたモデル部材の性能向上を狙い、溶接 プロセスの工夫によって溶接部破断を防止した結果も紹介 する。具体的には、スポット溶接の通電パターン改善や アークスポット溶接の活用<sup>6,7)</sup>、スポット溶接とレーザ溶接 の併用による溶接部の破断防止効果について述べる。さら に、スポット溶接時に発生する LME (Liquid Metal Embrittlement) 割れを電極先端形状の変更によって防止した検討例 と、EJOWELD<sup>®</sup>を活用したマルチマテリアル接合技術の開 発についても触れる。

#### 2. 後通電によるスポット溶接継手強度の向上

上述したように自動車用鋼板の高強度化が進んでいる。 高強化のため鋼板には C, Si, Mn といった元素が添加され ており,いずれの元素も鋼板の焼入れ性を高める。加えて スポット溶接において,鋼板は水冷却された銅電極で加圧 されて抜熱されるため,その冷却速度は非常に高い。従っ て,一般に 0.1 mass%以上の炭素を含有する高強度鋼板に おいて,スポット溶接で形成される溶接金属や隣接する熱 影響部(Heat Affected Zone: HAZ)では焼きが入る(組織は マルテンサイトとなる)。硬化した焼入れ組織のじん性は低 く,高強度鋼板のスポット溶接継手強度が低い要因となる。 鋼板の強度とスポット溶接継手強度の関係を図1に示 す。引張せん断強さ(Tensile Shear Strength:TSS)は鋼板強 度の上昇に伴い向上する。これはTSSが主に溶接部の強 度(硬さ)に支配されるためである。しかし、十字引張強さ (Cross Tension Strength:CTS)は、鋼板強度が780MPaを 超えると鋼板強度の上昇に伴い減少する。十字引張試験で は、ナゲットがき裂に囲まれた形状と捉えることができ、 またナゲット端に応力が集中するため<sup>8</sup>、その強度が溶接 部のじん性に支配されると考えられる<sup>9</sup>。スポット溶接継 手強度の基本的な改善策として、ナゲット径の拡大が挙げ られる。しかしナゲット径は、電極の先端径や溶接フラン ジ幅で上限が決まる。そこでここでは、通電パターンの工 夫によって継手強度を向上する手法について述べる。

後通電付きの通電パターンを図2に示す。通電はナゲッ トを形成する本通電とナゲットを改質する後通電に分かれ る。本通電で所定のサイズのナゲットを形成する。そして 無通電とする冷却工程を設けた後に電流や時間を変化させ て後通電を実施する。後通電の電流は本通電の電流を基準 として決定することが目安となる。従って,電流比(=後 通電電流/本通電電流)が重要な変数の1つとなる。後通







図1 TSS と CTS に及ぼす母材の引張強さの影響<sup>3)</sup> Effect of base steel strength on TSS and CTS of joints



図3 偏析緩和型後通電がナゲット端部の偏析状態に及ぼ す影響<sup>5)</sup>

Effect of post-heat for reduction of solidification segregation on segregation state at nugget edge



図4 偏析緩和型後通電の冷却時間が CTS に及ぼす影響<sup>5)</sup> Effect of cool time in post-heat for reduction of solidification segregation on CTS

電には短時間の凝固偏析緩和型,中時間のオートテンパ型, そして長時間の焼戻し(テンパ)型の3種類がある。ここ では,短時間および中時間の後通電について紹介する。

溶鋼の凝固過程において,溶質の濃度は固相よりも液相 で高くなる。この現象が凝固偏析であり,室温冷却後もこ の偏析はナゲットに残存する。特にPは局所に集合するこ とで原子間の凝集力低下を引き起こして鋼板を脆化させ<sup>10</sup>, スポット溶接においても継手強度の低下要因となる<sup>11</sup>)。偏 析緩和の後通電では,凝固直後に再び通電を行うことで偏 析した元素の拡散を促進し,ナゲットのじん性を改善す る<sup>5</sup>。この後通電では板厚に応じて 0.04~0.12s (板厚 1~ 2mm)程度の冷却時間を設ける。冷却は溶融金属の凝固を 進めるために必要である。

その後、本通電電流の90%程度の電流を0.1~0.2s 程度 流す。後通電条件が偏析緩和状態に及ぼす影響を図3に 示す。CTSが向上しなかった冷却時間0s、電流比50%の 後通電条件では、ナゲット端のPのコントラストが強い(凝 固偏析が残存した)。しかし、CTSが向上した冷却時間0.12 s、電流比90%程度の後通電条件では、同コントラストが 弱く、偏析が解消されていることが分かる。この後通電に よってスポット溶接部のじん性が向上する。その結果、図 4に示すように、後通電によってCTSが向上する。冷却時



図5 オートテンパ型後通電の時間が CTS に及ぼす影響<sup>14)</sup> Effect of time in post-heat for auto-tempering on CTS

間が増加すると電流比 90%の後通電では偏析元素に必要 な温度までナゲットが昇温されないため、CTS の向上効果 は得られない。こうした偏析緩和後通電を決定する指針に ついて検討がなされている<sup>12)</sup>。またパルス的に後通電する 手法においても偏析元素の緩和と CTS の向上が検討され ている<sup>13)</sup>。

鋼種によっては短時間の凝固偏析緩和型の後通電では CTS が向上しないことがある。こうした鋼種では後通電時 間を増大すると CTS を向上できる場合がある。その例を図 5 に示すように、CTS は後通電時間の増加に伴い向上し た<sup>14)</sup>。図の上に引張破断後の断面写真を示すように、後通 電時間の増加に伴いプラグ径 (プラグ状破断部位の径)が 増大したことが分かる。この後通電による HAZ の組織変 化を図6に示す。0.6s の後通電では多くの炭化物 (図中の 矢印)が析出していた。この現象は長めの後通電を通じて HAZ の y 粒径が増大して Ms 点が上昇し、溶接冷却中の オートテンパが促進された結果である。こうしてナゲット に加え、HAZ のじん性も改善されることで、CTS の向上に 至ったと考えられる。

#### スポット溶接通電パターン工夫およびアーク スポット溶接活用による部材曲げ特性向上

ここでは、中炭素・高強度鋼板を用いて作製した片ハッ ト形部材の曲げ試験において、溶接部破断を抑制し、部材 の衝撃吸収能を高めた結果を述べる。スポット溶接部材で は、溶接部の強度を改善するため、ナゲット径の拡大とテ ンパ後通電を試した。またスポット溶接の代替としてアー クスポット溶接でも部材を作製し、その溶接部破断に対す る抑制効果を評価した。

本実験では板厚が1.4mmで,炭素の含有量が0.44mass%の S45C 鋼を供した。供試鋼を窒素雰囲気炉の中でオース

- 69 -



図 6 後通電時間の違いによる HAZ 組織の変化<sup>14)</sup> Change of microstructure at HAZ due to difference post-heat time

テナイト化処理(1193K×300s保持)した後,取り出し,型で焼入れると同時に図7に示すハット形状に成形した。 その後,部材の強度が1180MPa級となる条件で焼鈍した。 同じ熱処理を短冊形の供試鋼に対しても実施した。そし て,ハット形部材のフランジと短冊形鋼を重ね合わせ,そ の部位を抵抗スポット(RS)溶接またはアークスポット(AS) 溶接した。RS溶接では、2枚の鋼板重ね面のナゲット径が  $3.0\sqrt{t}$ (3.5mm)(t:板厚)または $5.0\sqrt{t}$ (5.9mm)となるよう 溶接条件を調整した。溶接のピッチは40mmとした。ナ ゲット径が $5.0\sqrt{t}$ の場合,ナゲット形成後にテンパを狙っ た後通電を実施し,ナゲットの焼戻しが部材の衝撃吸収特 性に及ぼす影響も評価した。

AS 溶接では溶接機として CMT (Cold Metal Transfer) 電 源を用いた。安定した溶込みを得るため、ハット形状成形 材のフランジの溶接部位には溶接前に直径 4 mm の穴をあ けた。溶接には直径が 1.2 mm,強度クラスが 490 MPa 級の 溶接ワイヤを用いた。ワイヤの供給量と入熱を変化させて、 鋼板重ね面における溶接金属の直径を造り分けた。溶接 ピッチは RS 溶接と同様 40 mm とした。

RS 溶接部とAS 溶接部の数条件を選定し,溶接部の断 面観察と硬さ分布測定を行った。硬さは,上側鋼板の重ね 面側表面から0.2mm離れた位置において,測定荷重9.8N, 測定ピッチ0.2mmで測定した。作製した部材に対し動的 な三点曲げ試験を実施した。半径が30mmで間隔が700



図7 ハット形部材の模式図 Schematic of hat-shaped component

mmの2つの支持ロールの上に部材を配置した。そして部 材を上部に設置された半径50mmのインパクターに速度2 m/sで衝突させた。荷重はインパクターの上に設置された ロードセルで測定した。本試験において、部材は短冊形鋼 板を上側に配置してインパクターに衝突させた。

ナゲット径 5.0√f の RS 溶接部断面を図 8(a)に示す。母 材には焼戻しマルテンサイトが観察された。この組織は上 述した焼入れと焼戻しの熱処理を受けて生成した。ナゲッ トや隣接する HAZ にはマルテンサイトが生成した。溶接 金属径 5.3√f の AS 溶接部断面を図 8(b)に示す。AS 溶接 の場合,貫通溶接となり,溶接部の表裏面に余盛が形成さ れた。AS 溶接部の溶接金属の主相はフェライトであり, 残りの多くはパーライトが占めた。このように AS の溶接 金属に軟質な組織が形成されるのは,母材と溶接ワイヤの 成分が混合し(例えば炭素量は低下する),かつ冷却速度 が RS 溶接に比較し低いためである。また HAZ にはマル テンサイトに加え,フェライトやパーライトも観察された。

溶接部のビッカース硬さ分布を図9に比較する。RS 溶 接部のナゲットのビッカース硬さはHV700に達した。一 方,ナゲット形成後にテンパ通電を実施した RS 溶接部で は,ナゲット端部や HAZ の硬さが HV400 まで低下してい た。一方,AS 溶接部の溶接金属硬さは HV250 と,RS 溶 接部のそれよりも低かった。また HAZ の最高硬さも同様 にAS 溶接部の方が低く,これは上述したように軟質な組 織が生成したためである。

三点曲げ試験で得られたインパクターの変位(部材押し 込み量)と荷重の関係を図10に示す。RS 溶接部材では、



(a) Resistance spot weld

(b) Arc spot weld

図 8 溶接部断面 Cross section of welds ナゲット径の増加に伴い荷重レベルが増加したことが分か る。またテンパ通電を行った  $5.0\sqrt{t}$  条件の荷重は他条件の 荷重よりも高かった。図 10 には、AS 溶接された部材の変 位 - 荷重の関係も示す。AS 溶接部材の荷重が、ナゲット 径  $5.0\sqrt{t}$  の RS 溶接部材のそれよりも全変位範囲で高かっ たことが分かる。また AS 溶接部材の荷重は、 $5.0\sqrt{t}$ でテン パ通電ありの RS 溶接部材の荷重に対しては変位 25 mm 以 下の範囲で高かった。

ここで荷重を変位 0~100mm の範囲で積分した値を吸 収エネルギー (AE) として定義する。全条件の AE を図 11 に比較する。両溶接部材の AE が溶接径の増加に伴い上昇 したことが分かる。またナゲット径 5.0  $\sqrt{t}$  の RS 溶接部材 の AE は、テンパ通電によって 26%向上した。溶接金属径 がほぼ同等の条件 (RS 溶接が 5.0  $\sqrt{t}$ , AS 溶接が 5.3  $\sqrt{t}$ ) で



図 9 溶接部硬さ分布 Distribution of hardness in each weld





Load-displacement curves of resistance spot welded or arc-spot welded component obtained in the three-point bending test 比較すると、AS 溶接された部材の AE は、5.0√f の RS 溶 接部材の値よりも26%高かった。従って、AS 溶接は RS 溶接のテンパ通電と同等の効果を発揮したといえる。

三点曲げ試験後に撮影した数条件の部品外観を図12に 示す。ナゲット径  $3.0\sqrt{t}$  のRS 溶接部材では、曲げ試験中 に全ての溶接部が破断した。高速ビデオを用いた観察の結 果,溶接部は変位が約 10mm のときに破断し、同時にハッ ト形部材の壁面は内側に倒れるように変形することが分 かった。こうした結果を受け、図 10 に示したように部材の 荷重が変位 10mm 以降で低下した。ナゲット径を  $5.0\sqrt{t}$  ま で増加させると溶接破断点数が減少した。溶接破断や断面 座屈は  $3.0\sqrt{t}$  の条件に比較し、より大きい変位で発生した。 さらにナゲット径  $5.0\sqrt{t}$  でテンパ通電を実施すると、試験 中に溶接部は破断しなかった。この条件では、ハット形部 材と矩形の鋼板がお互いの変形を拘束し合い、断面の座屈



図 11 RS 溶接部材および AS 溶接部材の吸収エネルギー の比較

Comparison of average absorbed energy between resistance spot welded and arc-spot welded components



図 12 三点曲げ試験後の部材外観

Appearance of components after the three-point bending test

が抑制された。その結果,他の条件よりも高い荷重が最終 変位まで維持されたといえる。

AS 溶接部材で溶接金属径を 5.8√F とした場合も溶接部 の破断が抑制された。これは RS のテンパ通電条件と同様, AS の溶接金属が比較的軟らかく,じん性に優れることを 反映したと考えられる。図 8(b)に示したように,AS 溶接 部は余盛を有した。この余盛や部材中央の複数個所が曲げ 試験の初期からインパクターと衝突した。こうした部材と インパクターの接触領域の拡大によって,部材の応力負担 領域も拡大し,初期の断面座屈が抑制されたものと考えら れる。この"断面座屈の遅れ"が,図 10 に示した変位 25 mm 以下の範囲で,AS 溶接部材の荷重が RS 溶接部材の テンパ有り条件よりも高かった理由と推測される。しかし 両者の荷重は変位 25 mm 以上の範囲では概ね一致した。 従って部材が座屈を開始した後では,両者は同等の剛性を 有したといえる。

## スポット溶接とレーザ溶接の併用による部材 曲げ特性向上

1500 MPa 級のホットスタンプ鋼板などマルテンサイト変 態で強化した高強度鋼板では、スポット溶接時に HAZ の 一部が焼戻されて軟化する。このため、衝突時にスポット 溶接部に面内の大きな引張荷重がかかると、HAZ 軟化部 にひずみが集中して破断が起こり、所定の部材性能が確保 できない場合がある<sup>15,16)</sup>。この HAZ 軟化部での破断対策 として、スポット溶接前に溶接位置の周辺を部分的に軟化 させる手法や、部材構造の工夫によりスポット溶接部に負 荷されるひずみを軽減する手法が報告されている<sup>16-18)</sup>。こ こでは溶接技術による破断防止策として、スポット溶接と レーザ溶接を併用した手法について報告する。

スポット溶接部の破断有無を評価するため,1500MPa 級ホットスタンプ鋼板と590MPa 級鋼板を組合せ,図13



図 13 小形短冊板と接合されたハット形部材の外観 Schematic of hat-shaped component welded with a small rectangular sheet に示す片ハット形モデル部材を作製した。部材の全長は 300mmとした。インパクターの真下に位置する片ハット形 部材の底面に短冊形の鋼板(50mm×22mm)のホットスタ ンプ鋼をスポット溶接した。この溶接部が本試験の評価部 である。短冊形鋼板をスポット溶接のみで接合した部材と, スポット溶接に続きその中心を通るようにレーザ溶接した 部材を作製した。このときレーザ溶接の方向は部材長手方 向(引張負荷方向)とし,またレーザ溶接長は40mmとし た。フランジ部のスポット溶接ピッチは50mmとした。図 14に示すように,部材は590MPa材側が半径30mmのイ ンパクターの直下となるよう,また半径が30mmで間隔が 200mmの2つの支持ロールの上に配置した。そして部材 を速度1mm/sにて,インパクターで押し込む静的三点曲げ 試験を実施した。曲げ試験時,評価部のスポット溶接部に は面内の引張に加え,若干の曲げ変形が負荷された。

静的三点曲げ試験で得られたインパクターの押し込み変 位と荷重の関係を図15に、また試験後の部材外観を図16 に示す。短冊形鋼板をスポット溶接のみで接合した部材は、 変位が約22mmのときHAZ軟化部にひずみが集中し破断 した。その結果、部材断面の圧潰が進行し、荷重が急激に 低下した。他方、短冊形鋼板をスポット溶接後にレーザ溶 接した部材では、スポット溶接部が破断せず、大きな変位 まで高い荷重が維持された。これは、スポット溶接で形成



図 14 三点曲げ試験セットアップ Setup for three-point bending tests



図 15 三点曲げ試験で得られたスポット溶接部材およびス ポット溶接とレーザ溶接を併用した部材の荷重 - 変 位線図

Load-displacement curves of resistance spot welded component or laser-welded one after resistance spot welding obtained in the three-point bending test



with lase welding 図 16 三点曲げ試験後の溶接部外観 Appearance of welds after three-point bending test

された HAZ 軟化部がレーザ溶接によって再び焼入れられ て硬化し、曲げ試験時のひずみ集中が抑制されたためであ る。このようにスポット溶接部の上にレーザ溶接すること により、インパクター直下で高い応力が負荷されても、そ の破断を抑制し、部材性能を大幅に向上できることを見出 した。

## 5. 稜線接合パッチワーク・テーラードブランク 工法による部材曲げ特性向上

側面衝突時に乗員空間であるキャビンを保護するため, 骨格部材の変形を抑制する必要がある。センターピラーは そうした骨格部材の代表例であり,極めて高い曲げ性能が 求められる。そのため、センターピラーには高強度鋼板が 適用され、さらに一部に補強部品がスポット溶接されて必 要な曲げ性能が確保される。しかし従来の工法では、セン ターピラーと補強部品はそれぞれが成形された後に組付け られるため、図 17(a)に示すように、これら部品の間には 隙間が生じてしまう。隙間があると両部品は衝突時にそれ



(c) Newly developed PW-TWB technique with ridgeline welding



ぞれ独立して変形し,部品間にずれが生じる。つまり一枚 の厚板として挙動せず,厚肉化による曲げ性能向上の効果 が十分に発揮されない。この隙間を極力小さくするために, パッチワーク・テーラードブランク (Patchwork-Tailored Welded Blanks: PW-TWB) 工法が実用化されている。

この工法により作製された部材の斜視図と断面を図 17 (b)に示す。この工法では、メイン部品用の鋼板と補強部 品用の鋼板がプレス前の平板の状態においてスポット溶接 され、その後のプレス成形によって部材に仕上げられる。 一方、PW-TWB工法では、部材の稜線部(曲げ R 部)とな る部位をプレス前にスポット溶接することも可能である。 この新工法により作製された部材の斜視図と断面を図 17 (c)に示す。こうした部材に曲げの負荷がかかると稜線の変 形に差異が生じる。従来工法や通常の PW-TWB 工法によ る部材の稜線の変形は、図 18(a)に示すように上下の板が 独立して変形するため厚肉化の効果が限定的となる。しか し稜線も接合する新 PW-TWB 工法による部材の稜線は、 図 18(b)に示すように、溶接点を介して上下の板に応力が 伝達するため、部材剛性が向上すると予測された。

実際に図 17(a)~(c)に示す片ハット形部材を作製し、そ の部材曲げ特性を評価した。メイン部材の上面幅を 80mm, 高さを 60mm, フランジ幅を 25mm とした。補強部材の上 面幅を 57.2mm,高さを 40mm,そしてクロージングプレー トの幅を 140mm とした。部材全長は 600mm とした。メイ ン部品および補強部材に用いた鋼板は焼入れ後の強度が 1500 MPa 級のホットスタンプ鋼板である。メイン部材の板 厚を 1.4mm,補強部材の板厚を 1.2mm とした。クロージ ングプレートに用いた鋼板は 780 MPa 級の Dual Phase 鋼で あり、板厚は 1.8mm とした。従来工法では、メイン部品お よび補強部品を別々にホットスタンピングし、後からスポッ ト溶接で組付けた。メイン部品と補強部品の天板間には 5mm の隙間を設けた。

一方,2つのPW-TWB工法では、プレス前のブランク状態にあるメイン部品と補強部品をスポット溶接し、そして両部品をホットスタンピングした。このときの加熱条件は900℃×420sとした。両部材において片ハット形部材の成形後には、そのフランジ部をクロージングプレートと接合し、閉断面構造とした。メイン部品と補強部品やクロージ



or normal PW-TWB technique

(b) Newly developed PW-TWB technique with ridgeline welding

図 18 曲げ負荷を受ける部材の稜線における変形と応力分 布の比較

Comparison of deformation and stress distribution at ridgeline of components subjected to bending



図 19 三点曲げで得られた部材の荷重 - 変位線図 Load-displacement curves obtained in the three-point bending test for components





Absorbed energy-displacement curves obtained in the three-point bending test for components

ングプレートとのスポット溶接ピッチは全て 40mm とした。 作製した部材に対し静的な(押し込み速度:15mm/min)の 三点曲げ試験を行い,ストローク-荷重曲線を測定した。 曲げ試験において,部材を載せる2つの支持ロールのRは 30mm とし,その間隔を500mm とした。また押し込みポ ンチのRを150mm,最大の押し込み量を50mm とした。

三点曲げ試験におけるストロークと荷重の関係を図 19 に示す。従来工法部材と PW-TWB 工法による部材の最大 荷重を比較すると、後者では 22% (50kN→61kN)向上す ることが分かった。一方、ストロークと吸収エネルギー (AE)の関係を図 20 に示す。従来工法のハットの AE (50 mm 変位時)と比較し、従来の PW-TWB 工法によるハット の AE は 20% (1.8kJ→2.2kJ)向上し、新 PW-TWB 工法に よるそれは 27% (1.8kJ→2.3kJ)向上した。このように接合 工法の改良により、部材の曲げ性能を高度に発揮できるこ とが分かった。さらに図 20 から、同等の曲げ性能確保を 前提とすれば、PW-TWB 工法の採用によって補強部材を 薄肉化し、部材を軽量化できる可能性も示唆された。

# スポット溶接LME対策検討(電極先端拡大の 効果)

亜鉛めっきされた高強度鋼板を用いて抵抗スポット溶接 すると、溶接部に液体金属割れ (Liquid Metal Embrittlement:LME) が発生する場合がある。LME 割れは、溶接中 に電極で加圧される鋼板表面側または鋼板同士の重ね面側 (圧接部近傍)に発生する<sup>19)</sup>。圧接部近傍割れの対策として、 例えば保持時間の延長が有効である<sup>20)</sup>。この割れは電極解 放時に高い引張応力がこの部位に発生するために起こる。 また同時に、溶接の入熱で亜鉛が溶融することも原因の1 つとなる。保持時間を延長すると、一旦溶融した亜鉛が保 持の間に凝固するため、割れを抑制できると考えられてい る。ここでは電極側の割れの対策として、電極の先端径の 拡大を試した結果<sup>21)</sup>について述べる。また併せて、電極先 端径を拡大した場合に、実部品で見られる板間の隙間が あっても適正電流範囲を確保できるか検討した結果も紹介 する。

供試鋼には、板厚 1.6mm の合金化溶融亜鉛めっき(GA) 980 MPa 級鋼を用いた。溶接に用いた電極断面の模式図を 図 21 に示す。先端の曲率半径(R)を40mm に固定し、直 径を6~10mm の範囲で変化させた。溶接時の加圧力は4 kN,通電時間は0.4s,保持時間は0.1s に固定し、電流を 変化させた。溶接にはX型の溶接ガンを使用した。X型の 溶接ガンは溶接条件によっては電極の芯ずれを引き起こ す。このため溶接の際、電極側の鋼板表面には面内の応力 やひずみが発生し、割れが促進されると考えた。

各電極先端径における,溶接電流とLME割れ長さの関係を図22に示す。標準的な6mm径の電極を使用した場合,割れは,電流が9.5kA以上の範囲で,また散りの有無に関わらず発生した。先端径が8mmおよび10mmの電極では割れが全電流で発生しなかった。一例として,ナゲット径が5 $\sqrt{t}$ (6.3mm,電流は9.5kAまたは10kA)条件の溶接部断面を図23に示す。6mm径の電極を使用した場合,割れはインデンテーション(電極側の鋼板表面に形成されるくほみ)の外側(破線で囲んだ領域)に発生したが,8 mm径および10mm径の電極では発生しなかった。図23を見ると,電極先端径によってインデンテーションの深さ(ID)が相違したことが分かる。IDは,電流やナゲット径が増加するほど増大する傾向を示した。



図 21 スポット溶接用電極の模式図 Schematic of electrode for spot welding



図 22 各電極先端径における溶接電流と LME 割れ長さとの 関係

Relationship between current and LME crack length for each diameter of electrode tip



図 23 電極先拡大によるLME割れの抑制 (ナゲット径:  $5\sqrt{t}$ ) Suppression of LME cracking through increase of diameter of electrode tip (Nugget diameter:  $5\sqrt{t}$ )



図 24 各電極先端径におけるインデンテーション深さとLME 割れ長さの関係

Relationship between depth of indentation and LME crack length for each diameter of electrode tip

次に,各条件の割れ長さを ID で整理した結果を図 24 に示す。本図より,先端径 6mm の電極では, ID が 0.3mm 以上になると割れが発生したことが分かる。一方,8mm 径以上の電極ではいずれの ID でも割れが生じなかった。



図 25 板間隙間なしと 1.6mm の条件の適正電流範囲の比 較 (電極先端径:13mm)

Comparison of appropriate current range in welding without gap between two sheets and with that of 1.6mm (Electrode tip diameter:  $\phi$ 13mm)

8mm 径以上の電極では散り発生条件でも, ID が 0.3mm 未満に抑制されていた。従って, 電極先端径の増加による 割れ抑制の理由は, ID の減少を通じた鋼板表面の応力, ひずみの低減と考えられる。さらにいえば, ID の低減は, 電極先端径の増大による電流密度の低下や電極抜熱の促 進(鋼板表面の温度上昇抑制), 面圧の低下に起因したと 推測される。なお電極先端の曲率半径増加も同様に, 電極 側の鋼板表面の割れ防止に有効であるとの結果を得てい る。

さらに鋼板間の隙間を設定した場合の適正電流範囲を評価した。鋼板間の隙間は1.6mmとし、また電極の先端径は6mm,または上記の径よりもさらに大きな13mmとした。本評価においても、供試鋼は板厚1.6mmのGA980MPa級鋼とした。電極先端径13mmの場合の電流とナゲット径の関係を図25に示す。鋼板間の隙間がない場合とある場合の両条件を考慮した適正電流範囲(ナゲット径3√{ tから散りが発生する最低電流までの範囲)は2.5kA(8~10.5kA)であった。この程度の適正電流範囲を確保できていれば生産に十分耐えると思われる。比較のため行った先端径6mmの条件では、隙間がない場合とある場合の両条件を考慮した適正電流範囲が2.5kAであった。つまり本検討内では、電極先端径を拡大しても、適正電流範囲が変化しない結果が得られた。

## F. EJOWELD<sup>®</sup>を活用したマルチマテリアル接合 技術の開発

車体軽量化の手段としてマルチマテリアル化も挙げられ る。即ち、車体に鉄、アルミニウム、樹脂といった種々の 材料が適材適所に採用される。そして車体組付けの際、材 料の組合せに応じて接合方法が選択される。例えば鉄とア ルミニウムの接合では、セルフピアスリベットに代表される 機械接合が主流である。EJOT 社が開発した EJOWELD®







図 27 種々の強度の鋼板とアルミニウムを組合せた
 EJOWELD<sup>®</sup> 継手の十字引張強さの比較

Comparison of CTS of EJOWELD® joints made by combining aluminum and steels with various strengths

も、例えばアルミニウムと1500 MPa 級ホットスタンプ鋼の 接合に採用されている。日本製鉄(株)でも、この EJOWELD<sup>®</sup> を用いた鉄とアルミニウムの接合技術を開発している。こ こで EJOWELD<sup>®</sup> により得られた接合部断面を図 26 に示 す。この接合方法では、"エレメント"と呼ばれるリベット 状の部材を回転させながら加圧することで、まず上板のア ルミニウムを貫通する。そして、エレメントと下板の鋼板 を摩擦圧接すると同時に、エレメント頭部で上板を押さえ ることで接合を達成する。

検討の一例として、アルミニウム合金板 (A6061)の上板 と 590~1500 MPa 級の冷間圧延鋼板の下板を組合せて十 字引張試験片を作製し、その継手強度を評価した。板厚は アルミニウム、鋼板ともに 1.6 mm とした。各継手の十字引 張強さ (CTS)と破断後の接合部断面を図 27 に示す。アル ミニウム合金板と 590 MPa 級鋼または 980 MPa 級鋼を組合 せた継手においては、上板のアルミニウム合金板が破断し た。従って、アルミニウム合金板の母材強度よりも摩擦圧 接部 (エレメントと鋼板の接合界面)の強度の方が高かっ たといえる。しかしこの接合条件では、アルミニウム合金 板と 1500 MPa 級鋼を組合せた継手において下板が板厚方 向に破断し、また CTS が他の条件よりも若干低下した。今 後、こうしたアルミニウムと超高強度鋼板の組合せにおい て、継手強度を向上可能な条件を見出し、その適用を拡大 することを通じ、車体の軽量化に貢献したい。

#### 8. おわりに

今後,自動車用鋼板には高強度と高延性の両立がますま す求められると予想される。日本製鉄は,こうした先進的 な高強度鋼板の開発に取り組むと共に,これら鋼板を使い こなす技術の提案も図っている。中でも溶接部の強度信頼 性を確保することが適用拡大の鍵であるため,本報では溶 接部強度向上を狙いとする研究事例を述べた。こうした開 発が自動車産業を支える基盤となれば幸いである。

#### 参照文献

- 1) 佐藤章仁:高強度鋼板の問題点とその対応. Journal of the JSTP. 46 (534), 548-551 (2005)
- Clare, G.: Welding Advanced High-strength Steel is Pushing Welding Technology. Penton's Weld Mag. 81 (3), 14-16, 18 (2008)
- 3)及川初彦 ほか:自動車用高強度鋼板のスポット溶接性.新
  日鉄技報.(385), 36-41 (2006)
- Herai, T., Takahashi, Y.: Resistance Spot Welding of High Strength Steel Sheets. IIW Doc. III-612-79, 1979
- 5) 浜谷秀樹 ほか:高張力鋼板スポット溶接継手の十字引張強 さ特性. 溶接学会全国大会講演概要. 89, 44-45 (2011)
- Furusako, S. et al.: Strength of Arc Spot Welded Joints in a High Strength Steel Sheet. SAE 2014 World Congress, Material, 2014-01-0786
- 7) 古追誠司 ほか:アークスポット溶接された高強度鋼板継手 の疲労強度(第1報).溶接学会全国大会講演概要.96,114-115 (2015)
- 8) 山崎一正 ほか:超高強度冷延鋼板のスポット溶接継手の強 度特性.溶接学会論文集. 17 (4), 553 (1999)
- 9) Watanabe, F., Furusako, S., Hamatani, H., Miyazaki, Y., Nose, T.: Fracture Mechanical Analysis of Cross Tension Test for High-Strength Steel Spot Welded Joints. Mathematical Modeling of Weld Phenomena. 10, 653 (2012)
- 山口正剛:粒界凝集エネルギーの第一原理計算:bcc Fe Σ3(111)粒界における溶質元素の偏析と脆化および強化効果. 日本金属学会誌. 72 (9), 657-666 (2008)
- 古追誠司 ほか:スポット溶接されたL字継手の強度および 破壊挙動に及ぼす添加元素の影響.溶接学会論文集. 33 (2), 133-143 (2015)
- 12) 古迫誠司 ほか:熱伝導解析解を利用したスポット溶接条件 決定指針の検討.溶接学会論文集. 33 (2), 160-170 (2015)
- 13) 谷口公一 ほか:高張力鋼板のパルス通電抵抗スポット溶接 技術の開発(第3報). 溶接学会全国大会講演概要. 90, 240-241 (2012)
- 14) 若林千智 ほか: HAZ 部のオートテンパー促進によるスポット溶接継手の強度向上.溶接学会全国大会講演概要.96, 38-39 (2015)
- 15) 富士本博紀 ほか:高張力鋼板スポット溶接継手の面内引張

-76-

試験での強度と伸びに及ぼす HAZ 軟化の影響.溶接学会論 文集.34 (4),285-294 (2016)

- 16) Fermer, M. et al.: Local Annealing of Hot-formed Steel for Improved Ductility and Spot Weld Strength. Proceedings of Material in Car Body Engineering 2012. Bad Nauheim, p. 1-22
- 17) 中村岳司 ほか:新型マツダアクセラ新型アクセラの軽量ボ デーシェル開発. マツダ技報. 31, 14-18 (2013)
- 18) 広瀬智史 ほか:超高強度鋼板を適用した車体フレームのスポット溶接部破断対策の検討(第4報)-スポット溶接部周辺の熱影響部の破断対策の検討.自動車技術会 2018 年春季

大会学術講演会講演予稿集. 20185206, 1-4 (2018)

- Choi, D.Y. et al.: Parametric Study for Liquid Metal Embrittlement in Resistance Spot Welds of Galvanized TRIP Steel. Sheet Metal Welding Conference XVIII. October 17-18, 2018
- 20) EuroCarBody 2018 報告資料: Nissan Infiniti QX50
- 21) Sierlinger, R., Gruber, M.: A Practical Approach to Evaluate the Susceptibility of Zinc Coated Steels to Liquid Metal Embrittlement (LME) during Spot Welding. Joining in Car Body Engineering 2017, April 2017



古追誠司 Seiji FURUSAKO 鉄鋼研究所 接合研究部 主幹研究員 博士(工学) 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



松井 翔 Sho MATSUI 鉄鋼研究所 接合研究部





若林千智 Chisato WAKABAYASHI 鉄鋼研究所 接合研究部 主幹研究員 博士(工学)



岡田 徹 Tohru OKADA 鉄鋼研究所 接合研究部 主幹研究員







富士本博紀 Hiroki FUJIMOTO 鉄鋼研究所 接合研究部 主幹研究員 博士(工学)