

# 自動車用薄鋼板溶接技術の最先端 抵抗スポット溶接\*

The Forefront of Welding Technology for Automotive Steel Sheet,  
Resistance Spot Welding

宮崎康信 日本製鉄(株)  
Yasunobu Miyazaki 鉄鋼研究所 接合研究部  
上席主幹研究員

## 1 はじめに

自動車車体では安全性向上と軽量化との相反する要請を克服するため、特に骨格に使われる鋼板の高強度化が急速に進展している。車体の溶接には主にスポット溶接が適用され、レーザ溶接が用いられることもある。シャーシの溶接では、主にガスシールドアーク溶接が適用されている<sup>1)</sup>。これらの内、最も幅広く用いられている溶接方法であることから、スポット溶接を本稿では紹介する。

## 2 自動車の歴史と現在の課題

1876年にドイツ人のオットーが4ストロークのガソリンエンジンを発明し、彼のもとで働いていたダイムラがこれを改良して小型軽量で大出力が得られるエンジンを開発した<sup>2,3)</sup>。ダイムラは早くも1889年のパリ世界博覧会に全鋼製の四輪車を出品し、一般にも売り出している。またフランスのパナールはダイムラからエンジンの製造権を買い、1891年には現在のFR方式の始祖といえる車を発売した。こうして現在の乗用車の基礎技術はダイムラのエンジンとパナールのシャーシによって確立された。

アメリカではフォードやオールズなどが自動車の試作に

乗り出し量産技術を開発していった。1908年のT型フォードは現在のコンベアラインによる大量生産方式の基礎となり、1923年には年産205万台と、全世界生産台数の1/3近くを占めた。

日本では1907年にオートモビル商会在国産ガソリン車第1号となるタクリ号を10台造り、福沢諭吉など当時の有力者に納入した。また現在まで続く自動車会社が次々と創立された。戦後になって、ライセンス生産や欧米の車をお手本にした自動車生産が本格化した。そうした1950年代、乗用車の需要はハイヤー・タクシーと法人であった。1956年からの神武景気、1960年の所得倍増計画、1966年のいざなぎ景気と経済が成長するに従って個人需要が伸び、1960年代に小型大衆車の量産技術が確立された。そして1970年に制定された米国の大気浄化法改正法(通称マスキー法)を契機とした1975年代の排出ガス浄化技術の確立を経て、1980年代には日本車の生産台数が1,000万台を超えた。

1973年(第1次)と1979年(第2次)に原油の供給逼迫と原油価格高騰、またそれによる世界経済の混乱が生じた。いわゆる石油危機である。日本経済の発展のためにはエネルギー使用効率を大幅に改善していくことが必要と考えられ、1979年に「エネルギー使用の合理化に関する法律」(通称:省エネ法)が制定された。そして同年にガソリン乗用自動車の燃費

### \* 【今回の解説記事について】

「ふえらむ」では、入門講座「鋼を接合する(2011年5号~2012年1号掲載)」で、溶接・接合に関する解説記事や、「ものづくりを支える溶接材料と技術(2012年)」の連報解説記事(1,5,6号)を掲載してきた。しかしながら、近年の輸送機器、特に自動車の軽量化に対しては、鉄鋼材料の高強度化や薄肉化の動きが加速しており、これに伴い接合技術が重要なキー技術になっている。前記の入門講座、解説記事から10年近くが経過したこともあり、現状の自動車用薄鋼板の溶接技術に関して、その最新技術を含む概要を掲載することは、鉄鋼材料やその利用技術の研究/開発者には有効であると考え、第229・230回西山記念技術講座「鋼材の性能を引き出す溶接技術の最先端」の中から「自動車用薄鋼板溶接の最先端」の講義資料の内容の一部を紹介する解説記事を掲載する。溶接技術の最先端の全貌や、自動車用薄鋼板溶接の最先端の詳細は、是非、第229・230回西山記念技術講座テキストで確認していただきたい。(会報委員会委員長 足立 吉隆)

基準（1985年度目標）が策定された。その後CO<sub>2</sub>排出量の削減（環境保護）という視点が加わり、同法は次々と改正・制定されて2013年には2020年を目標年度とする乗用車・小型バスの燃費に対するトップランナー基準が策定されている。

一方1970年には既に交通事故の多発が世界的な社会問題となっていた。米国運輸省道路交通安全局は自動車メーカがより安全な車両を作るとを奨励し、消費者がそれらを購入できるように、1979年に新車アセスメントプログラム（New Car Assessment Program：NCAP）を開始した。日本でも1995年度より自動車事故対策機構により自動車アセスメント（Japan New Car Assessment Program：JNCAP）が開始された。フルラップ前面衝突試験や側面衝突試験がよく知られている。

こうして自動車は環境保護のための軽量化と同時に、重くなりがちな安全性の確保という、相反する課題を抱えるようになった。

### 3 自動車用鋼板<sup>4)</sup>

自動車の大量生産と大寸法成形が始まった1955年頃、成形の難しい部品には輸入のAlキルド鋼板が使われていた<sup>5)</sup>。その後1950年代後半になって深絞り用低炭素Alキルド鋼板が国産化された<sup>6,7)</sup>。この鋼板は箱焼鈍によって数日かけて製造され、1960年代の自動車産業の発展とともに大量に製造された。一方、当時連続焼鈍で製造された鋼板は硬質で時効劣化が大きく、自動車用途には不向きであった。1960年代後半に研究が進み、1970年代になって深絞り用低炭素Alキルド鋼板が連続焼鈍で造られるようになった。

Ti添加IF鋼板が1966年に、Nb添加IF鋼板が1981年に開発されている。IF（Interstitial Free）鋼板は、極低炭素鋼にTiやNbを添加して炭化物を形成し、固溶NやCをほとんどなくした鋼板である。当初高コストであったが、真空脱ガスや連続鋳造など製造技術の進歩により低コスト化が進んだ。そして1980年代後半に車体形状の複雑化や部品の一体成形が求められると、広く外板用の鋼板として使われるようになった<sup>8)</sup>。

1970年前後になると衝突安全性確保や排気ガス対策で車体重量が増加し、燃費が悪くなった<sup>9)</sup>。このため高い成形性が求められないバンパーなどにNb、Tiなどの析出強化型鋼板やSi、Mn系の固溶強化鋼板が使われ始めた<sup>6)</sup>。

1973年の第1次石油危機を経ると、軽量化のために高強度鋼板を車体にも適用する必要性が生じた。パネル系部品用の鋼板としてはP添加高強度鋼板や、焼付け硬化能をもつBH（Bake Hardening）高強度鋼板が開発され、1978年の第2次石油危機を契機として量産自動車に使用され始めた<sup>6)</sup>。現在では、TS（引張強さ。以下省略）340MPa級のBH鋼板までが鉄鋼連盟で規格化されている。

高い延性が求められる骨格系部品用鋼板として、複合組織鋼が開発された。DP（Dual Phase）鋼板はフェライトとマルテンサイトからなる複合組織鋼板である。590MPa級DP鋼板が1999年に、780MPa級が2002年に、980MPa級が2004年に採用されたことが報告されている<sup>10)</sup>。現在1180MPa級の実用化も進んでいる。

DP鋼よりさらに延性を高めた低合金TRIP鋼の開発も行われ、1989年に熱延780MPa級鋼板が実部品として採用された<sup>7)</sup>。直近では1180MPa級鋼板の適用事例も報告されている<sup>11)</sup>。

冷間でのプレス成形の課題を克服するために、オーステナイト域の温度（A<sub>c3</sub>点以上）まで加熱し、プレス成形と同時に金型で焼入れを行うホットスタンプ（以下、HS）鋼板も開発された<sup>12)</sup>。国内では2001年にドアインパクトビームに採用されている<sup>13)</sup>。現在では焼入れ後1.8GPa級となるHS鋼板も使われている。

シャーシ系部材には剛性ととともに疲労や腐食に対する耐久寿命が必要で、比較的厚手の熱間圧延鋼板が使われる<sup>8)</sup>。現在780MPa級までの鋼板が使われている。ホイールリムでは980MPa級鋼板も実用化された。

北米や北欧で冬季の路面凍結防止のために塩が散布されるようになると車体に錆が発生したり孔があいたりするようになり、高い耐食性が求められるようになった<sup>9)</sup>。1976年にカナダコードが最初の規制値として制定された。防錆鋼板への要求は2度に渡る石油危機による車体軽量化要請によっても強くなり、1980年代前半より防錆鋼板が多く使われるようになった<sup>6)</sup>。国内における防錆鋼板は片面研削合金化溶融亜鉛めっき鋼板（以下、合金化溶融亜鉛めっきはGAと略記する）の使用に始まる。その後電着塗装技術と化成処理技術が改良され、現在では厚目付の単相GA鋼板が主流となっている<sup>14)</sup>。

### 4 抵抗スポット溶接

#### 4.1 抵抗スポット溶接技術の概要

抵抗スポット溶接（Resistance Spot Welding）は、自動車製造の比較的初期から使われてきた。この溶接法では複数の鋼板を銅合金の電極で挟み込んで加圧・通電し、鋼板間に溶融凝固した溶接金属（ナゲット）を形成する。

図1<sup>15)</sup>に溶接工程の一例を示す。本図はナゲット形成後に改質のための通電を行う場合の工程である。電極での加圧後、加圧力が安定するまで待つスクイズ時間を設けて通電を開始する。すると鋼板は加熱・溶融される。通電初期に消失する接触抵抗と鋼板の固有抵抗によるジュール熱が熱源である。

鋼板表面は水冷銅電極により冷却されているため、合計板厚の中心が最も高温になりやすい。通電終了後、一定の加圧力保持時間を設けて電極を解放する。

スポット溶接部の断面写真例を図2<sup>15)</sup>に示す。本図において中央の碁石状の部分がナゲットである。その周囲にはコロナボンドと呼ばれる圧接部がある。さらに外側に母材とコントラストの違う領域が認められるが、この領域が溶接熱影響部 (Heat Affected Zone : HAZ) で、鋼板が $A_{c1}$ 点以上に加熱された領域である。

軟鋼板に対する推奨溶接条件を表1<sup>16)</sup>, 228)に示す。2サイクルのアップスロープが付けてある。また電極としてCF形またはCR形を前提としているが、DR形でも問題なく使える (電極形状については、JIS C 9304 (2010) を参照されたい)。溶接電流は数千Aから一万A程度である。

#### 4.2 抵抗スポット溶接機器

スポット溶接機は、構造面から定置式とロボットに搭載可能なポータブル式に分類される。さらにこれらは電源と加圧

機構により分類される。

電源には従来、単相交流電源が広く使われてきた。図3<sup>17)</sup>に示すように、単相交流電源は、単相200Vを溶接トランスにより降圧して溶接に供するものである。電流値の調整には各半サイクルの通電開始時期をサイリスタ等のスイッチン

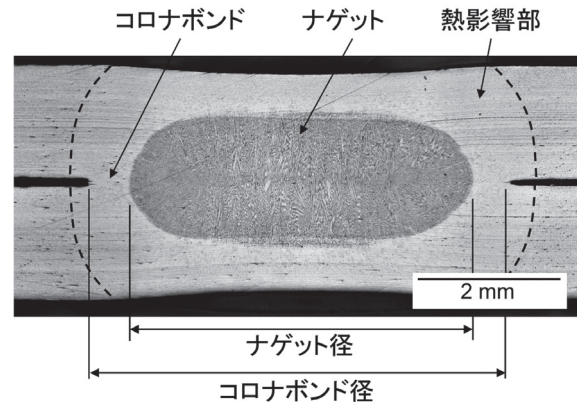


図2 抵抗スポット溶接部の構造

表1 軟鋼板に対する溶接条件例

| 項目            | 推奨条件                                                   |
|---------------|--------------------------------------------------------|
| 電極先端径 ( $d$ ) | $d=5\sqrt{t}$ (mm) 但し、現実的には<br>$t \geq 1.6$ で8mm, 他6mm |
| 加圧力 ( $P$ )   | $P=2.5t$ (kN)                                          |
| 全溶接時間 ( $T$ ) | $T=10t+2$ (サイクル, 50Hz)<br>$T=12t+2$ (サイクル, 60Hz)       |
| 溶接電流 ( $I$ )  | $I=0.95I_e$ (kA) 程度                                    |

$t$ : 板厚 (mm),  $I_e$ : 散り発生限界電流

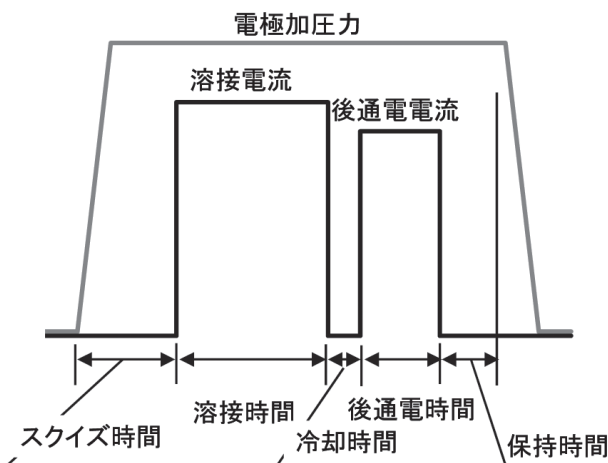
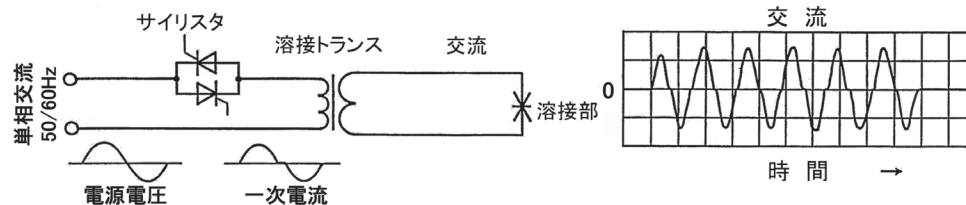


図1 抵抗スポット溶接の工程例

##### 1) 単相交流式



##### 2) インバータ式

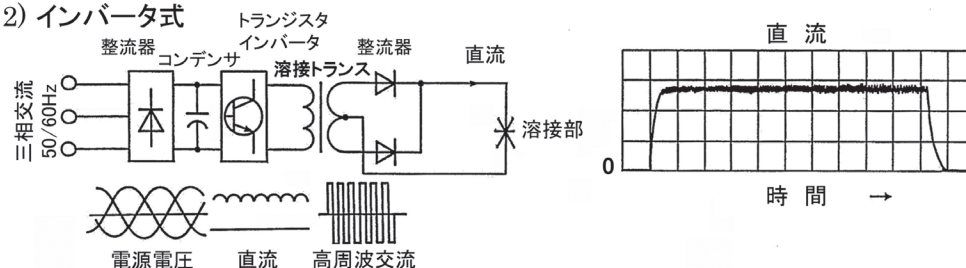


図3 溶接電源の回路<sup>17)</sup>



グ素子で調整する。これを位相制御（ヒートコントロール）という。また1990年頃より直流インバータ電源も採用されるようになった。この電源では商用周波数の交流を整流して直流を作り、インバータにより高周波交流に変換する。そして整流器付き溶接トランスで直流に戻して溶接に供する。溶接電流の調整には一般に、溶接トランスの一次側に電流を供給する時間幅を変える。これはパルス幅変調（Pulse Width Modulation：PWM）方式と呼ばれる。

単相交流電源を用いたポータブルスポット溶接機では、図4<sup>18)</sup>に示すように、ガンと溶接トランスが分離されたものが普通である。溶接電流は別置きされた溶接トランスから二次ケーブルでロボットに搭載されたガンに供給される。この方式では二次ケーブルに流れる溶接電流が大電流となることからケーブルが太くなる。このためロボットの動きを制約する。またケーブルが破断する不具合が発生し易い。さらにふところの大きな溶接機ではインダクタンス（交流での電気抵抗のうち、電磁誘導に起因する部分で、電流の急激な変化を抑制する）が大きくなり、短時間に大電流を流すことは不得手である。

インバータ方式では溶接トランスに高周波電流が供給されるため、溶接トランスを小さくできる。このため溶接トランスを溶接ガンと一体化してロボットに搭載できる。この方式では電源と溶接ガンとの間の電流を低く抑えられることから一次ケーブルを細くでき、ケーブルの切断不具合がなくな

る。こうした事情からガン・トランス一体型溶接機はロボットによる溶接工程で急速に普及した。さらに直流で溶接することから、溶接ガンのふところ深さに左右されないで溶接できる。高周波でトランスを小さくできるのは、鉄心を通る磁束密度が周波数に反比例して小さくなるためである。

電極の加圧には従来、空圧または油圧が使われてきた。ACサーボモータを用いた電動加圧式溶接ガン（以下、サーボガン）は1995年頃から実用化された<sup>18)</sup>。モータの回転量、回転速度で電極の位置や移動速度を決定でき、回転トルクで加圧力を制御できる。このサーボガンをロボットと協調制御することによりサイクルタイムの短縮が可能となる。ガンに開放・加圧動作をさせながらガンを移動させることができる<sup>19)</sup>ためである。また電極をソフトにワークにあてることが可能で、打撃音がなくなり作業環境が大幅に改善される。

### 4.3 抵抗スポット溶接現象の詳細

鋼板に電流が流れるとジュール熱が発生する。電流制御の場合、単位時間あたりの発熱密度 $q$ は、固有抵抗 $\rho$ と電流密度 $i$ の2乗の積で求められる。全電流値を $I$ 、電流が流れる領域の直径（通電径）を $d_c$ とすると、図5に示す発熱密度の表式が得られる<sup>16), p29</sup>。この式は発熱密度が電気抵抗の1乗、電流値の2乗に比例する一方、通電径には4乗で反比例することを示している。連続した溶接で電極先端が広がり易いめっき

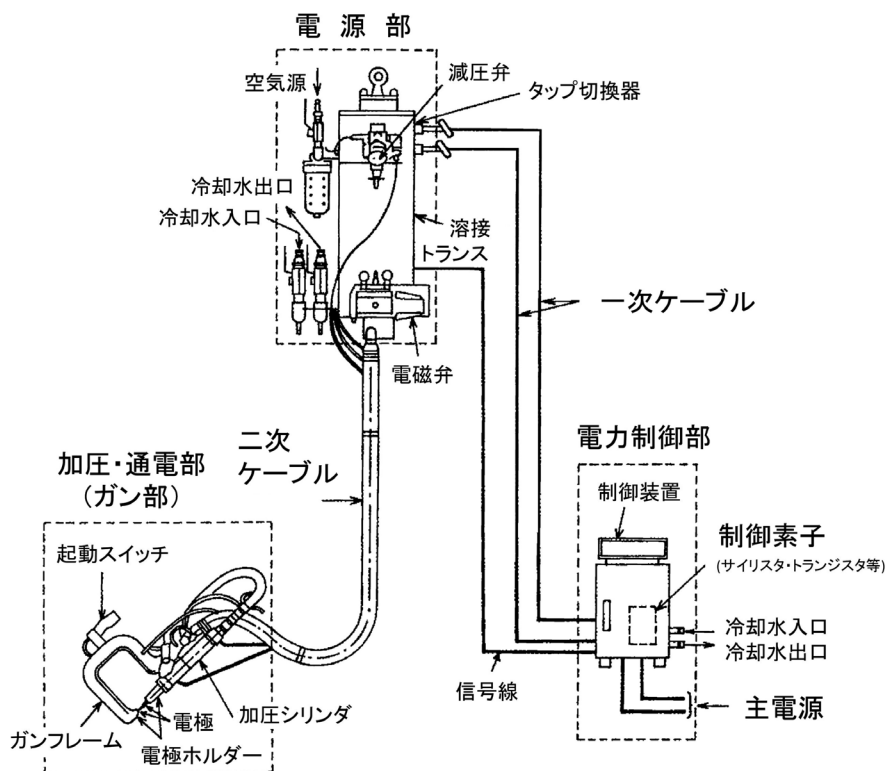


図4 ガン・トランス分離型溶接ガン<sup>18)</sup>

鋼板の溶接で、電極管理が重要となる所以である。

通電が始まるとコロナボンドとナゲットが成長する。通常コロナボンドはナゲットより先に成長し、溶接中に熔融金属が鋼板間に吹き出すこと（中散りの発生）を防ぐ。しかし溶接電流を高くしすぎると図6<sup>20), p35</sup>に示すように、ナゲットの成長がコロナボンドの成長に追いつき、散りが発生しやすくなる。

鋼板間に隙間（以下、板隙）があると散りが発生し易くなる。これは板隙があるとコロナボンドによる熔融池の保持能力が低下するためと報告されている<sup>21)</sup>。

図5に示した発熱密度の式において固有抵抗は温度に依存し、高温ほど高くなってナゲットの形成を助ける。また固有抵抗はSi、Al、Mn、Crといった化学成分に依存する<sup>20), p88</sup>。高強度鋼板では合金元素の添加量が多い。このため高強度鋼板の固有抵抗は軟鋼板に比べて高く、ナゲットが形成され易い傾向になる。

接触抵抗 $R_c$ は加圧力 $P$ 、鋼板の降伏強度 $\sigma_y$ とともに固有抵抗 $\rho$ に依存し、 $R_c = (\rho/2)\sqrt{3\sigma_y/P}$ と表される<sup>16), p19</sup>。従って高強度鋼板では軟鋼板に比べ接触抵抗も高くなる。

通電径は $d_c = \sqrt{8P/\pi\sigma_y}$ <sup>16), p27</sup>と表される。このため発熱密度は降伏強度の自乗に比例して高くなる。

以上述べたように高強度鋼板では抵抗の高さや通電径の狭さからナゲットが形成されやすく、中散りが発生しやすい。すなわち適正電流範囲が狭い傾向になる。ここで適正電流範囲は必要とする最小ナゲット径が得られる電流値から、散り

が発生する電流値までの電流範囲である。

通電径を確保するために下限加圧力に $P_{HT}^{lower} = \sqrt{\sigma_{HT}/\sigma_{MS}} \cdot P_{MS}$ 、上限加圧力に $P_{HT}^{upper} = (\sigma_{HS}/\sigma_{MS}) \cdot P_{MS}$ を考えれば良いことが提案されている<sup>16), p232</sup>。ここで $P_{HS}$ および $P_{MS}$ はそれぞれ高強度鋼板の場合と軟鋼板の場合の加圧力である。また $\sigma_{HT}$ および $\sigma_{MS}$ は、それぞれ高強度鋼板および軟鋼板の引張強さ（軟鋼の場合300MPaと設定する）、あるいは降伏強度と引張強さの平均とする。但しこれらの式に従うと厚手高強度鋼板の溶接に必要な電極加圧力がかなり高くなってしまう。

加圧力を十分に確保できない場合、通電方法が工夫される。すなわち、通電時間を長めにして電流値を抑制する、アップスロープや予備通電を行って本通電の前に鋼板間をなじませる、多段通電により通電初期のナゲット成長速度を緩和することが有効である<sup>22)</sup>。

#### 4.4 高強度鋼板の抵抗スポット溶接

##### 4.4.1 溶接部の組織と硬さ

図7<sup>23)</sup>は、590MPa級鋼板（ $t$  1.6 mm）2枚板組で直径 $3.5\sqrt{t}$ のナゲットを形成した場合の温度履歴実測値である。ここでナゲット径および板厚 $t$ はmm単位での数値であり、世界的に使われている慣用表記である。図7より、変態を左右する800℃から500℃までの冷却時間 $t_{8/5}$ は0.12 s程度であると読み取れる。この計測例では冷え切るまで電極を保持しているため冷却時間が極端に短くなっている。数値シミュレーションにより980MPa級鋼板（ $t$  1.4 mm）2枚板組のナゲットの冷却時間を推定した。その結果、保持時間が0.1 sの場合、熔融境界より1 mmのナゲットの $t_{8/5}$ は約0.6 sであった。

焼入れ後 1.5 GPa級となるHS鋼板の950℃からの連続冷却変態（CCT：Continuous Cooling Transformation）曲線図が報告されている<sup>12)</sup>。それによると0.6 s程度の $t_{8/5}$ ではこの鋼のスポット溶接部はマルテンサイトになると推定される。マルテンサイトの硬さ $H_M$ は炭素量 $C$ のみで決まり、 $H_M =$

$$q = \rho i^2 \propto \frac{\rho I^2}{d_c^4}$$

$q$ : 発熱密度     $I$ : 全電流  
 $\rho$ : 固有抵抗     $d_c$ : 通電径  
 $i$ : 電流密度

図5 発熱密度の支配因子

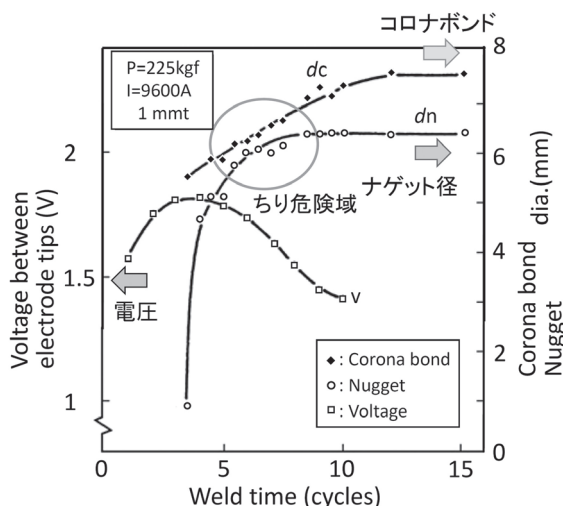


図6 高電流でのコロナボンドの成長遅れ<sup>20), p35</sup>

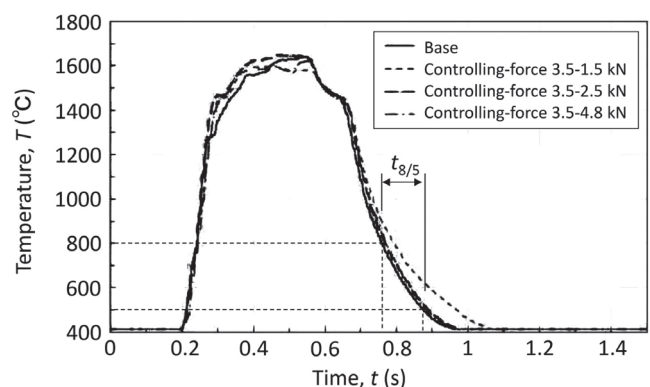


図7 スポット溶接ナゲットの温度履歴<sup>23)</sup>

884 C (1-0.3C<sup>2</sup>) + 294で推定される<sup>24)</sup>。0.22% Cの1.5 GPa級HS鋼のマルテンサイトの硬さは486と推定されるが、この値は実測値<sup>25)</sup>と良い一致を示す。

#### 4.4.2 高強度鋼板スポット溶接継手の強度

スポット溶接継手の引張強度は、引張せん断試験 (JIS Z 3136)、十字引張試験 (JIS Z 3137) で評価されることが多い。剥離強度の試験方法として他に、L字継手ピール試験やU字継手ピール試験がある。継手強度の鋼種依存性について幾つか報告されている<sup>26,27)</sup>。それらによると引張せん断強さ (Tensile Shear Strength : TSS) は母材の引張強さとともに上昇するものの、十字引張強さ (Cross tension strength : CTS) は800MPa付近より低下する傾向がみられる。

図8<sup>28)</sup>に示すように、十字引張試験ではナゲットが小さいときに界面破断となり易く、ナゲットが大きくなると部分プラグ破断あるいはプラグ破断となる。また鋼板強度や板厚が増すほどプラグ破断し難くなる。

図9<sup>28)</sup>に示すように破断はナゲットや溶融境界付近で生じ、CTSはそれら部位の材質に支配される。これら部位はA<sub>cs</sub>点以上にまで加熱された後、急速に冷却された部位で、成分のみによって機械的特性が決まる部位である。同じ剥離試験であるピール試験において破断形式が炭素当量とPおよびS量で整理できることが報告されており、ナゲットが硬くかつ偏析元素が多い場合にナゲット内破断し易いと解釈されている<sup>27)</sup>。

#### 4.4.3 十字引張試験における破断機構

十字引張試験での破断現象について、破壊力学に基づいた検討がなされた<sup>28,29)</sup>。貞末ら<sup>28)</sup>は980MPa鋼 (0.133C-1.59Si-2.29Mn、t1.6 mm) 継手の十字引張試験を行い、CTSと破断形態のナゲット径依存性を調べた。その結果が先に示した図8、図9である。3√t継手では1 kNの載荷でコロナボンド部が

剥離し、き裂がナゲット内に300 μm程度進展した。このき裂は荷重がCTSの6.09kN近傍になると急速にナゲット内に進展し、継手が脆性破壊したという。そこでこのき裂進展に対応する破壊パラメータとしてモード I の応力拡大係数が適切と考えた。これに対し5√tの継手では7kNで板厚方向の延性き裂が発生し、荷重の増加とともに12.8kNにおいてプラグ破断となった。そこでパラメータとして相当塑性歪みが有効と考えた。

貞末らは十字継手の1/4継手モデルを用いて弾塑性数値解析を行った。図10<sup>28)</sup>に示すように3√tではコロナボンドを、5√tではHAZのはみ出したコロナボンドを持つモデルである。十字引張試験をシミュレーションし、3√t継手の破断は、引張初期に入ったき裂先端の応力拡大係数が116MPa√mに達すると生じ、5√tの試験片では歪み集中部の相当塑性歪みが0.34に達すると延性き裂が発生すると考えれば実験結果と整合することを示した。なお0.34という値は厚鋼材や溶接金属の値に比べて低く、今後検証すべきとしている。

一方渡辺ら<sup>29)</sup>は破壊パラメータとしてき裂進展駆動力 $J$ を採用し、これ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た。き裂進展駆動力は仮想き裂がある場合とない場合のポテンシャルエネルギーの差から算出する。この解析では低荷重で剥離するコロナボンドは圧接されていないものとしている。

渡辺らの計算によると、引張荷重の増加とともに溶融境界において界面方向および板厚方向のき裂進展駆動力が増加する。またナゲット径が大きくなると、き裂方向に関わらず駆動力は低下する。そして図11<sup>29)</sup>に示すように、界面方向へのき裂進展駆動力に比べ、板厚方向への駆動力の方が高くな

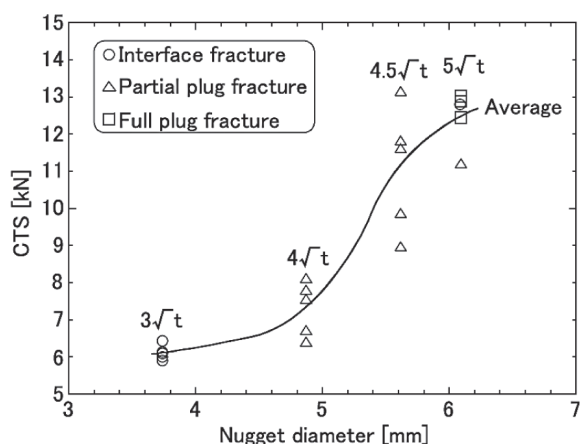


図8 ナゲット径によるCTSおよび破断形式の変化<sup>28)</sup>

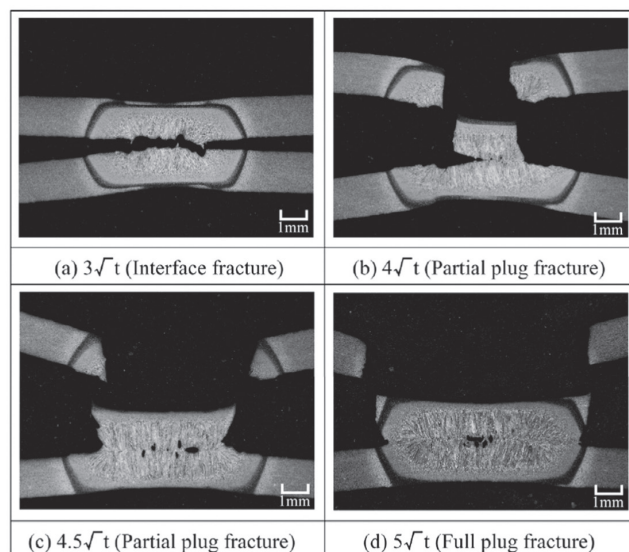


図9 各種破断形式での破断部断面<sup>28)</sup>



る。これは実験的にナゲット径が大きくなるとプラグ破断となりやすい傾向と対応する。また板厚が厚くなるとき裂進展駆動力が低下することを示し、CTSが高くなることに对应する結果を報告している<sup>30)</sup>。

渡辺らはさらにナゲットの破壊靱性値も測定している<sup>31)</sup>。その値は貞末ら<sup>28)</sup>の報告している0.133C材の応力拡大係数( $K_{Ic}$ )と概ね一致する。また石田ら<sup>32)</sup>は破壊靱性値のナゲット内での異方性を調べ、ナゲット内では界面方向より板厚方向

向の方が小さいことを報告している。これは部分プラグが生成されることの一因と考えられる。

## 5 スポット溶接継手の剥離強度向上技術

以上の報告は高強度鋼板継手で高いCTSを得るためにはナゲットを大きくすること、ナゲットおよびナゲット近傍の破壊靱性値を高くすることが必要であることを示している。

### 5.1 CTSに影響を与える因子

CTSは保持時間が長くなると低下する。若林ら<sup>33)</sup>は0.2C、 $t$  1.4mmの980MPa級鋼板を種々の保持時間で溶接し、これを確認している。破断形式は保持時間0.2sまではプラグ破断であったが、0.4s以降は部分プラグ破断となり、またプラグ率が低下した。溶融境界から1mmのナゲット組織は図12<sup>33)</sup>に示すように、保持時間によって炭化物の析出量に違いが認められた。この違いは $M_s$ 点以下の冷却速度の違いに起因し

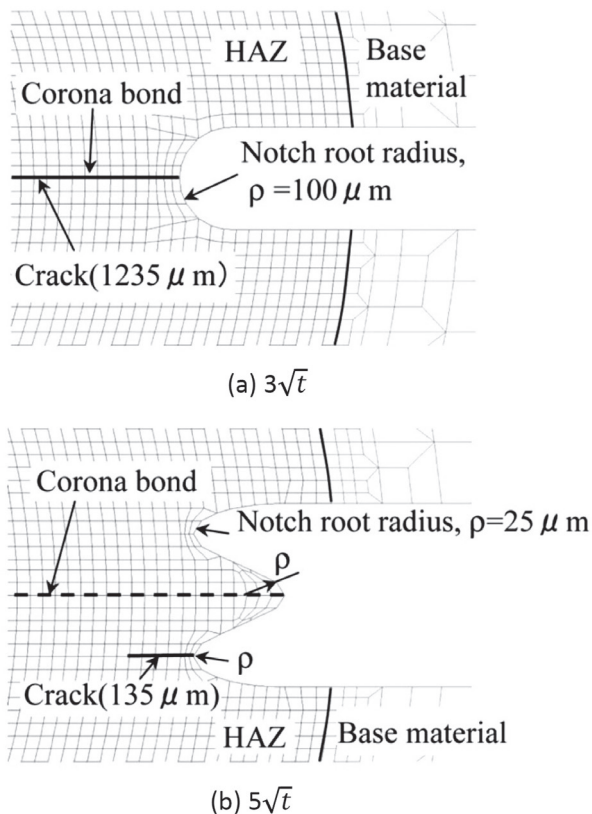


図10 十字引張試験における破断現象の数値解析モデル<sup>28)</sup>  
(a)  $3\sqrt{t}$ コロナボンド先端  
(b)  $5\sqrt{t}$ コロナボンド先端

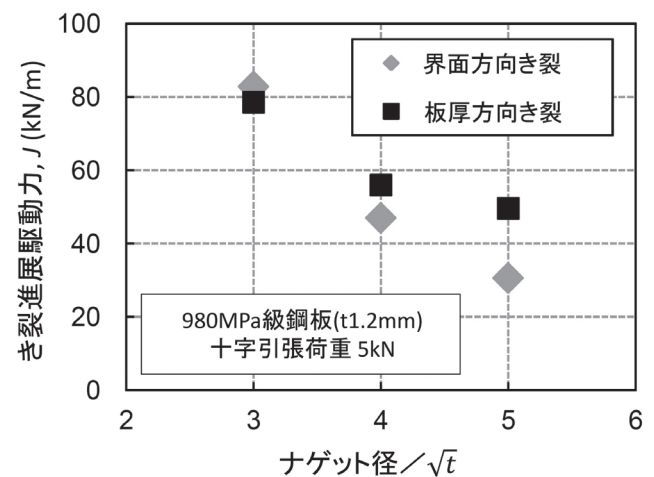


図11 ナゲット径とき裂進展駆動力の変化<sup>29)</sup>

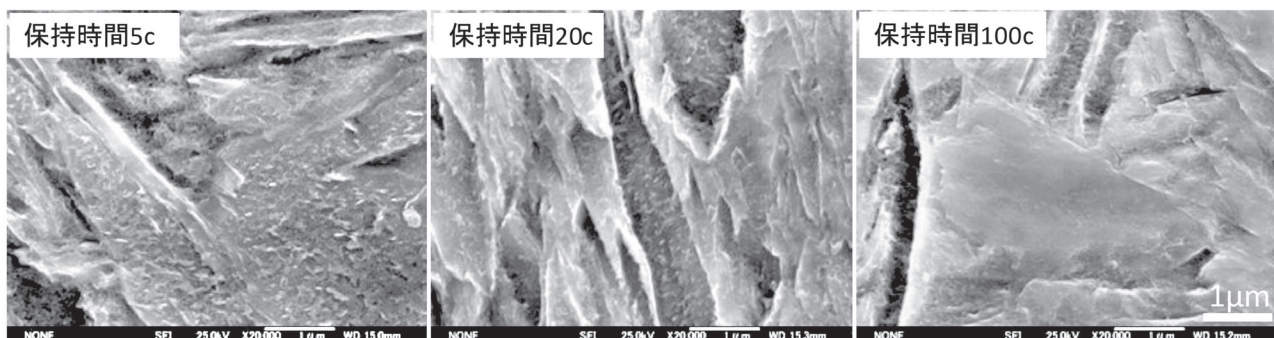


図12 保持時間によるナゲット組織の変化<sup>33)</sup>

てオートテンパ程度が変化したためであると考えられた。

岡田ら<sup>34)</sup>は各種自動車用鋼板のL字継手で剥離強度を評価した。高強度鋼板では保持時間1.0sで焼入れた場合に比べ、塗装焼付に相当する170℃、20minの熱処理を施すと剥離強度が高くなることを報告している。これは焼戻しによるナゲットの靱性向上によるものとしている。さらに0.15Cの鋼板でP量を変えて剥離強度を調べ、Pが凝固偏析している場合には塗装焼き付けの熱処理をしても剥離強度を変えられなかったという<sup>35)</sup>。峰松ら<sup>36)</sup>は引張破断破面のナゲットとコロナボンド境界の塑性変形領域の元素分析を行い、Pが局所的に偏析していることを報告している。さらに古迫ら<sup>37)</sup>はL字継手の途中除荷引張試験後の断面観察を行い、凝固偏析によりナゲットが破壊しやすいことを確認している。

これらの報告より、高強度鋼板スポット溶接継手の破断形式や剥離強度は焼戻し状態や凝固偏析状態の影響を受けると考えられる。

## 5.2 後通電による偏析緩和

大きなナゲットを前提とし、ナゲット形成後、冷却時間において再び通電すること（以下、後通電と表記する）によって継手の剥離強度を積極的に向上することができる。

数サイクルの冷却時間後に短い後通電を行うことで偏析元素を拡散させ、溶接金属の靱性改善を行う手法が短時間偏析緩和後通電である。この手法では板厚に応じて0.04s~0.12s程度の冷却時間を設け、溶接電流の90%程度の電流を0.1s~0.2s間通電する。浜谷ら<sup>38)</sup>はこの後通電により、1.5GPa級HS鋼板継手のCTSが向上することを示した。一方谷口ら<sup>39,40)</sup>も通電パターンは違うものの、後通電によりCTSが向上することを報告している。CTSが向上する理由として図13に示す

ようにPの凝固偏析緩和によるナゲット端部の靱性向上<sup>38,41)</sup>があげられる。

後通電を行うと軟化領域が拡大する。軟化領域があるところ「ばね」として働き、外力を分散してナゲットに伝えることで応力集中を低減させる効果が期待される。しかしこれによるCTS向上効果は小さい<sup>27,42,43)</sup>。一方岡田ら<sup>44)</sup>は短時間での溶接によりナゲット端近くに軟化が生じる場合、通常条件に比べCTSが40%近く向上したことを報告している。この結果は軟化領域の有無がCTSに影響を与えるのではなく、その位置が大事であることを示している。

古迫ら<sup>45)</sup>は熱伝導方程式を用いて凝固偏析緩和に必要な後通電時間を検討している。すなわち後通電時間は鋼板が厚いほど長くする必要があり、板厚比の2乗から3乗に比例させる必要がある。

渡辺ら<sup>31)</sup>は1.5GPa級HS鋼板 (t2.0mm) のスポット溶接部より試験片を切り出し、鋼板界面方向の破壊靱性値を測定した。そして後通電を施して凝固偏析が緩和されると、確かに破壊靱性値 ( $J_c$ ) が向上したことを確認している。また若林ら<sup>46)</sup>は後通電有無の十字継手をそれぞれ30体作成し、後通電によりCTSの平均値が向上するとともに標準偏差が小さくなることを報告している。

## 5.3 オートテンパの促進

図14<sup>15)</sup>は3鋼種の継手の十字引張試験後の破断部断面を示す。鋼A (0.08C) では後通電をしなくてもプラグ破断になる。鋼B (0.18C) では前節の短時間後通電を行うことによってプラグ破断となった。しかし鋼C (0.21C) では短時間の後通電では十分な効果が得られなかった。しかし図15<sup>47)</sup>に示すように、後通電時間を長くすることによってCTSを50%程度向

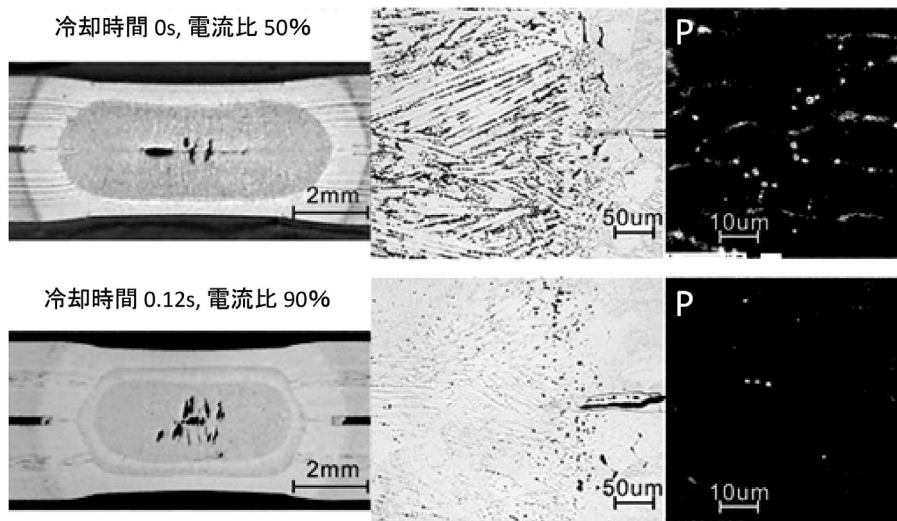
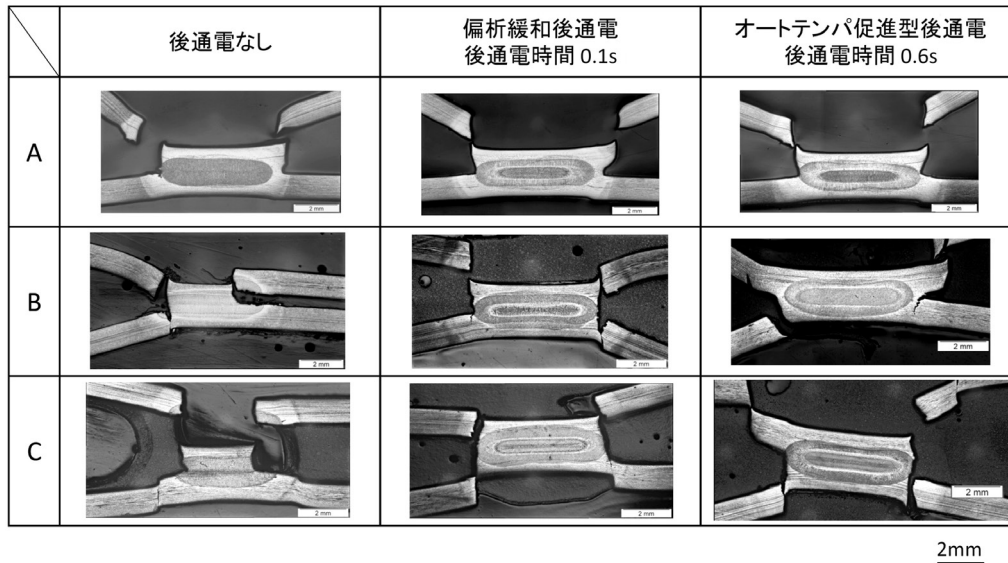
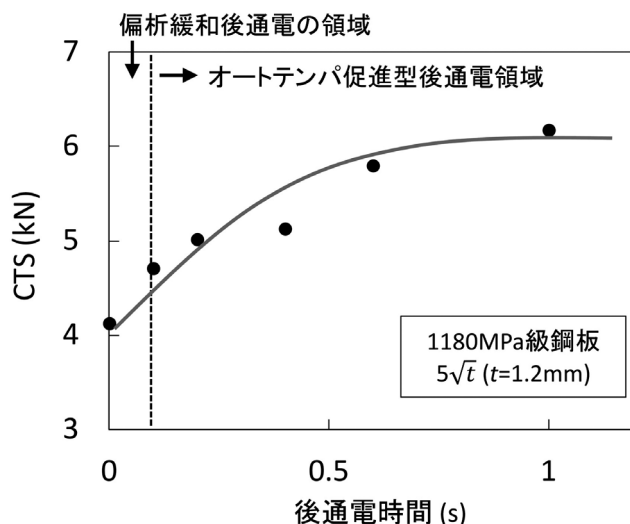


図13 短時間後通電による凝固偏析の緩和効果<sup>38)</sup>



図14 鋼種と後通電方法による破断形式の変化<sup>15)</sup>図15 後通電時間の延長によるCTSの向上<sup>47)</sup>

上させることができた。鋼Cについてスポット溶接部の組織を調べたところ、0.1sの後通電では後通電なしと明確な違いは認められないが、0.6sの後通電では炭化物の析出量が明らかに増えていた<sup>47,48)</sup>。旧 $\gamma$ 粒径が大きくなることから、この現象は長めの後通電によってMs点が上昇し、オートテンパが促進された結果と考えられた。その結果HAZの靱性が向上して図14に示したように延性的なプラグ破断となり、かつCTSが向上したと考えられる。この短時間冷却・中時間後通電によるオートテンパ促進型の後通電法は、偏析緩和後通電だけではCTSの向上が十分ではない、CやMn等の添加元素量が多い場合に有効である。

#### 5.4 テンパ処理による剥離強度の向上

テンパ処理後通電は古くから知られた手法である。本通電終了後、十分長い冷却時間を設けて電極抜熱により溶接部を焼入れ、その後通電して溶接部を焼戻す。冷却に比較的時間が必要となるが、ナゲットを大きくしても剥離強度が高くない材料に対して大きな効果が得られる。

## 6 おわりに

本稿では、スポット溶接について要約して紹介した。アーク溶接、レーザー溶接および摩擦撹拌接合については西山記念技術講座のテキストをご覧ください。幸いです。

#### 参考文献

- 1) 松井仁志：溶接学会誌, 69 (2000) 8, 622.
- 2) 浜田真司監修：季刊新日鉄住金, 8 (2014), 6.
- 3) 樋口健治：自動車技術, 41 (1987) 1, 19.
- 4) 林央：58 (2017) 673, 99.
- 5) 岸田宏司：ふえらむ, 2 (1997) 9, 679.
- 6) 秋末治, 羽田隆司：新日鉄技報, 354 (1994), 1.
- 7) 高橋学：鉄と鋼, 100 (2014) 1, 82.
- 8) 上西朗弘：溶接学会誌, 82 (2013) 7, 32.
- 9) 橋本俊一：自動車技術, 54 (2000) 1, 39.
- 10) 勝倉誠人：工業材料, 55 (2007) 6, 44.
- 11) 樽井大志：溶接学会誌, 84 (2015) 6, 458.
- 12) 末広正芳, 真木純, 楠見和久, 大神正浩, 宮腰寿拓：新日鉄技報, 378 (2003), 15.
- 13) 鈴木貴之：素形材, 55 (2014) 7, 2.

- 14) 佐藤登：表面技術, 44 (1993) 10, 795.
- 15) 鳥塚史郎, 高木節雄, 瀬沼武秀：しなやかで強い鉄鋼材料, エヌ・ティ・エス, (2016), 271.
- 16) 松山欽一, 高橋靖雄, 長谷川和芳：抵抗溶接の基礎と実際, 産報出版, (2011), 228, 29, 19, 27, 232.
- 17) 抵抗溶接教育ポスター, 日本溶接協会・電気溶接機部会編, (1994)
- 18) 近藤正恒：溶接学会誌, 79 (2010) 8, 750.
- 19) 瀬渡賢：溶接学会誌, 72 (2003) 7, 575.
- 20) 溶接学会 軽構造接合加工研究委員会：薄鋼板及びアルミニウム合金板の抵抗スポット溶接, 産報出版, (2008), 35, 88.
- 21) 松井翔, 古迫誠司, 宮崎康信：溶接講概, 99 (2016), 28.
- 22) 棕本厚司, 新明高史, 菊池陵, 福本学, 内原正人, 福井清之：溶接講概, 79 (2006), 382.
- 23) 西田貴之, 伊與田宗慶：溶接講概, 98 (2016), 144.
- 24) 百合岡信孝：溶接学会誌, 61 (1992) 4, 288.
- 25) 楠見和久, 真木純, 及川初彦, 末広正芳：溶接学会誌, 78 (2009) 6, 537.
- 26) 及川初彦, 村山元, 崎山達也, 高橋靖雄, 石川忠：新日鉄技報, 385 (2006), 36.
- 27) 池田倫正：溶接学会誌, 84 (2015) 6, 441.
- 28) 貞末照輝, 伊木聡, 谷口公一, 池田倫正, 大井健次：溶接学会論文集, 32 (2014) 2, 64.
- 29) 渡辺史徳, 古迫誠司, 浜谷秀樹, 宮崎康信, 野瀬哲郎：溶接構造シンポジウム2011講演論文集, (2011), 271.
- 30) 渡辺史徳, 古迫誠司, 若林千智, 宮崎康信, 上田秀樹, 野瀬哲郎：溶接講概, 93 (2013), 324.
- 31) 渡辺史徳, 古迫誠司, 若林千智, 宮崎康信, 野瀬哲郎：溶接講概, 92 (2013), 168.
- 32) 石田欽也, 宮崎康信, 渡辺史徳：溶接講概, 100 (2017), 38.
- 33) 若林千智, 渡辺史徳, 岡田 徹, 古迫誠司, 宮崎康信：溶接講概, 92 (2013), 74.
- 34) 岡田徹, 内原正人, 福井清之, Sullivan Smith, Nick den Uijl, Tony van der Veldt：溶接講概, 83 (2008), 4.
- 35) 岡田徹, 内原正人, 福井清之, Sullivan Smith, Nick den Uijl, Tony van der Veldt：溶接講概, 86 (2010), 106.
- 36) 峰松伸行, 澤西央海, 小椋智, 廣瀬明夫, 谷口公一, 池田倫正, 大井健次, 安田功一：溶接講概, 91 (2012), 300.
- 37) 古迫誠司, 宮崎康信, 濱谷秀樹, 秋庭義明：溶接学会論文集, 33 (2015) 2, 133.
- 38) 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：溶接講概, 89 (2011), 44.
- 39) 谷口公一, 沖田泰明, 池田倫正, 遠藤茂：溶接講概, 87 (2010), 96.
- 40) 谷口公一, 松田広志, 池田倫正, 大井健次：溶接学会論文集, 32 (2014) 3, 164.
- 41) 谷口公一, 池田倫正, 遠藤茂：溶接講概, 90 (2012), 240.
- 42) 谷口公一, 貞末照輝, 伊木聡, 池田倫正, 遠藤茂：溶接講概, 89 (2011), 4.
- 43) 渡辺史徳, 古迫誠司, 宮崎康信, 野瀬哲郎：溶接講概, 90 (2012), 238.
- 44) 岡田徹, 上田秀樹, 泰山正則, 内原正人, 福井清之：溶接講概, 90 (2012), 226.
- 45) 古迫誠司, 宮崎康信, 濱谷秀樹, 秋庭義明：溶接学会論文集, 33 (2015) 2, 160.
- 46) 若林千智, 古迫誠司, 宮崎康信：溶接講概, 95 (2014), 338.
- 47) 若林千智, 泰山正則, 古迫誠司, 宮崎康信：溶接講概, 96 (2015), 38.
- 48) C. Wakabayashi, S. Fyruako and Y. Miyazaki：Science and Technology of Welding and Joining, 20 (2015) 6, 468.

(2019年5月21日受付)

## 第229・230回西山記念技術講座「鋼材の性能を引き出す溶接技術の最先端」テキスト販売中

本稿の講演が掲載された上記テキスト(会員7,047円(税別))を販売しています。

ご注文方法は、本会ホームページでご確認いただくか、下記お問い合わせ先にご連絡下さい。

<https://www.isij.or.jp/publication/books/purchase/>

お問い合わせ先：レタープレス(株) 書籍販売事業部 稲留(高橋、加清)

TEL：03-5817-8617 FAX：03-5817-8618 E-mail：subsals@letterpress.co.jp