硬化領域新成による抵抗スポット溶接重ね継手の高強度化*

北村 貴典**, 秋山 哲也**, 増田 悠***

Strengthening of Spot Welded Lap Joints by New Hardened Zone*

by KITAMURA Takanori**, AKIYAMA Tetsuya** and MASUDA Yu***

This paper deals with the strengthening of spot welded lap joints by new hardened zone. Based on the equation to predict the strength proposed by past researchers, the factors necessary for the strengthening were extracted. And, based on these factors, the strengthening of spot welded lap joints was examined. First of all, in order to increase the hardened zone, the vicinity of the nugget edge was heated with a laser. Next, tensile shear tests were conducted by using spot welded lap joints which were heated by laser at various distances from nugget. Finally, the relationship between tensile shear strength and the distance from nugget center to the crack was clarified. As a result, by increasing the hardened zone, we found that the fracture position was far away from the nugget edge. And, we found that the tensile shear strength could be improved by 15%.

Key Words: Spot welding, Tensile shear strength, Strengthening, Hardened Zone

1. 緒 言

近年、車体軽量化と衝突安全性向上の観点から、自動車車体全体の高剛性化、高強度化が求められている。このような背景の中、スポット溶接継手強度や車体への高強度鋼板の利用に関する検討¹⁻¹⁶⁾が数多くなされている。しかし、素材自体がいくら強くても、破断部は抵抗スポット溶接部となる場合が多く、素材の高強度化のみならず、溶接継手自体の高強度化が必要不可欠である。谷口ら¹⁵⁾や福井ら¹⁶⁾は本通電後の後通電によるP偏析の緩和により、抵抗スポット溶接継手の十字引張強度向上を図っている。一方、抵抗スポット溶接継手の引張せん断強度についてはJIS Z 3140「スポット溶接部の検査方法」において、A級（特に強さを要する溶接部）、B級（強さを要する溶接部）、C級（A級、B級以外の溶接部）等といった溶接部の等級とナゲット径の最小値および平均値の関係が規定されているが、強度向上を図りたければ、ナゲット径を大きくすることしか規定されていない。しかしながら、ナゲット径を大きくするには、用いる電極径の増大とこれに伴う大電流が必要となり、設備上、ナゲット径を大きくできない場合もあり得る。引張せん断強度とナゲット径の関係は原点を通る直線関係にはならず切片を持つような直線関係となること¹⁷⁾が知られており、ナゲット径を大きくし

ても引張せん断強度の増大を十分に図れないおそれもある。ここで、引張せん断強度を予測するための評価式に関して多くの予測式が提案されており¹⁻⁶⁾、特に樺沢ら⁶⁾が報告した引張せん断強度予測式は軟鋼から高強度鋼をカバーするそれまでの提案式の欠点を考慮した式となっている。しかしながら、これらの評価式を元にして、引張せん断強度を向上（強化）させる因子を見だし、その因子を改良することによって、引張せん断強度を向上させる、という発想に到った例は無い。そこで、本研究では樺沢ら⁶⁾が提案した抵抗スポット溶接継手の引張せん断強度予測式を元にして、強度向上に必要な因子を抽出し、この概念に基づいて抵抗スポット溶接重ね継手の高強度化を検討した。

2. 過去の研究者による引張せん断強度予測式に基づく強度改善方法の提案

2.1 過去の研究者による引張せん断強度予測式

はじめに、本報で使用する変数記号を以下のように定義する。

h (mm)：板厚

d (mm)：ナゲット径

D (mm)：破断径（ナゲット中心から破断部までの距離の2倍）

σ_{BM}^B (MPa)：母材引張強さ

El (%)：母材の全伸び

TSS (Tensile Shear Strength) (N)：引張せん断強度

破断がナゲットの外側でプラグ破断する場合を対象として、従来より抵抗スポット溶接重ね継手の引張せん断強度予測式として種々の式が提案されている¹⁻⁶⁾。それらのうち、軟

*受付日 平成24年9月3日 受理日 平成25年4月2日

**正 員 九州工業大学大学院 Member, Graduate School of Engineering, Kyushu Institute of Technology

*** 九州工業大学（現在 住友鋼管(株)） Student, Kyushu Institute of Technology (Present Address SUMITOMO PIPE & TUBE Corporation)

鋼から高強度鋼まで広くカバーしている樺沢ら⁶⁾の提案式を式 (1) に示す。

$$TSS = h \times \sigma_{BM}^B \times (1 + 0.0059El) \times 1.95 \times D^0 \quad (1)$$

ただし、

$D = 1.05 \times (d + 2.09)$: ナゲット周囲が硬化する場合
(軟鋼, 高張力鋼など)

$D = d$: ナゲット周囲が硬化しない場合
(Al, SUS304 など)

2.2 強度予測式に基づいた強度改善因子の抽出と強度改善方法の提案

式 (1) に示す樺沢らが提案した引張せん断強度予測式⁶⁾の元となる応力分布の模式図を Fig. 1 に示す。破断はナゲット

Fig. 1 Stress distribution in tensile shear test specimen

(a) The case of not hardening HAZ by spot welding (ex. SUS304)

(b) The case of hardening HAZ by spot welding
(ex. Mild steel, High tensile steel)

(c) The case of hardening HAZ by spot welding and laser heating

Fig. 2 Concept of strengthening of the spot welded lap joint specimens

に隣接する引張側の母材から局部的に開始し、ナゲットは荷重伝達点であるので全引張荷重が集中するが、ナゲットから十分に離れた位置では応力は試験片の全幅に分布するとしている。

また、式 (1) に示す樺沢らが提案した引張せん断強度予測式⁶⁾での破断位置の考え方を Fig. 2 (a), (b) に、本論文で提案する強度改善方法の考え方を Fig. 2 (c) にそれぞれ模式的に示す。破断径 D (mm) については、後述の Fig. 14 の様に引張せん断試験後の試験片を写真撮影し、ナゲット中心から破断位置までの距離 $D/2$ (mm) を読み取り、その 2 倍の値を破断径 D (mm) とした。Fig. 2 (a) は抵抗スポット溶接によって熱影響による硬化領域が生じない材料 (例えば、SUS304 など) のナゲットと破断位置の相対的な位置関係である。この場合、応力集中部であるナゲット端部で破断する。すなわち、ナゲット径 d と破断径 D は同じになる。一方、Fig. 2 (b) に示す抵抗スポット溶接熱影響部が硬化するような材料 (例えば、軟鋼、高張力鋼など) の場合、硬化した熱影響部の端部で破断し、破断径 D はナゲット径 d より大きくなり、 $D = 1.05 \times (d + 2.09)$ で与えられるとしている。以上から、 TSS を決定する因子は、

h (mm) : 板厚

σ_{BM}^B (MPa) : 母材引張強さ

El (%) : 母材の全伸び

D (mm) : 破断径

である。引張せん断強度 TSS はナゲット径 d (mm) で決定するというよりも破断径 D (mm) で決定される。言い換えれば、破断径 D を大きくすれば、引張せん断強度 TSS は大きくなるはずである。破断径 D を大きくするには、硬さ上昇している領域を大きくしてやればよいことになる。そこで、Fig. 2 (c) に示すように、ナゲット周囲部の硬さ上昇領域を大きくする目的で、デフォーカスしたレーザ加熱することにより、ナゲット端部近傍の硬さを上昇させ、破断位置をナゲット端から遠ざけることによる応力集中の緩和によって TSS を改善できるものと考えた。

3. レーザ加熱によるナゲット端近傍の硬化領域の生成

3.1 供試材料およびレーザ加熱方法

実験には板厚 $h = 1.55$ mm の熱間圧延鋼板 SPHC を用いた。化学成分を Table 1 に示す。母材の引張強さは $\sigma_{BM}^B = 312$ MPa である。硬化領域の生成のためのレーザ加熱の模式を Fig. 3 (a) に示す。ここで、強度向上の観点からレーザ加熱面側だけ硬化するのではなく、加熱裏面まで板厚方向全域において硬化していることが重要である。そこで、冷却速度を大きくする目的で、レーザ加熱線の片側のみ銅ブロックで挟み、挟ん

Table 1 Chemical composition for SPHC

Unit: mass%												
	h	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al
SPHC	1.55	0.03	0.0	0.215	0.011	0.006	0.03	0.03	0.04	0.01	0.002	0.049

Fig. 3 Specimen and jig for measuring thermal cycles by laser heating

Fig. 4 Thermal cycles by laser heating for $v=500\text{mm/min}$

だ端部から 5 mm 離れた位置をレーザ照射する実験の様子を Fig. 3 (b) に示す。上下の銅ブロックをシャコ万力で挟むことで銅ブロックと SPHC 鋼板を密着させて冷却効果を上げる工夫をした。加熱裏面側の加熱線中央部に K 熱電対をとりつけ、レーザ照射による熱サイクルを測定した。レーザ熱源には YAG レーザを用い、レーザ照射条件は、レーザパワー $P=1500\text{W}$ 、ディフォーカス距離 $d_f=24\text{mm}$ 、レーザ熱量分布をガウス分布と仮定した場合のガウス半径 2.3 mm、トーチ移動速度 $v=500\text{mm/min}$ ($=8.3\text{mm/s}$) とした。

3.2 熱サイクル測定結果

鋼板裏面中央部の熱サイクル測定結果を Fig. 4 に示す。太い実線が Fig. 3 (a) に示す銅ブロックを用いなかった場合、細い一点鎖線は Fig. 3 (b) に示すレーザ加熱線片側を銅プロ

Fig. 5 Photo of cross sections of laser heated part

Fig. 6 Vickers hardness distributions for specimen without Cu block

ックで挟んで冷却した場合である。銅ブロックを用いなかった場合（太い実線）と比較して、レーザ加熱線片側を銅ブロックで挟んで冷却した場合（細い一点鎖線）は冷却速度が大きくなっていることから、銅ブロックによって大きな冷却速度向上効果が見られた。

3.3 断面マクロ写真と硬さ分布

銅ブロックを用いなかった場合、または用いた場合のレーザ加熱後の断面マクロ写真を Fig. 5 (a), (b) にそれぞれ示す。写真には溶融部の寸法および熱影響部の寸法を併記している。Fig. 5 (a), (b) に示すように加熱裏面側まで溶融部および熱影響部が達していることが分かる。

Fig. 3 (a) に示した銅ブロックを用いなかった場合の硬さ分布を Fig. 6 に示す。○印は加熱表面から 0.15 mm 内側、△印は加熱裏面から 0.15 mm 内側での測定結果である。母材のビッカース硬さ $HV110\sim120$ に対して、加熱部の最高硬さは $HV130\sim150$ 程度と測定され、大きな硬さ上昇は見られなかった。これは冷却速度が小さかったことが原因と考えられる。

一方、Fig. 3 (b) に示した銅ブロックで加熱線の片方のみ表

Fig. 7 Vickers hardness distributions for specimen with Cu block

Fig. 8 Spot welded lap joint specimen for tensile shear test

裏面から銅ブロックで挟んで加熱した場合のビッカース硬さ分布を Fig. 7 に示す。記号の用法は Fig. 6 と同様である。Fig. 7 に示すように、加熱表裏面で硬さ分布に大きな差はない。また、最高硬さは HV 170～180 程度で分布範囲もおおよそ ± 3.5 mm 程度と幅広く分布している。これは加熱線近傍に設置した銅ブロックによって冷却速度が大きくなり、硬さが上昇したものと考えられる。以上の結果より、Fig. 3 (b) に示すように、加熱線の近傍に銅ブロックを設置して冷却速度を向上させることにより、レーザ照射部に HV 170～180 程度の硬さ上昇範囲を ± 3.5 mm 程度の範囲に生成することが可能であることが分かった。

4. 硬化領域新成による引張せん断強度の高強度化

4.1 引張せん断試験片と引張せん断試験方法

引張せん断試験に用いる抵抗スポット溶接重ね継手試験片形状を Fig. 8 に示す。試験片幅は 30 mm、重ね部は 30 mm とした。抵抗スポット溶接より先に硬化領域生成のための所定の位置を Fig. 3 (b) の条件でレーザ加熱し、その銅板の重ね部の中心に抵抗スポット溶接した。このレーザ加熱と抵抗スポット溶接の順序については 4.2 節で詳細に説明する。抵抗スポット溶接条件を Table 2 に示す。定置式単相交流スポ

Table 2 Spot welding conditions

Current	Weld time	Pressure	Diameter and curvature radius of the top of the tip	Diameter and curvature radius of the tip
(A)	(cycles)	(kN)	(mm)	(mm)
11600	14 (time=0.23s)	3.6	ϕ 6-40R	ϕ 16-8R

Fig. 9 Cross section of spot welded lap joint specimens

Fig. 10 Vickers hardness distributions of spot welded lap joint specimens

ット溶接機を用い、電流 11600 A、溶接時間 14 cycles (溶接電周波数 60 Hz)、加圧力 3.6 kN とし、電極先端径 6 mm、電極先端曲率半径 40 mm の DR 形の銅電極を使用した。引張せん断試験には島津製作所製オートグラフ AG-20kNIST を用い、引張速度は 0.5 mm/min とした。試験片両端から 50 mm の部分を引張試験機のチャック部分とした。チャック間距離は 120 mm である。

4.2 抵抗スポット溶接後の断面マクロ写真と硬さ分布

抵抗スポット溶接部近傍のナゲットとレーザ加熱位置および引張せん断試験における破断位置それぞれの位置関係は Fig. 2 (c) に示す記号のように、ナゲット中心からレーザ加熱中心までの距離を a (mm)、破断径 (ナゲット中心から破断位置までの距離の 2 倍) を D (mm) とする。

抵抗スポット溶接部近傍の断面マクロ写真の一例として、ナゲット中心からレーザ加熱中心までの距離 $a = 4.2$ mm の場

合を Fig. 9 に示す。レーザ加熱による熱影響部が見て取れる。抵抗スポット溶接のみの場合の 2 枚板の合わせ面から 0.15 mm 内側のビッカース硬さ分布を Fig. 10 に示す。母材のビッカース硬さ HV 120 に対して、ナゲット内では HV 200～250 程度まで硬化している。これに対し、抵抗スポット溶接後、ナゲット中心からレーザ加熱中心までの距離 $a=2.9$ mm の位置にレーザ加熱した場合のビッカース硬さ分布を Fig. 11 に示す。Fig. 11 の○印、△印は、Fig. 9 に破線矢印で示す 2 枚板の合わせ面から 0.15 mm 内側の position A、position B の位置の測定結果である。レーザ加熱位置が図の右側となるようにプロットしている。レーザ加熱によって抵抗スポット溶接ナゲット内が焼戻され、抵抗スポット溶接のみの場合の硬さ HV 200～250 程度より軟化していることが分かる。この継手の引張せん断試験を行った結果、破断位置はナゲット端近傍であり、抵抗スポット溶接のみの $TSS=11644$ N に対して、 $TSS=11112$ N と強化されていない結果となった。

一方、レーザ加熱後、レーザ加熱中心からナゲット中心までの距離 $a=2.9$ mm となるように重ねた 2 枚の鋼板の中心を抵抗スポット溶接した場合のビッカース硬さ分布を Fig. 12 に示す。図中の記号の用法は Fig. 11 と同様である。Fig. 10 の抵抗スポット溶接のみの場合と比較して、Fig. 12 のレーザ加熱した場合、硬化領域が広く分布していることが分かる。また、Fig. 10 のようにナゲット部の硬さは抵抗スポット溶接のみの場合の HV 200～250 と同程度であり、レーザ加熱部の硬さも HV 170～180 を維持している。

本研究の目的を実現するためにはナゲット端部近傍に硬化領域が存在していることが重要であり、レーザ加熱と抵抗スポット溶接の工程の順序についてはここでは議論の対象とせず、広範囲の硬化領域が得られた工程順序として、レーザ加熱後にスポット溶接する順序を採用して引張せん断試験用継手を作製した。

4.3 引張せん断試験結果

抵抗スポット溶接重ね継手の引張せん断試験結果をまとめて Table 3 に示す。ナゲット中心からレーザ加熱中心までの距離 a を 1.3 mm から 4.2 mm まで段階的に変化させた試験片を用いた。なお、抵抗スポット溶接のみの継手の結果も併記している。ここで、ナゲット径 d については、引張試験後に、ナゲット中心からレーザ加熱中心までの距離 a が異なる試験片を 1 本ずつ抜き出してナゲット中心で切断し、ナゲット径を測定した。なお、引張せん断試験により引張軸方向にナゲットが引き延ばされ、これに伴い、引張軸と直角方向のナゲット圧痕径（くぼみ径）を表面から撮影した写真から測定したところ、引張せん断試験前後で 0.3 mm 程度小さくなっていた。引張軸方向よりも直角方向の方がその変化は小さいため、この方向に切断し、ナゲット径として測定した。距離 a が最小の $a=1.3$ mm、最大強度を示した $a=2.9$ mm および距離 a が最大の $a=4.2$ mm の場合および抵抗スポット溶接のみの場合の引張せん断試験における荷重－チャック間

Fig. 11 Vickers hardness distributions of lap joint specimens of laser heating after spot welding

Fig. 12 Vickers hardness distributions of lap joint specimens of spot welding after laser heating

Table 3 Experimental results of TSS for spot welded lap joint specimens

h	TSS	δ_{max}	a	D	d
1.55+1.55	10970	7.6	Spot welding only	9.3	6.8
	11644	8.0		9.6	7.2
	11892	10.2	1.3	8.2	6.5
	12296	12.2	1.7	7.8	6.6
	12200	11.8	1.8	8.4	6.5
	12392	13.5	2.0	7.8	6.7
	11864	9.2	2.2	8.2	6.6
	12872	17.5	2.4	9.8	6.7
	13316	19.1	2.9	11.4	6.6
	12724	16.1	3.0	10.4	6.6
	12460	13.2	3.4	8.2	6.3
	13096	18.1	3.5	9.0	6.3
	12116	9.6	4.2	6.8	7.3
	11932	7.9	4.2	8.0	7.3
	12284	9.4	4.2	8.2	7.3

h : Plate thickness /mm TSS : Tensile shear strength /N

δ_{max} : Displacement between chucks on TSS /mm

a : Distance from center of nugget to center of laser heating /mm

D : Fracture diameter /mm d : Nugget diameter /mm

Fig. 13 Load - displacement between chucks diagram for spot welded lap joint specimens after laser heating

Fig. 14 Photo of spot welded lap joint specimens after tensile shear test

変位線図を Fig. 13 に示す。Fig. 13 の太い破線が抵抗スポット溶接のみの場合、細い実線が $a = 1.3 \text{ mm}$ の位置にレーザ加熱した場合、太い実線が $a = 2.9 \text{ mm}$ の位置にレーザ加熱した場合、および太い破線が $a = 4.2 \text{ mm}$ の位置にレーザ加熱した場合である。最大強度を示した $a = 2.9 \text{ mm}$ の場合、破断までのチャック間変位も大きくなっていることが分かる。また、抵抗スポット溶接のみの場合および最大強度を示した $a = 2.9 \text{ mm}$ の場合の抵抗スポット溶接部近傍の引張せん断試験前後の外観写真を Fig. 14 (a), (b) にそれぞれ示す。なお、ナゲットの中心位置は、Fig. 14 に示すようにナゲットの直上から距離表示つきの写真を撮り、電極による圧痕の輪郭に沿って円を描き、円の中心とした。ナゲットの半径はおよそ 3.5 mm である。破断径 $D(\text{mm})$ は Fig. 14 に示すように写真を撮影し、ナゲット中心から破断位置までの距離 $D/2$ を読み取ることで測定した。抵抗スポット溶接のみの場合、破断位置が $D/2 = 4.7 \text{ mm}$ であるのに対して、 $a = 2.9 \text{ mm}$ の位置にレーザ加熱した場合、破断位置が $D/2 = 5.7 \text{ mm}$ とナゲット端から遠い位置になっている

Fig. 15 Relation between TSS and fracture diameter

Fig. 16 Relation between TSS and nugget diameter

ことが分かる。

4.4 ナゲット径と破断位置、引張せん断強度の関係

破断径 $D(\text{mm})$ と引張せん断強度 TSS の関係を Fig. 15 に示す。Fig. 15 中の●印は抵抗スポット溶接のみ、○印はレーザ加熱による硬化領域を付与した場合で破断位置がナゲット端から遠いもの、△印はレーザ加熱による硬化領域を付与した場合で破断位置がナゲット端に近かったものの試験結果である。また、図中の破線は式 (1) を元に TSS と D の関係を表す直線である。抵抗スポット溶接のみのデータと破断位置がナゲット端から遠い○印のプロットは概ね式 (1) の破線上に乗っていることから、式 (1) に従って破断径 D を大きくすることにより、引張せん断強度が大きくなっていることが分かる。一方、△印で示した破断位置がナゲット端に近かったデータは式 (1) の D を大きくする効果ではなく、破断箇所が硬化領域内なので硬化に伴う強度増加であると考えられる。

なお、ナゲット端から離れた位置で破断した○印のデータ

を Table 3 に太字で示す。 a が 2.4~3.5 mm となり、これより a が大きいと破断位置がナゲット端部近傍に戻り、引張せん断強度 TSS も減少することが分かる。

ナゲット径 d と引張せん断強度 TSS の関係を Fig. 16 に示す。記号の用法は Fig. 15 と同様である。各プロット横の添え字は破断径 D の値を示している。なお、抵抗スポット溶接のみの結果 (●印) は、 $D=9.6$ mm の試験片について、実測の破断径 D (mm) から式 (1) の $D=1.05 \times (d+2.09)$ より逆算して求めたナゲット径 $d=7.1$ mm とナゲット中心を切断した断面から測定したナゲット径 $d=7.2$ mm がほぼ一致したので、 $D=9.3$ mm のデータについても $D=1.05 \times (d+2.09)$ より逆算した $d=6.8$ mm でプロットしている。Fig. 16 中の太い破線は式 (1) から得られる直線であり、抵抗スポット溶接のみの結果 (●印) を説明できている。一方、○, △印で示すように、ナゲット径が抵抗スポット溶接のみの場合 (●印) と同程度であっても、レーザ加熱による硬化領域付与の効果で、式 (1) の破線で示した直線から離れて引張せん断強度 TSS が大きくなっていることが分かる。すなわち、レーザ加熱により硬化領域を付与した試験片では、ナゲット径 d (mm) ではなく、硬化領域を付与したことによってナゲット端の応力集中部から破断位置を遠ざける効果と破断箇所が硬化領域内となることのそれぞれの効果で破断位置ならびに継手強度が決定されていることが分かる。継手強度は、抵抗スポット溶接のみの場合の引張せん断強度約 11300 N と比較して、約 13000 N 程度と約 15% 程度の強度向上が図れた。また、式 (1) の太い破線を基にすると、ナゲット径 d を約 8 mm 程度まで大きくしなければ、抵抗スポット溶接のみで $TSS=13000$ N を達成できないことから、本手法の有効性が確認できる。

5. 結 言

抵抗スポット溶接重ね継手の引張せん断強度について、過去の研究者による強度予測式を元にして、強度向上に必要な因子を抽出し、この概念に基づいて抵抗スポット溶接継手の高強度化を検討したところ以下の知見が得られた。

- 1) 強度向上には破断位置をナゲット端部から遠ざけることが有効である。
- 2) 破断位置をナゲット端部から遠ざけるために、レーザ加熱による硬化領域をナゲット端部近傍に生成させることは有効である。
- 3) 硬化領域を大きくすることにより、破断位置がナゲット端から遠ざかり、その結果として、引張せん断強度をおよそ 15% 程度の高強度化できた。

参 考 文 献

- 1) J. Heuschkel: The Expression of Spot-Weld Properties, *Welding Journal*, 31-10 (1952), 931s-943s.
- 2) B. Pollard: Spot Welding Characteristics of HSLA Steel for Automotive Applications, *Welding Journal*, 53-8 (1974), 343s-350s.
- 3) J. M. Sawhill, JR., J. C. Baker: Spot Weldability of High-Strength Sheet Steels, *Welding Journal*, 59-1 (1980), 19s-31s.
- 4) J. M. Sawhill, JR., S. T. Furr: Weldability Considerations in the Development of High-Strength Sheet Steels, *Welding Journal*, 63-7 (1984), 203s-212s.
- 5) J. Tanaka, M. Kabasawa, M. Ono and M. Nagae: Spot Weldability of High Strength Steel Sheets, *NihonKoukanGihou*, 105 (1984), 72-81. (in Japanese)
- 6) M. Kabasawa, Y. Funakawa, K. Ogawa and M. Tamura: Estimation of Tensile Shear Strength of Spot Welded Joint of Steel Sheets, *Quarterly Journal of the JWS*, 14, 4 (1996), 754-761. (in Japanese)
- 7) K. Yamazaki, K. Satoh and Y. Tokunaga: Static and Fatigue Strength of Spot Welded Joints of Ultrahigh Strength Steel Sheets, *Quarterly Journal of the JWS*, 17, 4 (1999), 553-560. (in Japanese)
- 8) M. Ono: 自動車用高強度薄鋼板のスポット溶接性, *Yousetsu Gijyutsu*, 3 (2003), 77-82. (in Japanese)
- 9) Y. Sakuma, H. Oikawa: Factors to Determine Static Strengths of Spot-weld for High-strength Steel Sheets and Developments of High-strength Steel Sheets with Strong and Stable Welding Characteristics, *ShinnittetsuGihou*, 378 (2003), 30-34. (in Japanese)
- 10) Yuh J. Chao: Ultimate Strength and Failure Mechanism of Resistance Spot Weld Subjected to Tensile, Shear, or Combined Tensile/Shear Loads, *Transactions of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology*, 125, APRIL (2003), 125-132.
- 11) H. Oikawa, G. Murayama, T. Sakiyama, Y. Takahashi and T. Ishikawa: Resistance Spot Weldability of High Strength Steel (HSS) Sheets for Automobile, *Shinnittetsu Gihou*, 385 (2006), 36-41. (in Japanese)
- 12) E. Nakayama: 超小型試験片による局所材料強度特性評価-スポット溶接継手の強度予測への応用-, *Journal of the JWS*, 75, 6 (2006), 7-11. (in Japanese)
- 13) Xin Sun, Elizabeth V. Stephens, Mohammad A. Khaleel: Effects of fusion zone size and failure mode on peak load and energy absorption of advanced high strength steel spot welds under lap shear loading conditions, *Engineering Failure Analysis*, 15 (2008), 356-367.
- 14) M. Balasubramanian, V. Balasubramanian: Effect of process parameters on SPRC35 spot welded automotive panels, *Acta Metallurgica Sinica (English letters)*, 23-3 (2010), 185-190.
- 15) K. Fukui, H. Fujimoto: Mechanism of improved joint strength of high strength 0.1% P steel.: Study on improving the strength of spot welded joints of high tensile strength steel sheets, *Preprints of the National Meeting of JWS*, 62 (1998), 228-229.
- 16) K. Taniguchi, Y. Okita, R. Ikeda, S. Endo: Development of resistance spot welding with pulsed current pattern for high strength steel sheets, *Preprints of the National Meeting of JWS*, 87 (2010), 96-97.
- 17) Joining and Materials Processing for Light Structures Japan Welding Society: *Usukouhan oyobi Aluminum Goukin no Teikou Spot Yousetsu*. 60 (in Japanese)