

抵抗スポット溶接システムSmartRSW[®]を用いた 鉄道車両の圧痕外観向上に関する研究

Study of Technology to Improve the Indentation of Resistance Spot Welding by Close Control of the Electrode Force

渥美健太郎 Kentarou ATSUMI
大塚陽介 Yosuke OTSUKA

河田直樹 Naoki KAWADA
阿部千明 Chiaki ABE

ステンレス鋼製鉄道車両構体は主として抵抗スポット溶接で製造されている。その溶接施工部には圧痕が形成されるが、側構体に代表されるような箇所では圧痕の外観も製品品質に含まれてくる。そこで、圧痕の形成メカニズムをあらためて確認し、抵抗スポット溶接における加圧力、電流値に着目し従来工法よりも細かく制御することで、圧痕形状の改善を行った。

その結果、溶接プロセス中の加圧力をプロセスごとに制御することで圧痕形状の改善効果が確認できたので報告する。

The railway vehicle of stainless steel is generally manufactured from the resistance spot welding. This welding method makes indentation at surface of material. The appearance of indentation at side body structure is included in quality of manufacture. Then, the mechanism of the indentation generation in resistance spot welding was reviewed, and the appearance of indentation was improved by the way of close control of the electrode force.

As a result, appearance of indentation was improved by the way of control of the electrode force at every scene in welding process.

1 はじめに

当社の主力製品である在来線通勤型車両は、ステンレス鋼製が主流となっているが、その車両構体の製造では抵抗スポット溶接を中心に接合が行われている。抵抗スポット溶接は溶接施工した材料表面に圧痕が形成されるが、圧痕は部位によっては製品の外観にも影響を与えることがある。鉄道車両の側構体はその好例と言える。よって、「JRIS-W0161 鉄道車両—作業標準—ステンレス鋼材のスポット溶接」の規準を確保しつつ、圧痕の外観を向上することは製品の品質向上に直結するものと考えられる。

本稿では圧痕部の外観向上を目的とし、まず抵抗スポット溶接機の主に加圧機構に着目して、圧痕形状に加圧機構が与える影響について調査を実施した。その後、抵抗スポット溶接システムであるSmartRSW[®]を開発し溶接プロセスを従来以上に細かく制御することで、圧痕部の外観向上について検討を実施した。その結果、溶接プロセス中の加圧力が圧痕部外観に大きな影響を与えることを確認し、圧痕部外観の向上を達成したので報告する。

2 抵抗スポット溶接の原理

2. 1 溶接プロセス

抵抗スポット溶接の一般的な溶接プロセスを図1に示す。抵抗スポット溶接はそのプロセスをスクイズ時間、通電時間、ホールド時間の3つに分けることができる。材料の溶融は通電時間に行われ、その際に材料に与えられる熱エネルギーは、主にジュール発熱によって定義されており、式(1)で示される¹⁾。

$$Q=0.24 I^2 R t \dots\dots\dots (1)$$

式(1)の各項より、ジュール発熱量Qは電流値I、電気抵抗R、通電時間tの関数である。ここで電気抵抗Rは材料の固有抵抗、電極—被接合物の表面間の接触抵抗、被接合物同士の接触面(溶接部)の接触抵抗の和である。このうち、接触抵抗は加圧力Pによって制御することができ、加圧力Pを増加させると電気抵抗Rは減少することが知られている。すなわち、適正な溶接結果を得るためには、溶接プロセス中の電流値I、加圧力P、通電時間tを適正な値に設定することが重要となってくる。

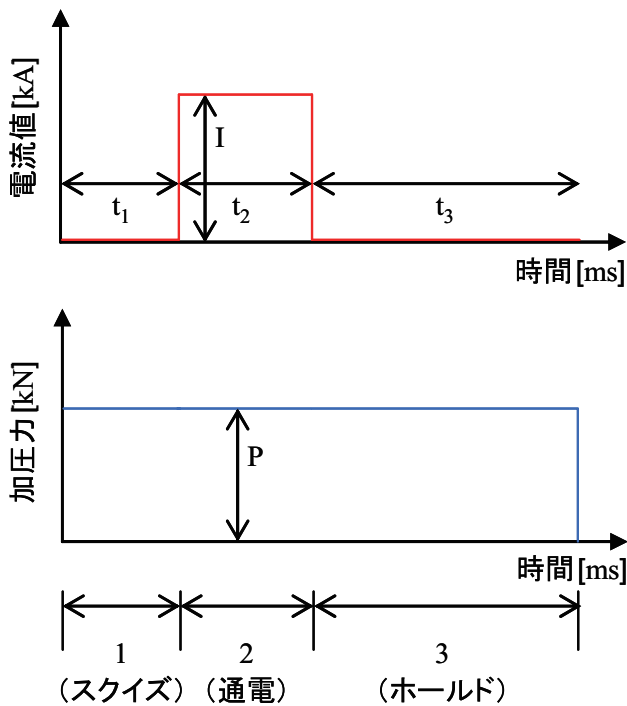


図1 一般的な溶接プロセス

2. 2 加圧機構と圧痕外観

ステンレス鋼製鉄道車両の側構体におけるスポット溶接の例を図2に示す。材料（図中では骨組相当の板と外板相当の板の2枚）を電極（上側は $\Phi 12$ 、下側は表面がフラットな銅板電極）によって挟み込み、加圧力 P および電流値 I を材料に与えることで接合を行う。ステンレス鋼製鉄道車両の側構体製造時には、図2中の点線で示した面の圧痕外観が特に問題になる場合がある。

ステンレス鋼製鉄道車両の側構体における良好な圧痕外観とは、圧痕径が小さく、圧痕高さ（外板表面から圧痕の最も高い点までの高さ）および圧痕深さ（圧痕の最も高い点と低い点との距離）が小さい状態を指す。

ところで圧痕外観は電流値 I や加圧力 P のほかに、加圧機構によっても影響を受ける。加圧機構には空圧式と電気サーボ式があるが、銅板電極を使用する場合は特に加圧機構のもつ特性によって圧痕外観は同じ溶接条件であっても大きく異なる場合がある。加圧機構ごとの圧痕部の例を表1に示す。

表1中の断面形状の波形は上が材料側、下が銅板側を示し、圧痕外観の画像は銅板側の圧痕形状を示している。

まず、空圧式で通常の電極と銅板電極を用いた際の圧痕外観は、電気サーボ式と比較して圧痕径が大きくなる傾向にあるが、圧痕中央部の圧痕深さは電気サーボ式と比較して浅い。一方、電気サーボ式では圧痕径は空圧式と比較して小さくできるものの、圧痕深さは空圧式と比較して深い（加圧力指令値が一定の場合）。

圧痕形状の改善を検討する場合、圧痕径を小さく抑えることができ、加圧力を溶接プロセス中に任意に変化させることができる点で電気サーボ式の方が有利であると考えられる。ここで圧痕形状を改善するうえで最大の焦点となるのが電気サーボ式で施工した際の圧痕深さが空圧式と比較して深い点であるが、その原因に関する検証を行った。

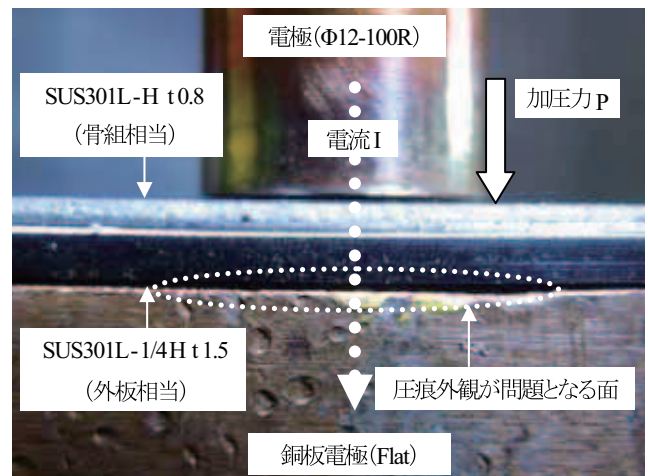
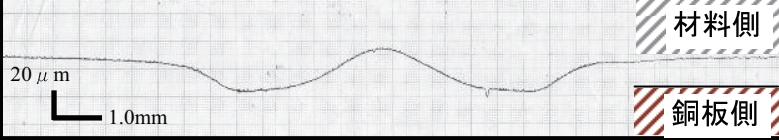
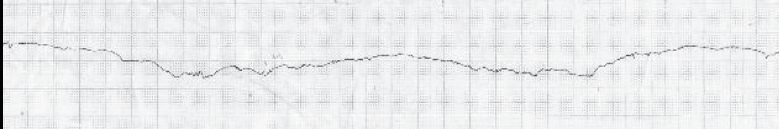


図2 溶接施工方法（側構体製造の例）

表1 加圧機構と圧痕形状

	表面形状	圧痕外観	圧痕高さ	圧痕深さ	圧痕径
			[μm]	[μm]	[mm]
電気サーボ式			27	32	5.6
空圧式			24	16	8.0

2. 3 加圧機構と電極挙動

スポット溶接時の電極の挙動について検証するため、材料の横方向から溶接プロセス中に定点観測を行った。その際の溶接条件を表2に示す。なお定点観測では、電極の挙動を捉えやすくするために材料はSUS304 t2.0の2枚合わせとした。

表2 溶接条件

	スクイズ(1)	通電(2)	ホールド(3)
電流値(I)	—	6kA	—
時間(t)	1200ms	600ms	1200ms
加圧力(P)	8kN		

電極の挙動について定点観測を行った結果を表3に示す。図中の矢印はスクイズ時の銅板から上部電極の溝までの基準の距離を示しており、それぞれの加圧機構の列内の矢印は全て同じ長さである。

まず空圧式では材料に電極が接触した後、通電時には材料の発熱にともなう熱膨張によって電極の高さがわずかに上昇していることが、基準長さの矢印と電極の溝の間に隙間があることから確認でき、変位量は約290 μm であった。その後、ホールド時には材料の熱収縮にともなって電極の高さはふたたびわずかに下降している。これは、シリンダ内部のエアがダンパの役割を果たしているためと考えられる。この効果により空圧式ではホールド時のまだ材料が柔らかいわずかな時間に電極直下の材料が銅板側にわずかに押し出され、熱収縮によって銅板側の圧痕深さが深くなるのを軽減しているものと考えられる。

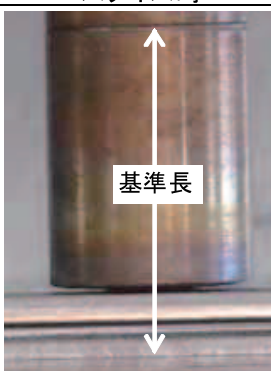
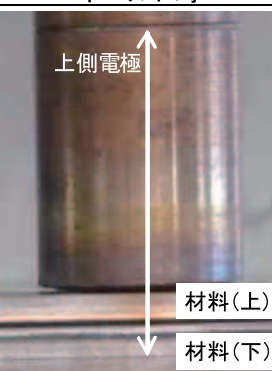
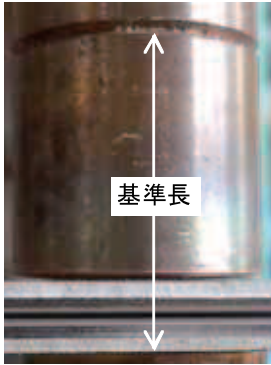
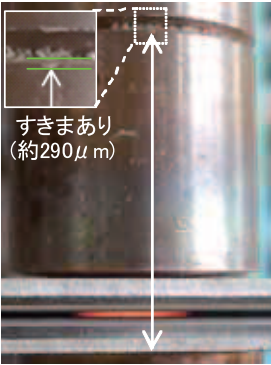
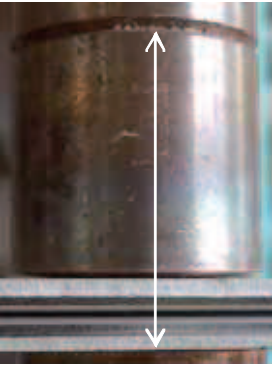
電気サーボ式では材料に電極が接触してからホールド終了時まで、電極の高さは変わらない。これは電気サーボ式の加圧制御がトルクリミッタ機能（モータの電気子電流を検出）を利用しており^②、溶接中はモータの回転が止まっているため電極の高さも変化しないと考えられる。よって、ホールド時の熱収縮が生じても空圧式のようなダンパ効果生まれず、結果として圧痕深さが空圧式と比較して大きくなるものと考えられる。

以上のことから、電気サーボ式の加圧機構と銅板電極を用いたスポット溶接において、溶接プロセス全体を通して加圧力の指令値が一定の条件のもとでは、銅板側の圧痕深さが空圧式と比較して大きくなるのは加圧機構の構造上仕方ないことと言える。

そこで、電気サーボ式の加圧機構で銅板電極を用いる場合、銅板側の圧痕深さを改善するには空圧式の電極と同等の挙動をするように加圧力を設定すればよいと考えられる。つまり、ホールド時の加圧力の指令値を高く設定する（結果として電極を材料にさらに押し込む）ことが重要となってくるものと考えられる。

そこで、電気サーボ式加圧機構を用いて溶接中の加圧力をプロセスごとに変化させることを念頭に、抵抗スポット溶接システムの開発を行った。

表3 加圧機構と電極挙動

	スクイズ時	通電時	ホールド時
電気サーボ式			
空圧式			

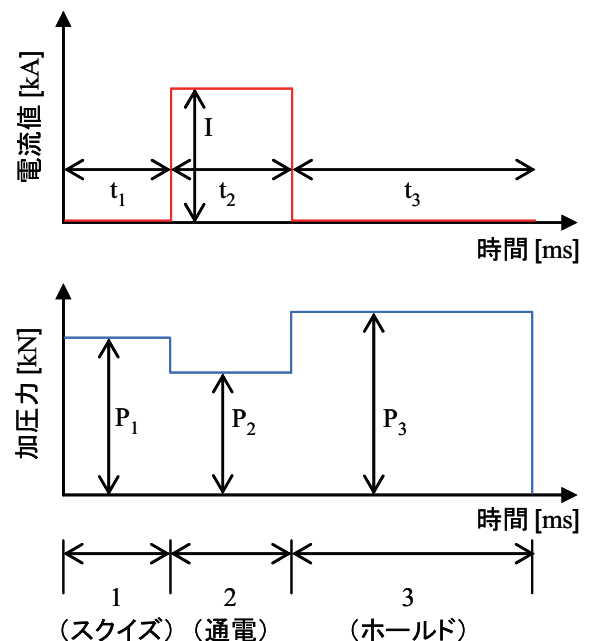
3 SmartRSW[®]概要

本稿で開発した抵抗スポット溶接システムSmartRSW[®]の主な仕様を表4、溶接プロセスを図3に示す。SmartRSW[®]は状態監視機能と可変加圧機能の2つの特徴を有する抵抗スポット溶接システムである。状態監視機能は、主要部位にセンサーを取り付け、溶接時の状態監視を可能とする機能であり、既存の技術⁽²⁾を用いて溶接中の加圧力や電流値等をリアルタイムに測定することができる。

表4 SmartRSW[®]の主な仕様

項目	仕様
入力電圧	3相400V, 50/60Hz
定格容量	280kVA
トランス	直流インバータ
2次側最大電流	直流12kA
電極加圧力	最大9.8kN
電極加圧方式	サーボモータによる直動制御 溶接プロセス中に可変する機能を有する
電極形状	Φ12-100R(上), Flat(銅板電極)(下)
状態監視機能	1次側電圧・溶接電流・通電時間・ 電極加圧力・冷却水流量・冷却水温度

一方可変加圧機能は、これまでの空圧式では電極加圧が溶接プロセス中は一定であったのに対し、電気サーボ式にすることで溶接中の加圧力 ($P_1 \sim P_3$) を図3のようにプロセスごとに任意に設定できるようになり、空圧式の加圧機構より細かな加圧力制御が可能となっている。また、指令に対して空圧式よりも素早い応答性も有している。

図3 溶接プロセス (SmartRSW[®])

4 溶接条件パラメータと溶接結果の関係

SmartRSW[®]を用いて本章ではJRISの断面試験に関する規定値を満足しつつ、銅板電極側の圧痕形状の改善を試みた。4.1節ではJRISの規準を満たすナゲットを得られる溶接条件範囲の探索、4.2節ではほぼ同等のナゲット径を得られる複数の溶接条件における圧痕形状の比較、4.3節ではホルド時の加圧力と圧痕形状の関連について検証を行い、圧痕形状の改善を試みた。

4. 1 加圧力・電流値と溶接結果の関係

鉄道車両の構体製造で使用する抵抗スポット溶接の溶接条件は、その溶接結果が「JRIS-W0161 鉄道車両—作業標準—ステンレス鋼材のスポット溶接」に定められた規定値を満たすことが大前提となっている。そこで、代表的な2枚合せの板厚組合せについて、JRIS-W0161で定められた規定値を満たす溶接結果が得られる溶接条件範囲の探索を行った。材料はSUS301L-H t0.8 + SUS301L-1/4H t1.5を対象とし、その際の溶接条件を表5、断面試験での測定位置を図4、JRIS-W0161の断面試験に関する規定値を表6、断面試験結果を図5に示す。

まず、それぞれの加圧力 P_2 において電流値 I を増加させるとナゲット径は大きく増加しており、これは式(1)で電流値 I が2乗項であることから当然の結果と言える。一方、通電中の加圧力 P_2 を増加させるとナゲット径は減少するが、ナゲット径に与える影響は電流値ほど大きくはないことが分かる。しかし、ナゲットを生成することができる電流値の範囲は加圧力 P_2 の増加にともなって拡大しており、通電中の加圧力 P_2 を大きくとれば溶接条件の選択の幅が広がることを示している。ところで、今回の組合せではJRISで決められている断面試験におけるナゲット径の規定値は3.6mmである。実施工においては何らかの外乱によって同一条件であってもナゲット径が多少小さくなってしまいがちが起こりうる。その点を考慮し、規定値よりも少し大きい4.1mm程度の大きさのナゲット径を得られる溶接条件を表7で示した。これらの溶接条件から施工時の溶接条件を決定するわけだが、次節ではこれらの溶接条件で施工した際の銅板電極側の圧痕形状について調査した。

表5 溶接条件

	スクイズ(1)	通電(2)	ホルド(3)
電流値(I)	—	2~13kA (1kA刻み)	—
時間(t)	150ms	180ms	800ms
加圧力(P)	P2と同一	2~8kN (1kN刻み)	P2と同一

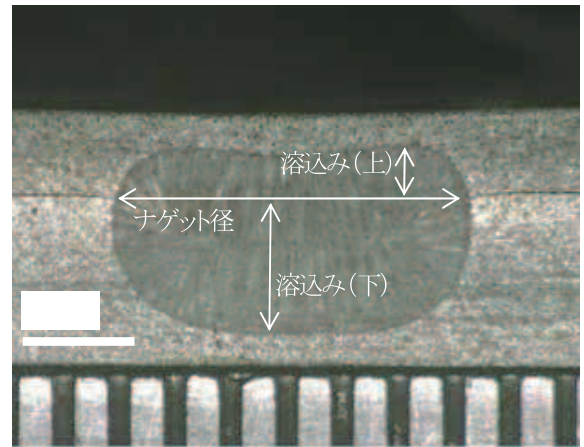


図4 測定位置

表6 断面試験の規定値 (JRIS-W0161)

項目	規定値(JRIS-W0161による)
溶込み	(上) 板厚の20~90%
	(下) 板厚の20~90%
ナゲット径	3.6mm(外側の薄い方の板厚によって異なる)
内部欠陥	ナゲット径の25%以下

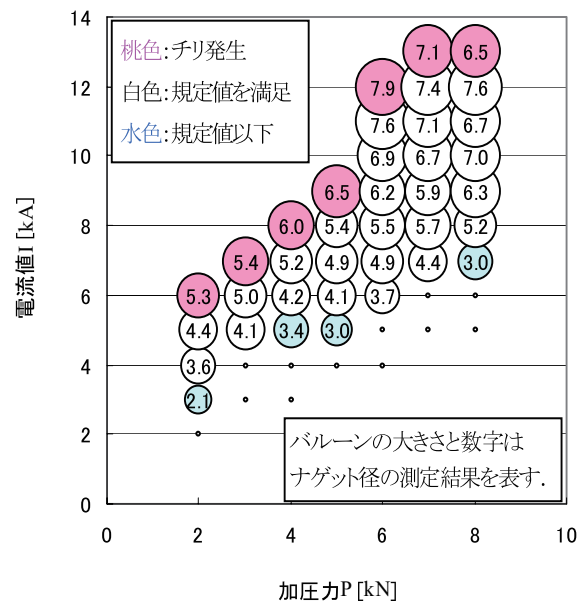


図5 加圧力・電流値とナゲット径の関係

表7 溶接条件とナゲット径

	電流値 I	加圧力			通電時間 t_2	ナゲット径	
		P_1	P_2	P_3		測定値	規定値
単位	[kA]	[kN]	[kN]	[kN]	[ms]	[mm]	[mm]
①	5.0		2.0		180	4.4	3.6
②	5.0		3.0		180	4.1	
③	6.0		4.0		180	4.2	
④	6.0		5.0		180	4.1	
⑤	7.0		7.0		180	4.4	

4. 2 通電中の加圧力と圧痕形状の関係

次に、加圧力 P_2 が圧痕形状に与える影響について検証を行った。今回は4.1節で施工した溶接条件のうち、JRISの規定値（ナゲット径：3.6mm）より少し大きい4.1mm程度のナゲット径を得られる溶接条件で圧痕形状を比較した。その溶接条件とナゲット径を表7、粗さ計で測定した圧痕形状の測定結果を表9、その際に使用した粗さ計の諸元を表8に示す。

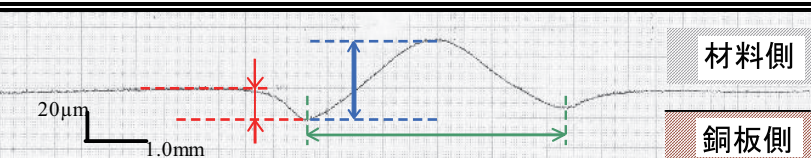
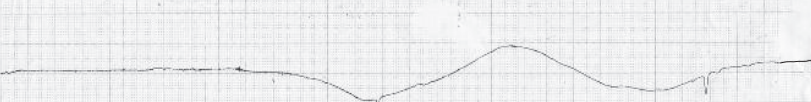
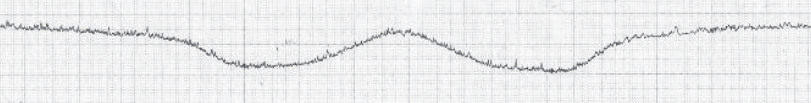
まず、加圧力 P_2 を高い値に設定した場合、所望のナゲット径を得るには、それに付随して電流値 I も高い値に設定する必要があることが表7から分かる。これは式(1)で加圧力 P を大きくすると電気抵抗 R が減少し、同等の入熱量 Q を得るには電流値 I を大きくする必要があることと一致する。また、加圧力 P_2 を高く設定するほど圧痕径、圧痕高さが増加する傾向にあることが表9から分かる。これは加圧力が高いほど、発熱によって軟化した材料が電極によって銅板側へ押され、大きな圧痕を形成することを示している。よって、より良好な圧痕（ここでは圧痕径および圧痕高さが小さい圧痕のこと）を得るには、加圧力 P_2 を低く設定する必要があることが分かった。

しかし、低すぎる加圧力は材料が元々持っている歪を押さえ込むことが出来ない可能性があるため、実施工的には加圧力 P_2 は3.0kN以上が妥当であるものと考えられる。また、電流値 I は低い方が熱ひずみが少なく抑えられるため、今回実施した溶接条件の中では5.0kAが適切であるものと考えられる。しかし、4.0kAでは全くナゲット径が得られていないため、少しでも電流値が低い方へばらつけばすぐにナゲット径がJRISを下回る危険性がある。よって電流値 I は安全のため5.5kA程度が妥当であると考えられる。次節ではホールド加圧力 P_3 が表面形状に与える影響について検討した。

表8 粗さ計諸元

型式	SURFCOM 120A
駆動速度	0.6mm/s
測定子	ダイヤモンド 5 μ R90°円錐
駆動長	0.2～30mm(0.1mm単位)
カットオフ値	粗さ曲線:0.08,0.25,0.8,2.5mm
	ろ波うねり曲線:0.8mm ろ波中心線うねり曲線:0.8～8mm

表9 表面形状

	表面形状	ナ ゲ ッ ト 径	圧 痕 高 さ	圧 痕 深 さ	圧 痕 径
		[mm]	[μ m]	[μ m]	[mm]
①		4.4	22	52	4.7
②		4.1	24	36	5.5
③		4.2	27	32	5.6
④		4.1	28	26	5.8
⑤		4.4	30	28	6.3

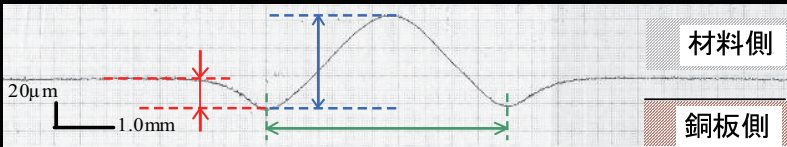
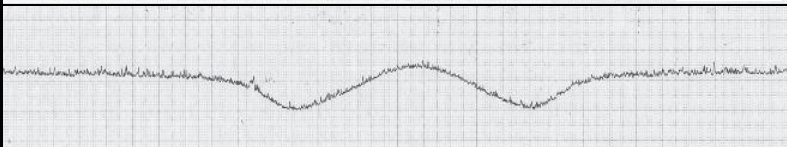
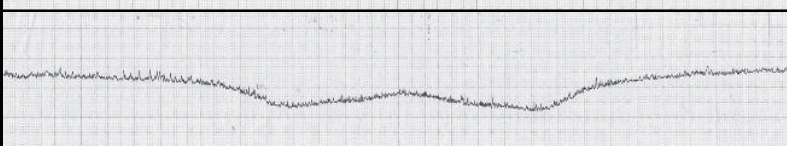
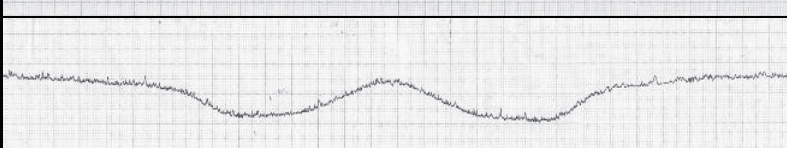
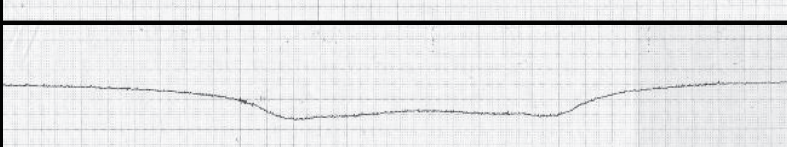
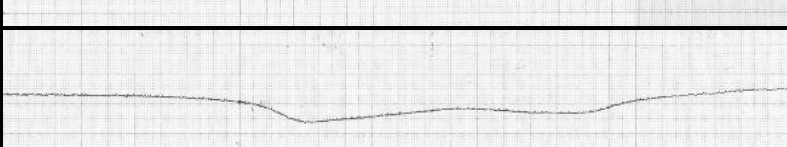
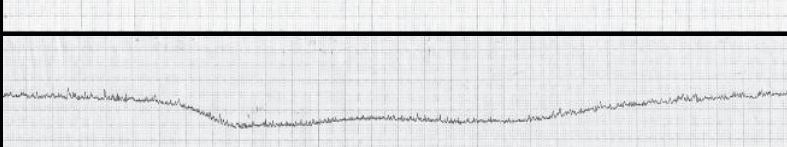
4. 3 ホールド加圧力 P_3 と圧痕形状の関係

次にホルドの加圧力 P_3 と圧痕形状の関係について検討を行った。その際の試験条件を表10、粗さ計で測定した圧痕形状の測定結果と圧痕外観を表11に示す。ホルド加圧力 P_3 を増加させると圧痕深さは減少し、圧痕深さが $30\mu\text{m}$ 程度までは圧痕中央部にあるくぼみが目立つが、 $15\mu\text{m}$ 以下になるとほとんどくぼみの存在は目立たなくなることが分かる。また、圧痕の形状も加圧力 P_3 を大きくするほど圧痕径が多少増加するものの、全体的になだらかな形状になることが分かった。

表10 試験条件

	電流値	加圧力			通電時間
	I	P_1	P_2	P_3	t_2
単位	[kA]	[kN]	[kN]	[kN]	[ms]
⑥	5.5	3.0		2.0	180
⑦	5.5	3.0		3.0	180
⑧	5.5	3.0		4.0	180
⑨	5.5	3.0		5.0	180
⑩	5.5	3.0		6.0	180
⑪	5.5	3.0		7.0	180
⑫	5.5	3.0		8.0	180

表11 表面形状

	P_3 [kN]	表面形状	ナゲツト径	圧痕高さ	圧痕深さ	圧痕径	圧痕外観
			[mm]	[μm]	[μm]	[mm]	
⑥	2.0		4.1	22	68	4.6	
⑦	3.0		4.2	22	30	4.5	
⑧	4.0		4.6	25	14	4.8	
⑨	5.0		4.4	24	16	4.9	
⑩	6.0		4.5	26	6	5.0	
⑪	7.0		4.5	26	8	5.2	
⑫	8.0		4.4	24	6	5.2	

さらに、ホールド時の加圧力 P_3 と圧痕深さ、圧痕高さおよびナゲット径の関係を図6に示す。圧痕深さは加圧力 P_3 に反比例して減少する傾向が見られた。これはホールド時の加圧力 P_3 を高く設定することで電極が材料に押し込まれ、空圧式のダンパ効果を再現することができ、結果として圧痕深さが減少したと考えられる。一方で、ホールド加圧力 P_3 の設定値に対してナゲット径は大きな変化は見られず、ホールド加圧力 P_3 はナゲット径とは関係なく任意に選択可能であることを示している。

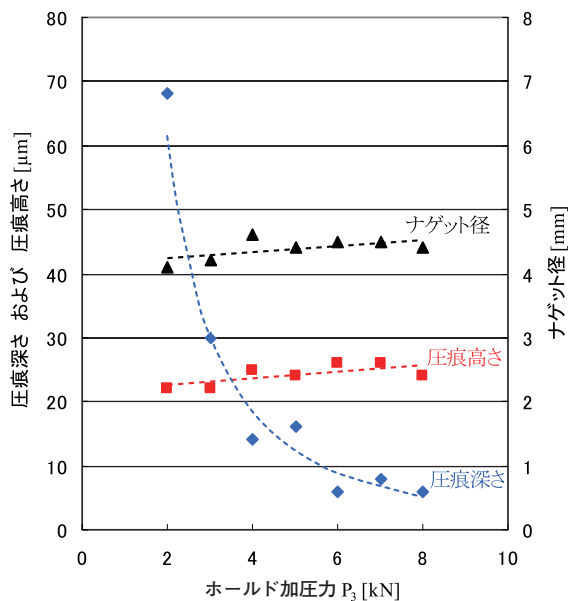


図6 ホールド加圧力 P_3 と圧痕寸法

5 まとめ

外観が品質に含まれる箇所に施工する抵抗スポット溶接の圧痕部に対して、加圧機構が圧痕外観に与える影響とその改善について検討を実施した。その結果を以下にまとめる。

- (1) 電気サーボ式の加圧機構により可変加圧機能を有する抵抗スポット溶接装置であるSmartRSW[®]を開発し、溶接プロセス中の加圧力を変化させることで従来よりも圧痕外観の品質向上を達成した。
- (2) 片側が銅板電極を使用した際の銅板側の圧痕形状は、その装置の加圧機構の影響を受ける。空圧式の加圧機構の場合、シリンダのもつダンパ機能と熱膨張の影響によって溶接プロセス中に上側の電極がわずかに上下する。このため、銅板側の圧痕深さは比較的浅い。
- (3) 電気サーボ式の加圧機構の場合、サーボシリンダに

は空圧式のようなダンパ機能が構造的に無いため、溶接中に熱膨張しても電極位置は変わらない。このため、片側に銅板電極を用いて一定の加圧力指令値のもとで溶接を行うと銅板側の圧痕深さは空圧式と比較して深くなる。

- (4) 電気サーボ式の加圧機構で圧痕深さを浅くするためにはホールド時の加圧力を高く設定することで達成でき、その加圧力はナゲット径に影響を与えない。
- (5) 通電中の加圧力は低く設定することで圧痕高さや圧痕径を小さくできるが、材料の歪の影響を受けやすくなり、選択可能な電流値が狭まることが考えられる。よって、通電中の加圧力は3.0kN以上が望ましい。

本稿では代表的な板厚組合せについてJRISに基づいた検討を行ったが、実施工では数多くの板厚組合せが存在している。今後は他の組合せについても検討を進める。

参考文献

- (1) 奥田滝夫, 他: 「スポット溶接入門」, 23-25, (1986), 産報出版
- (2) 松山欽一, 他: 「抵抗溶接の基礎と実際」, 72-73, (2011), 産報出版
- (3) 古川一敏, 他: 「新しい抵抗溶接機の開発とその適用」, 溶接技術, 62-68, (2008), 産報出版

著者紹介



渥美健太郎
生産本部
技術部（溶接センター）



大塚陽介
技術士（金属部門）
生産本部
技術部（溶接センター）主任



河田直樹
博士（工学）
生産本部
技術部（基礎開発）主査



阿部千明
生産本部
技術部（溶接センター）主査