

# 飲料缶の抵抗シーム溶接性と等価的接触抵抗の関係

清水 信義\*・林田 貴裕\*・西本 信幸\*<sup>2</sup>・深井 潤\*<sup>3</sup>・宮武 修\*<sup>3</sup>

Relation between Equivalent Contact Resistance and Resistance Seam Weldability for Beverage Cans  
*Nobuyoshi SHIMIZU, Takahiro HAYASHIDA, Nobuyuki NISHIMOTO, Jun FUKAI and Osamu MIYATAKE*

**Synopsis :** Welded cans for beverages amount to over 1 million cans/year and take an important role in the field of steel package industry. Under the intense competition among other materials, can cost reduction and high productivity, which usually lead to the worse weldability, must be overcome steadily.

Until recently, several authors reported that the static electric contact resistance between welded materials strongly influenced weldability. However, the static contact resistance could not be the index of the dynamic high speed welding. The weldability using high speed seam welder was hardly experimented and discussed quantitatively because the dynamic electric resistance could not be divided into the contact resistance and the bulk resistance.

In this report, the effects of the main parameters on weldability, namely tin coating weight, steel thickness and welding speed, were investigated in connection with the equivalent contact resistance by subtracting the calculated bulk resistance from the measured total resistance during high speed welding.

It made clear that the contact length between material and electrode correlates with the available welding current range. The weldability deteriorated with the decrease of tin coating weight and the decrease of steel thickness because of the increased contact resistance and with the increase of welding speed because of the increased discontinuity of HAZ pattern.

**Key words :** welding ; weldability ; equivalent contact resistance ; contact length ; weldable current range.

## 1. 緒言

鋼板を使用した飲料缶、食缶、エアゾール缶などの製缶方法として、抵抗シーム溶接法が広く用いられている。近年、空缶価格のコストダウンと生産性向上を目的に、(1)溶接速度の高速化(2)溶接材料の薄板化(3)鋼板の表面処理皮膜の減少が進められているが、これらの対策はいずれも溶接性の低下を伴うことが知られている。この原因を探るために静的な電気抵抗と溶接性の関連性が検討され、静的な電気抵抗の増加とともに溶接性が低下することが明らかにされている<sup>1-3)</sup>。しかし、実際の溶接の接合部は1000°C以上の高温になり、材料の母材抵抗が無視できないので、静的な電気抵抗は、溶接性の正確な指標にはならないと考えられる。一方、シーム溶接時の動的な電極間電気抵抗と溶接性の関連性に関しては、測定方法の煩雑さもあり、低速溶接機(1~25m/分)を用いてわずかに検討されているにすぎない<sup>4,5)</sup>。これらの研究においても、材料の母材抵抗を含んだ動的な電極間電気抵抗が高いほど溶接性は低下することを報告しているが、材料板厚や溶接速度を変化させた時のあらゆる条件下において、動的な電極間電気抵抗で溶接

性を単純に整理することはできない。その理由は、通電時の材料の母材抵抗を推測することが困難なため、電極間抵抗から接触抵抗を求めることができないためである。実際には、接触抵抗は接合界面における通電路の制限作用を有するものと考えられるが、等価的に界面抵抗とみなすことにより、電極間抵抗を母材抵抗成分と接触抵抗成分に分離して考察できると考えられる。

そこで、本研究では、商用の高速溶接機(70m/分)を用いて、高速シーム溶接中の電気抵抗を測定し、得られた抵抗値を材料の母材抵抗成分と接触抵抗成分に分離して、溶接性と接触抵抗成分の関連性を定量的に評価することを試みた。さらに、溶接時の鋼板/電極界面の接触長さを測定して、接触長さや溶接性の関連性について考察した。

## 2. 実験方法

### 2・1 供試材および溶接条件

材料板厚およびSnめっき量の影響を調査するため、Table 1に示すような板厚の材料を使用し、錫めっきラインで所望量の錫めっきを施した。加工性と耐圧強度の観点から、板

平成9年7月24日受付 平成9年12月8日受理 (Received on July 24, 1997; Accepted on Dec. 8, 1997)

\* 東洋鋼板(株)技術研究所 (Technical Research Laboratory, Toyo Kohan Co., Ltd., 1296 Higashitoyoi Kudamatsu 744-8611)

\* 2 東洋鋼板(株)下松工場 (Kudamatsu Plant, Toyo Kohan Co., Ltd.)

\* 3 九州大学工学部 (Faculty of Engineering, Kyushu University)

Table 1. Specifications of specimens.

Tin coating weight (g/m <sup>2</sup> )	1.0	0.3,	1.0,	1.3,	2.8	1.0
Thickness	0.15	0.18			0.22	
Hardness (HR-30T)	73	66			60	

Table 2. Welding condition of FBB5600 welder

Electrode diameter (mm)	Upper	85
	Lower	49
Welding speed (m/min)	35, 70	
Welding force (N)	450	
Overlap (mm)	0.40	

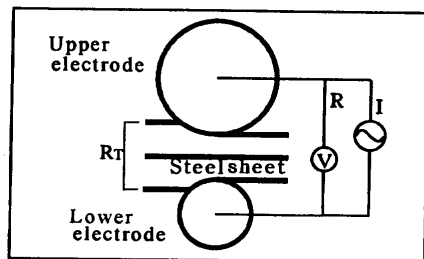


Fig. 1. Model of voltage measurement.

厚により異なる硬度に仕上げた材料を準備した。Snは加熱によりFeと合金化するため、溶接試験に先立ち、塗装を想定した210°C×15minの加熱を施し、スリッターで165.7mm×135mmのブランクサイズにカットした。

本実験に使用した溶接機はスードロニック社製のFBB5600であり、速度可変(最高速度70m/min)、周波数540Hz一定の溶接機である。本実験に用いた溶接条件をTable 2に示す。本実験では溶接電流を約60Aずつ増加させて、各電流ごとに溶接缶を採取すると同時に、溶接電流と電極間電圧を測定した。溶接速度の影響を調べるためには、本来、HAZ間隔が等しいように電流周波数を変化させるべきであるが、今回は設備の都合上、一定の周波数で実験を行った。

### 2・2 溶接性の評価

溶接性は、溶接可能電流範囲(Weldable Current Range, 以下WCRと略す)によって決定される。WCRの下限はTearテストと呼ばれるピール試験で決定し、上限はスプラッシュ発生状態から目視により決定した。

### 2・3 断面観察

溶接部を切り出し、エポキシ樹脂に埋込み・研磨した後、5%ピクリン酸アルコール溶液でエッチングして熱影響部(Heat Affected Zone, HAZ)を光学顕微鏡で観察した。また、同様に埋込み・研磨した試料を、5%硝酸アルコール溶液でエッチングして、組織の形態を光学顕微鏡で観察した。

### 2・4 抵抗値の算出

Fig. 1に測定部位の概略を示す。本溶接機は交流であるため、電流および上下電極間の電圧測定値(ピーク値)はすべ

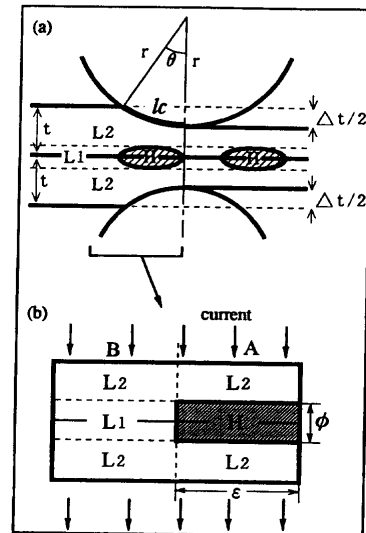


Fig. 2. Cross-sectional illustration of welded part.

て実効値に換算した。測定した電流値および電圧値の位相のずれから、回路のインダクタンスを補正して抵抗値を求めた。抵抗の測定値Rは電源回路のバルク抵抗R<sub>0</sub>と電極間抵抗R<sub>T</sub>からなる。さらに、R<sub>T</sub>は材料/電極間の接触抵抗R<sub>c1</sub>、材料/材料間の接触抵抗R<sub>c2</sub>および鋼板の母材抵抗R<sub>b</sub>からなる。したがって、全接触抵抗R<sub>c</sub>(=R<sub>c1</sub>+R<sub>c2</sub>)は次式で与えられる。

$$R_c = R_T - R_b = R - R_b - R_0 \dots\dots\dots (1)$$

ここに、R<sub>0</sub>はサンプルを通板しないブランクテストから決定した。

HAZが周期的に発生することから、発熱周期と電流周期はほぼ一致すると予測され、通過電流に応じて発熱すると考えられる。母材抵抗の瞬間値は周期的に変化することが予測されるが、通過電流に応じて材料が発熱するモデルを考えるのは困難であるので、材料の表面電位を一定とし、材料内を電流が通過し、抵抗差によって温度分布を生じると仮定して、Fig. 2 (a)に示すような溶接部平行断面を、組織写真を基に、Fig. 2 (b)に示すように簡略化した。すなわち、溶接部の組織変化から温度分布を推定し、発熱の原因である抵抗成分を等価的電気回路を想定して、母材抵抗成分と接触抵抗(接合界面の接触状況を等価的に界面抵抗とみなしたときの抵抗)成分に分離した。溶接部の組織は最高到達温度に対応するものであるが、抵抗成分は通電中に大きく変化しないと仮定して、平均的な抵抗値で整理した。接合部を含んだHAZ部(H)、界面接触部(L1)および電極接触部(L2)に溶接部平行断面を分割すると、各部分の到達温度を組織変化から決定することができ、その温度に対応する各領域の比抵抗、ρ<sub>H</sub>、ρ<sub>L1</sub>、ρ<sub>L2</sub>を求められる。これらの比抵抗の値から母材抵抗を計算し、溶接時の電気抵抗を母材抵抗成分と、接合界面の接触状況を等価的に接触抵抗として評価したときの接触抵抗成分に分割した。溶接部平行断面

において、HAZが存在する領域をA、それ以外をBとすれば、各領域の $R_A$ および $R_B$ は次式で与えられる。

$$R_A = (\rho_{L2}(1-\phi) + \rho_H\phi)t / (S\varepsilon) \dots\dots\dots (2)$$

$$R_B = (\rho_{L2}(1-\phi) + \rho_{L1}\phi)t / \{S(1-\varepsilon)\} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $t$ は板厚であり、溶接前後の板厚の平均値とした。 $\varepsilon$ はHAZの生成周期単位ごとにHAZが占める割合、 $\phi$ は板厚に対してHAZが占める割合である。また、 $S$ は電極と材料の接触面積であり、電極/材料間の接触長さ $l_c$ とオーバーラップ量 $d$ の積で与えた。電流が領域AおよびBを並列に流れると仮定すれば、母材抵抗は

$$R_b = R_A \cdot R_B / (R_A + R_B) \dots\dots\dots (4)$$

で与えられる。

### 2・5 接触長さの測定

溶接部の断面観察と同じ手法で平行断面の顕微鏡写真を撮り、画像解析装置を使用して平均的な溶接後の板厚を求めた。Fig. 2 (a)に示す材料/電極間の接触円弧長さ $l_c$ は以下の式により算出した。

$$l_c = r \cdot \theta = r \cdot \cos^{-1}\{(2r - \Delta t) / 2r\} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $\theta$ は材料/電極の接触開始点と電極直下のなす角度、 $\Delta t$ は溶接前後の板厚差、 $r$ は上下電極の平均半径を表す。

## 3. 実験結果と考察

### 3・1 溶接部の到達温度の推定

鋼板の母材抵抗を求めるには、溶接時の鋼板温度の推定が必要である。そこで、ガスバーナにより室温から鋼板の融点まで約100°Cごとに加熱、空冷したサンプルの組織を予め調査し、溶接部の組織の到達温度を推定した。各温度での組織写真の一例をFig. 3に示す。この実験には、今回溶接に用いたものと同じ材料(板厚:0.18mm, 鋼中炭素量:0.04%)を使用した。

各温度に加熱したサンプルの結晶粒径をインターセプト法により求めたが、600°C~1200°Cの範囲においては粒径よりも粒の形状の変化の方が特徴的なので、結晶粒のアスペクト比を使用した。実際結果をFig. 4に示す。1200°C以上で

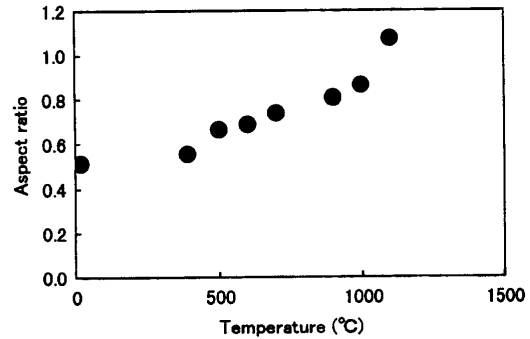


Fig. 4. Relation between temperature and aspect ratio of grains.

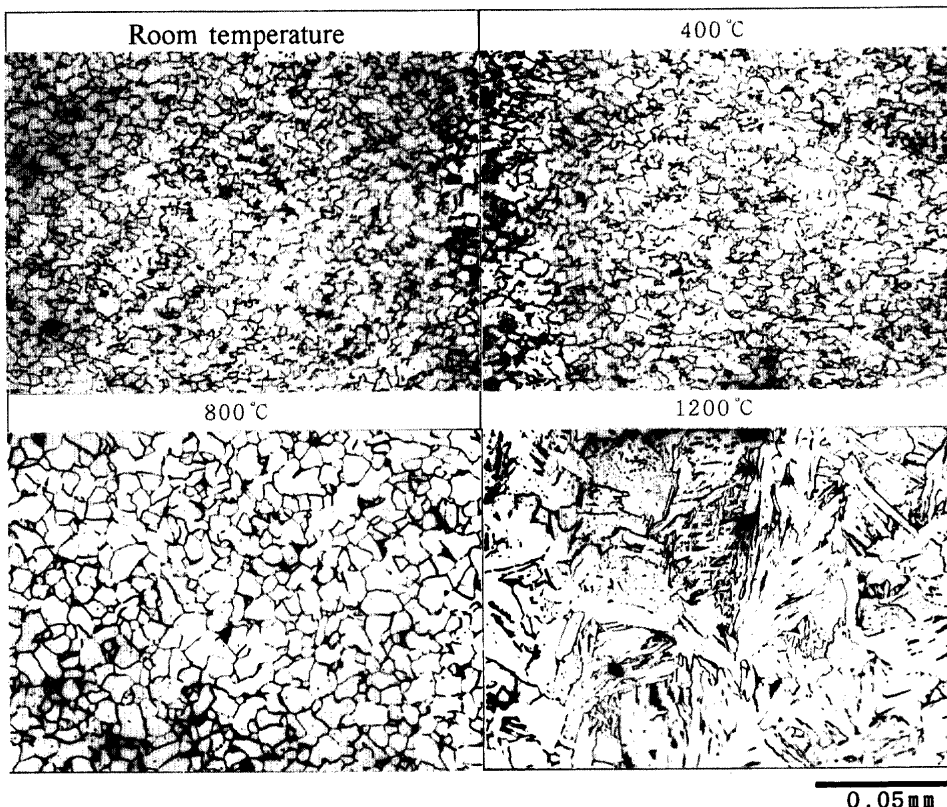


Fig. 3. Longitudinal cross-section of heated steel at various temperatures.

はベイナイトに近い針状組織になるためアスペクト比は算出してない。

Fig. 2 (b) に示した溶融部を含むHAZ部では、加熱により結晶の粗大化あるいは溶融・凝固を受けており、Fig. 3 の組織写真を参照すると、HAZ部は1200°C以上の部分が大部分を占めるが、750~1200°Cの部分も含んでいる。また、溶融接合部は鋼の融点に達する。したがって、HAZ部は約750~1535°Cの温度範囲を含むが、大部分は1200°Cに加熱したときの組織に近いので、平均温度を1200°Cとした(800~1250°Cにおける軟鋼の比抵抗は約1150~1350 $\mu\Omega \cdot \text{mm}$ であり、純鉄の融点における抵抗値は1386 $\mu\Omega$ であることから、この温度範囲では平均温度で比抵抗を求めても大きな誤差はない)。また、HAZ以外の部分(L1部およびL2部)でも、加熱により粒が圧延組織よりも球状に近づいていた。各部分のアスペクト比を求め、Fig. 4 から到達温度を推定した結果をTable 3 に示す。さらに鋼中のC量が0.04%であることを考慮して、溶接各部の比抵抗を、 $\rho_H = 1250$ ,  $\rho_{L2} = 1000$ ,  $\rho_{L1} = 900 \mu\Omega \cdot \text{mm}$ とした<sup>6)</sup>。

3.2 材料/電極間の接触長さ

今回用いた代表的な溶接条件での接触長さ $l_c$ をTable 4 に示す。溶接電流の増加により、材料のジュール発熱量は大となり、溶接部はより高温となる。したがって、材料の軟化により接触長さ $l_c$ が長くなることが予想される。Table 4 のaとbを比較すると、上限と下限の電流差がこの試料では小さいので $l_c$ の変化幅は小さいが、上限電流側の方が $l_c$ が長くなる傾向が伺える。Table 4 のcとdの比較より、板厚を薄くすると溶接電流は低電流側にシフトし、材料の軟化が起こりにくいため、 $l_c$ が短くなる。また、材料成分や仕上げにより、薄い材料は一般に硬質化されるので $l_c$ はさらに短くなる。Table 4 のeとfの比較より、錫めっき量を減少すると溶

接電流は低電流側へシフトし、材料の軟化が起こりにくいため、 $l_c$ は短くなる。Table 4 のgとhの比較より、低速にすると1ナゲットあたりのジュール熱が増加するため、材料の軟化が起こりやすい。したがって、 $l_c$ は長くなることが予想される。

Table 4 のa~hの接触長さや溶接性の関係を見ると、Fig. 5 のようになる。データが散乱してはいるものの、接触長さの長い方が溶接性が良好な傾向を示している。さらに、Table 4 において、dの方がgよりも $l_c$ は短く、薄板化が表面皮膜量の減少以上に、難溶接化の問題を抱えていることを示唆している。

3.3 各種因子と溶接性

3.3.1 板厚の影響

Fig. 6 に板厚と抵抗値の関係を示す。また、Fig. 7 に板厚と溶接性の関係を示す。薄板化により $R_T$ ,  $R_b$ は減少傾向にあり、 $R_c$ は増加傾向にある。また、薄板化に伴い溶接性は

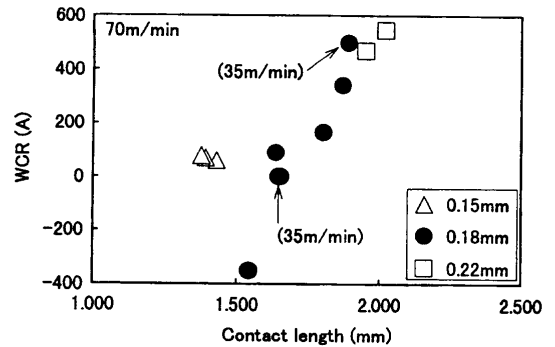


Fig. 5. Effect of contact length on WCR.

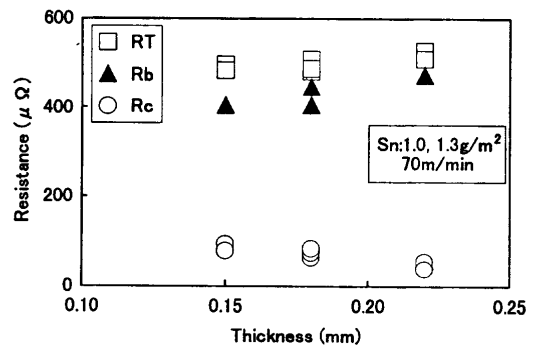


Fig. 6. Effect of thickness on resistance.

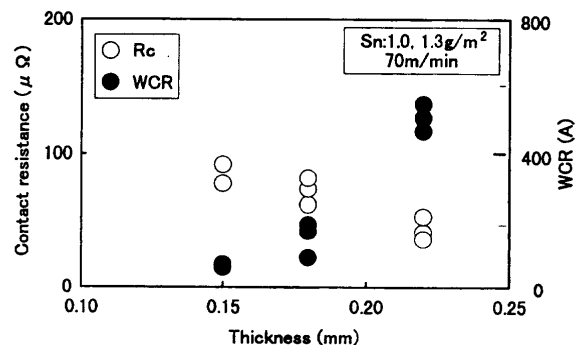


Fig. 7. Effect of thickness on WCR and contact resistance.

Table 3. Presumed maximum temperature during welding.

	Aspect ratio	Temperature (°C)	Resistivity ( $\mu\Omega \cdot \text{mm}$ )
H	—	>1200	1250
L1	0.75	720	900
L2	0.83	780	1000

Table 4. Calculated contact length obtained from cross-section of welded part.

No.	Parameters	Welding current (kA)	Steel thickness (mm)	Tin coating weight ( $\text{g/m}^2$ )	Welding speed (m/min)	Thickness change $\Delta t$ (mm)	Contact length $l_c$ (mm)	ACR (A)
a	Highest current	4.69	0.18	2.8	70	0.104	1.870	
b	Lowest current	4.35	0.18	2.8	70	0.098	1.811	
c	Thicker steel	5.06	0.22	1.0	70	0.122	2.020	546
d	Thinner steel	4.21	0.15	1.0	70	0.058	1.392	68
e	Heavier coating	4.69	0.18	2.8	70	0.104	1.870	393
f	Lighter coating	3.08	0.18	0.3	70	0.071	1.542	-352
g	Higher speed	3.97	0.18	1.0	70	0.080	1.637	88
h	Lower speed	3.75	0.18	1.0	35	0.107	1.889	498

大きく低下している。従来は動的な電気抵抗 $R_T$ の高い方が溶接性は低下すると言われていたが、板厚と溶接性の関係は、このように $R_T$ の値では説明できない。しかし、 $R_c$ を用いれば、溶接性の低下と抵抗値の増加を関連づけることができる。薄板化により $R_c$ 成分が増加するのは、Table 4 に示すように接触長さが減少したためと考えられる。

これまで、薄板化に伴い溶接性が低下することが生産現場で確認されていたが、その理由は、材料/電極間の接触長さの減少による接触抵抗成分 $R_c$ の上昇の要因が大きいことが明らかとなった。ただし、この $R_c$ は材料/電極間の接触長さの他に、材料/材料間の接触長さや、通電領域の移動なども含めた界面抵抗と等価であると考えられる。山本ら<sup>4)</sup>は0.5~2.3mmの板厚の冷延鋼板のシーム溶接性を1~25m/分の溶接速度で調査し、相対的溶接可能電流範囲で評価すると、薄板化するほど高速のシーム溶接が可能であると述べている。その理由として、板厚の薄い方が電流の幅方向への広がりが少ないことや板厚方向の温度勾配を作りやすいためとしている。本研究結果が彼らの傾向と異なっているのは、本研究の対象範囲が0.15~0.18mmの板厚の表面処理鋼板であり、かつ、35~70m/分の溶接速度であり、山本らの研究範囲といろいろな要因が異なっているためと考えられる。

3.3.2 Snめっき量の影響

Snめっき量0.3g/m<sup>2</sup>および2.8g/m<sup>2</sup>の各サンプルのWCRの上限の平行断面写真をFig. 8 (a)および(b)に示す。(a)では、HAZが断続的で板厚方向に厚く、溶接不良およびスプラッシュを生じやすいため、溶接性が低下する。一方、(b)のHAZは、(a)と比較すると連続的で板厚方向に薄く、溶接性が良好である。Fig. 9 にSn量を変化させた際の $R_c$ と溶接性の関係を示す。Snめっき量の減少に伴い、 $R_c$ は増加するとともに溶接性は低下する。ただし、1.0g/m<sup>2</sup>以上のSnめっき量範囲においては、Sn量の減少によるWCRの減少傾向は緩やかであるのに対し、Sn量が少ない範囲ではSn量減少に伴い溶接性は急激に低下する。Sn量の減少によって溶接性が極端に低下する理由は、フリー錫量の減少により表面処理皮膜の抵抗が急増する変曲点<sup>7)</sup>があり、Sn量の低減により溶接電流を低減せざるを得ず、その結果、接触長さがさら

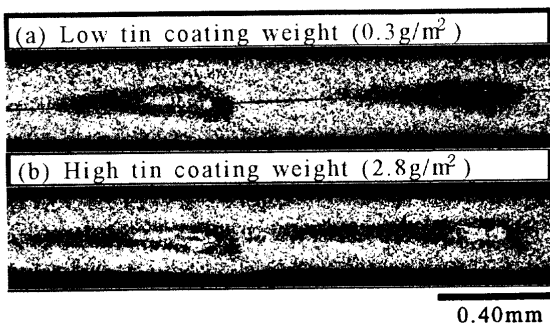


Fig. 8. Longitudinal cross-section of HAZ at different tin coating weights.

に短くなることによって $R_c$ が急上昇するためと考えられる。

3.3.3 溶接速度の影響

本装置は周波数一定であるため、溶接速度を変えるとHAZの間隔が変化する。Fig.10に低速(35m/min)および高速(70m/min)サンプルの断面観察結果を示す。Fig.10の断面写真からわかるように、溶接上限電流においても溶融部が観察されず、飲料缶のシーム溶接はスポット溶接よりも溶融部が少なく、低温側で接合されることがわかる。山本ら<sup>8)</sup>は、電極と溶接材料の接触面積は低速にするほど大きくなり、その結果、電流密度の増大が抑制されると説明している。本実験においても、Table 4 に示すように、低速の方が電極/材料間の接触長さは長くなり、Fig.10に示すように、低速の方がHAZの厚さの変化が小さく、電流密度の不均一化が多

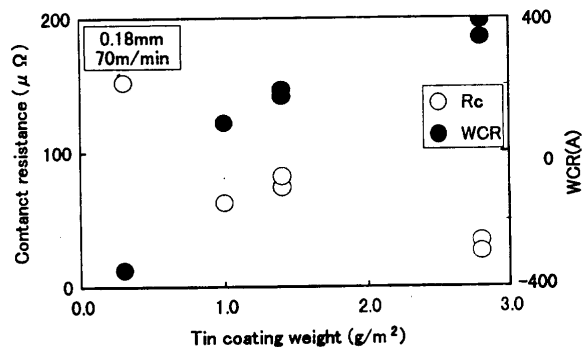


Fig. 9. Effect of tin coating weight on WCR and contact resistance.

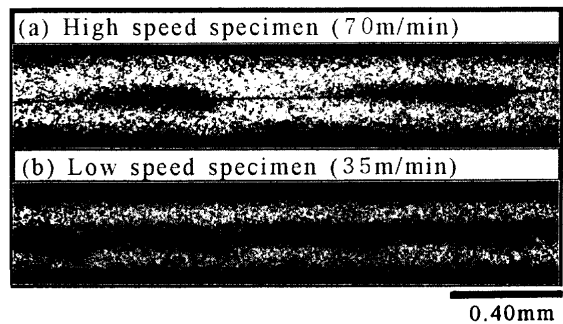


Fig. 10. Longitudinal cross-section of HAZ at different welding speeds.

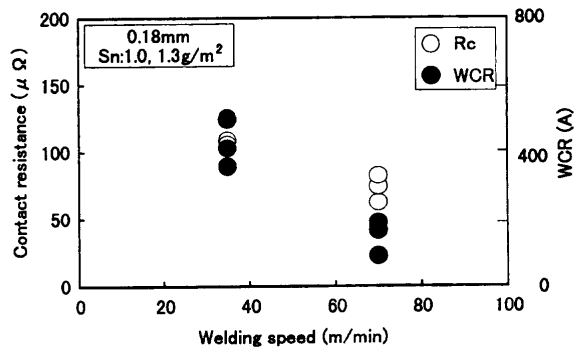


Fig. 11. Effect of welding speed speed on WCR and contact resistance.

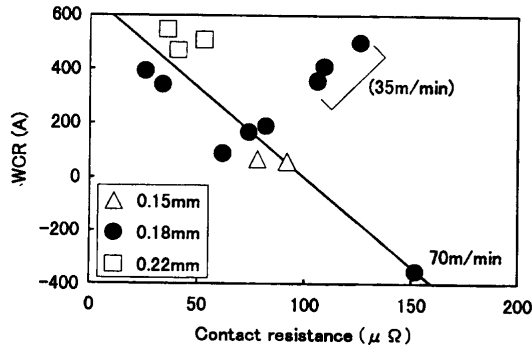


Fig. 12. Effect of contact resistance on WCR.

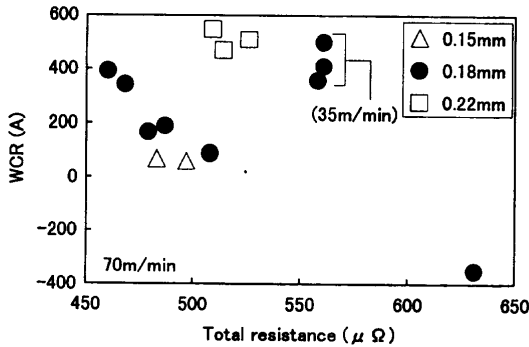


Fig. 13. Effect of total resistance on WCR.

少抑制されていると推察される。写真のように低速の方がHAZの間隔が短いため、高速の場合よりHAZが連続的であり溶接性は良好である。Fig.11に溶接速度と溶接性の関係を示す。低速の方が $R_c$ が高いにも拘わらず、溶接性は良好である。溶接性が良好になる理由は、低速にすると、HAZの間隔が狭くなるために、接合不良となる領域が縮小することが主因と考えられる。したがって、今回のような周波数一定の条件下においては、溶接速度と溶接性との関係を $R_c$ 単独で一義的に整理することはできない。

3・3・4 接触抵抗と溶接性

Fig.12に今回調査した全サンプルの $R_c$ と溶接性の関係を示す。溶接速度70m/minにおいては、 $R_c$ の上昇に伴い溶接性は低下する。しかしながら、速度に関しては低速の方が高 $R_c$ であるにも拘わらず溶接性は向上している。このように、HAZの間隔が異なる場合の溶接性を $R_c$ で一義的に整理できないが、溶接速度を一定にして、HAZ間隔が等しい条件の範囲では $R_c$ と溶接性はおおむね直線的な関係になる。一方、Fig.13は電極間抵抗 $R_T (=R_c + R_b)$ とWCRの関係を示

しており、従来の方法では $R_T$ とWCRの間に相関が見られない。

4. 結言

抵抗シーム溶接において、板厚、Snめっき量および溶接速度が溶接性に及ぼす影響を、材料/電極間接触長さおよび等価的界面抵抗とみなしたときの材料の接触抵抗成分と母材抵抗成分に分離した抵抗値に関連付けて調査した結果、以下のことがわかった。

(1) 材料/電極間の接触長さの長い方が溶接性は良好な傾向がある。

(2) 板厚減少に伴い溶接性は低下する。このとき、板厚減少に伴い電気抵抗 $R_T$ は減少するが、等価的界面抵抗とみなしたときの接触抵抗 $R_c$ は増加する。したがって、材料の板厚と溶接性の関係は接触抵抗で整理できる。

(3) Snめっき量の減少に伴いHAZはより厚く不連続になり、溶接性は低下する。これは、材料/電極間の接触長さが減少し、接触抵抗が増加するためである。

(4) 溶接速度の増加とともにHAZは不連続になり、溶接性は低下する。しかしながら、このとき接触抵抗は低下し、(2)、(3)の結果とは異なった。これは、高速にすると、HAZの間隔が広くなるために接合不良の領域が拡大するためである。

(5) ナゲット間隔が等しい状態では、常に接触抵抗の低い方が溶接性は良好になり、接触抵抗と溶接性には直線的な関係が成立する。しかし、従来より溶接性の指標としていた $R_T$ では、溶接性との関係が整理できない。

文 献

- 1) 安仲健二, 藤村 司: 東洋鋼板技報, 26 (1984), 13.
- 2) 古屋博英, 岩佐浩樹, 渡辺豊文, 渡辺 勉: 材料とプロセス, 2 (1989), 637.
- 3) 菊池利裕, 緒方 一, 望月一雄, 森戸延行, 市田敏郎: 材料とプロセス, 4 (1991), 1616.
- 4) 山本利雄, 奥田滝夫: 溶接学会誌, 46 (1977), 671.
- 5) M.Ichikawa and T.Saito: Proc.of 4th International Tinplate Conference, International Tin Research Institute, Middlesex, (1988), 446.
- 6) 第3版鉄鋼便覧 I, 日本鉄鋼協会編, 丸善, (1981), 311.
- 7) N.Shimizu, N.Kaguma, M.Matsubara and T.Fujimoto: Proc. of 5th International Tinplate Conference, International Tin Research Institute, Middlesex, (1992), 76.
- 8) 山本利雄, 奥田滝夫: 溶接学会誌, 46 (1977), 534.