

抵抗スポット溶接品質の安定化に向けた取り組み

Study of Technology to Improve the Robustness of Resistance Spot Welding

渥美健太郎	Kentaro ATSUMI
河田直樹	Naoki KAWADA
大塚陽介	Yosuke OTSUKA
石川 武	Takeshi ISHIKAWA

一般的に溶接に要求される品質には強度、じん性、延性などがあるが、それらの諸特性が安定的に得られることも重要な要素となる。ステンレス鋼製車両で使用する抵抗スポット溶接に関しても同様に、溶接部（ナゲット）が安定的に得られることが求められる。抵抗スポット溶接における安定性を阻害する要因の一つにギャップを挙げることができるが、このギャップに対する安定性（ロバスト性）を向上するために何の因子が重要であるのか調査した文献は少ない。そこで、溶接条件の各要素がギャップに対するロバスト性にどの程度寄与するのかを調査した。

1 はじめに

当社ではステンレス鋼製車両を主に車両製造を行っているが、その構体製造ではアーク溶接、抵抗スポット溶接およびレーザ溶接を用いて接合が行われている⁽¹⁾。

抵抗スポット溶接は2枚以上重ねられた被溶接材を1対の電極で加圧しつつ電流を流し、その接触面に発生する抵抗発熱によって加熱し接合する溶接法である。

抵抗スポット溶接では良好な溶接品質を得るためには適切な溶接条件を選定することが重要であるが、外乱によって溶接品質がばらつくことが考えられる。抵抗スポット溶接における外乱のひとつとして、図1に示すような被溶接材どうしのギャップなどが挙げられる。

抵抗スポット溶接における溶接品質のばらつきとはナゲット径の大きさのばらつきや溶込みのばらつきを指す。また、場合によっては図2に示すようなチリをとともなうことも考えられる。

溶接品質が良好な溶接結果を安定的に得るためにはギャップを抑制していくとともに、ギャップに対してロバスト（頑健）であるような溶接条件を選択していくことが重要となる。そこで本稿では、溶接条件の各因子がギャップに対するロバスト性に与える影響を調査した内容について報告する。

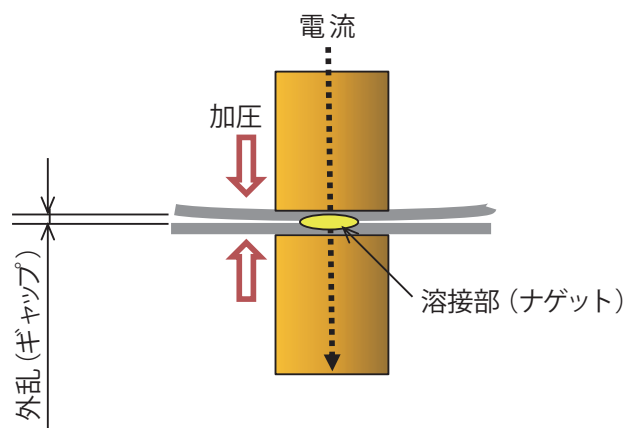


図1 抵抗スポット溶接の外乱（ギャップ）



図2 抵抗スポット溶接のチリ

2 実験方法

2.1 パラメータ設計の導入

実験にはパラメータ設計を導入した。パラメータ設計は、品質工学（タグチメソッド）による最適化手法で、具体的には「SN比」、「損失関数」および「直交表」の3要素を用いて、研究開発した技術や製品が市場または製造工程で成立するか否かを推し量る評価手法である⁽²⁾。設計対象の基本的な「機能」を定義し、SN比によってその「機能」が誤差や外乱に対してロバスト（頑健）であるかどうかを評価する。また、「直交表」によって、ロバスト性の高い設計因子の抽出と、パラメータの決定が容易になるという特徴がある。SN比とはばらつきが小さく、かつシステムの働きの良さを示す尺度で、以下の式で表わされる。本稿では動特性のSN比を用いている。

$$\text{SN比 } \eta = \text{有効な情報 } \beta^2 / \text{有害な情報 (誤差) } \sigma^2 \cdots (1)$$

分母にある誤差（ばらつき）が小さいと、SN比が大きくなり、機能をばらつかせる要因（今回はギャップ）に対してロバスト性が高いことを示している。

2.2 実験計画

抵抗スポット溶接に使用する熱エネルギーの収支をシステムと捉え、その入出力関係を基本機能とした。入力には溶接に必要なエネルギーの代用特性として、溶接すべき量に比例する総板厚を選び、出力には溶接に使われた熱エネルギーの代用特性として、実際の溶接断面から得られるナゲット径と溶け込み深さを選んだ。

よって、信号因子は板厚組合せとし、表1に示すものとした。信号因子とはコントロールすることはできるが、設計者が自由に決めることのできない因子のことである。

誤差因子は被溶接材間のギャップとし、その値を表2に示す値とした。ここでは、ギャップ有りの場合の値を経験的に生産現場で発生している1.0mmに設定した。

制御因子は各種の溶接条件とし、それらを表3に示す値とした。そこで用いる標準条件は、信号因子である板厚組合せ（M1からM3）ごとに表4に示す値に設定した。制御因子とは、設計者が自由に決めることが出来る因子のことで、今回は電源、溶接ピッチ、電極形状、加圧力、電流値、通電時間およびスロープ時間とした。

なお、標準条件は信号因子ごとに現場で施工している溶接条件を参考に決定した。なお、誤差因子、信号因子および制御因子の各因子の関係は図3に示す通りである。

表1 信号因子 M

	M1	M2	M3
板厚組合せ	SUS301L-H(HT) t0.8 SUS301L-1/4H(DLT)t1.5	SUS301L-H(HT) t1.5 SUS301L-1/4H(DLT)t1.5 SUS304 t4.0	SUS301L-H(HT) t1.5 SUS301L-H(HT) t2.0 SUS301L-1/4H(DLT)t1.5 SUS301L-1/4H(DLT)t1.5

表2 誤差因子 N

	N1	N2
ギャップ (mm)	密着	1.0

表3 制御因子

	1	2	3
A: 電源	直流インバータ電源	交流インバータ電源	—
B: ピッチ (mm)	30	40	50
C: 電極形状 (上) (下)	Φ12-100R 銅板 (Flat)	Φ16-100R 銅板 (Flat)	Φ16-100R Φ16-100R
D: 加圧力 (kN)	標準条件 -20%	標準条件	標準条件 +20%
E: 電流値 (kA)	標準条件 -20%	標準条件	標準条件 +20%
F: 通電時間 (cyc)	標準条件 -20%	標準条件	標準条件 +20%
G: スロープ (cyc)	1	3	5

表 4 標準条件

	M1	M2	M3
D: 加圧力 (kN)	8.0	7.5	8.0
E: 電流値 (kA)	7.0	8.0	8.0
F: 通電時間 (cyc)	15	30	50

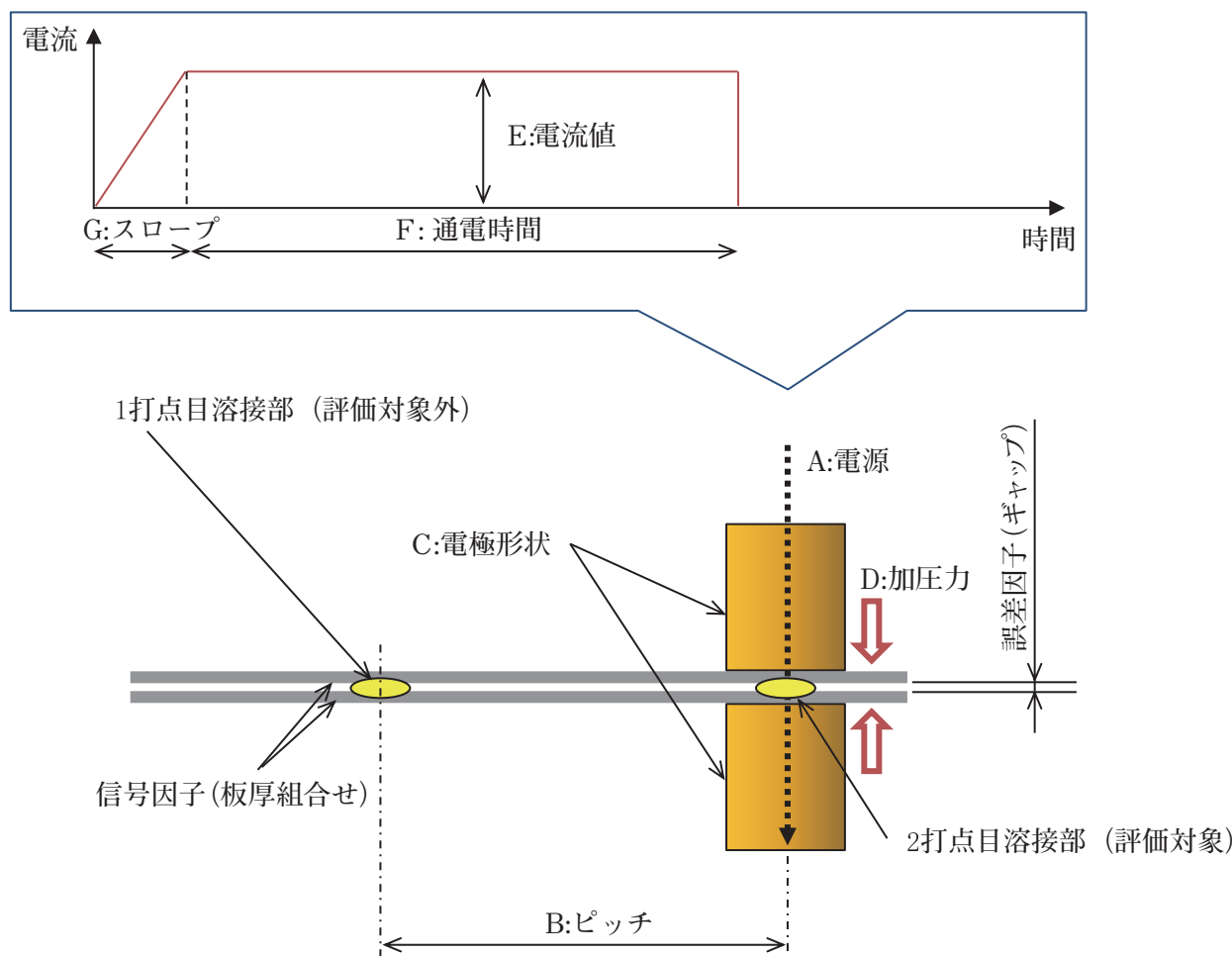


図 3 信号因子・制御因子・誤差因子

2. 3 評価項目

溶接部断面におけるナゲット径（上側および下側）と最も外側の板への溶込み（上側および下側）を測定し、それらの値を計算のうえSN比で評価した。各測定項目の位置関係は図4に示す通り。

なお、試験片は精密切断機にて溶接部の中心を通る断面で切断、その後に準備研磨機にて切断した断面を研磨し、シュウ酸水溶液にて断面を腐食させて観察を行った。

3 結果

断面測定の結果から得られた要因効果図を図5、寄与率を表5、結果の概要を表6に示す。ここでは解析にSN比を用いたが、SN比は水準間の差が大きい場合に値が高い水準を選択すると、ロバスト性が高いことを示している。

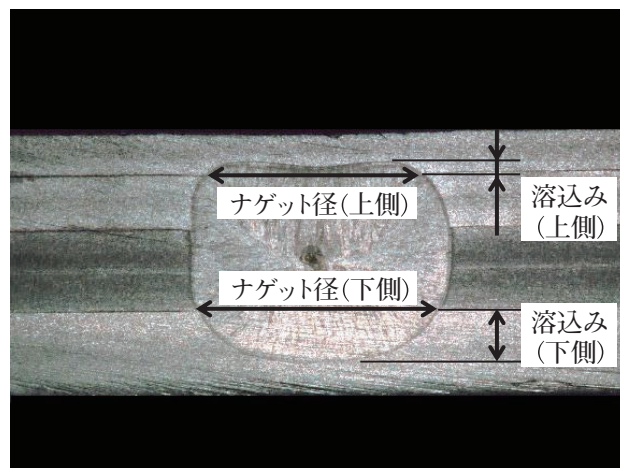


図 4 評価項目

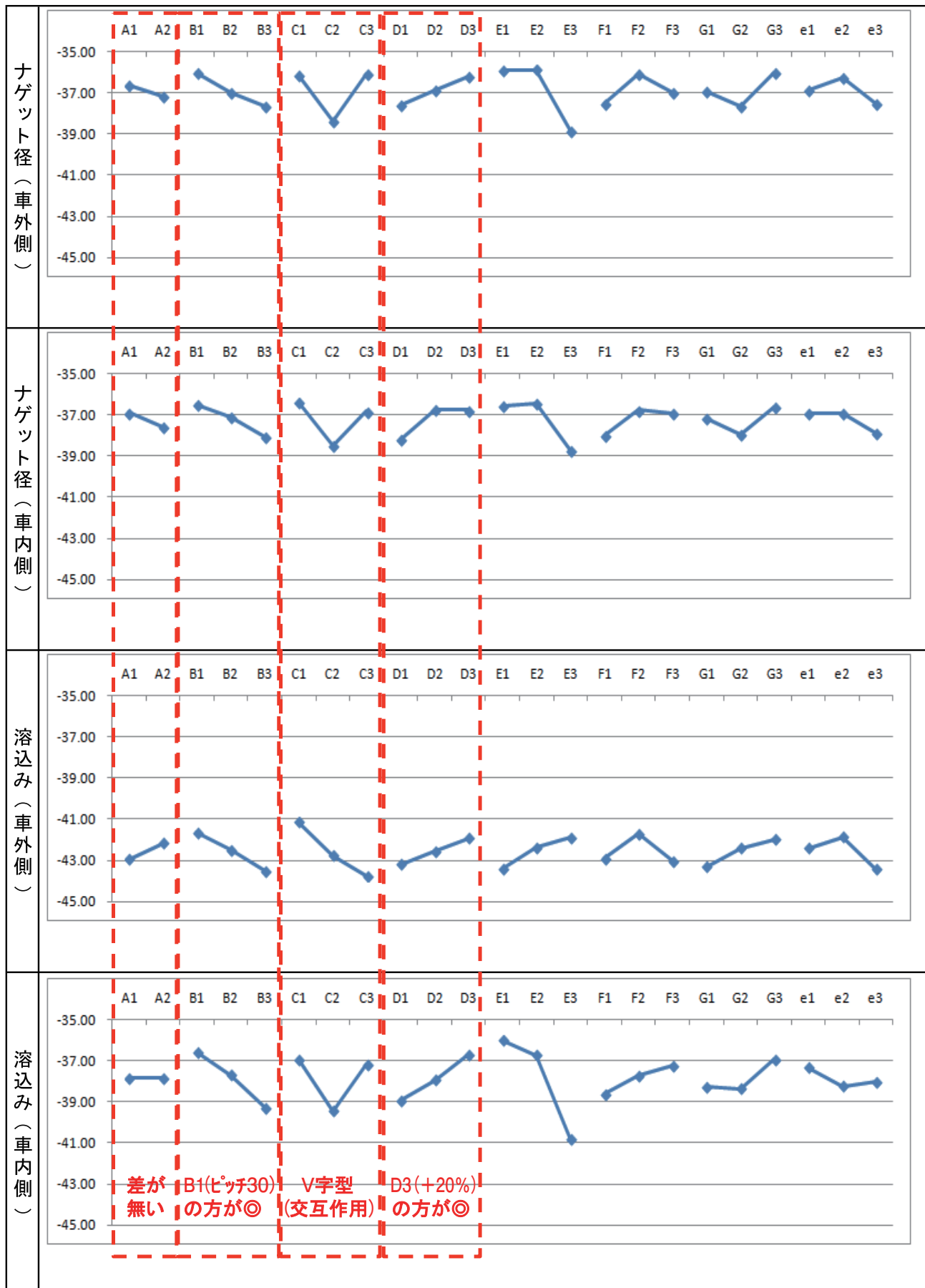


図5 要因効果図

表5 寄与率

	寄与率 [%]							
	A	B	C	D	E	F	G	e
ナゲット上	1.19	7.71	19.01	5.14	32.55	6.05	7.31	16.35
ナゲット下	2.89	9.93	19.49	10.70	26.66	7.36	7.52	10.74
溶込み上	3.88	15.23	30.15	7.06	9.98	9.32	8.00	5.48
溶込み下	0.00	13.77	14.17	9.28	50.26	3.70	4.80	2.34

表6 結果概要

項目	結果概要
A 電源	A1とA2の差がいずれも1dB以下 ⇒ ギャップに対して、電源の差は優位性が無い
B ピッチ	B1(=ピッチ30mm)にすればギャップに対して安定する結果 ⇒ 安定的に分流している可能性有り
C 電極	V型の形状を呈している ⇒ 交互作用
D 加圧力	D3(=標準条件の120%)にすればギャップに対して安定する結果
E 電流値	寄与率がいずれの測定項目でも高い ⇒ ギャップに対する優位性が高い
F 通電時間	寄与率がいずれの測定項目でも比較的低め ⇒ ギャップに対する優位性はそれほど高くない
G スロープ	いずれもG3(=スロープ5cyc)が高い ⇒ スロープは長く設定する方がギャップに対して安定する
e 誤差列	

なお、解析手順は以下に示す通り。

<手順1>全データの2乗和 S_T を求める。

$$S_T = y_{11}^2 + y_{12}^2 + y_{13}^2 \cdots (2)$$

<手順2>線形式 L を求める。

$$L = M_1 y_{11} + M_2 y_{12} + M_3 y_{13} \cdots (3)$$

<手順3>有効除数 r (単位の2乗量)を求める。

$$r = M_1^2 + M_2^2 + M_3^2 \cdots (4)$$

<手順4>比例項の変動(有効成分) S_β を求める。

$$S_\beta = L_A^2 / r \cdots (5)$$

<手順5>全2乗和から有効成分を差し引き、誤差変動 S_e を求める。

$$S_e = S_T - S_\beta \cdots (6)$$

<手順6>自由度 f の値で割り、誤差分散 V_e を求める。

$$V_e = S_e / f \cdots (7)$$

<手順7>公式に則り、SN比 η [db]を求める。

$$\eta = 10 \log \{ (S_\beta - V_e) / (r \times V_e) \} \cdots (8)$$

3. 1 制御因子A：電源（寄与率：0.00～3.88%）

すべての測定項目で2水準（交流or直流）の差は1dB程度であり、寄与率も他の制御因子よりも小さい値となった。このことから、制御因子A〔電源〕はギャップに対する優位性がほぼ無いことを示している。

3. 2 制御因子B：ピッチ（寄与率：7.71～15.23%）

すべての測定項目でも3水準（ピッチ30, 40, 50mm）のうちB1（ピッチ30mm）のSN比が高い値となった。このことから、ギャップに対して制御因子B〔ピッチ〕はC1（30mm）にした方が溶接結果は安定することを示している。

3. 3 制御因子C：電極（寄与率：14.17～30.15%）

3つの測定項目において谷型となった。これは、制御因子Cには交互作用があることを示している。

3. 4 制御因子D：加圧力（寄与率：5.14～10.70%）

すべての測定項目で3水準のうちD3（標準条件+20%）でのSN比が最も高い結果を得た。これはギャップに対して、制御因子DはD3（標準条件+20%=高加圧力）にした方が溶接結果は安定することを示している。

3. 5 制御因子E：電流値（寄与率：9.98～50.26%）

3つの測定項目においてE1（標準条件-20%）でのSN比が最も高い結果を得た。これはギャップに対して、電流値はE1（標準条件-20%=低めの電流値）にした方が溶接結果は安定することを示している。

3. 6 制御因子F：通電時間（寄与率：3.70～9.32%）

すべての測定項目で3水準の差は1dB程度であり、寄与率も比較的小さい値となった。このことから、制御因子F〔通電時間〕はギャップに対する優位性が低いことを示している。

3. 7 制御因子G：スロープ（寄与率：4.80～8.00%）

すべての測定項目で3水準の差は1dB程度であり寄与率も比較的小さい値となったが、G3（スロープ5cyc）にした方がSN比は高い値となった。

4 考察

今回の実験ではギャップを誤差因子Nに設定しているため、寄与率は「ギャップがN1（ギャップ＝なし）とN2（ギャップ＝1.0mm）のどちらの値であっても溶接品質（ナゲット径・溶込み）を安定させたい場合、制御因子AからGを変化させることでどの程度影響を与えることができるのか」を表している。制御因子A（電源）の寄与率は最大でも3.9%であったことから、ギャップに対する溶接品質への寄与は低いものと考えられる。

一方で、寄与率が高かったのは制御因子E（電流値）で50.26%であった。これは、時間 t [sec] の間に発生する熱量を H [J]、抵抗を R [Ω]、制御因子E（電流値）を I [A] とすると、

$$H = I^2 \times R \times t \quad \cdots (2)$$

と表されることが知られている。

溶接品質（ナゲット径・溶込み）のロバスト性は、発熱量 H の安定性と言い換えることができる。ギャップの有無は抵抗 R の大きさに影響を与えるが、その際に制御因子E（電流値）である I は式(2)の中で2乗の項であることから、発熱量への寄与率が大きいたことが分かる。

5 まとめ

抵抗スポット溶接におけるギャップへのロバスト性に、溶接条件の各因子が与える影響について調査した。得られた知見は以下の通り。

- ・ロバスト性を上げるためには低めの電流、高めの加圧力、長めのスロープが良い結果を得た。
- ・制御因子の中で条件を変えと、ロバスト性の寄与率で高いのは電流値、電極、溶接ピッチおよび加圧

力の順であった。

参考文献

- (1) 杉山隆：「東急車輛技報で辿るステンレス車両の技術史」，東急車輛技報 60号，2-11，(2010)，東急車輛製造（株）
- (2) 河田直樹：「研究開発における品質工学の活用」，総合車両製作所技報 1号，38-45，(2013)，(株) 総合車両製作所

著者紹介



渥美健太郎
生産本部
技術部（接合技術センター）



河田直樹
博士（工学）
生産本部
技術部（接合技術センター）主査



大塚陽介
技術士（金属部門），IWE
生産本部
技術部（接合技術センター）主査



石川武
博士（工学）
生産本部
技術部（接合技術センター）課長