

技術資料

Technical Data

スラグを低減した溶接ワイヤによる溶接部の電着塗装性および架橋性

上仲明郎*¹, 山下正和*²

Electrodeposition Coating Property and Gap Resistance of Welds by Welding Wire with Reduced Slag

Akio UENAKA and Masakazu YAMASHITA

Synopsis

In the welding of automobile undercarriage parts, in addition to ensuring electrodeposition coating properties, gap resistance in welding with large gaps is an issue. The form and electrical properties of the welding slag can be changed, so that the electrodeposition coating film can be formed even if the slag remains in the weld joint. The amount of deoxidizing elements added to the welding wire was adjusted so that gap resistance could be ensured even in welds with large gaps. The Si of the welding wire was small, and the oxide-forming elements Ti and Al were added as substitutes, and W was added to improve the viscosity. In this welding wire, the entire surface of the weld bead had a slightly dark brown hue, and the electrodeposition coating was formed on almost the entire surface. The electrical resistance is low, like a base sheet, and the slag is thin at about 10 μm . The gap resistance is as good as that of general-purpose welding wire, although bead formation defects are likely to occur in low-Si wires without W. The mechanical properties of the weld metal are generally the same as those of general-purpose welding wires, and they are good.

1. 緒言

自動車の足回りはサスペンションやアームなどの部品類で構成される薄板構造体であり、強度、耐疲労性、靱性などが求められる。一般的に高張力の鉄鋼材料が用いられ、溶接には Ar-CO₂ ガスが多用される。溶接ワイヤには Si や Mn が添加され、スラグが形成される。そのスラグにより大気を遮蔽することで要求の強度特性を満足する健全な溶接継手が得られる。

また、自動車の足回り部品は、耐食性の向上を目的に溶接後には電着塗装をする。溶接継手では、溶接ビード表面に絶縁物であるスラグが存在するため、電着塗膜ができずに錆の起点となる。そのため、電着塗装を実施する前に、スラグを可能な限り除去することが好ましい。しかし、電動工具やショットブラストなどで物理的にスラグを除去する方法¹⁾では、高作業負荷や高コストになるだけでなく、複雑な形状への適用が難しいなど、技術面での問題もある。

2024年5月15日 受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 大同特殊鋼(株)技術開発研究所, 技術士(金属) (P.E.Jp, Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

そこで、溶接プロセスならびに溶接ワイヤの成分設計からのアプローチが提案されてきた。溶接プロセスでは、スラグの形成が少なくなるよう、シールドガス中の CO_2 ガスの比率を下げる手法の報告がされている^{2)~4)}。また、溶接ワイヤの成分設計では、SiおよびMnの添加量を低減することでスラグの形成を少なくした溶接ワイヤの報告がある⁵⁾。しかし、スラグの形成が少なくなる代わりに溶融池の酸素量が高くなるため架橋性が低下し⁶⁾、溶接外観品質を確保できなくなるという問題がある。

筆者らは、スラグの形態や電気的性質を変化させ、溶接継手にスラグが残存しても電着塗膜の形成が可能な溶接ワイヤを検討した。さらに溶接時の溶融池の物理的性質を変化させ、隙間が大きい溶接でも架橋性を確保できるように検討した。本稿では、この検討した溶接ワイヤによる溶接継手の電着塗装性と架橋性の調査結果を報告する。

2. 溶接ワイヤの合金設計の思想

2. 1 溶接部の電着塗装性

溶接継手にスラグが残存しても電着塗膜を形成させるには、スラグに含まれる酸化物の種類が重要と考えられる⁷⁾。酸化物は金属導電性、半導性、絶縁性に分類され、電気導電性が異なる⁸⁾。Fig. 1に溶融状態の1600℃における各種元素の組合せでの酸化物の平衡状態の計算結果を示す。計算には熱力学平衡計算ソフトウェアFact StageTM 7.3を用いた。

Fig. 1 (a)は490 MPa級溶接ワイヤの成分での計算結果である。Si-Mnのほとんどの領域で融液とスラグになっている。Si量が高い場合、スラグは高絶縁の SiO_2 ⁸⁾が主体である。一方、Si量が低い場合はスラグが認められない。

Fig. 1 (b)はSi量が低く、Siの代わりに脱酸作用となる元素を添加した溶接ワイヤの成分での計算結果である。Al量が高い場合、高絶縁性の Al_2O_3 ⁸⁾が生成する。一方、Ti量が高い場合、高導電性の Ti_2O_3 ⁸⁾が生成する。ただし、Tiを過剰に含むと、Ti系酸化物が過度に生成し、溶接金属の伸びが低下する。また、TiとAlの添加量によっては、融液、スラグおよび高導電性の TiN ⁹⁾で構成される領域がある(図中にハッチング)。スラグは Ti_2O_3 、 TiO_2 および Al_2O_3 が混在しているが、主に Ti_2O_3 、 TiO_2 が占めているため導電性は良好と考えられる。

そこで、低Siの溶接ワイヤでは、酸化物が固溶体として溶接金属に留まるのではなく、主にTi系酸化物のスラグが形成されるように、適量のTiとAlを添加した。

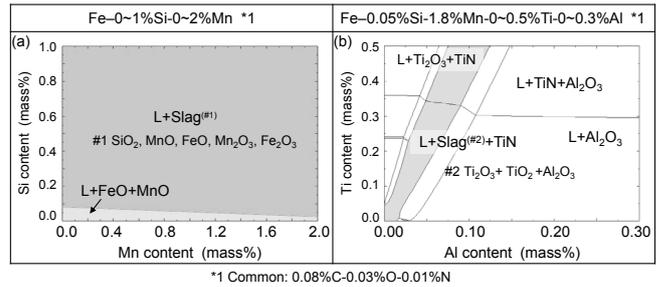


Fig. 1. Equilibrium phase diagram of oxides (1600 °C).

2. 2 架橋性

溶接時の溶融金属の粘度を向上させることで架橋性は向上すると考えられる。元素によっては粘度が上昇あるいは下降することが知られており¹⁰⁾、溶融金属の粘度におよぼす各種元素の影響を調査した。Fig. 2に材料物性値計算ソフトウェアJMatPro[®] 11.1を用いて計算した粘度の結果を示す。C, Mn, Niは添加量の増加とともに粘度が低下する。一方で、Cr, Nb, Mo, Wは添加量の増加とともに粘度が上昇し、その中で添加量あたりの粘度の上昇はWが最も大きい。そこで、低Siの溶接ワイヤへWを添加することとした。

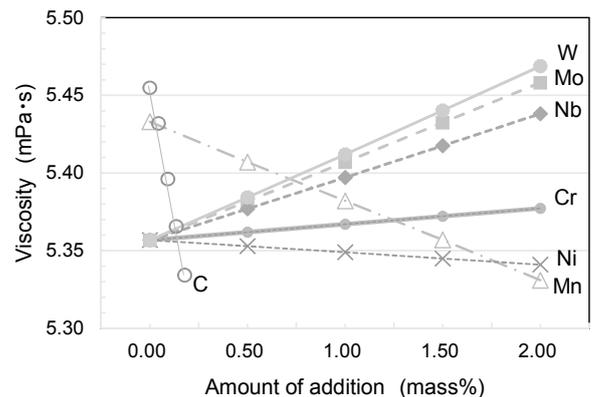


Fig. 2. Effect of element on viscosity (1600 °C).

3. 実験方法

3. 1 供試材

本調査で用いた溶接ワイヤおよび鋼板の化学組成の一例をTable 1に示す。溶接ワイヤは、 $\phi 1.2$ まで伸線加工されたCuめっき付きのソリッドワイヤ3種類である。1つは、比較用の溶接ワイヤとして、490 MPa級溶接ワイヤ(JIS Z 3312 G 49 A 2M16)を用いた。残りの2つは低Siの溶接ワイヤでTiとAlを添加した。溶接部の電着塗装性については、490 MPa級溶接ワイヤと低Si-W添加溶接ワイヤで比較した。架橋性については、Wの添加あり、なしで比較した。供試鋼板として、440 MPa級熱間圧延鋼板(SAPH440)を用いた。

Table 1. Chemical composition of welding wire and base sheet.

Material		C	Si	Mn	P	S	Ti	Al	W	O
Welding wire	490 MPa wire	0.04	0.53	1.82	0.010	0.002	<0.01	<0.005	<0.01	0.004
	Low Si wire	0.05	0.05	1.78	0.007	0.007	0.1	0.021	<0.01	0.001
	Low Si - W wire	0.05	0.05	1.76	0.006	0.008	0.1	0.021	Add.	0.001
Base sheet	440 MPa Steel (SAPH440)	0.06	0.02	1.39	0.014	0.005	<0.01	<0.005	<0.01	0.002

3. 2 継手の溶接試験

溶接状況の模式図を Fig. 3 (a) に、溶接条件を Table 2 に示す。板厚 2 mm、幅 50 mm、長さ 250 mm の鋼板を用い、80%Ar-20%CO₂ 混合ガスの下向の溶接姿勢で、パルスマグ溶接による重ね継手を作製した。

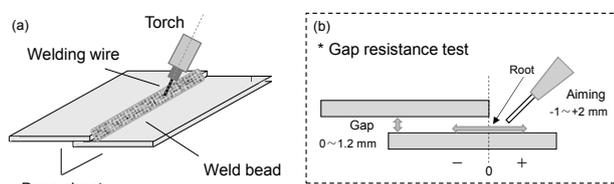


Fig. 3. Schematic diagrams of welding situation.

Table 2. Welding conditions.

Welding method	Pulse MAG
Shielding gas	80%Ar-20%CO ₂
Welding current	200 A
Arc voltage	24 V
Welding speed	100 cm/min
Contact tip to work distance	15 mm
Rotation angle [Torch]	45°
Travel angle	Perpendicular

3. 3 電着塗装性の評価

溶接試験の後、電着塗装を実施する前後でビード中央部の外観写真を撮影し、スラグの発生有無、スラグの発生状況および電着塗装性を評価した。黒色カチオン電着塗装は、洗浄、脱脂、表面調整、化成処理の上、20 μm の膜厚狙いで実施した。

3. 4 スラグの評価

3. 4. 1 スラグの電気抵抗の測定

スラグの電気抵抗は、横河計測(株)製のデジタルマルチメータ 73202 で測定した。対象部位は、490 MPa 級溶接ワイヤでは、溶接ビードの上板側の凝集したスラグの位置とし、低 Si-W 添加溶接ワイヤでは、溶接ビード上と

した。さらに、電気抵抗の比較として鋼板自体も測定した。

3. 4. 2 スラグの組成・構造

スラグの平均組成は、走査型電子顕微鏡エネルギー分散型 X 線分析装置 (SEM-EDS) により分析した。さらに、スラグの分子構造は、ラマン分光分析装置により、ラマンスペクトルを観測・解析し、同定した。

3. 4. 3 スラグの厚さ測定

スラグの厚さを測定するため、溶接試験片の横断面を切断し、樹脂に埋込研磨した。溶接ビードの断面を走査型電子顕微鏡で観察し、溶接ビード表面に存在するスラグの厚さを測定した。

3. 5 溶接継手の架橋性の評価

溶接状況の模式図を Fig. 3 (b) に示す。鋼板の隙間およびワイヤ狙い位置を変動させた溶接試験を実施し、ビード外観および断面の形状観察から、架橋性の良否を評価した。

鋼板の隙間は 0 ~ 1.2 mm の範囲とした。また、溶接ワイヤの狙い位置は、水平面において、溶接長手方向に対して垂直にルート部から -1 ~ +2 mm の範囲内で変化させた。

3. 6 溶着金属の機械的特性の評価

溶接ワイヤの性能試験のため、JIS Z3111 に基づき、鋼板の成分希釈がなく、試験する部分がすべて溶接ワイヤの成分からなる溶着金属を作製した。

溶接ワイヤには 490 MPa 級溶接ワイヤおよび低 Si-W 添加溶接ワイヤを用いた。引張試験方法は JIS Z2241 (14A 号試験片、試験温度：常温)、衝撃試験方法は JIS Z2242 (V ノッチ試験片、試験温度 -20 °C) とした。

4. 試験結果

4. 1 溶接部の電着塗装性

溶接および電着塗装後の溶接ビード外観写真を Fig. 4 に示す。490 MPa 級溶接ワイヤでは、溶接ビード表面には光沢のあるスラグが局部的に凝集して形成されており、このスラグが残留した箇所では電着塗膜が形成されなかった。一方で、低 Si-W 添加溶接ワイヤでは、溶接ビード表面全体がスラグで覆われ、やや暗褐色の色相であった。電着塗膜は、ほぼ全面で形成された。

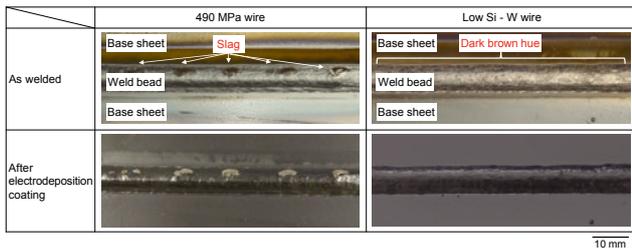


Fig. 4. Appearance of weld bead (as welded, after electrodeposition coating).

4. 2 スラグの評価

4. 2. 1 スラグの電気抵抗

スラグの電気抵抗の測定結果を Fig. 5 に示す。490 MPa 級溶接ワイヤのスラグは、デジタルマルチメータの測定上限の 40 MΩ に達し電気抵抗値は非常に高い。一方、低 Si-W 添加溶接ワイヤのスラグは、鋼板と同様に電気抵抗値は低い。

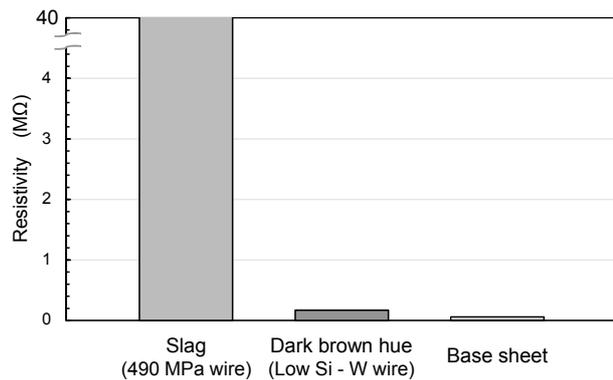


Fig. 5. Results of resistivity.

4. 2. 2 スラグの組成・構造

SEM-EDS でのスラグの組成分析結果を Fig. 6 に示す。490 MPa 級溶接ワイヤでは、スラグ中の Si が 14 mass% と多い。一方、低 Si-W 添加溶接ワイヤでは、スラグ中

の Si は 3 mass% と少なく、スラグの絶縁に寄与する Si 量が減っている。

ラマン分光分析装置による溶接スラグ中の酸化物の調査結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7 (a) の 490 MPa 級溶接ワイヤのスラグの部位では SiO_2 , $\text{Mn}_2\text{Si}_3\text{O}_4$, Mn_3O_4 , Fe_3O_4 の特徴的なピークと類似したラマンシフトにピークが検出された。Fig. 1 の酸化物の平衡状態の計算結果と類似し、スラグは高絶縁性の SiO_2 が存在する。

一方、Fig. 7 (b) の低 Si-W 添加溶接ワイヤでは、 $40\mu\text{m} \times 1000\mu\text{m}$ の範囲でスラグをマッピング分析した。スラグは各種酸化物が複雑に層状になっていたため、古典的最小二乗法を使用してラマンスペクトルを 7 種類に分離し、スペクトル分布図を構築した。各スペクトルは、SEM-EDS での検出元素を参照している。スラグの部位では、高導電性の Fe や Mn の酸化物および TiN の特徴的なピークと類似したラマンシフトにピークが検出された。Fig. 1 の酸化物の平衡状態の計算結果と類似し、スラグは高絶縁性の SiO_2 が存在せず、高導電性を有するといえる。

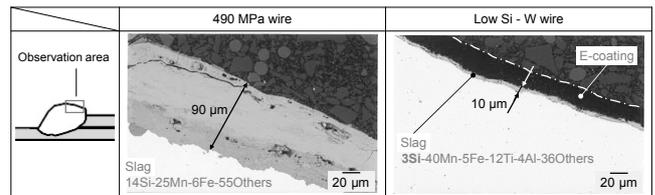


Fig. 6. Thickness of slag and EDS analysis.

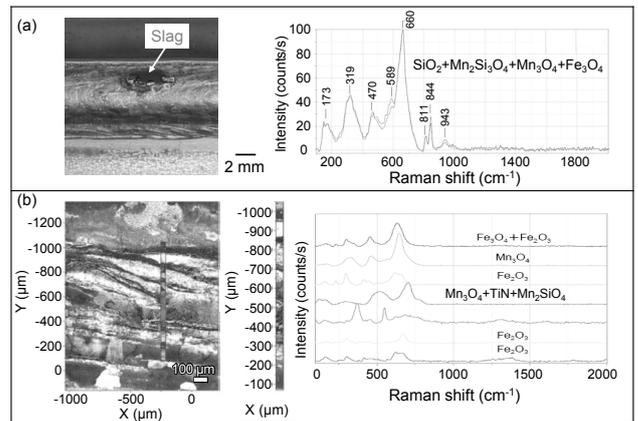


Fig. 7. Raman spectroscopy given by (a) Slag (490 MPa wire) and (b) Dark brown hue (Low Si - W wire).

4. 2. 3 スラグの厚さ

スラグの厚さの測定結果を Fig. 6 に示す。490 MPa 級溶接ワイヤのスラグは約 $90\mu\text{m}$ と厚い。一方、低 Si-W 添加溶接ワイヤのスラグは約 $10\mu\text{m}$ と薄い。これは、490 MPa 級溶接ワイヤではスラグが局部的に凝集し、厚

いスラグを形成するのに対し、低 Si-W 添加溶接ワイヤではスラグが溶接ビード全体に広がり、薄くなるためである。このスラグが溶接ビード全体に広がる理由として、MnO や Mn と Fe の複合酸化物の凝固開始温度が低いことが考えられる⁷⁾。

低 Si-W 添加溶接ワイヤは、スラグは高絶縁性の SiO₂ が存在せず、高導電性を有し、スラグの厚さが薄い。そのため、電気抵抗が低く、電着塗装性に優れると考えられる。

4. 3 溶接継手の架橋性

架橋性の判定例を Fig. 8 に示す。溶接不良のない良好な溶接ビードが得られた場合を“○”判定とし、ハンピングビード、アンダカット、ビード形成不良では、判定“×”とした。

架橋性の調査結果を Fig. 9 に示す。“○”判定の適正良好条件範囲をハッチングした。いずれの溶接ワイヤにおいても、隙間が 0 mm で、ルート部から鋼板の上板側へのワイヤ狙い位置が -2 mm において、ハンピングビードが生じた。

Fig. 9 (b) の低 Si で W が添加されていない溶接ワイヤは、ハッチングの範囲が狭い。隙間が大きく、かつルート部から下板側へのワイヤの狙い位置の場合、アンダカットが発生するとともにビード形成不良が生じる。

一方、Fig. 9 (c) の低 Si-W 添加溶接ワイヤは、Fig. 9 (a) の 490 MPa 級溶接ワイヤと同程度のハッチングの範囲であり広い。これは W の添加により粘度が向上し、溶接金属が崩れにくくなった影響と考えられる。

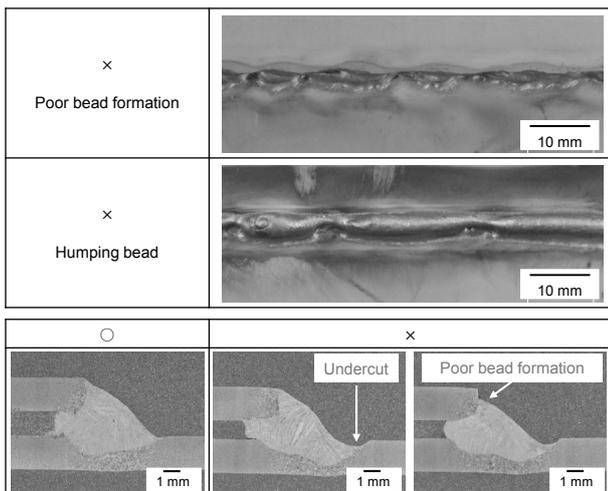


Fig. 8. Examples of bead appearance and cross section of welds.

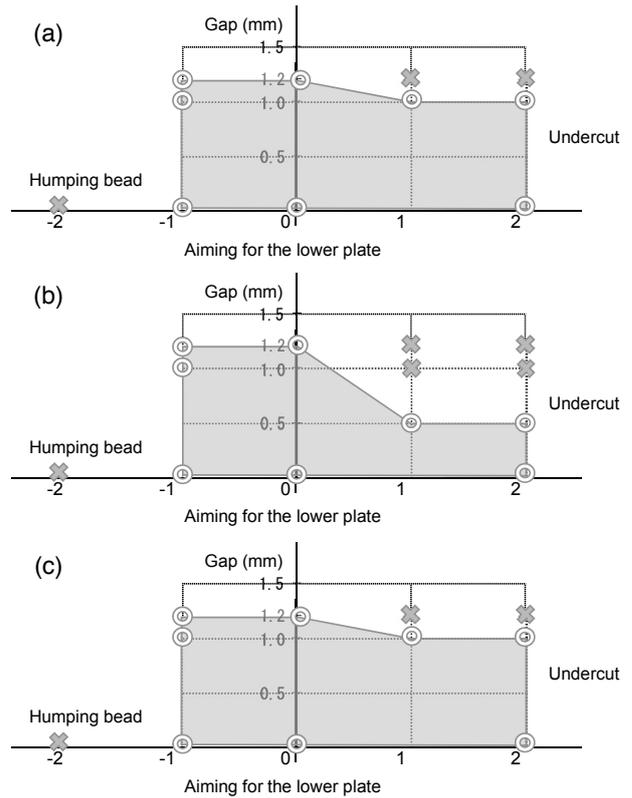


Fig. 9. Gap resistance of lap joint given by (a) 490 MPa wire, (b) Low Si wire and (c) Low Si - W wire.

4. 4 溶着金属の機械的特性

溶着金属から採取した試験片での引張試験およびシャルピー衝撃試験の結果を Table 3 に示す。低 Si-W 添加溶接ワイヤの溶着金属の耐力、引張強さ、伸びは、490 MPa 級溶接ワイヤのそれとおおむね同等であった。また、-20 °C における吸収エネルギーについても、低 Si-W 添加溶接ワイヤは 490 MPa 級溶接ワイヤとおおむね同等であった。

溶着金属の化学成分を Table 4 に示す。低 Si-W 添加溶接ワイヤは、490 MPa 級溶接ワイヤに比べ、溶着金属の酸素量は若干高い。低 Si-W 添加溶接ワイヤの機械的特性が 490 MPa 級溶接ワイヤとおおむね同等であるのは、低 Si-W 添加溶接ワイヤの酸素量が上昇したものの、溶着金属に巨大な酸化物などが残留していないためと考えられる。

Table 3. Mechanical properties of deposited metal.

	Tensile property [@RT]			Absorbed energy (J) [@-20 °C]
	Proof strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	
490 MPa wire	480	579	29	165
Low Si - W wire	486	557	31	138

Table 4. Chemical composition of deposited metal.
(mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Ti	Al	W	O
490 MPa wire	0.06	0.33	1.53	0.010	0.002	<0.01	<0.005	<0.01	0.03
Low Si-W wire	0.07	0.05	1.50	0.008	0.007	0.04	0.007	Add.	0.04

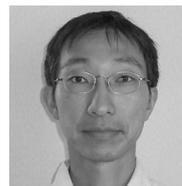
5. 結 言

溶接継手にスラグが残存しても電着塗膜の形成ができ、さらに隙間が大きな溶接でも架橋性を確保可能な溶接ワイヤ（低 Si-W 添加）を評価し、以下のことが明らかになった。

- (1) 溶接ビード表面全体はやや暗褐色の色相であり、電着塗装はほぼ全面で形成されている。
- (2) 鋼板と同程度の低い電気抵抗である。
- (3) スラグは約 10 μm と薄く、酸化物の平衡状態の計算結果と同様に、Si酸化物は認められない。
- (4) 架橋性は、490 MPa級溶接ワイヤと同様に良好であり、W添加による改善効果が認められる。
- (5) 溶着金属の機械的特性は、490 MPa級溶接ワイヤとおおむね同等で良好である。

(文 献)

- 1) 富士本博紀, 秋岡幸司, 徳永仁寿: 新日鉄住金技報, 409(2017), 90.
- 2) 小西恭平, 澤西央海, 松岡広志, 伊本聡: 溶接技術, 71(2023), 2, 47.
- 3) 山本俊佑, 鈴木幸子, 安藤聡, 池田倫正, 片岡時彦: 溶接学会論文集, 36(2018), 1, 77.
- 4) 高橋通泰, 内原正人, 迫田章人, 植木光彦, 新里文明: 自動車技術会論文集, 28(1997), 2, 143.
- 5) 松葉正寛, 石田欽也, 児玉真二: 溶接学会全国大会講演概要, 105(2019), 220.
- 6) 児玉真二, 石田欽也, 古迫誠司, 斎藤雅哉, 宮崎康信, 野瀬哲郎: 新日鉄技報, 393(2012), 83.
- 7) 木梨光, 孫悦, 井海和也: 溶接技術, 72(2024), 2, 52.
- 8) 田村英雄, 米山宏: 電気化学および工業物理化学, 48(1980), 6, 335.
- 9) 沖村浩史, J.-F. Lei: 電気学会論文誌 A, 114(1994), 12, 886.
- 10) 平居正純: 鉄と鋼, 78(1992), 3, 399.



上仲明郎



山下正和