

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 18 日現在

機関番号：57601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06883

研究課題名（和文）オールグリーン溶接スパッタ付着防止剤の高度化と溶接部位信頼性の実証

研究課題名（英文）Improvement of All-Green Welding Spatter Adhesion Preventive Agent and Reliability Demonstration of Welded Zone

研究代表者

高橋 明宏（Takahashi, Akihiro）

都城工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：90370056

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：我々は、溶接施工時に効果のある、火山灰由来のオールグリーンスパッタ付着防止剤の開発を行った。この研究では、水と火山灰の試作剤を計99種作製し、試作剤と付着防止効果の関係を調査した。試作剤に水を含むため、溶接部位の力学的試験が行われた。またスパッタと母材との間の接触角を測定した。その結果、最適な水と火山灰の配合量を明らかにした。水を用いても、力学的試験と水素量試験の結果、信頼性を実証できた。水のみを用いたモデル実験により、スパッタ熱移動効果に基づいてスパッタ粒子が球状になることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水と火山灰を混合した新規溶接スパッタ付着防止剤の開発的研究を行った。その結果、スパッタ付着防止機能を十分に有し、誰でも簡易に作製できる低コストなアーク溶接用スパッタ付着防止剤を提案できた。最大のメリットは、有機合成物由来の現行品に比べ、著しく人体や地球環境に影響を及ぼさない点である。またスパッタ球状化モデル研究を実施し、溶融スパッタの凝固潜熱と水の蒸発顕熱の熱輸送原理に基づくスパッタ球状化メカニズムを考察した。この時、輸送された熱エネルギーをスパッタ重量で除したパラメータを新たに提案し、接触角との相関を得た。この点について学術的意義のある研究成果が得られたと考えている。

研究成果の概要（英文）：We have developed all-green spatter adhesion preventive agents made from volcanic ash and tap water for use in arc welding. In this study, we have prepared a total of 99 samples of volcanic ash and water. Relationship between the sample and anti-adhesion effect, contact angle measurement, mechanical properties of the weld zone and diffusional hydrogen content in welded plate are investigated. As a result, we have clarified the optimum mixing amount of volcanic ash and water showing the spatter adhesion preventive effect. Strength reliability of welded plate with coating of the sample is confirmed by mechanical test and the hydrogen content test. From spatter adhesion model experiment using only water, it is suggested that the spheroidization of the spatter particles after solidification is based on the heat transfer effect between the molten spatter and water.

研究分野：金属加工

キーワード：溶接施工 スパッタ粒子 天然材料 強度保証

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

アーク溶接中に大量のスパッタ（図1）が発生し、それが溶接現場内で様々なトラブルを引き起こしている。作業員はタガネなどを用いてスパッタ除去作業を強いられ、時には除去時間が溶接施工時間を上回ることがあり効率的でない。現状、スパッタの付着を防止するには、溶接現場で石油由来の防止剤を塗布している。ところが化学物質等安全シート(MSDS)に基づく調査によれば、上市されている石油由来スパッタ付着防止剤の多くは、環境・人体等への影響を完全に払拭できず、塗布する段階で作業者の健康や地球環境に影響を及ぼすものとわかった。そこで平成20年から安全な天然ガラス質スパッタ付着防止剤の研究開発を開始し、平成23年にその成果を特許出願（特願2011-217567）した。このスパッタ付着防止剤は、「スパッタ付着防止機能」、「安全」、「安価」、「無臭」を併せ持ち、「水」と火山灰由来の「シラスバルーン」を特定の配合比で混合させた塗布剤である。その効果を図2に示す。(a)の矢印は粗大なスパッタを示し、特許出願のスパッタ付着防止剤を塗布した(b)にはスパッタが付着していない。

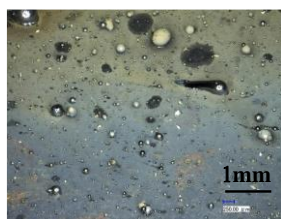
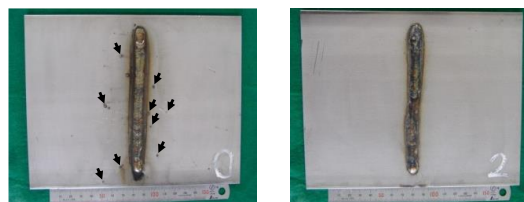


図1 スパッタ粒子



(a) 塗布無し

(b) 塗布あり

図2 溶接スパッタ付着防止剤の効果

2. 研究の目的

本研究は、南九州に賦存する火山灰シラスの天然資源有効活用、そして桜島や新燃岳の火山灰の工業資源化の実現に寄与すべく、火山灰/水の最適な配合量と溶接継手信頼性の定量評価に基づく「オールグリーン溶接スパッタ付着防止剤の高度化と溶接部位信頼性の実証」を研究目的とする。そして、スパッタが付着しない防止剤配合の最適化と効率的な熱収支特性を見出し、溶接スパッタ付着防止剤の高度化を実現するための学術的成果を提案する。

3. 研究の方法

(1) スパッタ付着防止機能の確認

まず、火山灰粒子（3種）を分級し、粒度分布と粒度平均（200 μm 、75 μm 、5.0 μm ）を変化せしめた。それらに所定量の水を混合し、火山灰配合割合を0~100%の間で11等分し、計99ヶの防止剤を作製し、それぞれの粘性、比熱（推定）データを取得した。防止剤を作製後、鋼材およびSUS304プレートにハケ塗りを行い、溶接スパッタの付着状況をビードオンプレート（Bead on Plate）試験にてすべて評価した。評価指標は、塗布しやすさ、スパッタの除去のしやすさ、凝固スパッタと母材表面との接触角 θ （濡れ性）である。しかし図3に一例を示すが、火山灰に水を混合すると、特有の粘度と混合性状が現れる。これまでの研究成果から、火山灰：水が3:7から2:8に変化すると急激にペースト状となることがわかっており（シラスバルーン、平均粒度75 μm ）、各評価が困難な防止剤が数種出てきた。

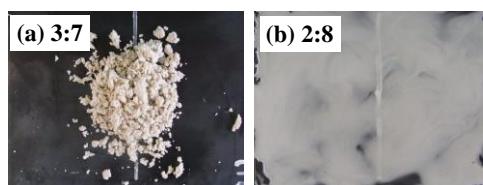


図3 配合比の異なる火山灰/水の混合状況

(2) 防止剤を用いた溶接材の破壊試験

スパッタ付着防止効果の高い防止剤を使用した薄板突合せ溶接材から各試験片を採取し、JIS Z3121法・Z3122法の引張・曲げ・衝撃試験による検証を行った。溶接方法はいずれもJIS Z3801法、溶加材はJIS Z3211法に準拠して実施し、運棒はストレートの1パス（単パス）、あるいは多パスを採用した。なお、塗布する防止剤はシラスバルーン平均粒度75 μm を用い、シラスバルーンと水の配合量は2:8とした。

(3) 防止剤を用いた溶接材の非破壊試験

非破壊試験は、JIS Z3090法による外観試験とZ3060法による超音波探傷試験を実施した。そして、カラーチェック法（染色浸透探傷法）を実施し、曲げ試験後の表面き裂検査を行った。

(4) 拡散水素量調査

JIS Z3118 法による鋼溶接部の水素量測定方法に準拠して、100 g 当たりの拡散性水素量を調査（外部委託）した。表 1 は拡散性水素量測定のための実験条件である。なお、材料は溶接用 SM400A 鋼材を用いた。また、塗布する防止剤はシラスバルーン平均粒度 75 μ m を用い、シラスバルーンと水の配合量は 2:8 とした。

表 1 JIS Z3118 法（拡散性水素量測定の実験条件）

銘柄 (サイズ)	電源極性	電流 (A/ペア)	運棒比	予備乾燥	備考
LB-26 (4.0 mm ϕ)	AC	170~175	0.8	350 $^{\circ}$ C-1 h	測定方法は JIS Z3118 に準拠

(5) 模擬スパッタの熱輸送モデル実験

溶接スパッタ球状化の一要因であると考えられている熱輸送と濡れ性の関係性に焦点を当て、SUS304 プレートに水を塗布した状況下における溶融溶加材を用いたモデル実験、またその際の断熱容器内の雰囲気温度と溶滴形状の関係性を評価した。母材から 300 mm の高さに溶接棒を固定し、ガス溶接機にてその先端を加熱し、溶接棒から溶け出した溶滴（模擬スパッタ）を母材上に滴下した（図 4）。その際、母材表面を濡らしている水の温度と断熱容器内の雰囲気温度、断熱容器外の雰囲気温度を測定した（図 5）。実験後、時間が十分に経過した後に模擬スパッタを母材ごと小片に切り出し、断面・界面観察および接触角測定を行った。

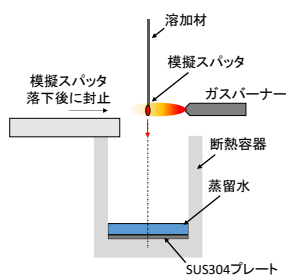


図 4 溶滴(模擬スパッタ)の
滴下実験模式図

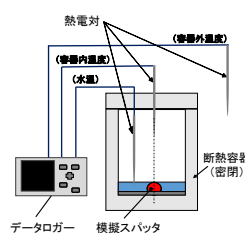


図 5 熱輸送を確認するための
各所温度測定

4. 研究成果

(1) スパッタ付着防止機能の確認結果

計 99 ケの防止剤について超音波粘度計を用いて粘度を求め、SUS304 プレートに塗布し、ビードオンプレート法にて各種評価を行った。その結果、シラスバルーンを用いたものが、スパッタ付着防止機能および作業ハンドリング性に優れていた。総花的ではあるが、シラスバルーンと水の防止剤に関する各種評価結果を表 2 に示す。番号④では火山灰粉体状態が維持され、粘度測定が困難であった。

表 2 シラスバルーンと水の配合割合および粘度

番号	水	シラスバルーン	粘度 (mPa \cdot s)	塗布しやすさ	除去しやすさ
①	90	10	0.9	◎	◎
②	80	20	2	◎	◎
③	70	30	6.25	○	○
④	60	40		△	△

(2) 防止剤を用いた溶接材の破壊試験結果

JIS に準拠した引張・曲げ・疲労・衝撃試験による力学特性やき裂発生に関する検証を行った。図 6 は SS400 鋼材の引張試験片の破断状況を示しているが、すべて突き合わせ溶接部以外の箇所破断が生じた。また図 7 は SS400 鋼材の引張強さの平均強度と偏差を示しており、ほぼ同等と云える。これらの結果より、力学的な継手保証問題等は生じなかったと結論づけられる。

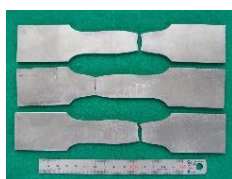


図 6 防止剤を塗布した SS400 鋼材
の引張破断状況

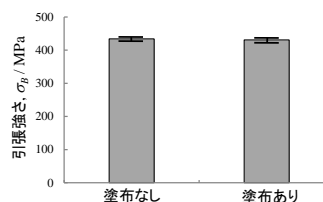


図 7 防止剤の塗布ありとなしの SS400
鋼材の引張強さ

(3) 防止剤を用いた溶接材の非破壊試験結果

曲げ荷重-変位線図において弾性限界点での微小き裂発生に類した荷重変動が観察されたため、アコースティックエミッション評価を実施し、材料表面層からのき裂発生情報を取得した。その結果、JISに抵触せず、且つ早期破壊を助長することのない表面き裂であることがわかった。

(4) 拡散水素量調査結果

表 3 は、SM400A 鋼材に対しスパッタ付着防止剤を塗布したときの 100g 当たりの拡散性水素量の測定結果である。JISZ3118 法の分析精度は 0.5 ミリリットル/100g である。スパッタ付着防止剤有りの平均値は本研究結果の 7%に相当するため、分析精度範囲内といえる。本研究のスパッタ付着防止剤は水を使用しているため、乾燥処理をした SM400A 鋼材に塗布した瞬間に表面反応を起こし、拡散性水素が混入したと考えられる。

表 3 拡散性水素量測定結果(JIS Z3118 法)

溶接材料		電流 A	電圧 V	No.	溶着金属の拡散性水素量	
溶接棒	スパッタ 防止剤				ml/100 g	平均
LB-26 (4.0 mm φ)	有り	175	24	1	8.1	8.0
				2	8.0	
				3	7.9	
	無し	175	24	1	7.6	7.5
				2	7.5	
				3	7.5	

(5) 模擬スパッタの熱輸送モデル実験結果

θ/2 法により SUS304 プレートと模擬スパッタとの接触角θを測定した。図 8 は、SUS304 プレートと模擬スパッタとの接触状況を示した切断面写真と接触角θを示したものである。なお、M_wはモデル実験時に使用した水重量である。また、プレート面に塗布しなかった場合、接触角θは 29.1°であった。故に、少しでも施工面に水分が存在することで接触角が増大し、低い濡れ性を呈することから、水分がスパッタ付着防止に大きく寄与することがわかった。

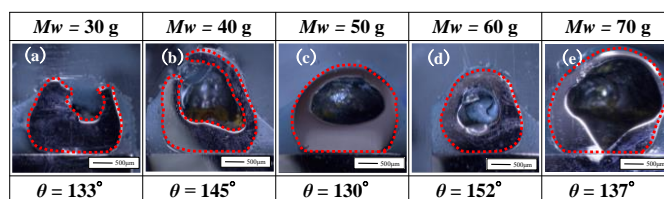


図 8 模擬スパッタ断面観察結果および接触角測定結果

模擬スパッタが容器内の蒸留水に接触後、密閉系となった断熱容器内の各所温度変化を測定し、以下の式にて模擬スパッタから輸送された全熱エネルギーQを求めた。この全熱エネルギーは、高温の模擬スパッタから容器内蒸留水に移動した熱エネルギーQ_{wi}と容器内空気に移動した熱エネルギーQ_{ai}の総和と考え、以下の重ね合わせの式を採用した。

$$Q = Q_{wi} + Q_{ai}$$

模擬スパッタから蒸留水に移動した熱エネルギーQ_{wi}は、模擬スパッタと蒸留水の二相間を輸送する熱エネルギーの基礎式を用いて、

$$Q_{wi} = M_w C_{pw} (T_{wi} - T_{w0})$$

ここで、M_wは蒸留水の重量、C_{pw}は蒸留水の定圧比熱、T_{w0}は模擬スパッタ滴下前の蒸留水温度、T_{wi}は模擬スパッタ滴下後の3時間経過後の蒸留水温度である。

容器内空気に移動した熱エネルギーQ_{ai}は、

$$Q_{ai} = M_a C_{pa} (T_{ai} - T_{a0})$$

ここで M_a は空気の重量、C_{pa} は空気の定容比熱、T_{a0} は模擬スパッタ滴下前の容器内空気温度、T_{ai} は模擬スパッタ滴下後の3時間経過後の容器内空気温度である。

さらに、模擬スパッタが持つ熱エネルギーは模擬スパッタの重量 M_s によって変化するため、全熱エネルギーQを M_s で除した規格化熱エネルギーQ/M_sを用いた。図 9 は、模擬スパッタ滴下後 20 分間ごとに測定した模擬スパッタ重量と規格化熱エネルギーの時間プロファイルである。この結果、模擬スパッタの重量が増すほど規格化熱エネルギー量は比例関係であった。また、熱輸送解析の結果、99%以上は模擬スパッタから蒸留水への熱輸送であり、模擬スパッタから容器内空気への熱輸送は1%未満であることがわかった。

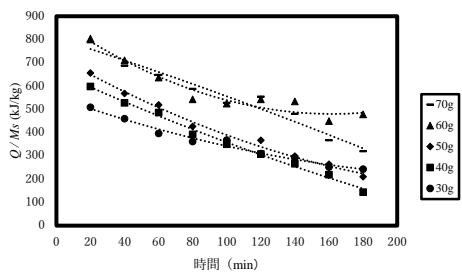


図9 蒸留水量と規格化熱エネルギーの時間プロファイル

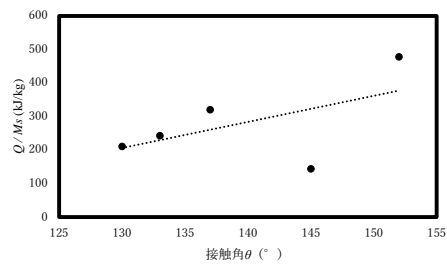


図10 規格化熱エネルギーと接触角の関係性

図10は、規格化熱エネルギー Q/M_s と接触角 θ との関係を示したものである。相関係数は $R=0.55$ であった。データ点が少ない段階での結論ではあるが、模擬スパッタの規格化熱エネルギーを大きくすることが低い濡れ性となることを示唆している。この結果は、水よりも低沸点を示す溶媒の活用が有効であることを示しており、模擬スパッタを用いた熱輸送モデル実験によって明らかになった知見である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 A. Takahashi, N. Yamamoto, M. Tomiyama and T. Toyohiro	4. 巻 vol. 7
2. 論文標題 Contact Angle Measurement of Arc Welding Spatter after Coating with Spatter Adhesion Preventive Agent	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Tropical Resources and Sustainable Science	6. 最初と最後の頁 17-19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件／うち国際学会 5件）

1. 発表者名 A. Takahashi, N. Yamamoto and T. Toyohiro
2. 発表標題 Contact Angle Measurement of Arc Welding Spatter After Coating with Spatter Adhesion Preventive Agent
3. 学会等名 International Conference on Science, Technology and Education 2018（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Minamihara, A. Takahashi, N. Yamamoto and T. Toyohiro
2. 発表標題 Solidification Behavior of Arc Welding Spatter on SUS304 Plate Coated by Spatter Adhesion Preventive Agent
3. 学会等名 8th International Joint Symposium on Education Engineering 2018（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 D.Kawasaki, A.Takahashi, N.Yamamoto and T.Toyohiro
2. 発表標題 Spatter Adhesion Preventive Agent with Glassy Volcanic Ash Bolloon in SUS304 Welding
3. 学会等名 International Eorkshop on Fundamental Research for Science and Technology 2017（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 D.Kawasaki, A.Takahashi and N.Yamamoto
2. 発表標題 Spatter Adhesion Inhibitor made of Volcanic Ash for Metal Arc Welding
3. 学会等名 12th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T.Ando, A.Takahashi, N.Yamamoto and T.Toyohiro
2. 発表標題 Welding Spatter Configuration under each Surface Condition during SUS304 Welding
3. 学会等名 International Workshop on Fundamental Research for Science and Technology 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T.Ando, A.Takahashi, N.Yamamoto and M.Tomiya
2. 発表標題 A Study on Spatter Spheroidizing Mechanism in Metal Arc Welding
3. 学会等名 14th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考