

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420779

研究課題名(和文) マンガン系ヒュームの無害化のためのヒューム粒子径・粒子形状制御技術の開発

研究課題名(英文) Development of controlling technique of fume size and shape for detoxifying manganese fume

研究代表者

田代 真一 (TASHIRO, SHINICHI)

大阪大学・接合科学研究所・助教

研究者番号：70432424

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：溶接ヒュームとは、アーク溶接中の溶融池や溶接ワイヤー等から蒸発する金属蒸気から発生する、ナノ～マイクロメートルサイズの微粒子である。本課題では、主に数値シミュレーションを通じて、溶接プロセスや溶接材料、溶接パラメータ等の違いがヒューム生成機構に及ぼす影響を解明すると共に、吸入時に人体への危険度が特に高い微小粒子の含有率を低下させ、更に防じんマスクでの捕集率も向上させるための、粒子径・粒子形状の基礎的な制御技術の開発を行った。

研究成果の概要(英文)：Welding fume is very small particles with size of nanometer or micrometer nucleated of metal vapor from welding wire and weld pool in arc welding. This study clarified influence of welding processes and welding parameters on welding fume formation process mainly through numerical simulation using a unified model consisting of a GMA welding model and a fume formation model in order to develop technique for controlling welding fume shape.

研究分野：接合科学

キーワード：アーク ヒューム

1. 研究開始当初の背景

アーク溶接においては、熔融した溶接ワイヤー先端部、溶滴および母材の熔融池表面より、高温の蒸気が多量に発生する。これが周囲空間へと放出される過程において、酸化を伴い急激に冷却固化され、粒径数 nm~100nm 程度の極めて微細な 1 次粒子が形成される。更にその一部は凝集し、粒径が最大で数 μm 程度となる 2 次粒子が作られ、これらはアーク溶接部から煙状となって放出される。

これらは溶接ヒュームと呼ばれ、溶接作業者が吸入し続けた場合、じん肺等の深刻な健康被害を生じる事が従来より指摘されてきた。特に、粒径が概ね 50nm 以下の、一般にナノ粒子と呼ばれる微細な粒子は、吸入すると肺組織やリンパ節に沈着し易く、更に一部は肺を通り抜け心臓、脳、生殖器等に達し全身に影響を及ぼすと言われている。近年では、母材及びその接合部の靱性確保の為に添加されるマンガン成分の溶接ヒュームによる、パーキンソン病の発症が報告されている。

これらの対策として、溶接ヒューム吸引装置や防じんマスク等が用いられている。しかしながら、溶接ヒューム吸引装置はアーク気流を擾乱し製品品質を劣化させる上、装置も高価かつ大型である為、使用される環境は限定されており、一方で防じんマスクは安価で広く用いられているものの、微細なナノ粒子については完全な捕集が極めて困難であるのが実情である。

この様に、一刻も早い溶接ヒュームの無害化対策が求められているが、その実現には単に溶接ヒュームの生成量を低減化させるだけで無く、吸入時に人体への危険度が特に高い微小ナノ粒子の含有率を低下させ、更に防じんマスクでの捕集率も向上させる為の粒径・粒子形状の制御技術も不可欠となる。

2. 研究の目的

アーク溶接に関しては、古くから多くの研究が成されているが、その大部分は製品の品質や生産性の向上に主眼が置かれたものであり、作業者の安全性向上に関する研究は重要ながら未だ十分とは言えないのが実情である。特に溶接ヒュームについては、国内での研究報告は極めて少ない。一方、国外では近年徐々に研究報告が増えつつあるが、その多くは溶接ヒュームの生成量や粒径及び成分等と、アークの運転条件や溶接ワイヤー成分との関係を実験的に示すに留まっている。これはよく知られているように、アーク溶接では溶接ワイヤーから母材への溶滴移行のサイクルに依存し、金属蒸気濃度や温度分布等の条件が時間的に著しく変化するため、詳細な理論的検討が難しい事に起因する。

したがって、ヒュームの低減化及び無害化に向け、溶接プロセスや溶接材料、溶接パラメータ等の違いがヒューム生成機構に及ぼす影響を明らかにするためには、GMA 溶接モデルとヒューム生成モデルを完全に連成し

た新たな数値シミュレーションモデルを用いた検討が望ましい。

そこで本研究では上記の連成モデルの開発を行い、主にこれを用いた数値シミュレーションを通じて、上記の影響因子がヒュームの生成機構に及ぼす影響に関して理論的な解明を行うと共に、吸入時に人体への危険度が特に高い微小粒子の含有率を低下させ、更に防じんマスクでの捕集率も向上させる為の粒径・粒子形状の制御技術の開発を試みる。

本成果は、近年健康被害に対する影響が指摘されている溶接ヒュームの無害化にむけた足がかりとなるものと期待できる。

3. 研究の方法

本報告書では、本課題における研究成果の一部として、GMA 溶接モデルとヒューム生成モデルを完全に連成した新たな数値シミュレーションモデルについて説明するとともに、本モデルを用いて実施した解析結果の例を報告する。ここでは特に、パルスミグ溶接における電流波形がヒューム生成機構に及ぼす影響、ならびにシールドガス種の違いがヒューム生成機構に及ぼす影響の解析結果について述べる。

本数値シミュレーションモデルでは、簡単のため純鉄製ワイヤーを用いた GMA 溶接を仮定し、計算領域を 2 次元軸対称とする。図 1 に計算領域およびメッシュ形状を示す。ワイヤー径は 1.2mm、ワイヤー送給速度は 5m/min とする。シールドガスは流量 10L/min で領域上部境界より導入され、領域側面境界より流出するものとする。領域内の流れ場及び温度場、金属蒸気濃度場等は、非定常の質量保存式及び運動量保存式、エネルギー保存式を解くことにより求められる。電流密度の算出には電流保存式を用い、磁場についてはベクトルポテンシャルより求める。プラズマは LTE 近似が成立するものとし、その物性値は金属蒸気濃度及び温度の関数として与える。ワイヤー物性値は温度の関数として与える。自由表面の解析には VOF 法を用いる。ヒューム生成モデルでは均一核生成・不均一凝縮・凝集プロセスを考慮することとし、ここでは計算負荷低減のため、エアロゾルの解析に一般的に用いられているモーメント法を採用する。

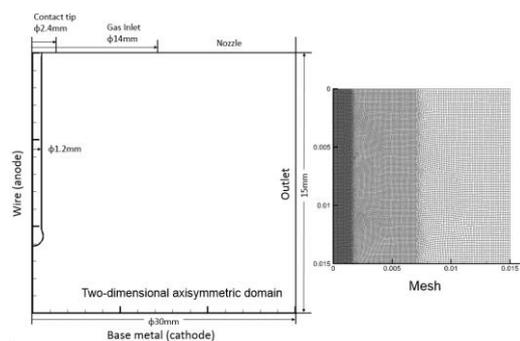


図 1 シミュレーション領域

4. 研究成果

(1) パルスミグ溶接における電流波形がヒューム生成機構に及ぼす影響

ここでは図2に示すパルス電流波形を用いた。パルス周期を10msとし、ピーク電流を450A、ベース電流を50Aとしている。

図3~6は、計算結果の一例として、図2の(a)~(e)に示された5つの特徴的な時刻における温度及び金属蒸気モル分率、ヒューム生成レート、ヒューム質量密度の2次元分布を示したものである。パルス開始時(a)付近ではベース電流であるため、アーク温度は10,000K程度と低温であり、金属蒸気の蒸発量も少ないことがわかる。これが時刻(b)ではピーク電流に達し、アークは20,000Kを超える高温となった。また、ワイヤー先端及び溶滴内部の温度は平均2,500K程度まで加熱された。その結果、これらの表面からは高濃度の金属蒸気が蒸発し、プラズマ流により下流側へと輸送された。アークコラム外縁部の2,000K程度の低温領域にまで輸送されると、金属蒸気の過飽和度が急激に上昇し、核生成を通じてヒュームが生成された。その後、ヒュームは対流及び拡散により周囲空間へと輸送される。

単位体積あたりのヒューム生成レートを体積積分して得られる全ヒューム生成レートの時間変化を図7に示す。ヒュームは主に溶滴上部近傍のプラズマ流上流域及び母材表面近傍のプラズマ流下流域で生成される。

しかしながら、前者の多くはプラズマ中に輸送され再蒸気化される。ヒューム生成レートは第二ピーク電流終了時(d)付近で生じるアーク柱の急激な緊縮により最大となることがわかった。平均した全ヒューム生成レートは7.3mg/sとなり、Piresらにより実験観察された10mg/sと概ね一致した。

以上の様に、溶滴移行現象やアーク現象に加え、金属蒸気の溶滴からの蒸発やアーク中での輸送、アーク柱外縁部での核生成によるヒュームの生成、その後の凝縮及び凝集による成長、周囲空間への散逸といった一連の現象を同時に取り扱うことが可能となった。

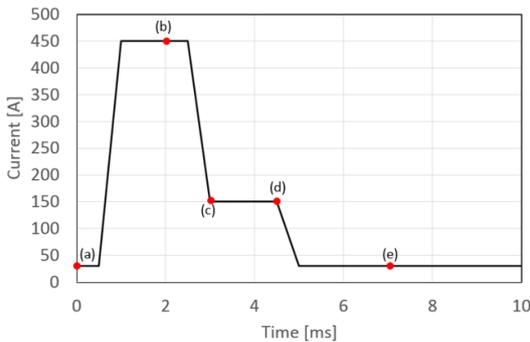


図2 パルス電流波形

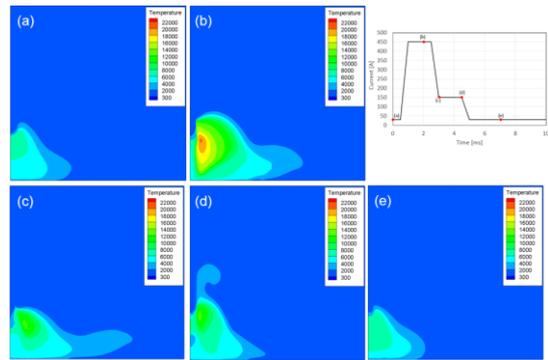


図3 温度分布

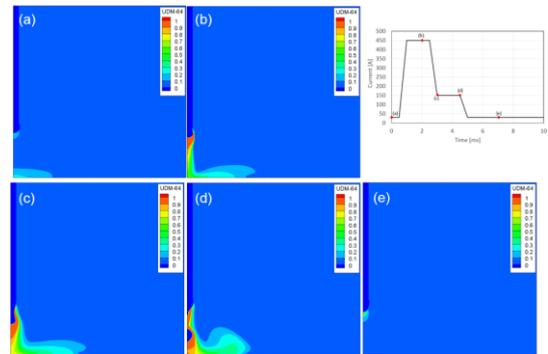


図4 金属蒸気モル濃度分布

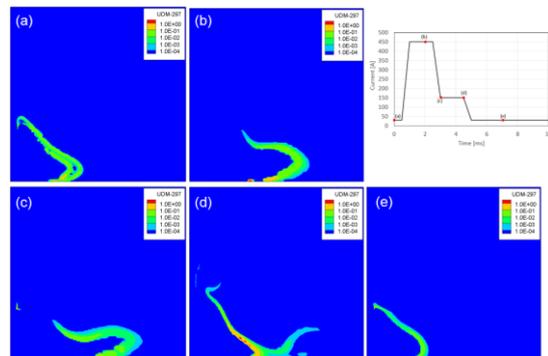


図5 ヒューム生成レート分布

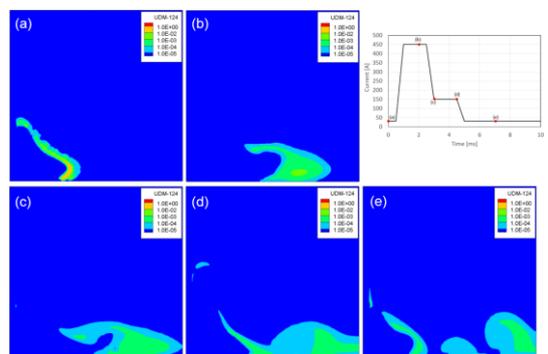


図6 ヒューム質量密度分布

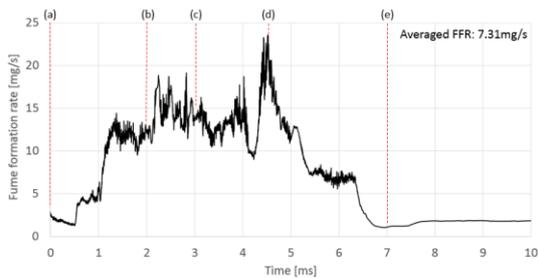


図7 ヒューム生成レート

(2) シールドガス種の違いがヒューム生成機構に及ぼす影響

続いて、上記の数値シミュレーションモデルを用いて、ヒュームの発生が顕著となる炭酸ガスアーク溶接についても基礎的な検討を行った。

表1に主要な計算条件を示す。ここでは電流は直流 280A とした。アルゴンガスを用いた条件では、不活性雰囲気であることから、溶滴からの蒸発粒子種及びアーク中でヒューム生成の粒子種は Fe であるものと仮定した(条件番号1)。炭酸ガスを用いた条件では、Fe 粒子の酸化プロセスが现阶段では未解明であるため、溶滴からの蒸発粒子種及びアーク中でヒューム生成の粒子種は、Fe または FeO であるものと仮定し、各組み合わせについて検討した(条件番号2~4)。

図8及び9は、計算結果の一例として、条件1及び条件4における、計算開始10ms後の温度及び金属蒸気モル分率、ヒューム生成レート、ヒューム質量密度の2次元分布を示したものである。図10は条件1~4における粒子径分布を比較したものである。表2に計算結果のまとめを示す。炭酸ガスアーク溶接の場合、溶滴近傍で生成されたヒュームは、100nmを超える大きな粒子径となることがわかった。これに対してプラズマ流下流域で生成される粒子径は30~70nm程度と小さくなる。ヒューム生成粒子種を FeO とした場合、Fe の場合と比較して粒子径が小さくなる。これは、FeO では核生成により生じる粒子数が増加するためである。溶滴からの蒸発粒子種を FeO とした場合、蒸発量が増加し、ヒュームの粒子径及び生成レートが大きくなることが示された。

アルゴンアーク溶接の場合、溶滴離脱時に溶滴のネックで生成された多量のヒュームは、アークルートが溶滴からワイヤー先端に移動する際にアークにより再蒸気化されることがわかった。炭酸ガスアーク溶接の場合、溶滴近傍で生成されたヒュームは全体の約30%となり、これらはアーク内へと輸送されず、直接的に周囲空間へと散逸することが明らかになった。これは図11に示す炭酸ガスアーク溶接におけるヒューム観察結果と良く一致する傾向であることが確認できた。

本課題の成果により、溶滴移行現象やアーク現象に加え、金属蒸気の溶滴からの蒸発やアーク中での輸送、アーク柱外縁部での核生成によるヒュームの生成、その後の凝縮及び凝集による成長、周囲空間への散逸といった一連の現象を同時に取り扱うことが可能となり、溶接プロセスや溶接パラメータ等の違いがヒューム生成機構に及ぼす影響について基本的な知見を得ることができたが、最終的な目標としている粒子径・粒子形状の制御技術の開発には、未だ多くの課題が残されている。今後はこれらをさらに掘り下げていくとともに、特にアーク中や溶滴表面における化学反応等がヒューム生成プロセスに及ぼす影響についても併せて検討していく必要がある。

表1 計算条件

	条件番号			
	1	2	3	4
ワイヤ組成	Fe			
ワイヤ径 [mm]	1.2			
ワイヤ送給速度 [m/min]	5			
溶接電流 [A]	DC280			
シールドガス	Ar	CO ₂		
シールドガス流量 [L/min]	10			
溶滴からの蒸発粒子種	Fe	Fe	Fe	FeO
ヒューム生成の粒子種	Fe	Fe	FeO	FeO

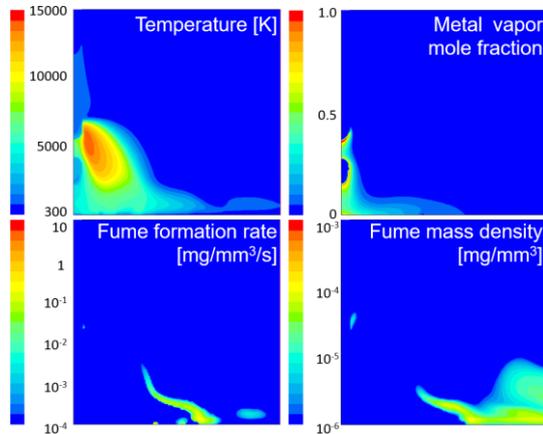


図8 条件1結果まとめ

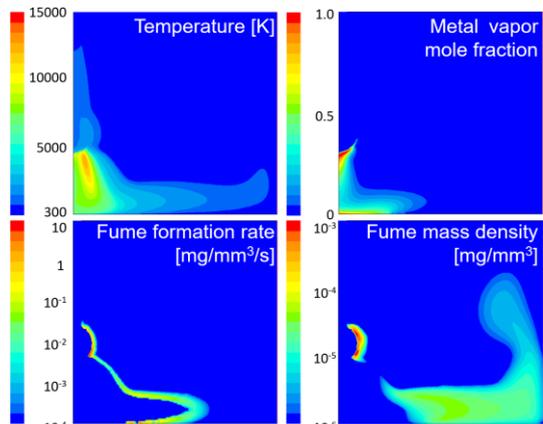


図9 条件4結果まとめ

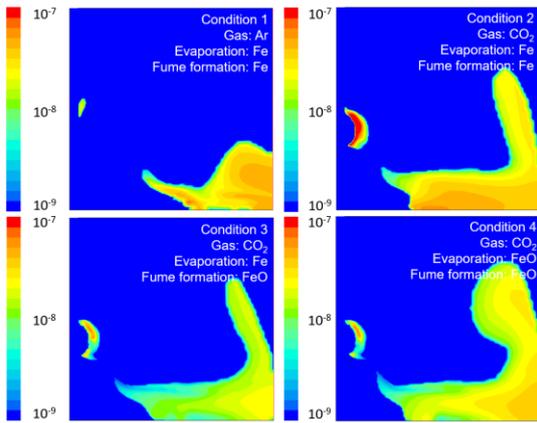


図 10 粒子径分布比較

表 2 計算結果まとめ

	条件番号			
	1	2	3	4
シールドガス	Ar	CO ₂		
溶滴からの蒸発粒子種	Fe	Fe	Fe	FeO
ヒューム生成の粒子種	Fe	Fe	FeO	FeO
ヒューム生成レート [mg/s]	13.1	12.5	12.4	23.2
溶滴近傍からの正味生成率 [%]	-	29.7	25.4	26.5
代表的ヒューム径 (溶滴近傍) [nm]	-	100以上	100以上	100以上
代表的ヒューム径 (下流域) [nm]	100以上	70	30	50

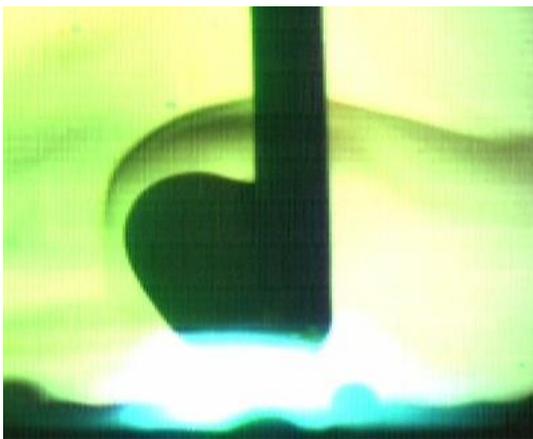


図 11 炭酸ガスアーク溶接におけるヒューム観察結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Tashiro Shinichi, Matsui Sho, Tanaka Manabu, Investigation of Numerical Analysis of Influence of Quenching Rate on Coagulation Process in Welding Fume Formation, 溶接学会論文集、査読有、31 巻、(2013)、31s-34s
- ② Matsui Sho, Tashiro Shinichi, Tanaka Manabu, Investigation of Fume Formation Mechanism in Gas Shield Arc

Welding、溶接学会論文集、査読有、31 巻、(2013)、35s-39s

- ③ Shinichi Tashiro, Anthony B. Murphy, Sho Matsui, Manabu Tanaka, Numerical analysis of the influence of particle charging on the fume formation process in arc welding, J. Phys. D: Appl. Phys., 査読有、VOL46、(2013)、224007

[学会発表] (計 6 件)

- ① Shinichi Tashiro, Anthony B. Murphy, Manabu Tanaka, Numerical Simulation of Fume Formation Process in GMA Welding, 10th International Conference on Trends in Welding Research & 9th International Welding Symposium of Japan Welding Society (9WS)、2016. 10. 12、Tokyo
- ② Shinichi Tashiro, Anthony B. Murphy, Manabu Tanaka, Visualization of Fume Formation Process in Arc Welding, International WELDING Symposium (IWS 2K16)、2016. 10. 05、India (招待講演)
- ③ Shinichi Tashiro, Anthony B. Murphy, Manabu Tanaka, Numerical analysis of welding fume formation mechanism, IIW_Intermediate meeting, 2016. 03. 07、Genova
- ④ Shinichi Tashiro, Anthony B. Murphy, Manabu Tanaka, Influence of Particle Charging on the Fume Formation Process in Arc Welding, International WELDING Symposium (IWS 2K14)、2014. 10. 28、India (招待講演)
- ⑤ Shinichi Tashiro, Matsui Sho, Anthony B. Murphy, Manabu Tanaka, Numerical analysis of welding fume formation mechanism, IIW_Intermediate meeting, 2016. 03. 07、Genova
- ⑥ Shinichi Tashiro, Anthony B. Murphy, Matsui Sho, Manabu Tanaka, Numerical Analysis of the Influence of Particle Charging on the Fume Formation Process in Arc Welding, 12th International Conference on Fluid Control, Measurements, and Visualization (FLUCOME2013)、2013. 11. 19、Japan

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田代 真一 (TASHIRO SHINICHI)
 大阪大学・接合科学研究所・助教
 研究者番号：7 0 4 3 2 4 2 4