

溶接ヒューム流れ解析と職場環境対策

Analysis of Weld Fumes Motion and Improvement of Welding Workshop Circumstances

大原 章* 三井 昇** 田中 廣***
Akira Ohara Noboru Mitsui Hiroshi Tanaka

要旨

MAG溶接時に発生するヒュームは、職場の環境を悪化させるため従来より問題となっていた。ヤマハ発動機㈱においても、作業者の健康を守るために様々な対策を行ってきた。しかし、その対策は発生源からの対策になっておらず、対策のために作業者が装着している保護具も吸気の清浄度は充分確保されているが、行動に制約が出てしまうなどの欠点が存在した。

このため、今回、ヒュームの発生メカニズムの基礎実験を行い、発生における各種要因の影響度を調査した。そして、その結果をコンピュータでシミュレーションし実機で確認することにより、対策のための技術的解明ができたので報告する。

1 はじめに

MAG (Metal Active Gas)溶接法は高能率、高品質であることから各方面で多用されその伸びは著しい。またこの溶接法は半自動、自動、ロボット溶接に適用されているが、溶接時に発生するヒュームの処理が溶接職場での課題となっている。

具体的には換気装置などの工場設備や、防塵マスクを始めとする安全衛生保護具による改善が進められている¹⁾。

2 今までの対策の経緯

ヤマハ発動機㈱においては、防塵マスクの使用と吸引フードの設置などにより対策を行ってきていた。

従来の防塵マスクは、防塵の目的は達成しているが、息苦しい・夏場にはむれる・圧迫感があるなどの欠点があった。そのため、電動式の動力源をもつフィルターをメーカーと共同開発し、作業者全員が装着している。これにより、口元に常に新鮮な空気が供給されるため従来の欠点の多くが改善された。この保護具を装着することにより健康上の保証はされているが、器具を装着する事態は変わりなく装着感が課題となっていた。

保護具レスが最終の目標であり、今回ヤマハ発動機㈱のTPM活動の中で改めて発生源から原因を取り除くための対策を開始し、その結果が今回の報告である。

3 ヒュームとは

溶接ヒュームとは、溶接または切断時の熱によって蒸発した物質が冷却されて、個体の微粒子になったものである。従って、母材表面に付着した油、ゴミなどの異物が、溶接時の熱により燃えて、発生した酸化物や油煙も含まれる。(図1)

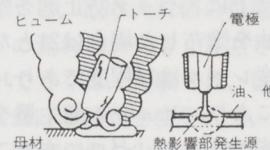


図1 ヒューム発生のメカニズム

ヒュームの大きさは $0.01\text{ }\mu\text{m} \sim \text{数 }\mu\text{m}$ であり、溶接時の上昇気流に乗って上昇拡散し、滞留後、ゆっくり沈降する性質をもっている²⁾。ヒュームの成分は、油、ゴミなどの付着物がない場合60%以上は、酸化鉄からなっている。³⁾ (表1)

表1 分析例（付着物がない場合）

成分	Fe_2O_3	SiO_2	MnO	他
%	66	10	8	16

4 ヒュームの影響について

4.1 人体に対する影響

金属酸化物であるヒュームを、多量に吸うことによって、金属熱といわれる高熱を出したり、長期に吸引することにより、塵肺などの症状をおこす危険がある。⁴⁾

4.2 周辺に対する影響

ヒュームの沈降堆積によって、工場内が汚れる

* 製造事業部
** 製造事業部
*** 技術本部
早出工場
森町工場
基盤技術研究室

のは当然であるが、溶接機、制御盤など、冷却ファン付きの機械設備の中にも入り込む。ヒュームの基板などへの付着により、電気部品などの焼損を招くことがある。実際の例として、溶接機内部に数百グラム堆積した場合があり、定期的な清掃が必要となっている。

5 素材表面状態と発生量

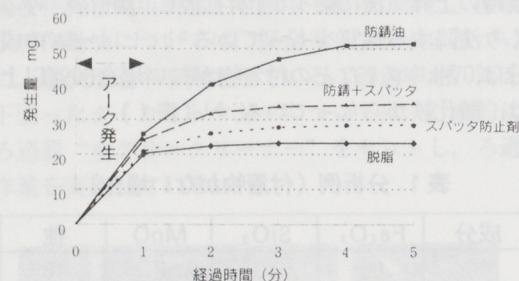
ヒューム発生は、材料の表面状態によって大きく左右されると前述したが、実際の工程では表面に防錆油、スパッタ防止剤などの油が、付着した状態で溶接しているのが実状である。

ここでは、防錆油とスパッタ防止剤のファクターについて、ヒューム発生量への影響度実験の結果について述べる。

5.1 付着物と発生量

図2に素材の表面状態の変化に伴う、ヒュームの発生量と経過時間との相関を示す。材料を脱脂して、油分の全くない状態で、溶接したときの総発生量を10として、他の油の影響度を調べると、材料にスパッタ防止剤を塗布した場合は12、防錆油を塗布した上にスパッタ防止剤を塗布した場合は14、防錆油を塗布した場合は21となる。

現在の生産レベルは14程度であり、溶接前に脱脂することにより、ヒューム発生量を30%削減することは可能であるが、ゼロにすることはできない。つまり、溶接するからにはヒュームの発生を避けることはできない。



◎一定条件下同一位置にて400cm²のフードに捕集されたヒュームの累積濃度をデジタル粉塵計にて1分間隔で測定
条件 電流160A、電圧18V、速度200cm/min
試料 防錆油、スパッタ防止剤は垂れる状態に塗布し垂直状態に30秒間放置したものを使用

図2 表面状態とヒューム発生量

さらに、図2から次のようなことが言える。

①ヒュームは、脱脂された状態ではアーケ発生中に90%が発生し、10%が溶接終了後、2分間以内に発生する。

- ②防錆油が付着していた場合、総発生量は2倍となり、溶接終了後、3分間発生が続き、アーケ発生中の発生量とほぼ同量が発生する。
- ③スパッタ防止剤が、ヒューム発生に与える影響度は、防錆油に比べて低い。これは、スパッタ防止剤の揮発性が、高いことに起因する。
- ④スパッタ防止剤は、吹き付けることにより、ヒューム発生量を押さえる効果がある。これは、スパッタ防止剤の粘性が低いため、粘性の高い防錆油を洗い流しているからであると推測される。

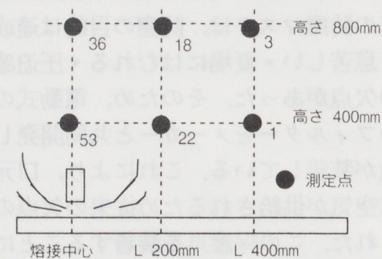
従来、工場ではスパッタ防止剤が、ヒュームの大きな要因であると言われていたが、この調査結果から、必ずしもそうではないということが分かった。

5.2 ヒューム拡散の状況

ヒュームは、溶接時の上昇気流により拡散するのが普通である。そこで、アーケスタート後、アーケ発生点を中心とした、ヒュームの濃度分布を調べた。

ヒュームは、無風状態では、まっすぐ上昇し拡散する。水平方向の拡散は、ある範囲に限られており、通常の作業では、アーケ点から水平方向に400mm離れば、人体への影響はほとんどなくなる。図3また、わずかの風があると、大きく影響を受けることが、他の実験によって確認された。

ヒュームの対策は、こうした性質を十分に考慮して進めることが、ポイントとなる。



溶接条件、測定法は前項の条件と同一
テストは無風状態にて実施
テスト霧団気濃度 $1 \text{ mg}/\text{m}^3$

図3 アーケ点からの距離と10分間の累積濃度 (mg/m^3)

6 ヒューム対策について

工場でのヒューム対策としては、図4に示すような3つの方式があるが、製品形状などの制約から、基本展開は、現状採用されているフード方式

を改善して、工場内への漏れをなくし、現在作業者が着用している防塵マスクを、廃止することを最終目標とした。

具体的には

- ①工程をユニットとして考え、ユニット単位でのヒュームの集塵を進める。
- ②ユニットの周りを囲んで、内部に最適な気流を作り、外部への漏れをゼロにする。

対策ユニットをキャビンと呼び、以後キャビンと称する。

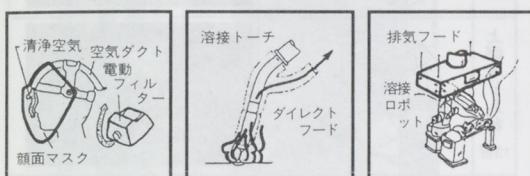


図4 ヒューム集塵の方法

7 キャビンの開発

開発を、4ステップに分けて行った。各ステップごとの展開内容について説明する。

7.1 第1ステップ

(1) 現状分析

現在の上部フード吸引では図5でわかるように工場内の出入り口からの風の進入など外乱の要因があり、捕集効率が悪い。実際に測定してみると、作業エリアに漏れているヒューム量は、 3 mg/m^3 の箇所もあった。この値は、溶接作業環境基準（WES9007）の上限値と同じであり、好ましい環境とは言えない。

(2) キャビンの試作

現状のロボット工程において、ロボットと治具を一体のユニットとして考え、ユニット全体を囲ったキャビンを試作した。（図6）

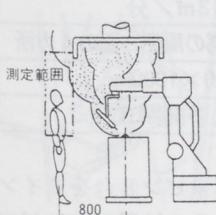


図5 フード集塵

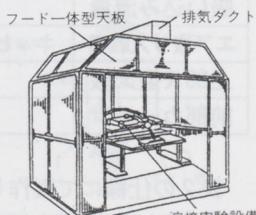
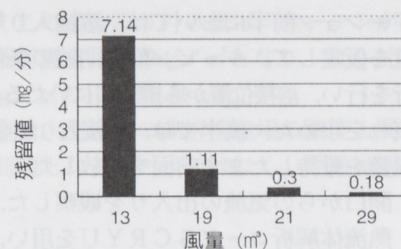


図6 キャビン集塵

このキャビンにて風量、エア吸入口の位置、形状などの実験を行った。

(3) 風量とヒューム残留濃度の相関

キャビン上部よりの吸引風量とキャビン内ヒューム残留濃度の相関を調べた結果を図7に示す。この結果より、試作キャビンでは、吸引風量が $21 \text{ m}^3/\text{分}$ までは、残留値の減少率が大きいが、それ以上では、実験時の環境値（ 0.1 mg/m^3 ）のレベルに近く、風量を増やしても得られる効果が、小さいことがわかる。



データは 100cm の溶接終了後キャビン内コーナー部の値

図7 残量と滞留値

(4) エアの取り入れ口の設定

ファンを用いてヒュームを吸引することで、キャビン内が負圧になり、エアを取り入れる必要がでてくる。取り入れ口の位置によって、内部のエアの流れは、大きく左右され、集塵性能に影響がでてくる。実験では、図8に示すように取り入れ口の種類を変更して、比較した。その結果、滞留が最も少なく、流れがスムーズであったのが、真横方向設定の場合であった。

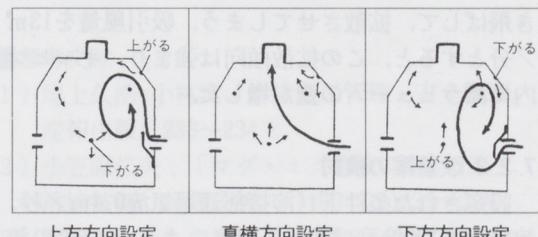


図8 エア取り入れ方向と漏れ

また、採り入れ口の面積が小さいと、その近傍の流速が上がり、溶接時のガスシールドに影響し、溶接欠陥（ブローホール）を引き起こすことも確認された。（図9）

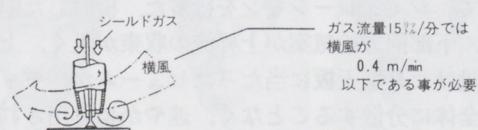


図9 溶接時の横風の影響

7.2 第2ステップ（シミュレーション解析）

7.2.1 解析の目的と方法

試作したキャビンの各部の流れを可視化し、さらに効率のよい、簡素な仕様を見いだすことを目的として、コンピュータシミュレーションを行った。溶接工程では、約80秒の溶接作業をキャビン内で行った後、前面を開放してワークの着脱を行う。

工程サイクルは約2分である。したがって、シミュレーション前半においては、溶接入り熱と吸引風量を仮定して、キャビン前面閉鎖の条件の下で解析を行い、溶接位置から排気口にいたるヒュームの流れを求めた。後半では、溶接入り熱をやめ、吸引風量を維持したまま前面を開放したとして解析し、開口からの気流の出入りを観察した。解析には、熱流体解析コードSCRUYを用い、モデルは59878要素で、断熱壁、壁面摩擦なしとした。溶接条件から発熱は3200Wと推定、ワーク表面に均等に分布させた。

7.2.2 試作キャビンの解析結果

吸引風量を $21\text{m}^3/\text{分}$ とした解析では、溶接入り熱による対流が、顕著に認められた。天板に当たって、左右へ分散した気流の一部がキャビン側面に沿って下降し、空気取り入れ口からの気流と合流して、横方向に循環する流れが、形成されていた。左右の循環流は、キャビン中央のワークの真下で合流して、強い上昇流となるため、ヒュームを吹き飛ばして、拡散させてしまう。吸引風量を $13\text{m}^3/\text{分}$ とすると、この拡散傾向は強まり、キャビン内に漂うヒュームの量が増した。

7.2.3 改善案の検討

設定された条件下（溶接部通過気流 $0.4\text{m}/\text{秒}$ 、溶接範囲 $1000\text{mm} \times 700\text{mm}$ ）では、キャビン内の流れは $17\text{m}^3/\text{分}$ となることから、これ以下の吸引風量では、ヒュームがキャビン内に残ることになる。このため、吸引風量低減を実現するには、ワーク付近の流速を抑えることが必要と考え、排気口をキャビン奥に集中配置する、給気口をキャビン上部前方にする、下部前方にするなどの対策案について、シミュレーションを行った。検討した中では、下部前方給気案が上昇流の収束がよく、上部に設けたR型天板に当たったヒュームが、キャビン全体に分散することなく、速やかに排出されることが分かった。また、吸引風量を低減した場合の解析では、どの給排気案も溶接点付近の流速が、

溶接品質に影響する $0.4\text{m}/\text{秒}$ を越えることはなかった。図10にシミュレーション結果の一例を示す。

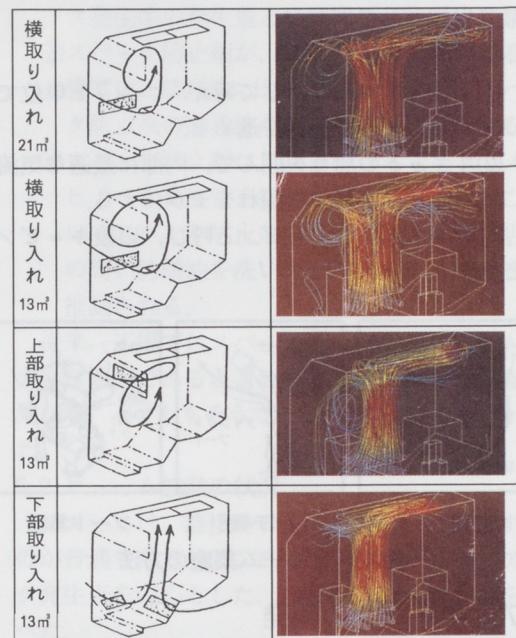


図10 シミュレーション結果
(吸引風量・位置と流れ分析)

7.2.4 前面開放時のヒューム漏れ

カーテン開放時、外部より流入する気流の分布を経過時間5秒おきに求めたところ、左右開き方式では、前面からの漏れがあったのに対し、上下開き方式（下部給気）では、少ない吸引風量においても漏れはほとんど認められなかった。

7.3 第3ステップ（キャビンのライン導入）

シミュレーション結果に基づき試作キャビンの仕様を表2のように変更し、ラインに導入して実際の状況下でのテストを行った。

表2

吸引風量	$13\text{m}^3/\text{分}$
エア取り入れ口	キャビン下部の周囲3面の4カ所
上部R型天板	$900 \times 1800\text{mm}$
前部カーテン	上下開閉式

表2の仕様にて製作したキャビン8台をラインに導入して、確認を行った。その結果、キャビン外へのヒュームの漏れはゼロであり、当初の目的を達成することができた。吸引風量も $13\text{m}^3/\text{分}$ と、従来タイプ（ $42\text{m}^3/\text{分}$ ）の $1/3$ を達成することができた。

また、キャビン方式を採用することにより、溶接工場特有の現象であるスパッタの飛散を、キャビン内にとどめることができた。従来は、スパッタが通路まで飛散していたが、飛散がなくなったことにより、工場の5Sへの寄与も大きいものがあった。図11にラインに導入されたキャビンの外観を示す。

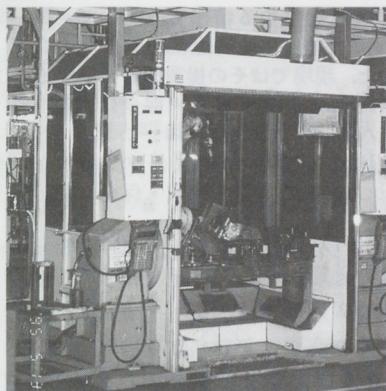


図11 ラインに設置されたキャビン

7.4 第4ステップ（キャビンの問題点と改善）

キャビンからの工場内への飛散は対策できたが、カーテンが開いた瞬間に、キャビン内の残留ヒューム濃度は $0.96\text{mg}/\text{m}^3$ あることがわかった。（作業者の口元高さ位置）この値は、基準値より低いが、目視ではうっすらとヒュームが、漂っている状態であり、人に対しては、好ましい状態ではない。実際の作業では、カーテンが開くと同時に作業者が、製品を取り外すために、キャビンの中に上半身を入れる場合があり、この状態にさらされる。（図12）溶接終了後、カーテンが開いた瞬間のヒューム濃度を下げるには、吸引風量を増やして、単位時間当たりの処理能力を上げるのが、最もよい対策である。そのため、図13に示すような機構を、吸引ダクトに追加して対策を行った。

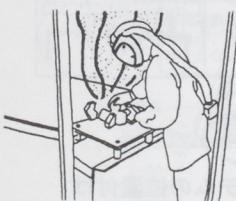


図12 作業時のヒューム



図13 風量制御ダンパー

この装置は、溶接中はダクトの風量を $2\text{m}^3/\text{分}$ とし、キャビン内を負圧状態にし、溶接終了後、カーテンが開く直前から、一定時間 $36\text{m}^3/\text{分}$ の風

量での吸引を可能としたものである。これによって、カーテンが開いた瞬間は、大風量による上方の気流ができ、人が上半身をキャビン内に入れても影響を受けることはなくなった。

従来の吸引風量は、常時 $13\text{m}^3/\text{分}$ であったが、改善後は一定時間 $36\text{m}^3/\text{分}$ で吸引するだけであり、平均吸引風量としては、ほぼ同じか低いレベルにすることができた。

また、この装置取り付け後は、カーテンが開いた時の残留濃度は $0.09\text{mg}/\text{m}^3$ となり、取り付け前の $0.96\text{mg}/\text{m}^3$ の $1/10$ となった。

この値は、工場内の非溶接職場の濃度と同じであり、問題となるレベルではなく、問題は解決された。

8 おわりに

今回のキャビン開発は、基礎データの収集から始まり、コンピュータ解析、ライン導入改善と進み、工場内飛散ゼロの目標に対して、満足できる結果を得ることができた。今後は、キャビンの容積を可能な限り小さくし横展開していく。つまりヒュームの拡散範囲が小さい状態で捕集するということである。具体的には、キャビンを治具部のみにして、容積を $1/2$ にしたもの、ロボットアーム先端部にミニダクトを取り付けたものなどの開発を進めていき、キャビンの容積ゼロを目指していきたい。

■参考文献

- 1) 尾上久浩・小林実：溶接施工管理・安全管理、産報出版、233～234
- 2) 小笠原仁夫：「マグ・ミグ溶接の安全対策」、溶接技術、産報出版、(1994.02)233～234
- 3) 溶接ヒュームの手引き、進和商会、1～3
- 4) 鋼構造 溶接工作法通論、日本溶接協会、262～264

■著者



大原 章



三井 昇



田中 廣