溶接ヒュームを含む流体挙動の可視化と解析に関する研究

村田 顕彦*1

Study on Flow Visualization and Computational Fluid Dynamics Analysis of Welding Fume

Akihiko Murata

労働安全衛生法の改正により溶接ヒュームが規制され,溶接作業のある工場では全体換気装置等の設置が必要と なった。工場の形状は工場ごとに異なるため,換気装置の明確な設置指針は確立されておらず,流体解析による溶 接ヒュームを含む流体挙動の解明が要望されている。本研究では,暗室とレーザーを用いて実験室内における溶接 ヒュームの挙動を可視化し,その結果を流体解析へフィードバックすることで,溶接ヒュームを含む流体挙動を模 擬する解析条件を見出した。

1 はじめに

労働安全衛生法の改正により溶接ヒュームが規制さ れ、令和3年4月1日から溶接作業のある工場では、全 体換気装置による換気の実施、またはこれと同等以上 の措置を講じることが必要となった¹⁾。加えて、熱中 症対策やコロナ対策においても全体換気は必要とされ ている。工場の形状は工場ごとに異なるため、換気装 置の明確な設置指針は確立されておらず、数値流体力 学²⁾ (CFD: Computational Fluid Dynamics)による 微粒子を含む流体挙動の解明が県内企業より要望され ているが、解析結果の妥当性を確認するためには計測 結果と比較する必要がある。当所では、これまで、機 械装置の周囲又は内部に形成される流れ場を、レーザ 一光源及びカメラを用いた測定により、可視化する熱 流体可視化システムを用いた研究を実施してきた³⁾。

本研究では、上記システムを用いて、実験室内にお ける溶接ヒュームの挙動を可視化し、その結果をCFD による解析へフィードバックすることで、溶接ヒュー ムを含む流体挙動を模擬できる解析条件を検討した。

2 実験,解析方法

2-1 溶接ヒュームの可視化実験

溶接ヒューム可視化実験の模式図を図1に示す。暗幕 で覆った可視化用の実験室内(幅:2,850 mm,奥行 き:2,850 mm,高さ:2,450 mm)において,表1の条 件で溶接を実施した。溶接板は板厚9 mmのSS400を, 溶接棒は高酸化チタン系低電圧軟鋼用被覆アーク溶接 は直流インバーターアーク溶接機(スター電機製造 製:STK-80)を使用した。CWレーザーによってレーザ ーシートを溶接者側面から照射し,可視化した溶接ヒ ュームを,溶接者前面からデジタルカメラ(SONY製: α6000)を用いて撮影した。実験時の室温は10℃で あった。なお,この溶接はあくまでも溶接ヒュームを

棒 φ 1.6 mm (スター電機製造製: PB-07) を, 溶接機



図1 可視化実験の模式図

表1	溶接条件	-

溶接方法	被覆アーク溶接
溶接棒	高酸化チタン系溶接棒
溶接電流	約40 A
溶接時間	約10 秒

発生させることが目的であり,溶接すること自体は目 的としていない。

2-2 模擬溶接ヒュームのCFD解析

2-1の可視化実験との比較用解析モデルと解析範囲 を図2に示す。本解析では、模擬溶接部を中心とした 部屋の半分を解析対象とし,解析範囲は横幅1,425 mm, 高さ2,450 mm,計算負荷を低減するために奥行きはな しの2次元解析とした。乱流モデルにはSST k-ωモデ ルを使用し,気相は圧縮性の空気,境界条件は床面を 断熱面,解析領域の上面と側面は流体の出入りは無し の等温面 (10 ℃), 部屋の中心を対称面とした。模擬 溶接部(横幅0.8 mm,高さ1.6 mm)には最初の10秒間 は5,000 ℃,11秒からは30 ℃の温度固定条件を設定 した。実際の溶接において生じる溶接部の溶融や蒸発 は解析できないため、模擬溶接部の物性は5,000 ℃で も変化しない設定とした。溶接ヒュームの挙動を模擬 するために、非定常の粒子追跡解析を用い、模擬溶接 ヒューム(以下「粒子」という。)として投入する質 量熱粒子は, 密度4,000 kg/m³とし, 直径0.2 µm, 1 μm, 10 μm, 20 μm, 30 μmをそれぞれ5個ずつ0.05秒ご とに10秒間投入した。実際の溶接ヒュームには粒度分 布がある⁴⁾が,結果を見やすくするために,前述のと おり粒度によらず同数としている。粒子の投入面は、 模擬溶接部上面である粒子投入面①と、模擬溶接部上 面から1.6 mm 上方の粒子投入面②の2種類設定し、そ れぞれ解析を実施した。投入面を2種類設定した理由 は後述する。解析領域のメッシュ生成に用いた八分木 オクタントサイズは全体に20 mm, 模擬溶接部周辺10 層の範囲を0.1 mmに設定した。境界層の厚み係数は 0.2、厚みの変化率は1.1、層数2としてメッシュを生 成させた。解析ソフトウェアには株式会社ソフトウェ アクレイドルのscFLOW (V2023.1)を用いた。



図2 模擬溶接ヒュームの解析モデルと解析範囲

3 結果と考察

3-1 溶接ヒュームの可視化実験

溶接ヒュームの可視化実験の結果を図3に示す。図3 左図は照明あり、レーザーシートなしで撮影した画像、 図3右図は照明なし、レーザーシートありで撮影した 画像であり、両画像とも溶接開始12秒後を撮影したも のである。レーザーシートを用いることで、溶接ヒュ ームを鮮明に可視化できることを確認した。続けて、 レーザーシートを用いて、溶接ヒュームの流動状況を 可視化した(図4)。溶接によって上昇気流が発生し、 その流れに乗って溶接ヒュームが上昇していることを 可視化できた。また、溶接開始10秒~11秒後までの画 像では溶接の光によって確認が困難であるが、12秒後



図3 溶接ヒューム可視化結果 (左:照明あり,レーザーシートなし 右:照明なし,レーザーシートあり)



図4 溶接ヒューム流動状況可視化結果

の画像では溶接ヒュームが既に天井に到達していた。 今後,溶接中でもヒュームの上昇挙動をとらえるため に,レーザー光(波長532 nm)のみを通すバンドパス フィルターを導入する予定である。

3-2 模擬溶接ヒュームの解析

粒子を粒子投入面①から投入したscFLOWの解析結果 を図5に示す。粒子投入開始から、10秒、11秒、12秒、 14秒,16秒,18秒後の粒子の挙動を示している。高温 の模擬溶接部により、周囲の空気が暖められ、上昇気 流が発生し、その流れに乗って粒子が上昇しているこ とを確認できたが, 上昇しているのは粒径の小さい粒 子の一部のみであり, 粒径の大きい粒子は上昇してい なかった。粒子投入開始から12秒後に模擬溶接部上方 に存在する粒子数をカウントしたところ576個であり、 投入した全粒子5,000個の1割程度しか上昇していなか った。投入開始9秒後の模擬溶接部周辺を拡大し、速 度コンターとベクトル(図6)を確認したところ、模 擬溶接部上面付近に速度が遅いよどみ領域が発生して おり、これにより粒子が上昇しにくくなっていた。こ のように、解析においてのみよどみ領域が発生するの は、前述のとおり模擬溶接部は5,000 ℃でも溶融や蒸 発が起きない設定となっているからである。そこで、 粒子の投入面を粒子投入面②に変更し、再度解析を実 施した。その結果を図7に示す。表示する時間は図5と 同様である。粒子投入面②に投入面を変更した結果,



図5 模擬溶接ヒュームの挙動解析結果 (粒子投入面①より粒子を投入) 粒径の大きな粒子も含めてほぼすべての粒子が上昇し た。粒子投入開始12秒後の模擬溶接部上方に存在する 粒子数は4,998個であった。また、粒子の天井到達時 刻は約11秒であったことから、粒子の上昇挙動につい ては、可視化した溶接ヒュームの挙動をおおよそ模擬 できたと考えられる。



図6 模擬溶接部付近の速度コンターとベクトル



図7 模擬溶接ヒュームの挙動解析結果 (粒子投入面②より粒子を投入)

4 まとめ

被覆アーク溶接時の溶接ヒュームの流れについて, 暗室とレーザーによる可視化を行った。また,CFDを 用いた解析においては,粒子の投入面を工夫すること で,可視化の結果におおよそ一致する解析条件を見出 した。これらの結果を活用し,今後は解析領域を実験 室から工場等の大空間に拡張するための検討を実施し ていく。

5 参考文献

- 1) 厚生労働省:金属アーク溶接等作業を継続して屋内 作業場で行う皆さまへ(2020)(オンライン) https://www.mhlw.go.jp/content/11305000/00065 4441.pdf(参照2024-6-13)
- 2)H.K. Versteeg, W. Malalasekera (松下洋介ほか3 名共訳):数値流体力学(第2版), pp.1-7, 森北出版(2011)
- 3)村田顕彦:福岡県工業技術センター研究報告, No. 32, pp. 49-50(2022)
- 4)大熊洋一郎,秋葉勇,雪竹次太:日立評論,61巻(2 号),pp. 67-70(1979)