

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760682

研究課題名(和文) 噴霧自己組織化の解明による塗装技術の本質的改善

研究課題名(英文) Improvement of the coating operation by observation of self-organization of spray particles

研究代表者

藤本 修平 (Fujimoto, Shuhei)

独立行政法人海上技術安全研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：80586686

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：船体噴霧塗装の効率改善を目指し、エアレス塗装機による噴霧粒子の運動を詳細に観測した。まず塗装機実機を用いた高速撮影実験装置系を構築した。次いで、mean shift法による撮影画像からのノイズ除去や粒子追跡流速測定法による粒子移動速度の算出を実施した。塗装ノズルからの距離が離れるにつれての粒子移動速度の減衰割合等が定量的に明らかになった。これらの定量的な噴霧粒子挙動の情報は、今後研究代表者が実施を予定している液滴の衝突 塗膜の形成過程の観測実験の重要な基礎となる成果である。

研究成果の概要(英文)：Aimed at improving the quality and the efficiency of the coating, we have investigated the motion of liquid particles in an actual airless spray by using a high speed video camera. Here two-dimensional velocity vectors of the particle were quantitatively obtained by the mean shift algorithm and the particle tracking method. These results clearly indicate that the particle velocity decreases with distance from the spray nozzle and also from the spray axis. Since the spatio-temporal variation of the particle velocity in the spray and the deceleration process of the liquid particles directly affect the dynamics of the particle impact (i.e. the quality of coating film), the quantitative data obtained in this study is useful to improve the practical coating operation in shipbuilding.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：混相流 流れの可視化 流れの不安定 塗装 液体微粒化

### 1. 研究開始当初の背景

エアレス塗装機は、塗料に圧力を付加してノズル先端から塗料のみを高速で噴出する。噴出された塗料液膜は周囲空気との干渉により分裂し、液滴となって噴霧を形成する。通常のエア塗装機は塗料と共に空気を噴出するため、その気流の乱流化により飛散分(塗装対象物に付着せず、空気中に分散する塗料)が発生するが、エアレス型は塗料噴出時に空気を含まず飛散によるロスが少ないという利点があり、船体塗装など広い分野で用いられている。しかし、エアレス塗装機においても塗料の飛散は少なからず発生しており、その原因は不明である。船体塗装は塗装面積が広大であるため、飛散によるロスを削減出来れば塗料の使用量が劇的に減少する。また、船体塗装は屋外で行うことも多く、塗料粒子の周囲施設への飛散が問題となるが、その解消にもつながる。

しかし、塗装噴霧に関する学術的研究例は少なく、大学や研究機関ではこれまであまり実施されてこなかった。エンジン内燃料噴霧について数多くの研究例があるが、理想とする噴霧状態が塗装噴霧とは異なるため、それらの研究例をそのまま塗装改善に活かすことは出来ない。塗装の既往研究の多くは塗料や塗装機のメーカーが実施したものであり、いずれも噴霧の定性的な形態観測に止まる。

### 2. 研究の目的

エアレス噴霧塗装の効率改善を目指し、塗料飛散の原因を考察する。本研究では塗料飛散は高速で空気中を移動する液滴群が自発的に形成するパターン(自己組織化)が誘因であると考え、実験でこの機構を解明し、塗装技術の更なる効率向上に資する基礎的な知見を得ることを目的とする。

実際の噴霧は粒子が均一に分布している訳ではなく、各位置に粒子径分布の大小および粒子群の疎密が自発的に生じる。この「噴霧の自己組織化」は塗料の塗着や飛散および塗装面の品質など、塗装技術の優劣に密接に関係していることが予想される。この自己組織化の機構が明らかになれば、従来は経験に頼る部分が多かった塗料や塗装機的设计開発に対して、明確な指針を与える事が出来る。

### 3. 研究の方法

#### (1) 実験装置と実験方法

噴霧内の液滴群の運動を直接観測するための実験装置系を構築した。装置にはエアレス塗装機実機を用いた。図1に実験装置構成の概要を示す。塗装機(旭サナック製エアレス塗装機)はエアコンプレッサから供給された空気圧でプランジャーポンプを作動させ、タンクから塗料を吸い上げる。塗料は塗装機から自動ガンへと送られ、自動ガンから空気中へと噴き出されて噴霧を形成する。塗料噴射の開始/停止は自動ガンの空気作動弁で制御される。電子制御盤により噴霧の開始/停

止タイミングの制御や噴霧時間の0.1秒単位での設定が出来る。制御盤からは噴霧開始のタイミングで外部に信号(TTL 5V)を出力することが出来、これを高速度カメラの撮影開始のトリガー信号として利用した。

実験時に噴霧が周囲に飛散しないよう、透明アクリル製の壁を持つブース(寸法:1000mm×700mm×高さ1500mm)を設置した。ブースの上方にスプレーノズルを配し、ブース内に噴霧を吹き込む構造となっている。噴霧をはさむように高速度カメラ(ナックイメージテクノロジー製GX-3)と高輝度LED光源(IDT製Constellation120)を設置し、バックライト法により噴霧粒子を可視化した(図2)。噴霧粒子を捉えるため、高速度カメラに望遠拡大レンズ(アンフィ製AN-ZE)を装着した。レンズから200mm程度離れた位置を通過する粒子を撮影する。光源からの光を拡散(光量のムラを低減)させるため片方のブース外壁面にトレーシングペーパーを貼付した。この撮影方法により、背景は白色となり噴霧粒子ひとつひとつが黒い影として撮影される(図3)。

高速度カメラのフレームレートを80,000fps(1秒間に80,000コマを撮影する)、シャッター速度を1/333,000sとした。当該撮影条件で取得できる画像のサイズは64pixel×64pixelである。

なお、実験には実際の塗料ではなく、シリコンオイルを使用した。

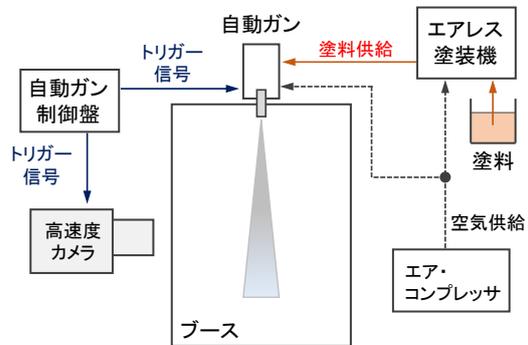


図1 実験装置の構成

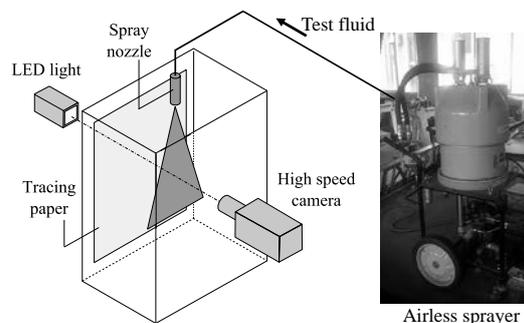


図2 実験装置の概要

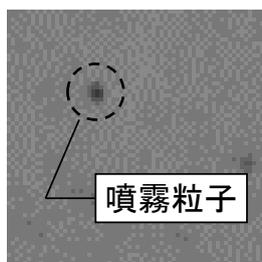


図3 撮影画像の例

## (2) 噴霧粒子の運動解析方法

前述の撮影条件で取得できる画像サイズは 64 pixel×64pixel と小さく、かつノイズを含んでいる。そこで、精度良く粒子を抽出できる画像処理アルゴリズムを検討した。結果、mean shift によるノイズ除去が有効であると判明した。以下にその手順を概説する。

mean shift はデータのクラスタリング等に応用される処理手法であり、画像の「輝度値」や「画像上での位置」等をクラスタリングの対象とすることで画像の平滑化処理にも適用できる。mean shift による画像平滑化の特徴は、エッジを保存した上で平滑化が行える点である (図4)。

まず撮影画像に対し、以下の手順で画像処理を施しノイズを除去し粒子候補を抽出する。

1. 元画像に mean shift による平滑化処理およびクラスタリング処理を施す。mean shift により、エッジを保存したまま画像を平滑化できる (ノイズ除去)。
2. クラスタリング結果に対し、ある範囲のサイズ (画像上での面積) のものを粒子候補とし輝度値を 255 に、それ以外の領域の輝度値を 0 とする (二値化処理)。
3. 二値化処理後の各粒子候補の重心位置を算出し、その位置を粒子位置とする (細線化)。

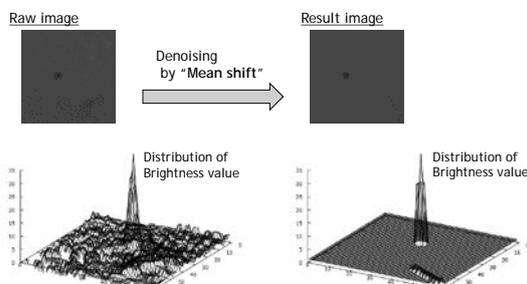


図4 mean shift によるノイズ除去

処理によって得られた複数枚の連続した画像を重ね合わせると、図5に示すような噴霧粒子の軌跡が得られる。

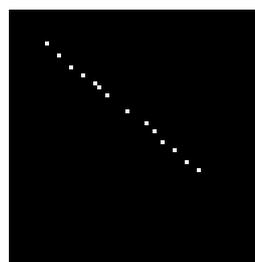


図5 噴霧粒子の軌跡

上記手順での画像処理を適用した画像群 (粒子候補の重心位置を示す二値化画像) に粒子追跡流速測定法 (Particle Tracking Velocimetry: PTV) を適用して粒子の移動速度、移動方向を求めた。粒子同定のアルゴリズムには「4時刻追跡法」を用いた。ただし、実際には4時刻ではなく3時刻分の画像間での対応をとり粒子を特定した。これは解析対象の画像サイズが小さいので、比較的移動速度の速い粒子に対しては4時刻の間の対応がとれない (速い粒子は4時刻目には画像外の位置に移動してしまう) ためである。速度の計測範囲を広くとるため、4時刻でなく3時刻間の対応とした。

## (3) 液膜不安定の観測方法

ノズル近傍での液膜不安定を高速度撮影で観測した。なお、噴霧粒子の運動解析で使用したものは別の高速度カメラ (SHIMADZU HPV-1) を使用した。可視化手法はバックライト法を用いた。

## 4. 研究成果

### (1) 噴霧粒子の運動状態

図6に粒子挙動の観測結果例を示す。試験流体に密度が 970kg/m<sup>3</sup>、動粘度が 300mm<sup>2</sup>/s のシリコーンオイル (信越シリコーン製 KF96-300CS) を用い、ノズルには旭サナック製エアレスノズル 07C05 (ノズル出口面積が約 0.062mm<sup>2</sup> で扇型噴霧を形成する) を使用して、約 7MPa の圧力を負荷した場合の結果である。

図は噴霧内の3カ所 (ノズルから 50mm 下方の位置、ノズルから 150mm 下方の位置、ノズルから 150mm 下方かつ 50mm 右方の位置) における粒子移動速度のヒストグラムである。なお、図中のスプレー範囲 (水色の領域) は使用ノズルのカタログ値から算出したものであり、実際にはこの領域外にも噴霧粒子は存在している。

ノズルから下方に距離が離れるにつれて、またノズルの中心軸から離れるにつれて粒子の移動速度が減速する。また、噴霧の中心付近と外縁付近とで粒子速度の分布を調べると、中心付近では速度分布の分散が比較的小さく、外縁付近では比較的大きくなる。こうした塗装噴霧内での粒子の減速等は従来もっぱら定性的に議論されており、本研究によって定量的な議論が可能となった。

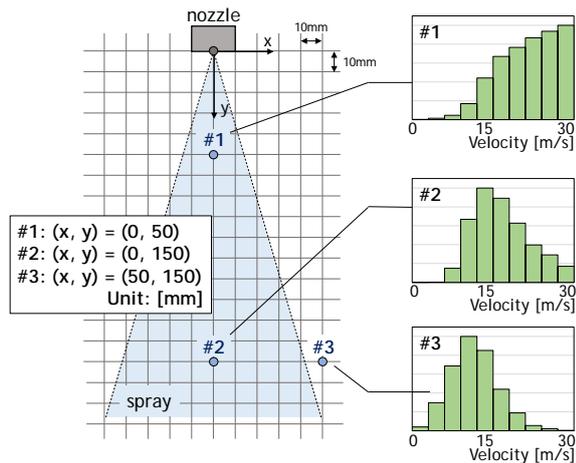


図 6 噴霧粒子移動速度の計測例

## (2) 液膜に生じる不安定波

図 7 に液膜不安定の観測例を示す。液膜に生じた不安定波が黒い影として観測された。不安定波の発生個所（平滑な液膜と不安定波の境界面）は付加圧力の増加に伴いノズル近傍に移動していくこと、また、不安定波の境界面の位置自体も振動しており、その振動数が圧力増加により高くなっていくこと等が判明した。

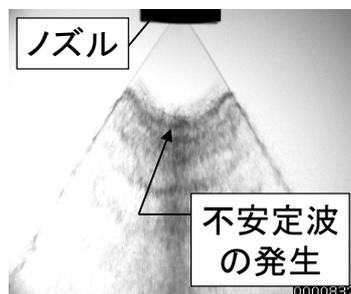


図 7 液膜不安定の観測例

「液膜に生じる不安定」と「噴霧粒子の運動」の中間に存在する「噴霧粒子（液滴）分裂」の観測も試みたが、高速度カメラの撮影コマ数と撮影領域のトレードオフ関係等の制約から、当初目標としていた分裂の様子の観測には至らなかった。

以上に述べた本研究の成果の意義は、従来は定性的な議論に止まっていた塗装噴霧内の粒子挙動について定量的な評価を実施した点にある。

噴霧内各位置での粒子速度分布等の定量的情報は、今後研究代表者が実施を予定している固体壁面等への液滴の衝突→塗膜の形成過程の詳細観測実験の重要な基礎ともなる。

## 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 1 件)

- ① 藤本, 林原, 菅澤, 山根, 松岡, 村上, 噴霧塗装の効率向上のための基礎的研究, 海上技術安全研究所報告, 査読無, Vol.13, No.1, pp.1-12, (2013). : <http://www.nmri.go.jp/main/publications/paper/pdf/21/13/01/PNM21130101-00.pdf>

〔学会発表〕(計 2 件)

- ① 藤本, 熊谷, エアレス塗装噴霧内の噴霧粒子の挙動, 第 91 期日本機械学会流体工学部門講演会, 2013 年 11 月 10 日, 九州大学.
- ② 藤本, 林原, 村上, 菅澤, 画像解析によるエアレス噴霧塗装の定量的良否評価法の開発, 第 90 期日本機械学会流体工学部門講演会, 2012 年 11 月 18 日, 同志社大学.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤本 修平 (FUJIMOTO, Shuhei)

独立行政法人 海上技術安全研究所・研究員

研究者番号：80586686