

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2016

課題番号：26709067

研究課題名(和文)非Newton液滴高速衝突現象の詳細観測による噴霧塗装における理想的粒子径の考究

研究課題名(英文)Study on optimal droplet diameter for spray coating by observation of non-Newtonian droplet impact

研究代表者

藤本 修平 (Fujimoto, Shuhei)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・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) 8,500,000円

研究成果の概要(和文)：船体塗装の効率向上のため、噴霧液滴の粒子径、速度、物性値などの各条件と塗着後に形成される塗膜の表面粗度との関係を定量的に調査した。液滴を一滴単位で射出可能なディスペンサを用い噴霧塗装のモデル実験を実施し、液滴のサイズや速度や非Newton性が塗膜形状に及ぼす影響を調べた。また、実際の塗料を用いて塗膜を形成し、その粗度を調べた。これらの結果をまとめ、液滴の条件から塗膜の表面粗度を求める塗装品質シミュレータプログラムを試作した。

研究成果の概要(英文)：To improve efficiency of coating process of ship's hull, relation between the size, velocity and properties of the spray droplets and surface roughness of the coating film was quantitatively investigated. For the quantitative investigation, model experiments of coating process were conducted. Roughness of paint film which formed using actual paint was measured. Summarizes these results, a prototype of coating quality simulation program for obtaining the surface roughness of the coating from the droplet conditions.

研究分野：流体工学

キーワード：液滴 衝突 非Newton流体 Shear-thinning 混相流 塗装 塗料

1. 研究開始当初の背景

船体をサビ等の腐食やフジツボ等の生物付着から守るために実施される船底塗装は、船舶の寿命に直結する極めて重要な作業工程である。しかし現状では、その効率化や品質向上に向けた取り組みはほとんど手つかずの状態にある。その主たる要因は噴霧塗装の力学的機構が定量的に把握できていないことにある。

例えば、塗装において最重要の考慮要素のひとつは噴霧内の液滴粒子径であり、理想的な粒子サイズについては塗料・塗装関連技術者の共通認識として、次の様に考えられている：「径の小さすぎる粒子は塗着前に周囲気流に流されて飛散してしまい、径の大きすぎる粒子は塗着後に凹凸を形成し塗装面品質を悪化させる」ことから、大きすぎず小さすぎずの最適な粒子径が存在する。しかしながら、実際にはこの「最適な粒子径」は概念的なものに留まっており、その具体的な数値は知られていない。

船体塗装の効率化を達成するためには、この「最適な粒子径」を定量的に明らかにし、液滴の粒子径、速度、物性値などの各条件と「塗着前の飛散」や「塗着後の凹凸」の関係の定量的な把握、つまりは噴霧塗装の動力学的研究が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、塗装時の噴霧粒子径、粒子速度、塗料物性等の各条件と、仕上がり塗装面品質（粗度）の関係をモデル実験によって解明し、噴霧塗装における最適な粒子径、粒子速度および塗料物性を具体的な数値で示すことを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では液滴を一滴単位で射出できるディスペンサを用いて塗装噴霧のモデル実験を実施する。その際には、塗料が有する代表的な非 Newton 流体的性質である Shear-thinning 性が液滴衝突時に及ぼす影響を調査する。Shear-thinning 性は、せん断力が作用すると粘度が低下する性質である。Shear-thinning 性により、塗装機ノズルを通過時の高せん断力下では塗料の粘度が低下し良好な微粒化が得られ、塗装対象物表面に塗料液滴が衝突して液膜が形成された後は粘度が回復（高粘度化）し、塗膜のタレを防止する（図1）。Shear-thinning 性を有する試験液体として、本研究ではキサントガム（三晶 Kelzan ST）の水溶液を用いた。

各種の濃度のキサントガム水溶液のせん断速度と粘度の関係を図2に示す。図はデジタル粘度計（ブルックフィールド RVDV1M）で計測した結果である。図は、横軸がせん断速度 1/s、縦軸が粘度 Pa·s である。せん断速度の増大に伴い粘度が大きく低下しており、特に、質量パーセント濃度 2.0 wt% の Kelzan ST 水溶液は実際の船底塗料に近い

粘度値を有している。このように実際の塗料に近い高粘度領域における非 Newton 流体の液滴衝突実験は過去に報告されていない。

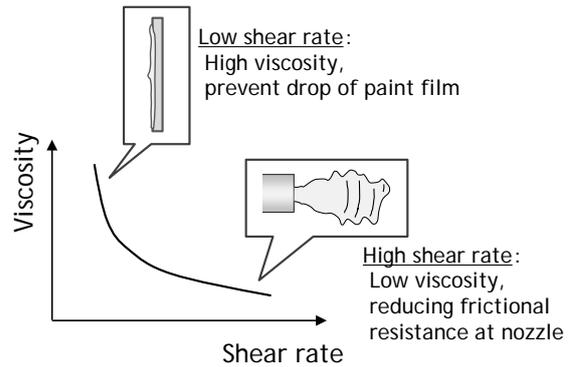


図1 塗料の Shear-thinning 特性

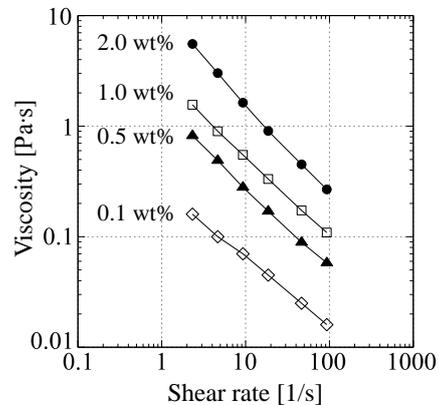


図2 試験液体の Shear-thinning 特性

液滴衝突のモデル実験に使用した装置の概要図を図3に示す。微小な液滴を一滴単位で射出できるディスペンサ（武蔵エンジニアリング Aerojet）を使用した実験装置を構築した。ディスペンサから射出された液滴が固体壁面に衝突する際の挙動を、高速度ビデオカメラ（Nac GX-3）で撮影した。液滴変形を鮮明に捉えるため、背後から白色 LED 光源（IDT Constellation120）で液滴を照射するバックライト法を用いた。光源からの光を拡散させるため、液滴の背後にトレーシングペーパーを配置した。高速度カメラには拡大ズームレンズを装着し、直径 1mm 以下の液滴を撮影した。撮影時の高速度カメラのフレーム数は 10,000 fps、シャッター速度は 1/333,000 s とした。取得した画像を解析し、衝突前後での液滴の変形を定量的に評価した。

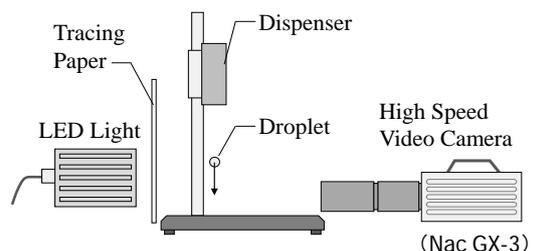


図3 液滴衝突の実験装置

液滴の変形を評価するため、画像解析により図4に示す形状パラメータを算出した。 D_0 は衝突前の液滴の直径、 U は衝突直前の液滴の移動速度、 D は衝突後の液滴（液膜）の直径、 H は衝突後の液膜の中心高さを表す。また、 H_c は衝突後の液膜中心高さの時間変化を示す（ H_c は時間の関数である）。

ディスペンサで種々の D_0 、 U の液滴を生成し液滴衝突実験を行い、衝突による液滴の形状変化を評価した。

種々の条件での液滴衝突実験で液滴衝突挙動を把握した上で実際の塗料を用いて塗膜を形成し、その粗度を表面粗さ測定機（ミツトヨ SJ410）で計測した。液滴衝突時の条件と形成される粗度の関係を調べ、別途実施した塗装機実機を用いた液滴生成の観測実験の結果と合わせて塗装品質シミュレータプログラムを試作した。

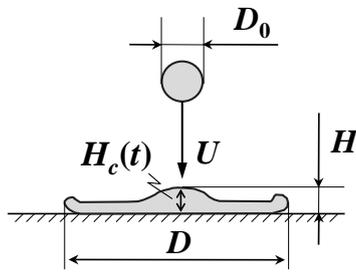


図4 液滴の形状評価パラメータ

4. 研究成果

図5に実験で用いた液滴の粒子径 D_0 と移動速度 U の分布を示す。 D_0 の範囲はおおよそ400 – 1200 μm であり、 U の範囲はおおよそ0.5 – 8.0 m/sである。

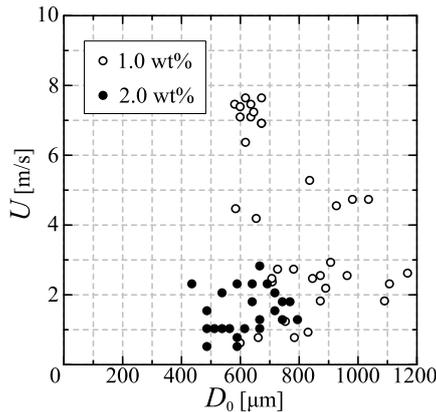


図5 液滴の粒子径と移動速度の範囲

図6に実験で取得した液滴衝突画像の一例を示す。条件の異なる2液滴の衝突を比較した画像である。いずれも濃度1.0 wt%の水溶液で、(A)は $D_0 = 710 \mu\text{m}$ 、 $U = 2.5 \text{ m/s}$ であり、(B)は $D_0 = 750 \mu\text{m}$ 、 $U = 1.2 \text{ m/s}$ である。図6から、条件のちがいに衝突後の液滴の挙動（(B)では、液膜中心高さの変動が顕著に見られる）や形状が大きく異なることが判る。

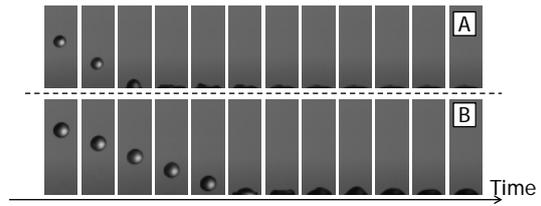


図6 液滴衝突時の変形挙動

衝突時の液滴の慣性力を表す指標として以下のWeber数を用いる。

$$We = \frac{\rho U^2 D_0}{\sigma}$$

ここで、 ρ は試験液体の密度、 σ は試験液体の表面張力である。キサントガム水溶液の表面張力は濃度による変化がほとんどない、との過去の計測例より、本研究では $\sigma = 72.75 \text{ mN/m}$ （水の表面張力の値）の定数とした。 σ が濃度によって変化しないことから、Weber数は液滴がもつ衝突直前の慣性力の大きさを表す。

図7、図8に衝突後に形成される液膜の形状の分析結果を示す。図7は横軸にWeber数、縦軸に液膜の拡がり度合（ D/D_0 ）をとっている。また、図8の縦軸は液膜の平滑度合（ H/D ）を表している。両図から、同程度のWeber数においてはより高い濃度の2.0 wt%の水溶液の方が1.0 wt%水溶液に比べて衝突後に形成される液膜が広範囲に広がり、かつ平坦であることが判る。つまり、Weber数が同じ値をとるとき、2.0 wt%の方がより状態の良い塗膜（平滑で薄く広がっており、粗度が小さい）が形成される。

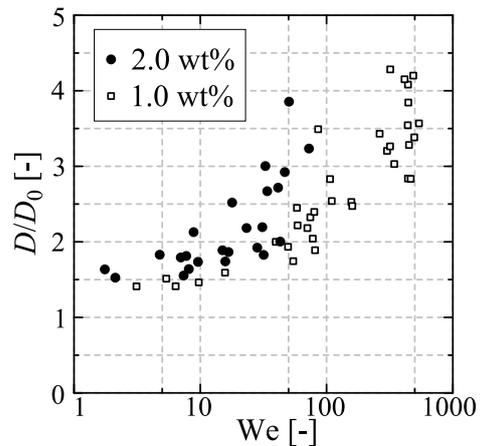


図7 液膜の拡がり度合

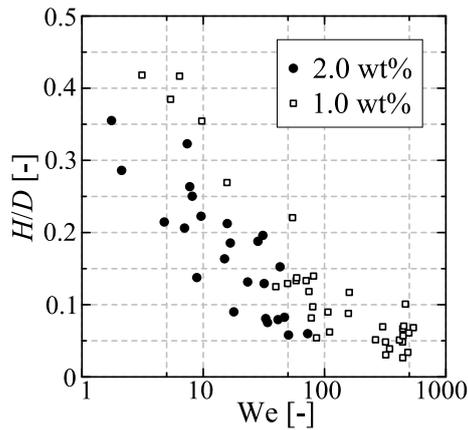


図8 液膜の平滑度合

衝突後の液膜中心高さの時間変化の例を図9に示す. 図の横軸は時間, 縦軸は衝突後に各液滴が静止状態に至った後の液膜中心高さ H からの差を示している. 図9のデータはいずれも濃度 1.0 wt% についてのデータである. 衝突時の液滴のもつ慣性力 (Weber 数) が大きくなるほど, 液膜中心高さの変動の振幅も大きくなる. また, 中心高さの変動の周期に着目すると, 時間の経過に伴い, 延びていることが判る. この振動周期の延長は Shear-thinning 性液体に特有のものとして過去に報告されている.

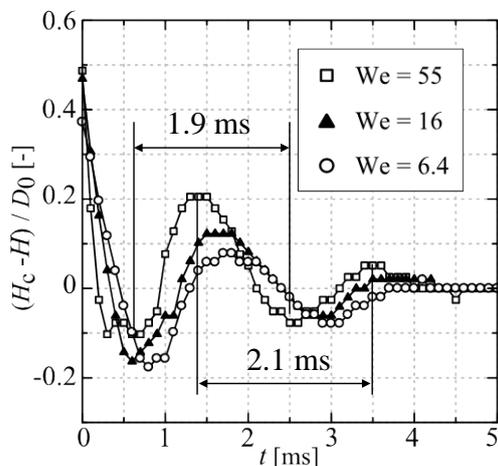


図9 液滴中心高さの時間変化 (Weber 数による差異)

図10は同程度の Weber 数において濃度の異なる2液滴について, 液膜中心高さの時間変動を比較したものである. 濃度の高い 2.0 wt% 水溶液の方が, 中心高さの変動が速やかに減衰していることが判る.

以上の観測結果から, 試験液体の濃度が衝突後の液滴の挙動に大きな影響を及ぼすことが明らかになった. 濃度が液滴変形挙動に及ぼす影響の機構として, 図11に示すモデルを考えた. まず, 比較的に濃度が低く Shear-thinning の程度も弱い液滴は, 壁面衝突時に慣性力の作用により液膜となり, その後

表面張力の作用により中心位置付近に液体が集まるような挙動を示し, 液膜中心位置での振動が現れる. 一方, 高濃度の溶液の場合は粘性が回復した際の粘度の値が大きいため表面張力の引き戻し作用を上回り, 液膜中心高さの時間変動も速やかに収まり比較的に平滑な液膜が形成されると考える.

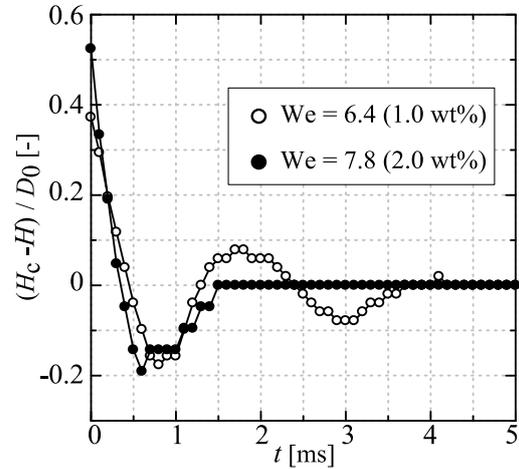


図10 液滴中心高さの時間変化 (キサンタンガム濃度による差異)

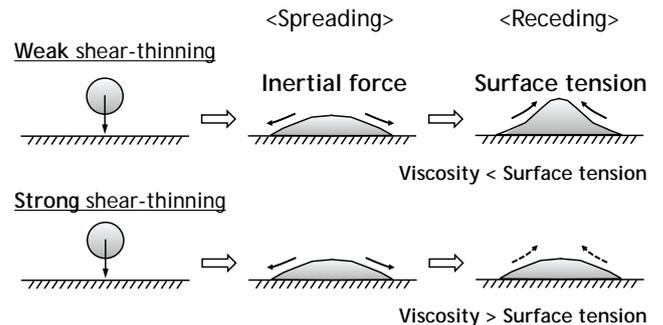


図11 Shear-thinning 性による液滴変形挙動のちがひ

非 Newton 液滴の壁面衝突挙動を把握した上で, 衝突後に形成される塗膜の粗度を計測した. 実際の塗料 (水性塗料) をディスペンサで射出して壁面に衝突させて乾燥させ塗膜面を形成した. 図12に粗度計測結果の例を示す. 同じ位置に塗料液滴を5滴 (図中の破線) または10滴 (実線) 衝突させた際の表面形状である. 多数の液滴を衝突させた程, 塗膜の形状は複雑になり粗度も大きくなる. 種々の液滴条件についてこの様な粗度計測を実施した.

加えて, 実塗装機を用いてキサンタンガム水溶液を噴霧し高速度カメラで撮影した. 粒子画像流速測定法を用いて実際の噴霧内の粒子速度を計測し, 塗装機ノズルの種類, 試験液体の粘度あるいは塗装機圧力の変化が速度に及ぼす影響を調べた.

これらの情報と液滴衝突挙動および衝突後に形成される表面粗度の計測結果をまと

め、塗装品質シミュレータを試作した。



図 12 粗度計測結果の例

造船塗装作業の改善を目指し、船用塗料と同程度の非 Newton 性を有する試験液体を用いて液滴の壁面衝突実験を行った。塗料と同程度の高濃度溶液の場合は、粘性回復の作用が大きくなり、衝突後に形成される液膜がより平滑になる等、非 Newton 性が衝突後形状に及ぼす影響が明らかになった。また、塗膜面の粗度計測と実塗装機を用いた噴霧内の粒子速度計測を実施した。以上の結果をまとめ、塗装品質シミュレータを試作した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

1) 藤本修平, 可視化技術による造船塗装作業の定量評価, 機械の研究, Vol.69, No.1 (2016), 査読無し, (依頼原稿).

〔学会発表〕 (計 6 件)

1) Shuhei FUJIMOTO, Ichiro KUMAGAI, Statistical characteristics of motions of liquid particles in airless spray, 26th European Conference Liquid Atomization & Spray Systems (2014), Bremen University, Germany.

2) 藤本修平, 熊谷一郎, エアレス噴霧における粒子挙動の統計解析, 第 92 期日本機械学会流体工学部門講演会 (2014), 富山大学.

3) 藤本修平, 塗料を模擬した非 Newton 液滴の壁面衝突時の挙動観測, 第 24 回微粒化シンポジウム (2015), 神戸大学.

4) Shuhei FUJIMOTO, Observation of impact of shear-thinning droplet simulating actual marine paint, 28th European Conference Liquid Atomization & Spray Systems (2016), Brighton University, United Kingdom.

5) 藤本修平, 船底塗料を模擬した Shear-thinning 流体を用いた液滴の壁面衝突, 第 94 期日本機械学会流体工学部門講演会 (2016), 山口大学.

6) 藤本修平, Shear-thinning 性が液滴の壁面衝突後の形状に及ぼす影響, 第 25 回微粒化シンポジウム (2016), 富山国際会議場.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤本 修平 (FUJIMOTO, Shuhei)

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術
研究所・その他部局等・研究員

研究者番号: 80586686