

噴霧塗装の効率向上のための基礎的研究

藤本 修平*、林原 仁志*、菅澤 忍*、
山根 健次**、松岡 一祥***、村上 睦尚*

A Fundamental Study on Improvement in Efficiency of Spray Painting

by

Shuhei FUJIMOTO, Hitoshi HAYASHIBARA, Shinobu SUGASAWA,
Kenji YAMANE, Kazuyoshi MATSUOKA and Chikahisa MURAKAMI

Abstract

Improvement effect of painting efficiency by using low volatile organic compounds (VOC) paint was investigated experimentally and numerically. We measured painting efficiency of low-VOC paint and conventional paint under crosswind by wind tunnel experiment. The painting efficiency and particle size distributions of spray of the test paints were calculated by simple numerical calculation. The efficiency of low-VOC paint was clearly better than that of conventional paint. It was shown that the motions of spray particle of the low-VOC paint were predictable by the simple numerical model.

And, we developed quantitative evaluation method of airless spray by using entropy of gray scale image. Stroboscopic method was employed to visualize the spray. An undesirable "tail" region of the spray is detected as low image entropy area. As against the conventional visual judgment, the proposed method enables a quantitative evaluation of spray.

* 構造系、** 大阪支所、*** 元研究担当理事
原稿受付 平成25年4月5日
審査日 平成25年5月29日

目 次

1. はじめに	2
2. 塗装性能の定量的評価試験	2
2.1 塗装性能評価試験の方法	2
2.1.1 試験装置	2
2.1.2 供試塗料	3
2.1.3 試験方法	3
2.1.4 試験条件	4
2.2 塗装性能評価試験の結果	5
2.2.1 塗着効率の測定結果	5
2.2.2 落下粒子量の測定結果	5
2.2.3 飛散粒子量の測定結果	5
3. 簡易計算による粒子径分布の推定	6
3.1 粒子径分布の推定方法	6
3.1.1 噴霧粒子運動の計算方法	6
3.1.2 噴霧形状のモデル化	6
3.1.3 粒子径分布・塗着効率のモデル化	7
3.2 粒子径分布推定の結果	7
3.2.1 粒子軌跡の計算例	7
3.2.2 単一粒子径噴霧の塗着効率の計算例	7
3.2.3 粒子径分布の推定例	8
3.2.4 塗着効率の推定例	8
4. 噴霧の定量的良否評価の試み	9
4.1 噴霧の定量的良否評価の方法	9
4.1.1 実験装置	9
4.1.2 画像解析の方法	9
4.2 定量的良否評価の例	10
5. まとめ	11
謝辞	11
参考文献	11

1. はじめに

塗料等に含まれる揮発性有機溶剤（Volatile Organic Compounds: VOC）は、光化学スモッグの原因物質の一つであることから、改正大気汚染防止法によって排出量が規制されている。塗料自体の VOC 含有量を低減させれば、従来と同様に塗装作業を実施しても排出量を削減できることから、低 VOC 型の塗料の開発が各塗料メーカーで行われている。こうした低 VOC 型塗料の第一の眼目は大気汚染問題への対応であるが、一方で、低 VOC 型の塗料を使用して船底塗装を実施した場合、塗料粒子の周囲への飛散量が低減したことが聞き取り調査などから確認された¹⁾。

飛散量低減の要因としては、VOC 含有量の低下による塗料の高密度化が考えられる。一般に、

VOC は塗料成分に比べて密度が低いいため、VOC 量が低減するほど塗料全体の密度は高くなる。塗料の高密度化による効果として、噴霧を構成する塗料粒子の密度も増大し、粒子運動の直進性が向上する（周囲空気との摩擦によって減速されにくくなる）が期待される。加えて、飛散量の低減に伴い、塗料の塗装対象物への塗着割合が向上、ひいては塗装作業の作業効率が向上していると考えられる。

低 VOC 塗料の使用による作業効率向上効果は、前述の聞き取り調査などから定性的にはある程度確認されているが、定量的には未解明である。そこで、低 VOC 塗料の塗着量増加・飛散量低減効果を定量的に調査するための実験を行った。本報告では、当該実験の概要および結果を述べる。また、塗装粒子の飛散量低減に向けた取り組みの一例として、噴霧の可視化実験を紹介する。

2. 塗装性能の定量的評価試験

2.1 塗装性能評価試験の方法

2.1.1 試験装置

塗装作業の効率を表す指標として、一般に塗着効率 E_p が用いられる。 E_p は塗装対象物（船体など）に塗着した塗料質量 W_e を、塗装に使用した全塗料質量 W で除した値の百分率で定義される。

$$E_p = \frac{W_e}{W} \times 100 \quad (2.1)$$

本研究においてもこの E_p を塗装性能の評価指標の一つとする。塗料ごとの塗着効率の差異を定量的に評価するため、塗装ブースに簡易的な風洞を設置し、横風条件での噴霧塗装試験を実施した。一連の試験は旭サナック(株)の塗装技術センターにおいて実施した。

Fig.1、Fig.2 に試験装置の概要を示す。吸い込み型の風洞であり、Fig.1 の前面部が開放部、背面部が吸い込み部（Fig.2 (a)の"outlet"）で、前面から背面に向けて空気が流れる構造になっている。既存の塗装ブースにベニヤ板製のトンネルを付加することで風洞を形成した。左側壁の穴部（(d)スプレーガン窓）から風洞内部にスプレーガンを挿入し、塗料を噴射する。ガン窓の対面の風洞内壁面にはアルミホイル(a)が貼付してあり、これを噴霧の塗着対象物とする。風洞の底面にもアルミホイル(b)を設置し、(a)に塗着せずにその周囲に落下した噴霧粒子を捕集する。また、風洞の出口部

にはファイバーフィルター(c)を設置し、(a)に塗着せず、周囲にも落下しない(アルミホイル(b)にも付着しない)で、風に流され飛散した粒子を捕集する。以下では、(a)、(b)、(c)の各捕集材に捕らえられた塗料粒子をそれぞれ(a)塗着粒子、(b)落下粒子、(c)飛散粒子と呼ぶことにする。これらは、実際の塗装現場において(a)塗装対象物に付着し塗膜を形成するもの、(b)塗装対象物に付着せず、その近傍において落下するもの、(c)塗装対象物から離れた箇所まで飛散するものに対応する。塗料の使用量に対して、塗着粒子の割合が高いほど塗装の効率(塗着効率 E_p)は向上する。また、落下粒子量は塗装時の作業環境に、飛散粒子量は塗装作業場周辺への環境に影響する。

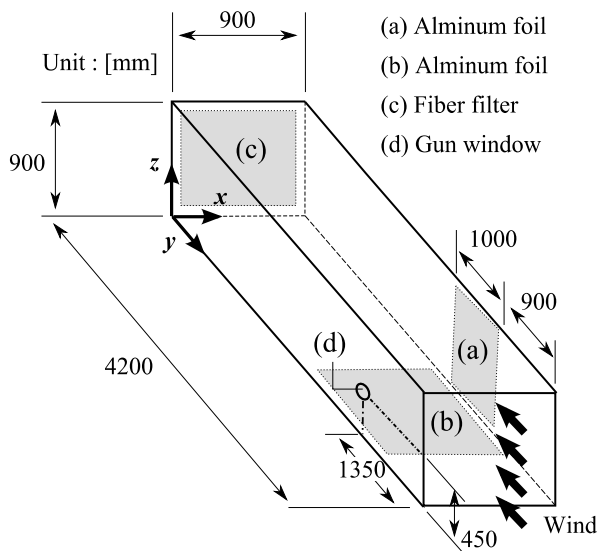
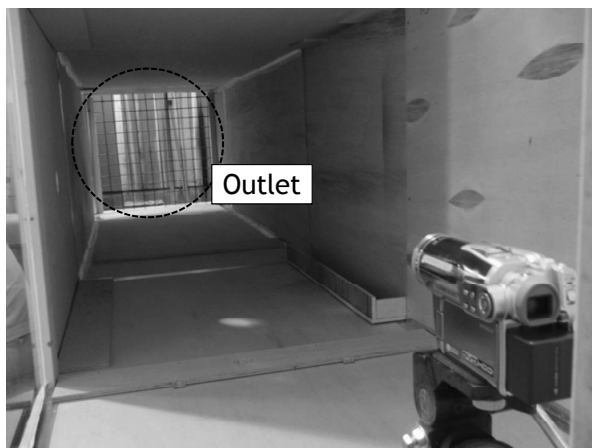
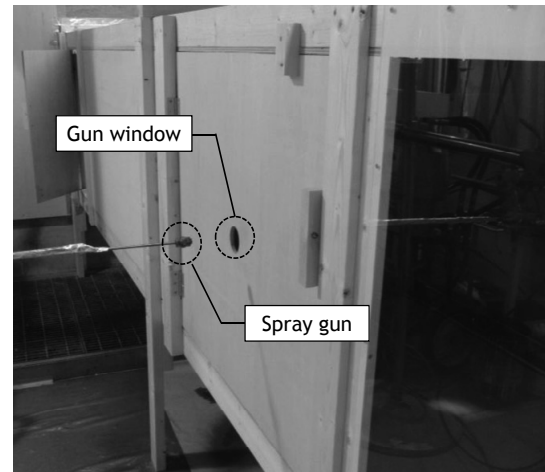


Fig.1 Experimental setup for painting efficiency



(a) Inside



(b) Outside

Fig.2 Picture of the wind tunnel

2.1.2 供試塗料

3種の船底用防汚塗料(A、B、C)について塗装性能評価試験を実施した。塗料Aは従来品であり、他の2塗料よりも含有されるVOC量が多い。塗料B、Cは低VOC型塗料であり、Bは市販品、CはBよりも更にVOC量を低減させた試作品である。塗料物性値(密度、粘度など)の差が塗着効率に与える影響について調査するため、塗料Bだけでなく塗料Cも使用することとした。それぞれの塗料の主要な物性値をTable1に示す。VOC含有量(VOC Content)は塗料1Lあたりに含まれるVOCの質量を、NV(Non-volatile Organic Compound)値は塗料の乾燥状態での質量と湿潤状態での質量の比を表す。揮発成分であるVOCの含有量が多いほどNV値は小さくなる。一般に、VOCは塗料の固形成分(塗膜を形成する成分)よりも低密度なので、VOC含有量の高い従来型塗料Aは、低VOC型の塗料BおよびCに比べて密度が低くなっている。

Table 1 Properties of test paints

	Density [kg/m ³]	Viscosity [mPa·s]	VOC Content[g/L]	NV [%]
A	1700	650	513	73.8
B	1970	680	330	83.6
C	1960	850	299	85.8

2.1.3 試験方法

以下の手順で塗着効率を測定した。

- ① 所定の条件(付加圧力、使用ノズル等)の下で塗料を塗装対象物(アルミホイル(a))に

- 向けて一定時間噴射する。あらかじめ同一条件での 1s あたりの塗料噴射量を計測しておき、塗料の噴射時間から塗料使用量 W を算出する。
- ② 塗装後、塗料が付着したアルミホイル(a)を回収し、電気炉で付着塗料を完全に乾燥させた上、質量を計測する。あらかじめ計測しておいたアルミホイル(a)単体での質量との差をとり、その値を NV 値で除して塗料塗着量 W_e を算出する。
- ③ 上記の①、②で算出した W 、 W_e から(2.1)式により塗着効率 E_p を算出する。

塗料が湿潤状態の場合、VOC の揮発によって時間と共に質量が減少していくため質量計測に影響する。正確な値を得るため、塗料を完全に乾燥させた上で質量を計測し、NV 値で換算する方法を採用した。落下粒子量、飛散粒子量についても同様の手順で測定した。上記①～③のアルミホイル(a)を、アルミホイル(b)またはファイバーフィルター(c)に読み替えると、それぞれ落下粒子量、飛散粒子量が測定できる。なお、落下粒子量、飛散粒子量ともに塗着効率と同じく全塗料使用量に対する割合で算出した。

上記手順での試験（本試験）に先立ち、試験結果の換算に必要な情報を得るための予備試験を実施した。実施した予備試験の内容は NV 値および塗料噴出質量の計測である。

NV 値の計測：本試験では、塗料捕集後のアルミホイルやファイバーフィルターを電気炉（Fig.3 参照）内で加熱し完全に塗料を乾燥させ、その質量を測定した。使用した全塗料質量 W は湿潤状態の質量を、塗着した塗料質量 W_e は乾燥状態の質量を計測することになる。そのため、湿潤状態から乾燥状態に変化した場合の塗料質量の減少を考慮する必要がある。 E_p 算出時には、あらかじめ塗料ごとに NV 値を計測しておき、乾燥状態質量から湿潤状態質量への換算に使用する。それぞれの塗料について、乾燥前後での質量を計測し、NV 値を計測した。計測結果が前掲の Table 1 内の値である。

塗料噴出質量の計測：1s あたりの塗料噴出質量を計測する。塗装機のスプレーノズルをビニール袋で完全に覆い、塗料を袋内に向けて 30s 間噴射する。塗料噴射後、ビニール袋の質量増加分を計測して 30s 間の塗料噴出質量を求め、それを 30 で除して 1s 間あたりの塗料噴出質量 (kg/s) とした。

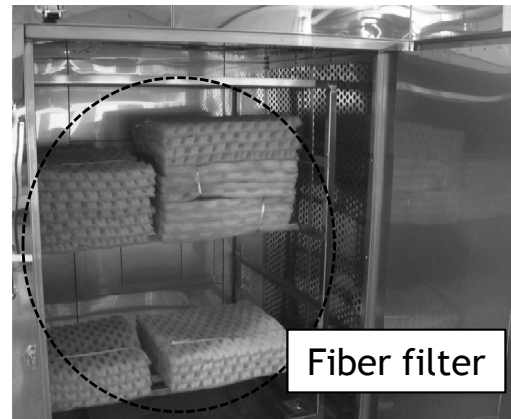


Fig.3 Electric furnace

2.1.4 試験条件

試験には旭サナック製エアレス塗装機を使用し、スプレーノズルには旭サナック製 30C07 を用いた。30C07 は等価口径 0.59mm、ノズルから 25.4cm 離れた位置でのスプレー幅が 17.78cm であるノズルである。また、30C07 は扇型の噴霧を形成する。なお、等価口径とは、ノズル開口部の面積を円形状に換算した場合の円の直径である。

試験の条件を Table 2 に示す。風洞内の風速は 0.0 m/s（無風状態）、2.0 m/s、5.0 m/s の 3 条件、塗装対象物（アルミホイル(a)）とスプレーガンとの距離は 0.3 m、0.6 m、0.9 m の 3 条件とした。各風速・距離条件について 2 条件ずつ試験を実施し、その平均値を当該条件での計測値とした。なお、各条件での塗料噴射時間は 15s 間とした。

Table 2 Experimental conditions

Wind Velocity [m/s]	0.0, 2.0, 5.0
Gun Distance [m]	0.3, 0.6, 0.9
Spray Time [s]	15

塗装条件を Table 3 に示す。塗料への付加圧力は 13.0 MPa で一定とした。各塗料を 13.0 MPa で噴射した場合、塗料流量は Table 3 のようになった。流量は予備試験で計測した塗料噴射質量 (kg/s) を塗料密度 (kg/m³) で除して算出した。高密度かつ高粘度の塗料 C は他の 2 塗料に比べて流量が少ない。また、塗料 C はそのままでは噴霧に適さない程の高粘度であったため、体積濃度 1% の希釈用シンナーを添加した。なお、前掲の Table 1 に記載の塗料 C の物性値は、シンナー希釈後の値である。

Table 3 Conditions of test paints

	Pressure [MPa]	Flow Rate [10 ⁻⁶ m ³ /s]	Thinner Additive Rate [vol.%]
A	13.0	27.4	0
B	13.0	23.1	0
C	13.0	17.9	1

2.2 塗装性能評価試験の結果

2.2.1 塗着効率の測定結果

各塗料の塗着効率の測定結果を Table 4、Table 5 および Table 6 に示す。

Table 4 Painting efficiency [%] (Paint A)

		Gun Distance [m]		
		0.3	0.6	0.9
Wind Velocity [m/s]	0.0	99.0	94.3	90.1
	2.0	99.7	91.7	77.6
	5.0	96.7	71.2	27.0

Table 5 Painting efficiency [%] (Paint B)

		Gun Distance [m]		
		0.3	0.6	0.9
Wind Velocity [m/s]	0.0	98.6	98.7	95.2
	2.0	98.6	94.7	79.8
	5.0	96.8	83.8	53.7

Table 6 Painting efficiency [%] (Paint C)

		Gun Distance [m]		
		0.3	0.6	0.9
Wind Velocity [m/s]	0.0	96.0	98.2	94.9
	2.0	92.6	97.2	93.0
	5.0	96.1	92.8	81.1

無風、近距離の条件（風速 $U=0.0$ m/s、距離 $D=0.3$ m）において、各塗料ともに塗着効率が 100% に近い。一方、強風、長距離の悪条件（ $U=5.0$ m/s、 $D=0.9$ m）においては、低 VOC 型塗料 B および C は従来型の塗料 A に比べて明らかに塗着効率が增加している。これは、塗料の低 VOC 化により噴霧粒子の慣性力（直進性）が増大したためと考える。なお、試験実施時、塗料 C は噴霧粒子の径が大きすぎ、塗着効率は高いものの、正常な塗膜面が得られない状態（試験実施者の所見）であった。

2.2.2 落下粒子量の測定結果

各塗料の落下量の測定結果を Table 7、Table 8 および Table 9 に示す。

Table 7 Fall paint [%] (Paint A)

		Gun Distance [m]		
		0.3	0.6	0.9
Wind Velocity [m/s]	0.0	0.039	0.398	0.921
	2.0	0.051	0.528	1.35
	5.0	0.258	0.441	9.32

Table 8 Fall paint [%] (Paint B)

		Gun Distance [m]		
		0.3	0.6	0.9
Wind Velocity [m/s]	0.0	0.05	0.072	0.543
	2.0	0.323	0.155	1.10
	5.0	0.055	0.472	3.14

Table 9 Fall paint [%] (Paint C)

		Gun Distance [m]		
		0.3	0.6	0.9
Wind Velocity [m/s]	0.0	0.006	0.018	0.049
	2.0	0.008	0.021	0.092
	5.0	0.007	0.212	0.622

遠距離条件において低 VOC 型塗料の落下量の低減が顕著である。

2.2.3 飛散粒子量の測定結果

各塗料の飛散量の測定結果を Table 10、Table 11 および Table 12 に示す。

Table 10 Fly paint [%] (Paint A)

		Gun Distance [m]		
		0.3	0.6	0.9
Wind Velocity [m/s]	0.0	0.451	0.360	0.444
	2.0	0.390	2.13	6.39
	5.0	1.08	7.88	31.4

Table 11 Fly paint [%] (Paint B)

		Gun Distance [m]		
		0.3	0.6	0.9
Wind Velocity [m/s]	0.0	0.716	1.04	0.575
	2.0	0.686	1.28	4.94
	5.0	0.911	6.61	24.9

Table 12 Fly paint [%] (Paint C)

		Gun Distance [m]		
		0.3	0.6	0.9
Wind Velocity [m/s]	0.0	0.580	0.672	0.331
	2.0	0.788	0.354	1.07
	5.0	0.562	1.32	6.89

落下粒子量と同じく、低 VOC 型塗料の B および C で飛散量の低減効果が確認できる。特に、悪条件（ $U = 5.0 \text{ m/s}$ 、 $D = 0.9 \text{ m}$ ）において、塗料 C は飛散量が大幅に低下している。低 VOC 化による高密度化の効果に加え、試験実施者所見（前述）の通り、噴霧粒子径が大きいために直進性が高く、飛散量低減につながったものと考ええる。

なお、各塗料・各試験条件の結果において、塗着量、落下量および飛散量を合計しても 100%とはならない。これは Fig.1 のアルミホイル(a)および(b)以外の風洞内壁面に付着した塗料分の存在に起因する。

3. 簡易計算による粒子径分布の推定

噴霧内の粒子径分布を計測するため様々な手法が提案されている^{2), 3)}が、今回は設備の制約上それらの手法による実計測が困難であった。そのため、簡易的な数値シミュレーションにより噴霧粒子の軌道等を計算し、測定結果と対照することで噴霧内の粒子径分布や塗着効率を算出した。

簡易化のため、以下を仮定した。

- ・ 噴霧粒子の形状は球形
- ・ VOC の揮発による粒子径の減少および密度の増加は発生しない
- ・ 風洞内の空気流の乱流成分は無視し、平均流として横風成分のみを考慮する
- ・ 噴霧粒子同士の衝突や合体等の相互作用は生じない

3.1 粒子径分布の推定方法

3.1.1 噴霧粒子運動の計算方法

流体中を移動する小粒子は周囲の流体から揚力、抗力等の力を受ける^{4), 5)}。前述の簡易化に加え、塗料粒子と空気の密度差が大きいことから、本研究では粒子の運動方程式として以下を考える。

$$\frac{dx_i}{dt} = V_i \quad (3.1)$$

$$\frac{dV_i}{dt} = \frac{1}{\tau} (U_i - V_i) \cdot \Phi \quad (3.2)$$

$$\tau = \frac{d_p^2 \rho_p}{18 \mu_a} \quad (3.3)$$

$$\text{Re}_p = \frac{\rho_a |U_i - V_i| d_p}{\mu_a} \quad (3.4)$$

Table 13 Coefficient Φ ($w = \log_{10} \text{Re}_p$)

	$\Phi(\text{Re}_p)$
$\text{Re}_p < 0.01$	$1 + 3/16 \text{Re}_p$
$0.01 < \text{Re}_p \leq 20$	$1 + 0.1315 \text{Re}_p^{(0.82-0.05w)}$
$20 \leq \text{Re}_p \leq 260$	$1 + 0.1935 \text{Re}_p^{0.6305}$
$260 \leq \text{Re}_p \leq 1500$	$44 \text{Re}_p^{(-1.1242+0.1558w)}$

x_i は粒子の位置座標で、添字 i は x 、 y 、 z の 3 方向について考える。 V_i 、 U_i はそれぞれ i 方向の粒子移動速度、風速である。座標系を Fig.1 中に示した。 τ は粒子の緩和時間であり、周囲気体の運動（気流）への粒子の追従性の指標である。 τ の値が大きい程、粒子は周囲の気流の影響を受けにくい（直進性が良い）。 d_p 、 ρ_p はそれぞれ粒子の直径、密度であり、 ρ_a 、 μ_a はそれぞれ空気の密度、粘度である。粒子の直径が大きい程、あるいは粒子の密度が高い程、 τ は増大し周囲気流の影響を受けにくくなる。 Φ は球状粒子にはたらくストークスの抵抗係数の補正係数に相当するもので、Table 13 の様に粒子 Reynolds 数 Re_p の関数で表される⁵⁾。 Re_p は粒子と空気の相対速度を代表速度として定義される。

(3.1)、(3.2) 式を 4 次 Runge-Kutta 法で数値的に解く。 U_i 、 V_i 、 ρ_p 、 ρ_a 、 μ_a の初期値には試験実施時の値を使用した。 U_i は風洞内の設定風速、 V_i の初期値は塗料流量 (Table 3) を、使用ノズルの噴出口面積で除した値として算出した。 ρ_p は Table 1 の値を用い、 ρ_a および μ_a は試験実施時の温度における値を物理定数表から求めた。粒子径 d_p は、 $30 \leq d_p \leq 300 \text{ } \mu\text{m}$ の範囲内を $0.2 \text{ } \mu\text{m}$ ごとに变化させ、各粒子径について計算を行った。

3.1.2 噴霧形状のモデル化

噴霧形状を模擬するため、粒子の初期移動方向を変化させ計算を実施した。Fig.4 の様に噴霧をモデル化した。噴霧は、 x - z 平面内に 2θ の角度で噴射されるとする。また、初期移動方向が x 軸と角度 $\theta \text{ rad}$ をなす方向である粒子の初速度を、 x 方向速度： $V_x = V \cos \theta$ 、 z 方向速度： $V_z = V \sin \theta$ で与える。ここで、 V は塗料流量をノズル噴出口面積で除した値である。 θ は、 $-\theta \leq \theta \leq \theta$ の範囲を 10,000 分割し、各角度について計算した。この 10,000 通りの異なった初速度・初期移動方向の粒子をまとめて一つの噴霧モデルと考える。なお、 θ の値は試験に使用したノズル「30C07」の仕様から、 $\theta = 0.421 \text{ rad}$ (24.1°) とした。

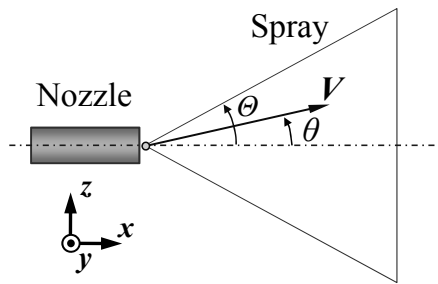


Fig.4 Spray model

3.1.3 粒子径分布・塗着効率のモデル化

実際の噴霧内の粒子は、単一のサイズではなくある分布をもつ。上述の噴霧モデルに加え、粒子径分布のモデル化を行った。各単一粒子径 d_p についての塗着効率は前記 3.1.1、3.1.2 の計算から得られ、これを $E_p(d_p)$ とする。つまり、 $E_p(d_p)$ は粒子径を変数とし、塗着効率を返す関数である。一方、粒子径分布は噴霧内の各粒子径の存在比率であり、これも d_p を変数とした分布関数 $D_p(d_p)$ として表現できる。本研究では、ある粒子径分布を与えたときの塗着効率の推定値を、 $\sum E_p(d_p) \cdot D_p(d_p)$ で計算することとする。

$E_p(d_p)$ は前述の計算 (3.1.1、3.1.2) から得られるため、何らかの粒子径分布 $D_p(d_p)$ を与えれば塗着効率が推定できる。ここでは粒子径分布として次のガンマ分布を使用した。

$$D_p(d_p, \mu, \lambda) = \frac{\mu^\lambda}{\Gamma(\lambda)} \cdot d_p^{\lambda-1} \cdot \exp(-\mu d_p) \quad (3.5)$$

ここで、 Γ はガンマ関数である。ガンマ分布は 2 つのパラメータ μ 、 λ によりその形状が決定される。また、ガンマ分布はスプレー噴霧の粒子径分布のモデルとしても使用される⁶⁾。各種の $D_p(d_p, \mu, \lambda)$ について塗着効率 $\sum E_p(d_p) \cdot D_p(d_p, \mu, \lambda)$ を計算し、実測値 (Table 4、Table 5 および Table 6) との残差が最も小さくなる分布 (d_p 、 μ 、 λ の組合せ) を粒子径分布の推定値とした。

3.2 粒子径分布推定の結果

3.2.1 粒子軌跡の計算例

Fig.5 に粒子径ごとの粒子軌跡シミュレーション結果の一例を示す。風洞を上方から見た図であり、右方から左方へと風が流れている。 $y = 2.85$ m の位置にスプレーノズルがある。風速 $U = 5.0$ m/s、ガン距離 $D = 0.9$ m 条件での塗料 B の結果である。また、噴霧粒子の初期移動方向は $\theta = 0$ rad である。図中の実線や破線、鎖線が粒子の軌跡を

示しており、四角囲みの数値が粒子径である。 $20 \leq d_p \leq 140 \mu\text{m}$ の範囲で、 $10 \mu\text{m}$ ごとの計算結果である。この例では、粒子径 d_p が 120、130、140 μm の粒子は対面のアルミホイル(a)まで到達するが、110 μm 以下の粒子は(a)に塗着する前に横風に吹き流されてしまう。このような粒子径による軌跡の違いは、緩和時間 τ の差異に起因する。なお、横風風速がゼロ (無風) であっても、直進する粒子は空気との摩擦により減速されるため、条件によっては (粒子径が小さく緩和時間が小さい、ガン距離が長い等)、アルミホイル(a)に塗着しない粒子も存在する。

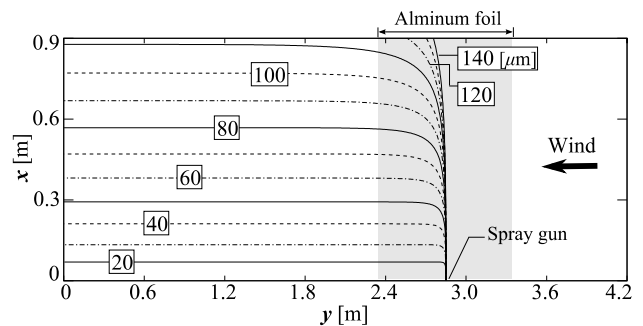


Fig.5 Orbits of paint B particle

3.2.2 単一粒子径噴霧の塗着効率の計算例

Fig.6 に塗料 B の各粒子径分布での塗着効率の計算例を示す。3.1.1、3.1.2 の計算により算出した単一粒子径に対する E_p である。ここでは、塗着効率は粒子径を変数としてステップ関数的に変化する。風速、ガン距離の条件が良い (低風速、短距離) ほど小さい粒子径で塗着効率が 100 % となる。また、ガン距離が長くなるほど風速条件による差異が大きくなる。これは、塗装対象物との距離が離れるほど横風による飛散の影響が大きくなることを反映している。

なお、ガン距離 $D = 0.9$ m の条件においては塗着効率がおおよそ 60 % 以上となった領域で変化割合がなだらかになっている。これは、当該の粒子径範囲において、噴霧の外縁部の粒子が対面の塗装対象物に到達する前に風洞の天井や床面に付着したためである。この風洞内壁面への付着は横風風速と粒子緩和時間および粒子初速度の兼ね合いによって生じる。

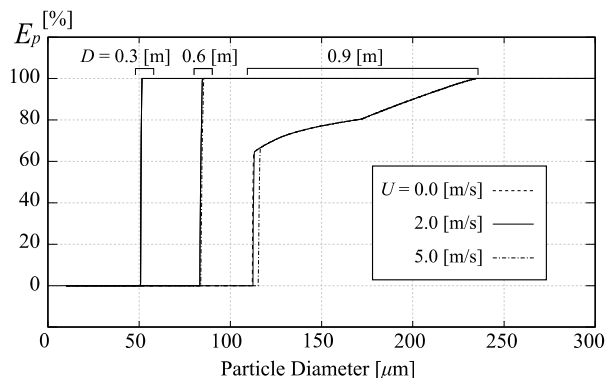


Fig.6 Simulated painting efficiency of paint B

3.2.3 粒子径分布の推定例

Fig.7 に各塗料の粒子径分布推定結果を示す。塗料 A、塗料 B、塗料 C の順にピークの粒子径が小さく、同順で粒子径分布の幅が広がっていたと推定される。また、塗料 C はピーク粒子径が大きく噴霧内にかなり大きな径の粒子が含まれていたと推測される。これは前述の試験実施者の所見とも一致する。

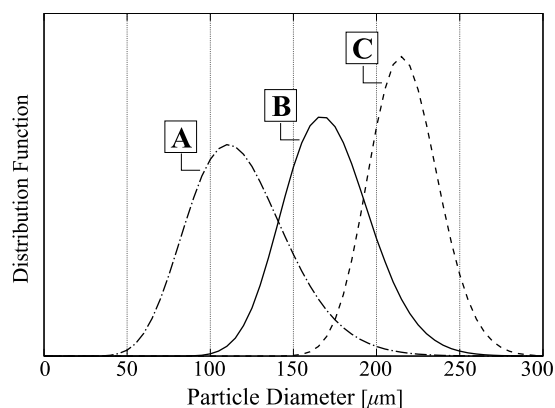


Fig.7 Simulated results of particle size distributions

3.2.4 塗着効率の推定例

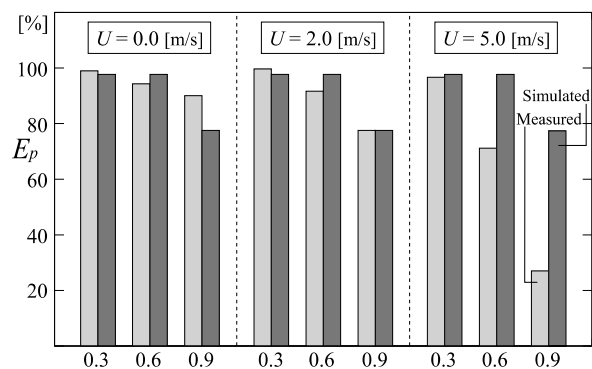
Fig.8 に各塗料の塗着効率の推定結果および実測値を示す。灰色が実測値、黒色が推定値であり、棒グラフ下の数値はガン距離を表す。各塗料ともに、 $U = 0.0$ m/s、 2.0 m/s の条件における推定値と実測値の差はおおむね 16 % 以内であった。また、塗料 B、C に比較し、塗料 A は推定値と実測値の差が大きい。 $U = 5.0$ m/s、 $D = 0.9$ m の条件では、塗料 A において推定値と実測値に 65 % 程度の差があった。

一方で、高密度かつ粒子径の大きい塗料 C の推定値は実測値と比較的に良く一致した。これは、低 VOC 型塗料の噴霧粒子の運動は、従来型塗料

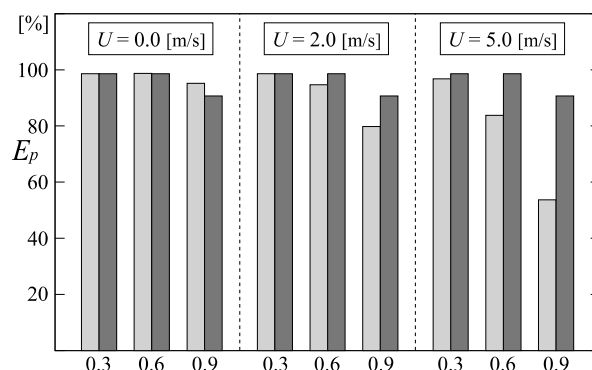
に比べ、本研究で使用した簡易的なモデルでも再現されやすいことを示す。例えば造船所周辺への塗料飛散量の数値シミュレーションを実施する場合などに、簡易モデルを使用した計算であっても低 VOC 型塗料は従来塗料よりも精度の良い結果が得られる可能性がある。

なお、塗料 A で推定値と実測値の差が特に大きくなった原因として、本研究のシミュレーションで考慮しなかった「VOC の揮発」の影響が考えられる。実際の塗料粒子は VOC 揮発により密度が増加し粒子径が減少する。揮発により緩和時間 τ が変化し、推定値との差が大きくなったと推測される。低 VOC 型の他 2 塗料に比べ、塗料 A ではこの影響が強く表れたと考える。

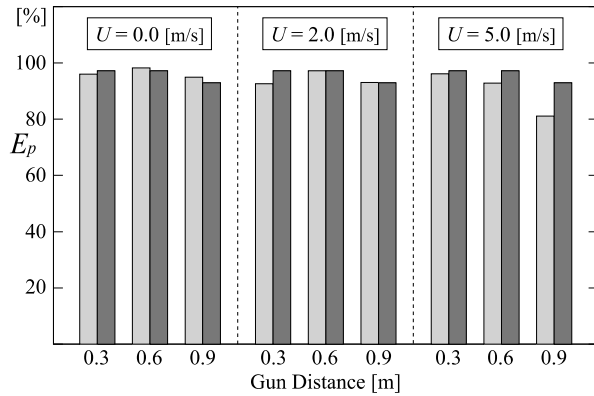
以上より、塗着効率の向上には、噴霧粒子が周囲の空気流動の影響を受けにくくなるよう、緩和時間 τ の増大が有効であることが示唆された。 τ の増大にあたっては塗装の品質を考慮し、(塗装面が粗くならないよう) 粒子径は増加させずに塗料密度のみを増加させることが理想的である。つまり、塗料の低 VOC 化によるハイソリッド化が有効である。また、塗料の粘性が高い場合、付加圧力を一定とすれば、ノズルからの塗料噴出速度は低下するため、微粒化が阻害される。従って、高い塗着効率と塗装品質の両立のためには、ハイソリッドかつ低粘度の塗料の使用が理想的である。



(a) Results of paint A



(b) Results of paint B



(c) Results of paint C

Fig.8 Comparison of simulated and measured painting efficiency (gray: measured results, black: simulated results)

4. 噴霧の定量的良否評価の試み

望ましくない噴霧の状態の一つとして、噴霧外縁部に粒子径の大きな粒子がまばらに存在する「テール」の発生がある。テールの発生は、従来は目視により判定されてきたが、以下に紹介する可視化手法により定量的な評価が可能となる。

4.1 噴霧の定量的良否評価の方法

4.1.1 実験装置

エアレス塗装機実機を用いて実験装置を構築した。Fig.9、Fig.10 および Fig.11 に実験装置の概要を示す。塗装機 (Airless Sprayer) 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 (Auto Gun) へと送られ、自動ガンから空气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により制御される。電子制御盤 (Gun Controller) 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 s 単位での設定が出来る。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もつブースを設置した。また、光による外乱を除去するため、実験装置全体を暗幕で覆い、簡易的な暗室を作成した。

閃光時間が数十マイクロ秒程度のストロボ光源 (菅原研究所製 G-SF-106-1) で噴霧を照射し、デジタルカメラ (PENTAX 製 K100D Super) のバルブ撮影モード (シャッター開放) により噴霧の瞬間画像を取得した。制御盤からのトリガー信号で噴霧開始とストロボ発光を同期させた。本方式により、高い時空間分解能での噴霧観察が可能となった。

実際の塗料は固化する等、実験上の難点が多いため、実験にはシリコンオイル (信越化学工業製 KF-96-100CS) を使用した。このオイルは水の約 100 倍の粘度をもつ。スプレーノズルには旭サナック製「07C05」を用いた。07C05 は拡がり角がおよそ 0.38 rad (21.8°) の扇型噴霧を形成する。

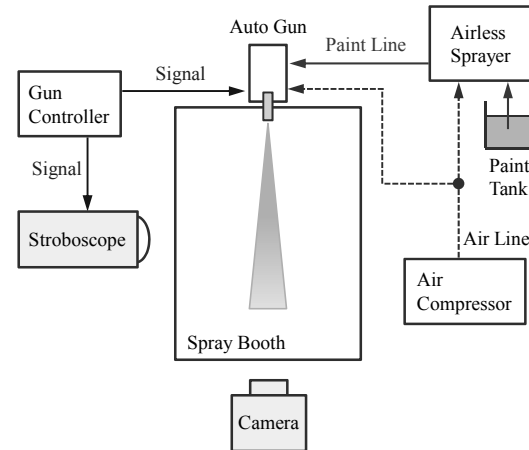


Fig.9 Experimental setup for visualization of spray

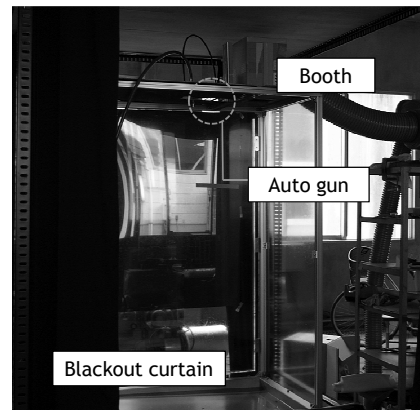


Fig.10 Picture of the experimental setup



Fig.11 Picture of the gun controller

4.1.2 画像解析の方法

実験で取得した瞬間画像を解析し、噴霧を定量的に評価した。前述の「テール」領域の抽出には

画像のエントロピー H を使用した。 H は情報論的エントロピーであり、8bitのグレースケール画像に対して次式で定義される。

$$H = -\sum_{i=0}^{255} P_i \log_2 P_i \quad (4.1)$$

ここで、 P_i は輝度値 i の画素が対象画像に含まれる割合を表す。対象画像を構成する画素の総数を N 、対象画像に含まれる輝度値 i の画素の数を n_i とすると、 P_i は次式で定義される。

$$P_i = \frac{n_i}{N} \quad (4.2)$$

画像エントロピー H は、対象画像を構成する画素の輝度値がばらついている程、つまり、多くの種類の輝度値で構成されている程、大きな値をとる。逆に、単一の輝度値で構成される画像の場合には $H=0$ となる。本研究では、この性質を利用し、テール領域の抽出に H を用いた。テール部は噴霧本体に比べて径が大きい粒子がまばらに存在する領域であり、画像上では個々の粒子が比較的是っきりと写る。このため、テール部は噴霧本体に比べて画像を構成する輝度値が少なく、 H の値が低くなる。

4.2 定量的良否評価の例

テール部、噴霧本体それぞれの領域の画像における画像エントロピー H の算出例をFig.12に示す。図の左がテール部、右が噴霧本体である。噴霧本体は種々の輝度値を含むための値が大きくなっている。

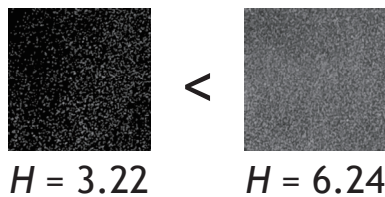


Fig.12 Comparison of image entropy

実験で取得した噴霧の全体画像を小領域に分割し、各領域について H を計算すると、元画像に対するエントロピーのマップが得られる。Fig.13にエントロピー・マップの算出例を示す。噴霧は左右対称であるため、Fig.13には半領域のみを示す。

エントロピー・マップは噴霧各位置でのエントロピーをカラースケールで表現した図であり、赤

に近い色ほどエントロピー H が高い。テール部分は H の値が小さいため、緑色で表現される。

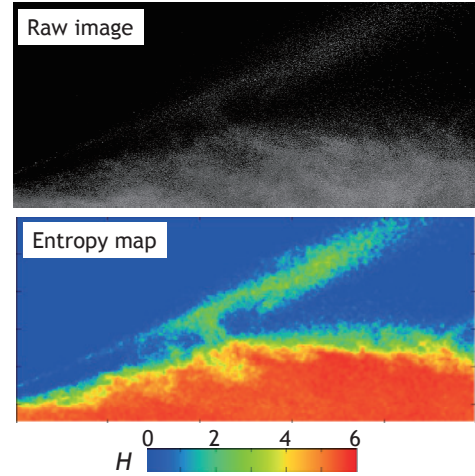


Fig.13 Entropy map

なお、Fig.13上の"Raw image"（元画像）は実験で取得した画像に閾値を設定し、その値以下の画素の輝度値を0とする処理を施している。閾値の設定には「大津の方法」⁷⁾を用いた。エントロピー・マップからは、 H のヒストグラムが得られる。このヒストグラムに閾値を設定して二つの領域に分割し、低エントロピー側をテール領域とする。Fig.14にテール領域の分離例を示す。

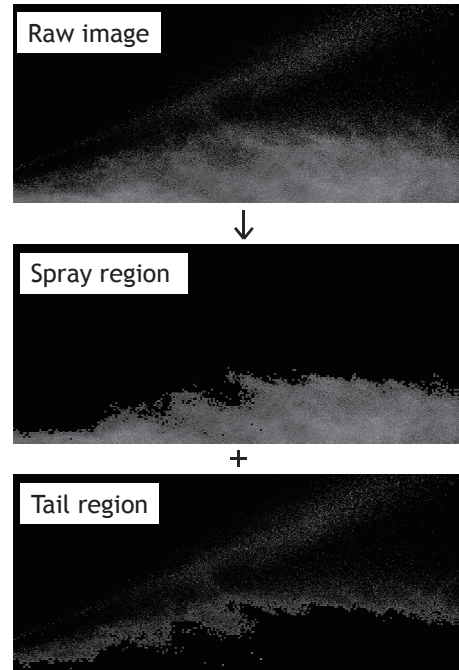


Fig.14 Separation of tail region

この方法によって、従来は目視によって為され

ていたテール発生量の定量的な評価が可能となる。分離後の噴霧本体あるいはテール領域を観察すると、噴霧とテールの境界部に波状の変動が見られる。これは流れの不安定によって生じた波状構造の可能性がある、塗料飛散の一因ではないかと推測される。

Fig.15 に付加圧力（自動ガン部での圧力）を変化させた場合のテール発生量の変化を示す。テール発生量は、テール領域が画像中に占める割合を百分率で示した値である。各圧力条件について 21 回の実験を行い、エラーバーを付している。

圧力の増加に伴い、テール発生量は減少する。実際の塗装現場では目視でテール発生が確認された場合は、テールが消滅するまで圧力を上昇させ対応している。このように、圧力増加によるテール減少自体は既知の事象であるが、本手法により「どの程度圧力を増加させれば良いか」等の定量的な情報を得ることが出来る。

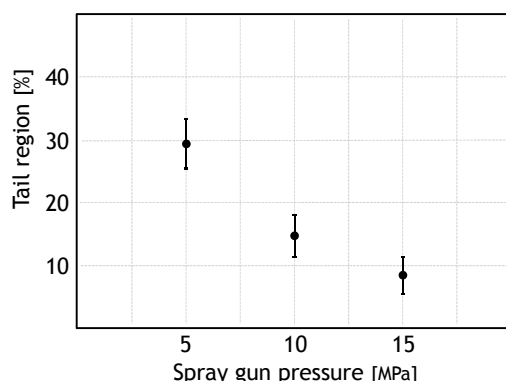


Fig.15 Relation between spray gun pressure and rate of tail region

5. まとめ

塗料に含まれる揮発性有機溶剤（VOC）の量の低減が塗着性・飛散性に及ぼす影響を、実験と簡易シミュレーションにより定量的に評価した。また、可視化実験を実施し、噴霧の定量的な評価を行った。以下に本研究で得た結論を示す。

- (1) エアレス塗装機実機を用いた風洞内での噴霧試験により、強い横風を受ける条件において、低 VOC 塗料の塗着効率は従来塗料を大きく上回ることであり、および飛散量が大幅に低減することを確認した。
- (2) 塗装噴霧をモデル化して簡易的な数値シミュレーションを行った。本シミュレーションによ

り、塗着効率および粒子径分布の推定値を算出した。推定値は横風の影響が弱い条件において、実測値や試験時の観察（作業者の所見）におおむね一致した。特に、低 VOC 塗料の推定値は実測値と良く一致した。VOC 含有量の低下による塗料の高密度化のため塗料粒子の直進性が向上し、簡易的なシミュレーションであっても精度の良い推定が可能となったと考える。

- (3) 塗着効率の向上には、噴霧粒子が周囲の空気流動の影響を受けにくくなるよう、緩和時間 τ の増大が有効であることが示唆された。 τ の増大にあたっては塗装品質を考慮し、粒子径は増加させずに塗料密度のみを増加させることが理想的である。つまり、塗料の低 VOC 化によるハイソリッド化が有効である。
- (4) 塗料の粘性が高い場合、付加圧力を一定とすれば、ノズルからの塗料噴出速度は低下するため、微粒化が阻害される。従って、高い塗着効率と塗装品質の両立のためには、ハイソリッドかつ低粘度の塗料の使用が望ましい。
- (5) 画像エントロピーを用いた噴霧の可視化により、定量的なテール発生量評価が可能となった。

なお、塗装作業の効率改善のためには、最適な物性値（密度、粘度等）をもつ塗料の開発、ならびにそれに適した微粒化装置（塗装機やノズル）の開発が重要と考える。こうした新規技術開発のためには、噴霧粒子からの VOC 揮発の影響や塗料のもつ非 Newton 流体の性質（Shear-thinning 性、粘弾性）等についての更なる検討が必要である。

謝 辞

本研究の一部は、日本財団の支援を受け、（社）中小型造船工業会との共同研究「艀装工程における生産性向上のための技術開発」の一環として実施した。旭ナック(株)には塗装性能評価試験の実施ならびに試験計画立案に際して多くのご協力をいただいた。また、中国塗料(株)には試験用に低VOC塗料をご提供いただいた。関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 村上、松岡、山根：低 VOC 防汚塗料の開発・

- 実用化、第 9 回海上技術安全研究所研究発表会
講演集、(2009)、pp.53-60
- 2) 日本液体微粒化学会：アトマイゼーション・テ
クノロジー、森北出版、(2001)
- 3) 大澤、小保方：レーザ計測、裳華房、(1994)
- 4) Hinze : Turbulence、McGraw-Hill、(1965)
- 5) Clift, Grace, Weber : Bubbles, Drops, and
Particles, Academic Press, (1978)
- 6) Bremond, Clanet, Villermaux : Atomization
of undulating liquid sheet, *Journal of Fluid
Mechanics*, Vol.585 (2007), pp.421-456
- 7) 大津：判別および最小 2 乗規準に基づく自動
しきい値選定法、電子通信学会論文誌、
Vol.J63-D (1980)、No.4、pp.349-356