C223 塗料の剥離を用いた壁せん断応力分布の定量測定法の開発

国立循環器病センター 中田 雅子[○], 増澤 徹, 妙中 義之, 関西大 大場 謙吉

Image Measurement of Wall Shear Stress Based on Paint Erosion

Masako NAKATA*, Toru MASUZAWA*, Yoshiyuki TAENAKA*, Kenkichi OHBA**

A new technique for wall shear stress measurement is proposed by using paint thickness change on the wall. In this method, the wall shear stress is represented by paint erosion. The thickness of paint is measured by light transmission power instantaneously using image, and the wall shear stress is calculated by decreasing ratio of paint thickness owing to erosion. The effectiveness of the measurement was examined in a flat plate flow. The following results were obtained: There was a relationship based on the exponential decay law between light transmission and thickness of paint. Paint displacement on the wall surface was negligible small and thickness change of the paint was caused by only erosion effect from the surface of the paint. A constant relationship between the paint erosion speed and the main flow velocity was observed and the paint erosion speed had no relation with the paint thickness. We consider the paint erosion speed was related to wall shear stress, and this new method will be useful to measure the wall shear stress.

1. 緒言

血液を作動流体とする人工心臓の開発^①においては、ポンプとしての基本的な性能以外に血球破壊および血栓形成を防ぐため、血液接触面の壁せん断応力分布を知ることが重要である。特に容積変化型の血液ポンプ内では流路の変形を伴う非定常流れが生じるため、従来の手法による壁せん断応力の計測は非常に困難である。そこで、我々は壁せん断応力の新たな非接触計測法として、可視化手法である壁面トレース法を応用した塗膜剥離法を考案した。本法では、物体表面に塗布した塗料がせん断応力によって侵食されると考え、塗膜厚さの変化量とせん断応力との関係を用いて壁せん断応力を算出しようとするものである。塗膜厚さの非接触計測に関しては、塗膜を通過してくる透過光強度が光の指数減衰則に従うことを利用し、塗膜厚さの変化量を画像上の透過光強度の変化として捉えることで行った。また本法では、トレーサー法で観測される人工心臓内流れが主流速度0-2.0m/sec、最高せん断速度約1500 1/sの非定常乱流であったことから、乱流境界層をモデルとして考えた。本報告では、塗膜の基本的特性並びに、定常流下で平板を用いた乱流境界層内での塗膜の剥離特性を調べ、塗膜剥離法の有用性について検討した。

2. 実験装置および方法

2.1 試験塗料

塗膜剥離法にとって、物体表面に塗布された塗料が水流によるせん断応力によって浸食され、水中に拡散していくことで塗膜厚さが変化するモデルが望ましい。そこで、実験に使用する塗料は水溶性であり、かつある程度の耐水性を持つ必要がある。また、透過光強度を画像として記録し、塗膜厚さの指標とする目的から、塗料の色は暗褐色系が望ましい。以上のことから、今回の試験塗料として、株式会社サクラクレパス製の耐水性絵の具アクリルガッシュ（コバルトブルー）を選定した。塗料の特性は表1に示す。この塗料は、含水率の低下によって塗料の色並びに性質が変化し、完全乾燥時には全く水溶性を示さなくなるものである。

Table.1 Property of the paint

density (g/cm ³)	viscosity (cP)	components	water	medium	pigment	time of desiccation (min)
			—	acryl emulsion	ultramarine	
1.3	30000	mass ratio % diameter μm	37 2.6*10 ⁻⁴	37 0.2	26 10	30 ± 5 at T=20℃, H=60%, t=0.2mm

* National Cardiovascular Center Research Institute, Fujishirodai 5-7-1, Suita, Osaka, 565

** Kansai University, Yamate-cho 3-35, Suita, Osaka, 564

2.2 塗膜厚さの透過光強度による測定

測定原理

塗料内の顔料粒子による光の減衰が、指数減衰則に従うと考えると、入射光 I_0 に対する距離 z での透過光強度 I は次式で表される⁽²⁾⁽³⁾。

$$I = I_0 \exp(-n\sigma z) \quad (1)$$

ここに、 I_0 は入射光強度である。また、 n は顔料粒子の数密度、 σ は粒子の投影断面積であり、それぞれ以下の式で表される。

$$n = \frac{ma/\rho}{\pi d^3/6}, \quad \sigma = \frac{\pi d^2}{4}$$

ここで、 a : 塗料 1m^3 内の顔料の質量、 m : 顔料中の質量分率、 ρ : 粒子の密度、 d : 粒子径である。

校正実験

塗膜厚さと透過光強度の測定系の概略を図1に示す。本実験系では検査面上の塗膜厚さの指標として、設定塗膜厚さ t g/cm^2 を用いた。実際の初期塗膜厚さ t' mm の計測は、楕形膜厚計を用いて行い、表2に設定塗膜厚さ t に対する t' を示した。透過光強度には塗膜の乾燥による顔料粒子の数密度の変化が影響するため、校正実験においては塗膜直後の透過光強度と塗膜厚さを測定した。

2.3 基礎実験装置

実験装置概略

平板モデルを用いた塗膜剥離法の実験装置の概略を図2に示す。せん断流の発生装置として最大流速 $3.0\text{m}/\text{sec}$ での連続運転が可能な回流水槽を用いた。本水槽では、測定区間内は整流板を経てほぼ一様な流れが実現している。また、透過光強度測定のための光源として 1000W のハロゲンランプを用いた。光強度の計測は照度計を用いると同時に、塗膜の侵食による透過光強度の局所変化を捉えるために、検査面上の塗膜を $500\text{コマ}/\text{s}$ の撮影能力を持つ高速度ビデオカメラによって撮影し、画像をコンピューター上のNIH-Imageで処理することで塗膜厚さの変化を計測した。

平板モデル

使用した平板モデルを図3に示す。平板は厚さ 1mm の亚克力板を用い、水槽中に流れに対して平行に設置した。上流側の板端は流れに対する影響を少なくするため、楕円形にした。塗膜は、本実験系において境界層が乱流境界層に遷移していた板端から 75mm の位置を始点として塗布した。

2.4 剥離時間の計測

塗料の剥離時間 T_i sec は、モデルを水流中に設置した時刻を0として、モデル内の検査面上の塗膜が侵食により完全に消失した時刻までとした。ただし検査面内であっても完全乾燥しており、塗料が侵食ならびに溶解しない部位の水中残存時間は加算しないこととした。

Fig.2 Schematic view of experimental setup

Fig.1 Experimental apparatus for measurement of light transmission power

table.2 Comparison between two thickness parameter

t (g/cm^2)	0.01	0.02	0.03	0.04
t' (mm)	0.07	0.15	0.23	0.30

Fig.3 Flat plate model

2.5 塗膜剥離法の検討項目

乾燥時間が剥離時間に及ぼす影響

本実験系において安定した塗膜特性ならびに最適塗膜状態を得るためには塗料の乾燥時間は重要な要因である。そこで塗膜の乾燥時間 T_0 secを、塗料を塗布し終えた直後からの大気中での放置時間と定義し、 T_0 を0-600secまでの間60secごとに変化させたときの検査面の状態の観察および主流速度 $U=1.0$ m/sec下での剥離時間 T_i の計測を行った。

侵食における塗料の移動の影響

塗膜厚さ減少の副要因として塗料の流れ方向への移動が考えられる。流れ方向への塗料の移動による膜厚の減少が侵食による塗膜厚さの減少に及ぼす影響を見るために、塗膜厚さ一定で図3に示す検査面上の流れ方向距離 l を1.5-6cmの間で1.5cm刻みで変化させたときの剥離時間 T_i の計測を行った。また、高速度ビデオカメラによる塗膜の状態の観察も同時に行った。

塗膜厚さの変化と主流速度との関係

本計測法の計測原理となる塗膜厚さの変化量と壁せん断応力との関係を明らかにするために、塗膜厚さの絶対値が剥離時間や塗膜厚さの減少速度に及ぼす影響および塗膜厚さの減少速度と主流速度との関係について、設定塗膜厚さ t と主流速度 U を変化させ、 $T_{i\sec}$ を計測することによって調べた。

3. 実験結果および考察

3.1 塗膜厚さと透過光強度の校正実験結果

図4に塗膜厚さ t を変化させたときの透過光強度 I の計測結果と式(1)による光の指数減衰則を用いた計算結果を示す。図4より、透過光強度 I は各塗膜厚さに対して光の指数減衰則に従っていることが分かった。このことから、本実験系において非接触で塗膜厚さ t を、透過光強度 I と式(1)より算出できる可能性が示唆された。

3.2 乾燥時間が剥離時間に及ぼす影響

図5に各塗膜厚さ t での乾燥時間 T_0 に対する剥離時間 T_i を測定した結果を示す。図5より、どの塗膜厚さにおいても $T_0=120$ secまでは T_i に上昇傾向が見られたが、 $T_0=240$ -600secまでの範囲においては乾燥時間に関係なく T_i はほぼ一定であった。また、検査面の状態の観察からは、 $T_0=300$ sec付近より、膜厚の薄いものから順に、検査面周囲の乾燥による変色が見られ、剥離時間の計測には加算できない部位が認められた。これらのことより、本実験系における乾燥時間 T_0 は240secとした。

3.3 侵食における塗料の移動の影響

検査面の流れ方向距離 l に対する剥離時間 T_i の測定結果を図6に示す。高速度ビデオ画像の解析結果と図6の結果より、塗料の流れ方向への移動はせん断応力による侵食に比べてほとんど影響を及ぼさないことが分かった。このことより、本法においては局所的な塗膜厚さの減少部位が、その部位のせん断応力を反映することが示唆された。

また、この結果より、本計測法においては塗膜の移動は無視することとし、塗膜表面においてはどの部位においても常に速度 0 m/secであり、塗膜表面上は固体壁と同様に扱えるものと仮定する。

3.4 塗膜厚さの変化と主流速度との関係

図7に各流速に対する塗膜厚さ t と剥離時間 T_i との関係を示す。ここで、塗膜厚さ t がモデル平板の境界層に比べて十分に小さく、流線の曲率半径も塗膜検査面のスケールに比べて十分に大きい場合、塗膜表面にはクエット流に近似される直線的な流速分布が存在していると考えられる⁽⁴⁾。また本法においては塗膜面は固体壁と同様に扱えると考えことから、塗膜

Fig.4 Relationship between light transmission power: I and paint thickness : t

Fig.5 Effect of paint desiccation time: T_0 on erosion time: T_i

Fig.6 Paint displacement effect on the wall surface

厚さに関係なく、塗膜表面には各々の主流速度に対していつも一定のせん断応力がかかると仮定すると、図7の各点は原点を通る直線で近似できると考えた。本法においてはこのように仮定したことで、モデル壁からの塗膜厚さの絶対量に対するせん断応力の補正を考慮しなくても良いこととなる。

また、塗膜厚さの変化と主流速度との関係を見るために、図7の各々の点について塗膜厚さの減少速度 v を算出し、主流速度との関係についてプロットし直した図が図8である。図8より塗膜厚さの減少速度と主流速度との間には塗膜厚さに依存しない関数関係が成り立つと考えられる。この関係を利用することで、塗膜の瞬時剥離速度を用いてその時の主流速度並びにせん断応力を算出できる可能性が示唆された。

以上のことから、塗膜剥離法は壁面トレース法の実験手技上非常に困難であった⁽⁵⁾⁽⁶⁾塗膜面の平滑化にさほどの注意を必要としない手法になりうると考えられる。また、瞬時の塗料の剥離速度を画像処理することで、局部的な、局時的な壁面せん断応力を算出する可能性があることから、定常流のみならず、拍動流、また間欠流などの時間変化を伴う流れに対しても応用の可能性が示唆された。

Fig.7 Effect of paint thickness: t on erosion time: T_i Fig.8 Relationship between main flow velocity: U and paint erosion speed: v

4. 結語

本報告において、新しい壁面せん断応力の非接触測定法として可視化手法を応用した塗膜剥離法を提案し、その有効性の検討を行い、以下の結果を得た。

1. 光の指数減衰則による透過光強度を用いた非接触塗膜厚さ測定の可能性が示唆された。
2. 塗膜表面の移動はほとんどなく、塗膜厚さの変化部位は、その局所のせん断応力を示すと考えられる。
3. 塗膜表面を固体壁とみなすことで、塗膜厚さの絶対量に対するせん断応力の補正を考慮しなくても良いと考えられる。
4. 塗膜厚さに依存しない、塗膜厚さの減少速度と主流速度との関係を確認した。

以上のことより、塗膜剥離法は膜厚の絶対量に依存しない局所的、局時的な壁せん断応力を算出する可能性を持ち、非定常流に対しても応用の可能性が示唆された。

最後に、本計測法に使用する塗料に対して適切な御助言と資料等を提供して下さいました株式会社サクラクレパス中央研究所の亀川 學、山本 隆造 両氏に深く感謝する。

5. 参考文献

- (1) Toru MASUZAWA, Yoshiyuki TAENAKA, et.al.: Development of an electrohydraulic total artificial heart at the National Cardiovascular Center, Osaka, Japan, ASAIO Journal Vol.41, No.3, (1995), 249-253
- (2) Kenkichi OHBA and tomohiro ITOH: Light attention technique for Void Fraction Measurement in Two-Phase Bubbly Flow -Part.1 Theory, Technology Reports of The Osaka University Vol.28, No.1448, (1978), 487-494
- (3) 大場謙吉: 流体薄膜の可視化と定量測定, 精密工学会誌 Vol.62, No.5, (1996), 628-632
- (4) 谷 一郎: 境界層, 丸善, (1984), 12-56
- (5) 奥野武俊: 油膜を用いた限界流線と壁面摩擦応力の計測, 日本造船学会論文集 第176号, (1994), 59-65
- (6) 流れの可視化学会編: 流れの可視化ハンドブック, 朝倉書店, (1986), 91-134