

OS2-1

オリフィス管内血液流れでのせん断速度の血栓形成速度への影響

Effects of shear rate on thrombus formation rate in pipe orifice blood flow

○玉川雅章 (九工大), 守屋良治 (九工大), 元岡亮輔 (九工大)

Masaaki TAMAGAWA, Kyushu Institute of Technology  
 Ryoji MORIYA, Kyushu Institute of Technology  
 Ryosuke MOTOOKA, Kyushu Institute of Technology

**Abstract:** This paper describes visualization of thrombus formation process on orifice flows by laser sheet beam. The aim is to investigate the effects of shear stress or shear rate on the thrombus formation or thrombus formation rate. In this investigation, by visualization of the thrombus formation in blood plasma flow, it was found that the high shear rate region of the flow has large effects of the thrombus formation.

**Key Words:** Blood flow, Shear rate, Thrombus formation

1. 緒言

近年、遠心血液ポンプをはじめとする人工臓器の開発が盛んに行われているが、その開発において血栓が大きな問題となっており、医用流体機器の代表である人工臓器やステントの開発にあたり血栓形成の工学的な予測法の確立が急務となっている。しかし、これまで行ってきたCFDによる血栓形成予測モデル<sup>(1)</sup>では、凝集や固着のパラメータが必要となっている。そこで、これらのパラメータの同定のため、実験による血栓形成の実験、すなわち血栓形成の可視化が必要となっている。本研究で目的とするのは、各種のせん断流れ場での人工壁面での血栓の付着の観察を行い、付着箇所やせん断速度場との相関性を調べることである。

本報では、これまでの可視化結果によって得られた輝度値分布と濃度分布の関係と形状の違い(せん断速度の違い)と血栓形成面積増加率の相関を調べることにする。

2 血栓の可視化実験

これまでの実験と同様に上流下流の変化を含め5種類の形状のオリフィス管 (Fig. 1) を使い、回路内にはオリフィス管(アクリル製)、流量計、ローラーポンプ、温度計、ウォーターバスからなり、回路内の長さは総計5[m]で流量は5[1/min]である。また、可視化およびPIV計測のための光源は、シート厚さ約1mmのレーザーシート光を作り、オリフィス管中心軸に照射する。これにより、血栓形成の可視化ならびに流れの可視化(PIV)が可能となる。血漿水の凝固能を戻すために、硫酸プロタミンを注入してその固着過程を観察する。また、アクリル表面上に各種の親水性コーティングを行い、壁での血栓吸着力を変化させることができるようになっている。

3 輝度分布と濃度分布

これまでの研究でも明らかにしているが、輝度値分布の変化を輝度値が上昇する時間周辺で示したものが Fig. 2 である。この図は、BF 形状の輝度値分布で、x=0

がBF形状のオリフィス後部の位置を示している。また、C

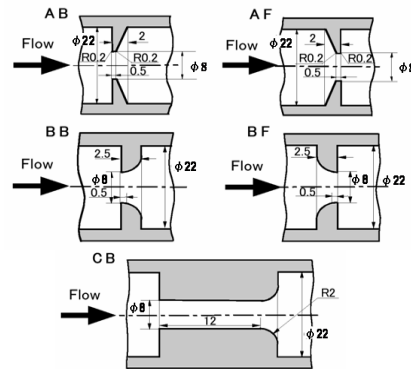


Fig.1 Orifice geometries for observation of thrombus formation on plasma flows

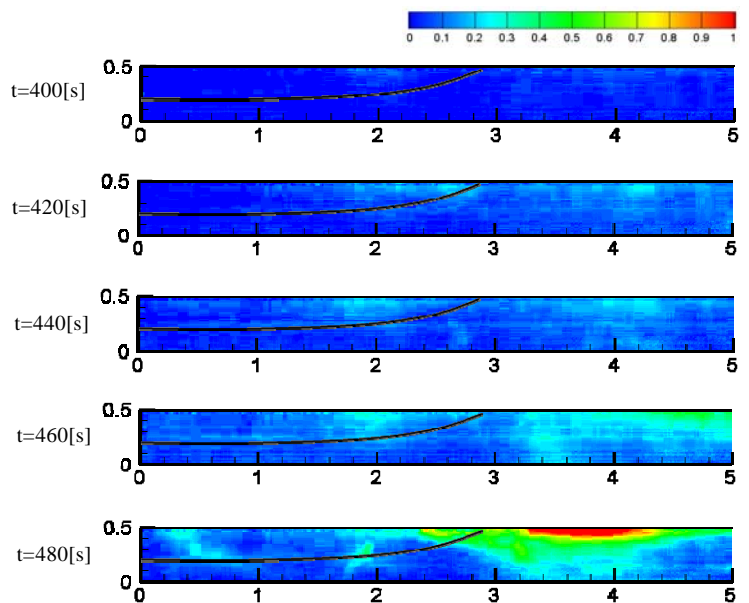


Fig.2 Brightness distribution in the flow (BF)

F Dから得られた流線のうち、はく離・再付着のものを図中に示す。図中のカラーの等高線は、輝度値を示すが、既に予備実験から得ているように濃度分布をも同時に示すことになっている。この図から、再付着点近傍から血栓形成が始まっていることは、これまでの結果と同様である。一方、輝度上昇について見てみると、光学の散乱原理から見れば、血漿水の濃度（タンパク質成分：低分子量）の散乱から、血しょう板が活性化された後に生成されるフィブリン（高分子量）に変化することも考慮すれば、輝度の上昇の度合いが変化し、同じ光量に対して散乱強度が大きくなることが予測される。これを確認するため、再付着点よりも下流での輝度値分布を時間をパラメータとして示したものが、Fig. 3 である。図中の実線が壁からの距離の指数関数での近似線を示す。これから、 $t=460$ (s)から  $r$  方向の分布が急速に上昇していることがわかる。この近似線を求めるにあたり指数関数の係数、すなわち、拡散係数  $\alpha$  を求め、各時間ごとにプロットしたものが Fig. 4 である。この図から、 $t=460$ (s)以降に大きく上昇することがわかる。すなわち、輝度上昇の空間分布が、 $t=460$ (s)以降に大きく変化して、低分子量の散乱強度から高分子量の散乱強度へ変化したことが、この結果からわかる。これらから、低分子量と高分子量の両方の光散乱のモードが存在していることがわかる。

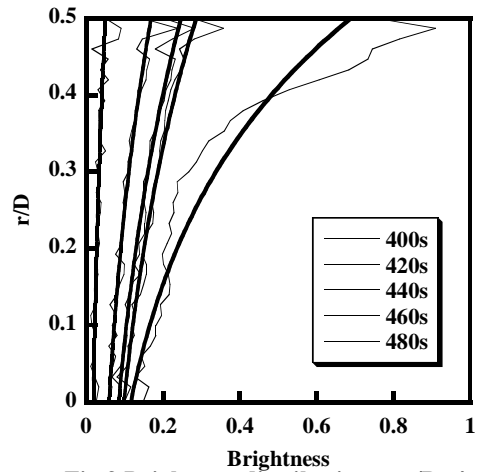


Fig.3 Brightness distribution at  $x/D=4$

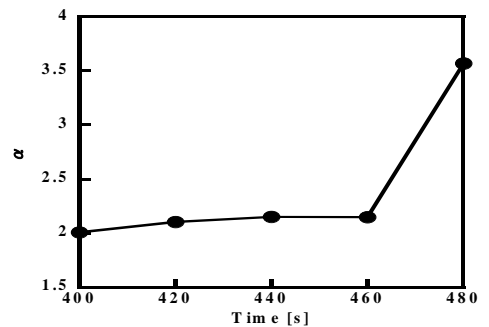


Fig.4 Time history of diffusion coefficient  $\alpha$

#### 4 せん断速度の空間積分を用いた血栓形成評価

血栓形成の成長を各形状で定量的に捕らえるため、壁面近傍での空間平均された輝度分布のしきい値以上の面積を  $S$  とし、この面積の時間変化を示したものが Fig. 5 である。これから、Fig. 2 の輝度値分布の変化にも対応するが、血栓領域の変化を知ることができる。さきの濃度変化同様に血栓成長の度合いを面積の増加によって示すことができることもわかる。したがって、本報では、このグラフの時間変化率、すなわち  $dS/dt$  を、血栓形成の速度  $R_s$  と定義する。次に、せん断速度のしきい値( $D_{th}$ )を考慮した空間積分を下記のように定義する。

$$T.F.R = \frac{\iint_{D \leq D_{th}} DU \Delta V}{\int \Delta V} \quad D = \begin{cases} 0 & (D \leq D_{th}) \\ 1 & (D > D_{th}) \end{cases}$$

Fig.1 の各形状と T.F.R.と上述の実験で得られた  $R_s$  の相関を示したものが Fig.6 である。なお、 $D_{th}=500$  としている。ここでは、各形状の具体的なせん断速度分布は示さないが、局所的なせん断速度場が血栓形成に影響を及ぼしていることが考えられる。その機構として推測されるのは、せん断応力によって反応する血小板や血漿水中のタンパク質が活性化されやすくなっているためと考えられる。今後、上述の Euler 的評価法の他に Lagrangian 的評価法の検討を行う予定である。

#### 参考文献

[1]Masaaki TAMAGAWA, Hiroaki KANEDA, Sho NAGAHAMA, Miki HIRAMOTO, Artificial Organs, Vol.33, No.8, pp.604-610, 2009

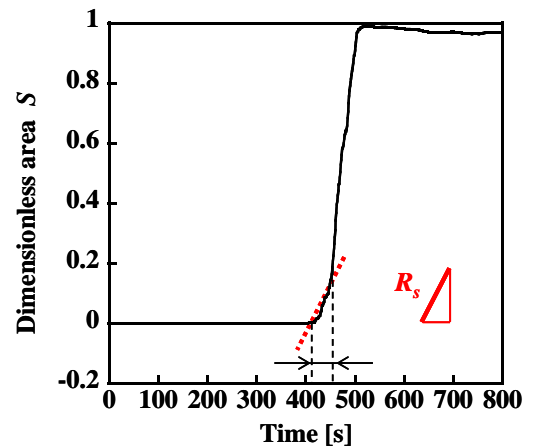


Fig.5 Brightness history near the wall

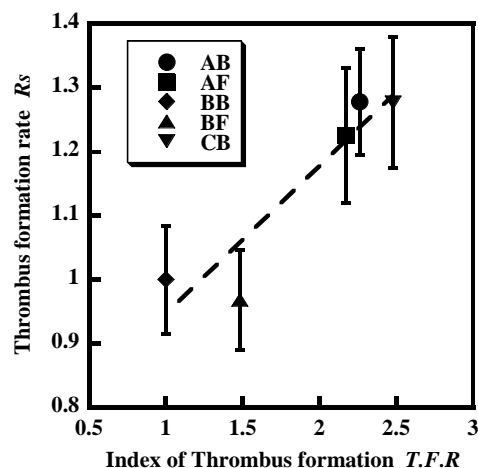


Fig.6 Correlation between thrombus formation rate and prediction index for 5 geometries