

ヒドロゲル管内壁の壁面剪断応力に及ぼす グラフト化ポリアクリル酸の影響

— 血管内皮細胞の損傷機序の模擬血管によるシミュレーション I. —

平井利博、Md. ハミダル・イスラム、渡辺真志、森川裕久
信州大学 繊維学部 素材開発化学科

1. 緒言

繊維系高分子は自律応答材料として人工筋肉をはじめ人工臓器など多様な展開が可能である。ここでは人工血管のみならず生体の血管系などにおける基本的な問題を、内壁に自律応答機能を有する人工微細ゲルチューブ系を作製し、実験的に解明する試みを行う。

チューブ内を流動する液体がその内壁と摩擦すると壁面に損傷を生じる。生体の血管系でも同様であり、この場合には循環器病の原因となるが、どのような過程で損傷を生じるかについて、いくつかの仮説があるものの直接的な証明には到っていない。本報ではまず微小管内流れの直接観察法の開発を中心に述べる。最後に、血管に類似した物性を持つ透明PVAヒドロゲル管内壁にグラフト化したポリアクリル酸(PAA)を持つゲル管についてその管内流動への適用結果を示す。

2. 実験方法

PVAの水・ジメチルスルフォキシド溶液から透明なゲル管(内径1~2mm)を得た。ゲル管の内部にPAA水溶液を満ち、酸性下でPAAをPVAゲル表面上にグラフトした。流動実験では単分散ポリスチレン粒子(粒径7 μ)をプローブとして用いた。この単分散粒子はシード重合法で作製した。プローブの流れを顕微鏡とCCDカメラを用いてビデオに記録し、画像解析によって流れを解析した。装置の概要をFig.1に示す。

3. 結果と考察

単分散粒径のポリスチレンをプローブとして用いたため粒子像から粒子までの距離を知ることができ、管壁から一定の位置で粒子の流れを追跡できた。この方法を粒子追尾法と呼ぶことにする。この場合、連続する二つのイメージ(ビ

デオの性能30コマ/秒)から着目粒子の移動速度を追跡できる。一例をFig.2に示す。

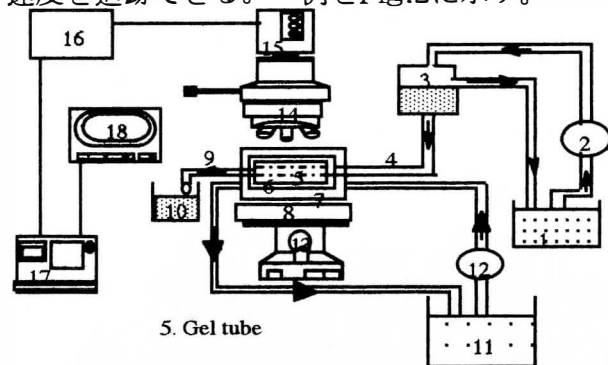


Fig. 1. Measurement of a flowing profile in a gel tube.

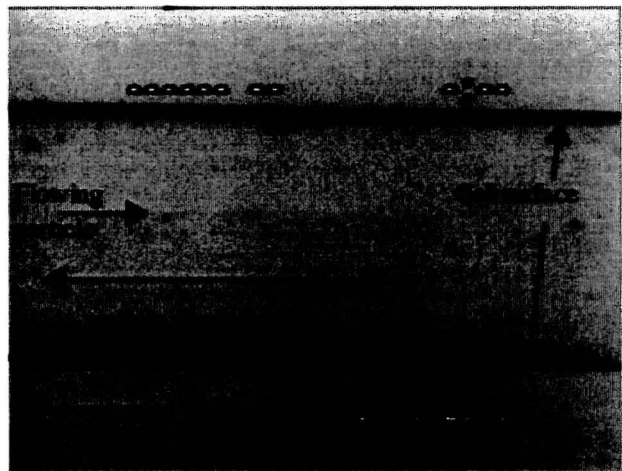


Fig. 2. Velocity measurement in a PVA hydrogel tube by particle-tracking method. Overlapped image of two consecutive images.

このようにして測定された流れのプロファイルをFig.3に示した。層流状態を保持した条件で測定が行われている。

しかしながら、流速を大きくするとビデオ装置の制限のためこの方法は適用できない。その場合に対応するため、次のような方法を採用した。

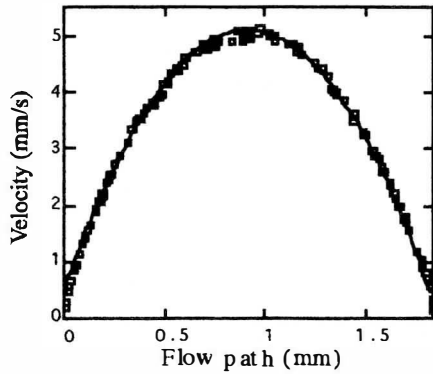


Fig.3. Laminar flow profile in a PVA hydrogeltube estimated from particle tracking method in steady flow ($Re = 5.23$). The errors in the flow rate is less than 1%.

Deformed particle-image on the focusing position



Fig. 4. An example of velocity measurement in a PVA hydrogel tube by PID method.

すなわち、CCDカメラのシャッター速度を遅くすることで生じる粒子像の変形を利用するのである。この方法を粒子像変形法と呼ぶことにする。粒子像変形法では高速で移動する粒子の平均速度を求めることができる。例をFig.4に示す。Fig.5はそうやって求めた流れのプロファイルの例である。これらいずれの方法を用いてもミクロンレベルの壁面近傍まで液体の流れを追跡できることがわかる。これらの方法を用いることで、界面付近の速度分布を高い精度で求めることができることが明らかとなった。よって、界面近傍の流速分布から壁面剪断応力の正確な推算が可能となる。

PVA-PAAゲル界面の壁面剪断応力 (WSS)

を検討した結果、Fig.6にあるようにPAAグラフ層の解離度の高いほど、そしてイオン強度の低いほどドラッグリダクションが大きいことが明らかとなった。また、PAA層の解離している場合には、壁面で流速が零に収束せず、壁面近傍で滑り層を生じることが見出された。このように、壁面の剪断応力を考察する場合、壁面極近傍の流れの直接観察が有効であるのみならず、従来法では見出されなかった界面現象の詳細が明らかにできることが示された。

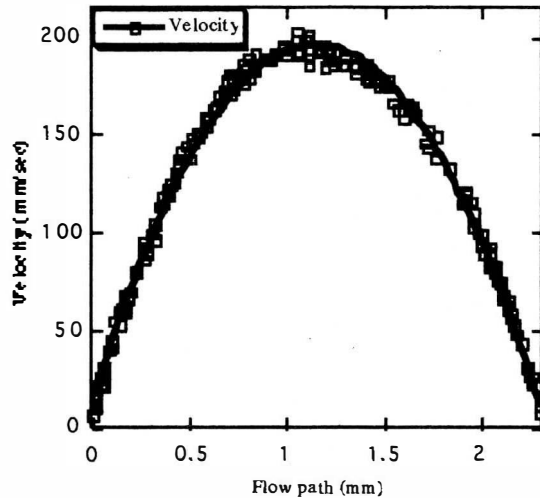


Fig. 5. Laminar flow profile in a PMMA tube estimated from particle-image deformation method in steady flow ($Re = 235.5$). Errors in the flow rate is less than 1%.

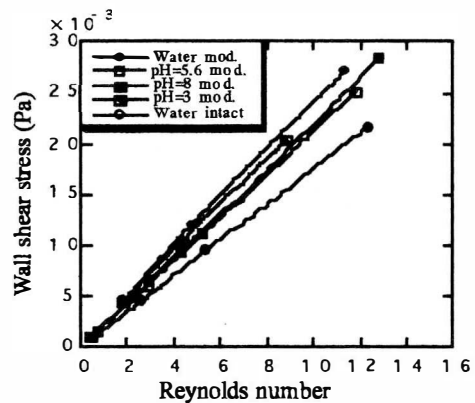


Fig. 6. Reynolds number dependence of wall shear stress in intact and modified PVA hydrogel tube at different pH.