

血管模擬粘弾性チューブ内の圧力波伝搬の解析及び理論モデルの検討

Evaluation of the theoretical model and analysis of pressure wave propagation in viscoelastic tubes mimicking blood vessels

同志社大¹ ピエール・マリー・キュリー大² 小野 慎平¹, 松川真美¹, ラグレー・ピエールイブ²

Doshisha Univ.¹, Université Pierre et Marie Curie² Shimpei Ono¹, Mami Matsukawa¹, Pierre-Yves Lagrée²

E-mail: mmatsukawa@mail.doshisha.ac.jp

1. はじめに

我々は、血管内の圧力波伝搬の1次元理論モデル(1Dモデル)と、血管模擬粘弾性チューブを用いた模擬実験との比較研究を行い、動脈硬化症の早期発見に向けた簡易診断手法の検討を行ってきた^[1]。これまでの1Dモデルではチューブ内の流速の半径方向分布が一定であると仮定してきたが、実際の人体の血管では圧力波伝搬に伴い流速分布形状が時間的に変化すると考えられる。

そこで本報告では、粒子画像速度法(PIV)を用いてチューブ内流速の径方向分布を計測し、チューブ内の流速分布形状の時間的変化が圧力波伝搬に及ぼす影響について検討を行う。

2. 1次元理論モデル(1Dモデル)^[1]

粘弾性チューブ内を伝わる圧力波を1Dモデルにより推定した。ここでは、以下に示す支配方程式を用いた。用いたパラメータをTable 1に示す。このモデルを実験結果と比較することにより、ヤング率 E 、チューブの非線形係数 ε_p 、粘性係数 η 、流速分布定数 α を推定できる。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \alpha \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q^2}{A} \right) = -\frac{A}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - C_f \frac{Q}{R^2}, \quad (2)$$

$$P = K[(R - R_0) + \varepsilon_p(R - R_0)^2] + \eta \frac{\partial R}{\partial t}, \quad (3)$$

$$K = \frac{Eh}{(1 - \sigma^2)R_0^2}, \quad (4) \quad C_f = \frac{2\pi\nu\alpha}{\alpha - 1}, \quad (5)$$

Table 1 Parameters in the 1D theoretical model.

(チューブ)	A : 断面積	R : 半径	R_0 : 初期半径	η : 粘性
	h : 厚さ	P : 内部の圧力	x : 軸方向の距離	
	E : ヤング率	K : 体積弾性率	σ : ポアソン比	
(液体)	Q : 流量	ρ : 密度	ν : 動粘性係数	
	ε_p : 非線形パラメータ	C_f : 抵抗項	α : 流速分布係数	

3. 実験方法

心臓を模擬したピストンポンプ(TOMITA Engineering)より、チューブ(全長4760mm)内に水を吐出しチューブ内圧の変化を入力端より280mmの位置で測定した(Keyence, AP-10S)。水の流速波形は正弦波半周期とし、吐出時間、吐出量はそれぞれ300ms, 4.5 mLとした。圧力波がチューブ末端で完全反射するようにステンレス棒をチューブ末端に挿入した。チューブ内の流速測定にはPIVを用いた。

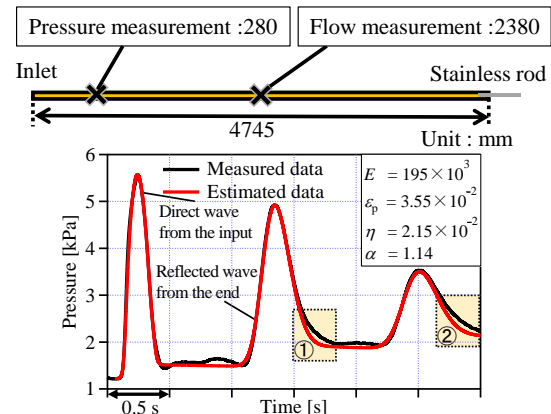


Fig. 1 Change of the pressure wave in tubes.

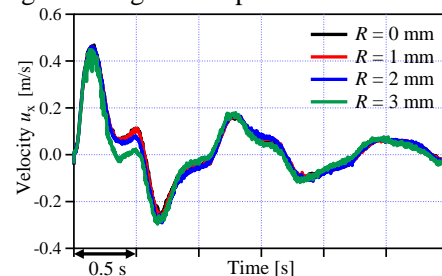


Fig. 2 Flow velocity u_x at the each radial position.

一部に透明チューブを使用し、シート状レーザー光(出力:18 mW, 波長:532 nm)を照射した。トレーサーにナイロン粒子(粒径:50 μm , 比重:1.03)を用いた。撮像には高速度カメラ(Photron, Fastcam 2.1)を使用した。チューブ中心軸の位置を $R = 0$ mmとし、 $R = 0, 1, 2, 3$ mmの各半径位置での x 軸方向の流速を測定した。測定点は入力端より2380 mmの位置とした。

4. 実験結果, 考察

Fig. 1にチューブ内の圧力波伝搬の測定結果、1Dモデルによる推定圧力波形及び、推定圧力波の各パラメータを示す。また、Fig. 2にチューブ内流速の半径方向分布を示す。Fig. 2の0.3-0.5[s]の管内の流速減少時に、チューブ中心部と、外周部に差が生じている。1Dモデルによる推定圧力波は実験結果と良い一致を示したが、端部からの反射の立下り部分(図中①, ②)では一致しなかった。これは、1Dモデル内で流速分布の時間的変化を想定していないためと考えられる。

参考文献

- [1] M. Saito, et al., IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings, pp. 713-716, 2011.