

# 血管の力学的特性と脈動伝播に関する研究

## 東京大学 生産技術研究所 機械・生体系部門 土屋研究室

### 背景

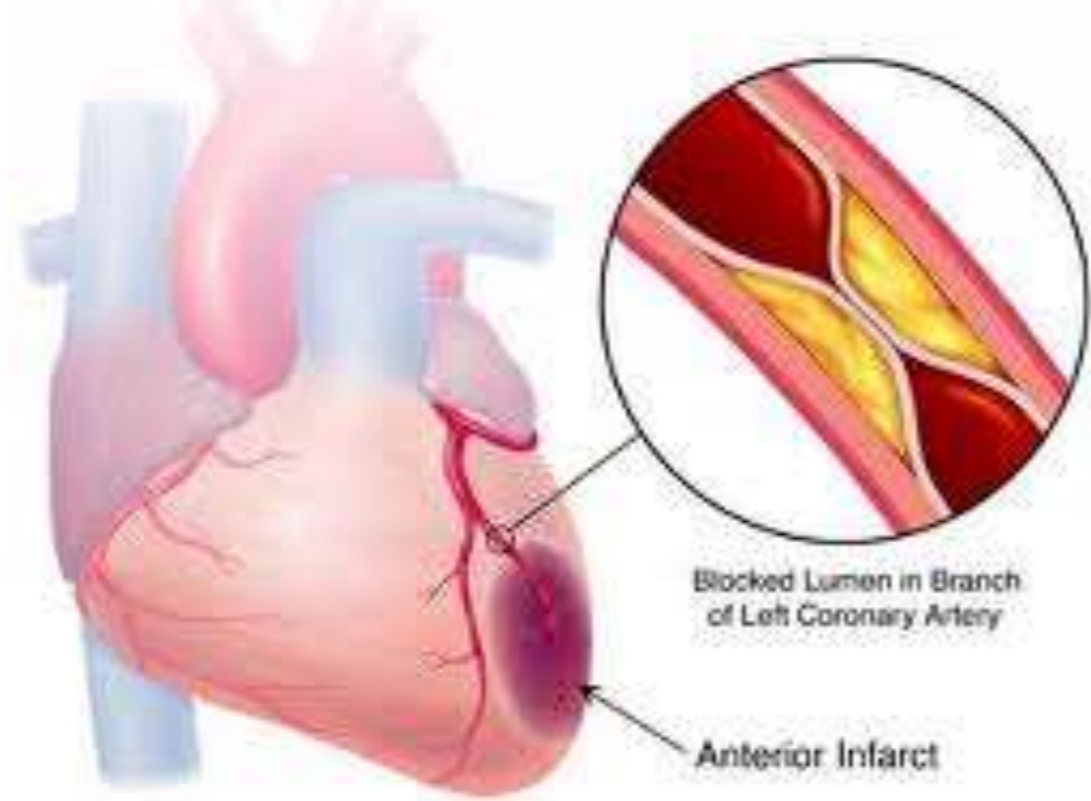
内径5mm以下の小口径人工血管は、血栓を生じて早期に閉塞してしまう。無閉塞の小口径人工血管が実現できれば、冠状動脈バイパス術への適用が期待される。

従来の小口径人工血管の開発は人工血管内膜の抗血栓性を高める方向で進んできた。(内皮細胞移植, 抗血栓剤塗布など)

→ **臨床で使えるものは開発されていない**

一方で、血管壁の柔軟性や拍動の伝播に対する血管の挙動といった血管単体の性質を正確に測定した例はほとんどない。

→ **無閉塞の人工血管を実現する為の大きな知見に成り得る**



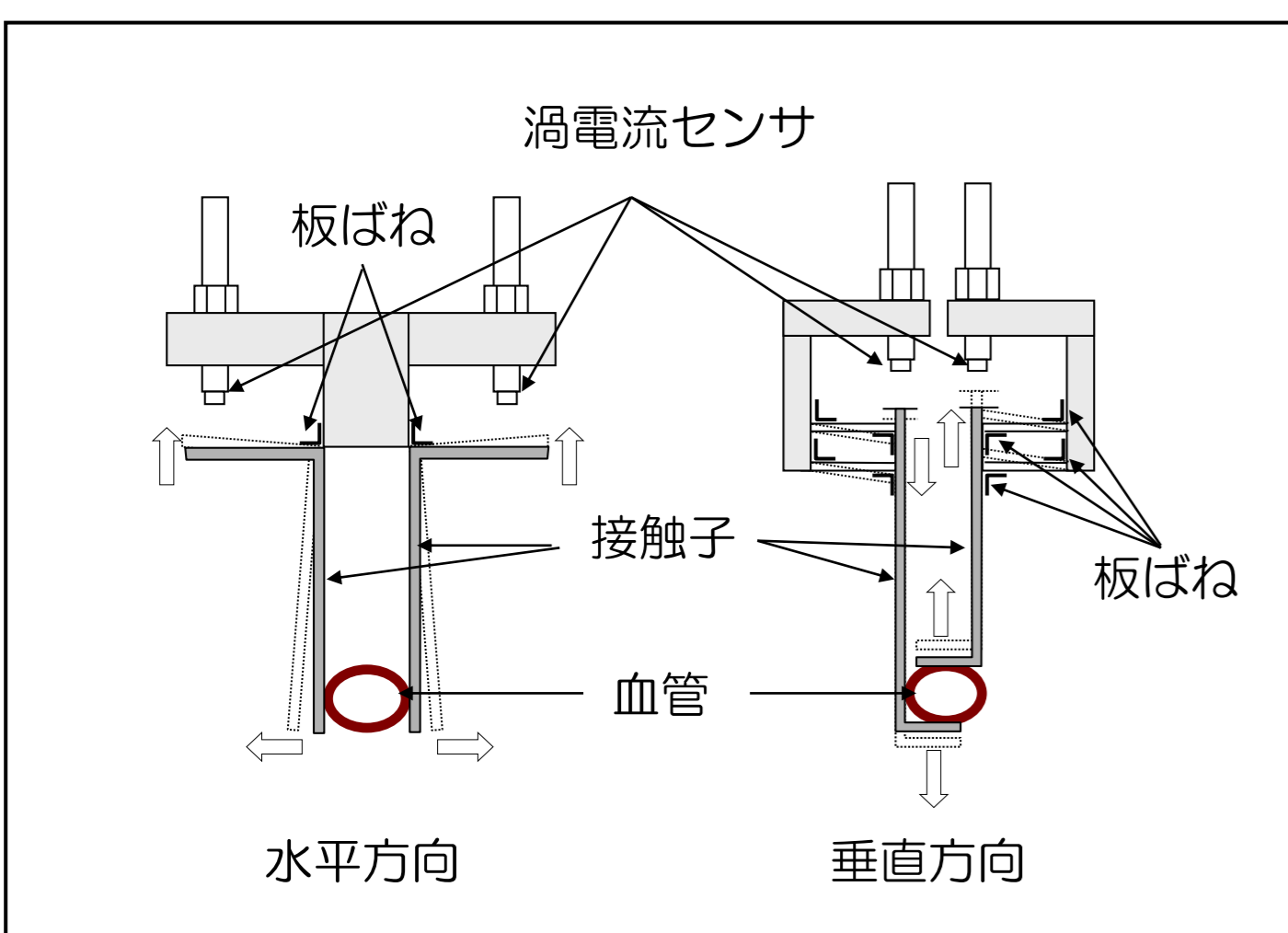
### 目的

1. 拍動に対する結果の挙動を観察する手法を設定し、血管の力学的特性と拍動の伝播との関係性を明らかにする。
2. 生体血管の持つ力学的特性を測定し、生体血管とコンパチブルな小口径人工血管を開発する。

### 接触式血管形状センサの開発

1. 接触式で血管変位を測定 → **接触子を用いた測定**
2. 限られた空間で測定できる構造 → **接触子先端が先細の構造**
3. 楕円形状の形状変化を測定 → **上下・左右の2軸測定**
4. 血管本来の動きを阻害しない → **接触子を小さな力で血管表面に押し付ける**
5. 高分解能測定
  - 接触子に触れない → **渦電流センサ**
  - 小型センサヘッド

#### 接触式血管形状センサの構造

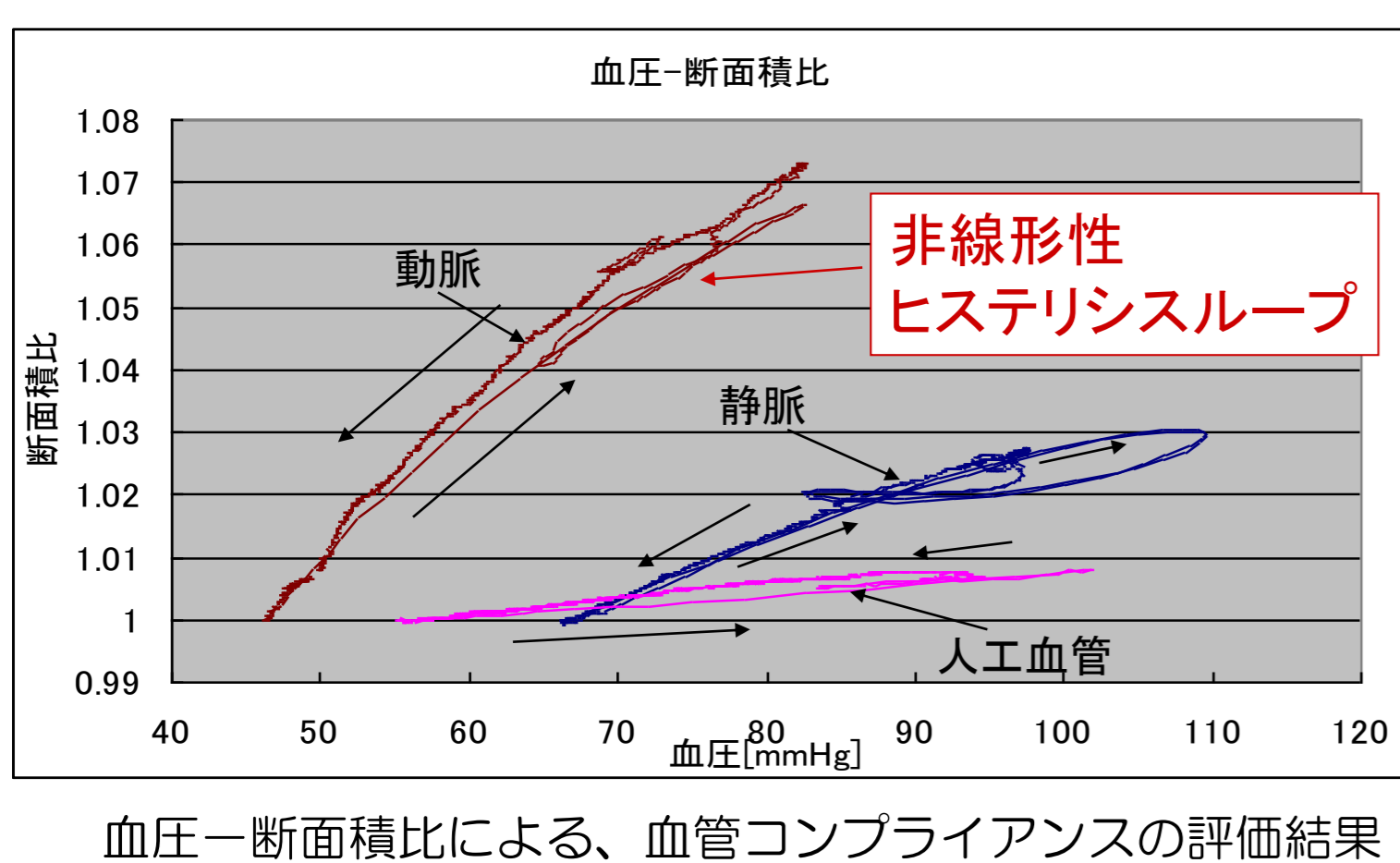


図：血管形状センサ断面図

写真：血管形状センサ概観

血管押し付け力：0.064mN/mm  
測定精度：約1%  
時間遅れ：1ms以下

### 実験結果



- 血管伸展性は動脈が最も高く、以下静脈、人工血管の順に低い。
- コンプライアンスの非線形性やヒステリシスループが得られた → **これが人工血管の早期閉塞に影響を与えている可能性がある**

### 脈動伝播実験

実験系

図：実験系の構成

シリンジポンプで拍動を入力  
流量、末梢抵抗を任意に設定可能  
複数点で直径・圧力測定

写真：実験系概観

人工心臓  
人工血管サンプル  
水槽  
レーザー変位計

圧力測定：脳圧計(J&J社CODMAN)  
直径測定：レーザー変位計(Keyence社)

### 実験

測定サンプル

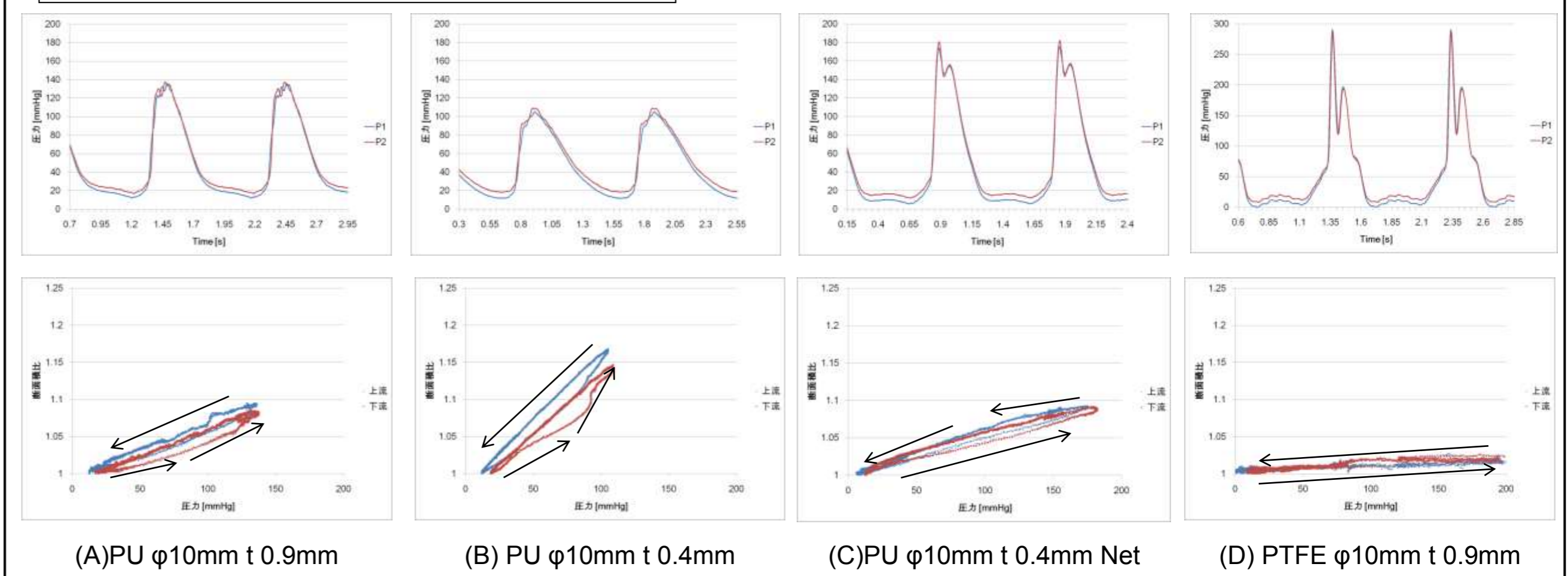
- (A) ポリウレタン人工血管, φ10mm, t0.9mm : 血管進展性小
- (B) ポリウレタン人工血管, φ10mm, t0.4mm : 血管進展性大
- (C) ポリウレタン人工血管, φ10mm, t0.4mm, 網目繊維入り : 非線形コンプライアンス
- (D) PTFE人工血管, φ10mm, t0.9mm : 市販品

圧力 - 断面積比線図

実験条件

- 脈動数：60Pulse/min
- 流量：0.48L/min
- 末梢抵抗：40mmHg (脈動を負荷していない時)
- サンプリング周波数：2kHz
- 測定点の距離：20cm

#### 脈動に対する血管直径・内圧の応答



人工血管	血管進展性 [mmHg <sup>-1</sup> ]	脈波伝播速度 [m/s]	脈圧 [mmHg]
(A) PU φ10mm t 0.9mm	0.81 × 10 <sup>-3</sup>	12.5	20 - 140
(B) PU φ10mm t 0.4mm	1.64 × 10 <sup>-3</sup>	9.5	20 - 110
(C) PU φ10mm t 0.4mm Net	0.43 × 10 <sup>-3</sup>	20	10 - 180
(D) PTFE φ10mm t 0.4mm	0.17 × 10 <sup>-3</sup>	33	0 - 270

• 血管進展性(≒コンプライアンス)が大きいほど、圧力が高い  
• 血管進展性と脈波伝播速度は相反の関係にある  
= 硬いものほど速く伝わる

#### 狭窄部の前後における脈動の減衰傾向

血管中央部の断面積を70%低下させた状態で脈動を入力

(A) PU φ10mm t 0.9mm (B) PU φ10mm t 0.4mm (C) PU φ10mm t 0.4mm Net (D) PTFE φ10mm t 0.9mm

25% 33% 14% 6%

血管進展性が大きいほど減衰が大きい  
= 柔らかい血管は脈動が伝播しづらい

非線形の方が減衰が小さい  
= 脈動が伝播しやすい

### 結果と考察

- 種々の血管について脈動の伝播を計測した結果、以下のことがわかった
  - 血管が硬いほど、内圧が高くなる(= 心臓への負担が大きい)
  - 血管が硬いほど、減衰が小さい(= 脈動が伝播しやすい)
  - 同程度の硬さなら、コンプライアンスが非線形の方が減衰が小さい(= 脈動が伝播しやすい)
- 生体血管は、コンプライアンスが非線形であることで、心臓への負担を抑えながら脈動を抹消へ伝えている可能性がある。

