

平成26年度 全学教育 医工学基礎

第4回 生体内の流れ

最新の測定技術や、スーパーコンピュータによるシミュレーションにより、生体内の複雑な血液の流れを理解する。

2014年11月11日

流体科学研究所
医工学研究科

早 瀬 敏 幸

講義内容

1. はじめに
2. 血液の流れ(循環系)
3. 血液の流れの計測
4. 血液の流れに関する研究(東北大学)
5. まとめ

1. はじめに

流れとは？

行く川の流れは絶えずして、
しかももとの水に非ず。

つながり

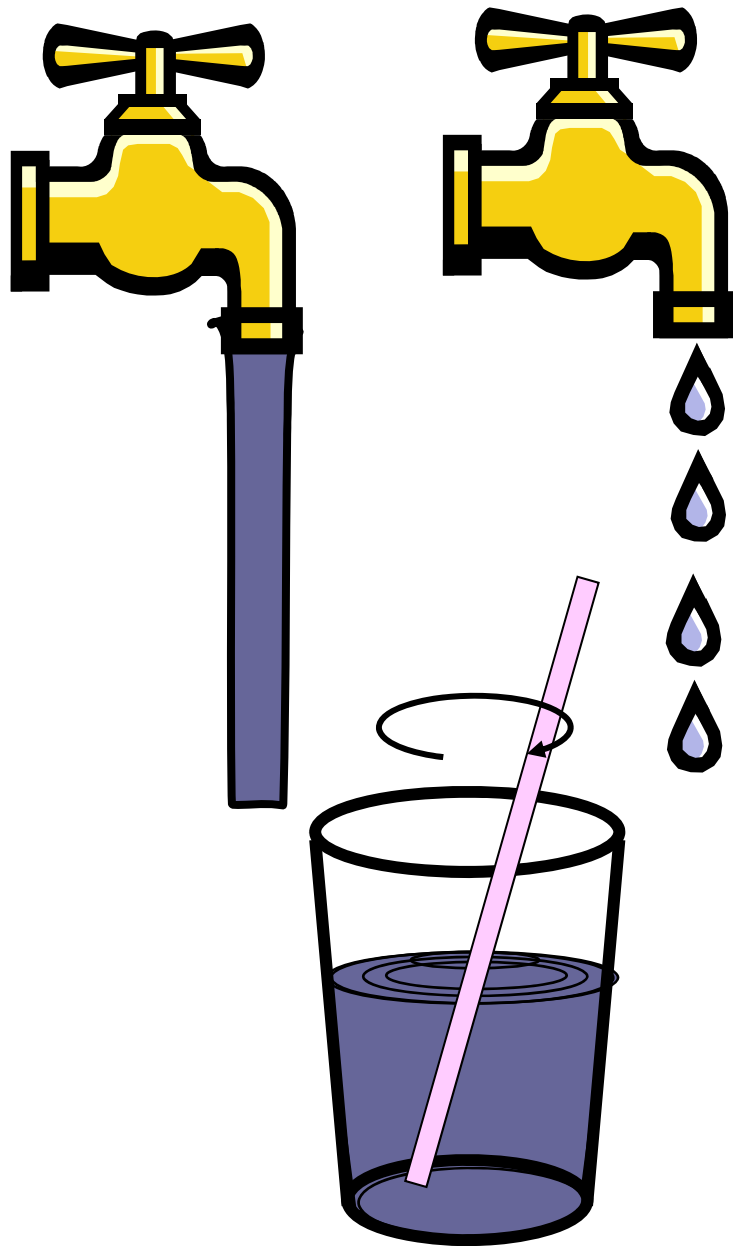
動き

鴨長明「方丈記」



広瀬川

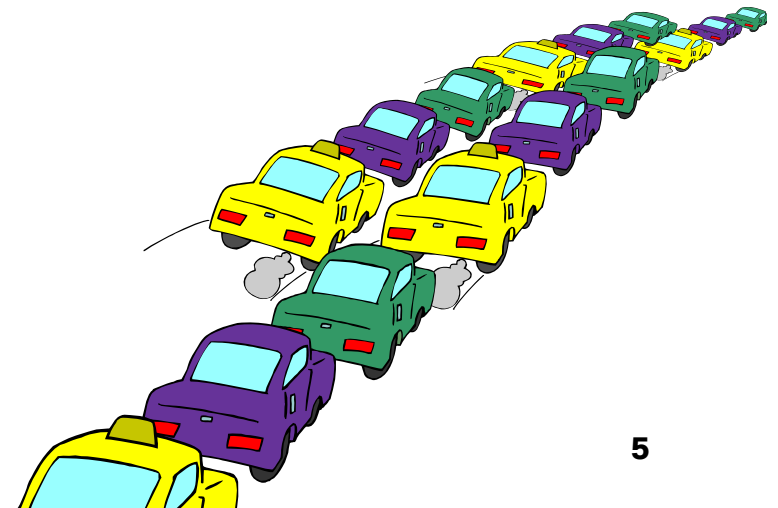
流れはどれ？「液体」と「流体」はちがう



つながり

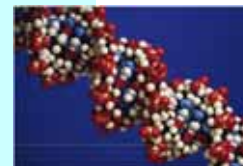
+

動き



様々な流れの例

流れの大きさ		流れの例
本州	10,000 km	マグマの流れ
	1,000 km	海流 ジェット気流
	100 km	台風
	10 km	河川
泉が岳	1 km	火山爆発
	100 m	新幹線周りの流れ ロケット
	10 m	ジェット旅客機 発電機のタービン
	1 m	水泳
ヒト	10 cm	半導体プロセスのプラズマ流
	1 cm	血管内の血流
	1 mm	メダカ
	100 μm	泳動型マイクロマシン
蚊	10 μm	毛細血管内の血流
	1 μm	赤血球 血液中のマイクロバブル ナノバブル
	100 nm	
	10 nm	ナノマシン



2. 血液の流れ(循環系)

血 液

量

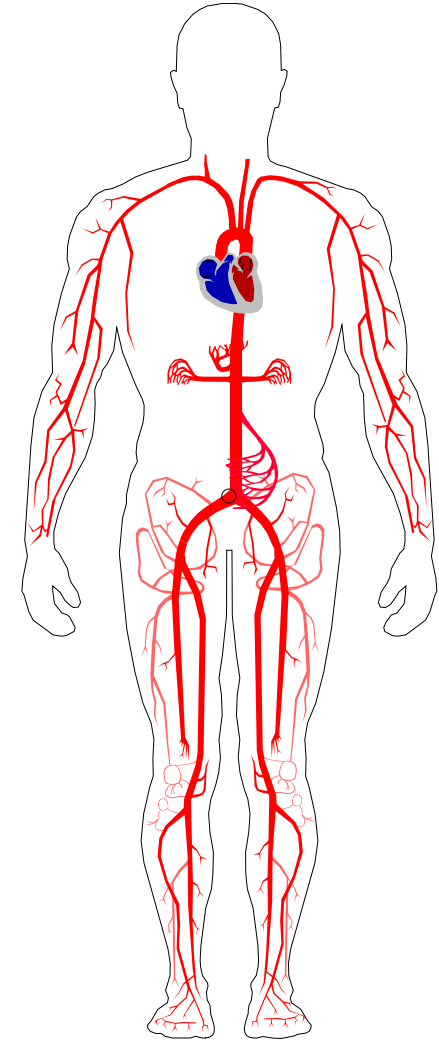
血液重量: 体重の約8%
(体重65kgなら5kg)

血液の体積: 約5リットル
(比重は1.06)

組成

有形成分(45%体積)

無形成分(55%体積)



血液の有形成分

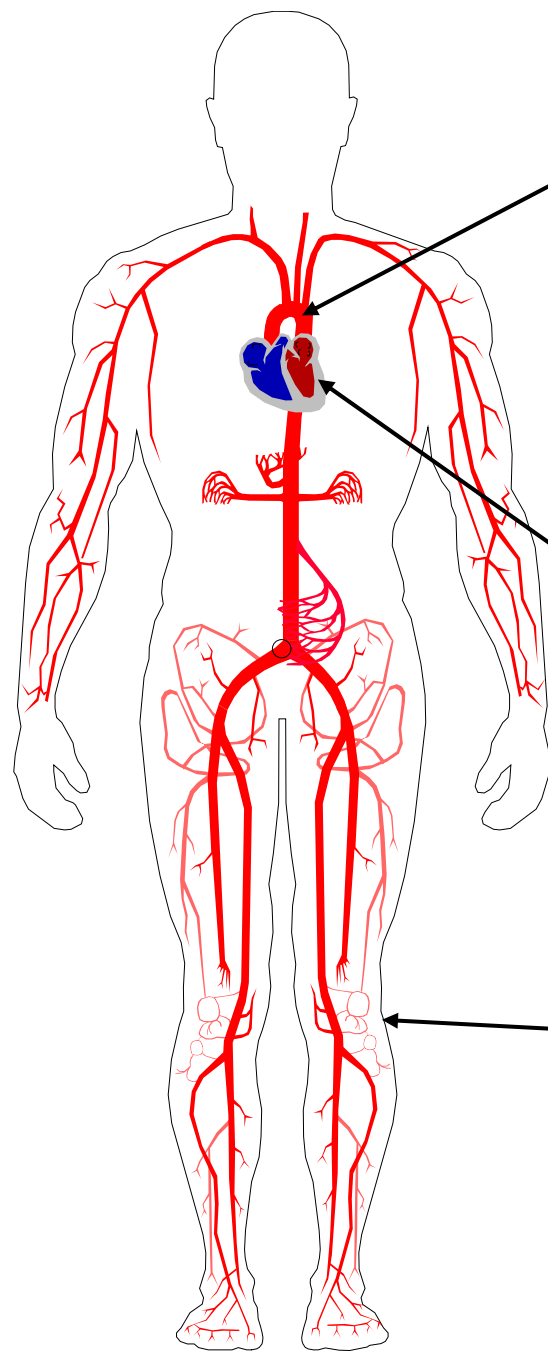
- 赤血球(95%)
酸素と二酸化炭素の輸送
直径8ミクロン×厚さ2ミクロンの円板状
寿命は120日
- 白血球(1%)
抗体の生産や細菌の消化
直径7ー20ミクロンの球状
寿命は数時間から数日
- 血小板(4%)
血液の凝集や凝血
直径3ミクロンの平板状
寿命は数日

血液の無形成分

- 血漿

栄養分や老廃物の輸送

水(90%), 血漿タンパク(7%), 無機質(3%)



大動脈(タンク, 管路)

直径3cm

長さ30cm

平均速度30cm/秒

心臓(ポンプ)

最大・最小容積160ml, 80ml

脈拍65回/分

拍出量5リットル/分

毛細血管(抵抗)

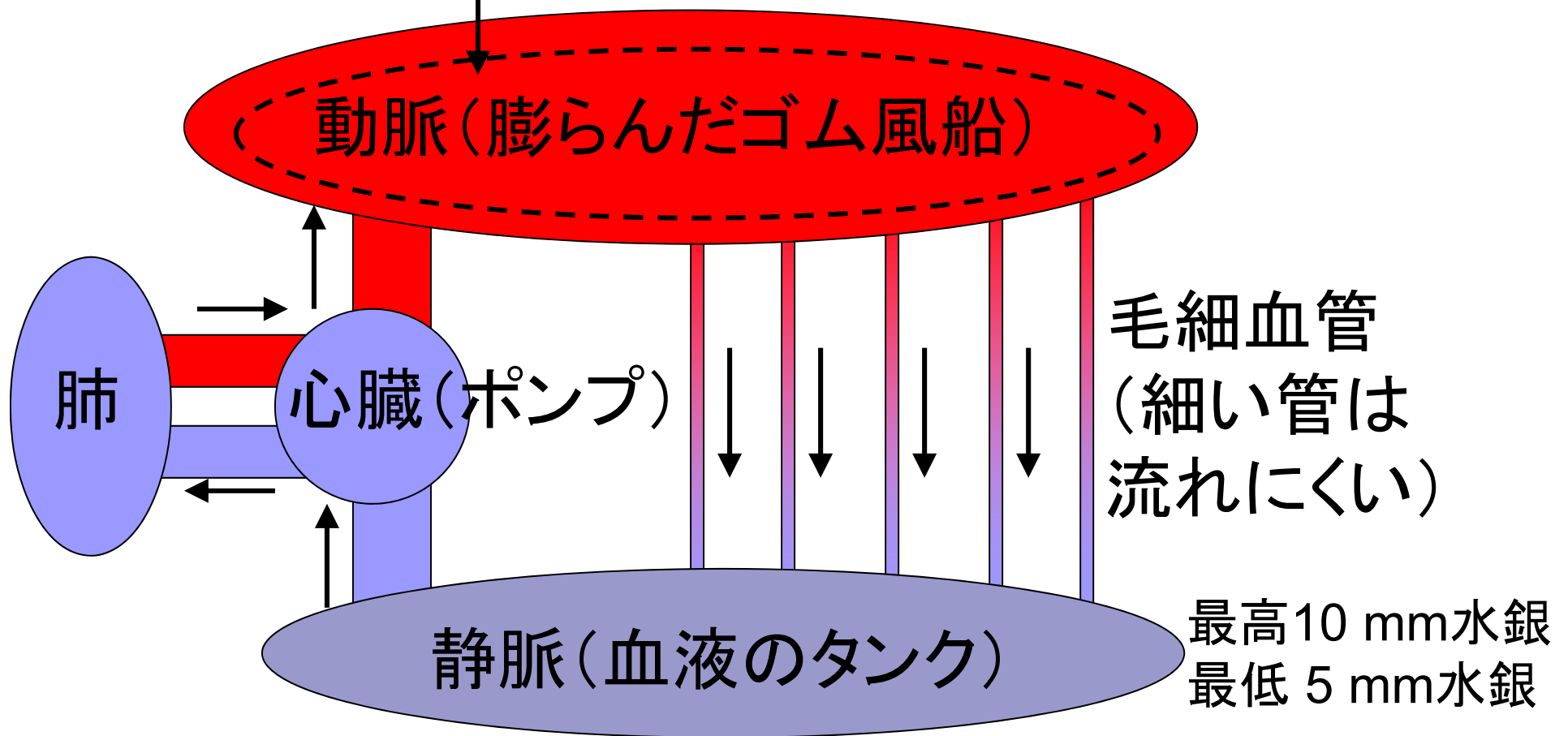
直径5ミクロン

長さ1mm

平均速度1mm/秒

血液循環のイメージ

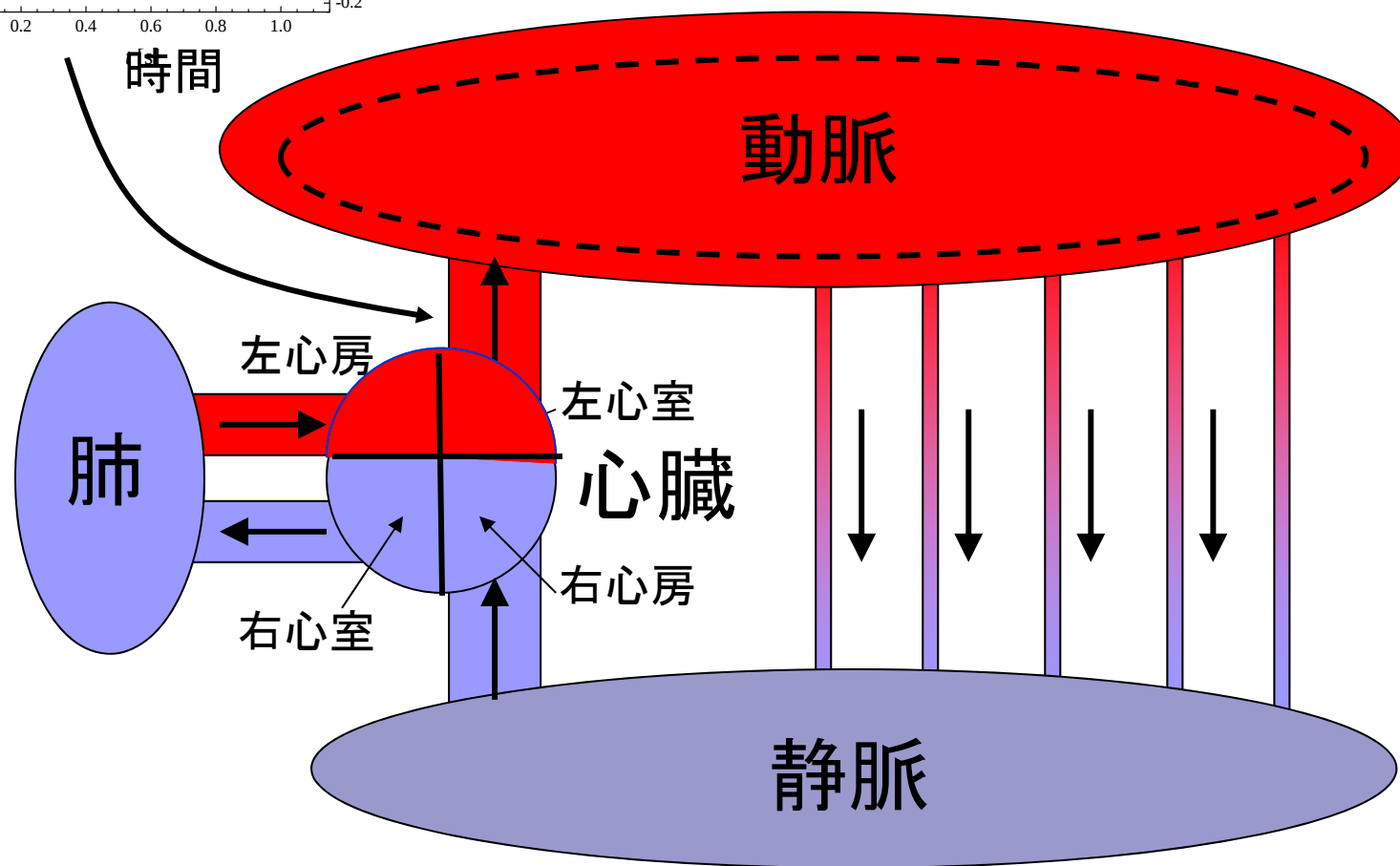
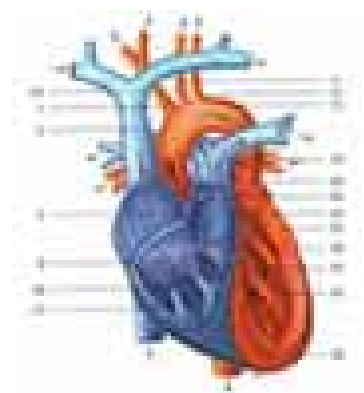
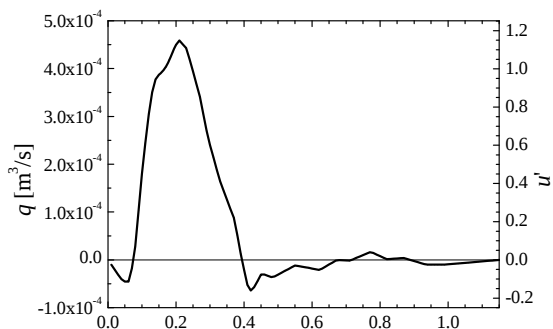
この部分の圧力が血圧 最高120mm水銀 = 1.6m水柱
最低 90mm水銀 = 1.2m水柱



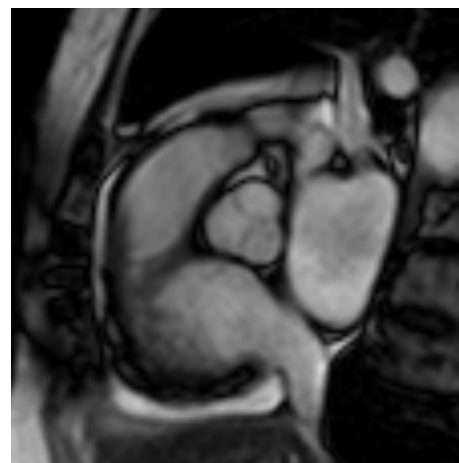
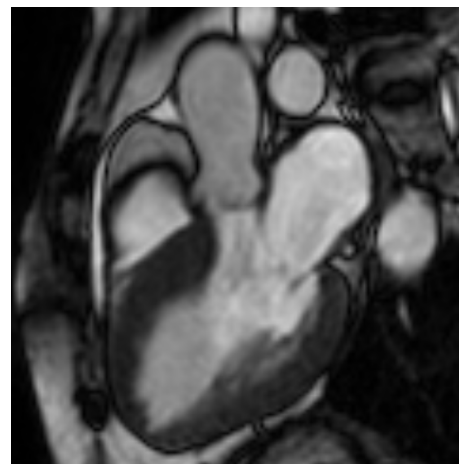
心臓は血液のポンプ

最高120mm水銀 = 1.6m水柱
最低 90mm水銀 = 1.2m水柱

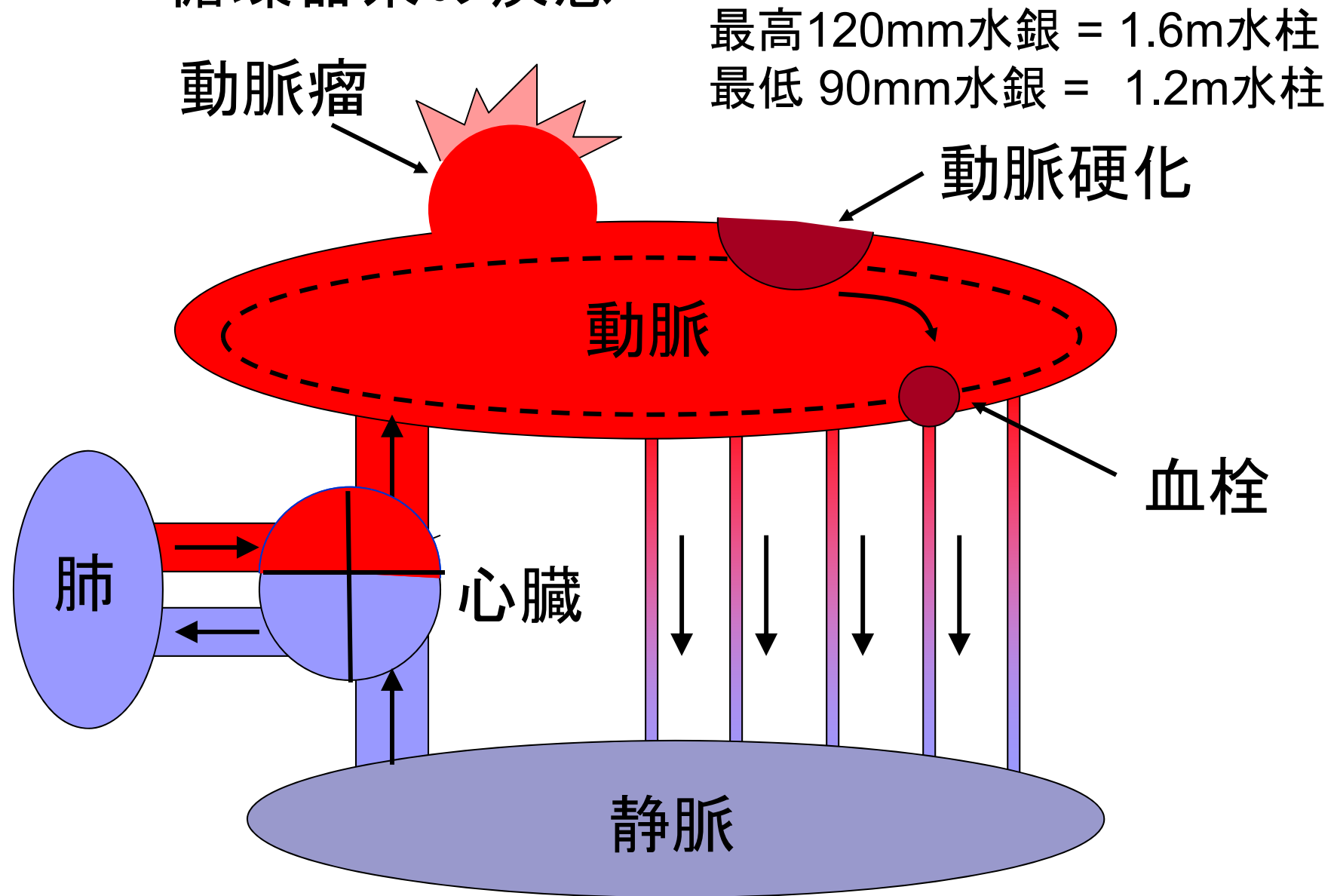
流量



MRIによる心臓の動きと血流の観察



循環器系の疾患



3. 血液の流れの計測

1) はじめに

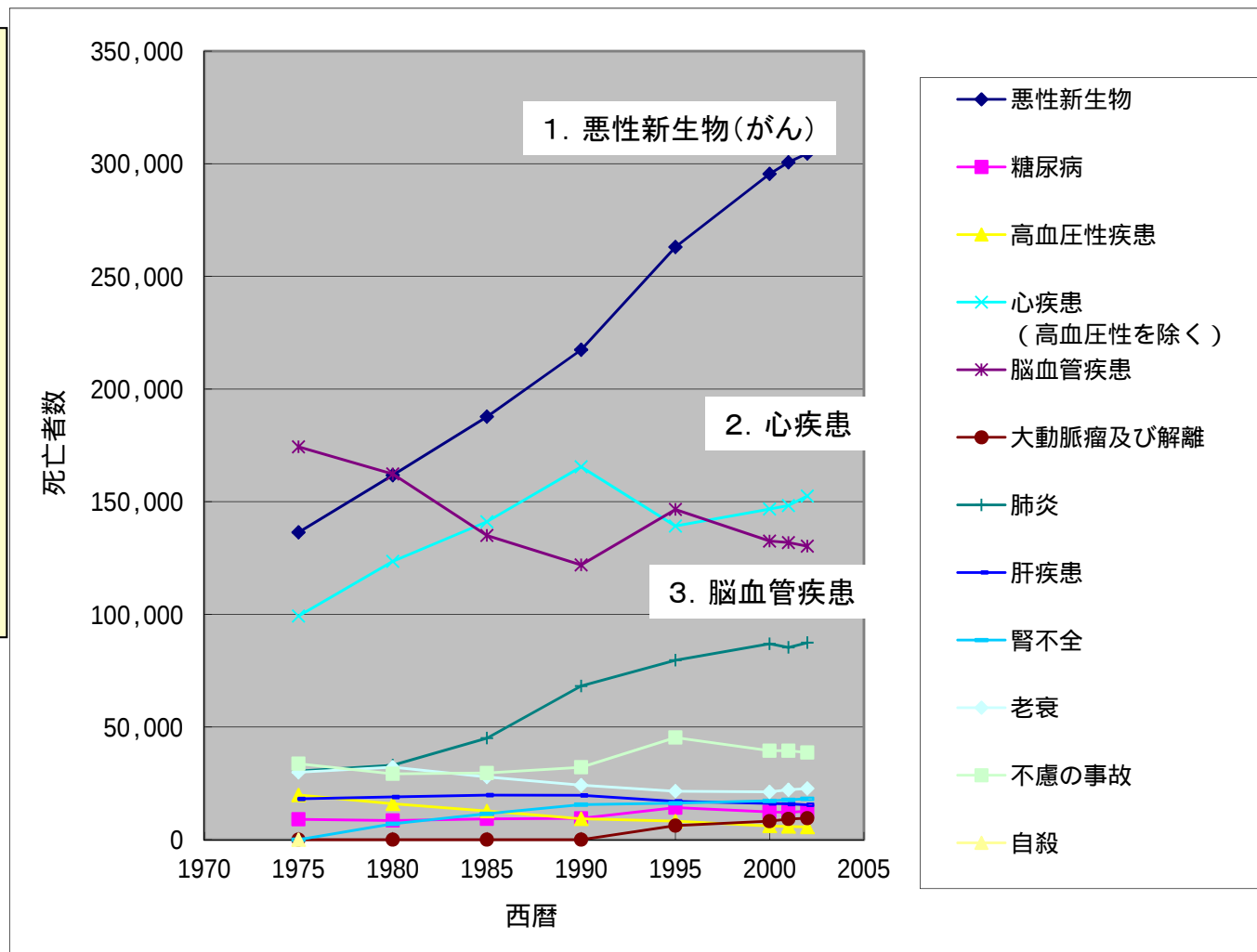
2) X線診断装置、CT

3) 超音波計測法

1)はじめに

我が国の死亡原因の推移

心疾患(高血圧性を除く)
急性心筋梗塞
その他の虚血性心疾患
不整脈及び伝導障害
心不全
脳血管疾患
くも膜下出血
脳内出血
脳梗塞
大動脈瘤及び解離



医用画像診断装置

体内構造物に体外からエネルギーを与え、構造物との作用から生じる物理量を検出し画像化する装置

	与えるエネルギー	構造物との作用	長所	短所
X線診断装置	X線	X線減衰	空間・時間分解能が高い	X線被曝
CT	X線	X線減衰	機動性に優れる	X線被曝
MRI	高周波磁場	スピン緩和	コントラストが高い	空間分解能が低い
超音波診断装置	パルス超音波	反射、ドプラ効果	局所、リアルタイム、非侵襲	コントラストが低い
核医学診断装置	放射性同位元素	局在化	機能診断	被曝

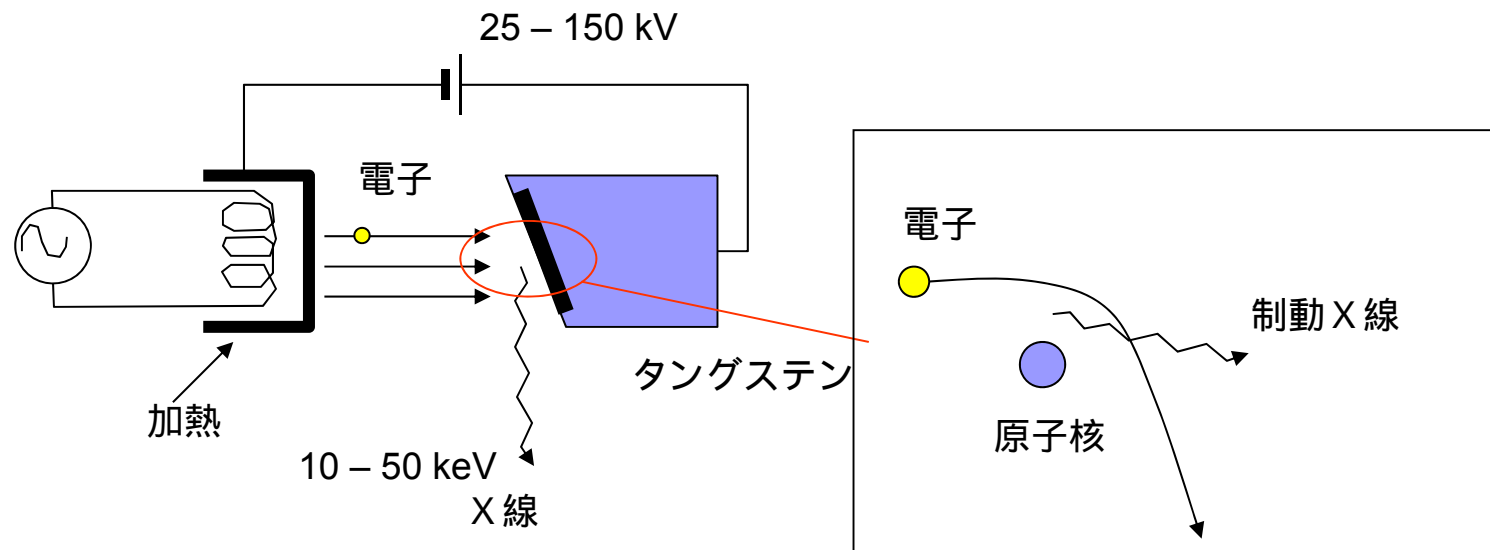
2) X線診断装置

(1) X線診断装置の歴史

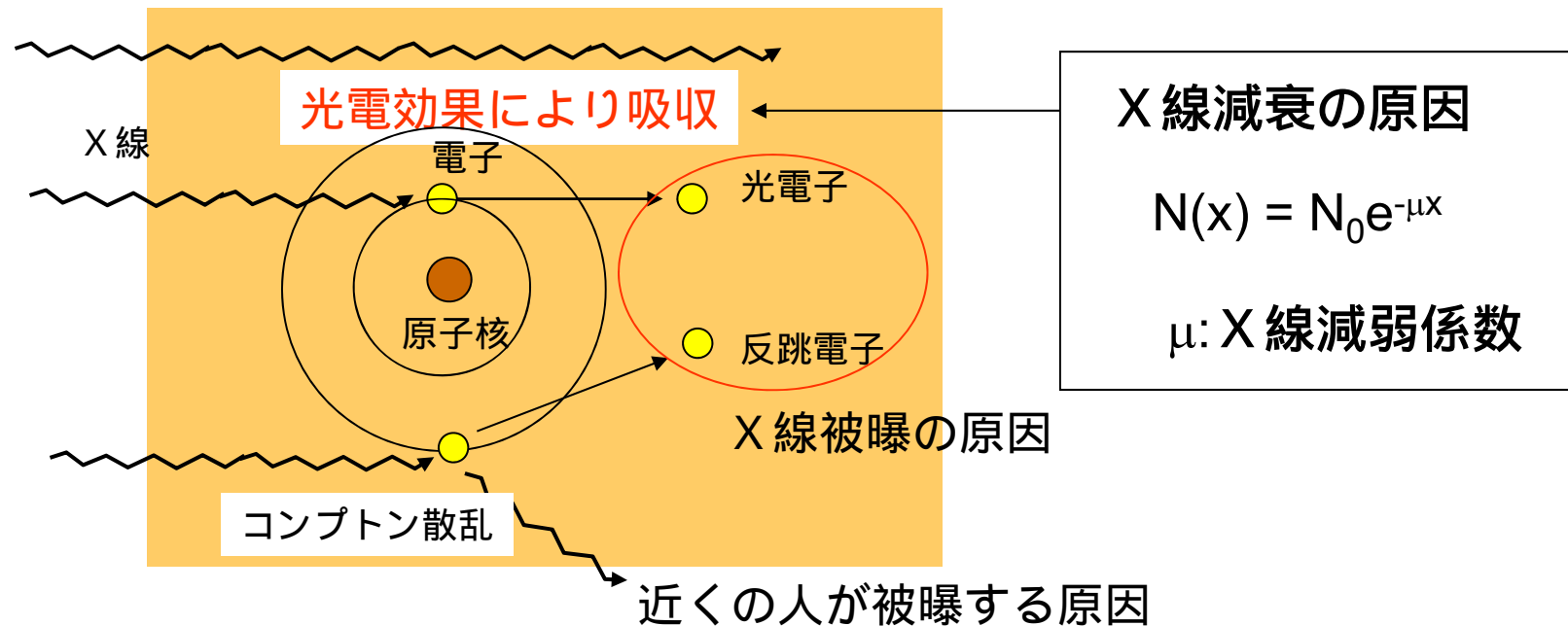
- 1895 Roentgen : X線
- 1898 Levy : X線フィルム
- 1918 Coolidge : 人体イメージング用X線管
- 1934 Holst : イメージインテンシファイア

(2) X線管 : X線の発生

X線は電磁波、フォトン



(3) 人体との相互作用

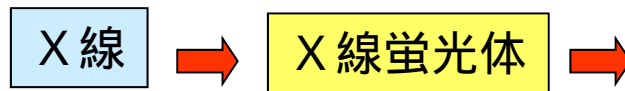


(4) X線の量

吸収線量：物質1kgにつき、1Jのエネルギー吸収が起こる線量:1Gy(グレイ)
実効線量：吸収線量に組織毎の補正を行い全身で合計：単位Sv(シーベルト)

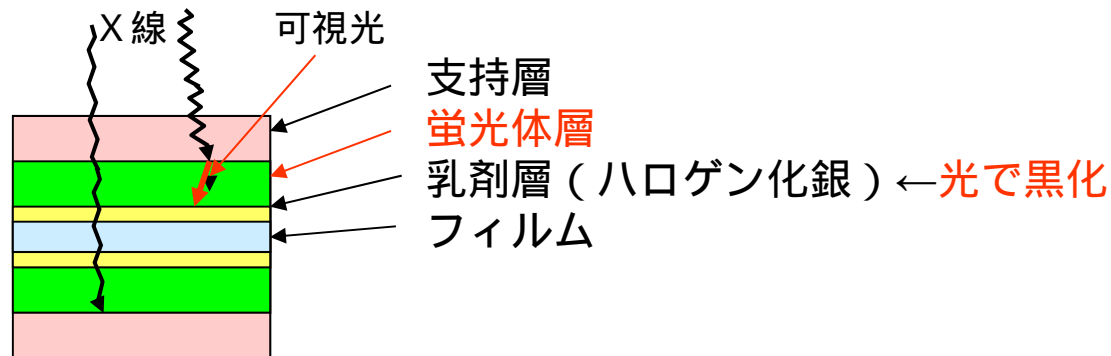
自然放射線： 1 ~ 3 mSv (1人1年間)
放射線作業員： 50 mSv (発癌率で差が出ない)
発癌の相関： 200 mSv 以上
胃X線検査： 0.6 mSv
CT： 10 mSv

(5) X線検出器

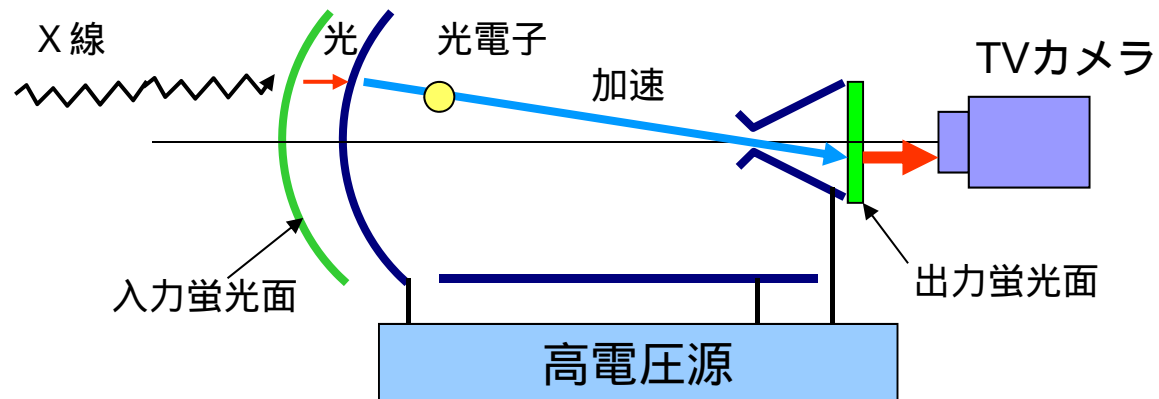


- ・フィルム
- ・イメージンシファイア→TVカメラ
- ・イメージングプレート
- ・フラットセンサー（間接型）

a) フィルム



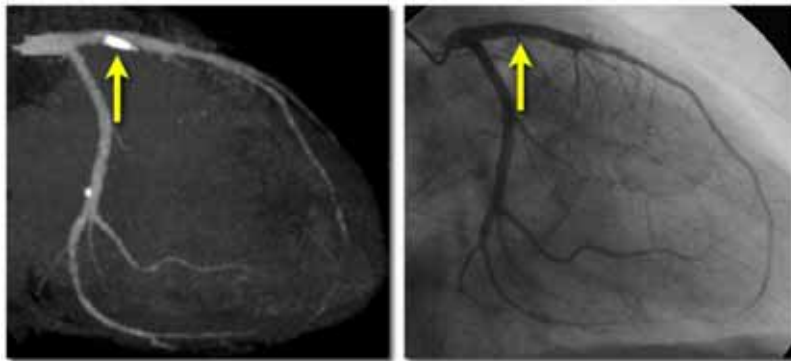
b) イメージンシファイア



CT



GE Healthcare Japan HP



東京女子医科大学HP

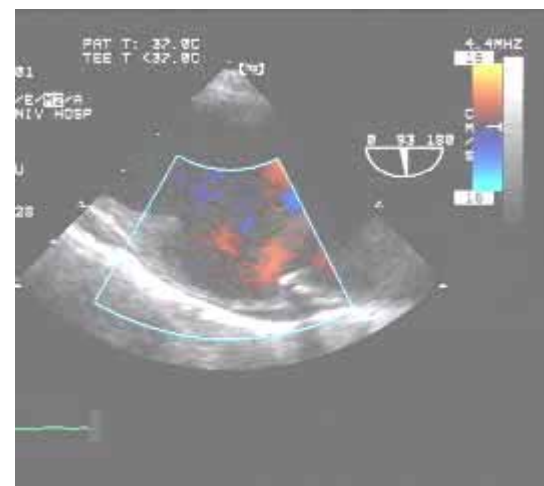


3) 超音波計測法

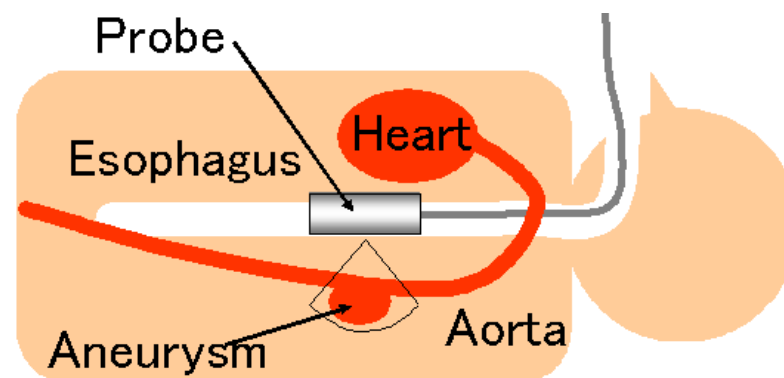
超音波診断装置



超音波診断装置



カラードプラ計測結果



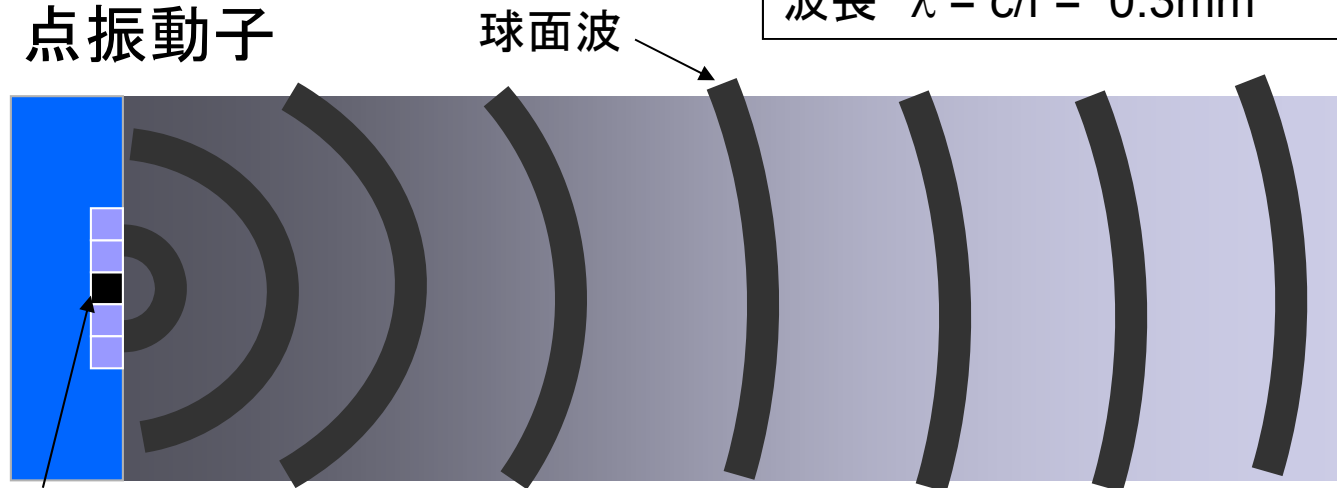
下行大動脈に発症した動脈瘤

超音波計測の原理

超音波ビーム

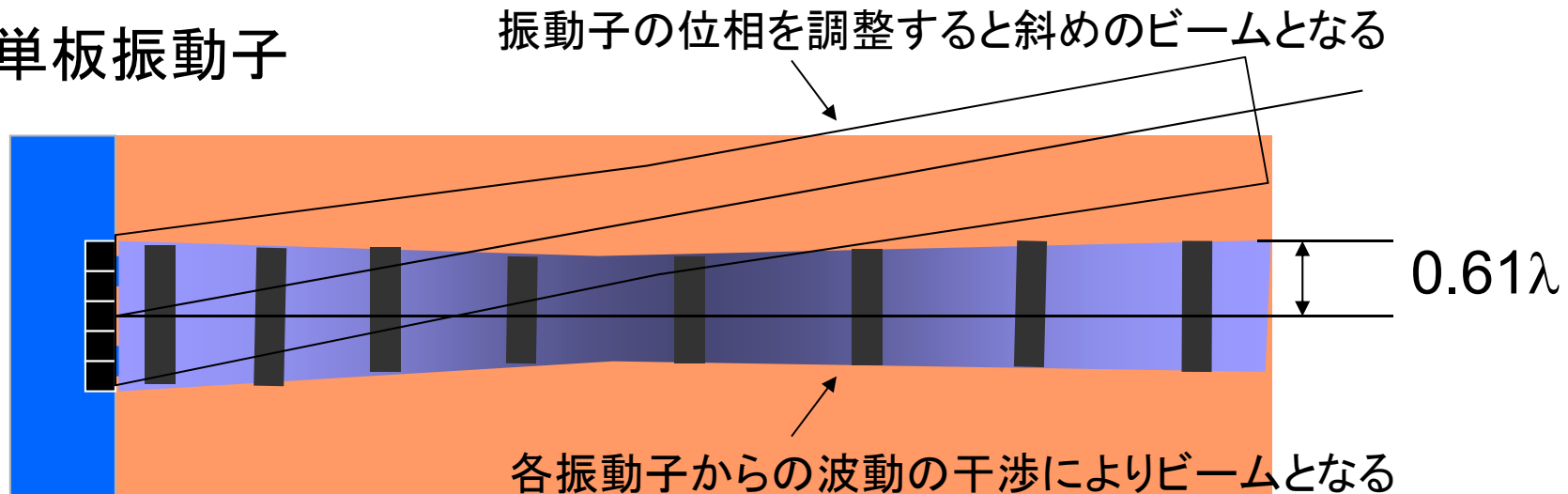
音速 $c = \sqrt{K/\rho} = 1540 \text{ m/s} \pm 6\%$ (生体組織)
周波数 $f = 5 \text{ MHz}$ (高いほど減衰が大きい)
波長 $\lambda = c/f = 0.3 \text{ mm}$

1. 点振動子



圧電素子: アクチュエータ&センサ

2. 単板振動子



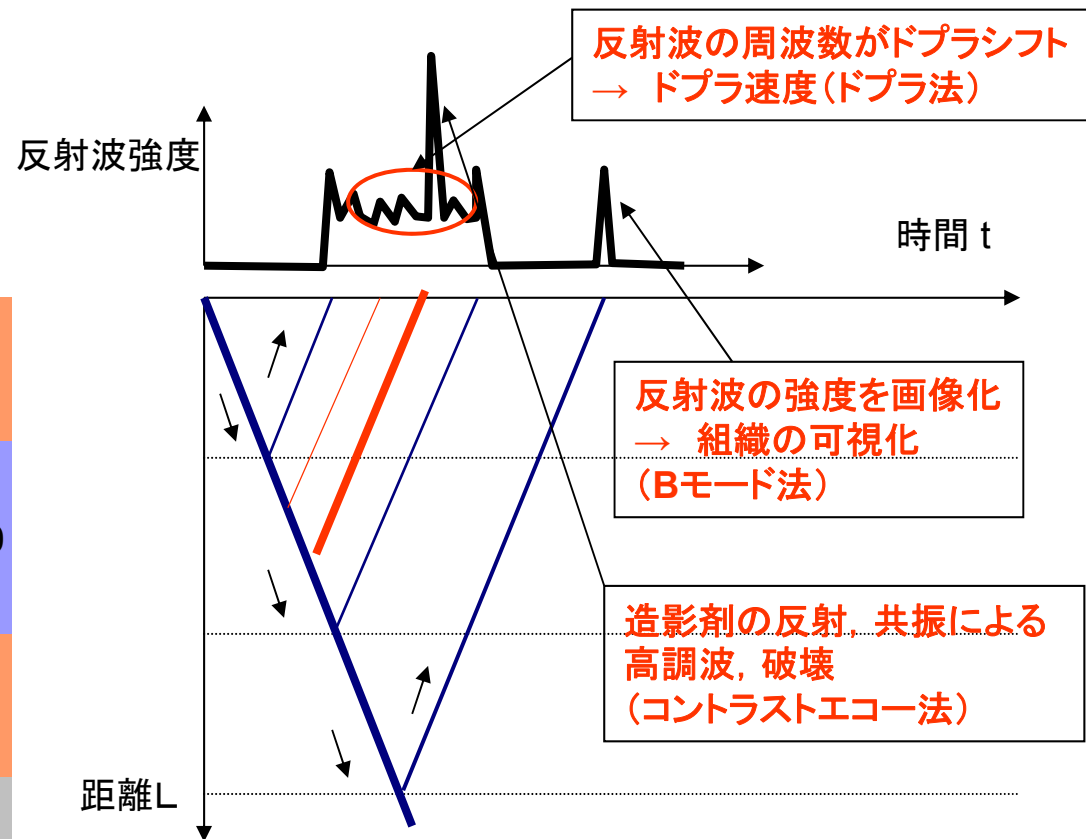
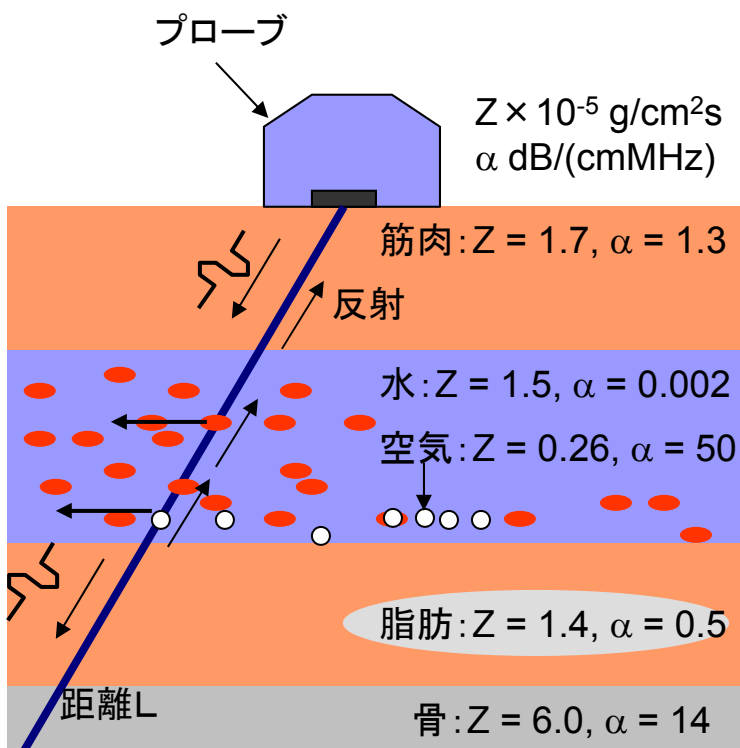
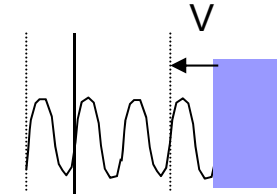
Bモード法とドプラ法

Bモード法: 固有音響インピーダンスの異なる界面での反射を利用

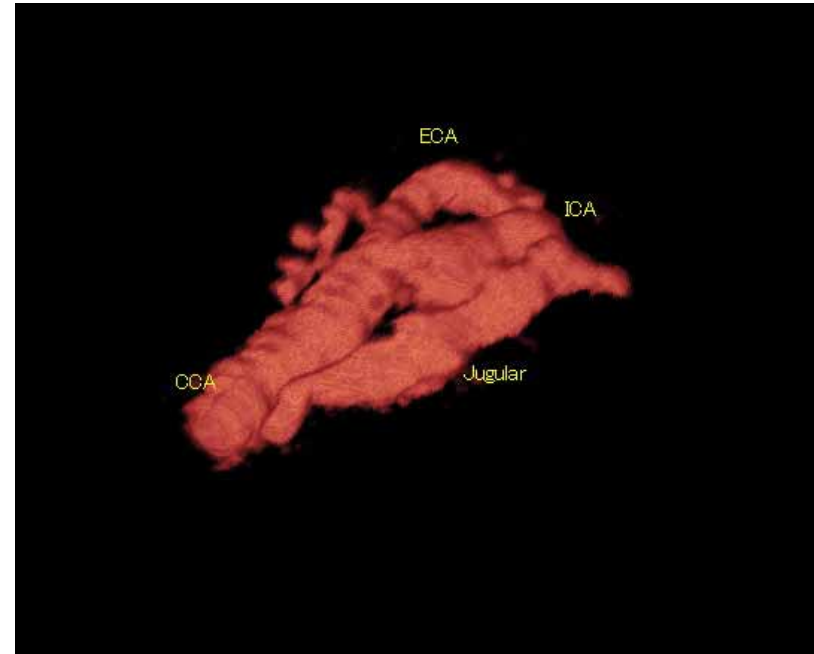
ドプラ法: 速度に比例した周波数シフトを利用

圧力振幅と速度振幅の関係: $P = ZV$ ここで $Z = \rho c$

P: 圧力振幅, V: 速度振幅, Z: 固有音響インピーダンス, ρ : 密度, c: 音速



超音波計測の例



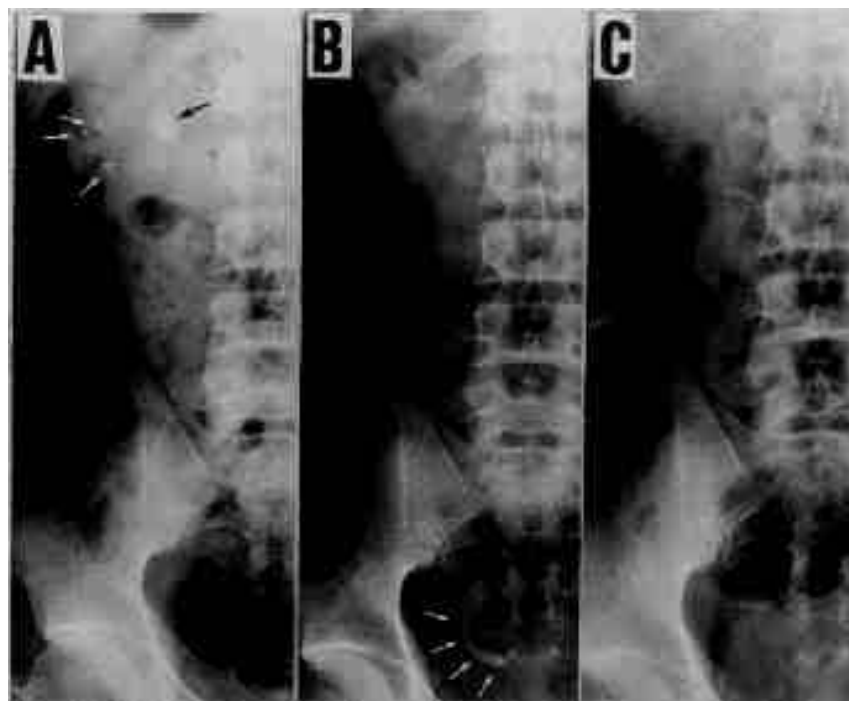
GE Healthcare Japan HP

4. 血液の流れに関する研究(東北大学)

- 1) 衝撃波結石破碎装置
- 2) 脳動脈瘤内の血流シミュレーション
- 3) 振動流型人工心臓の開発
- 4) ナノテク人工心筋
- 5) 心臓内血流シミュレーション
- 6) 超音波計測融合血流シミュレーション
- 7) 細胞の摩擦特性の計測
- 8) 磁気マイクロマシン
- 9) 肺毛細血管内の白血球の流動

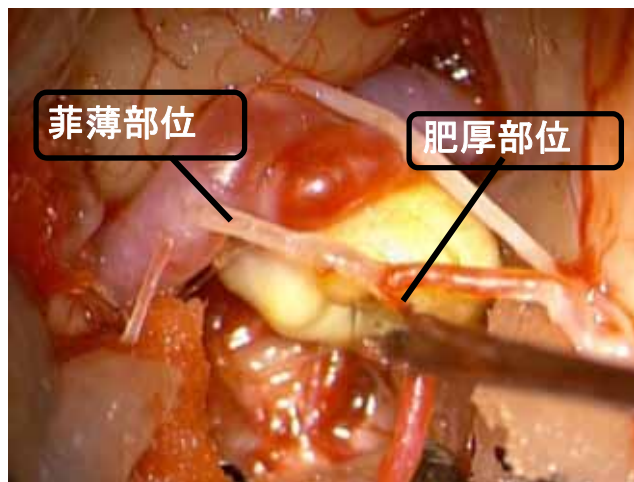
1) 衝撃波結石破碎装置

東北大で開発した最初の体外衝撃波結石破碎術



2) 脳動脈瘤内の血流シミュレーション

流体科学研究所と医学部との共同研究



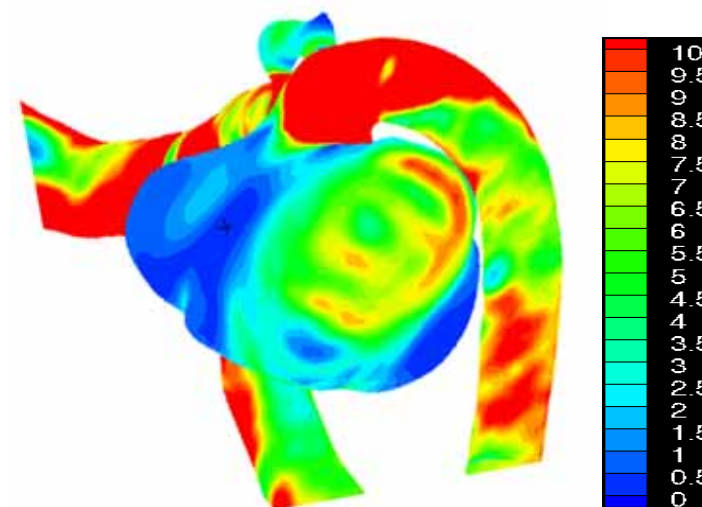
Inlet (Internal Carotid Artery)



Outlet (Middle Cerebral Artery)

Outlet (Right-Anterior Cerebral Artery)

Outlet (Left-Anterior Cerebral Artery)

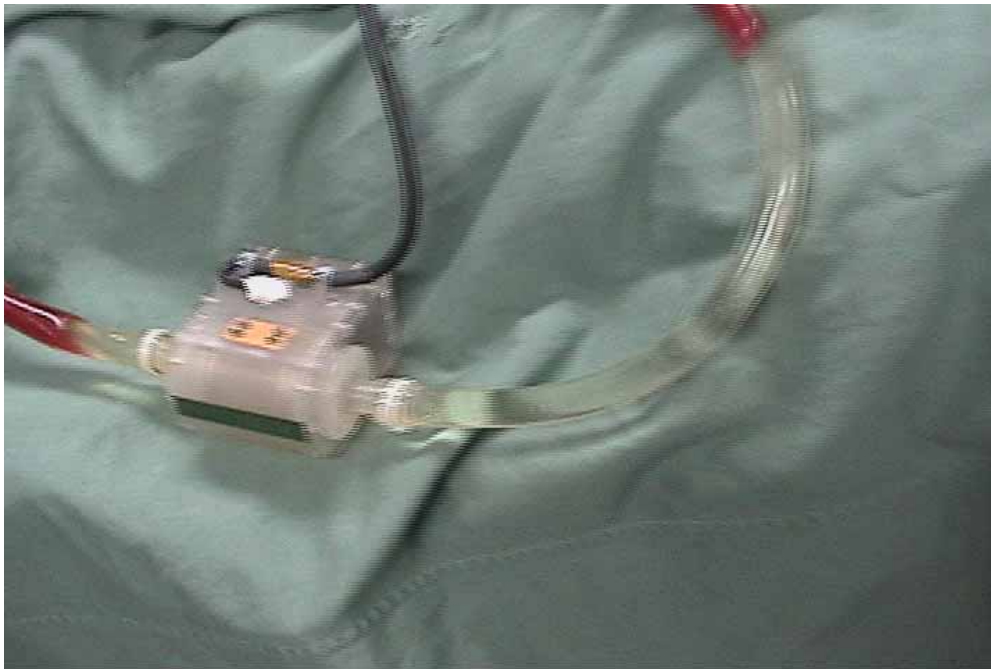


TAWSS

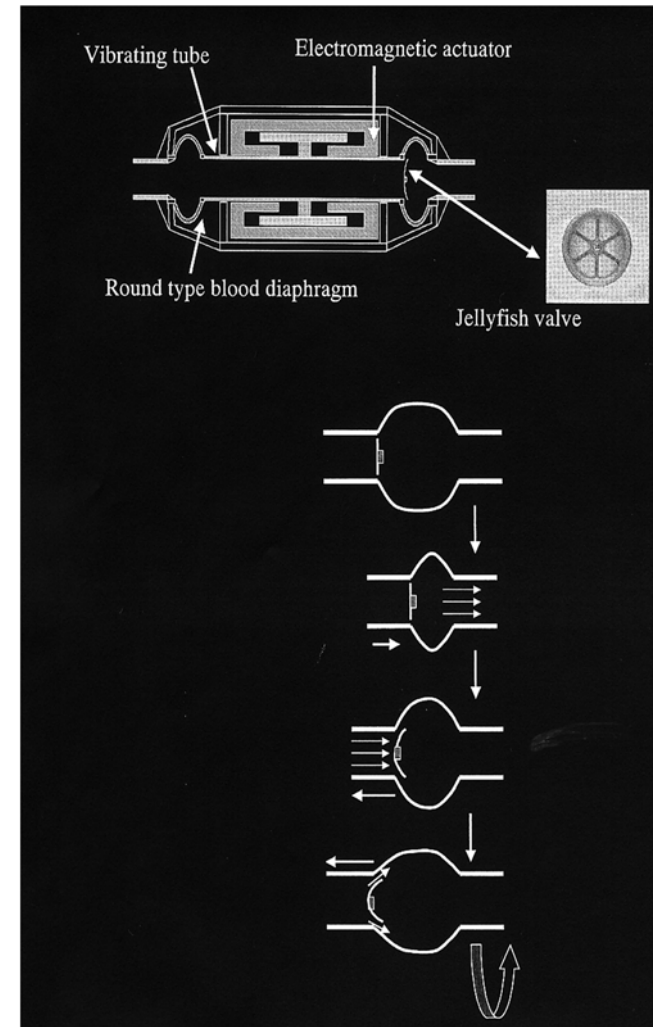
3) 振動流型人工心臓の開発

加齢医学研究所＋
流体科学研究所

人間の心臓 = 約1Hzで、60－80ml/
小型化人工心臓 = 20Hzで、3－4ml

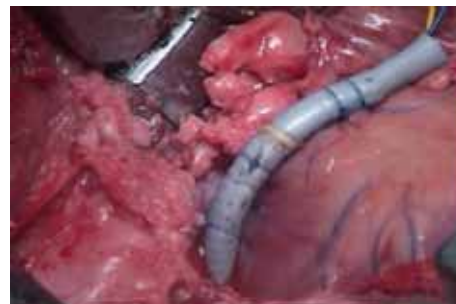
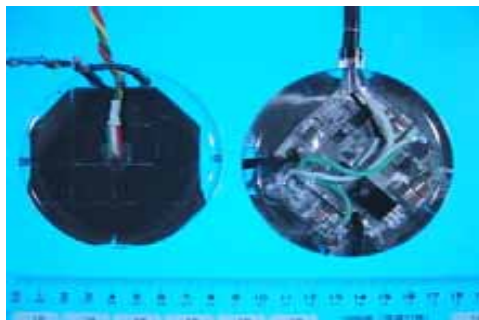
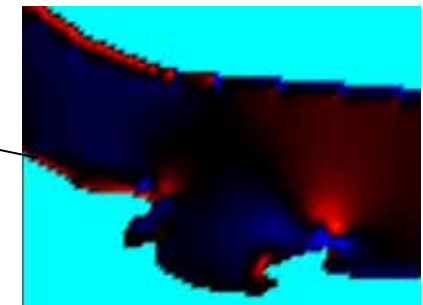
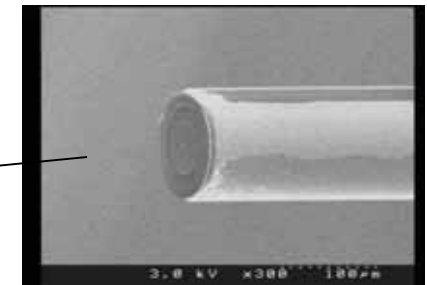
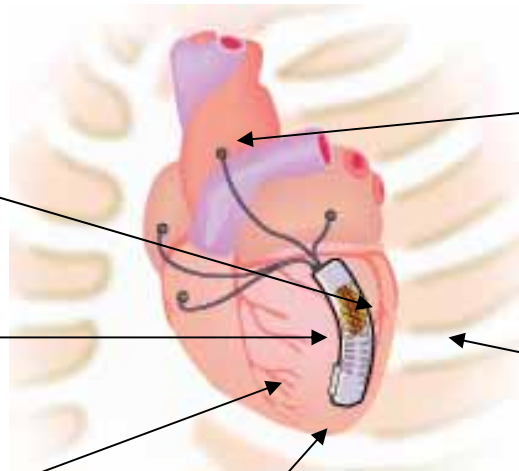
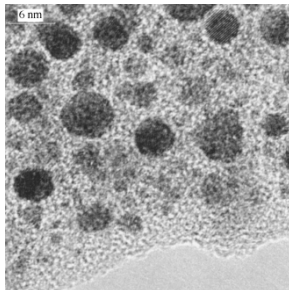
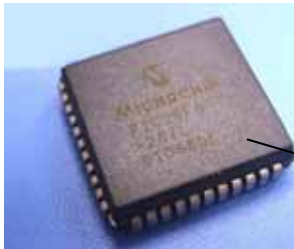


振動流ポンププロジェクト



4) ナノテク人工心筋

■ ナノテクの集積



形状記憶合金
結晶配列



ナノテクによる
分子結晶構造配列

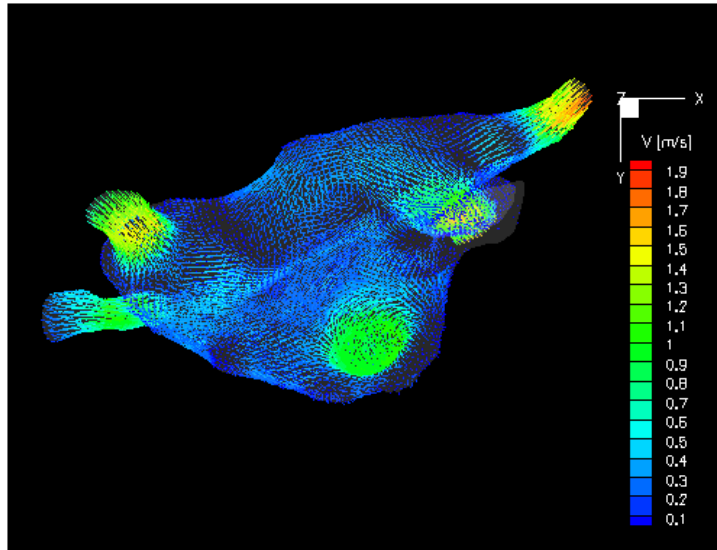


均一サイズ
均一方向の
多結晶体構造

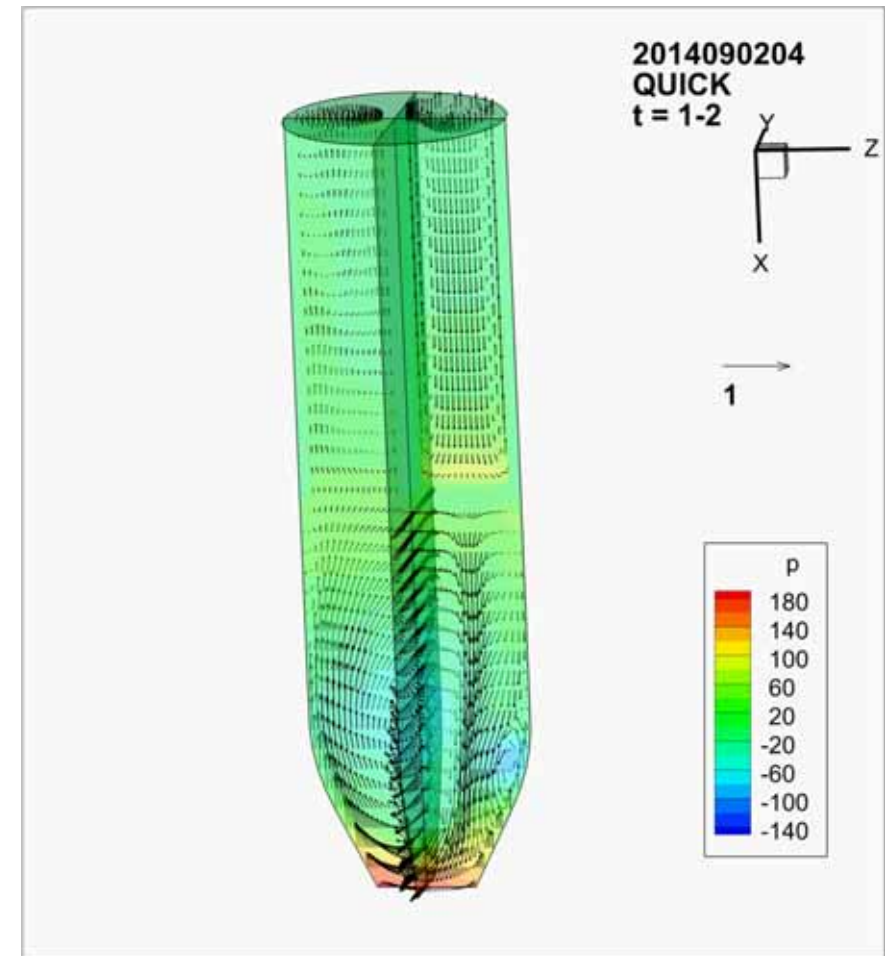
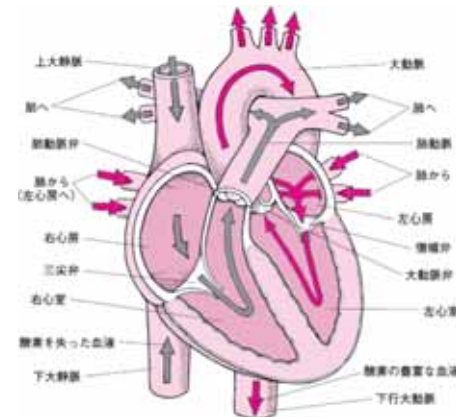


5) 心臓内血流シミュレーション

心房細動による血栓形成メカニズムの解明

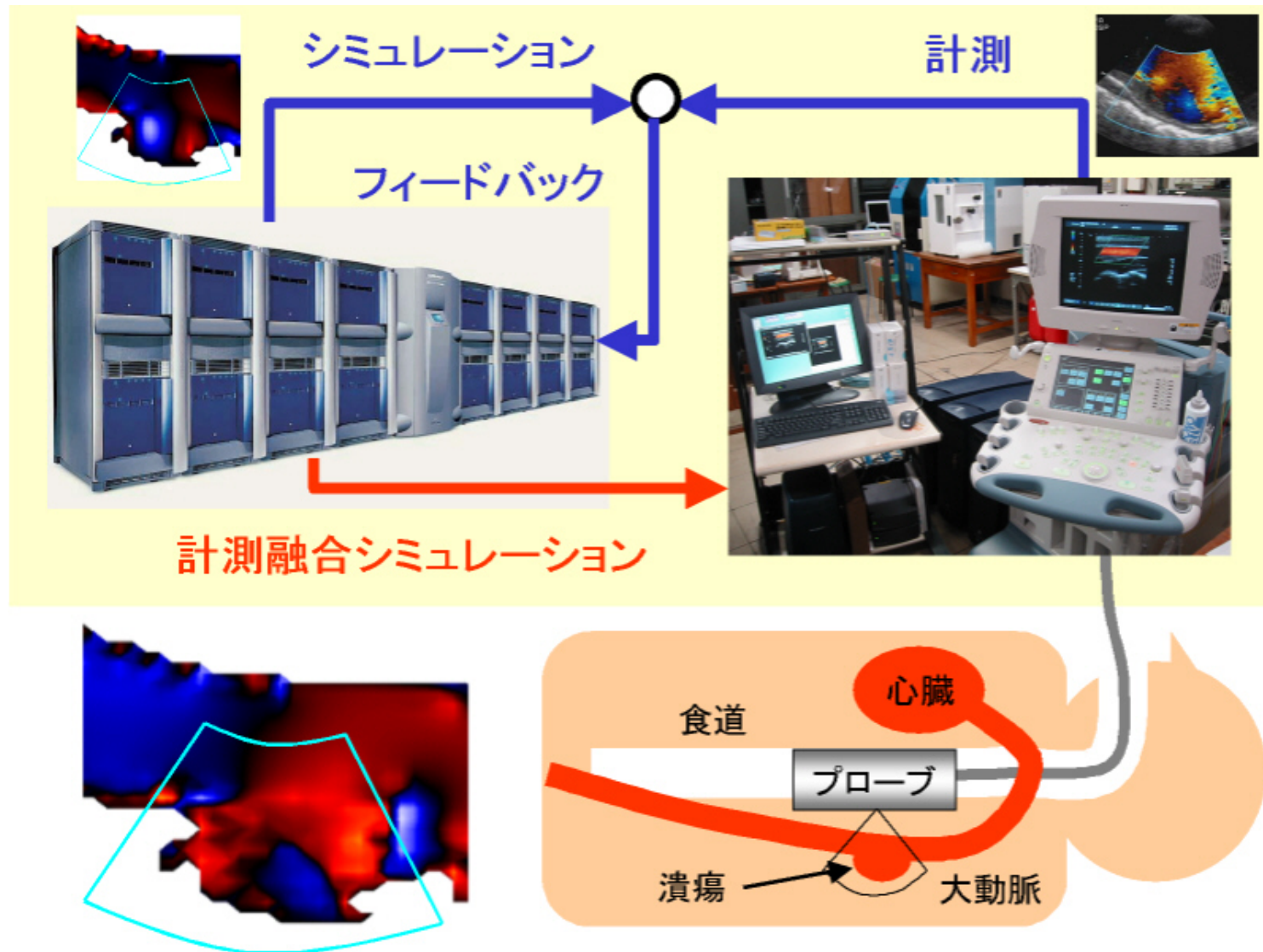


左心房に発生する心房細動のシミュレーション



左心室内の血流シミュレーション

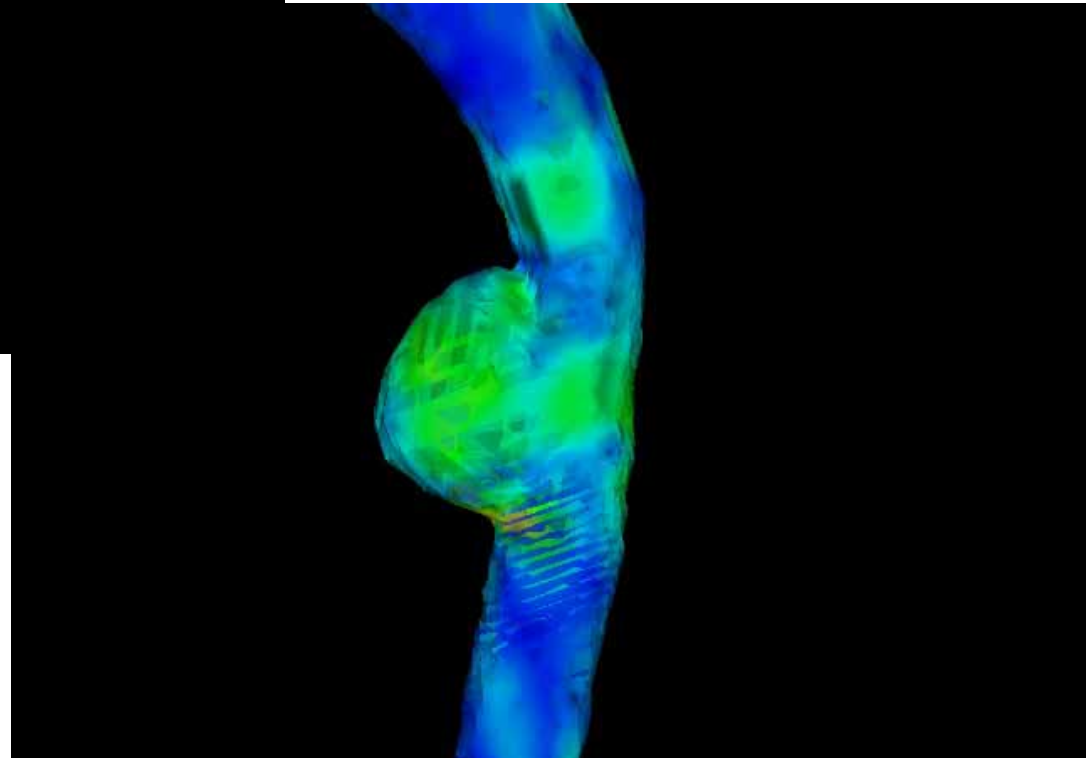
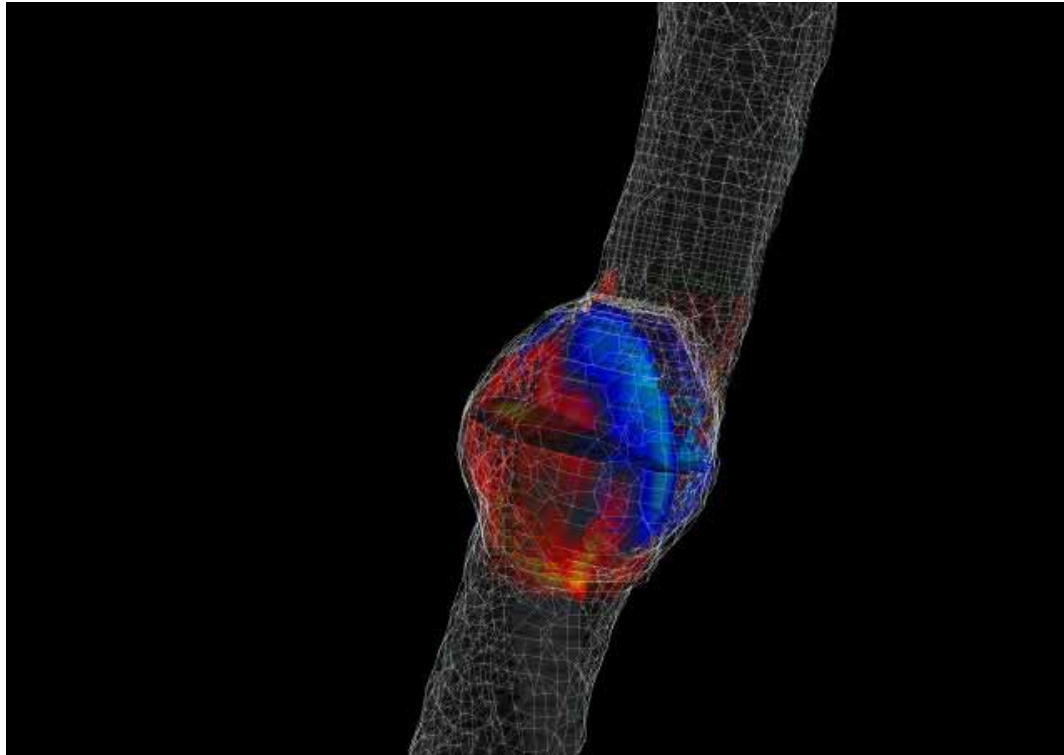
6) 超音波計測融合血流シミュレーション



血管内の血液の流れ



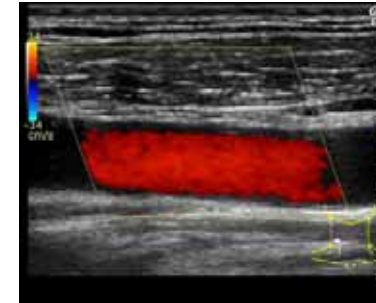
大動脈瘤内の血流の再現結果



頸動脈内血流の2次元解析（臨床応用）

頸動脈

- 動脈硬化の好発部位
- 超音波診断
- 内中膜厚さ (IMT)
 - 動脈硬化の診断
 - 予測パラメータ?

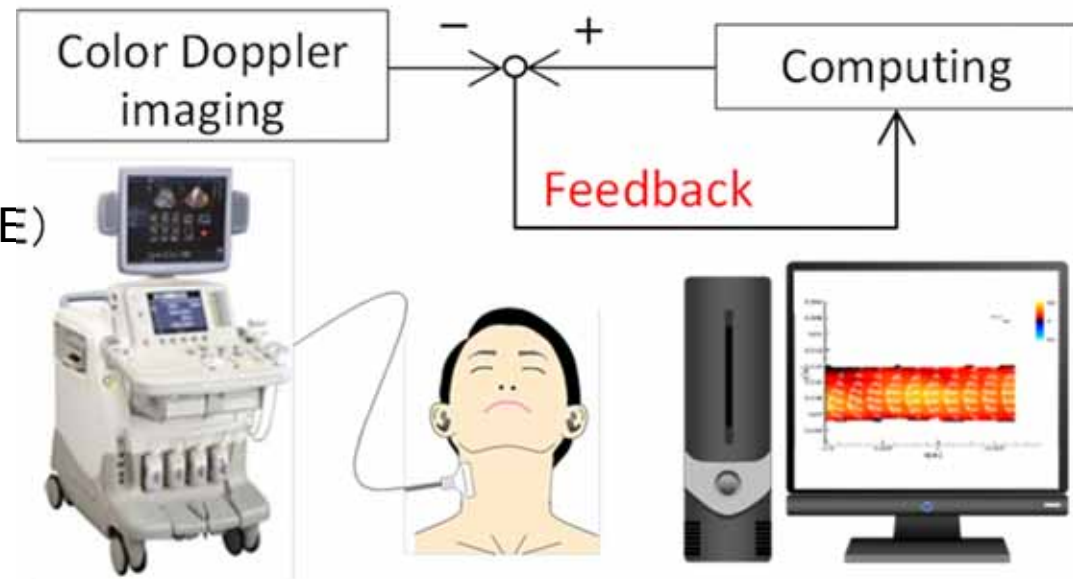


2次元超音波計測融合(2D-UMI) シミュレーションシステム

- 超音波診断装置 (LOGIQ7, GE)
- 2D血流解析 (Altix, SGI)

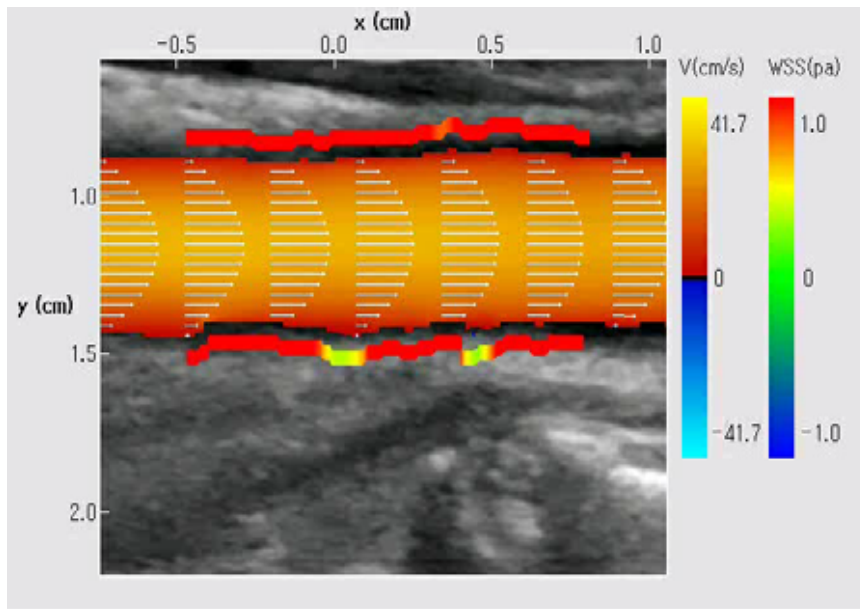
目的

- 動脈硬化の予測パラメータ

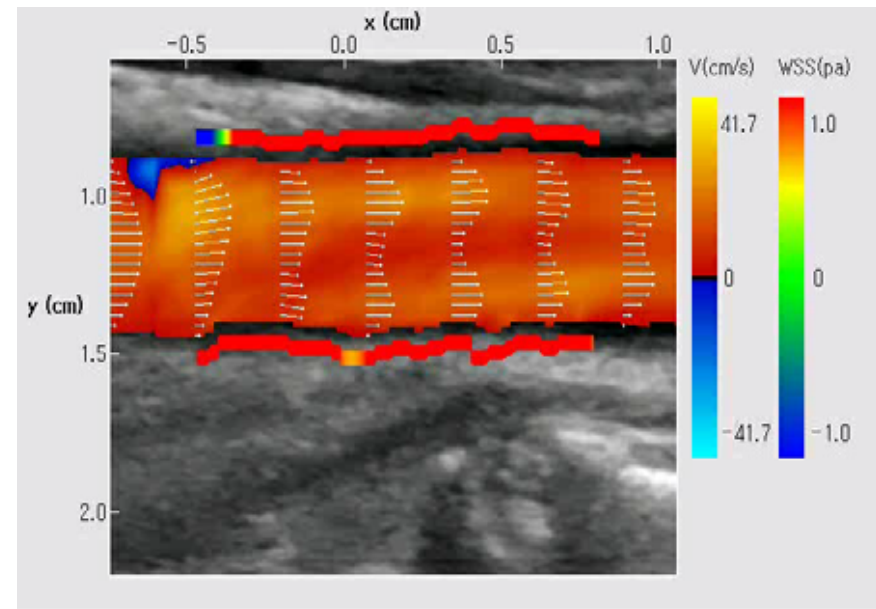


臨床用2D超音波計測融合 (UMI)
シミュレーションシステム

フィードバックの効果



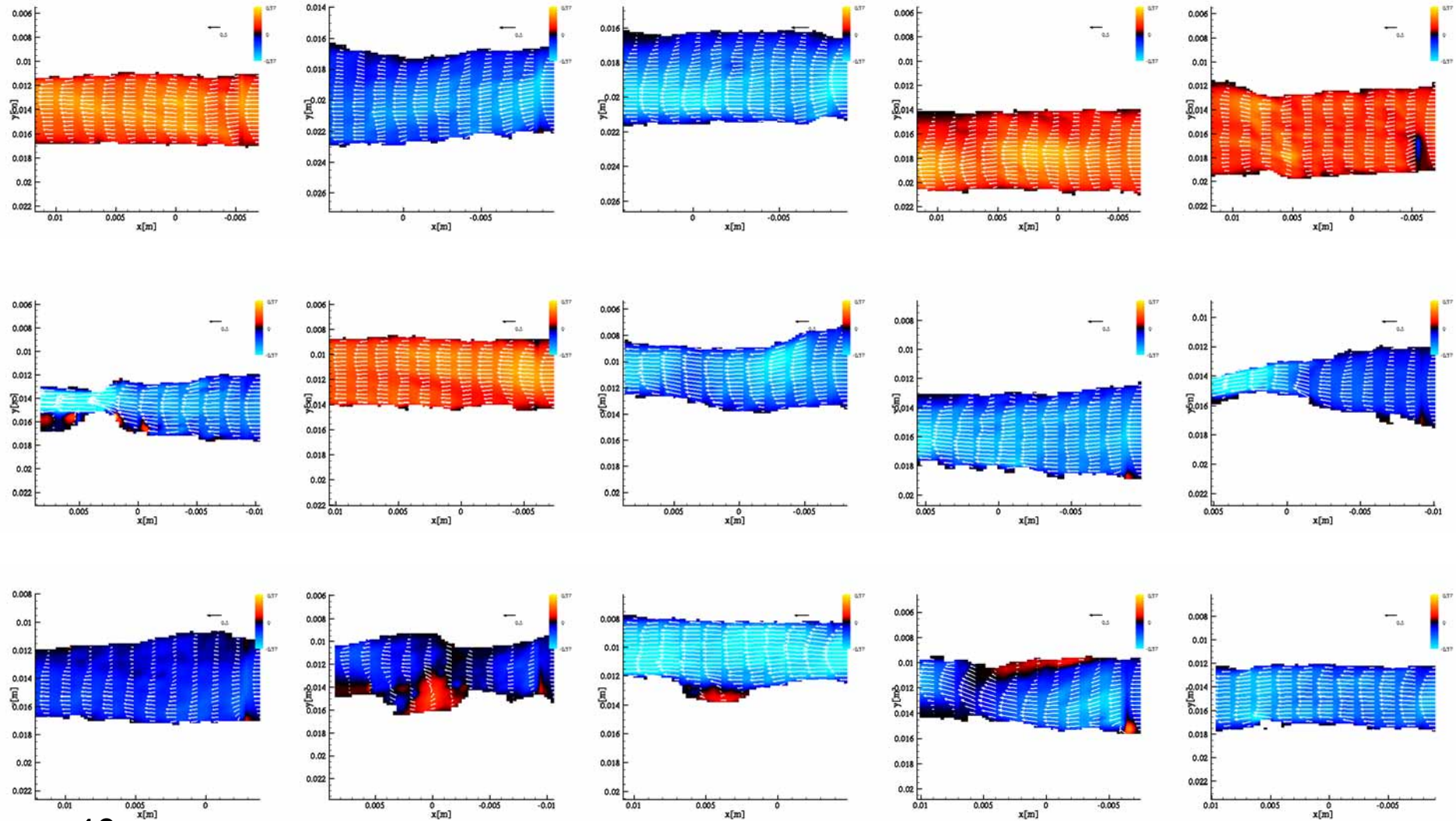
通常のシミュレーション
 $e = 6.7\%$



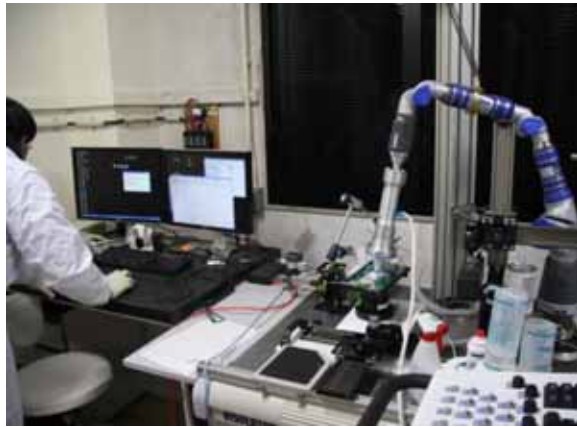
UMI シミュレーション ($K_v^* = 100$)
 $e = 2.5\%$

臨床データの解析

13名, 73 例



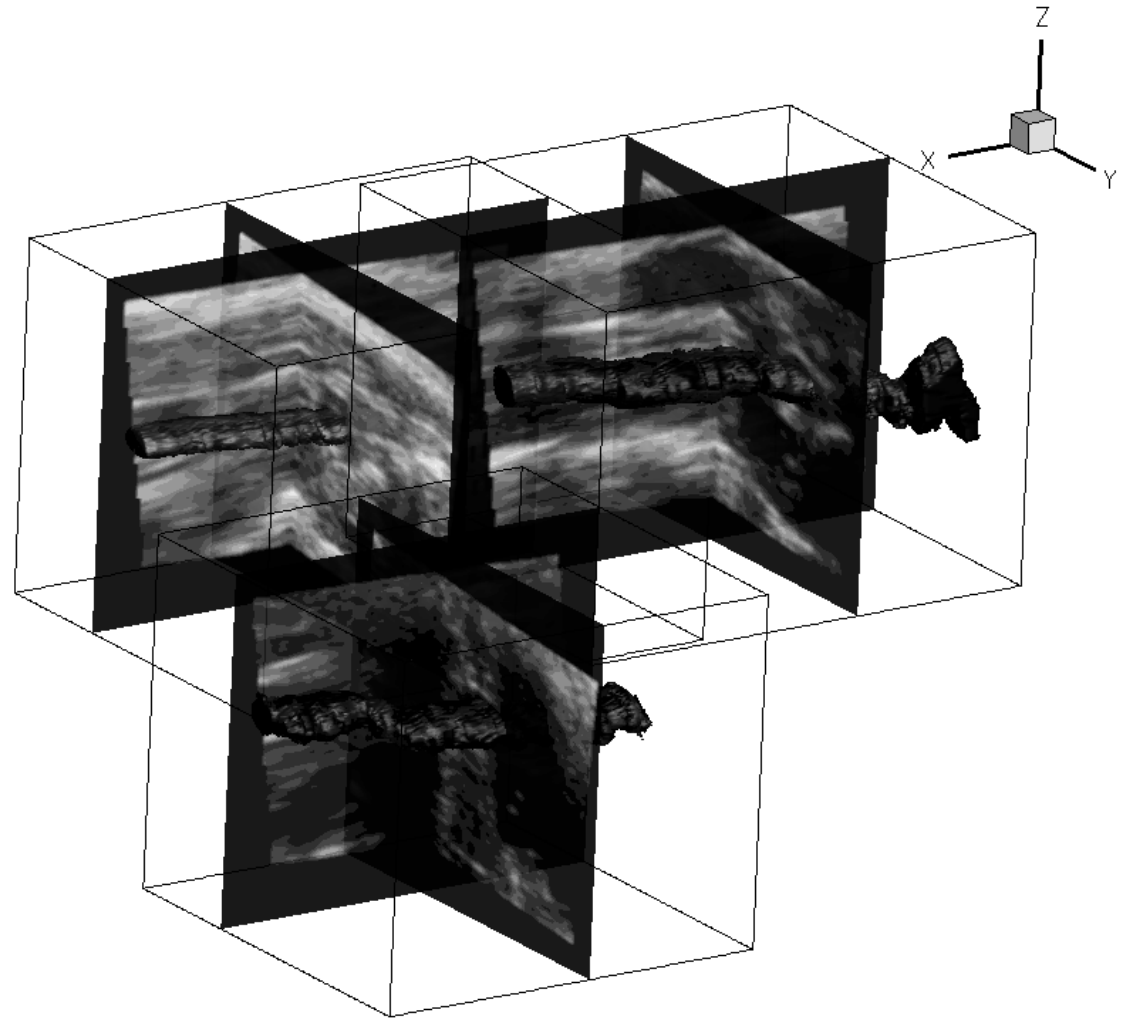
マウス頸動脈の3次元計測



実験の様子

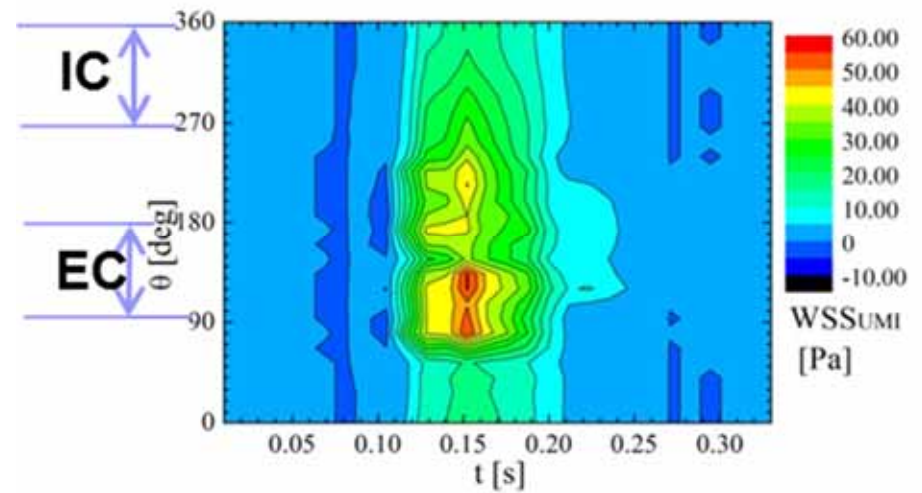
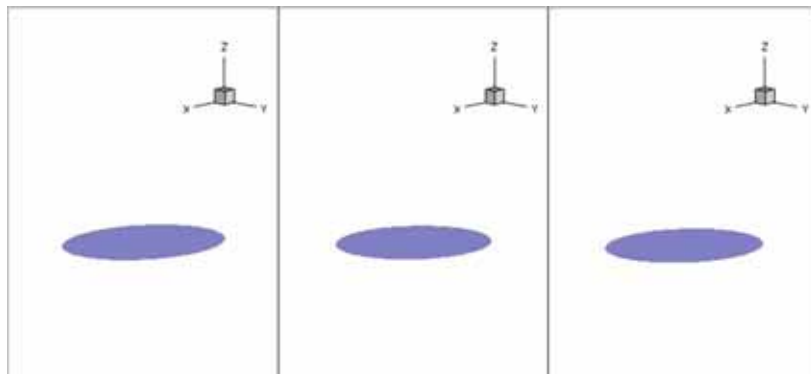
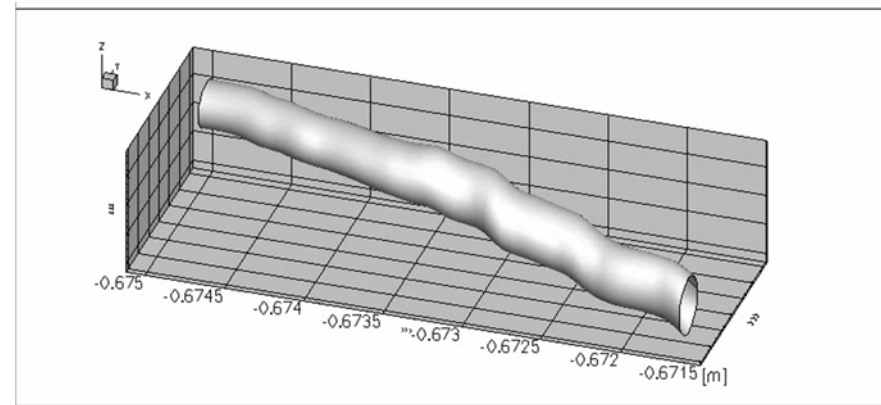
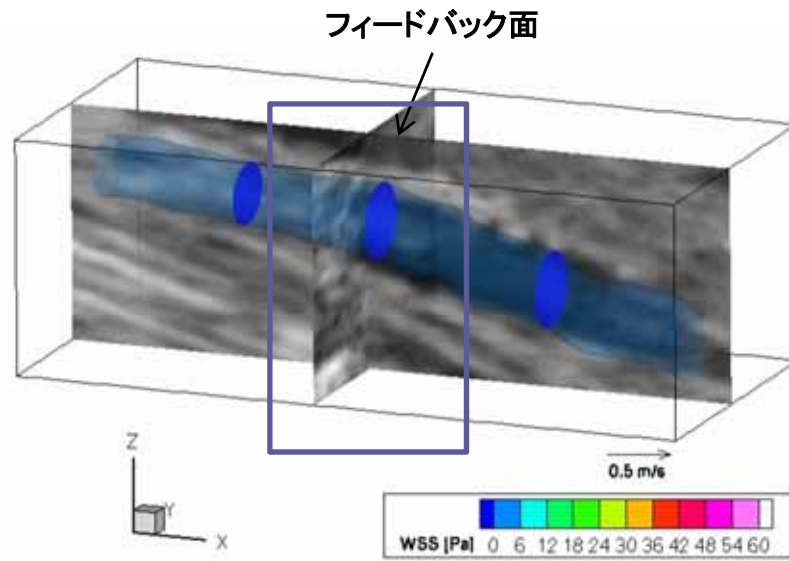


頸動脈カラードプラ計測結果



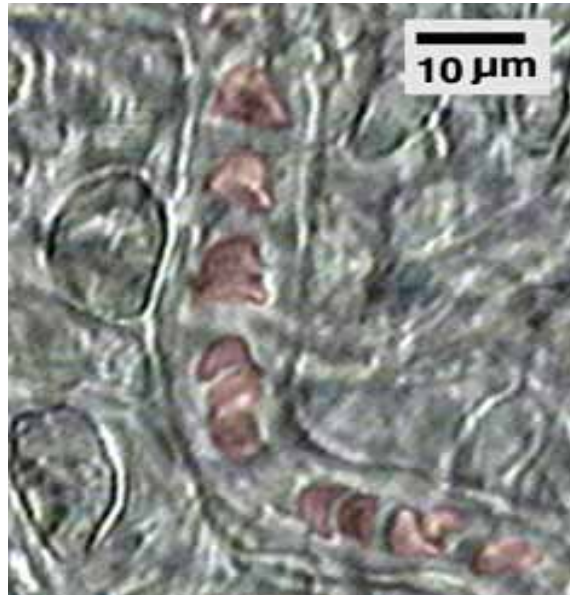
3回の計測により抽出された2本の頸動脈の
血管形状と、血管断面の計測画像

マウス頸動脈内の血流解析結果



7) 細胞の摩擦特性の計測

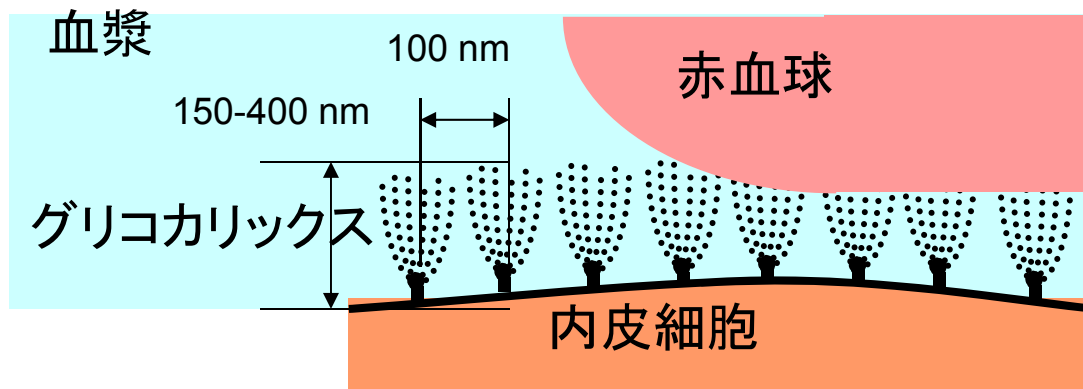
微小循環



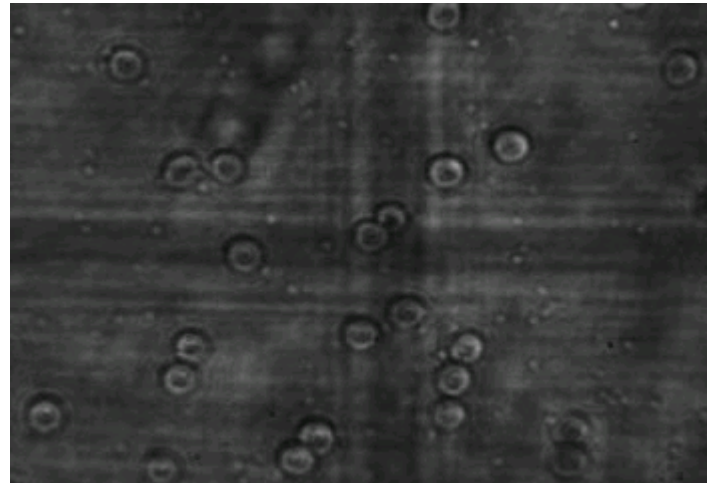
?



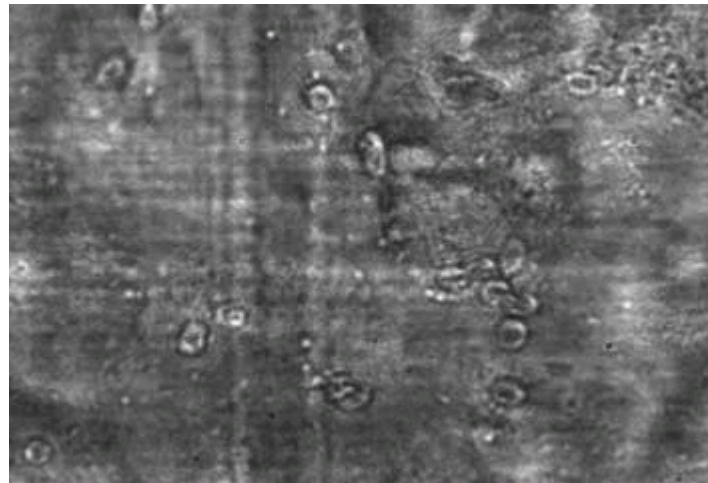
エアロトレイン



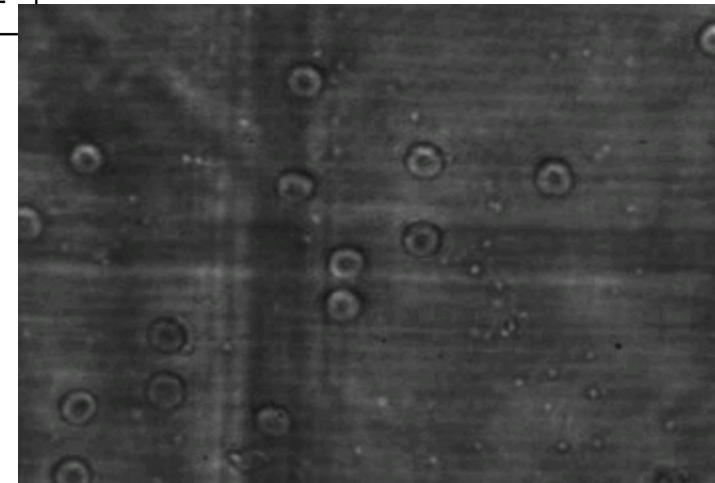
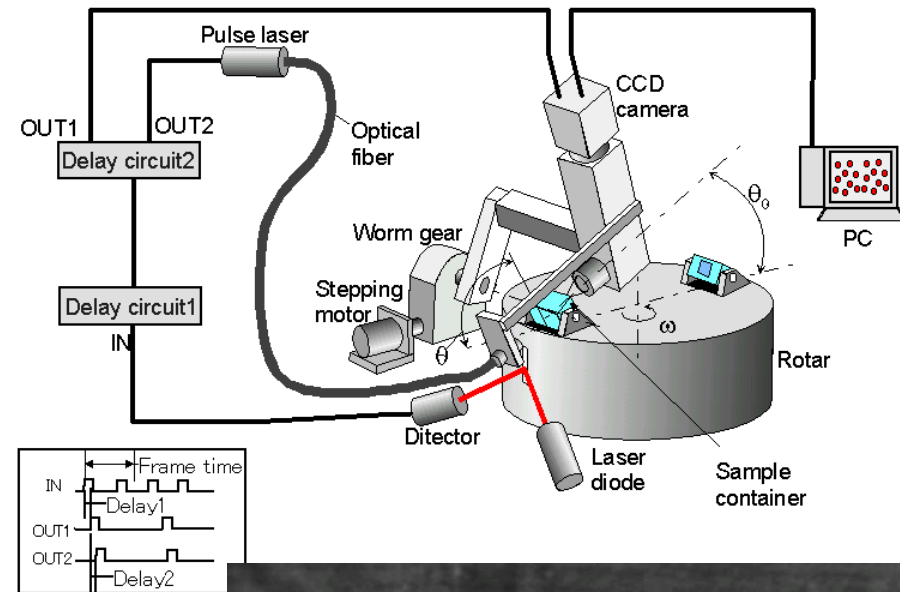
傾斜遠心顕微鏡による観察



ガラス板



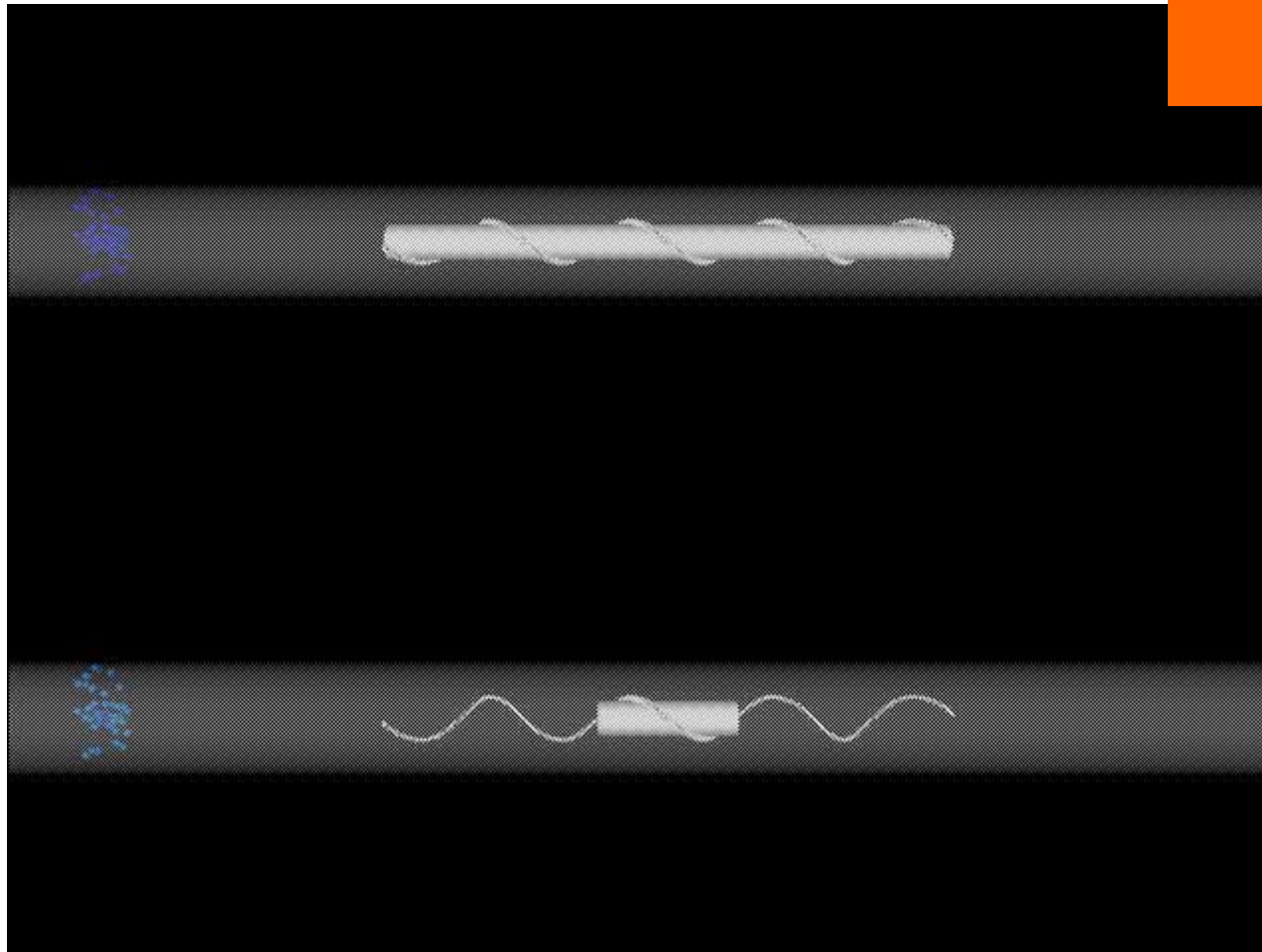
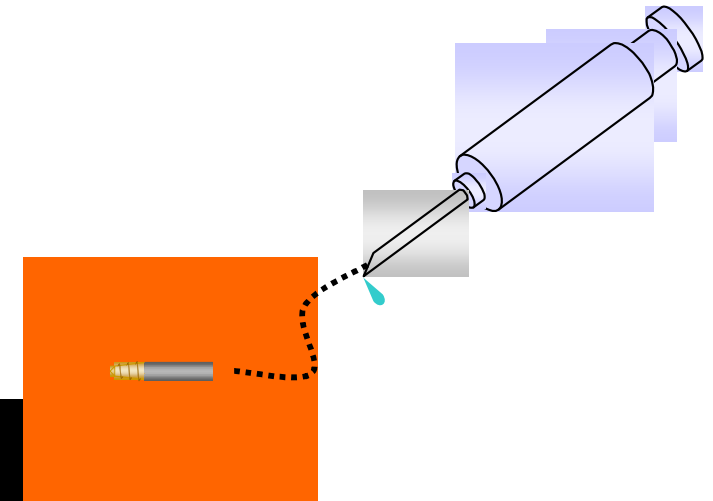
内皮細胞を培養したガラス板



ダイヤモンドライクカーボンをコーティングしたガラス板

8) 磁気マイクロマシン

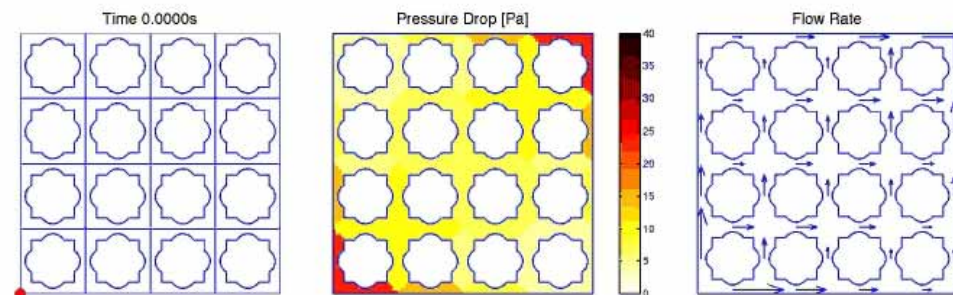
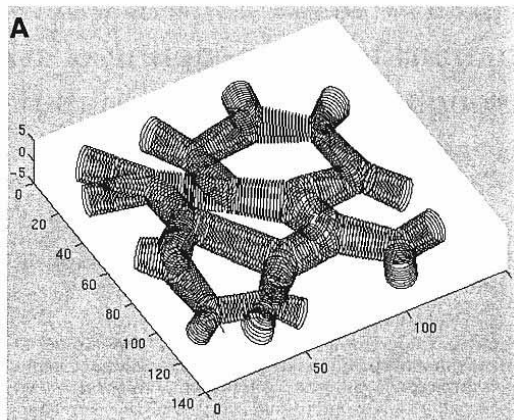
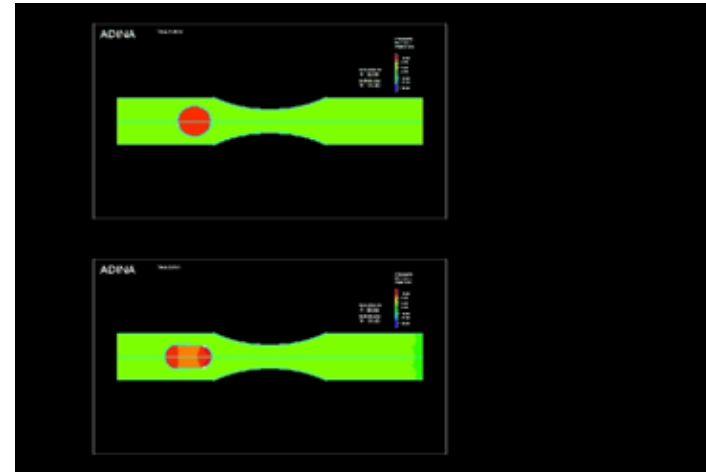
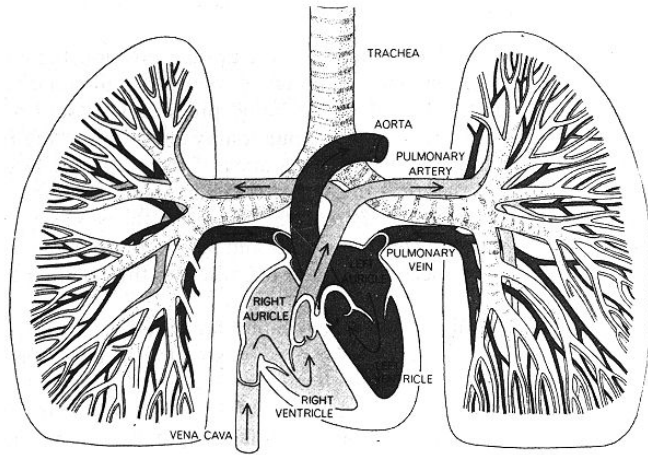
電気通信研究所と流体科学研究所の共同研究



注射器で血管に注入
胴体に磁石
外部磁界で回転
ブレードで推進
血栓除去
放射線のターゲット
抗がん剤注入

9) 肺の毛細血管内の白血球の流動

流体科学研究所とMITの共同研究



まとめ

1. はじめに
2. 血液の流れ(循環系)
3. 血液の流れの計測
4. 血液の流れに関する研究
5. まとめ