

血液の流れ

平成26年度 基礎ゼミ 第1回

2016年4月14日

東北大学
流体科学研究所

早瀬 敏幸



講演内容

1. はじめに
2. 血流のシミュレーション
3. 血流の計測
4. おわりに



1. はじめに



流れとは？

行く川の流れは絶えずして、
しかもとどの水に非ず。

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



様々な流れの例

流れの大きさ 流れの例

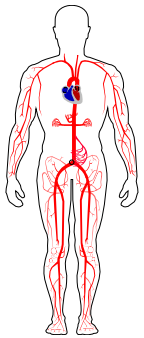
| 流れの大きさ | 流れの例 | |
|-----------|---------------|----------|
| 10,000 km | マグマの流れ | |
| 本州 | 海流 | |
| 1,000 km | ジェット気流 | |
| 100 km | 台風 | |
| 10 km | 河川 | |
| 泉が岳 | 1 km | 火山爆発 |
| 100 m | 新幹線周りの流れ | |
| 10 m | ジェット旅客機 | |
| ヒト | 1 m | 発電機のタービン |
| 1 m | 水泳 | |
| 10 cm | 半導体プロセスのプラズマ流 | |
| 1 cm |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



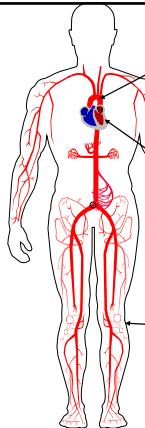
血液

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)



Transdisciplinary Fluid Integration Research Center, Institute of Fluid Science, Tohoku University



大動脈(タンク, 管路)
 直径3cm
 長さ30cm
 平均速度30cm/秒

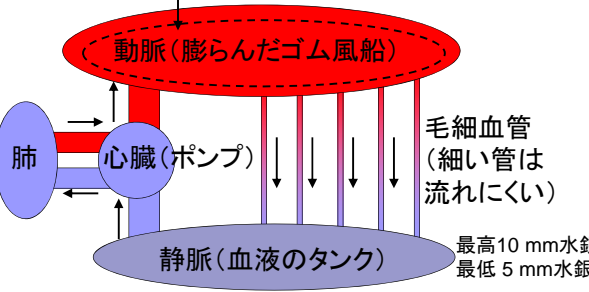
心臓(ポンプ)
 最大・最小容積160ml, 80ml
 脈拍65回/分
 拍出量5リットル/分

毛細血管(抵抗)
 直径5ミクロン
 長さ1mm
 平均速度1mm/秒

Institute of Fluid Science, Tohoku University

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



動脈(膨らんだゴム風船)

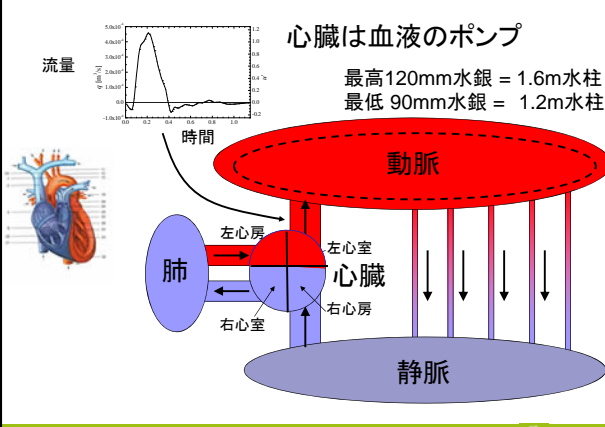
毛細血管
 (細い管は流れにくい)

静脈(血液のタンク) 最高10mm水銀
 最低5mm水銀

Institute of Fluid Science, Tohoku University

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

時間

動脈

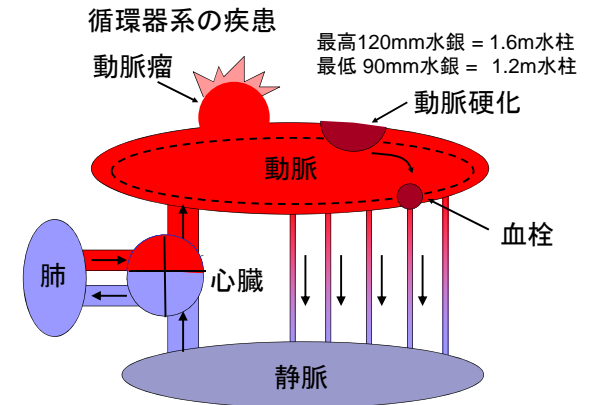
静脈

左心房 左心室 右心房 右心室

Institute of Fluid Science, Tohoku University

循環器系の疾患

最高120mm水銀 = 1.6m水柱
 最低 90mm水銀 = 1.2m水柱



動脈瘤

動脈硬化

血栓

動脈

静脈

心臓

肺


Institute of Fluid Science, Tohoku University

2. 血流のシミュレーション

Institute of Fluid Science, Tohoku University


コンピュータの発展

1946年 世界初のデジタル計算機ENIACが完成
Electronic Numerical Integrator and Computer
ペンシルベニア大学(米国)
18000本の真空管
毎秒5000回の加算、14回の10桁乗算
(当時、最新の機械式リレーコンピュータでは、毎秒50回の加算が可能)



2002年 世界最速の地球シミュレータが完成(56年後)
地球シミュレータセンター(日本)
3000億個のトランジスタ(CPUのみ) (1500万倍)
毎秒40兆回の乗算 (3兆倍)

2011年 京速コンピュータ「京」が世界最速に
理化学研究所(日本)
672筐体(CPU数68,544個)
毎秒8,162兆回の乗算 (583兆倍) ENIACで1800万年



Institute of Fluid Science, Tohoku University 13

シミュレーション手法の発展

1666年 微積分学(ニュートン)

1845年 ナビエ・ストークス方程式(流れの基礎方程式)

1900年頃 ルンゲ・クッタ法(常微分方程式の数値解法)


1960年頃 有限要素法(構造解析)

1965年 MAC法(差分法による流体解析)

1972年 SIMPLE法(有限体積法による流体解析)

Institute of Fluid Science, Tohoku University 14

人体のモデリング



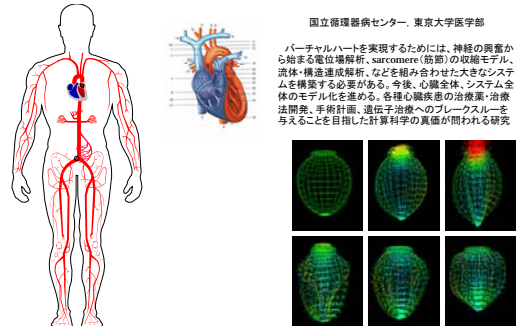
Institute of Fluid Science, Tohoku University 15

循環系シミュレーションモデル

バーチャルハート

国立循環器病センター、東京大学医学部

バーチャルハートを実現するためには、神経の興奮から始まる電位場解析、sarcomere(筋節)の収縮モデル、流体・構造連成解析、などを組み合わせた大きなシステムを構築する必要がある。今後、心臓全体、システム全体のモデル化を進める。各種心臓疾患の治療薬・治療法開発、手術計画、遠隔治療へのブレークスルーを与えることを目指した計算科学の真価が問われる研究



Institute of Fluid Science, Tohoku University 16

脳動脈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

Tamer HASAN*, Tsutomu SAITO*, Eugene TIMOFEEV*, Akira TAKAHASHI*, Kazuyoshi FUKAYAMA*, Takashi YOSHIMOTO**
The Fifth JSMI-ASME Fluid Engineering Conference
Nov. 17-21, 2002, Nagoya, Japan

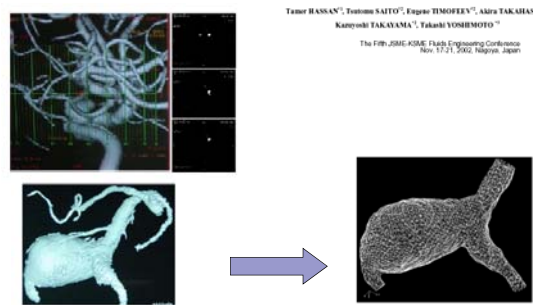


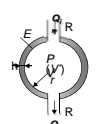
Fig. 6 The image of a giant spherulitic aneurysm created with CFD.

Fig. 7 Volume mesh modeling giant spherulitic aneurysm, created from the CFD image in Fig. 6.

Institute of Fluid Science, Tohoku University 17

循環器系のシミュレーション

ルンゲクッタ法によるシミュレーション




$$\frac{dP}{dt} = \frac{hE}{2\pi r^2} (Q_{in} - Q_{out} - \frac{dV}{dt})$$

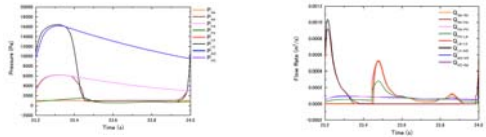
$$Q = C \left(\frac{P_1 - P_2}{R} \right)$$

$$V = V_0 + \frac{2\pi r^4}{hE} P$$

弾性球殻モデル 常微分方程式

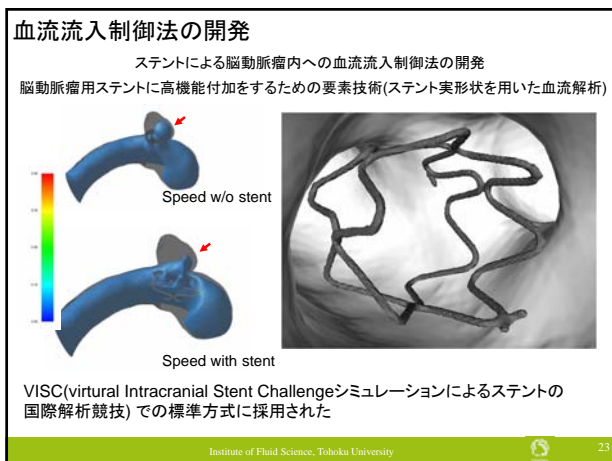
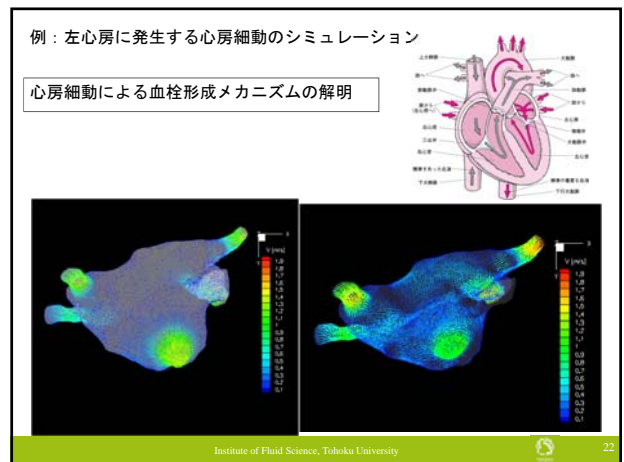
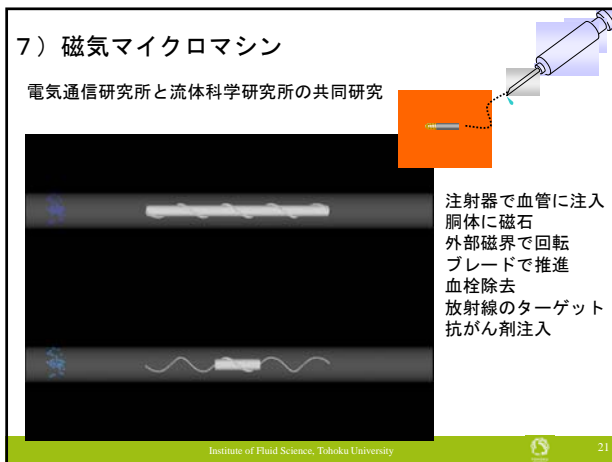
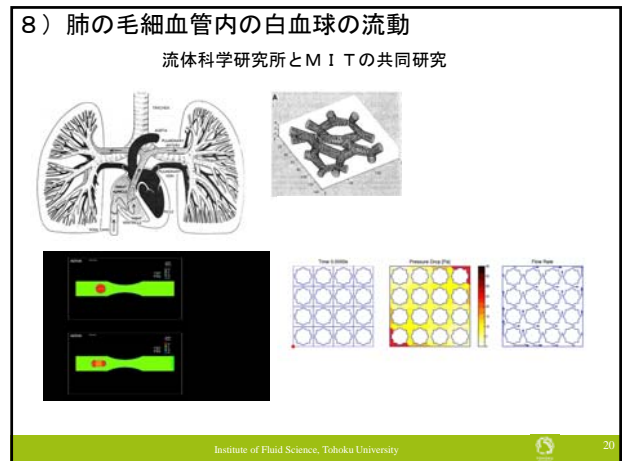
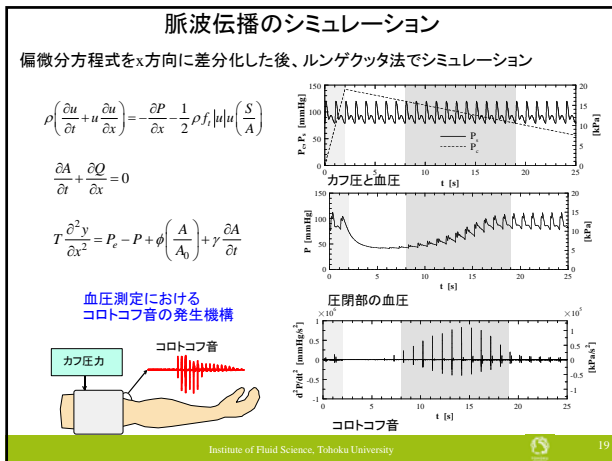


循環系全体のモデル



血圧の変化 血流量の変化

Institute of Fluid Science, Tohoku University 18



3. 血流の計測

Institute of Fluid Science, Tohoku University 24

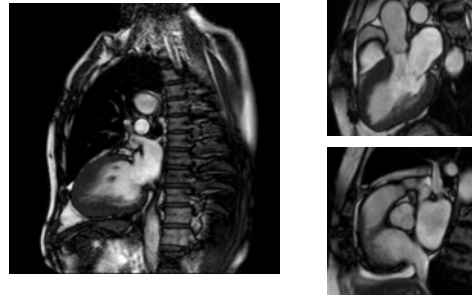
医用画像診断装置

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

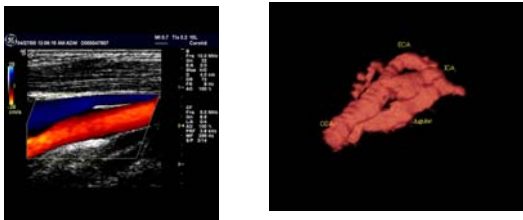
| | 与えるエネルギー | 構造物との作用 | 長所 | 短所 |
|---------|----------|----------|---------------|-----------|
| X線診断装置 | X線 | X線減衰 | 空間・時間分解能が高い | X線被曝 |
| CT | X線 | X線減衰 | 機動性に優れる | X線被曝 |
| MRI | 高周波磁場 | スピニング緩和 | コントラストが高い | 空間分解能が低い |
| 超音波診断装置 | パルス超音波 | 反射、ドプラ効果 | 局所、リアルタイム、非侵襲 | コントラストが低い |
| 核医学診断装置 | 放射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



MRI



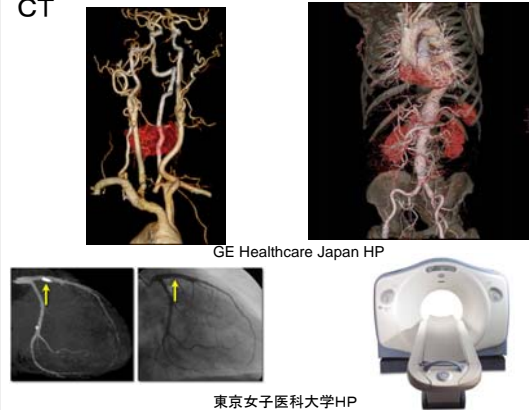
超音波計測



GE Healthcare Japan HP



CT



GE Healthcare Japan HP

東京女子医科大学HP



4. おわりに



血流

シミュレーション + 計測

⇒ 計測融合シミュレーション(次回)

