

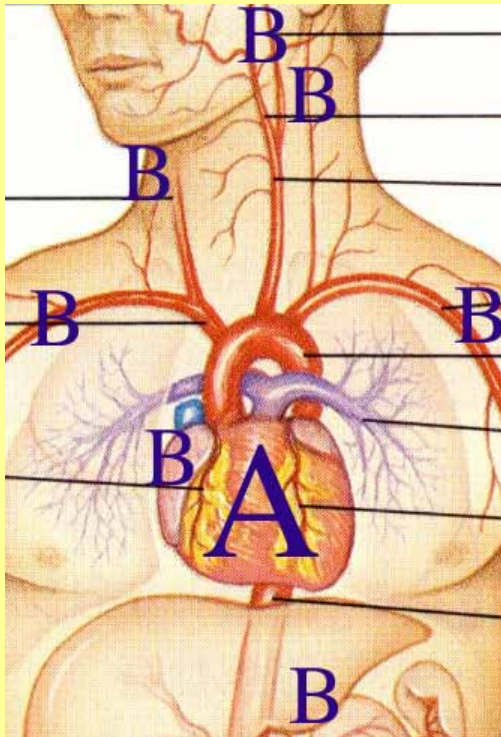
心臓左心室内の 三次元血流解析

Numerical Analysis of Blood Flow in A Left Ventricle

岩瀬 英仁(理研) 劉 浩(理研)
藤本 眞一(奈良県立医大)
姫野 龍太郎(理研)
早坂 智明(理研)

研究の背景

- 3次元生体循環器シミュレータを構築する。
心臓と血管、分岐部などを含めたもの



薬物による人体の影響
手術の方法
循環器系の変化

今回の目標は**心臓**

研究目的

- 心臓のシミュレーション

意義

1. 生理学

心臓一心拍間で何が行われているのかわかっていないことが多い。心臓のポンプとしての機能を理解する。

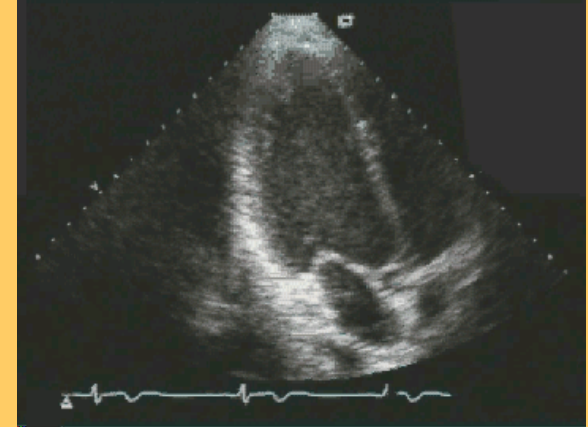
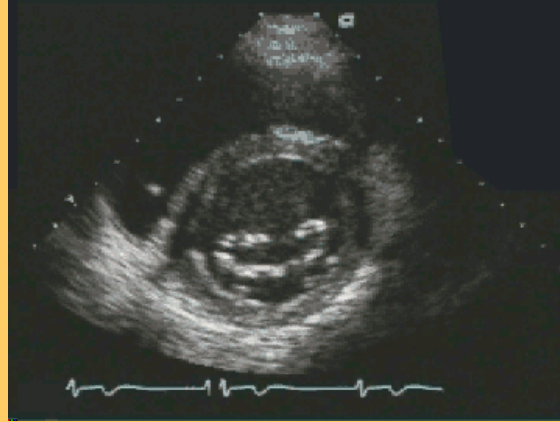
2. 病理学

先天性疾患、後天性疾患などの病態の心臓を診断するためのツールとなる。

4次元の血流動態を計測することは困難
数値計算による左心室内部の血流の解明

左心室壁の運動解析

短軸、長軸方向
の収縮・拡張
運動



ねじり運動



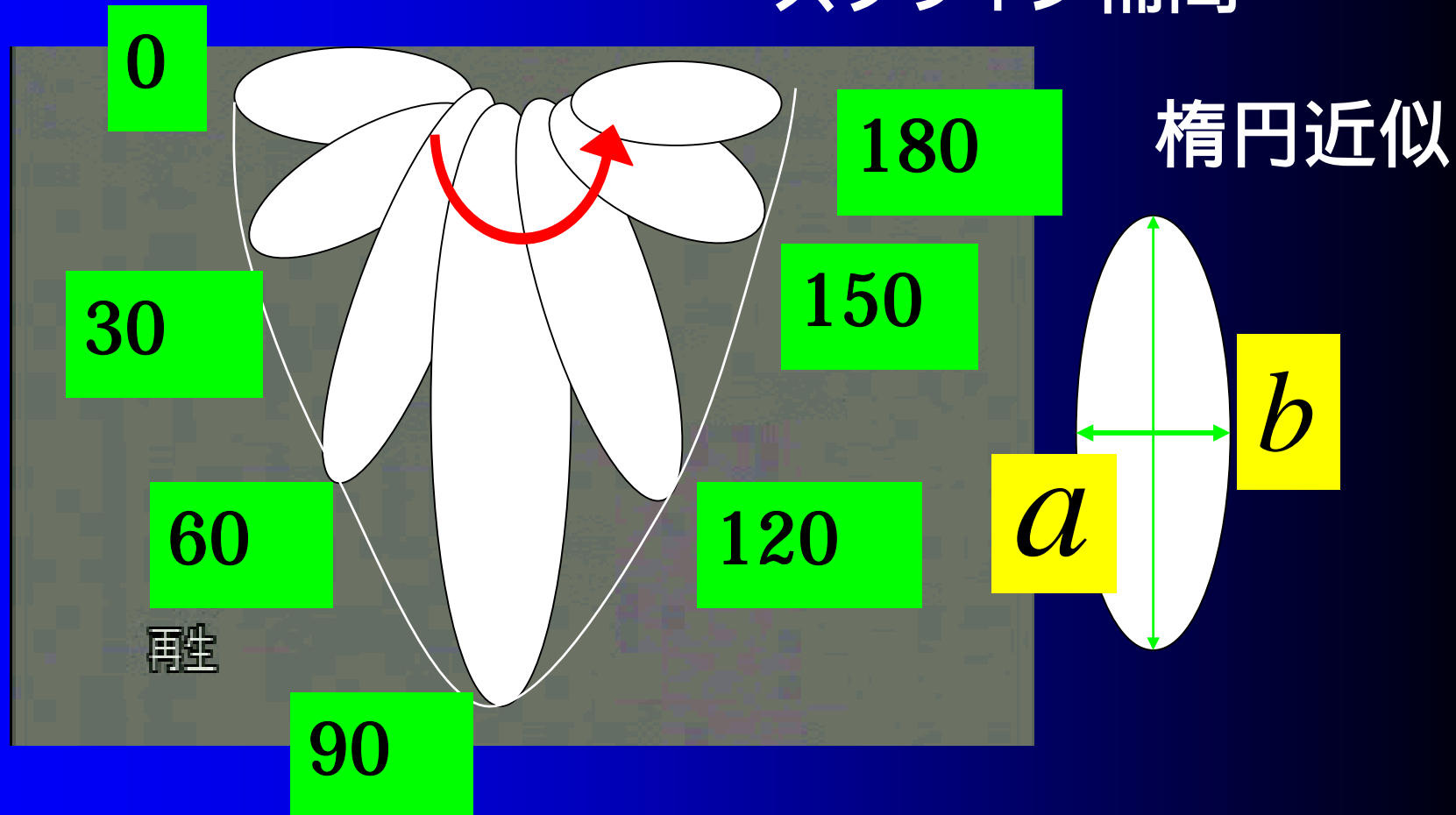
左心室の壁運動モデル

拡張・収縮運動およびねじり
運動はフーリエ級数で近似

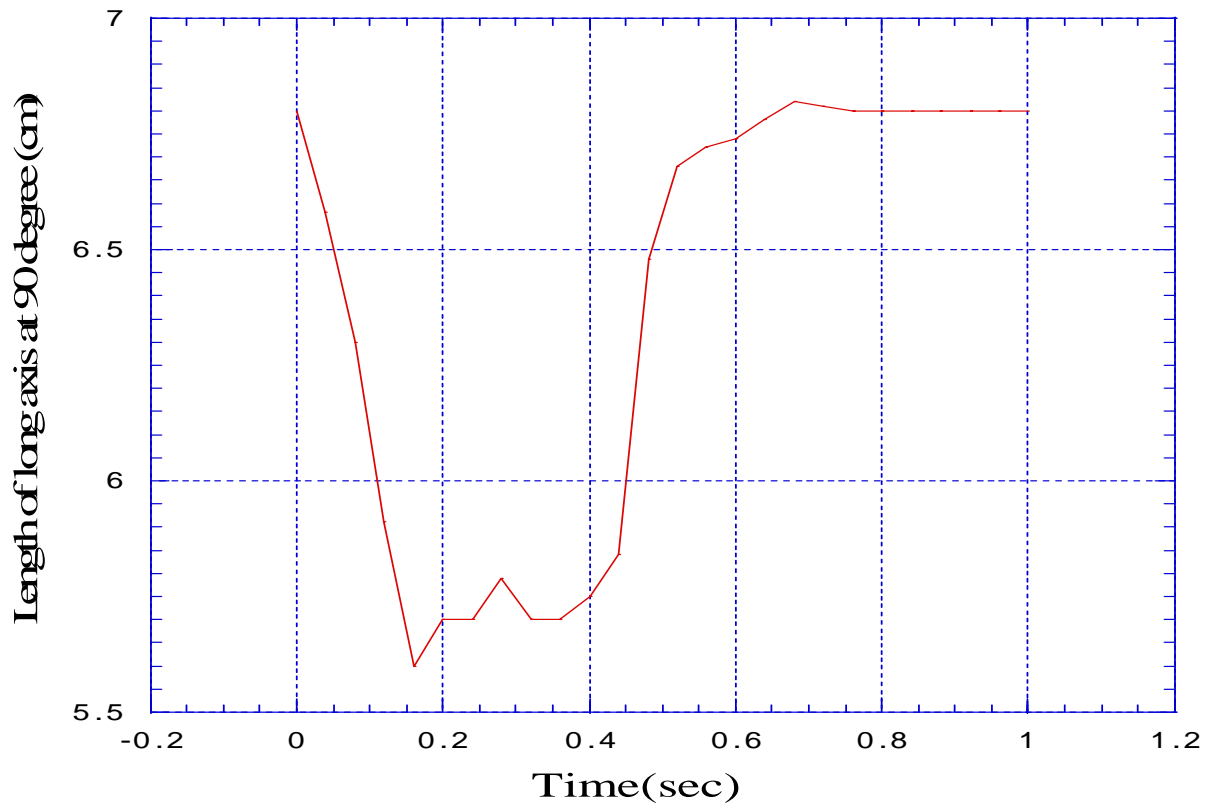
$$\phi(t) = \sum_{n=0}^M [\phi_{cn} \cos(nKt) + \phi_{sn} \sin(nKt)]$$

超音波エコー図に基づく左心室の形状モデルの構築

スプライン補間



90度における長軸径の時間変化



心周期中の力学現象

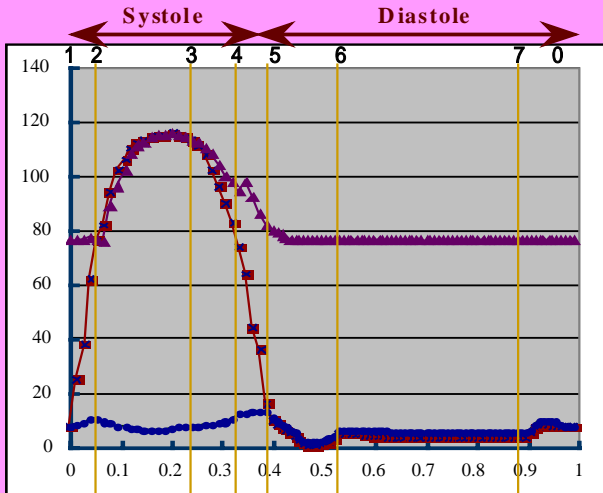
Dynamics in Cardiac Cycle

圧力

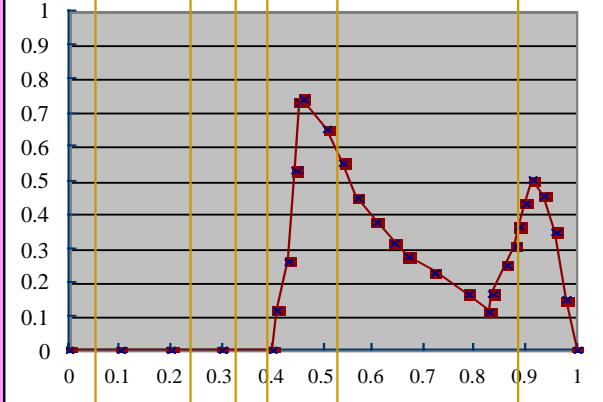
入口速度

出口速度

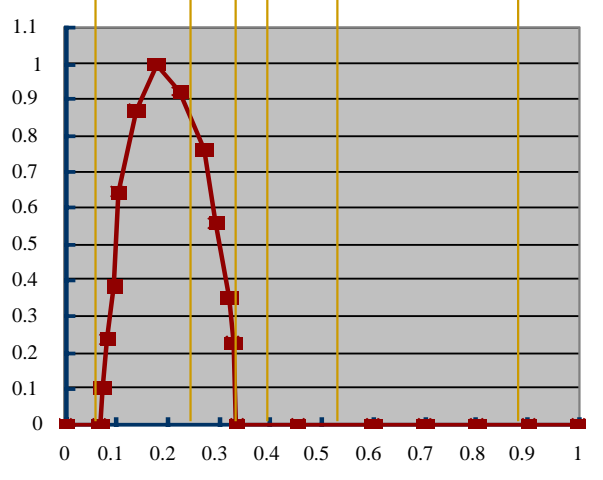
Time course of pressures in LA, LV and AA mmHg



Max. velocity at mitral valve (m/s)



Max. velocity at aortic valve (m/s)



0-1: 洞房結節興奮

1: 房室弁閉鎖: MC

1-2: 等容収縮: IVC

2: 大動脈弁開放: AO

2-3: 心室血液拍出

3-4: 血液慣性拍出

4: 大動脈弁閉鎖: AC

4-5: 等容弛緩: IVR

5: 房室弁開放: MO

5-6: 心房血液急速流入

6-7: 心房血液流入減少

7: 心房収縮・2次流入



流体の基礎方程式

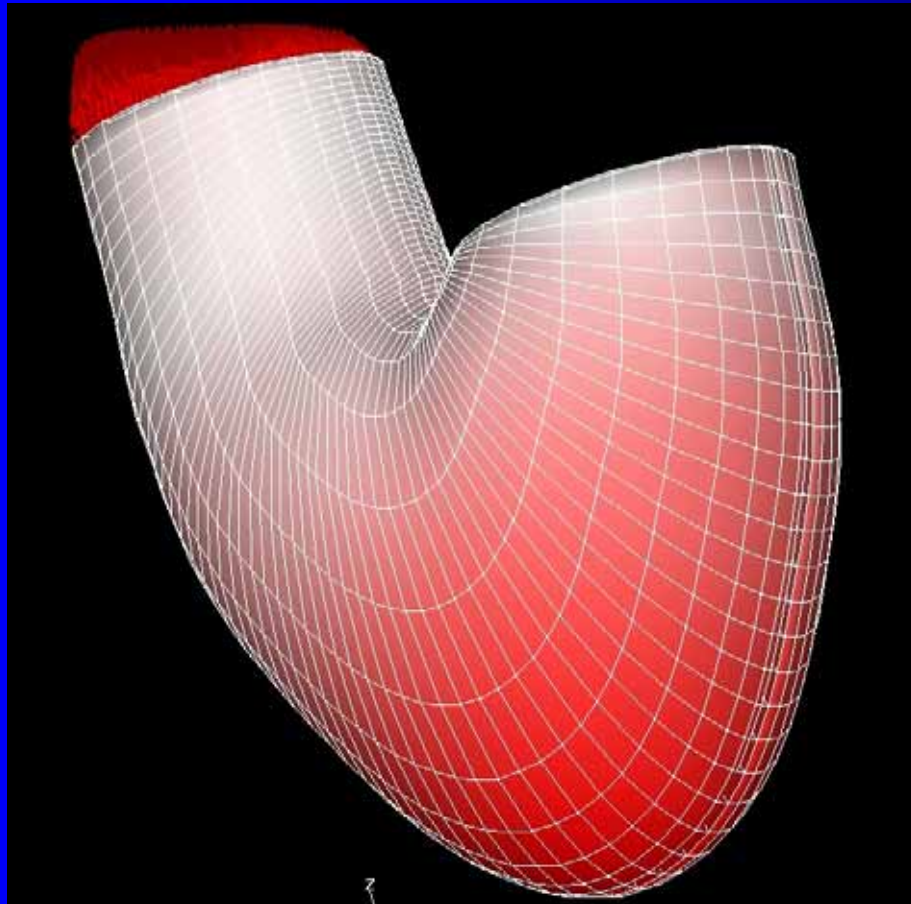
非定常、非圧縮流体、ニュートン流体

Navier-Stokes方程式 (保存形式)

有限体積法 (疑似圧縮法)

$$\int_{V(t)} \left(\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{u}_0}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial \tau} \right) dV + \int_{V(t)} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial z} + \frac{\partial \mathbf{F}_v}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}_v}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{H}_v}{\partial z} \right) dV = 0$$

左心室拡張期の形状モデルとメッシュ分割



構造格子

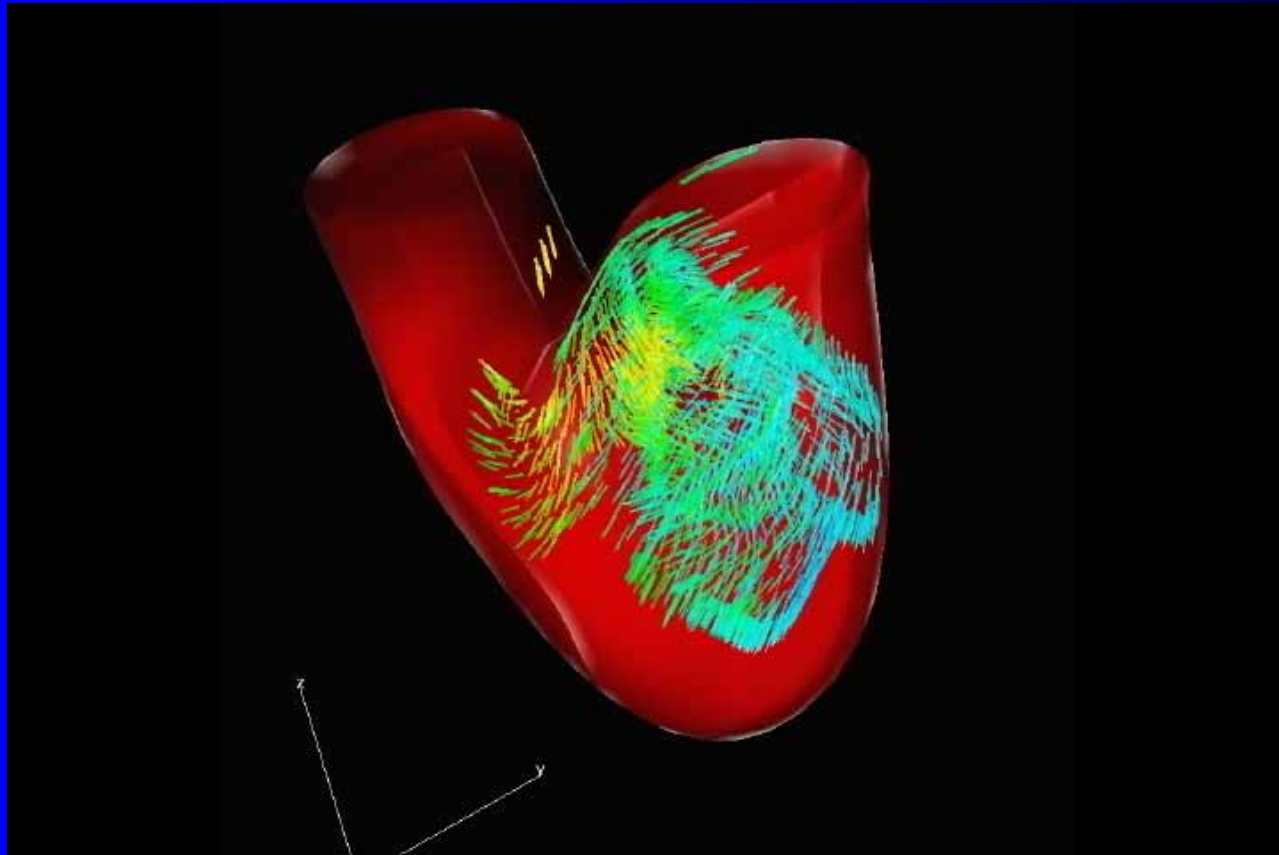
メッシュ分割

$61 \times 31 \times 25$

レイノルズ数

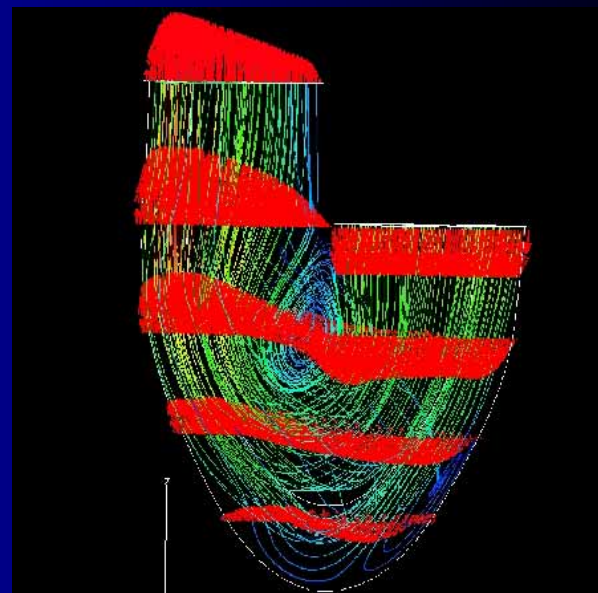
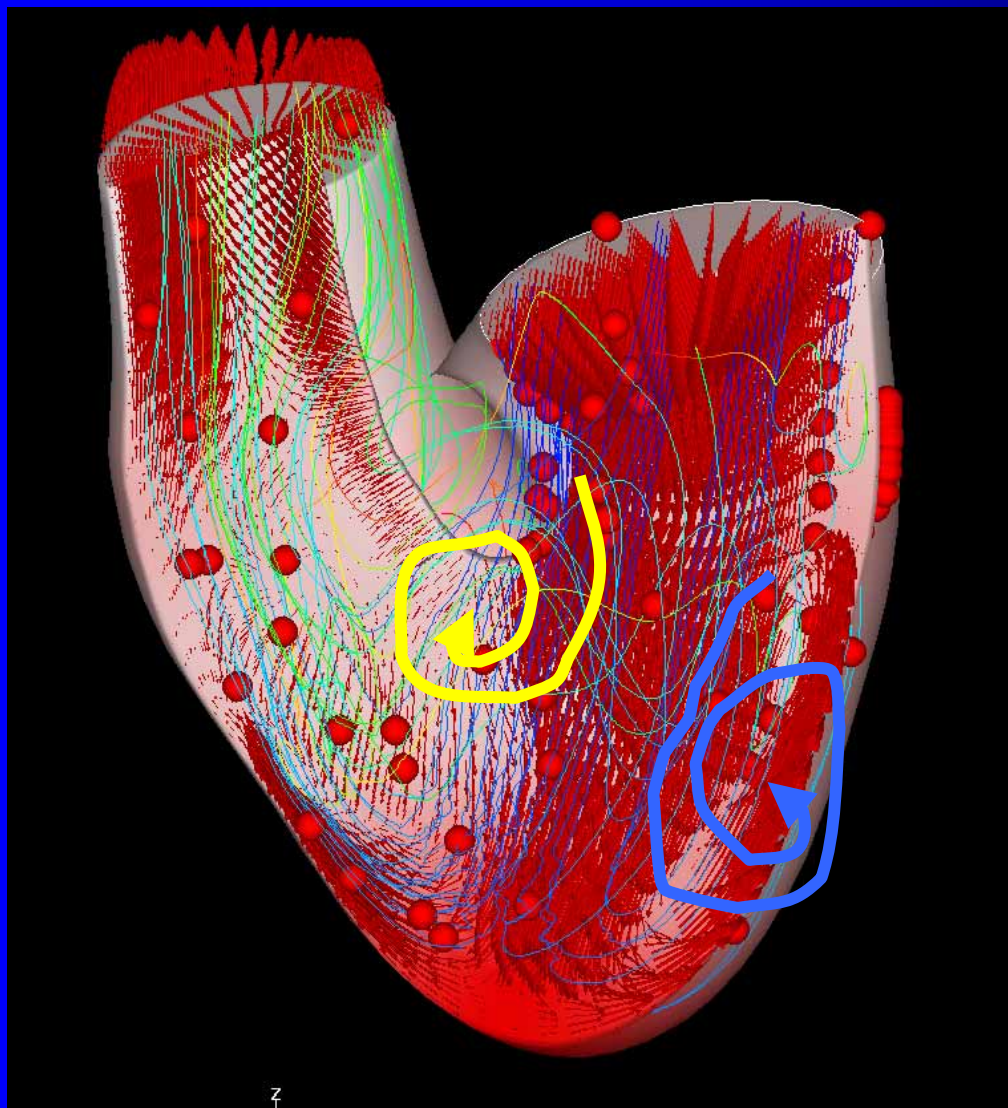
$1000 \sim 4500$

数値解析による左心室内の 血流動態

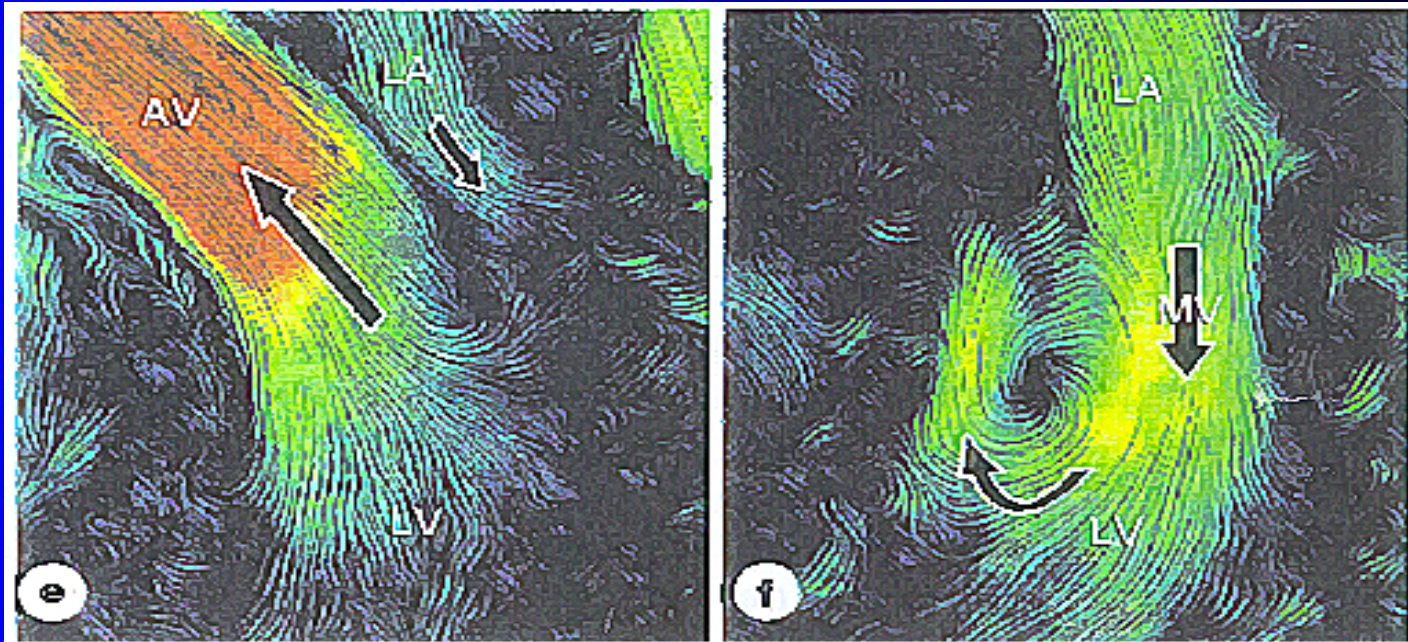


拡張期における血流動態

渦が
発生する



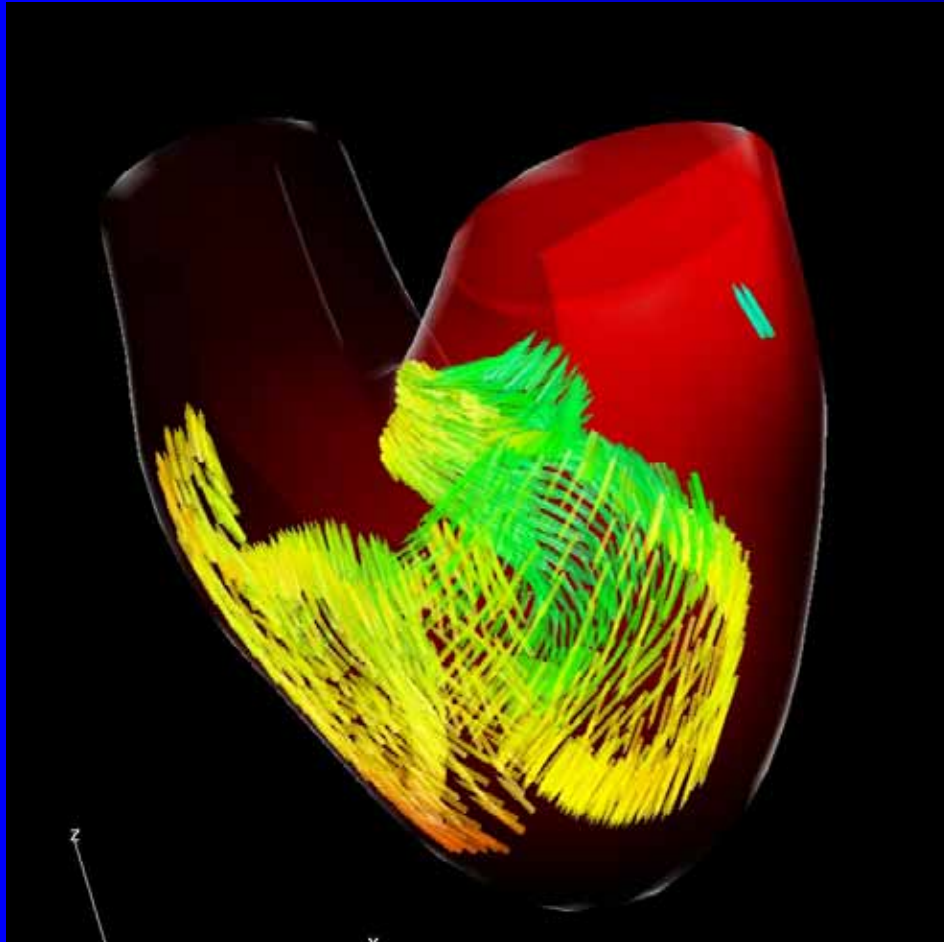
KilnerらのMagnetic resonanceを用いた速度計測



収縮期

拡張期

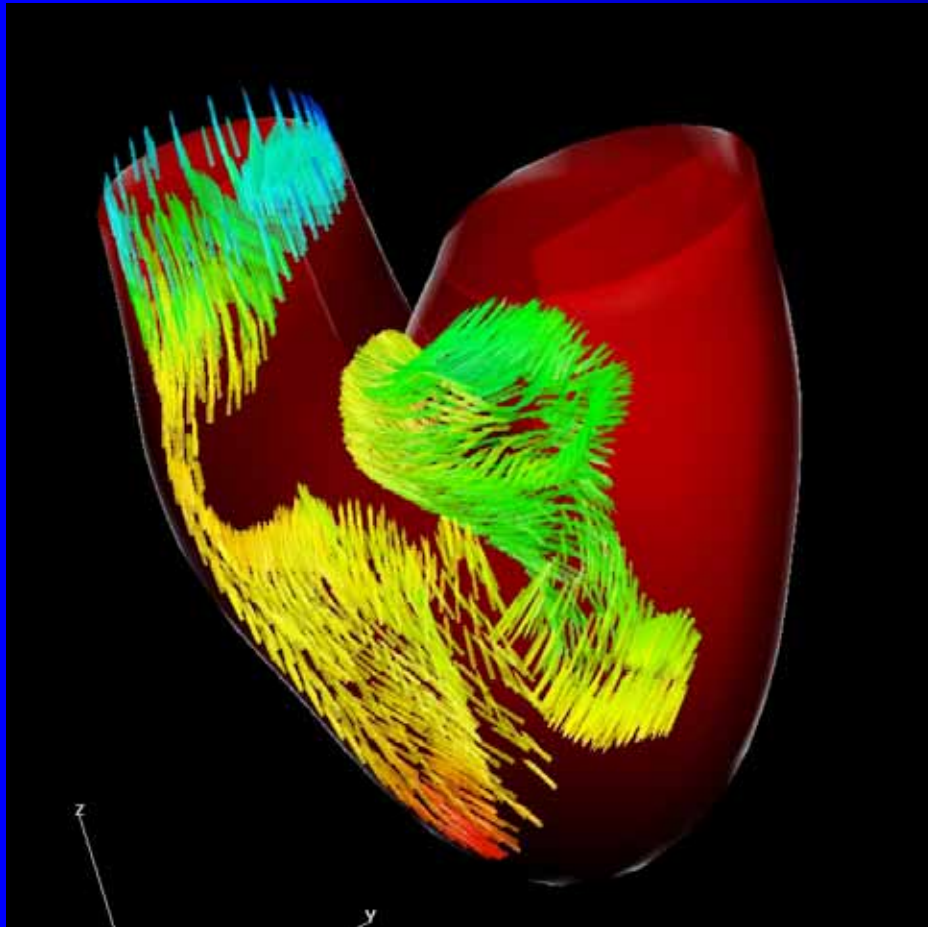
収縮期における血流動態(1)



左心室内と大動脈の圧力差で一気に流れる。



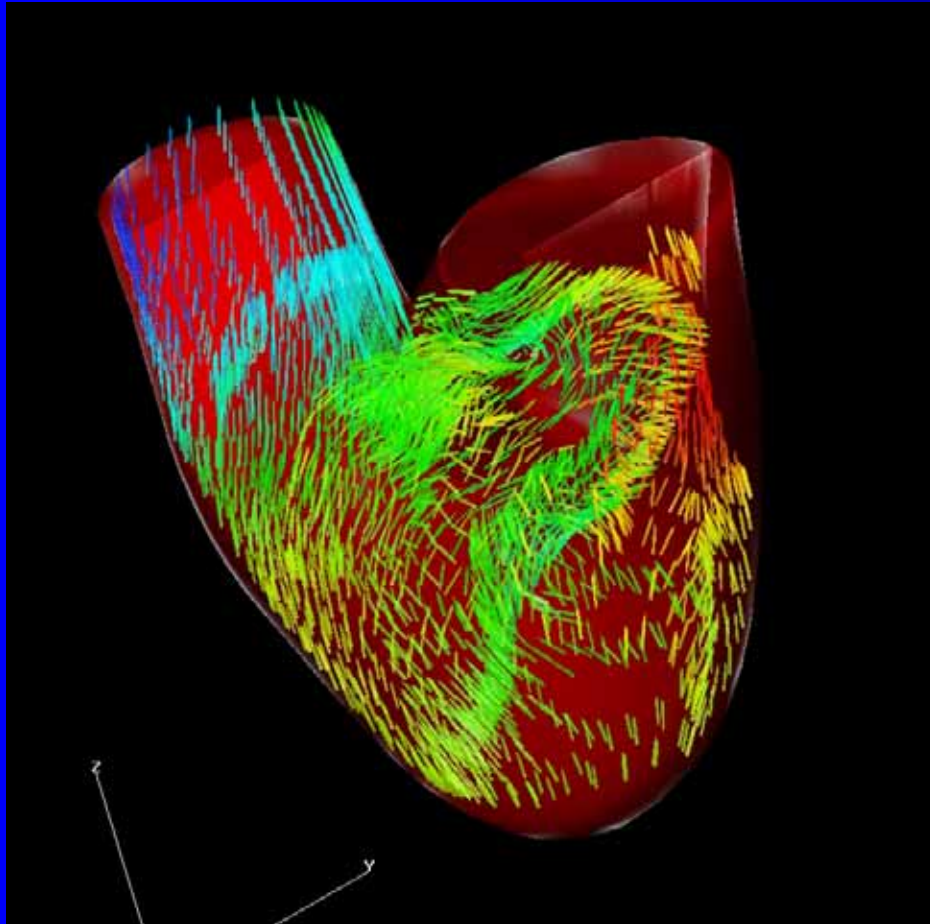
収縮期における血流動態(2)



出口部が主流速度

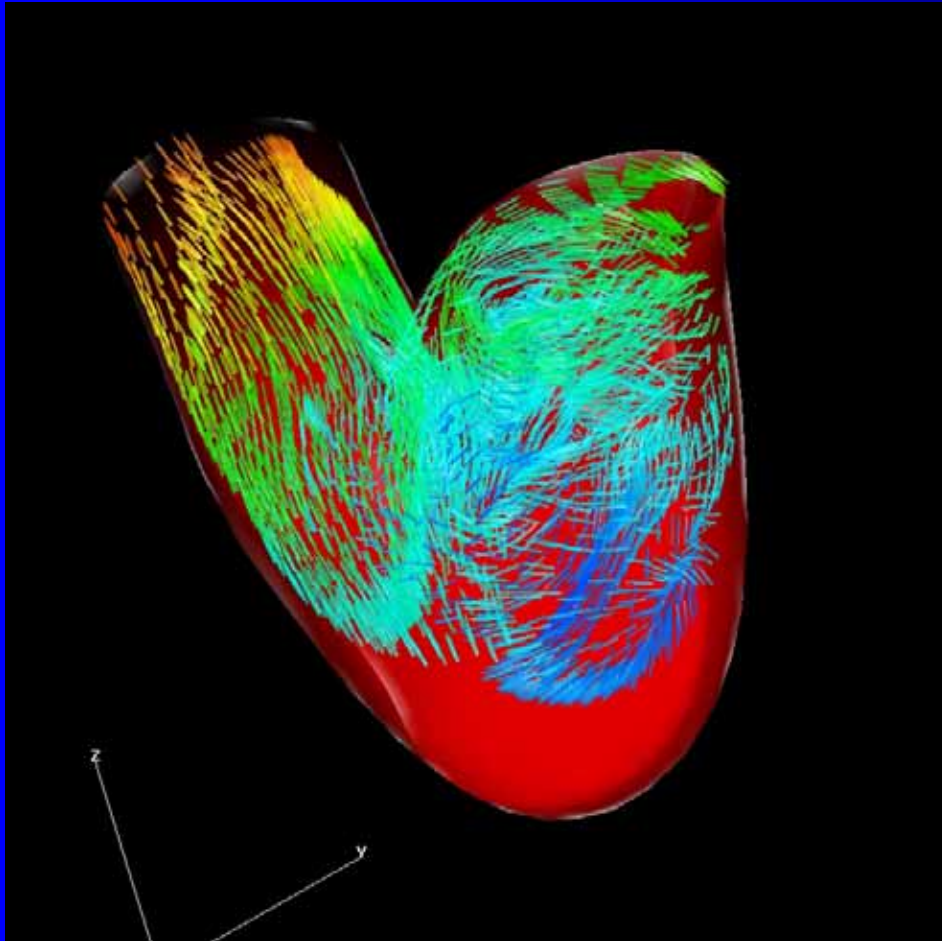
中央部近傍流体が
二次速度

収縮期における血流動態(3)



非対称な旋回流

収縮期における血流動態(4)



駆出率はおよそ
50%

結 言

- 超音波断層心エコー図から左心室の一心拍間の形状モデルを構築した。
- 拡張期における渦の形成と発達を解明した。
- 収縮期における大動脈弁出口では、非対称な旋回流となる。

今後の研究

モデルの精緻化

左心室の形状、壁運動、弁の開閉運動

心機能の評価

圧力、容積の関係

臨床への応用