

# MR based CFD による脳動脈瘤WSS分布 推定における血管形状抽出法および 血液の非ニュートン性の影響

東京工業大学 青木 康平, 大西 有希, 天谷 賢治,

(株)アールテック 清水 利恭,

名古屋大学 磯田 治夫,

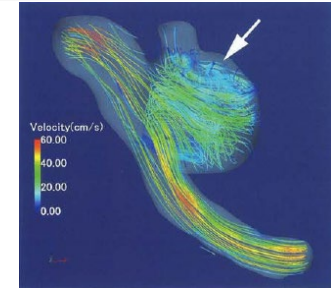
浜松医科大学 竹原 康雄,

(株)アールテック 小杉 隆司.



# はじめに

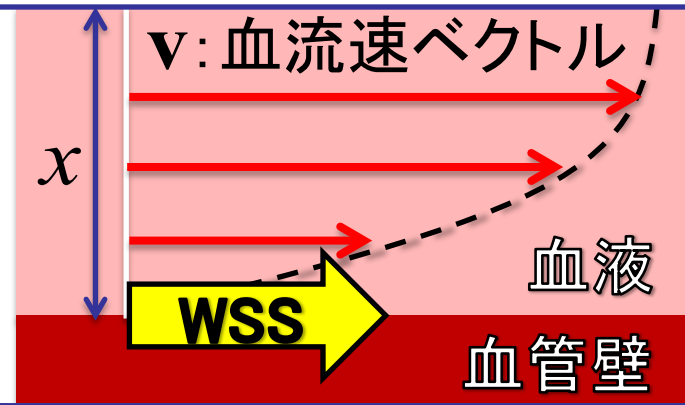
脳動脈瘤の破裂危険性などを定量的に評価する診断手法として「患者固有CFD血流解析」の実現が期待されている。



## 【血管壁剪断応力 (WSS)】

$$WSS = \mu \cdot \frac{dv}{dx} \quad (\text{at wall})$$

- 血流が血管壁に与える摩擦力
- 脳動脈瘤の破裂に関与



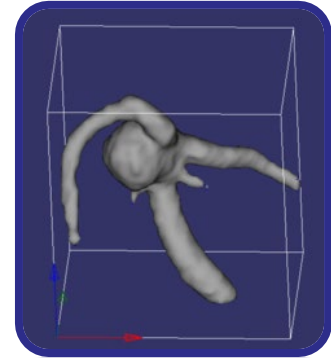
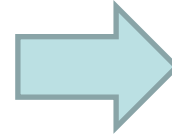
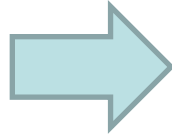
## ★CFD血流解析の三大要件★

1. 血管形状の抽出
2. 血液粘性モデルの設定
3. 流入出境界条件の決定

本発表はこの2つに焦点を合わせる。

# 血管形状の抽出

## 【血管形状の抽出方法】



1. 血管を撮影

2. 血管領域の抽出

3. ポリゴンデータに変換

※血管壁は剛体と仮定して計算

## 撮影方法

### ● PC-MRA (4D-Flow)

《利点》 血流速を同時に測定できる

《欠点》 測定誤差が大きい

### ● 造影 (CE)-MRA, CTA など

《利点》 測定誤差が小さい

《欠点》 血流速を同時に測定できない、  
造影剤を使用するなど

● 最大約100%のWSS推定誤差

⇒ ノイズ除去の有効性は？

● 定量的な評価は行われていない

⇒ 他の撮影方法の有効性は？

**最適な血管形状の抽出法  
について検討が必要**



# 血液粘性モデルの設定

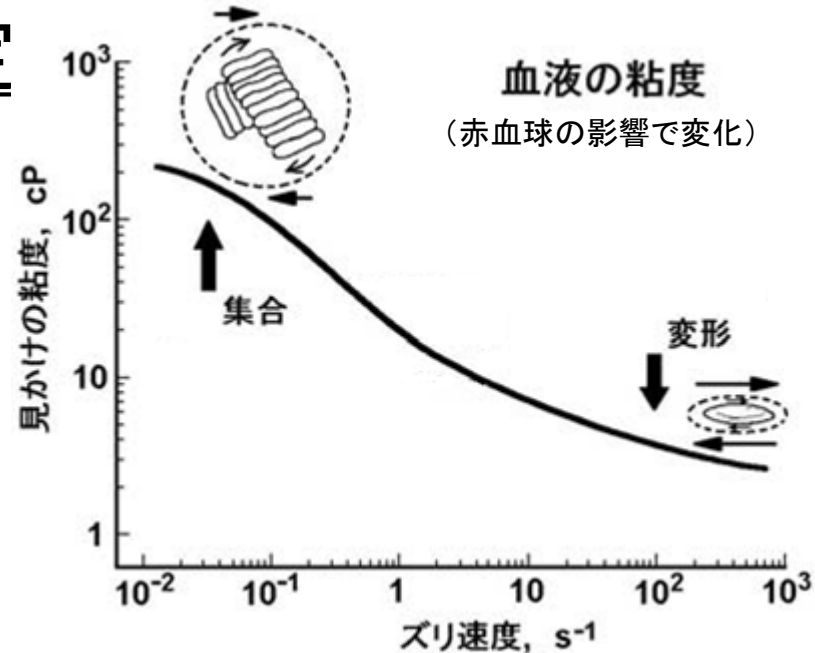
## 【現状】

血液をニュートン流体と仮定  
(粘性係数  $\mu = \text{const.}$ )



実際は**非ニュートン流体**

- 剪断速度で粘性係数が変化
- CFD血流解析結果に影響？



転載元: 日生誌 Vol. 66, No. 7・8, 2004, P.238(一部改変)

**血液の非ニュートン性の影響**について検討が必要



# 研究目的

## 【研究目的】

- 最適な**血管形状の抽出法**についての検討
- 血液の**非ニュートン性の影響**についての検討

## 【本発表の流れ】

- 最適な血管形状の抽出法についての検討
- 血液の非ニュートン性の影響についての検討
- 本発表のまとめ
- 全体のまとめ



# 最適な血管形状の抽出法 についての検討



# 検証内容

## 【今回検討する抽出法】

### ■ PC-MRA

1. 補正無し

$$M_t(r)$$

2. 単純補正

〔時間平均による  
ノイズ除去〕

$$\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T M_t(r)$$

3. Michael Markl らの補正

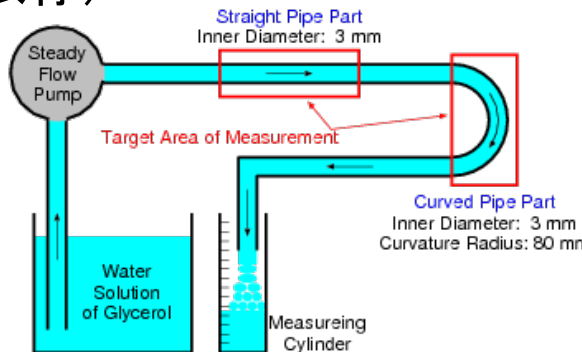
〔2.に位相画像の  
情報を加えたもの〕

$$\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left( M_t^2(r) \sum_{i=x,y,z} V_{i,t}^2(r) \right)$$

### ■ CE-MRA (造影剤の濃度に依存)

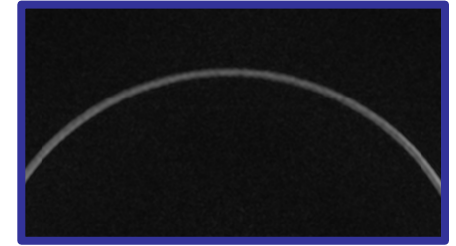
## 【検証内容】

- 以上の4つの形状抽出法について精度検証を行う。
- 測定物: 内径4mmの直円管

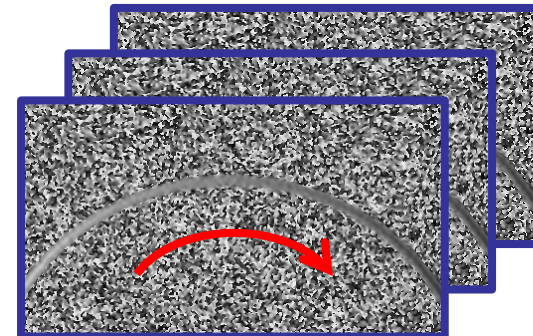


## PC-MRA撮影画像

- ・強度画像 (流速に依存)  
 $M_t(r)$



- ・位相画像  
(x,y,z方向の速度成分)  
 $V_{i,t}(r)$  ( $i = x, y, z$ )

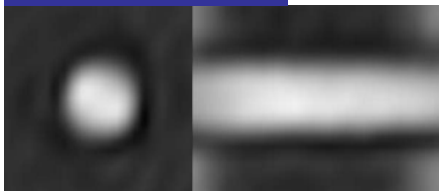


※この図は上下方向の速度成分の位相画像

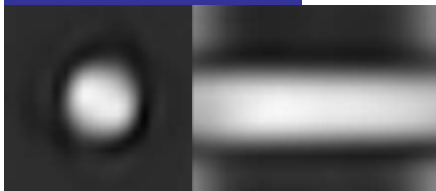


# 検証結果(抽出された形状)

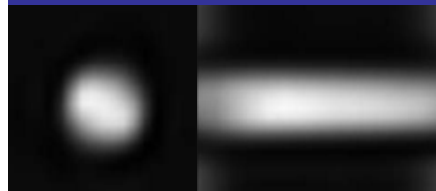
PC-MRA  
補正無し



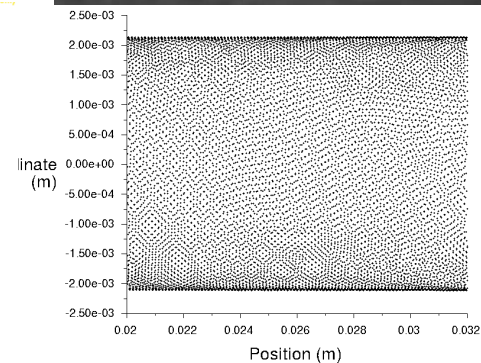
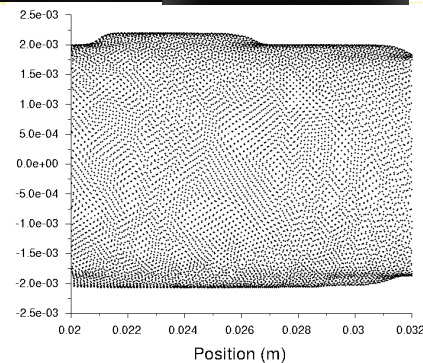
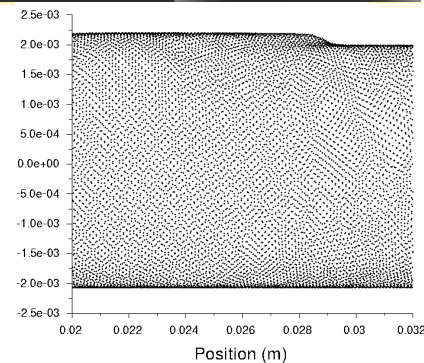
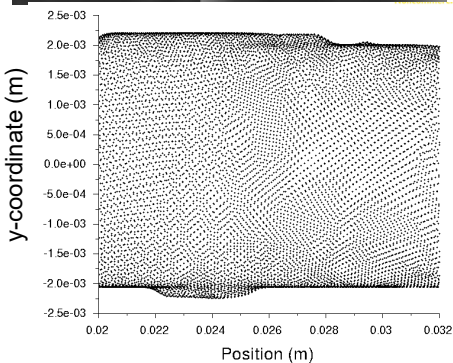
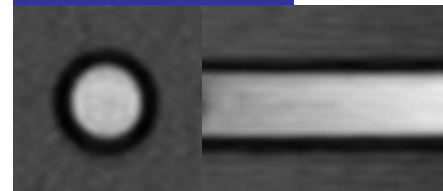
PC-MRA  
単純補正



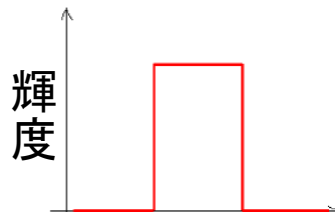
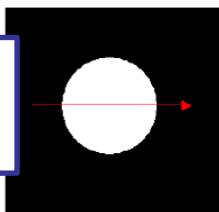
PC-MRA  
M. Marklらの補正



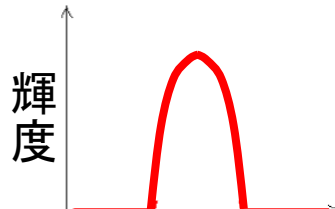
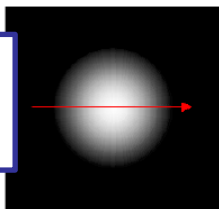
CE-MRA



理想的な  
輝度分布



PC-MRAの  
輝度分布



## 【PC-MRA】

- 画像では壁面がぼやけている。
- 抽出された形状に凹凸がある。
- ノイズ除去による改善は見られない。

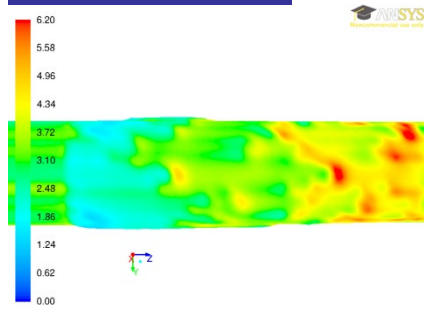
## 【CE-MRA】

- 画像では壁面がはっきりしている。
- 抽出された形状に凹凸はない。

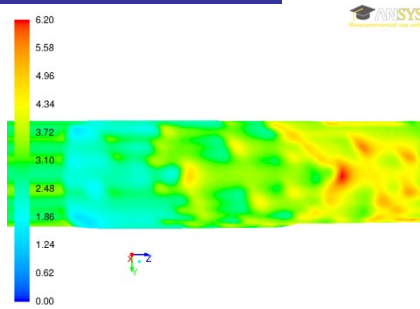


# 検証結果 (WSS分布)

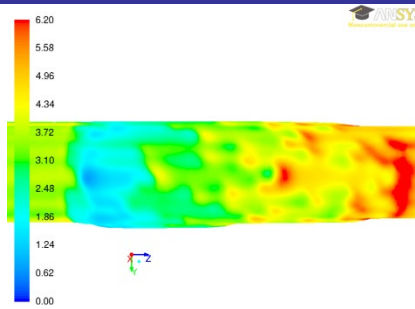
PC-MRA  
補正無し



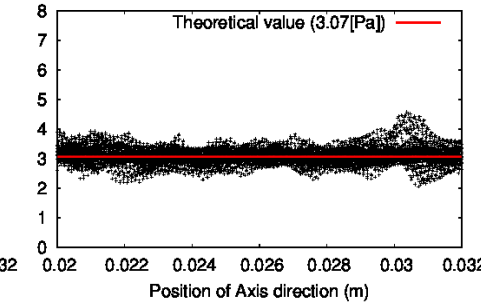
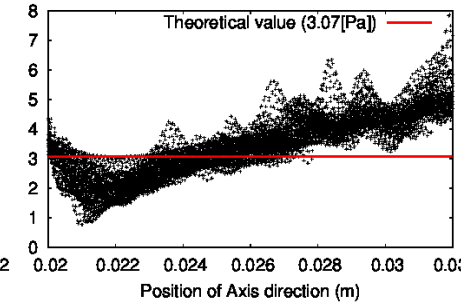
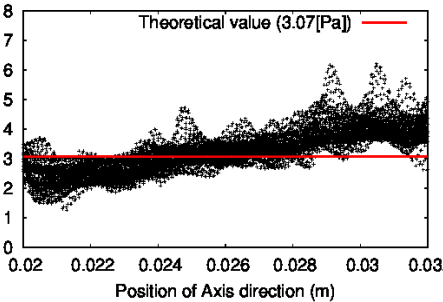
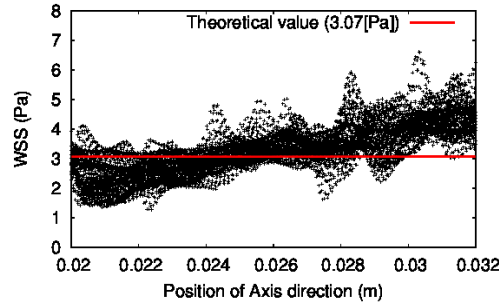
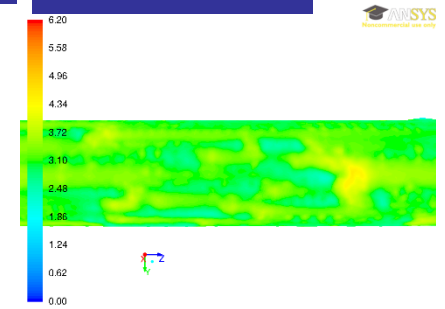
PC-MRA  
単純補正



PC-MRA  
M. Marklらの補正



CE-MRA



[最大誤差] 93.5%

101.0%

107.2%

31.6%

【PC-MRA】

ノイズ除去による改善は見られなかった。

【CE-MRA】

有効な形状抽出法である。

# 血液の非ニュートン性の影響 についての検討



# 血液の流体粘性モデル

## ■ 血液の流体粘性モデル

### ● Newtonian model

$$\mu = 0.00345 \text{ [Pa} \cdot \text{s]}$$

### ● Power Law

$$\mu = \mu_0 \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$$

$$(\mu_0 = 0.035, n = 0.6)$$

### ● Carreau model

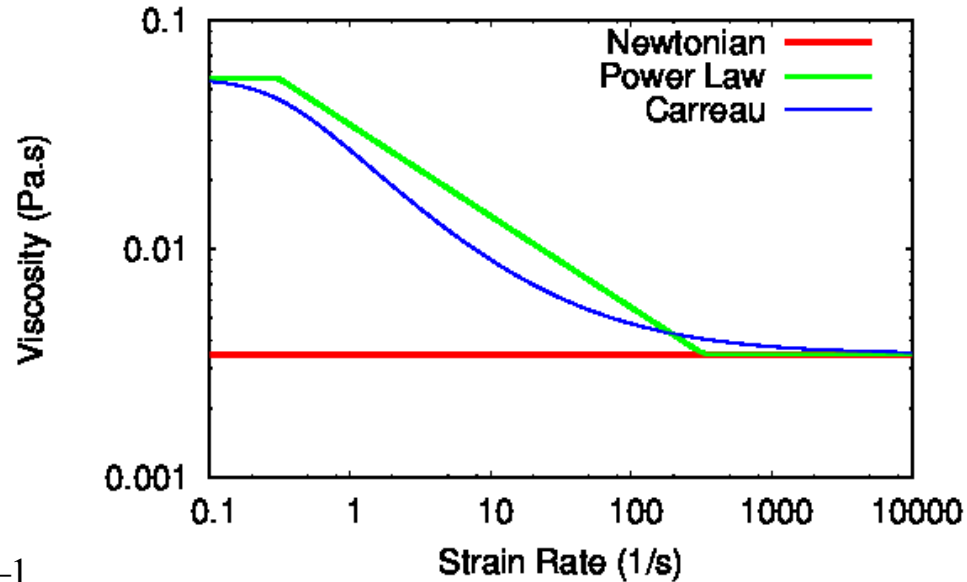
$$\mu = \mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) \left[ 1 + (\lambda \dot{\gamma})^2 \right]^{\frac{n-1}{2}}$$

$$\left( \lambda = 3.313 \text{ [s]}, n = 0.3568, \right.$$

$$\mu_0 = 0.056 \text{ [Pa} \cdot \text{s]},$$

$$\mu_\infty = 0.00345 \text{ [Pa} \cdot \text{s}])$$

非ニュートン流体モデル



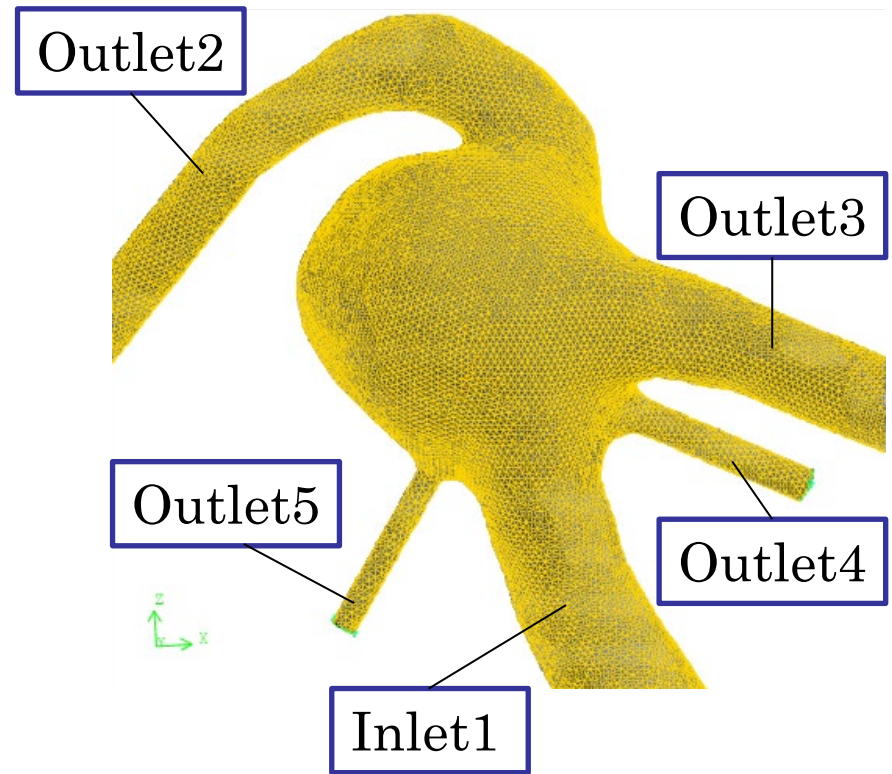
剪断速度と血液の粘性係数の関係

# 検証内容

- 3つの流体粘性モデルのCFD解析結果を比較し  
、**血液の非ニュートン流体の影響**について検討.

## 【CFD解析条件】

- 使用ソフトウェア
  - ◆ メッシュ作成: Gambit
  - ◆ CFD解析: Fluent
- 解析種別: 層流, 定常
- 血液密度:  $1054[\text{kg}/\text{m}^3]$
- 流入出境界条件: 流量
- 血管壁境界条件: 滑り無し

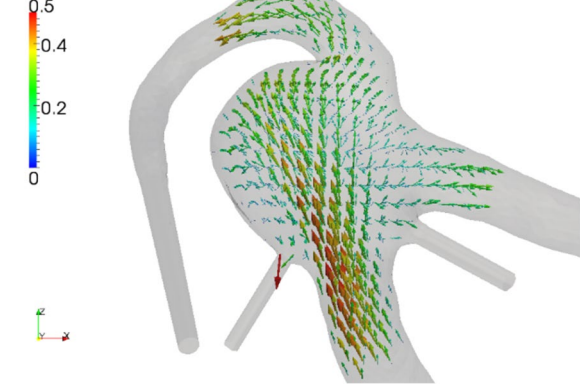


脳動脈瘤のCFD解析用メッシュ

# 検証結果(流速分布)

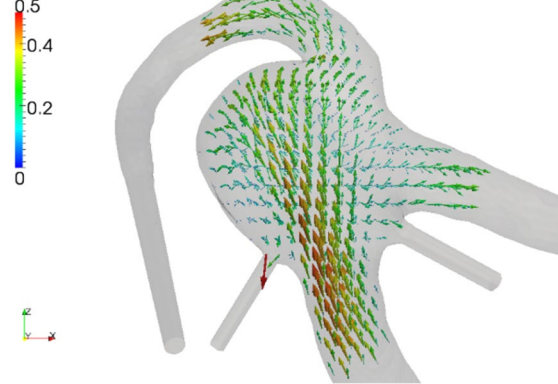
## Newtonian model

Newtonian model (m/s)



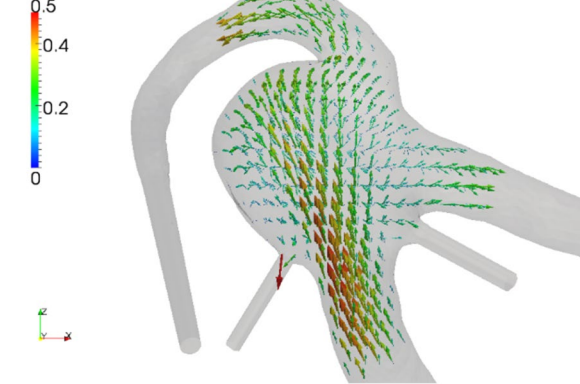
## Power Law

Power Law (m/s)



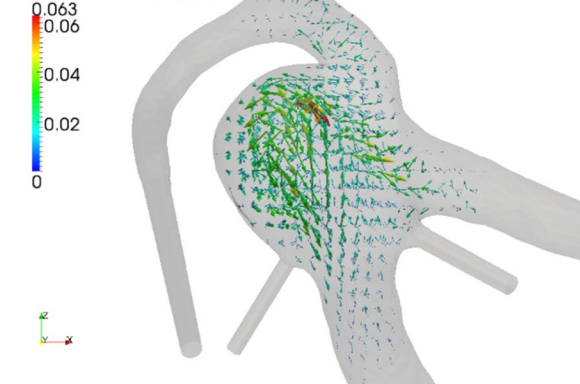
## Carreau model

Carreau model (m/s)



## Carreau model と Newtonian model の差

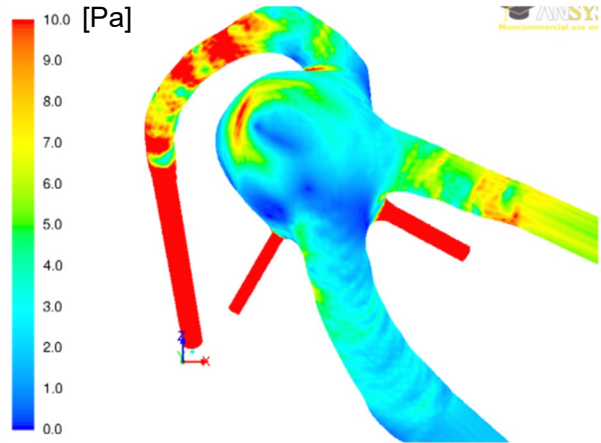
Carreau - Newtonian (m/s)



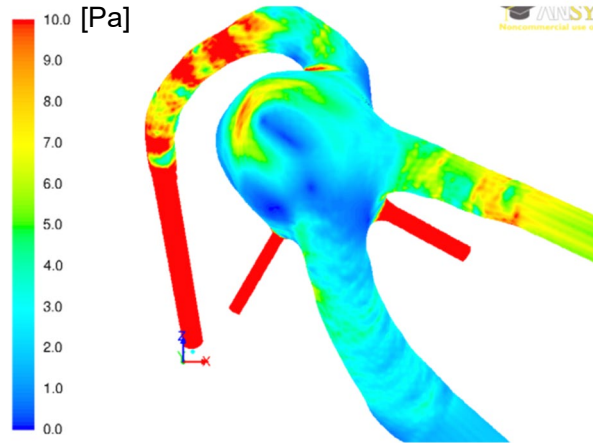
- 3つのモデルで大きな違いは見られない。
- 最大でも約0.06m/sの誤差

# 検証結果 (WSS分布)

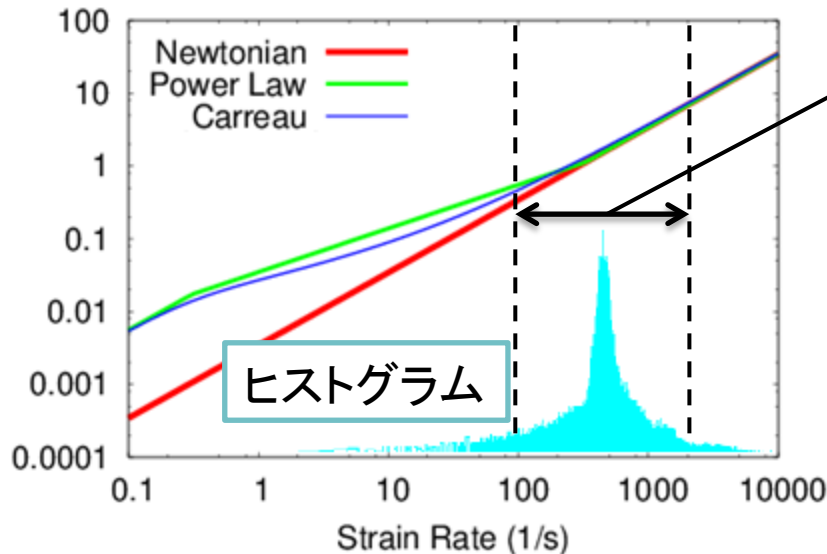
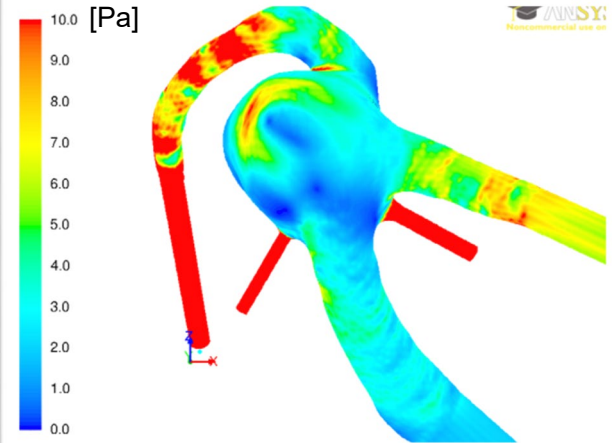
## Newtonian model



## Power Law



## Carreau model



0.1~0.4Pa程度の違いしかない

- 大きな違いは見られない。
- 脳動脈瘤のCFD血流解析において、**血液の非ニュートン性の影響は小さい。**



# 本発表のまとめ

## ■ 血管の形状抽出法の影響

- PC-MRAを用いた方法では、複数時相の画像や位相画像を利用したノイズ除去を行っても、十分な精度で形状を抽出することはできなかった。
- CE-MRAを用いた方法では、精度良く形状を抽出できた。

## ■ 血液の非ニュートン性の影響

- 脳動脈瘤のCFD血流解析において、血液の非ニュートン性の影響は小さいことが分かった。





# 全体のまとめ

- 脳動脈瘤のCFD血流解析の三大要件の内, 2つの要件(血液粘性, 流入出BC)を解決した.

## 【今後の課題】

### 血管形状の抽出

- PC-MRAを用いた血管の形状抽出の精度向上
- 血管壁の変形の影響についての検討

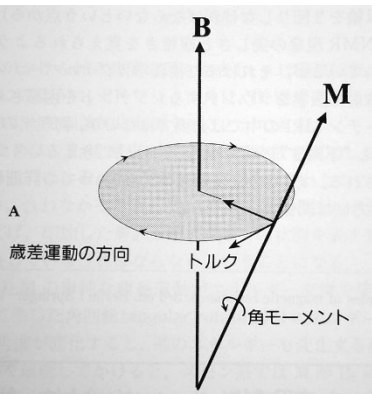
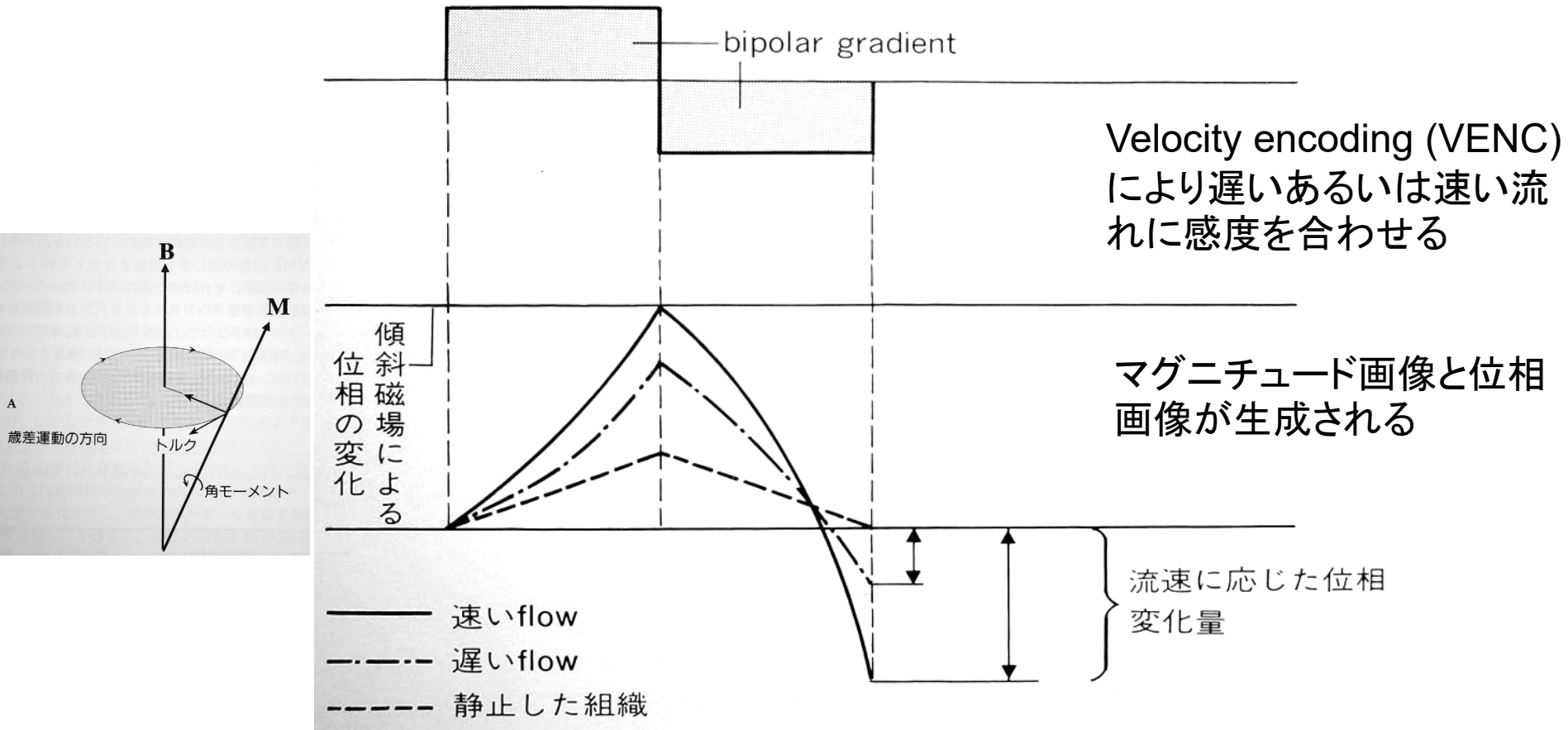


# 付録



# Phase contrast (PC) cine MRI の原理

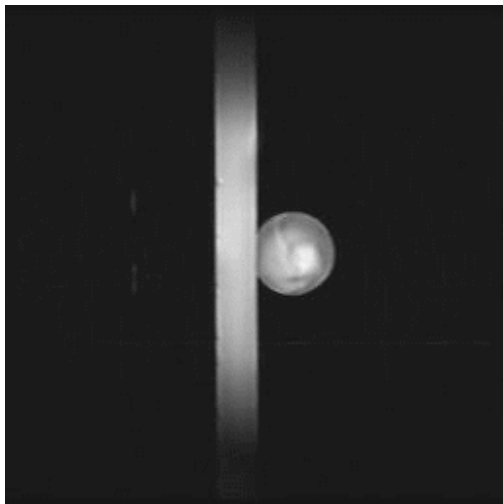
## Phase contrast 法



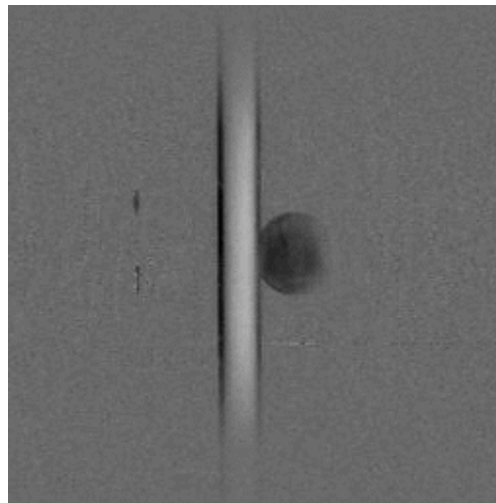
## cine MR 法

心電図同期により心周期の様々な時間に複数の画像を収集し、心周期の各ポイントの画像を得る手法

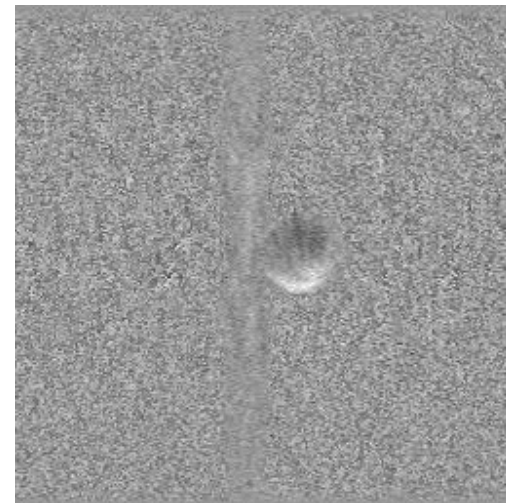
# 2次元シネ位相コントラスト磁気共鳴法 (2D cine PC MRI)



マグニチュード画像

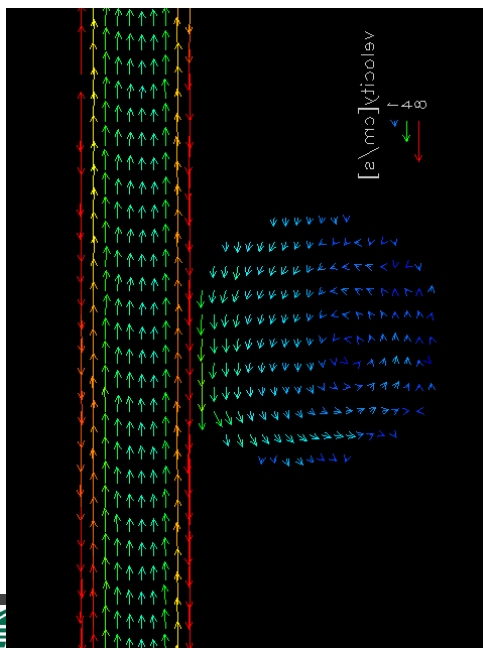


X方向にエンコード  
した位相画像



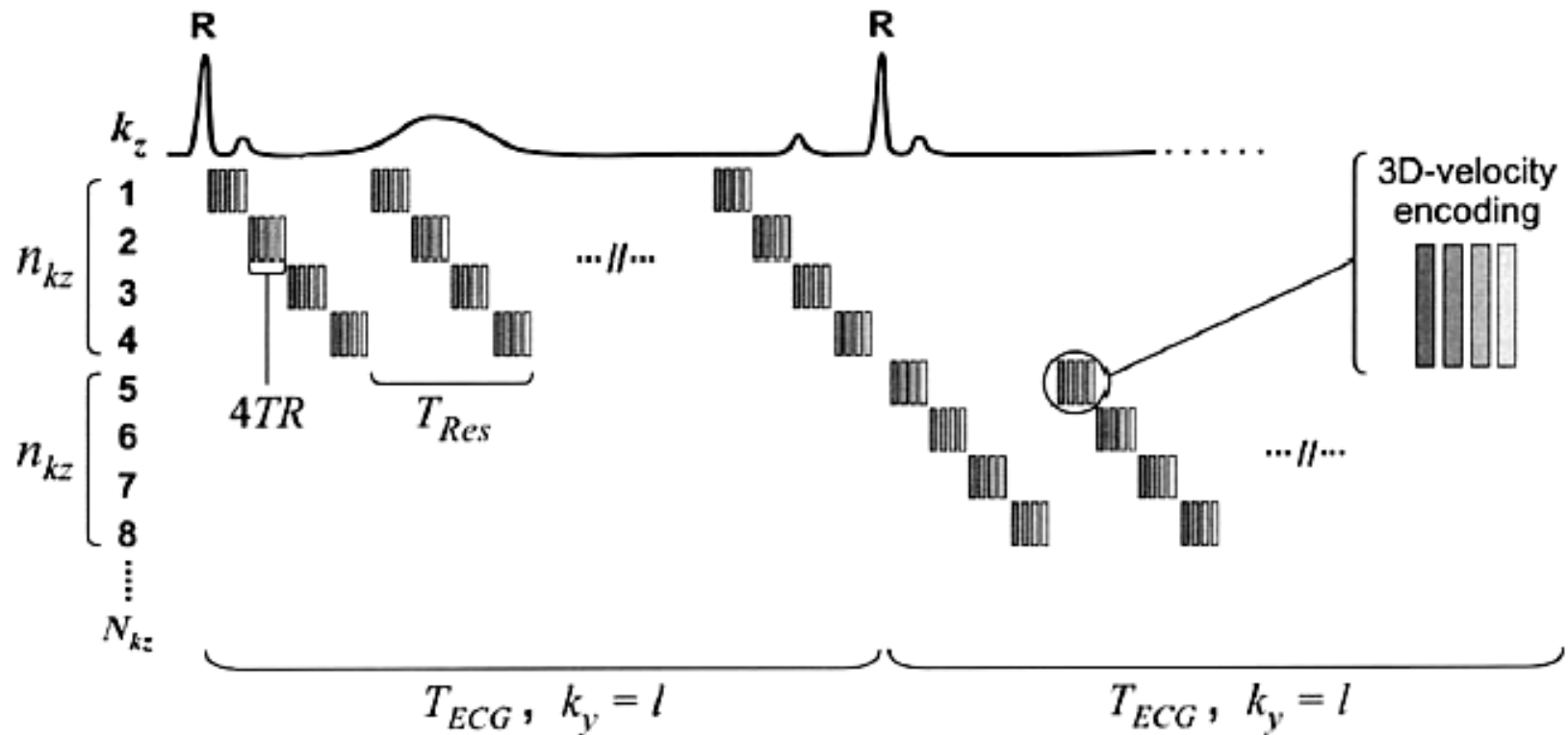
Y方向にエンコードした  
位相画像

位相情報を合成して  
得たベクトルマップ



2D PC cine MRIにおける  
位相画像と速度の関係  
「速度＝位相画像のピクセル値」

# 3次元シネ位相コントラスト磁気共鳴法 (3D cine PC MRI = 4D Flow)

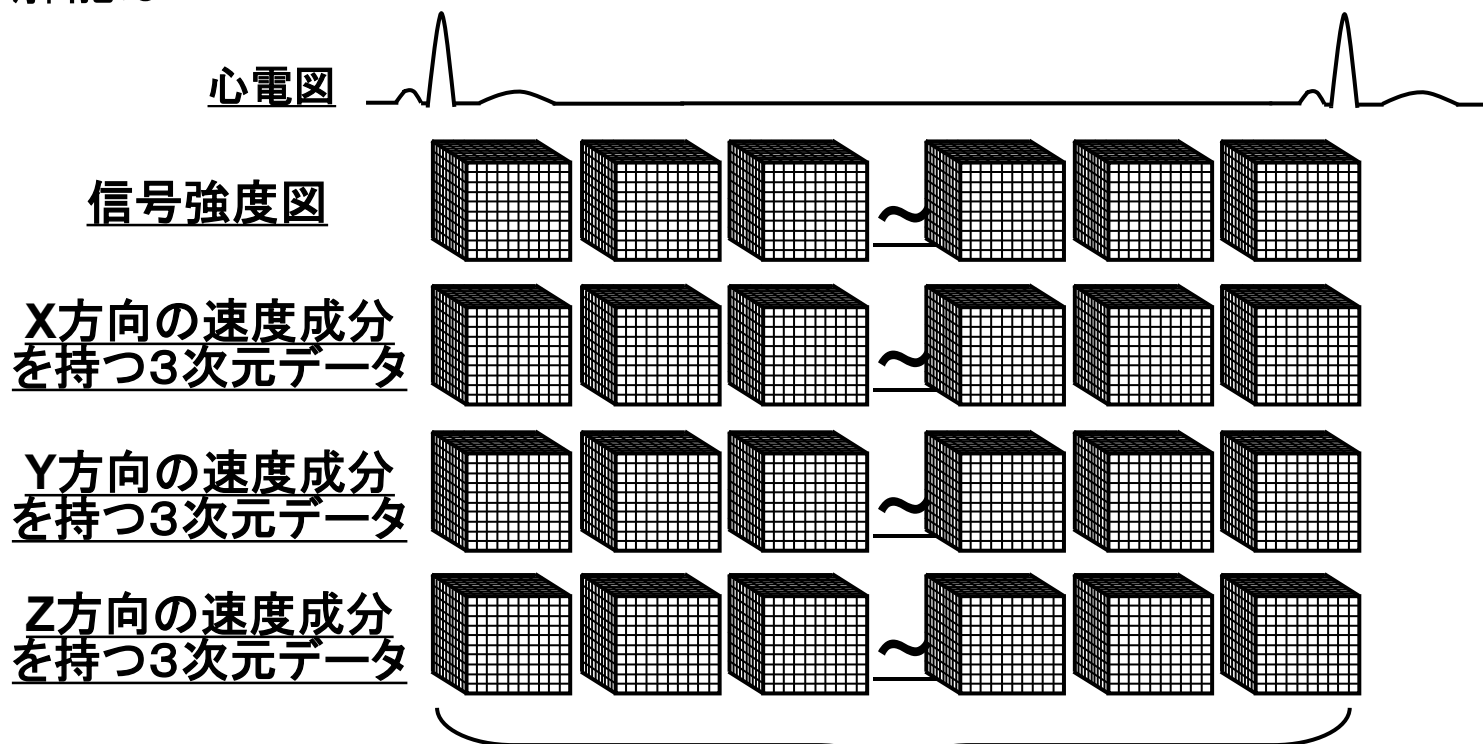


Markl M, Chan FP, Alley MT, Wedding KL, Draney MT, Elkins CJ, Parker DW, Wicker R, Taylor CA, Herfkens RJ, Pelc NJ. Time-resolved three-dimensional phase-contrast MRI. J Magn Reson Imaging. 2003 Apr;17(4):499-506.



# 4D-Flowの原理

- ・ 撮像シーケンスはradiofrequency-spoiled gradient-echo sequenceが基本
- ・ 心電図に同期させ、レトロスペクティブまたはプロスペクティブにデータ収集
- ・ 3軸全てに速度エンコードを行い、時間軸を含めて4次元の速度データを収集
- ・ Segmented k-spaceでデータ収集
- ・ 時間分解能は  $4 \times 4 \times TR$

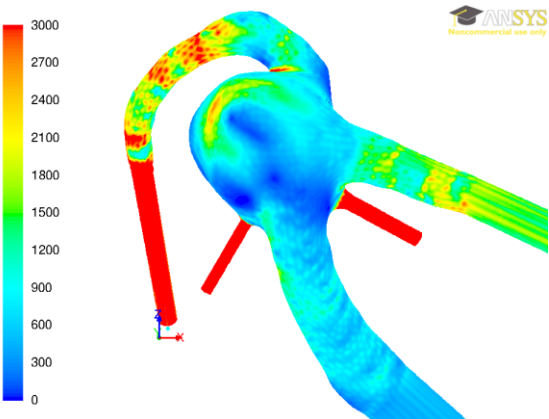
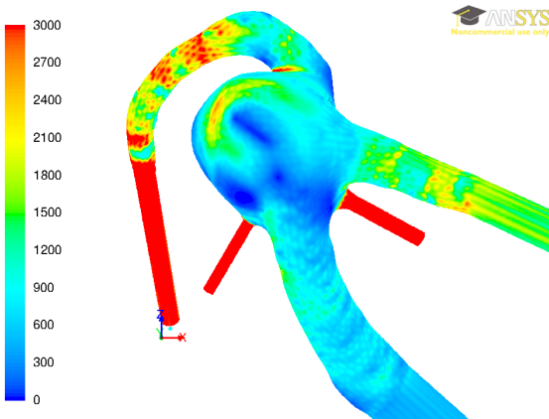
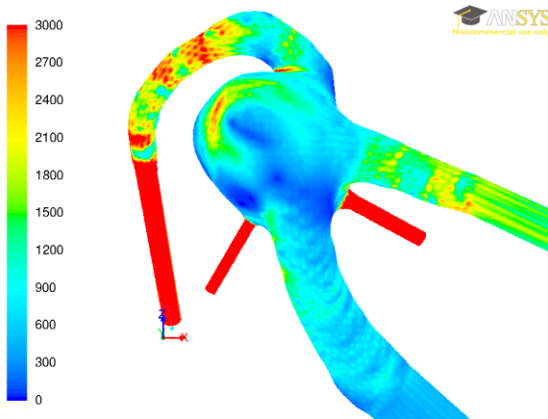


# Newtonian model

# Power Law

# Carreau model

剪断速度  
(1/s)



粘性係数  
(Pa·s)

