

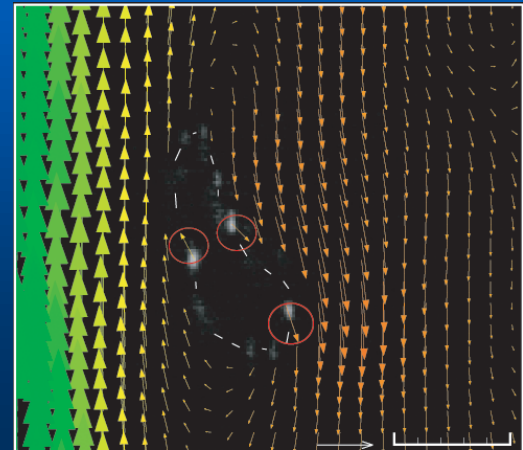
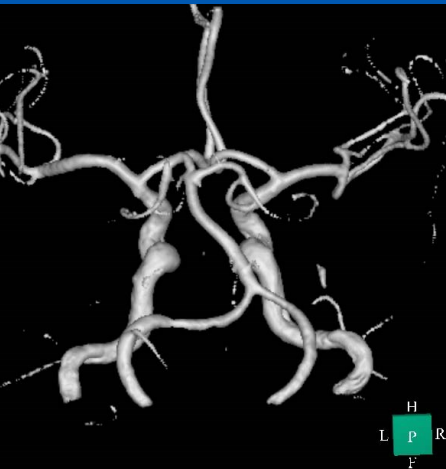
統計数理研究所 公開講演会  
2014年11月4日 (火)

# シミュレーションで手術をアシスト

東京大学大学院情報学環・生産技術研究所

大島 まり

<http://oshimalab.iis.u-tokyo.ac.jp>

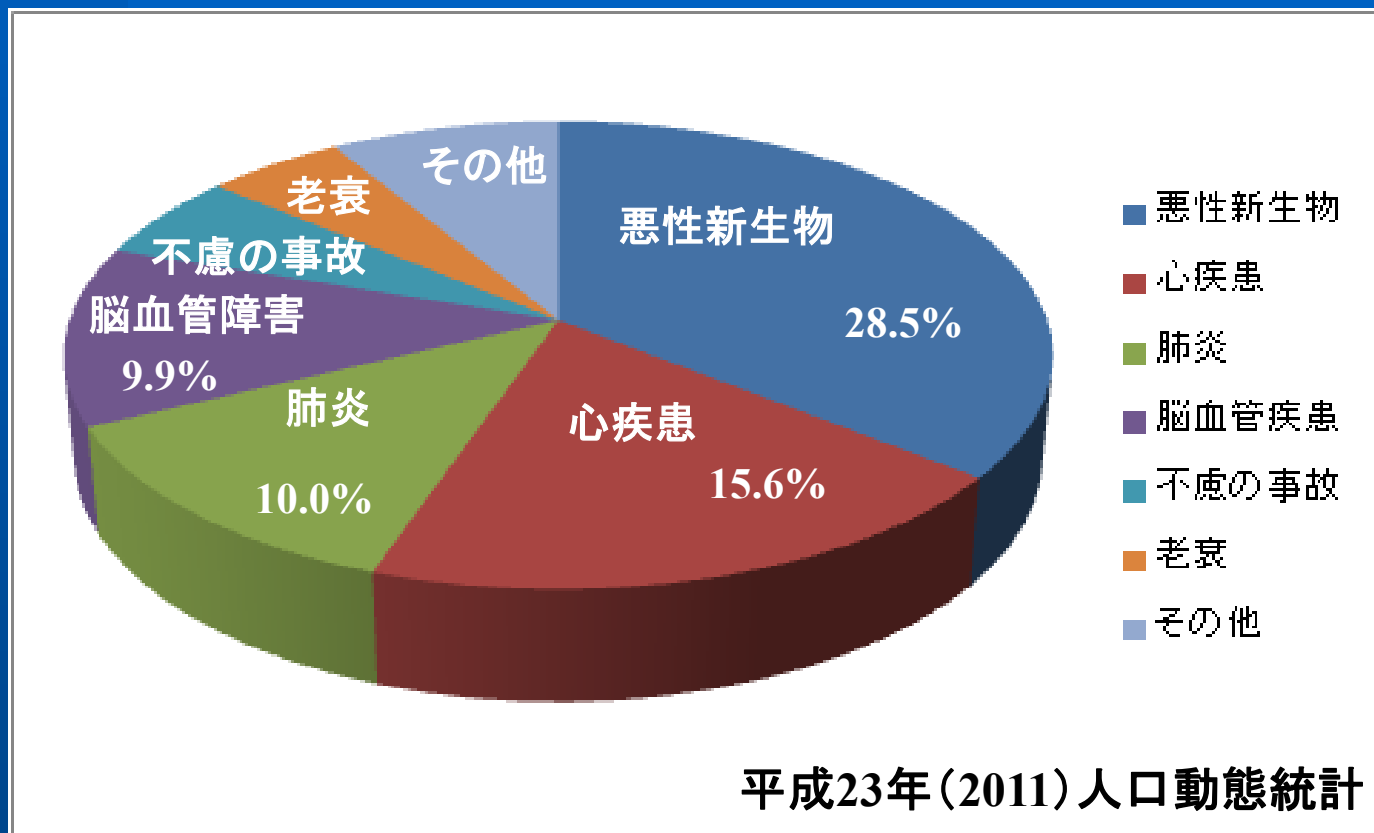


# アウトライン

- はじめに
  - 血行力学と循環器系疾患について
- シミュレーションの事例
  - Image-Based Modeling & Simulation  
(患者個別に対応できるモデリングとシミュレーション)
  - 実際の症例を使ったシミュレーションの例
    - 血管の形状モデリング
    - 脳動脈瘤のシミュレーション
    - 全身循環を考慮したステント留置術の  
術前・術後のシミュレーション
- まとめと今後の展望

# 日本人の死因分類

## ● 平成23年の日本人の死因



- 心疾患 15.6%
  - 脳血管障害 9.9%
- 循環器系疾患

# 循環器系の疾患

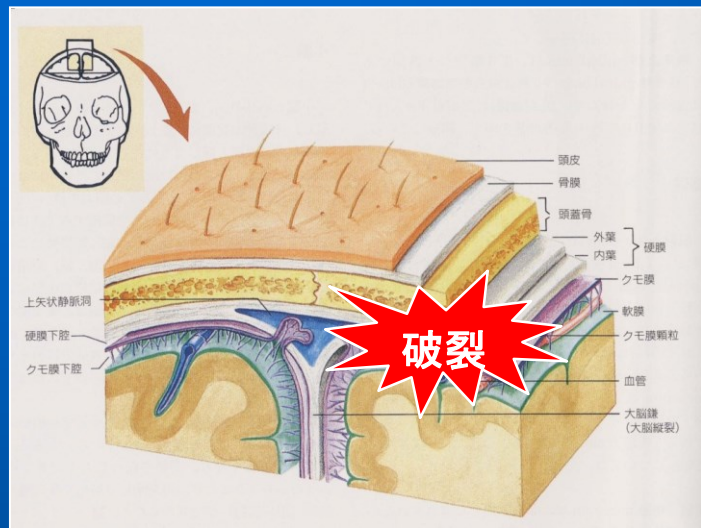
- 閉塞性：脳梗塞（脳血栓・脳塞栓）  
→動脈硬化症が主要因
- 出血性：くも膜下出血・脳出血  
→脳動脈瘤の破裂



**血管病変**

血液の流れが重要な役割を果たしている

# 脳動脈瘤とくも膜下出血について

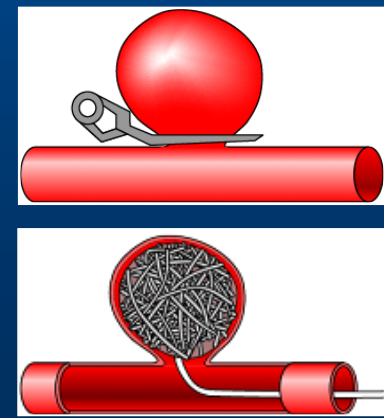


**脳動脈瘤  
の破裂**



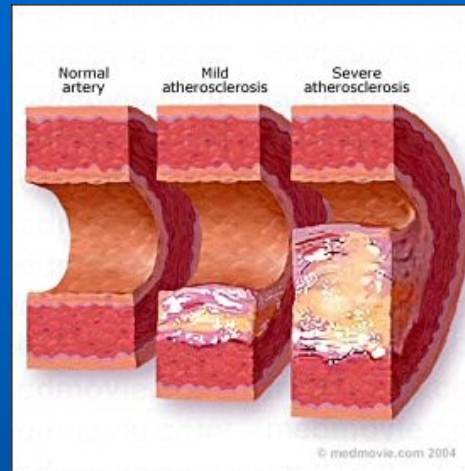
- 動脈瘤とは
  - 比較的太い脳動脈にできる嚢状の瘤 (約10mm)
- 破裂によりクモ膜出血
  - 未破裂動脈瘤: 人口の 3~5%
  - 発生したもののうち約 0.5-1.0%が破裂
  - 手術による後遺症の危険性は数%-5.0%

クリッピング  
コイリング



# アテローム性動脈硬化症

## 動脈壁が肥厚により硬化する血管病変



- 特定の場所に発生：  
頸動脈分岐部, など
- 狭窄の原因(脳梗塞, 心筋梗塞などの要因):  
動脈壁がLDL(Low Density Lipoprotein :低密度リポ蛋白質)の沈着などにより肥厚し, 粥状(アテローム性)のプラークを形成

### 内頸動脈へのステント手術

- ステント手術:  
手術後に脳出血や再狭窄を起こす場合があります。術後の予測が重要



個人の各々の状況に対応した  
血流シミュレーション



# 予測医療に向けたシミュレーション技術の開発

一人一人が健康で生き生きとした社会



疾患の早期発見・早期治療



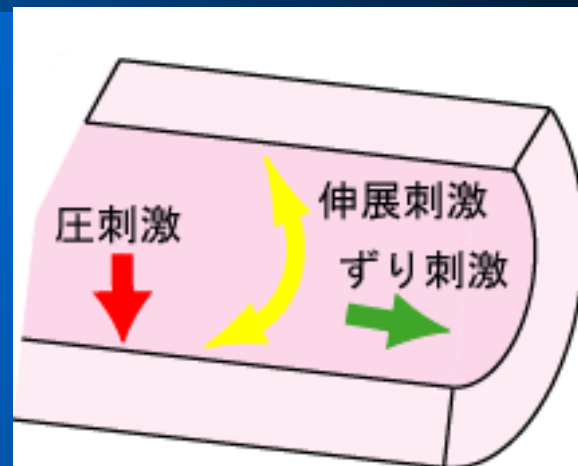
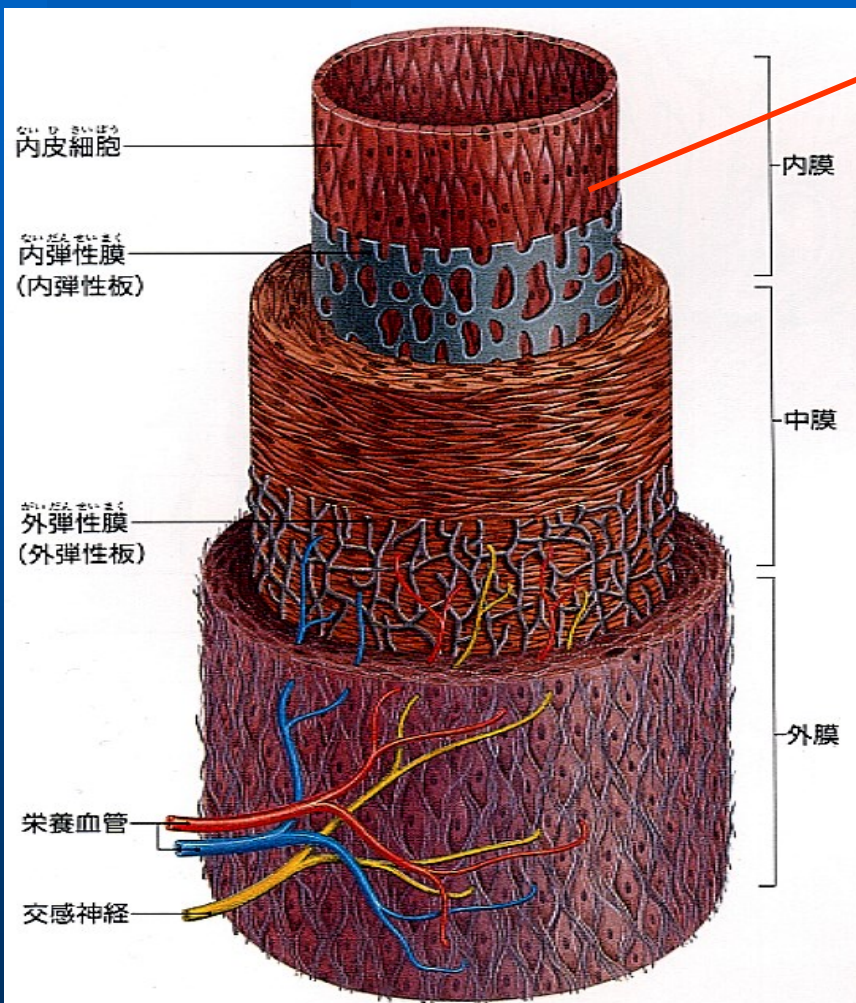
シミュレーションによる  
病態の**早期予測**と**治療支援**



医用計測技術とシミュレーションを  
融合した新しい予測医療の創出



# 血管の構造



血流が血管壁におよぼす力

- ・壁面せん断応力(ずり刺激)
- ・圧刺激(血圧)
- ・伸展刺激(血管壁の伸縮)

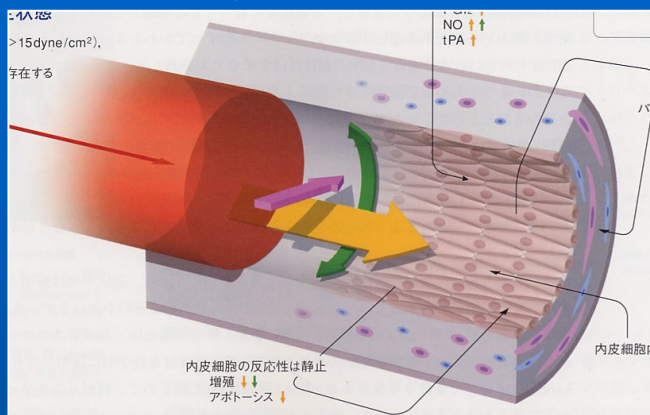
内皮細胞に  
影響



# 血流による力が細胞に影響を与える

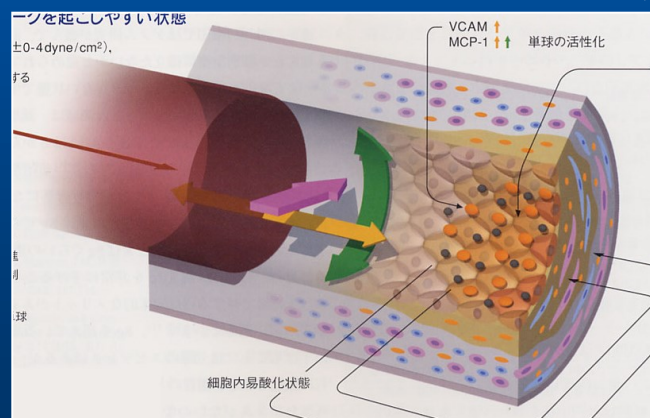
## 血液が血管壁に力学的刺激を与える

壁面せん断応力  
正常な場合



内皮細胞に影響

壁面せん断応力  
小さい場合



**動脈硬化症**

# 体内の血液の流れを探るには？

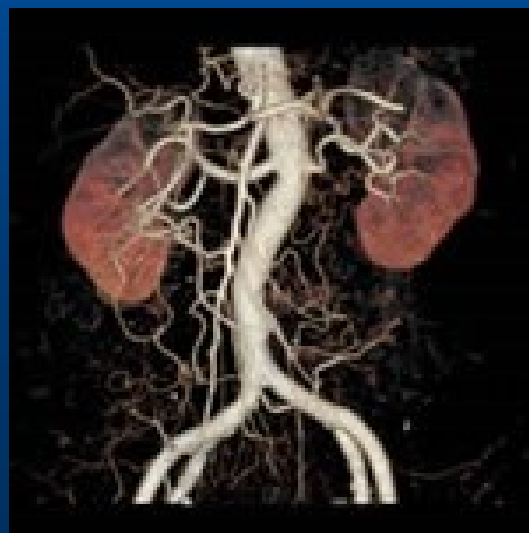
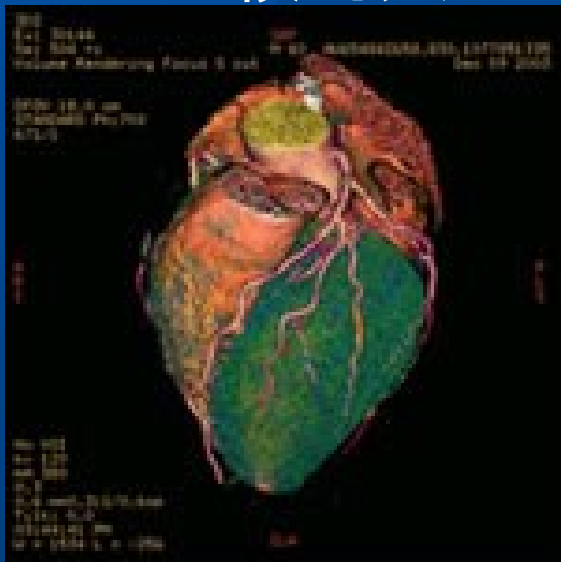
- 皮膚や骨があるため、外から体内の様子を見ることはできない。



最新の医用画像技術

- ・CT(Computed Tomography)
- ・MRI(Magnetic Resonance Image)

比較的太い血管(0.1mm~1mm以上)は可能



ただし、  
・細い血管  
・流れ  
を見るのは難しい

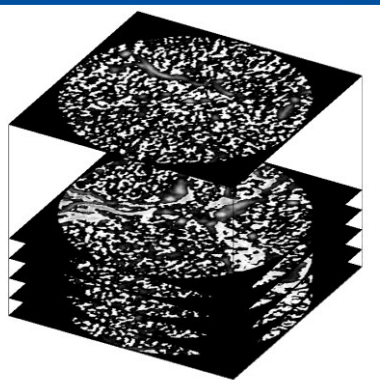
# 血液の流れを知るには？

医用画像や実験  
では限界

組み合わせ

コンピュータ・シミュレーション

## 医用画像



CT  
MRI

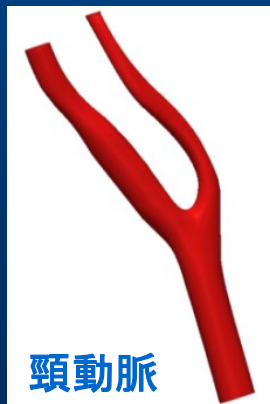


3次元形状  
モデリング  
&  
格子分割

## 解析モデル



脳動脈瘤

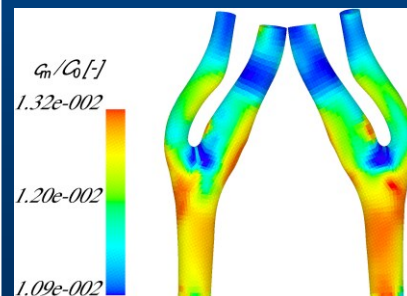
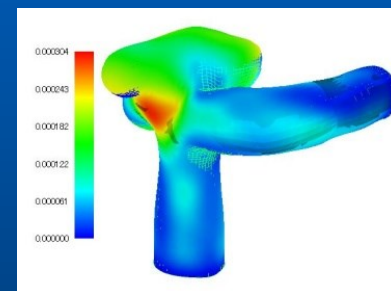


頸動脈



シミュレーション

## 結果の可視化



# 医療分野でのコンピュータ・シミュレーションの応用

## ● 医用画像との組み合わせによる新しい展開

従来の手法

動物実験  
臨床試験  
疫学調査

+

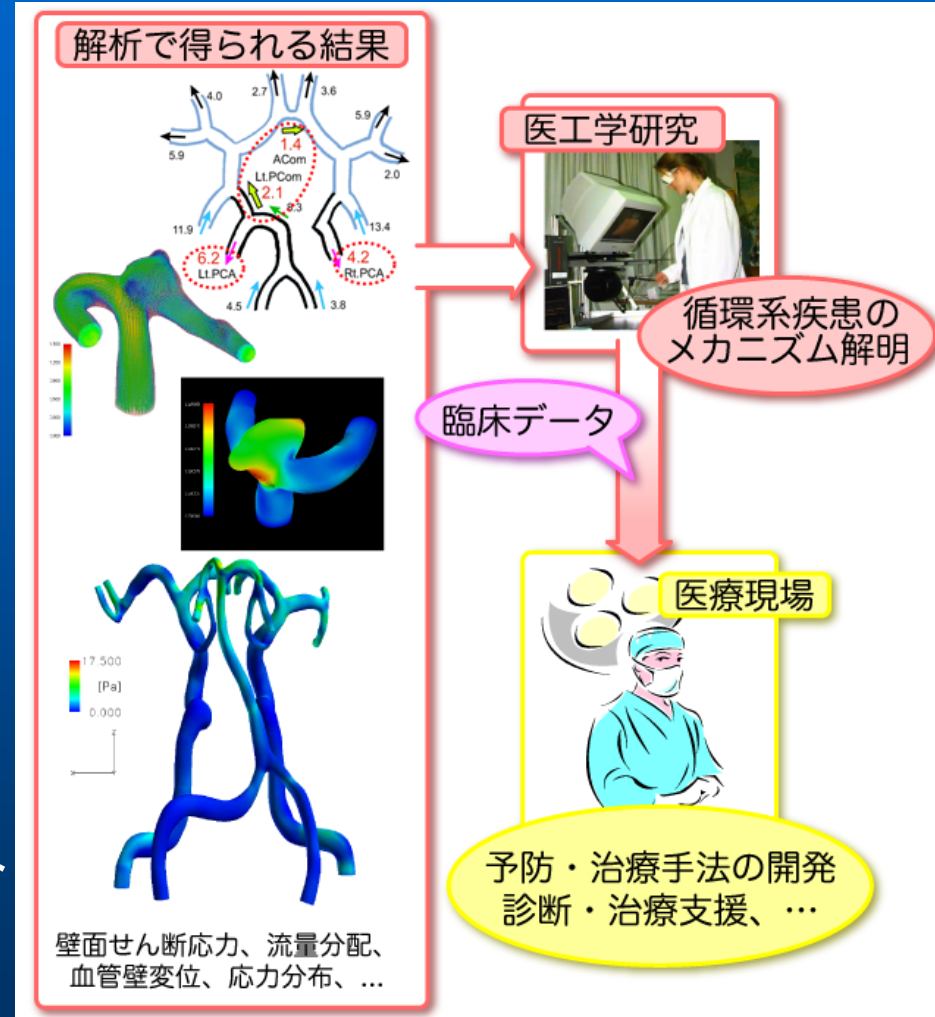
コンピュータ  
シミュレーション

- ・ 非侵襲であり、倫理的な問題がない
  - ・ 壁面せん断応力などの力学情報の取得
  - ・ 予測・手術計画に最適
- より高度・安全・安心な予防、治療、診断方法の研究開発を迅速に推進

## ● 発展できる柔軟なシステム

新しい医学・生理学的な知見を継続的な組み込みが可能。時代とともに技術が「成長」

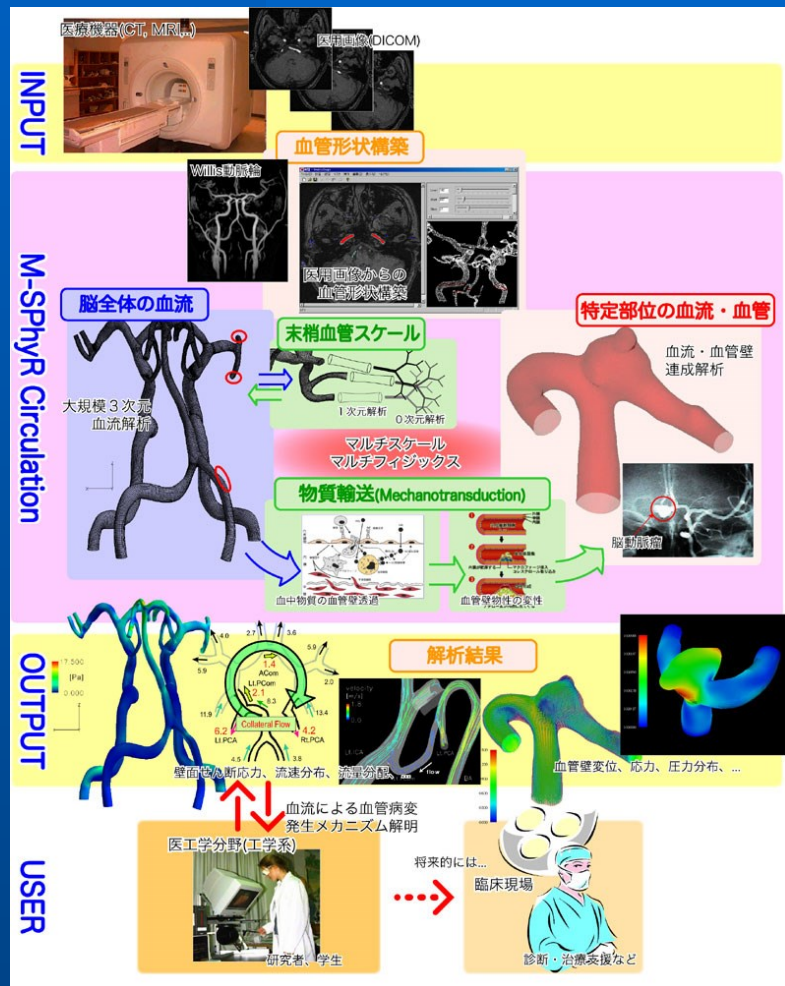
→ マルチスケール・フィジックスな現象に対応可能



個別の患者に対応できる治療・診断システム



# 循環器系統合シミュレーション



- ・MRI/CTなどの診断機器の医用画像に基づき(Image based)、実際の血管形状を作成

- ・患者個人個人の血管形状を考慮した(Patient specific)血流解析

- ・ミリオーダーの太い動脈から、毛細血管の効果まで含めたマルチスケールな解析

- ・脈動に伴う血管壁の移動、血流による血管内物質の壁面透過など脳血管におけるマルチフィジックスの解析



血管病変のメカニズム解明



脳動脈破裂のリスク予想、より効果的な予防・治療法の開発、...

# 研究の概要

## ● 脳血管形状モデル内流れの可視化計測

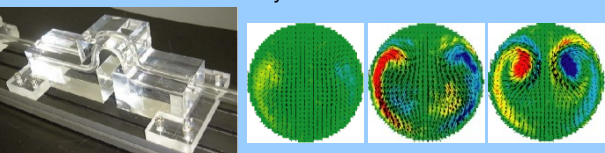
### ◆ 実血管形状モデル内流れのステレオPIV計測



実血管形状モデル

動脈瘤内の流跡線

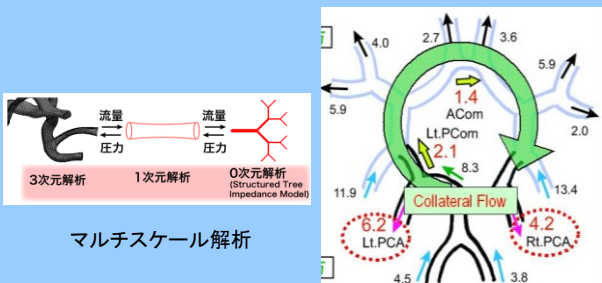
### ◆ 曲がり管モデル内流れのDynamicPIV計測



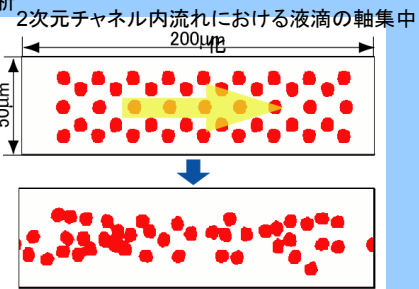
曲がり管モデル

断面内2次流れパターンの時系列変化

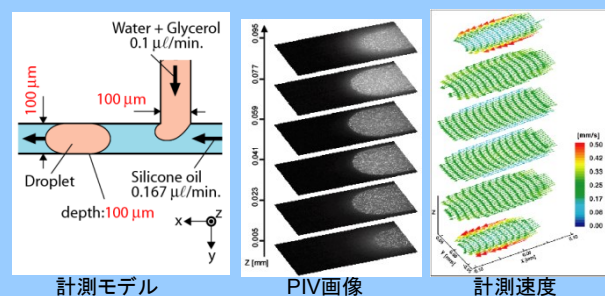
## ● Willis動脈輪のマルチスケール大規模解析



## ● 格子Boltzmann法による液滴と流体の数値解析

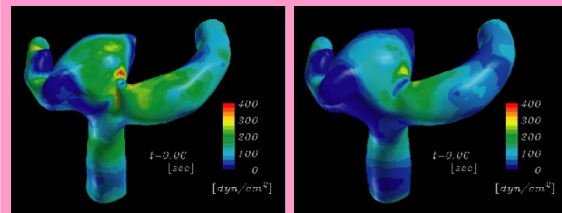


## ● 微小液滴内部流れの共焦点マイクロPIV計測



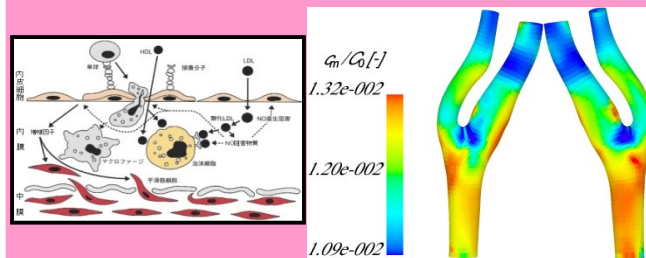
## ◆ 血流—血管壁の流体構造連成解析

### 中大脳動脈周辺の壁面せん断応力分布



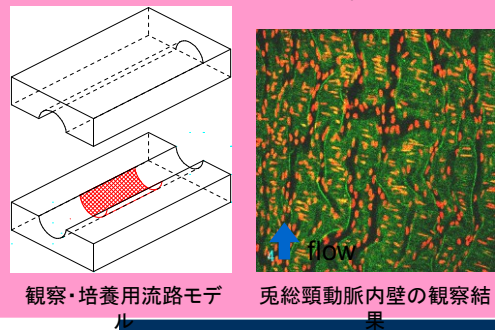
## ◆ 動脈硬化症における生理学的相互作用の取り扱い

### 力学的刺激と血管壁の物質吸収・物質生産の相互作用のモデル化



## ◆ 力学的刺激による血管内皮細胞の形態変化

### 壁面せん断応力が血管壁に与える影響の定量的評価





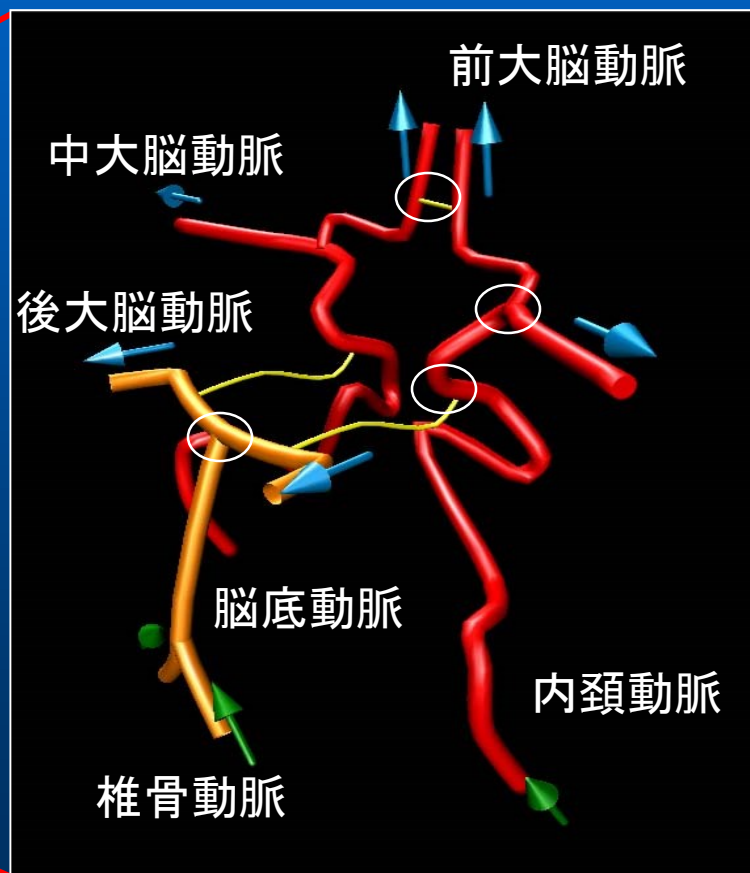
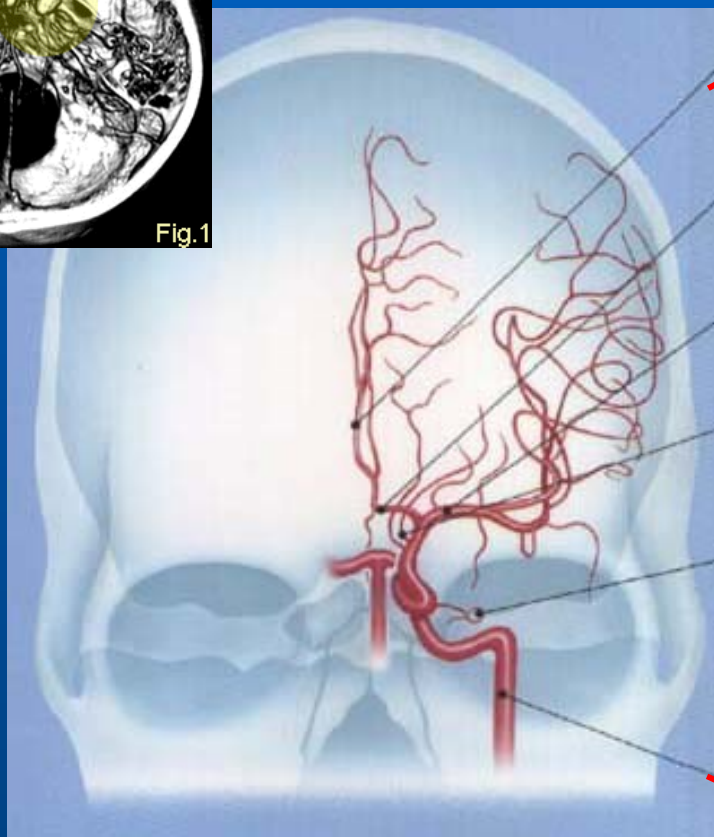
# 循環器系シミュレーション

—患者個別に対応できるモデリングとシミュレーション—  
〈一部のみ〉

# 脳の中の血流

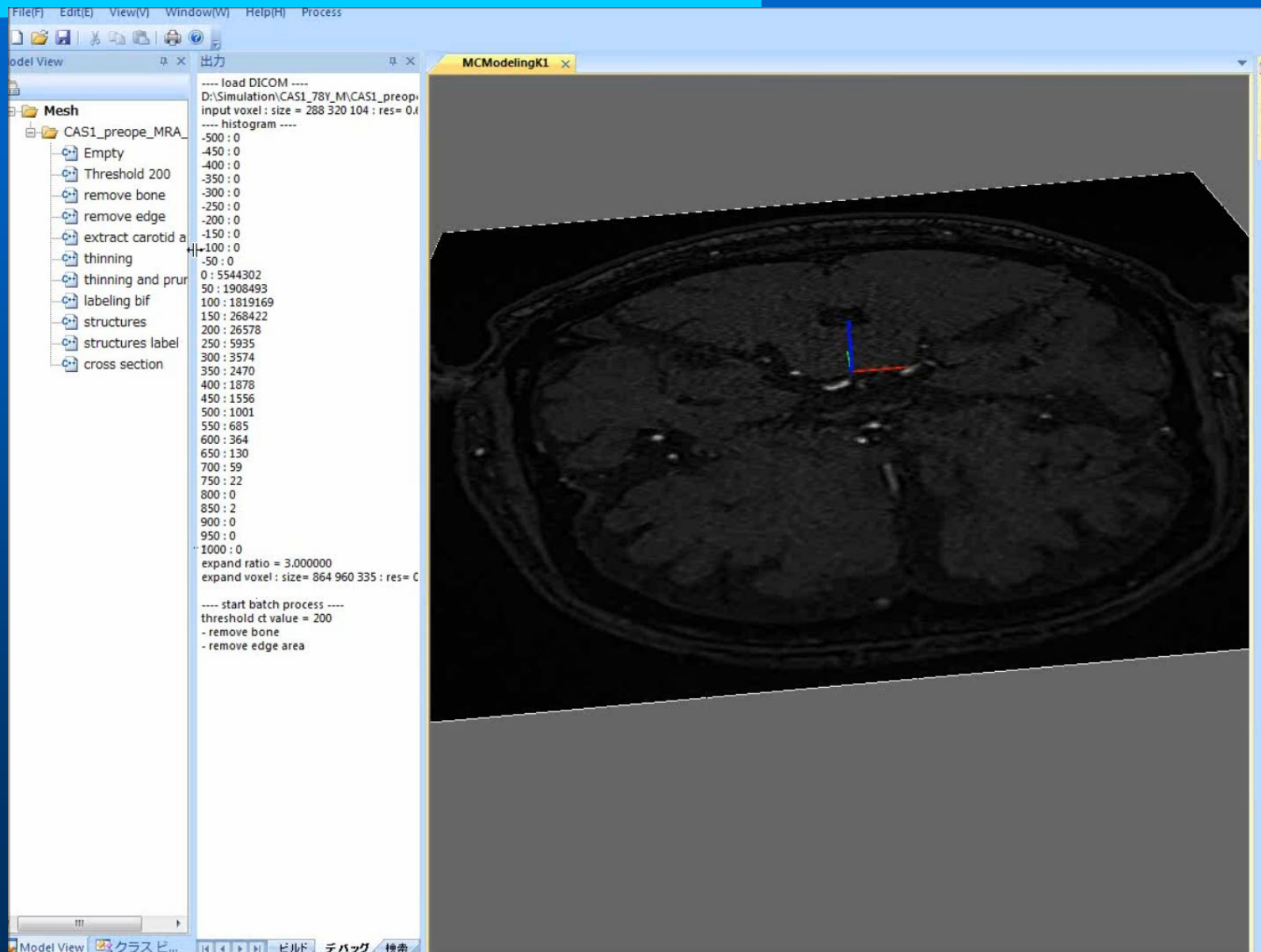
## 脳動脈瘤

(10mm程度の囊状の瘤)



ウィリス動脈輪 (主要な脳血管網)<sup>6</sup>

# GUIによるInteractiveな操作



# 全身循環を考慮したステント留置術の術前・術後のシミュレーション

## □ 内頸動脈ステント手術

78歳, 男性

左側内頸動脈(L.ICA)高度狭窄による左脳梗塞

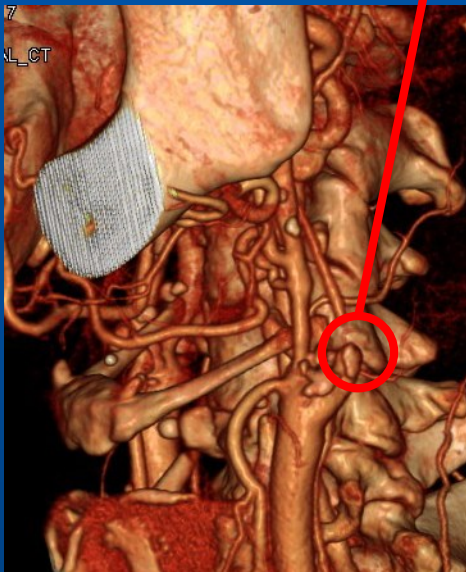
ステント手術後, 左側中大脳動脈(L.MCA)において出血



シミュレーションによる術後の予測

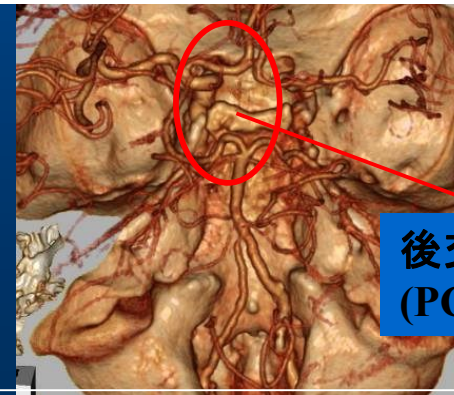
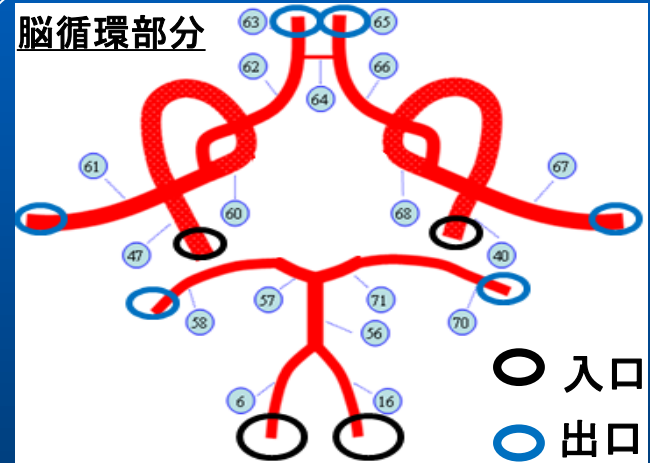
術前

狭窄率:????  
狭窄の長さ:3mm



CTA

術後



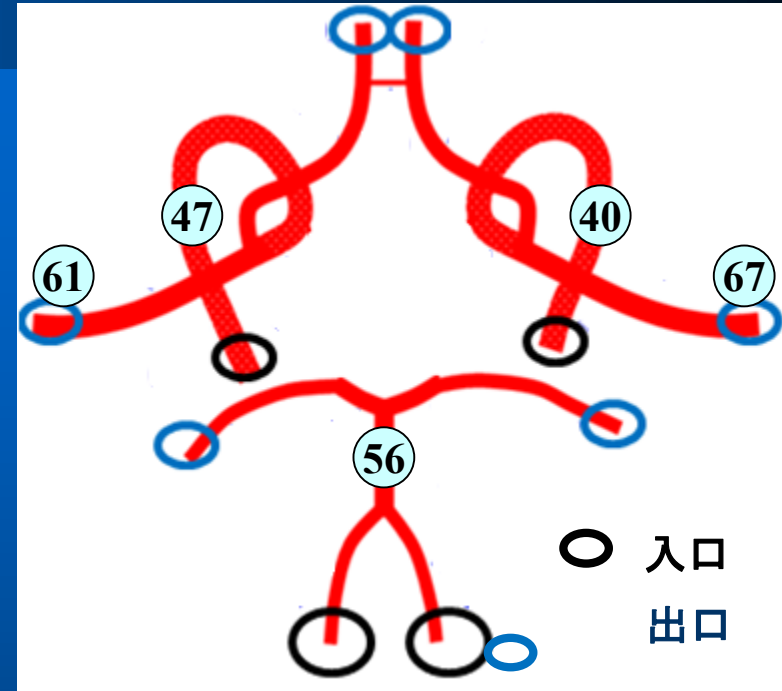
後交通動脈 (PCoM)がない

Angiography

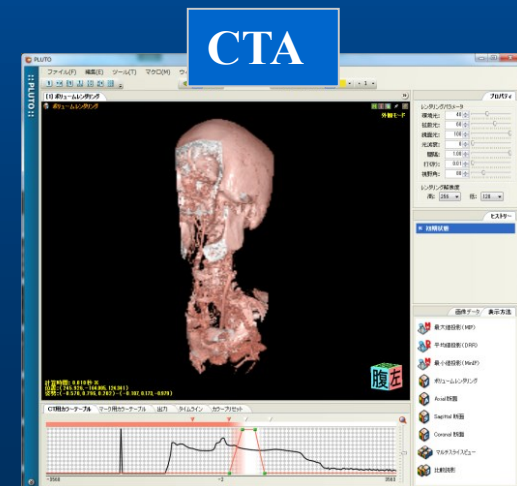
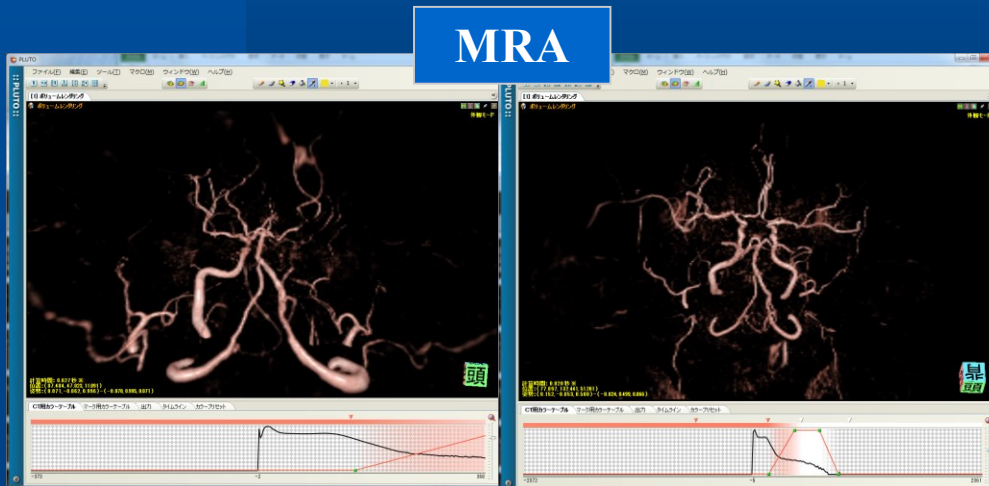
# データ

## 1. Flow Rate & Pressure (MRI)

Averaged FR(ml/min)		Pre	Post
Rt. ICA	47	51.1	231.8
Lt. ICA	40	76.4	186.9
BA	56	154.9	142.0
Rt. MCA	61	71.2	50.3
Lt. MCA	67	23.1	59.3
Averaged BP (mmHg)		100.0	95.0



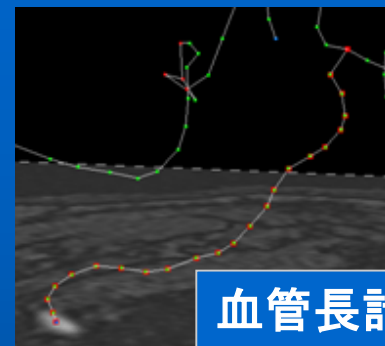
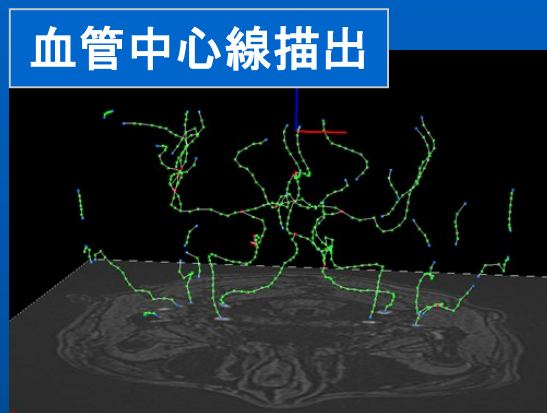
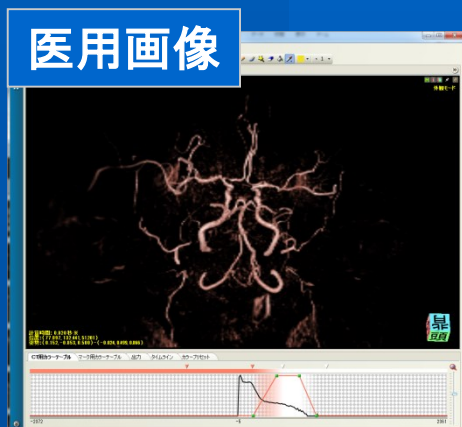
## 2. MRA & CTA (Pre- & Post-)



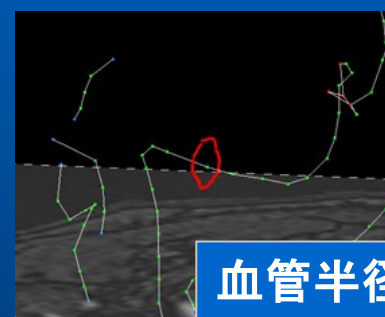


# パラメータ算出方法

- 手順1: 血管径・長さの計測  
各血管の長さや両端の血管径を計測



血管長計測



血管半径計測

	L.ICA
Post_data	L:84.4
	r0:1.05
	r1:1.02



- 手順2: 流量の推定
- 手順3: 末梢抵抗の調整
- 手順4: 狭窄率の推定(術前のみ)



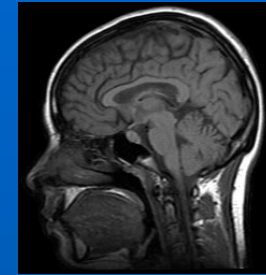
# まとめと今後の展開

- 血管形状のパラメータ化
  - 全身循環を考慮した血流シミュレーションの実現
- 【今後の予定】
- シミュレーション結果の検証(実験や臨床データ)
  - PETなど他のモダリティとのデータ同化
  - 生理的な数理モデル化
  - 臨床への応用(薬事法のソフトウェアへの適用)  
⇒ HPCからクラウドコンピューティング & PC

# シミュレーション技術の 医学・医療分野での利用展開



→  
医用画像・医療計測  
技術の発展



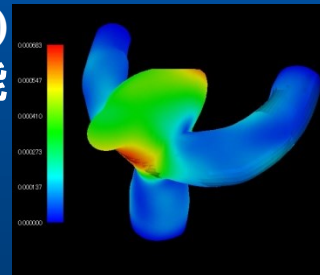
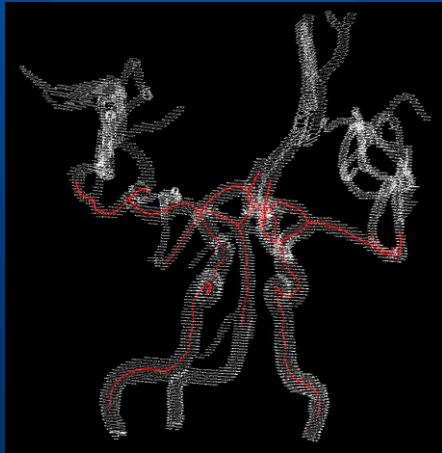
データの可視化  
による診断



## Multi-Modality + シミュレーション



患者個別 (Patient-Specific)  
に対応可能



手術シミュレーション・  
データベース化へ

↓  
病状進行予測

↓  
手術計画・  
手術後予測



高度な情報の提供による安全・安心な医療に貢献

# 謝辞

This research is supported by the ‘Research and Development of the Next-Generation Integrated Simulation of Living Matter’, as a part of the ‘Development and Use of the Next-Generation Supercomputer Project’ of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), Japan.

**Professor Fuyou Liang: Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China**

**Professor Shu Takagi: The University of Tokyo, Japan**

**Dr. Ryutaro Himeno: Riken**

**Professor Kiyomi Niki: Tokyo City University**

**Mr. Ryota Abe**

**Ms. Shiori Yauchi**

**Professor Motoaki Sugawara: Hemeji Dokyo University**

**Dr. Shigeki Yamada: Hamamatsu Rosai Hospital**

**Mr. Masaharu Kobayashi The University of Tokyo**

ご清聴ありがとうございました。