

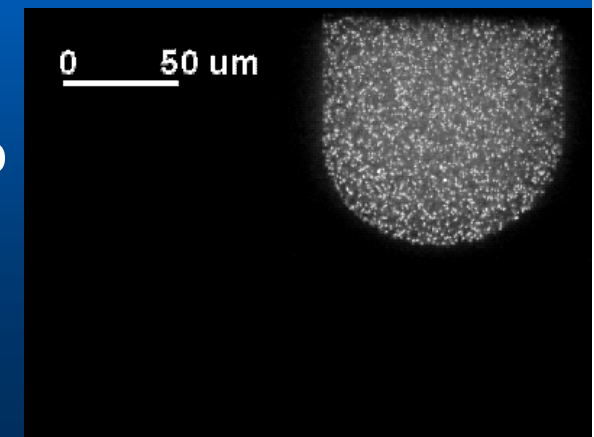
スーパーコンピュータ「京」を知る集い
2012年12月8日（土）

スパコンで見る血液の流れ

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>

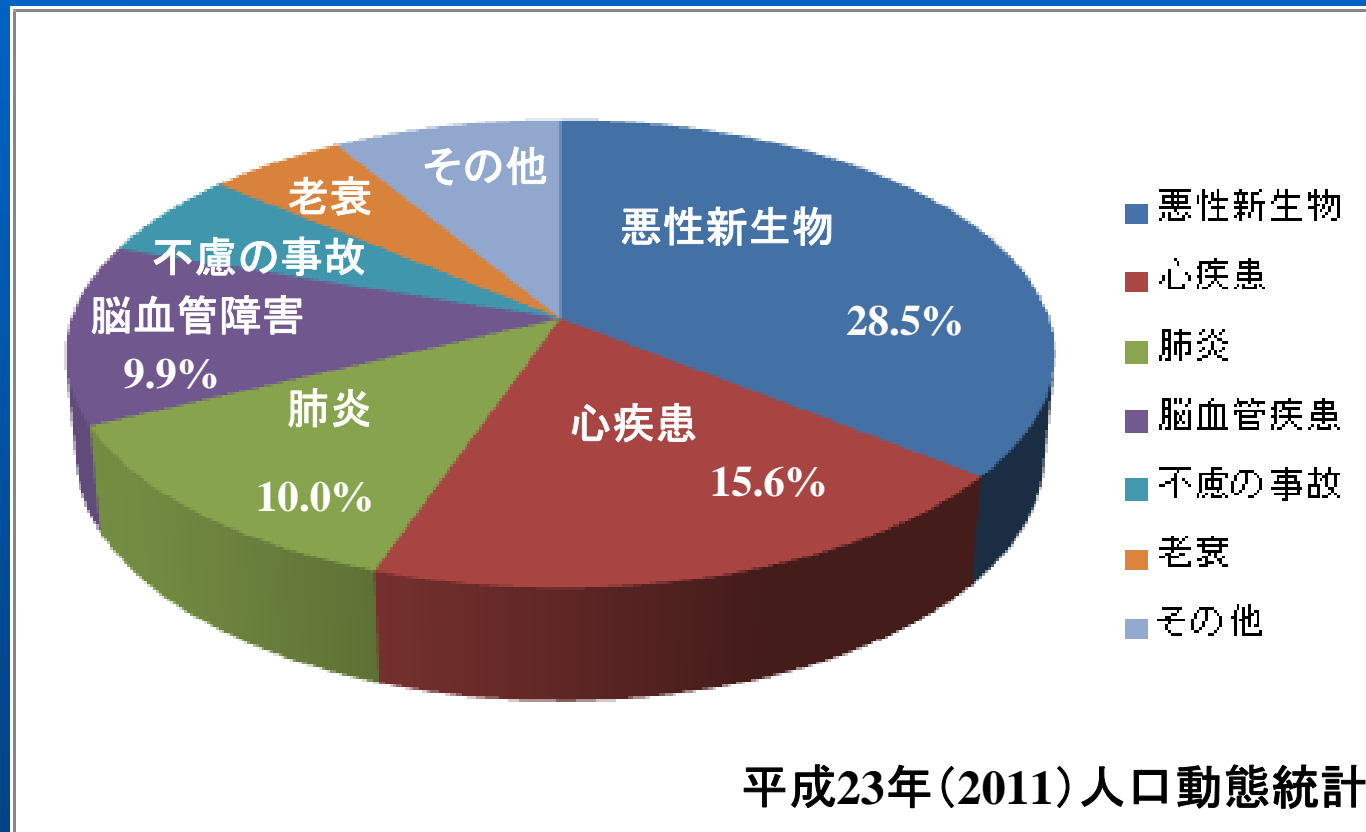


アウトライン

- はじめに
- 血液の流れと病気の関係
 - 体内の血液の流れについて
 - 血液の流れが与える影響について
- スパコンで見る血液の流れ
 - 頭の血管はどうなっているのだろうか
 - 血液の流れを見てみよう
 - * 脳内の血液の流れについて
 - * 動脈硬化症と血液の流れ
 - * 脳動脈瘤と血液の流れ
- さいごに

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



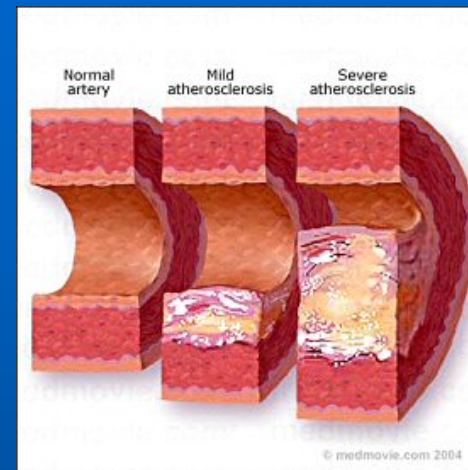
血管病変

血液の流れが重要な役割を果たしている

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

- 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)のプラークを形成する⇒**狭窄の原因(脳梗塞, 心筋梗塞などの要因)**
- **頸動脈分岐部**など、特定の場所に発生しやすい
- 動脈硬化症により狭窄が生じた場合、ステント手術が行われる。しかし、手術後に**脳出血**や**再狭窄**を起こす場合があり、術後**求められている**



内頸動脈へのステント手術



生体内環境に近い個人に対応した
in vivoな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



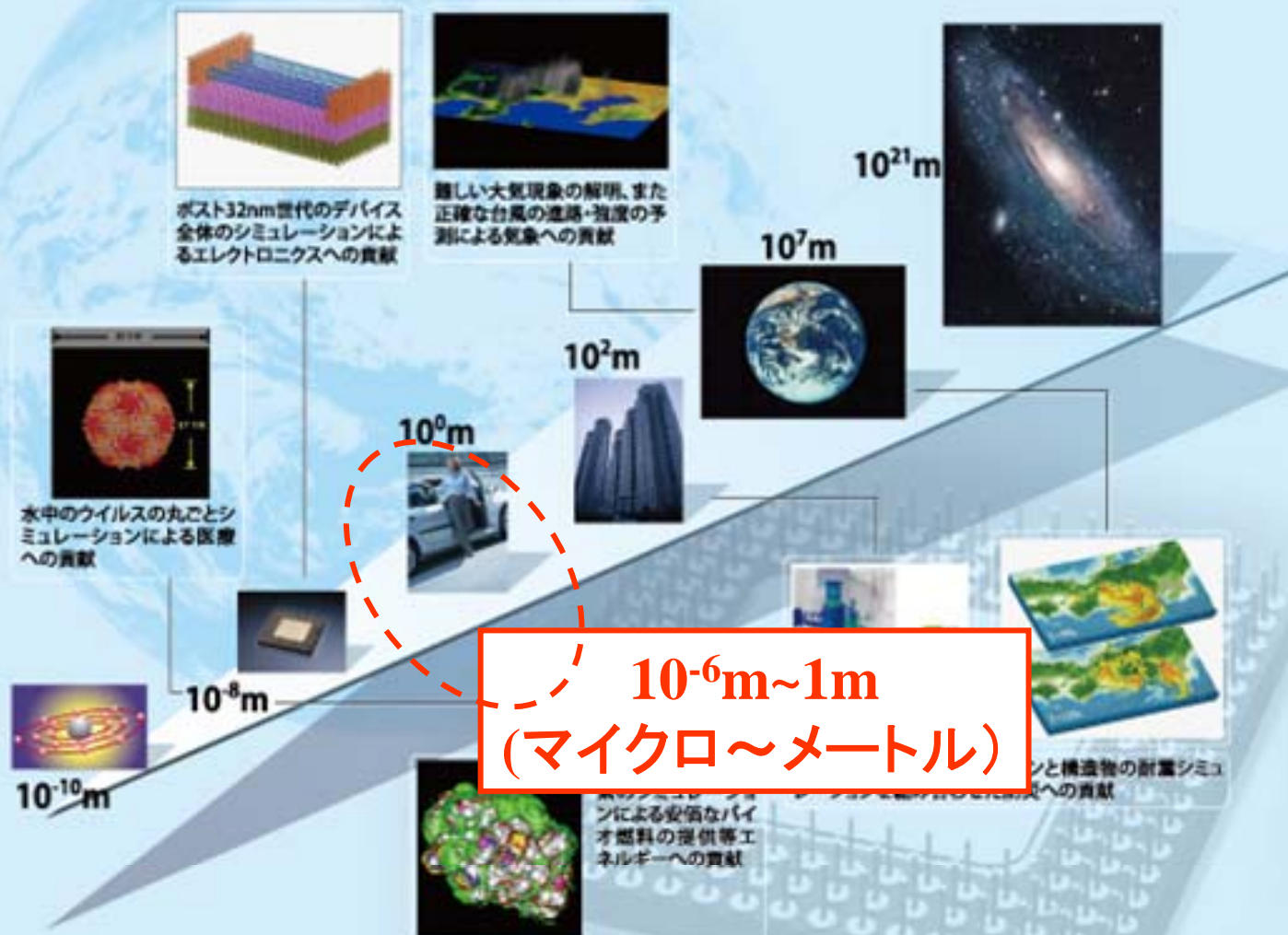
シミュレーションによる
病態の**早期予測**と**治療支援**



医用計測技術とIT(コンピュータ)
を融合した新しい予測医療の創出

京コンピュータにより広がる世界

次世代スーパーコンピュータを用いたシミュレーションの例 ～ナノから宇宙まで～

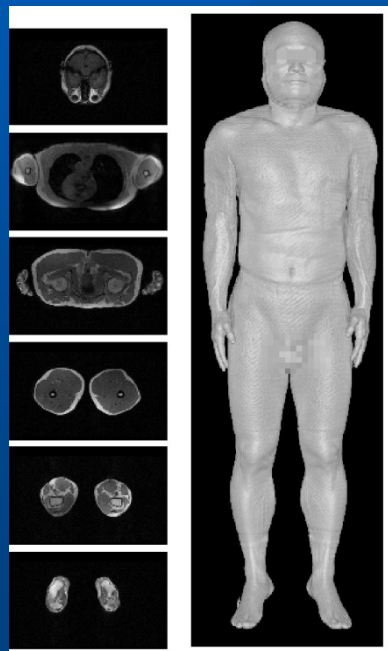
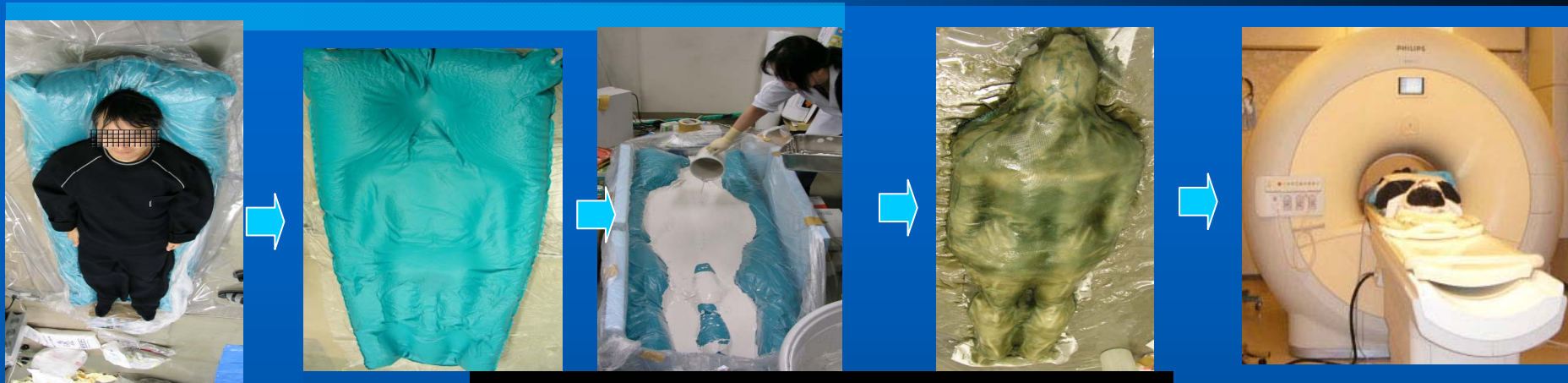


次世代スーパーコンピュータが挑む5つの分野

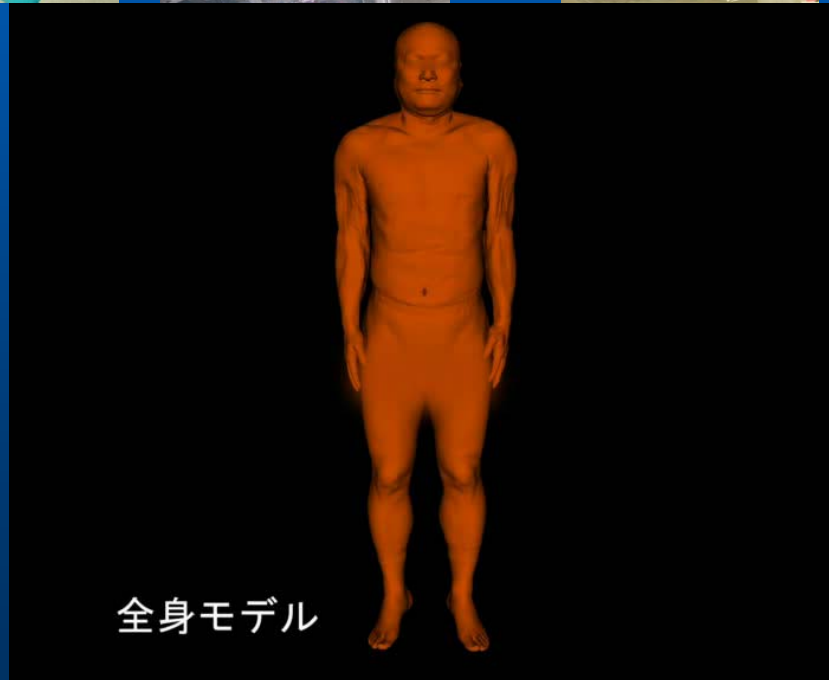


ハードウェア
&
ソフトウェア
の両輪

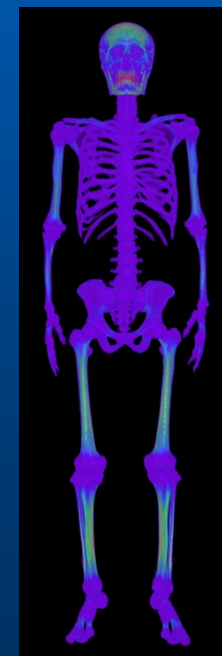
医用画像による全身モデル化



1mm間隔の全身医用画像

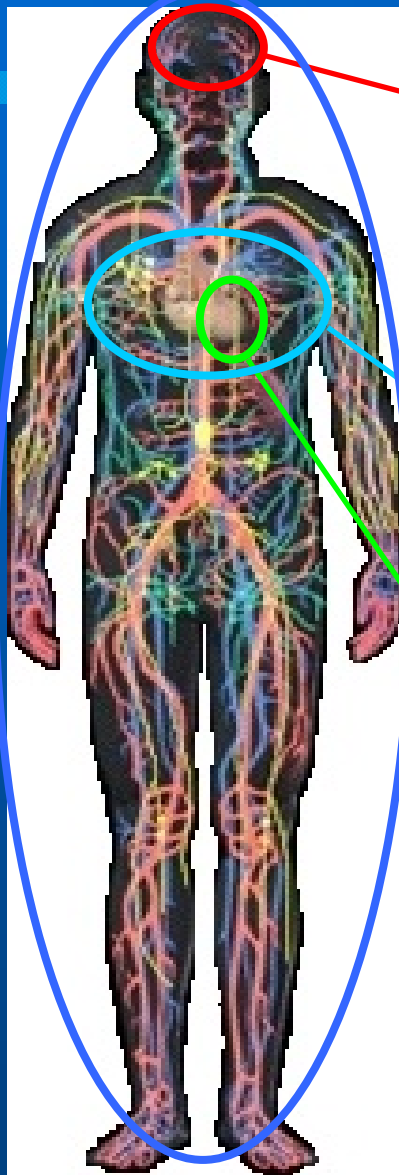


全身モデル



CT データからの
物性値の予測

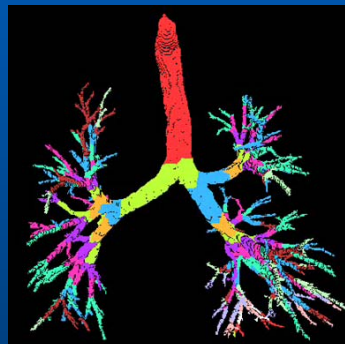
循環系のシミュレーション



Blood Circulation



Brain (脳動脈瘤, 脳梗塞)



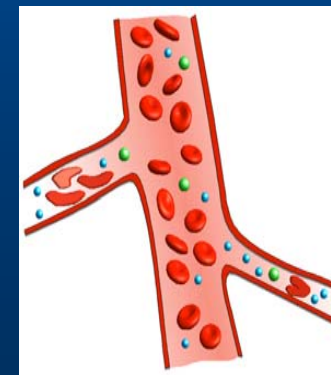
Lung (肺呼吸, 肺循環)



Heart (各種心臓病)



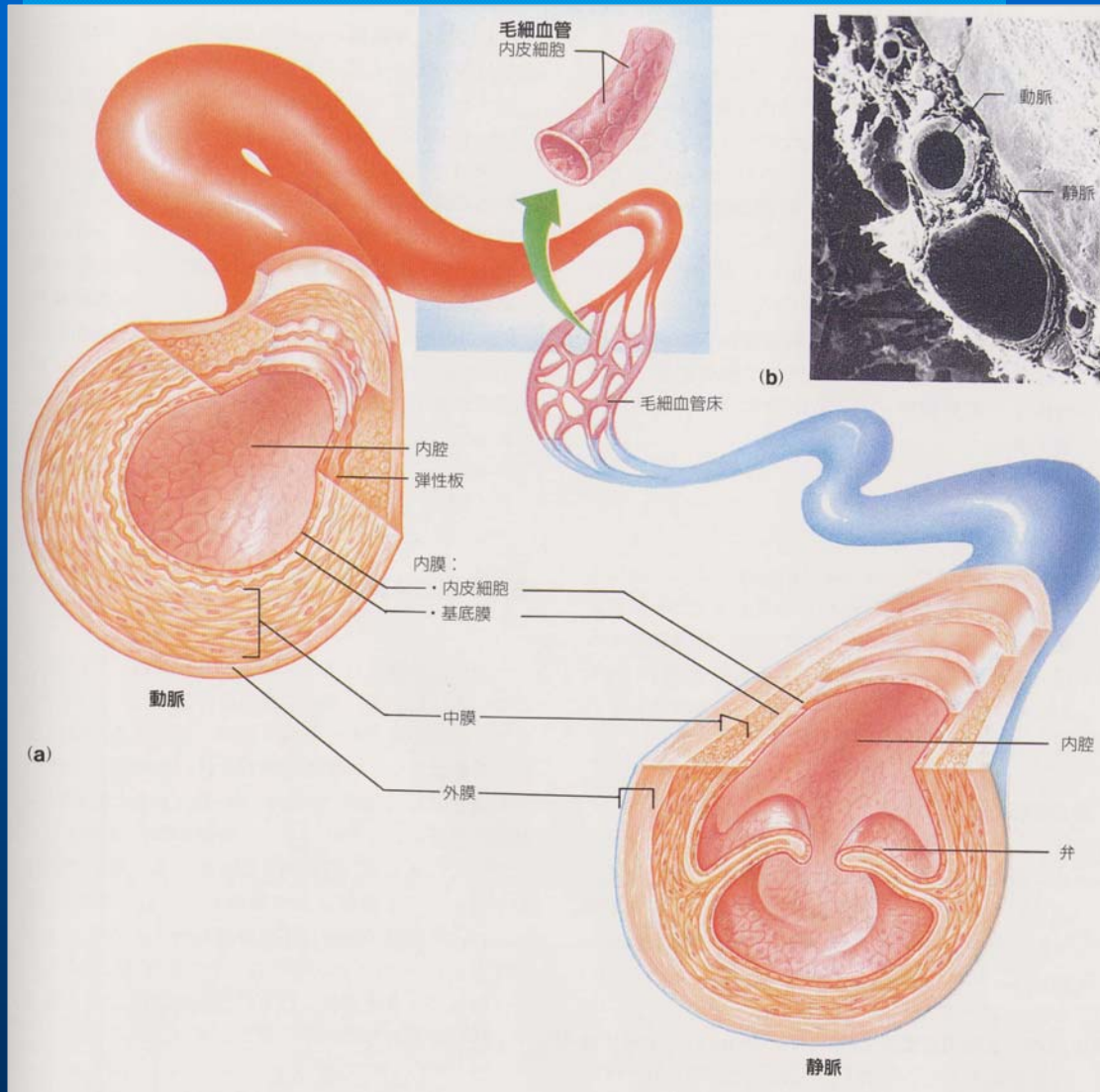
Vessels Network (全身血管網)



Micro-circulation (微小循環)

血液の流れと循環器系疾患

血液は血管の中を流れている



* 血管の長さをすべて合計すると地球何周分？

- 1) 3 万km 2) 6 万km
3) 9 万km 4) 12万km

ヒント: 地球1周は4 万km

* 血液は様々な太さの血管の中を流れる

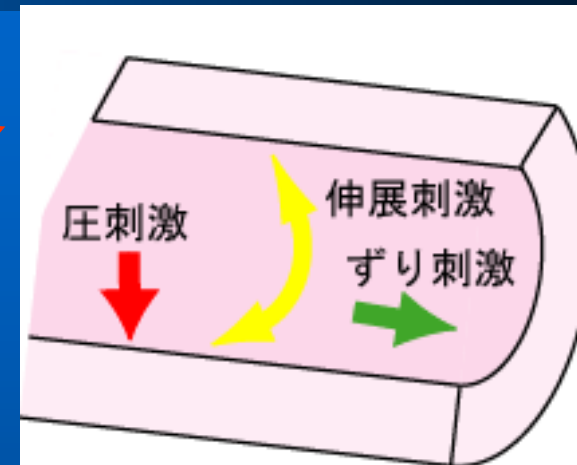
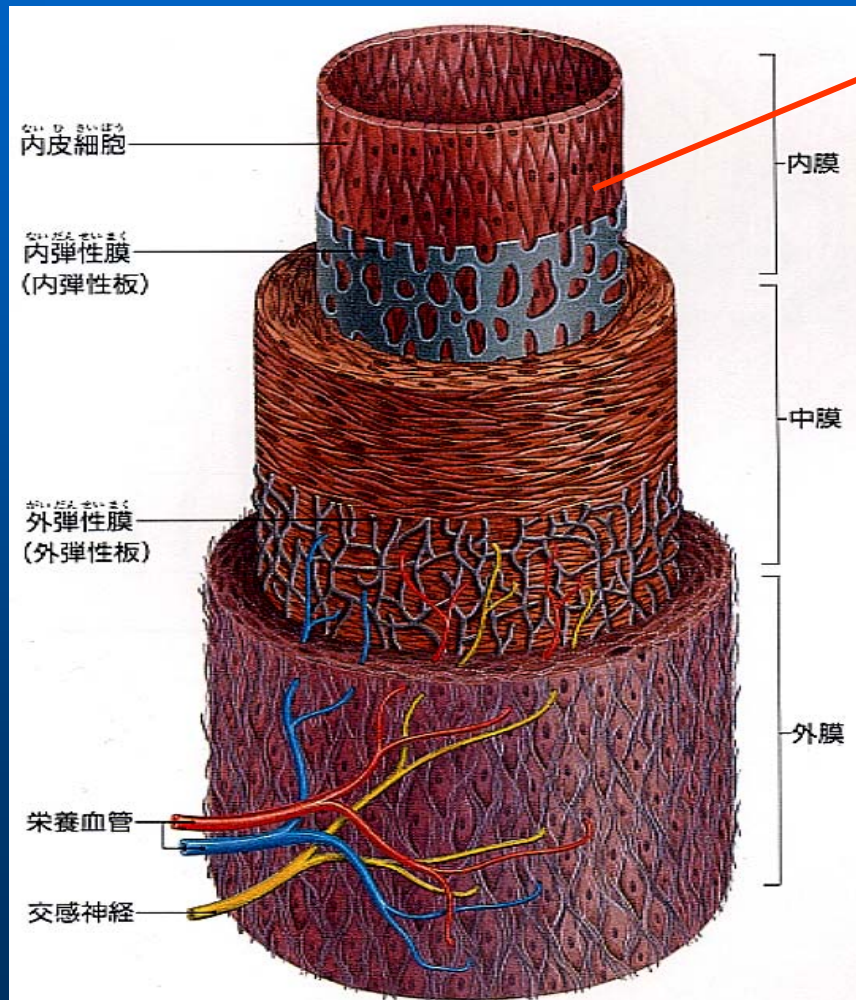
一番太い血管

- 1) 10 mm 2) 25mm
3) 30 mm 4) 50 mm

一番細い血管

- 1) 5 μm 2) 50 μm
3) 500 μm 4) 1mm

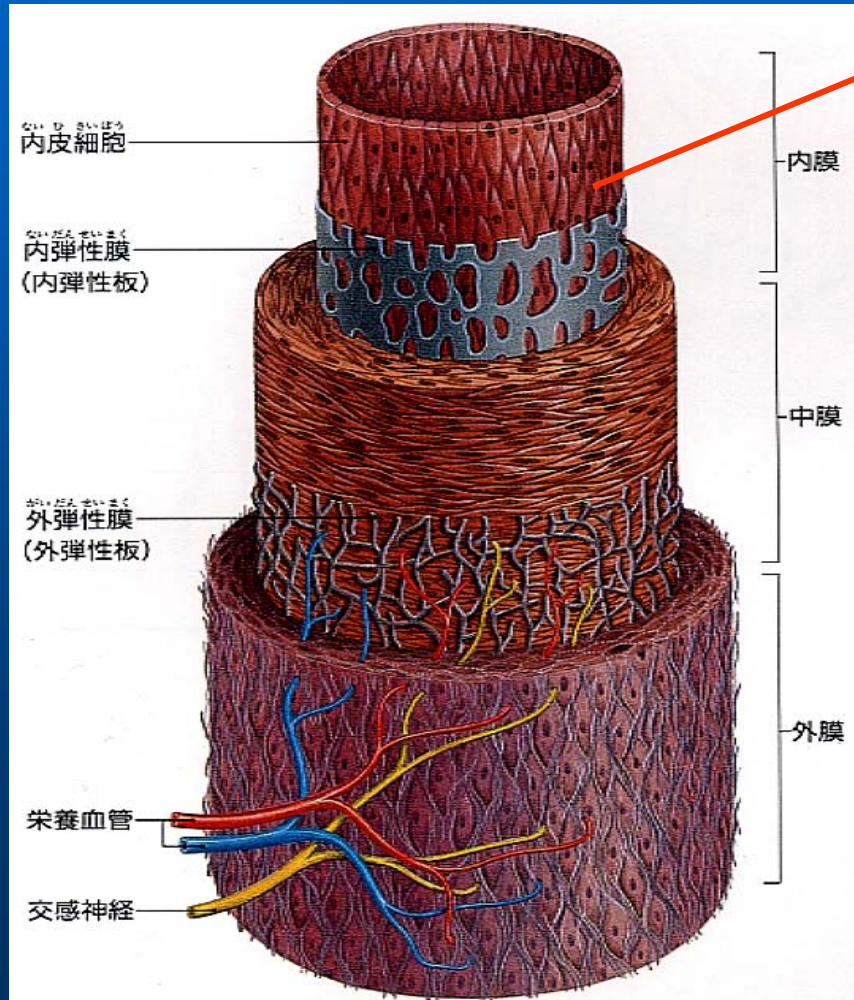
血管の構造



- 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

血管の構造



正常な場合



低い場合

体内の血液の流れはどうしたらわかるの？

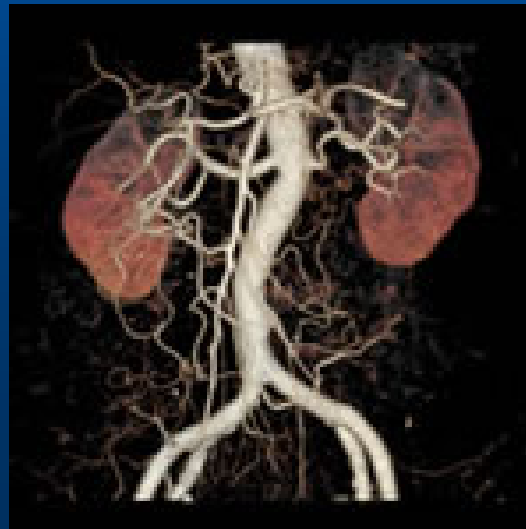
- 皮膚や骨があるため、外から体内の様子を見ることはできない。



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

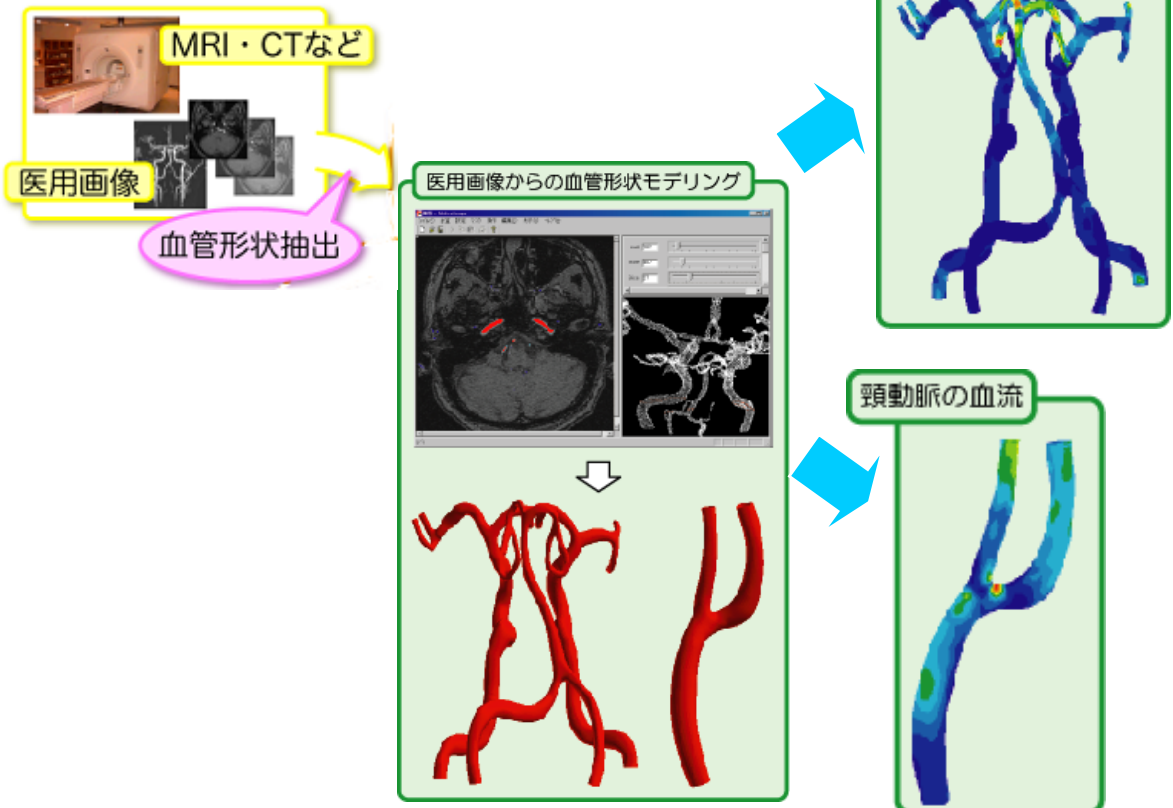
血液の流れの様子を知るには？

医用画像や実験
では限界

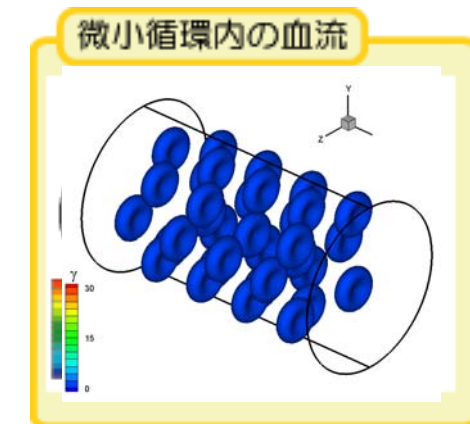
組み合わせ

コンピュータ・シミュレーション

太い血管 (100 μm 以上)



細い血管 (100 μm 以下)



シミュレーションの利点と高度医療への発展

● 医用画像との組み合わせによる新しい展開

従来の手
動物実験
臨床試験
疫学調査

+

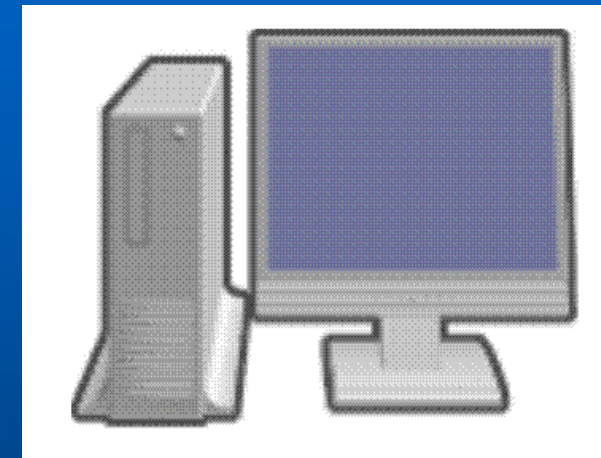
コンピュータ
シミュレーション

- ・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

● 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」

シミュレーションの流れ



コンピュータを使って方程式(大規模連立一次方程式)を解く。
($y=ax+b$)

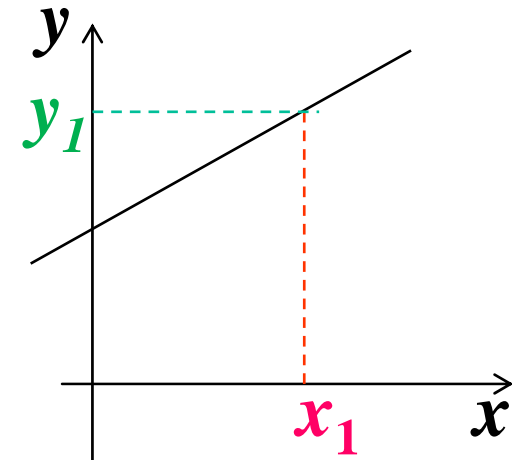


結果をコンピュータグラフィックスを使って表示する。

シミュレーションとは

- ・ x_1 を求めるには

$$y_1 = ax_1 + b \quad \rightarrow \quad x_1 = \frac{y_1 - b}{a}$$



- ・ x_1, x_2 を求めるには

$$\begin{aligned} y_1 &= a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + b_1 \\ y_2 &= a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + b_2 \end{aligned} \quad \rightarrow \quad \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} y_1 - b_1 \\ y_2 - b_2 \end{Bmatrix}$$

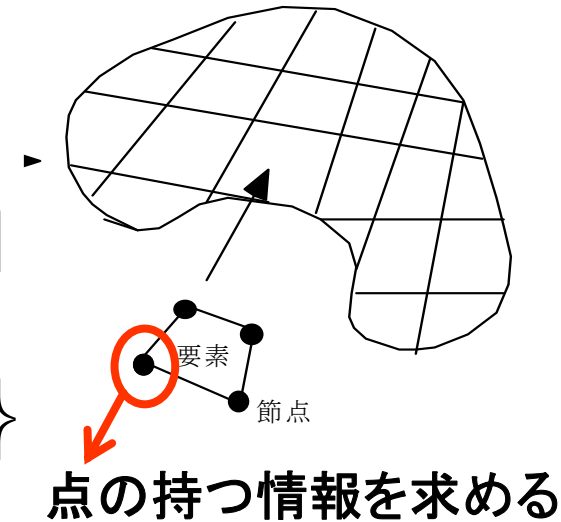
逆行列から手算で求められる

$$\begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = A^{-1} \begin{Bmatrix} y_1 - b_1 \\ y_2 - b_2 \end{Bmatrix} \quad A^{-1} = \frac{1}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}} \begin{bmatrix} a_{22} & -a_{12} \\ -a_{21} & a_{11} \end{bmatrix}$$

規模が大きくなったら

- x_1, x_2, \dots, x_n を求めるには

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{n2} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{n2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{n2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} y_1 - b_1 \\ y_2 - b_2 \\ \vdots \\ y_n - b_n \end{Bmatrix}$$

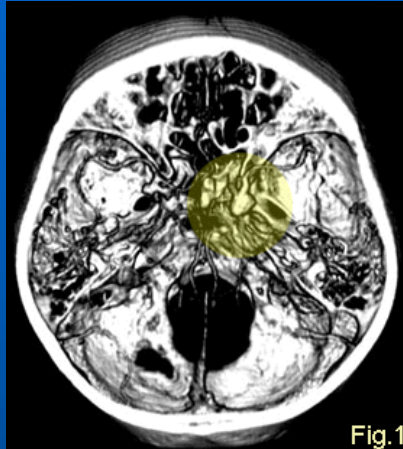


手算では求められない

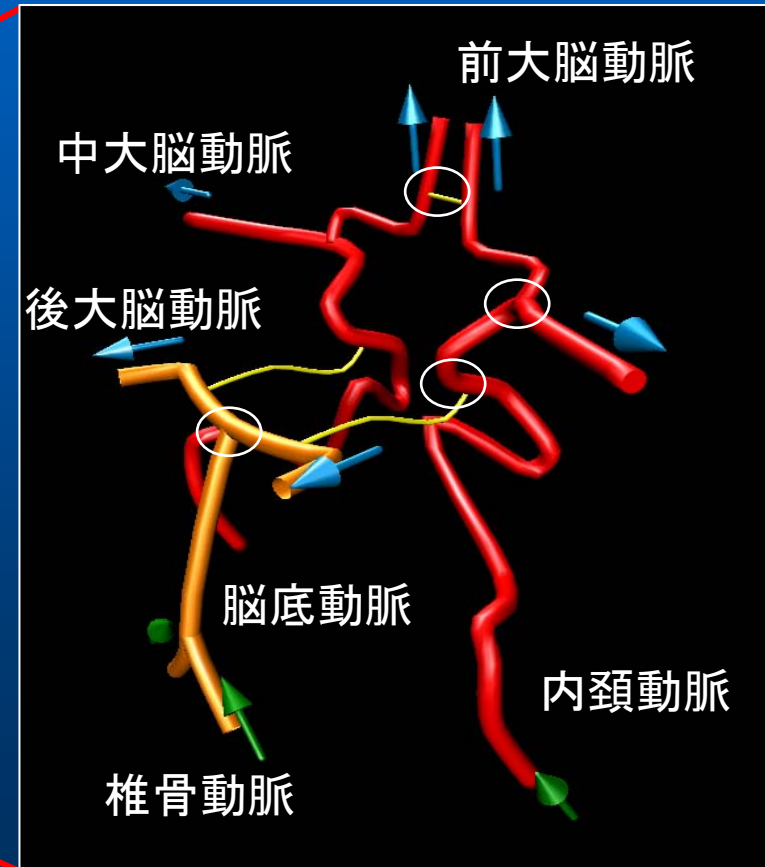
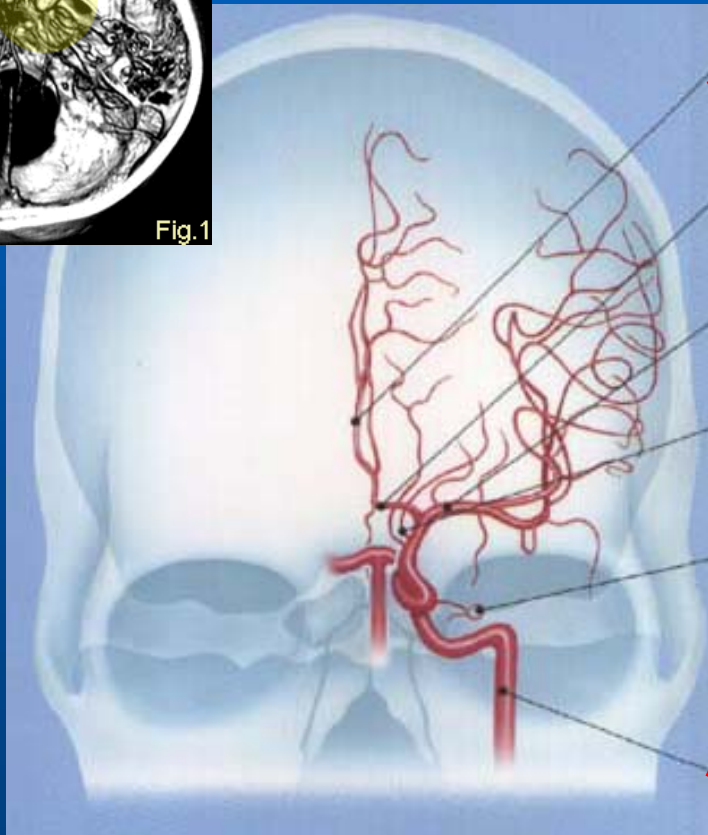
コンピュータを使って計算

循環器系のシミュレーション

脳の中の血流



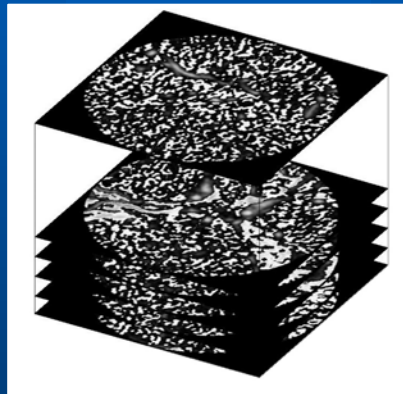
脳動脈瘤
(10mm程度の嚢状の瘤)



ウィリス動脈輪 (主要な脳血管網)¹

医用画像からのモデリングとシミュレーション

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

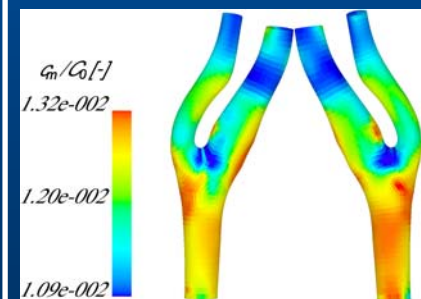
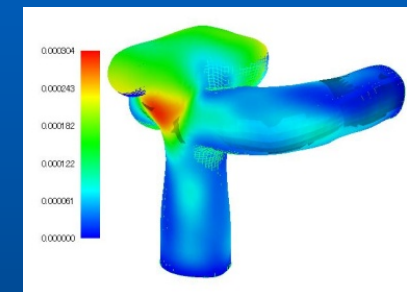


頸動脈



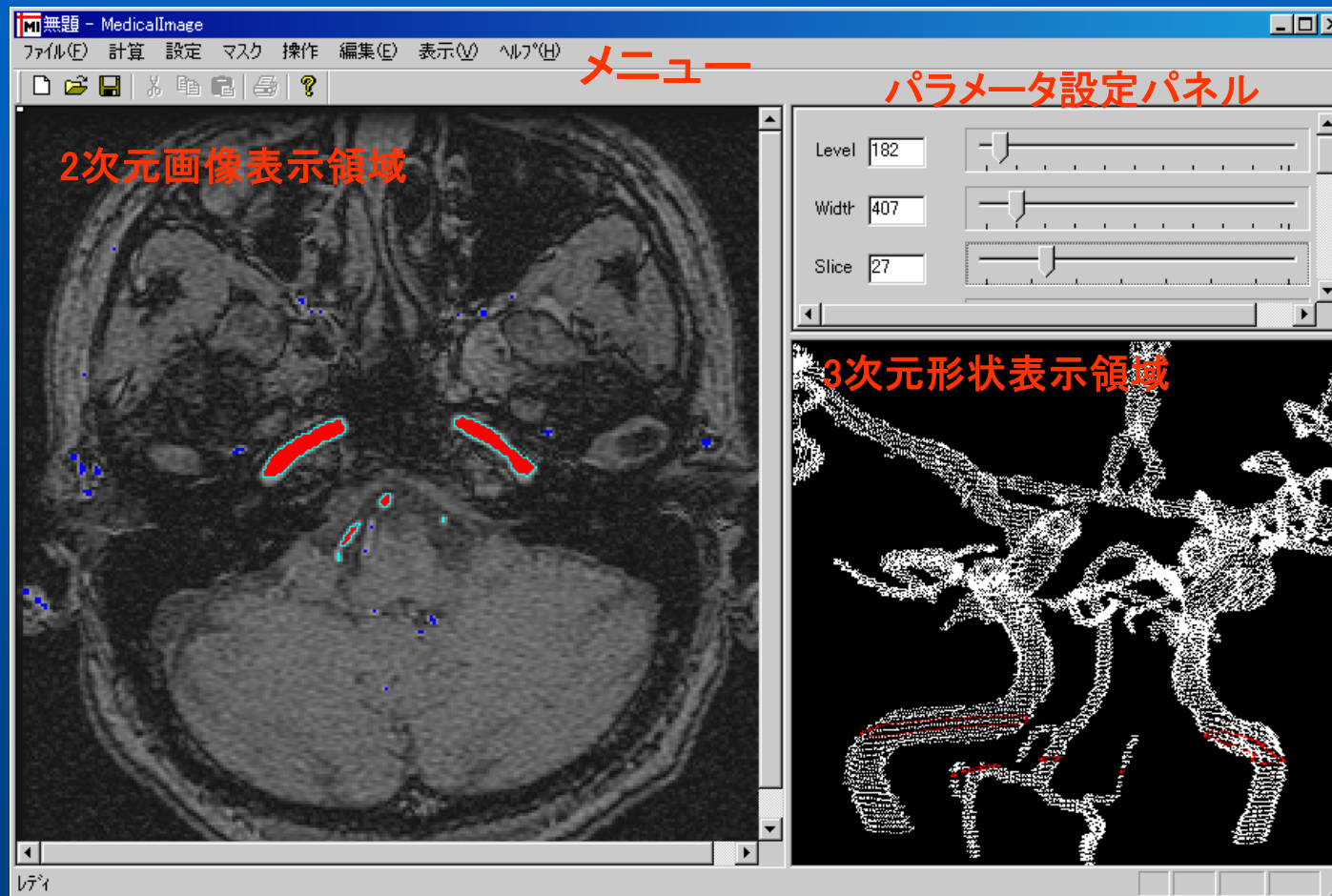
シミュレーション

結果の可視化

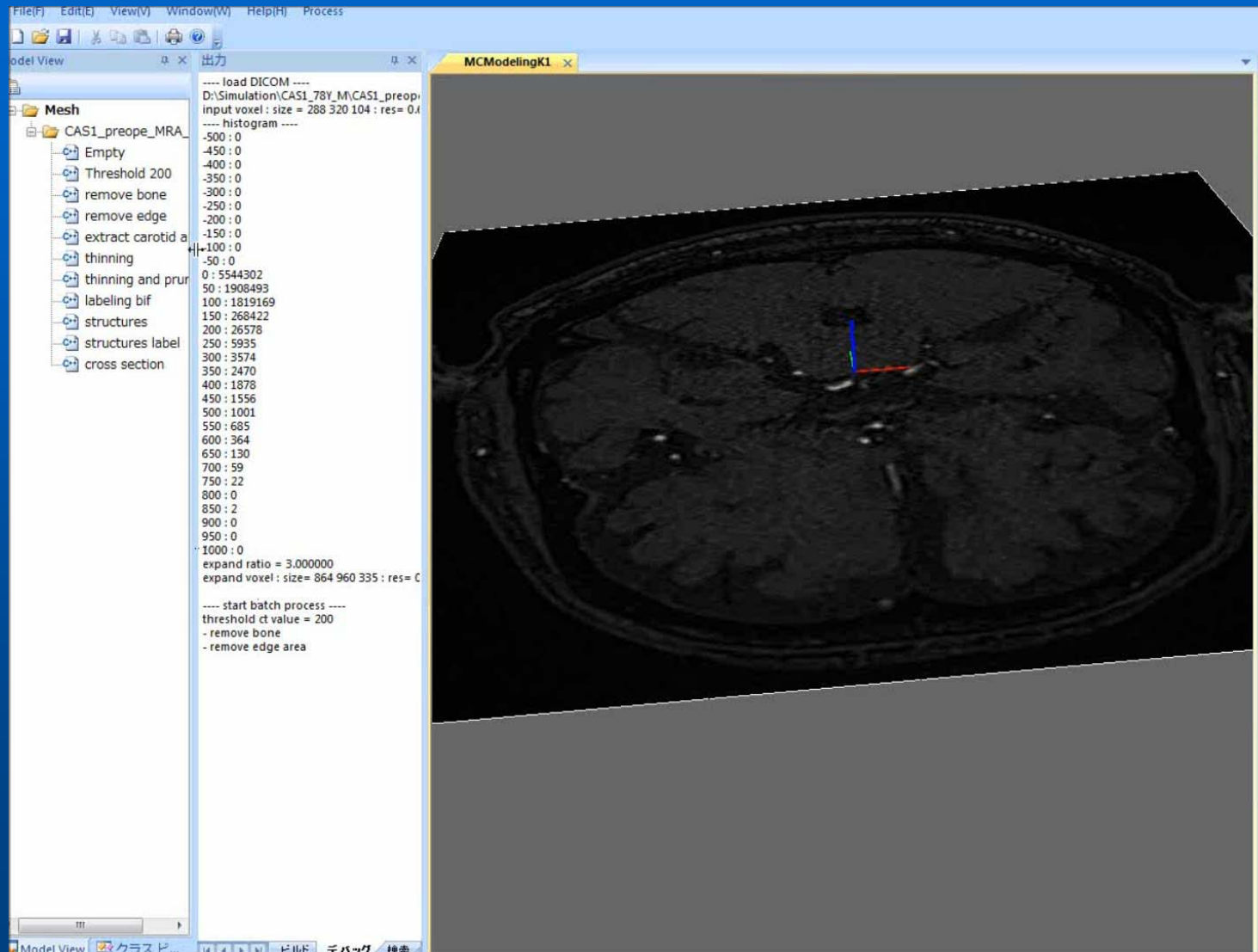


医用画像からの血管モデリングとパラメータ化

MC-Modeling画面



GUIによるInteractiveな操作

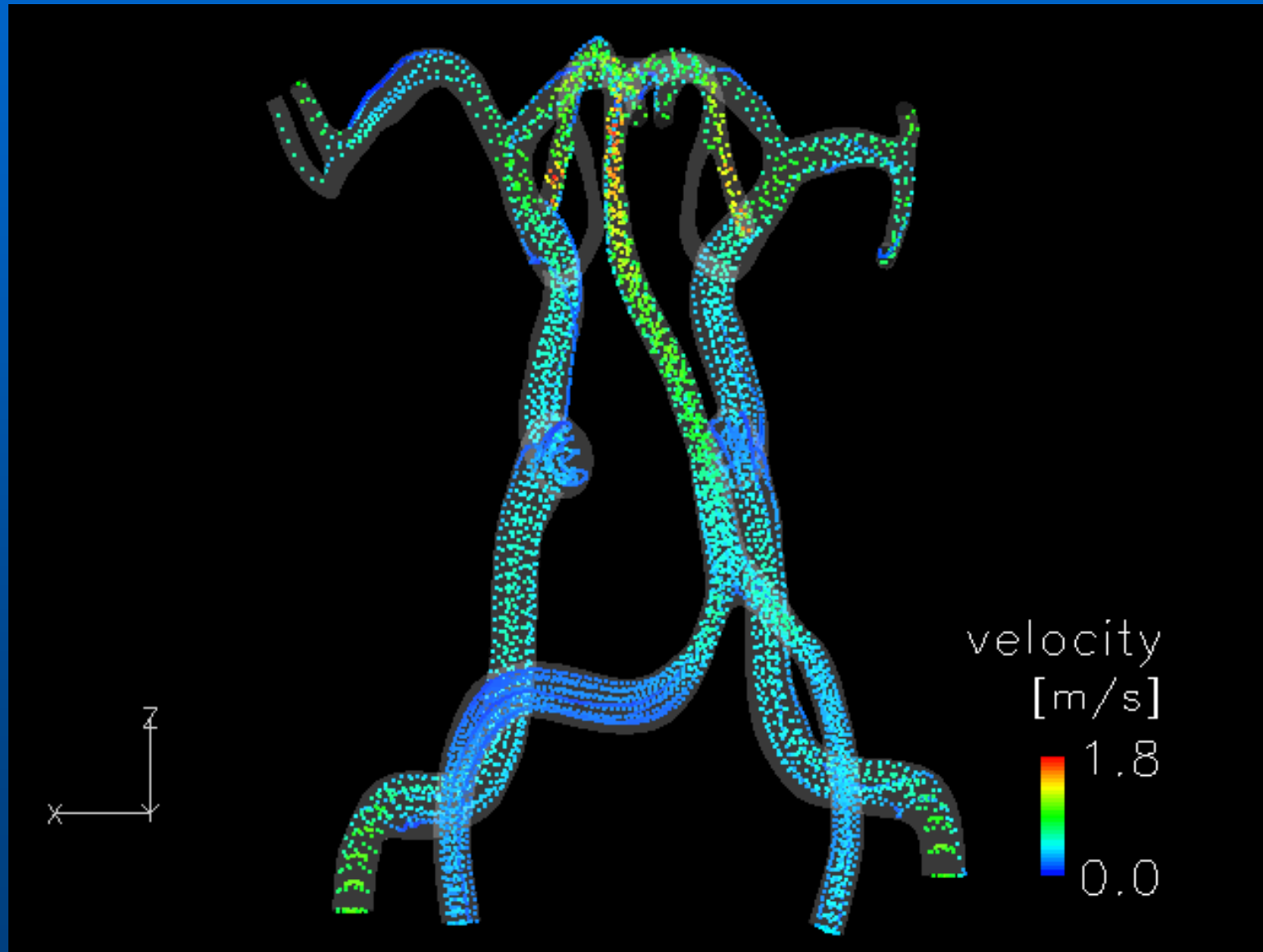


脳血管網 (Willis動脈輪) の3次元モデル

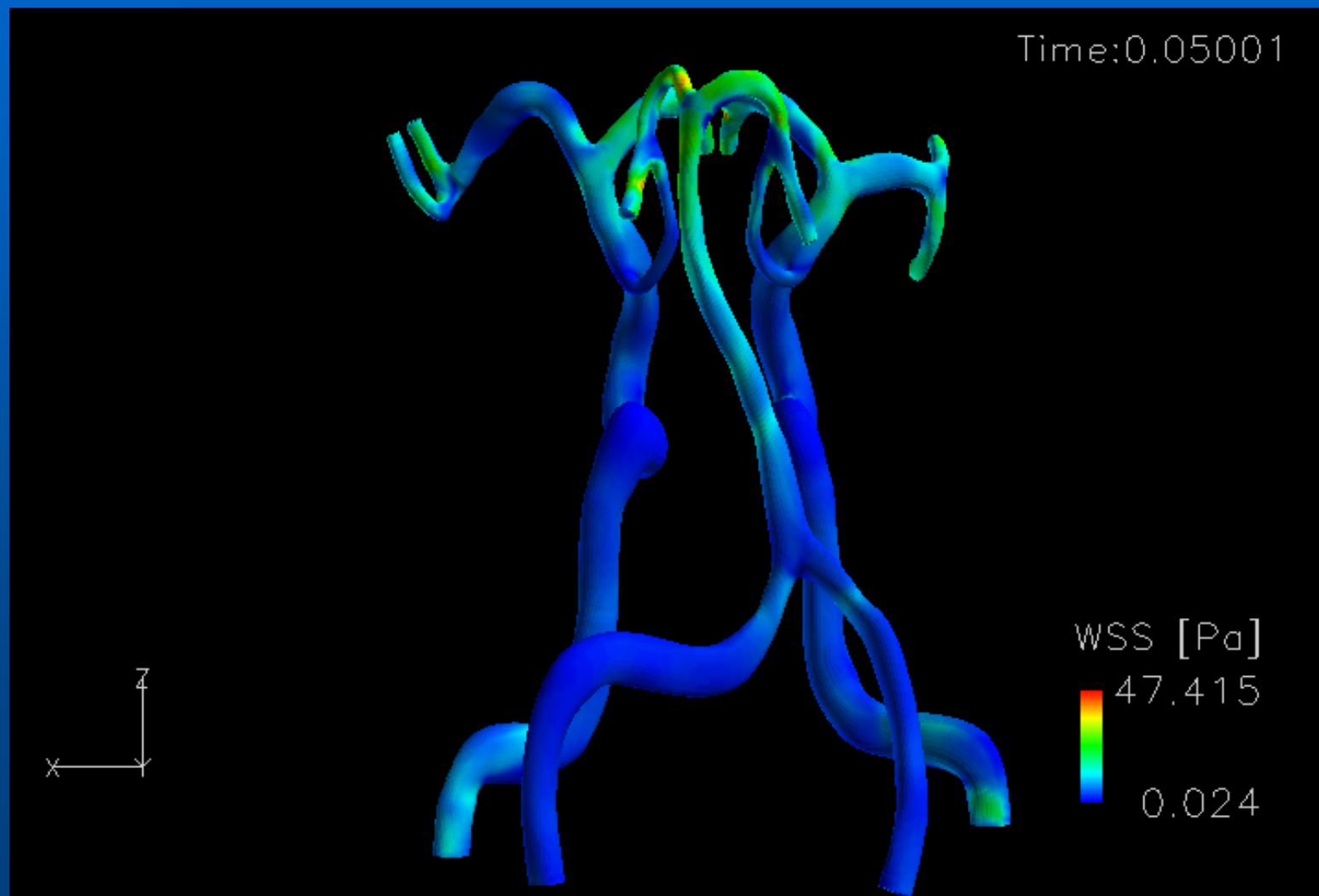


分岐・屈曲が多く，非常に複雑な形状

脳内の血流について

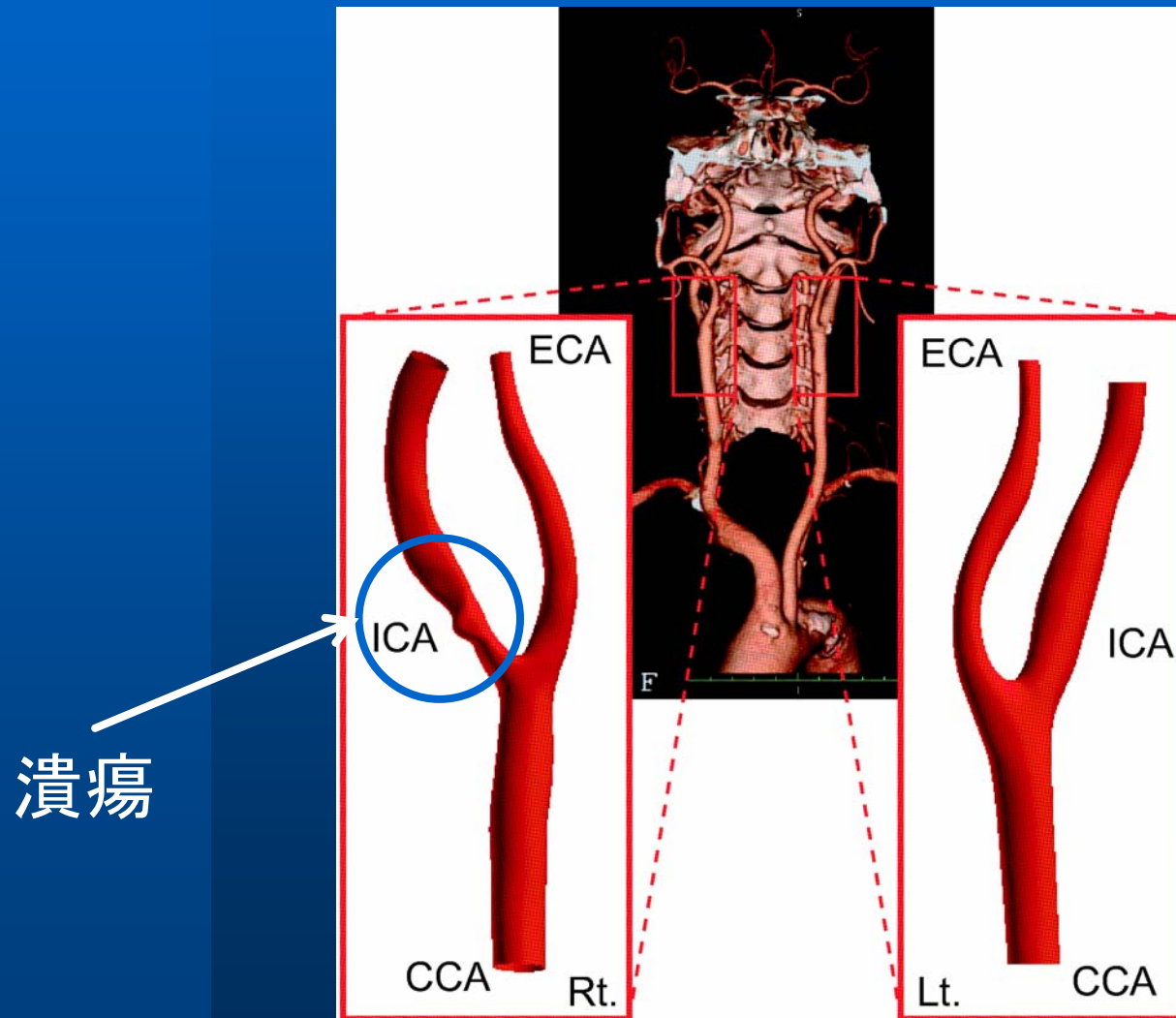


解析結果



動脈硬化症の解析例

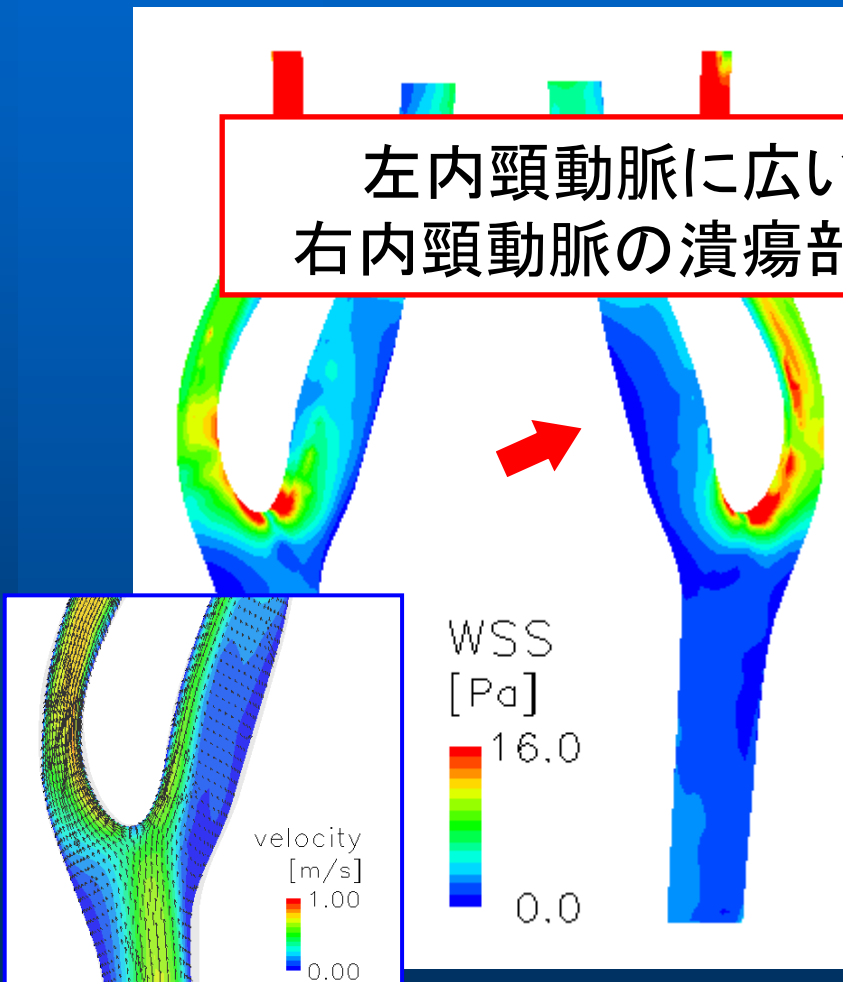
- 解析対象：66歳男性の左右総頸動脈分岐部



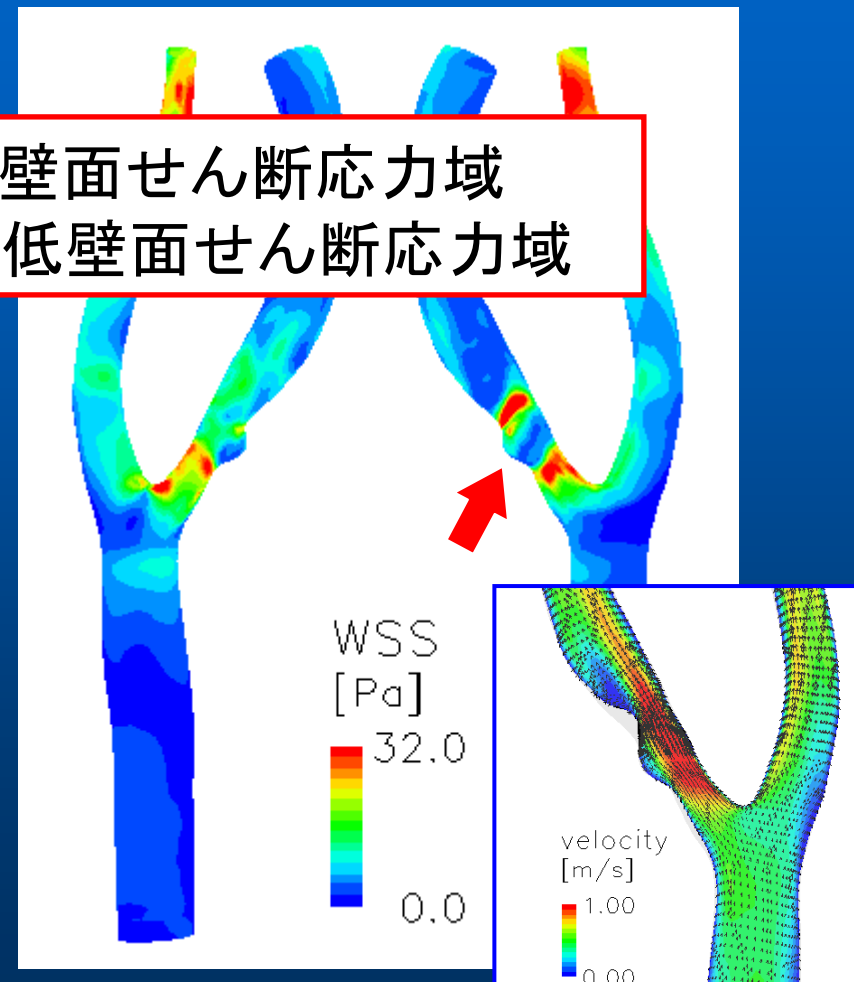
血流により血管壁にかかる力

– 時間平均化した壁面せん断応力分布

左内頸動脈に広い低壁面せん断応力域
右内頸動脈の潰瘍部が低壁面せん断応力域



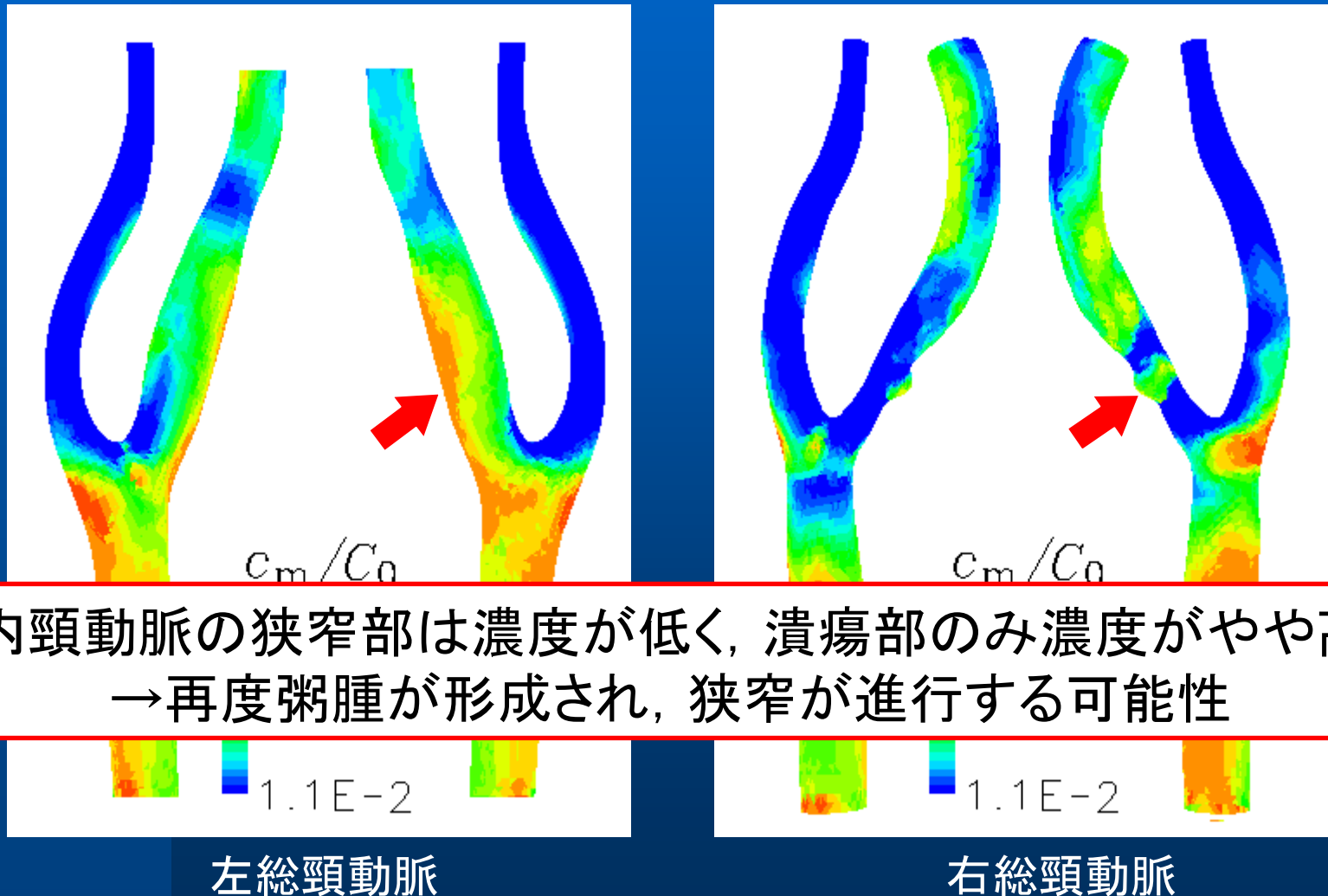
左総頸動脈



右総頸動脈

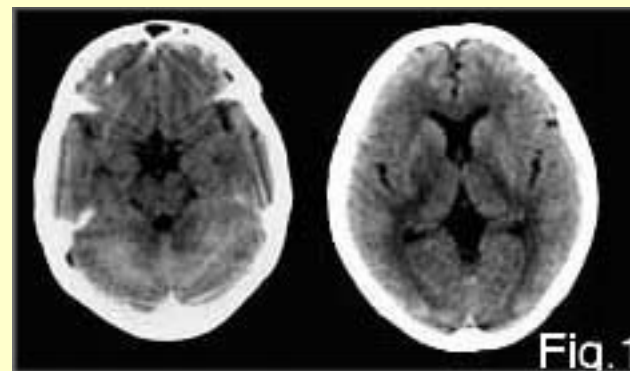
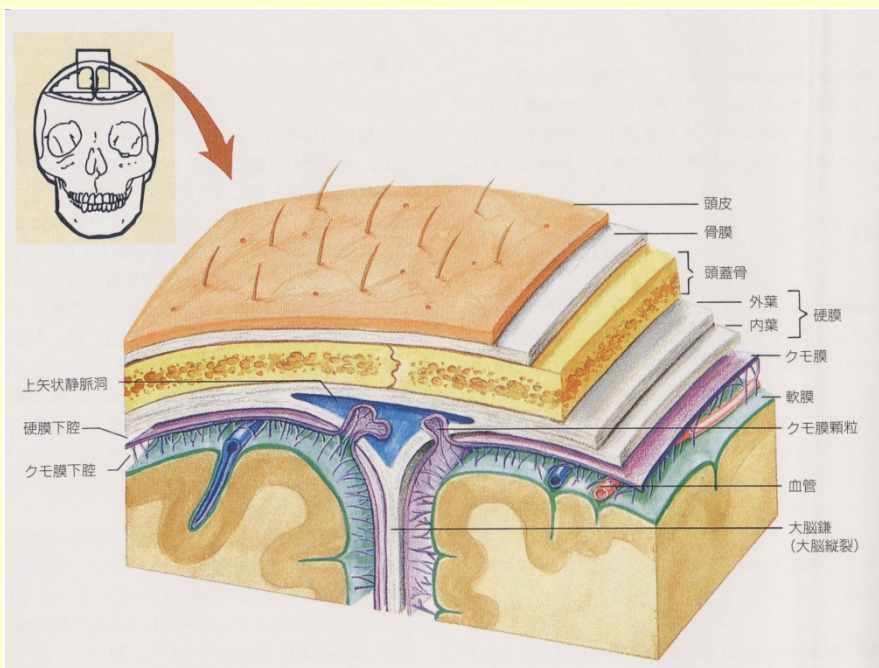
血管壁内のLDLの分布

– 内膜直下での濃度分布

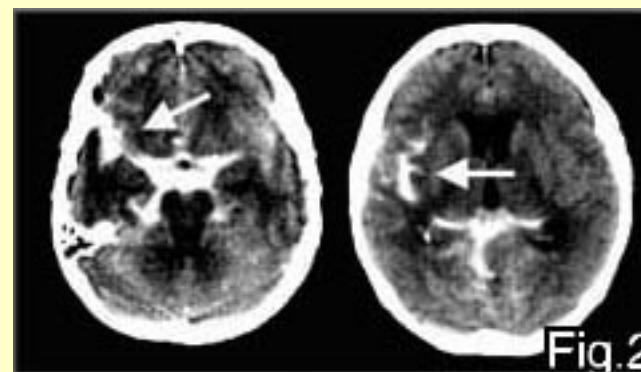


くも膜下出血について

CT(コンピュータ断層撮影)



正常



くも膜下出血

脳動脈瘤(こぶ)の破裂!!

発生率: 1 / 1万人/年
半数が半年以内に死亡

70~80%

動脈瘤について

- **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: 1/100人 (全人口1%)
 - > 脳ドックの導入により、6%に増加
 - 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%

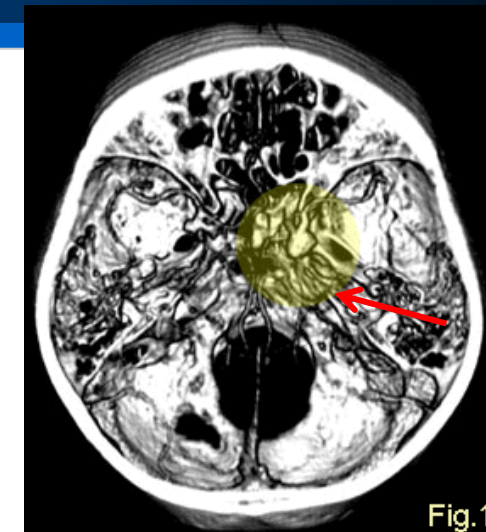
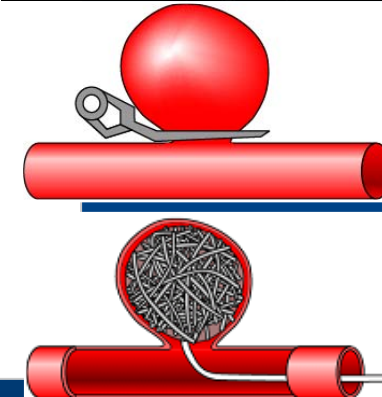


Fig.1



クリッピング
コイルリング

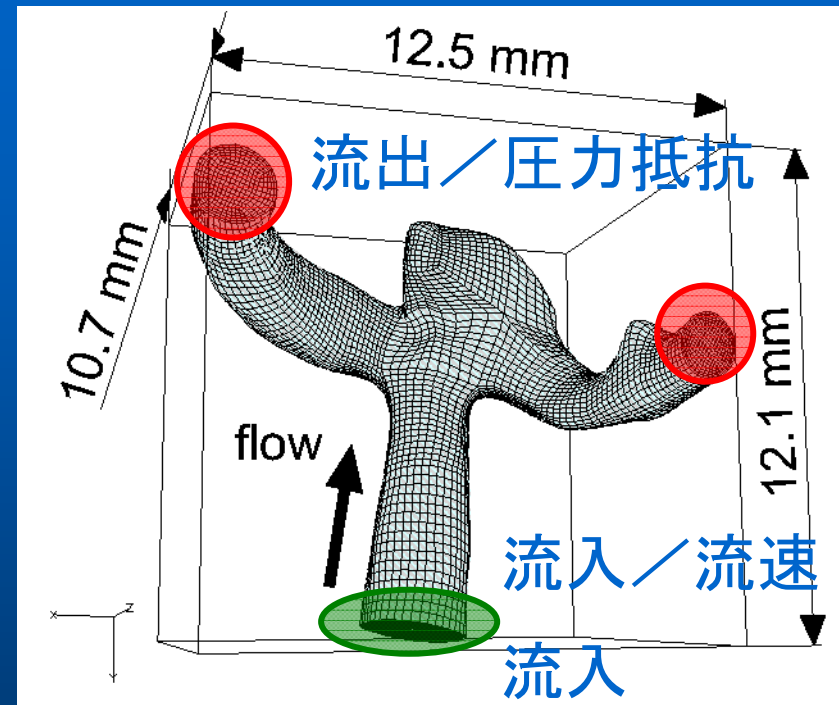
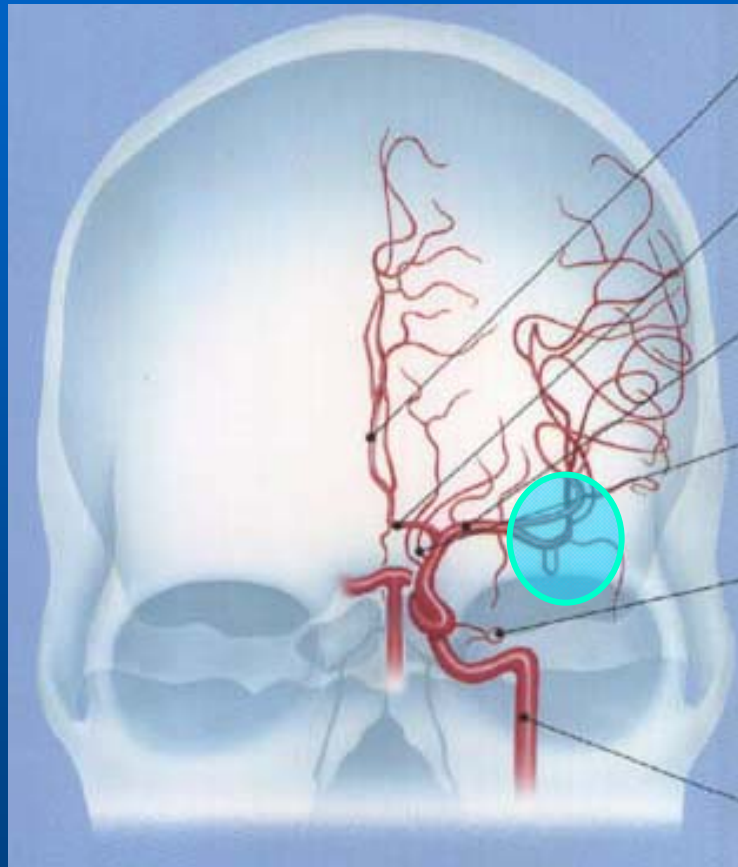
現状

手術に対する明確な指針なし

発生・成長・破裂の要因の解明
破裂の危険度の予測
→ より安全な治療・予防

脳動脈瘤について

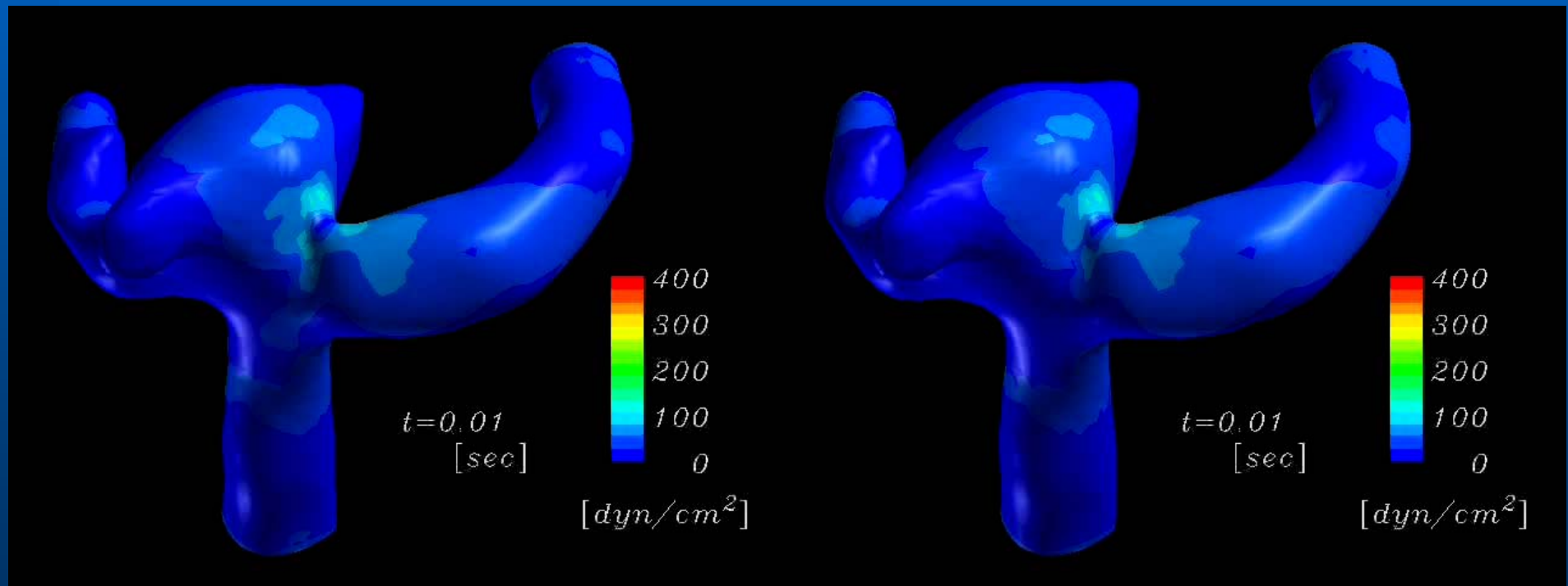
● 中大脳動脈分岐部 (59歳女性)



- 血液は人血の物性値を用いている
- 血管壁はヒトと同じ物性値を用いている

壁面せん断応力 (血流が血管壁をこする力)

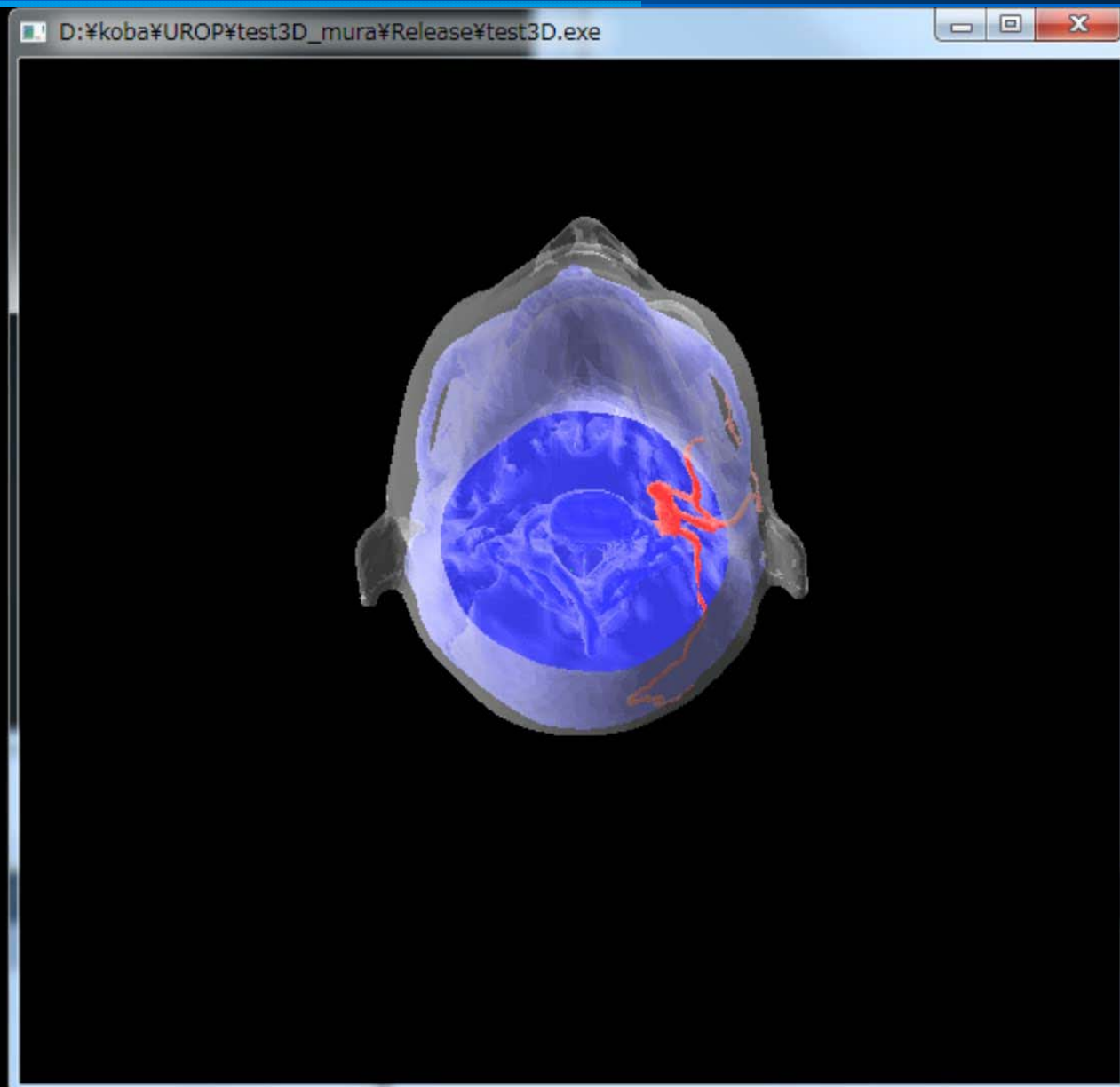
- 正常血圧 (80~120 mmHg)
- 高血圧(110~170 mmHg)



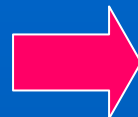
弾性壁-正常血圧-

弾性壁-高血圧-

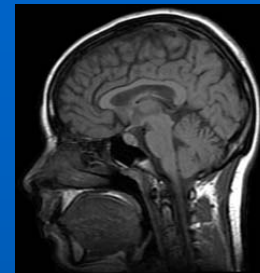
結果の可視化



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



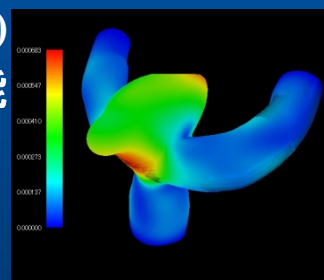
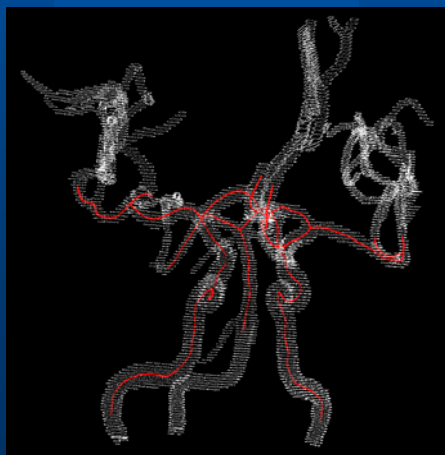
データの可視化
による診断



シミュレーション技術
(M-SPHyR Circulation)



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

本研究は、文部科学省 最先端・高性能汎用スーパーコンピュータの開発利用「次世代生命体統合シミュレーションソフトウェアの研究開発」の支援を受け行われました。

- 高木周（東京大学・理化学研究所）
- 梁夫友（理化学研究所）
- 姫野龍太郎（理化学研究所）
- 大島研スタッフ・ポストドク・学生
- 鳥井亮(Imperial College, U.K.)
- 庄島正明(東京大学大学医学部脳神経外科)
- 高木 清(藤田保健衛生大学医学部脳神経外科)
- 早川基治(藤田保健衛生大学医学部脳神経外科)
- 小泉昭夫(京都大学大学院医学研究科環境衛生学分野)
- 山田茂樹(浜松労災病院)

ご清聴ありがとうございました