





# 計算機機生体力学の 脳神経外科領域における応用

深作和明、根來 眞、姫野龍太郎



# Clinical Application of Biomechanics or Human Simulator in Neurosurgery

#1 Diseases

#2 Treatment Modalities



# 中枢神経系の疾患

---

- 血管障害
- 新生物（腫瘍）
- 先天奇形
- 変性疾患
- 炎症
- 外傷
- その他



# 治療法

---

- 脳神経外科的なもの
  - 開頭術
  - 血管内手術
  - 集中放射線療法 (radiosurgery,  $\gamma$ -knife)
  - その他
    - 脊髄脊椎手術、穿頭術など
- 神経内科的なもの



# 神経組織の解剖学的な特徴

---

- 骨に囲まれている
  - 動きに極めて乏しい
  - 超音波が非常に使いづらい
  - 診断機器間の位置合わせにマーカを使える
- 血管周囲に支持組織が乏しい
- 水溶性物質が血管外に出られない
- 水（脳脊髄液）の中に浮いている



# 血管障害

---

- 出血性疾患
  - クモ膜下出血
    - Subarachnoid Hemorrhage (SAH)
  - 脳出血（脳内出血）
- 脳梗塞（虚血性疾患）
  - 塞栓症（他所から「血栓」が流れてくる）
  - 血栓症（血管狭窄自体が問題となる）
- Others



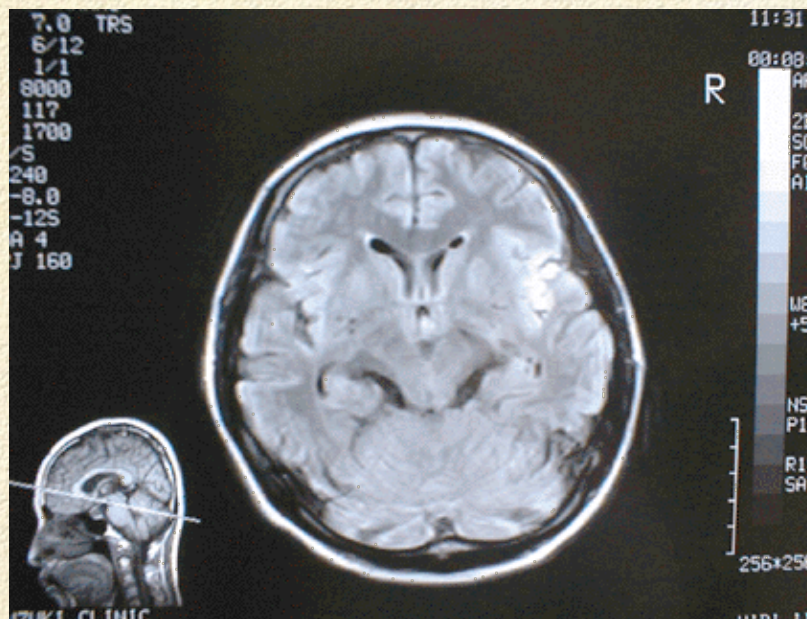
# SAH

---

- Rupture of Intracranial Anrusysms >80%
- Others
  - AVM, dural AVF
  - Brain tumor
  - Head Injury
  - Bacterial Aneurysm



# SAH の診断



- CT Scan
- MRI
- Lumbar Tap



# SAH の予後

---

- 15 % of Sudden Death
- 27% of SAH is NOT Indication of Treatment
- 37 % Death in SAH Patients



# SAH の予後

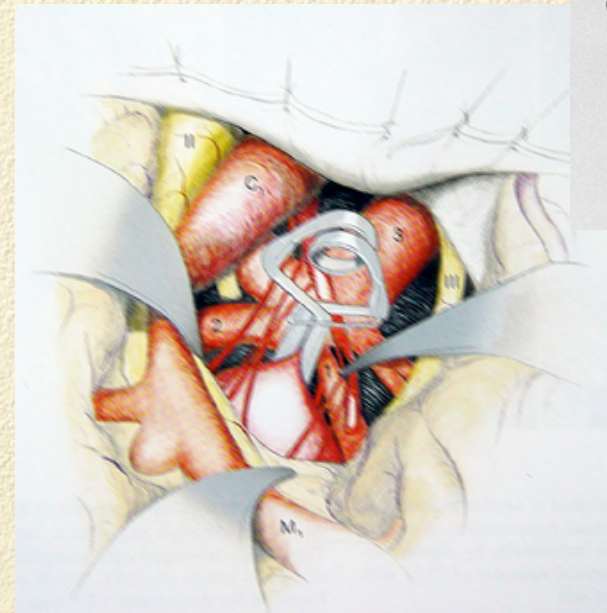
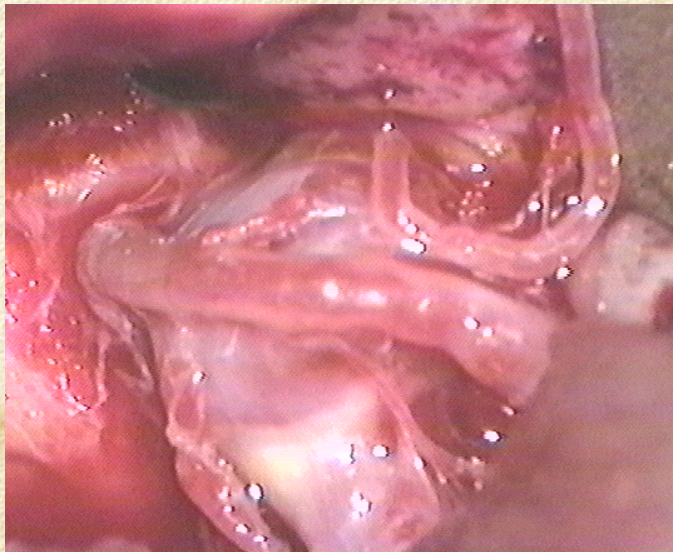
---

- 10 - 20 SAH per Year per 100000 Population
- 10 % of Cerebrovascular Accident
- 50% of Hemorrhagic Stroke
- 
- 32 - 67 % Death
- 30 % Need Support
- 10 - 50 % Can NOT Come to Hospital?
- 
- 1/3 死亡、1/3 障害が残る、1/3 自立



# 脳動脈瘤

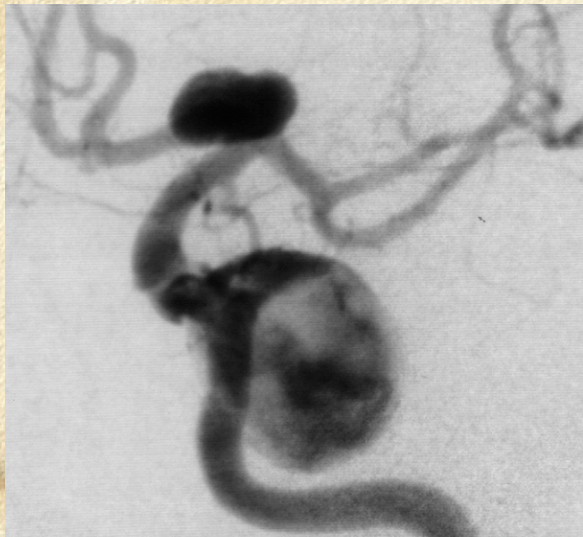
- 動脈壁の嚢状の拡大で、主に動脈の分岐部に発生する。



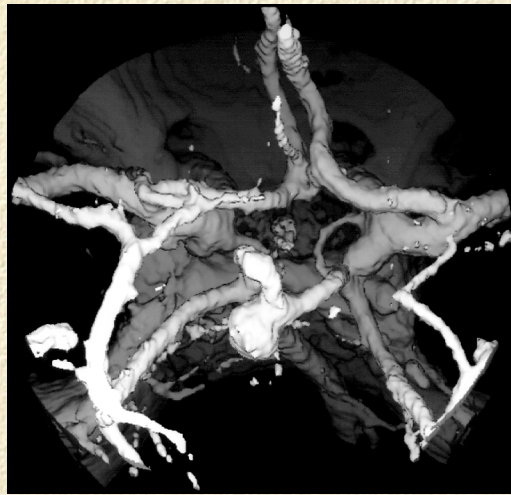


# 脳動脈瘤の存在診断

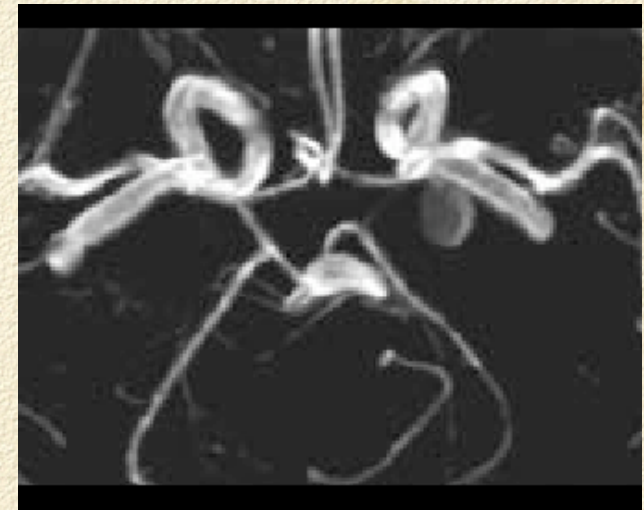
---



DSA



3D CTA



3D MRA (TOF)



# 未破裂脳動脈瘤の破裂の可能性

---

- 破裂率: 1 - 2 % per year
- 破れやすい動脈瘤
  - > 5 or 10 mm
  - 不規則な形態
  - Daughter or Bleb
  - 発生部位 (脳底動脈分岐部 or 前交通動脈)
  - 破裂例で発見された未破裂瘤




# 何故、破れるのか??

□ 動脈瘤壁が内圧に耐えきれなくなったため?


□ 急激な血圧の変化

□ In-flow jet があたる部位?

□ いびつになって力が不均一にかかった?

□  力学的解析が有用

□ 血管壁（動脈瘤壁）の生産が壁の増大に間にあわなくなったため?

 力学的解析に加え、  
生物学的な情報が必要



# 脳動脈瘤に対する CFD

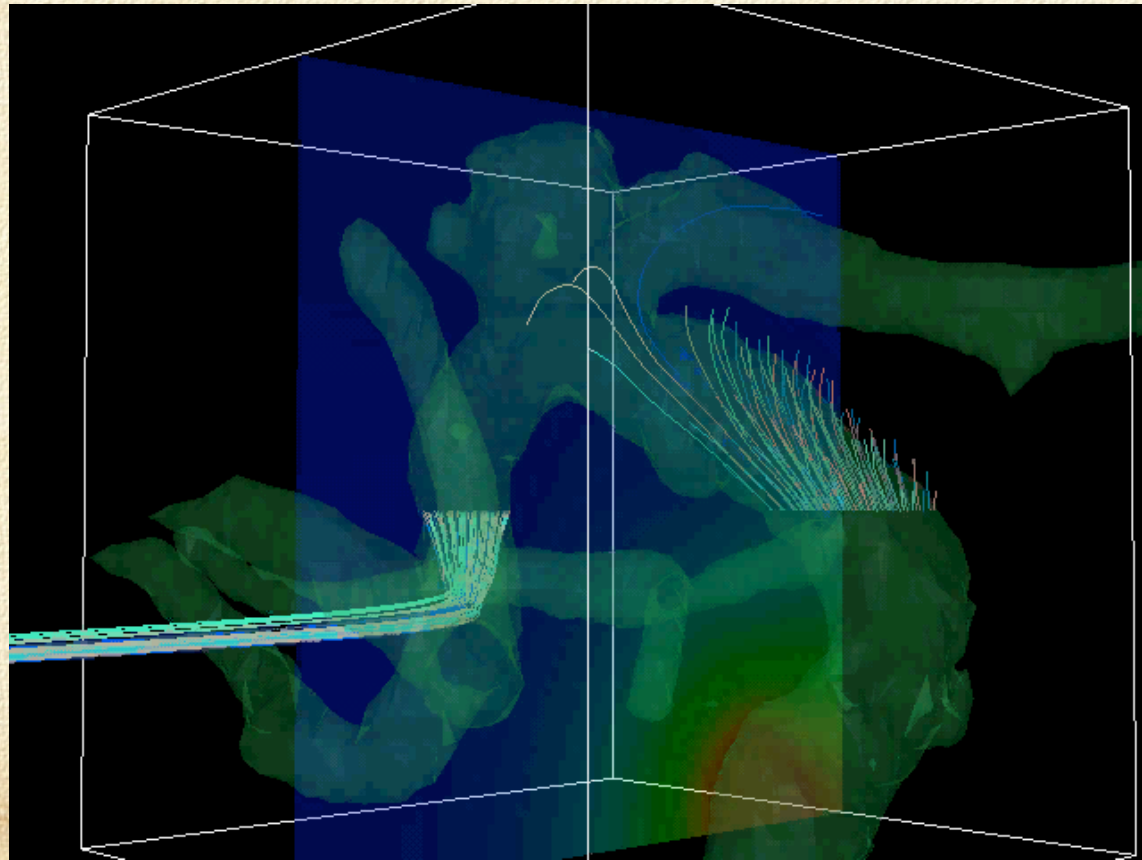
---

- 血管、動脈瘤の三次元構造の収集
  - 3D CTA, MRA, DSA(Rotation DSA)
- Smoothing ?
- 計算機解析
- 問題点
  - 血管の弾性
  - 血流の境界条件
  - ニュートン流体として扱って良いか？



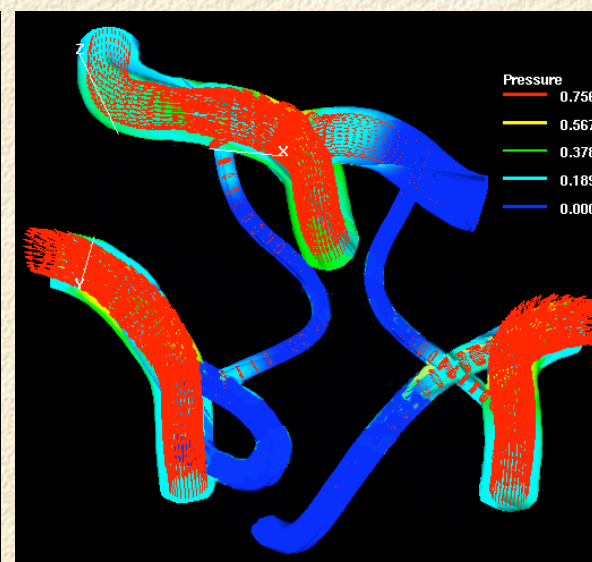
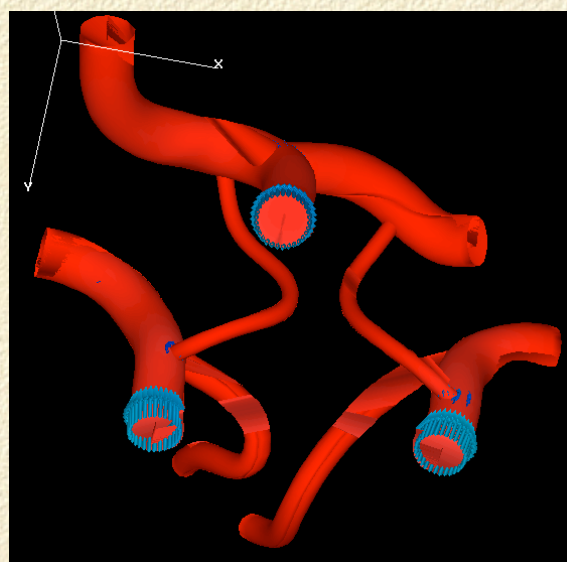
# 脳動脈瘤に対する CFD

---





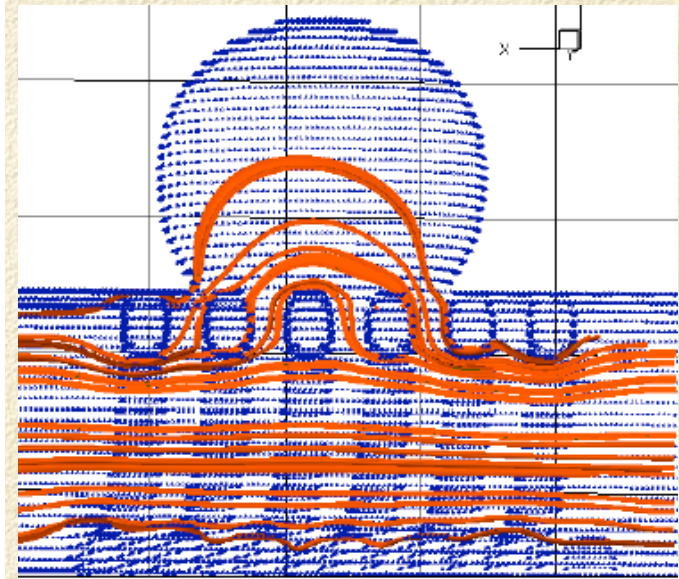
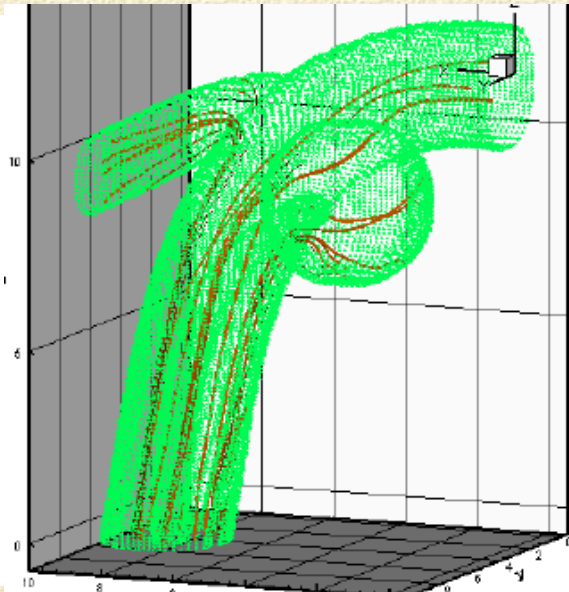
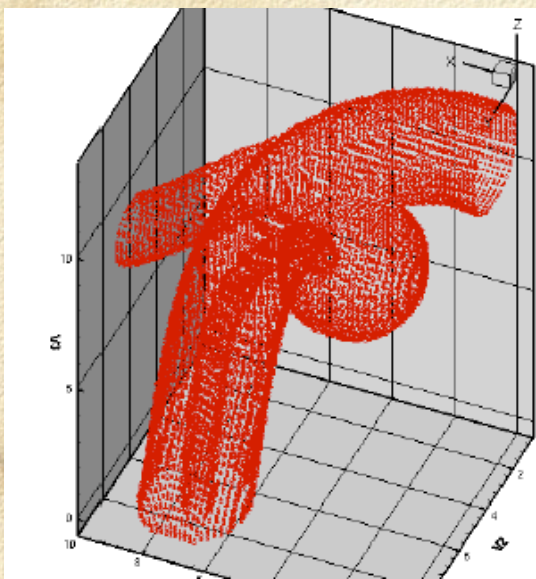
# 脳動脈瘤に対する CFD



- 壁の平滑化が可能であった
- 動脈瘤自動診断への可能性



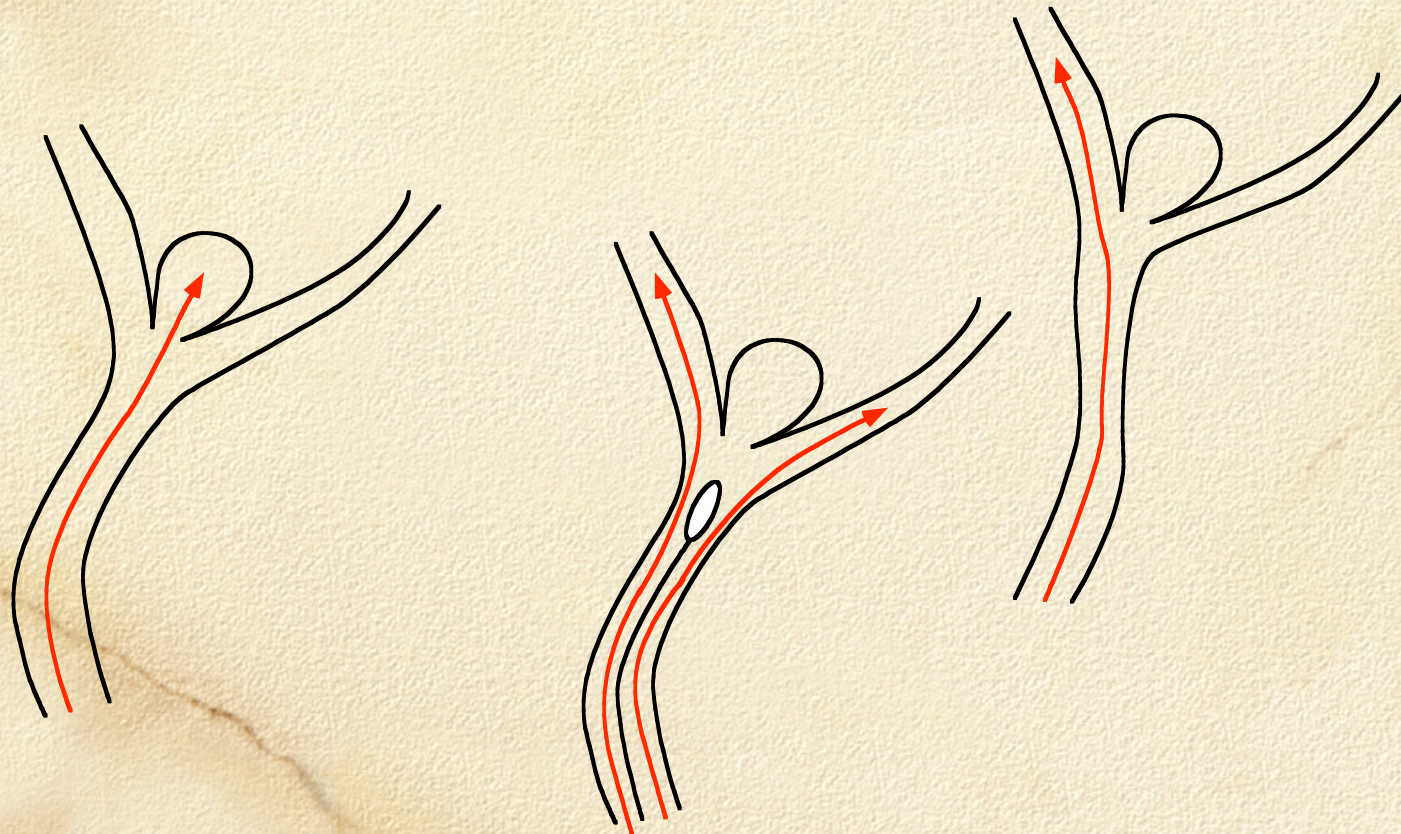
# 脳動脈瘤に対する CFD





# 流れパターンの修飾と脳動脈瘤

- 近位血管の修飾
  - “自然” 血栓化?





# 境界条件

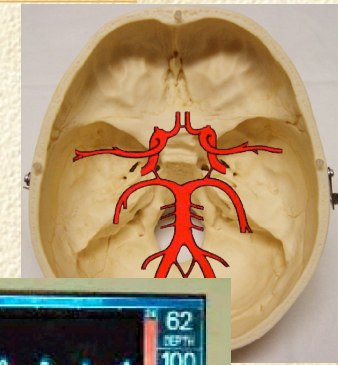
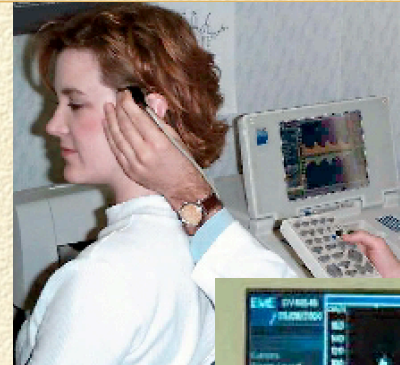
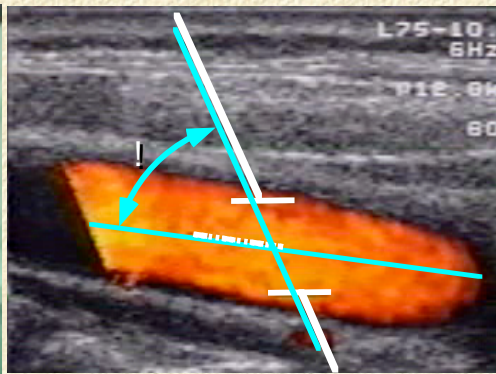
---

- 流速の時間変化
  - Echo (Doppler)
  - MR (Phase Contrast, Tagging)
- 流速分布
  - Tagging MR? PC MA?
  - 3D Echo?
- 圧較差
  - マイクロカテからの計測?
  - SmartWire?

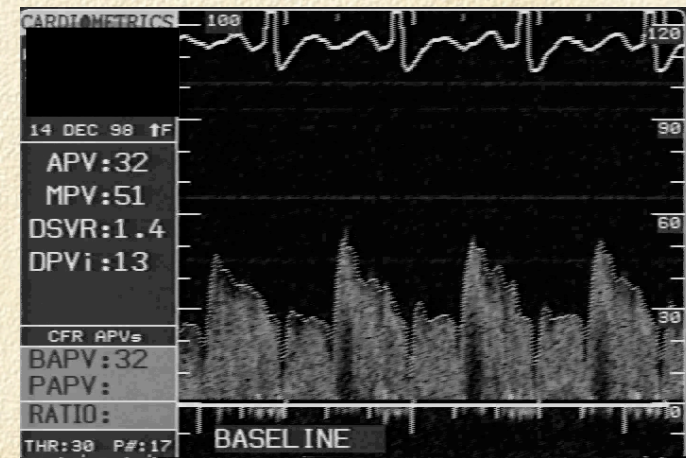
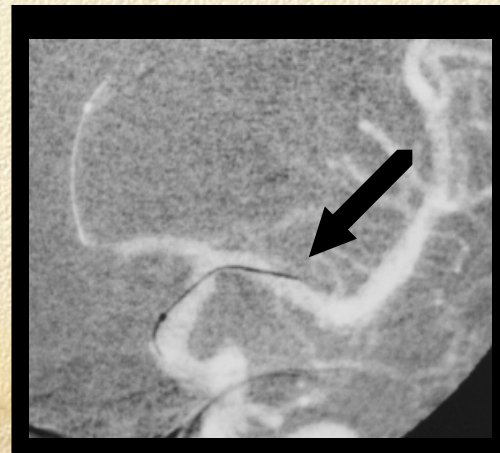
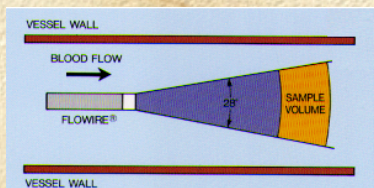


# 境界条件 - Echo

## ■ 体表からのもの



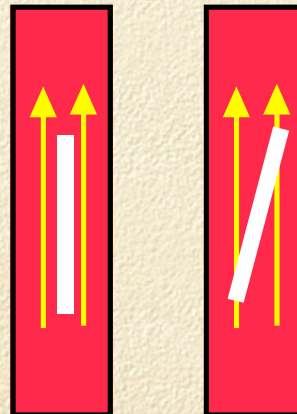
## ■ 血管内超音波ドップラー





## 境界条件 - Echo

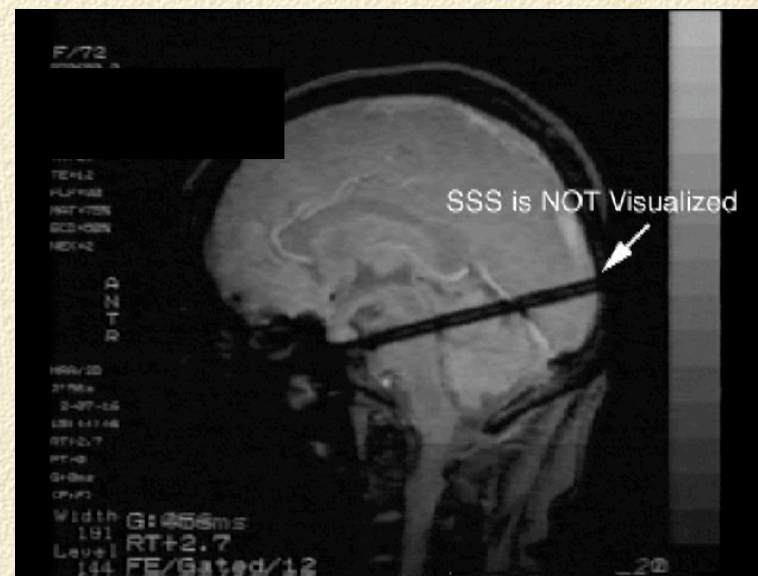
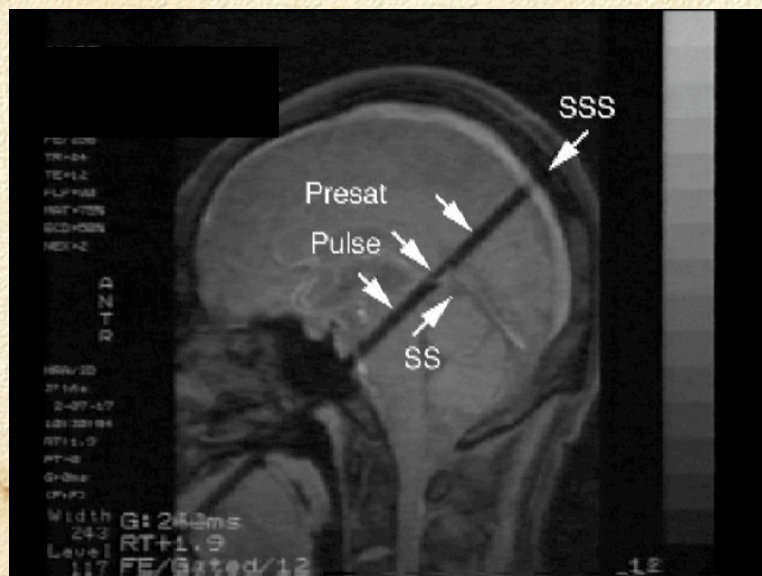
- Echo の問題点
  - 検査施行者の技量に依存する
  - 三次元情報が得づらい
  - Doppler に信頼が置きにくい点がある
- プローブの三次元位置検出の併用？





## 境界条件 - Tagging MR

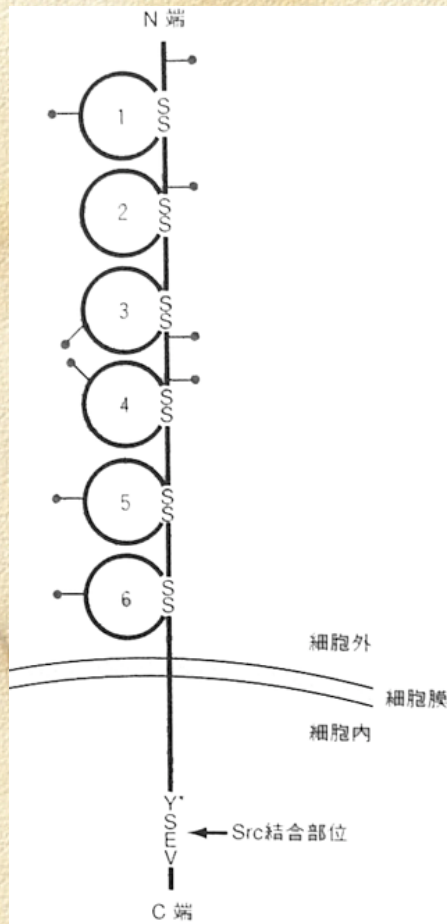
- Presaturation Pulse を心収縮に併せて追いかけて、流れを可視化



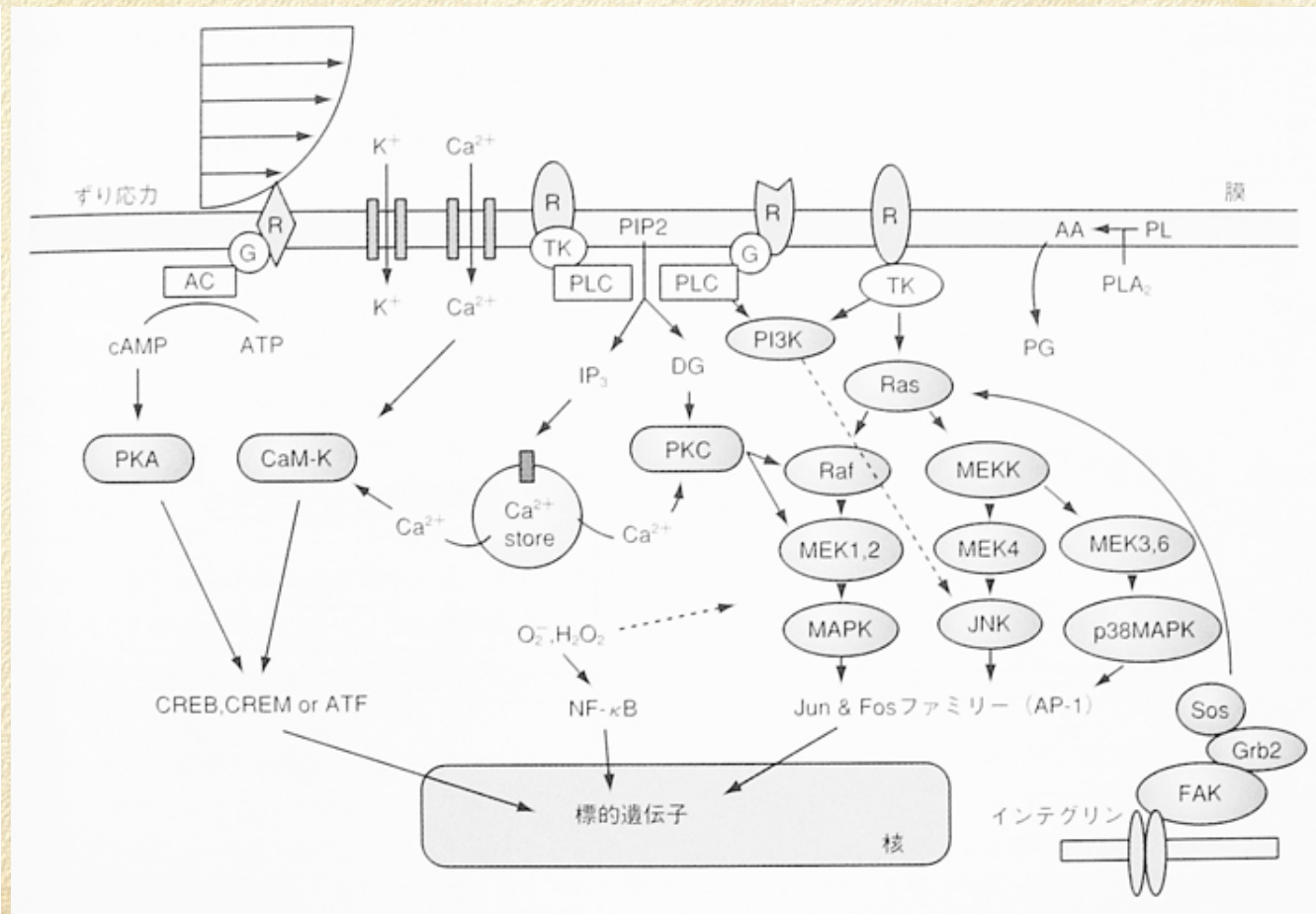
- 血流に直行する面内の流れの表現が困難



# 流れと内皮細胞の反応



Shear Stress Receptor



Biological Response in Endothelial Cells



# 流れと内皮細胞の反応

---

- 細胞内 Ca Level の上昇
- $K^+$  Channel の開口
- NO Level の上昇
- Growth Factor の増加
- tPA, Collergen の増加
- 血管壁（動脈瘤壁）産生の調節？



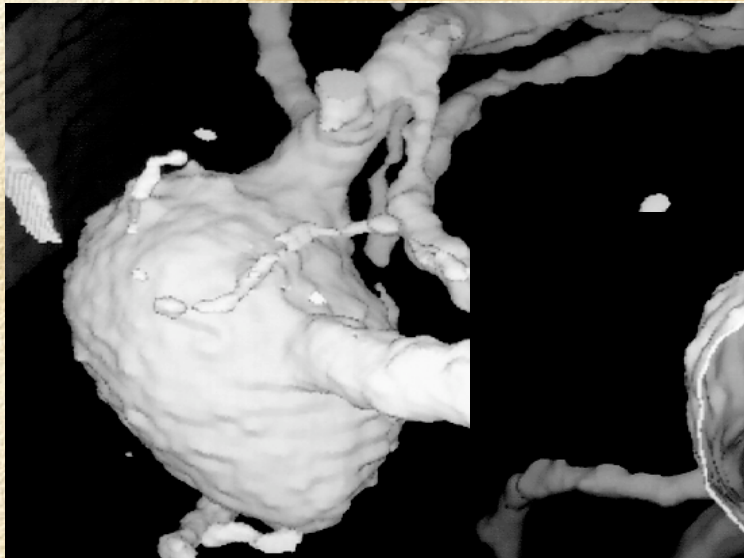
# 流れと内皮細胞の反応

---

- 流れによる生理活性物質産生の調節
  - 活性物質を体外から計測できるか？
  - CFD からの推測が必須では？
- 
- **Tailor Made Medicine for Indication and Strategy for Treatment**

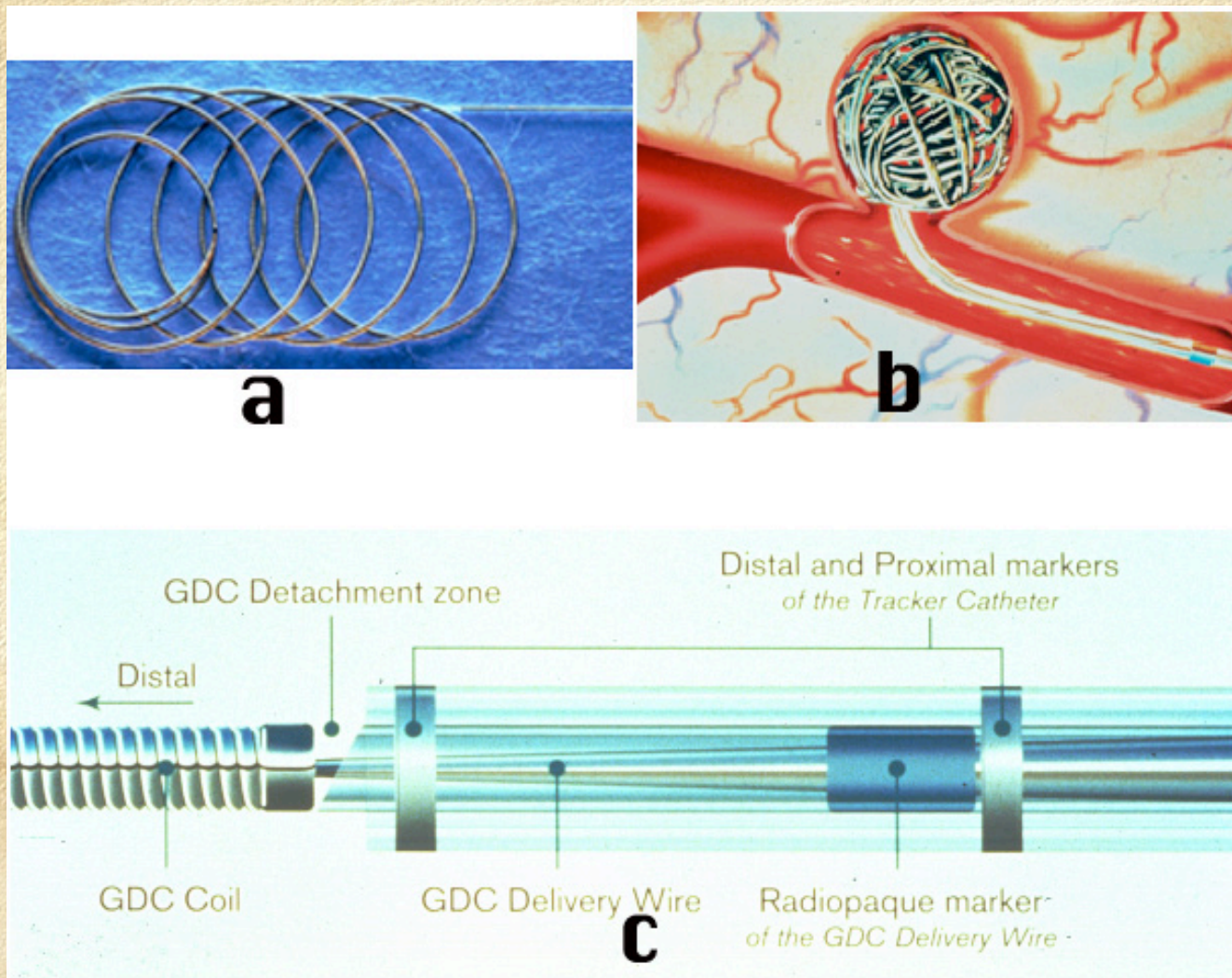


# 脳動脈瘤に対するコイル塞栓術



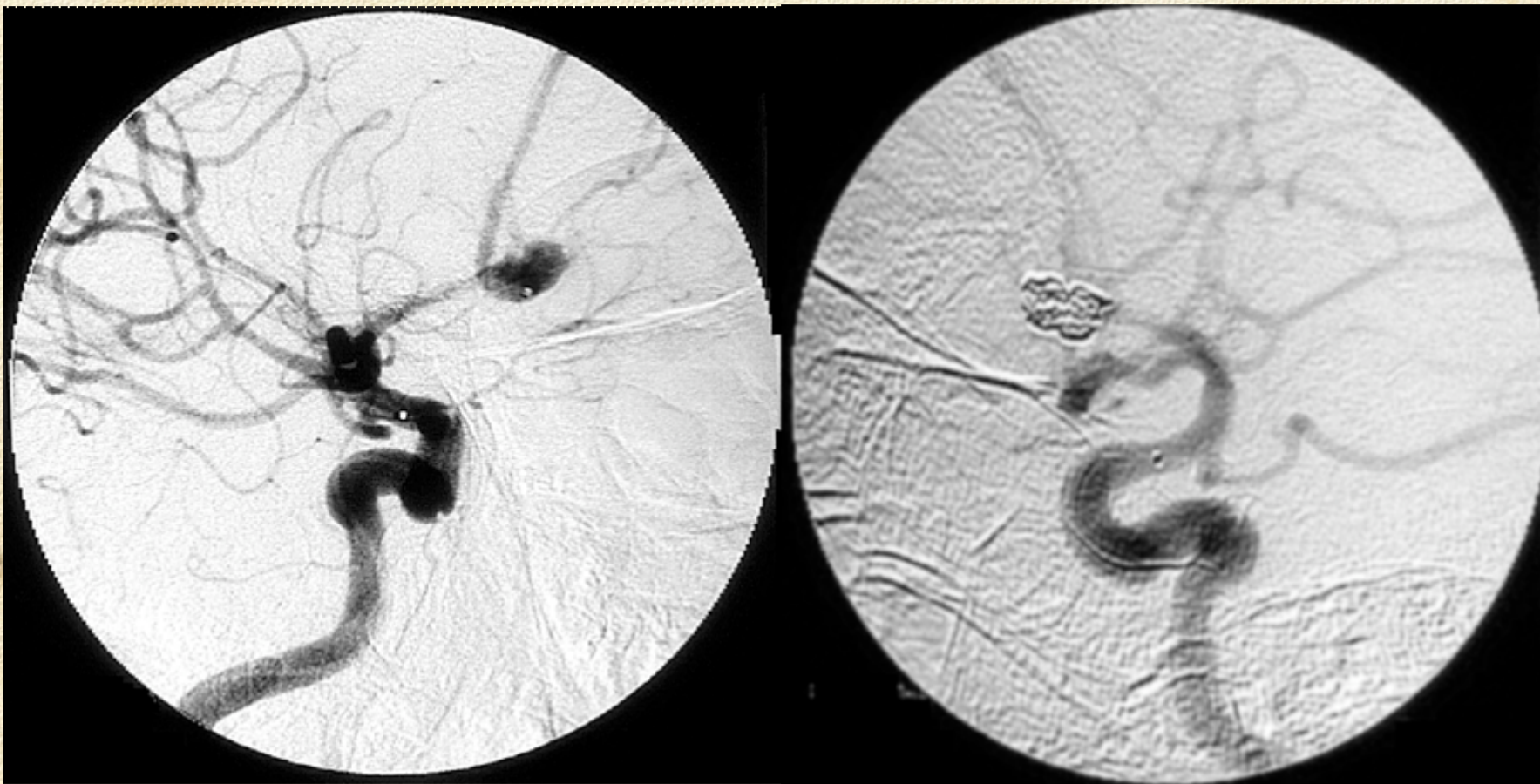


# 脳動脈瘤に対するコイル塞栓術



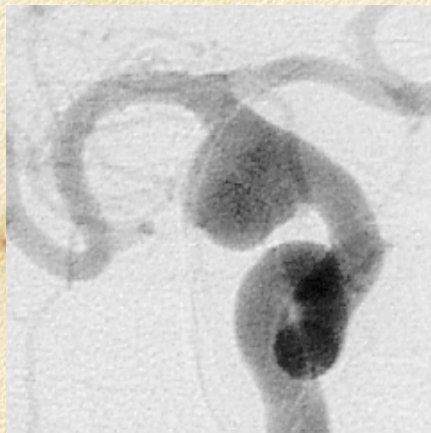
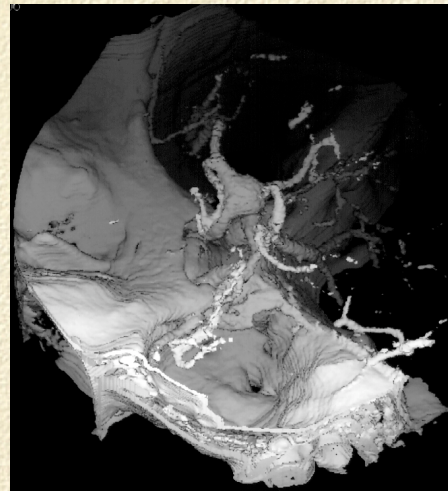


# 脳動脈瘤に対するコイル塞栓術





# 脳動脈瘤に対するコイル塞栓術





# 脳動脈瘤に対するコイル塞栓術

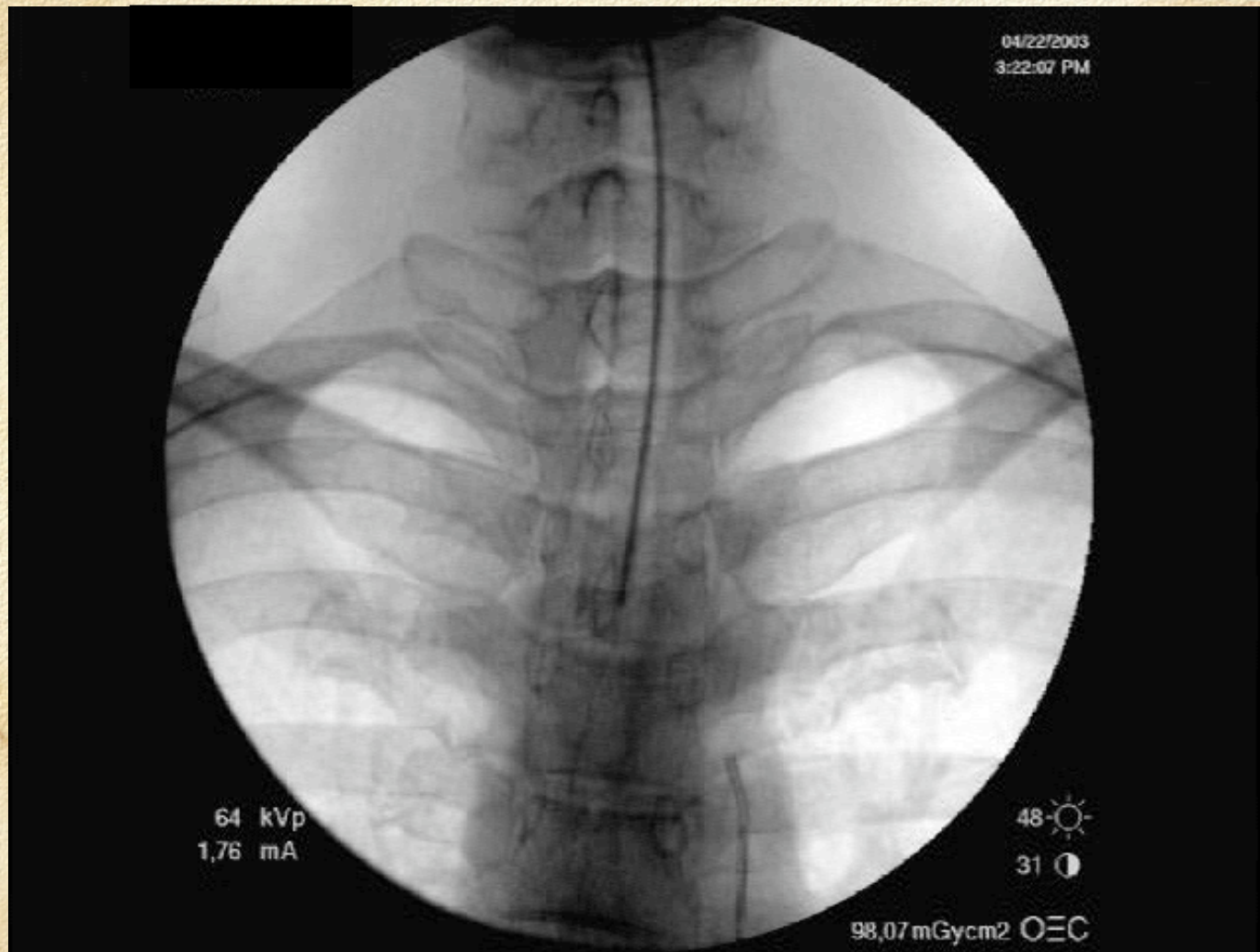
---

- 全身麻酔（局所麻酔でも可能）
- 穿刺、シース（穿刺部に留置するカテ）留置
- ガイディングカテーテルの留置
- マイクロカテーテルの誘導
  - 透視／ロードマップ利用 (3D DSA/CTA)
  - ガイドワイヤー併用
- コイルの留置、離脱
- カテーテル類の抜去
- 止血



# 脳動脈瘤に対するコイル塞栓術

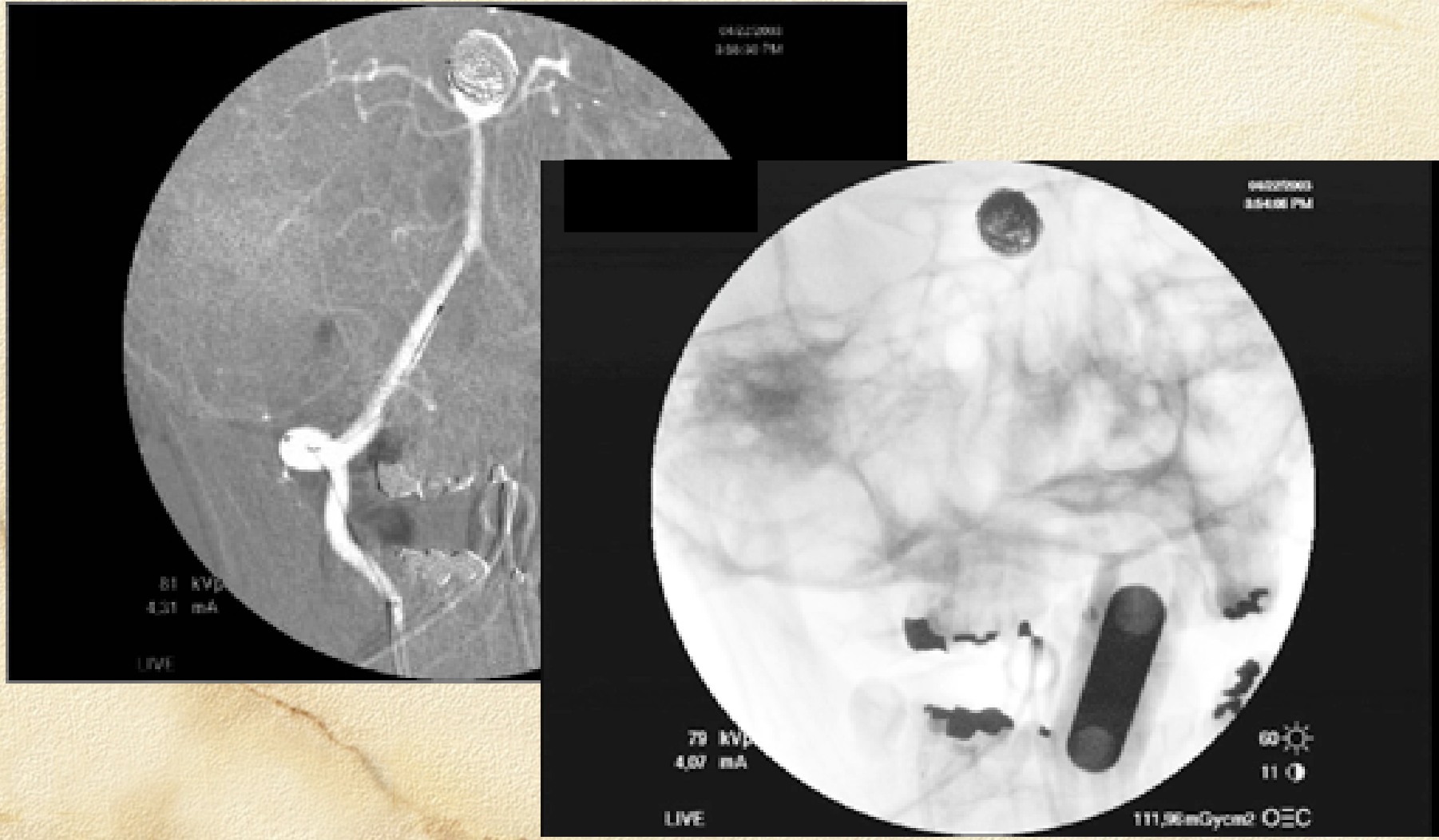
## □ ガイディングカテーテルの誘導





# 脳動脈瘤に対するコイル塞栓術

## ■ ロードマップ





# 脳動脈瘤に対するコイル塞栓術

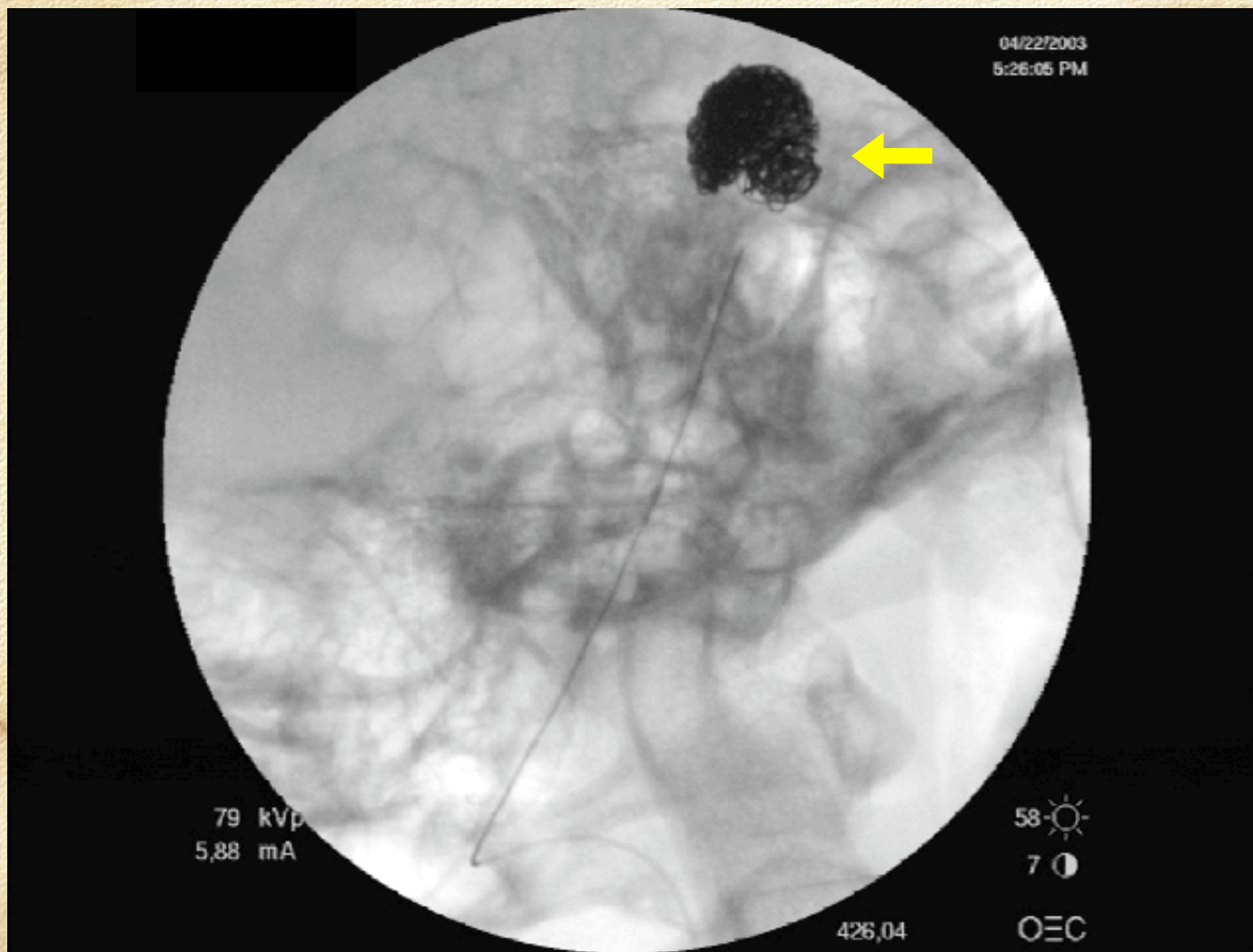
## ■ マイクロカテーテルの誘導





# 脳動脈瘤に対するコイル塞栓術

## □ Deliver of Coil(s)





# 脳動脈瘤に対するコイル塞栓術

## ■ 塞栓術後の血管撮影 (DSA)





# コイル塞栓術の問題点

---

- 手技に関連したもの
- 長期的な問題点



# コイル塞栓術の問題点 - 手技関連

---

- 手技に関連したもの
  - 術中破裂 (Coil, Guide Wire, Microcath.)
  - 虚血
  - 迷入
  - その他
    - 感染、穿刺部位、被爆
- 長期的な問題



# コイル塞栓術の問題点 - 長期的なもの

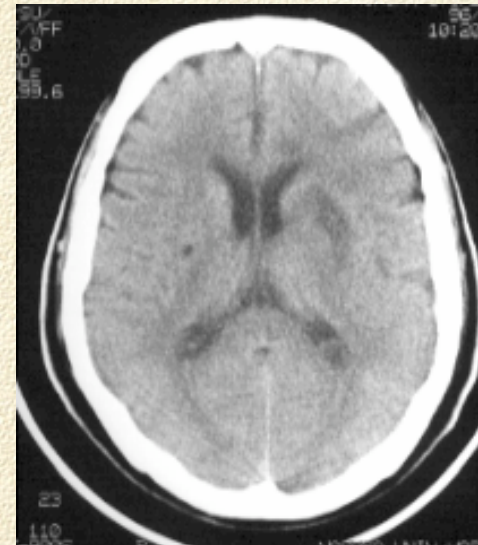
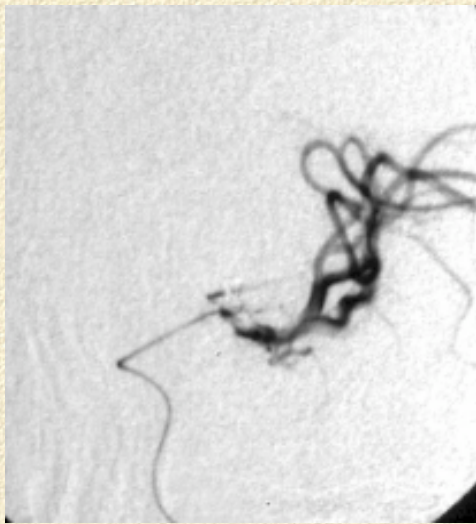
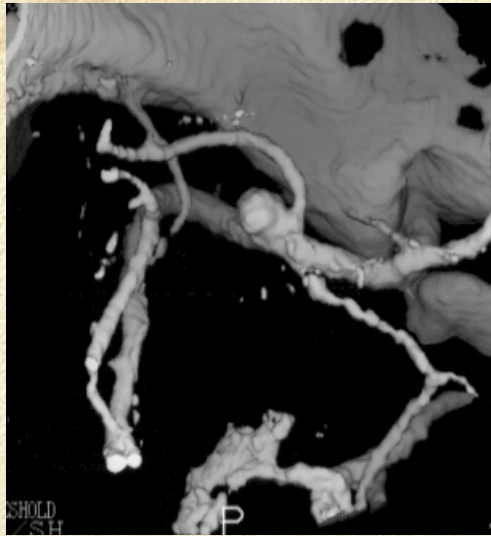
---

- 手技に関連したもの
- 長期的なもの
  - コイル コンパクション、迷入
  - 再増大
  - 壁内血栓への沈み込み
  - その他
    - 金属アレルギー、放射線被曝の影響

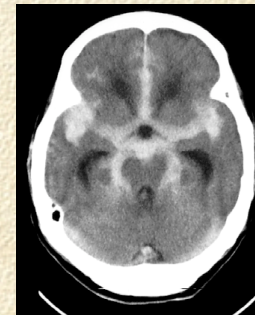
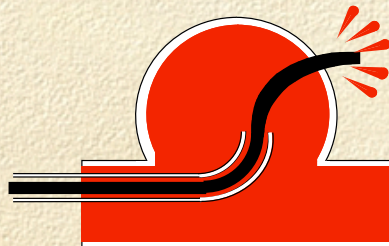


# コイル塞栓術の問題点 - 手技関連

## ■ 虚血性合併症



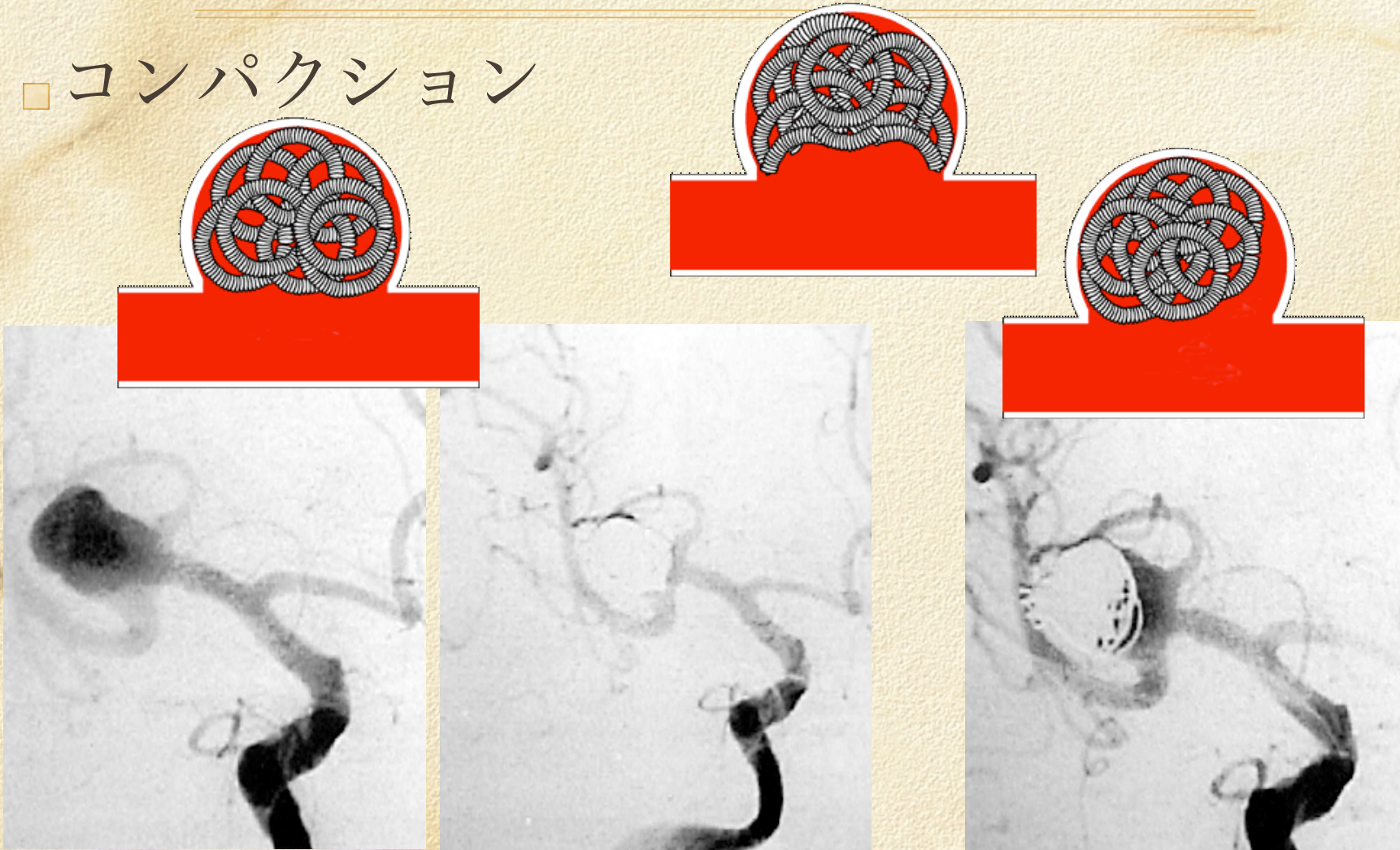
## ■ 術中破裂





# コイル塞栓術の問題点 - 長期的問題

## ■ コンパクション





# Coil Variation

GDC® UltraSoft



GDC® Soft 2D SR



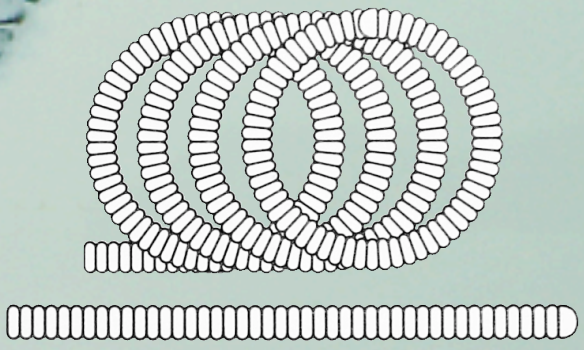
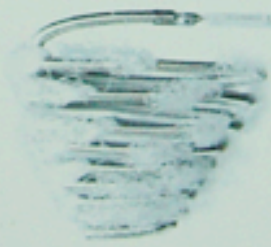
GDC® Soft



GDC® 3D Shape



GDC® Fibered VortX® Shape





# Coil Variation & Rigidity

- Rigidity

- GDC 18; Large, 3D(6 x 15), 3D (8 x 25), Standard & 3D (Others), Soft

- GDC 10; Standard & 3D, Soft, Ultra Soft

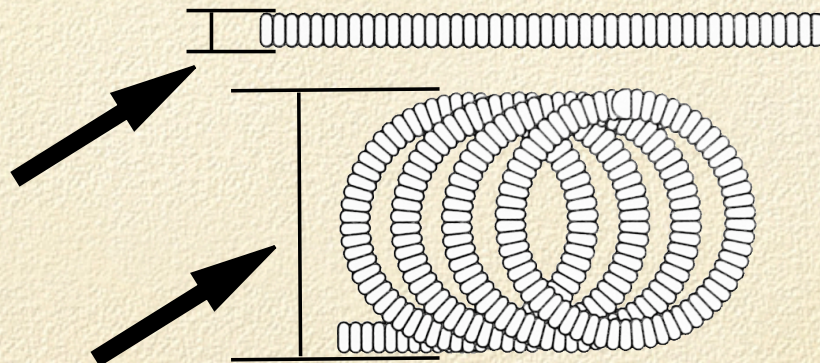
- Diameter

- 10 or 18

- Size

- 2 mm to 20 mm in diameter

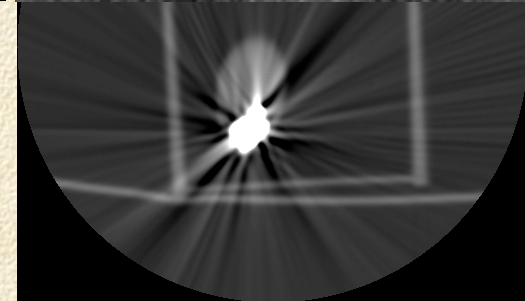
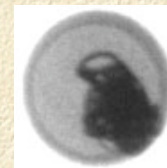
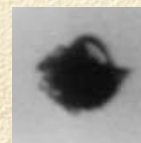
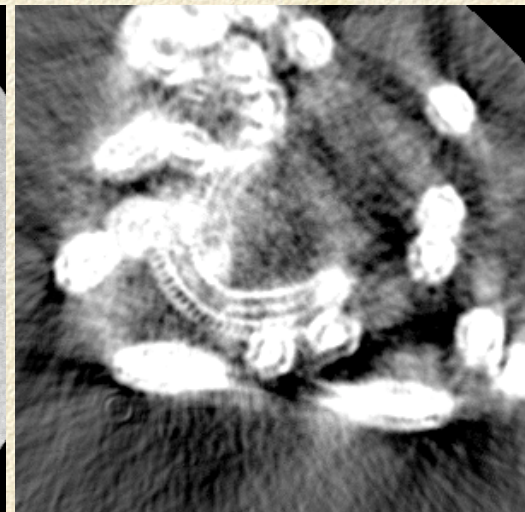
- **Proper Rigidity for Each Size**





# コイル塞栓術の問題点 - コンパクション 慢性期の変形

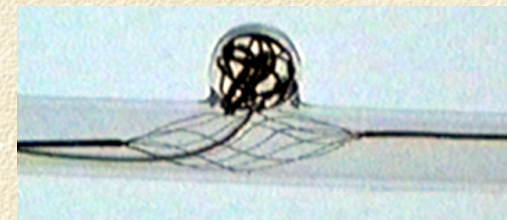
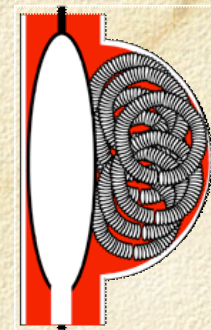
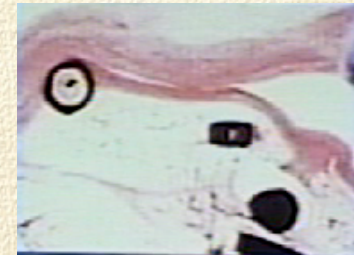
- 留置後のコイルを含めた流体、構造解析？





# コイル塞栓術の問題点

- Using Coil
  - Increase VER (Volume Embolization Ratio)
    - Hydrogel Coil
    - “Ultra Soft” Coil
    - Variable Detachable System
    - Neck Remodeling
      - Non Detachable Balloon, **MicroBasket**
  - Bioactive Coil
    - Surface Coating
    - Core Rod with Bioactive Material
- Liquid Material
- Stent/Covered Stent





# カテーテル操作

---

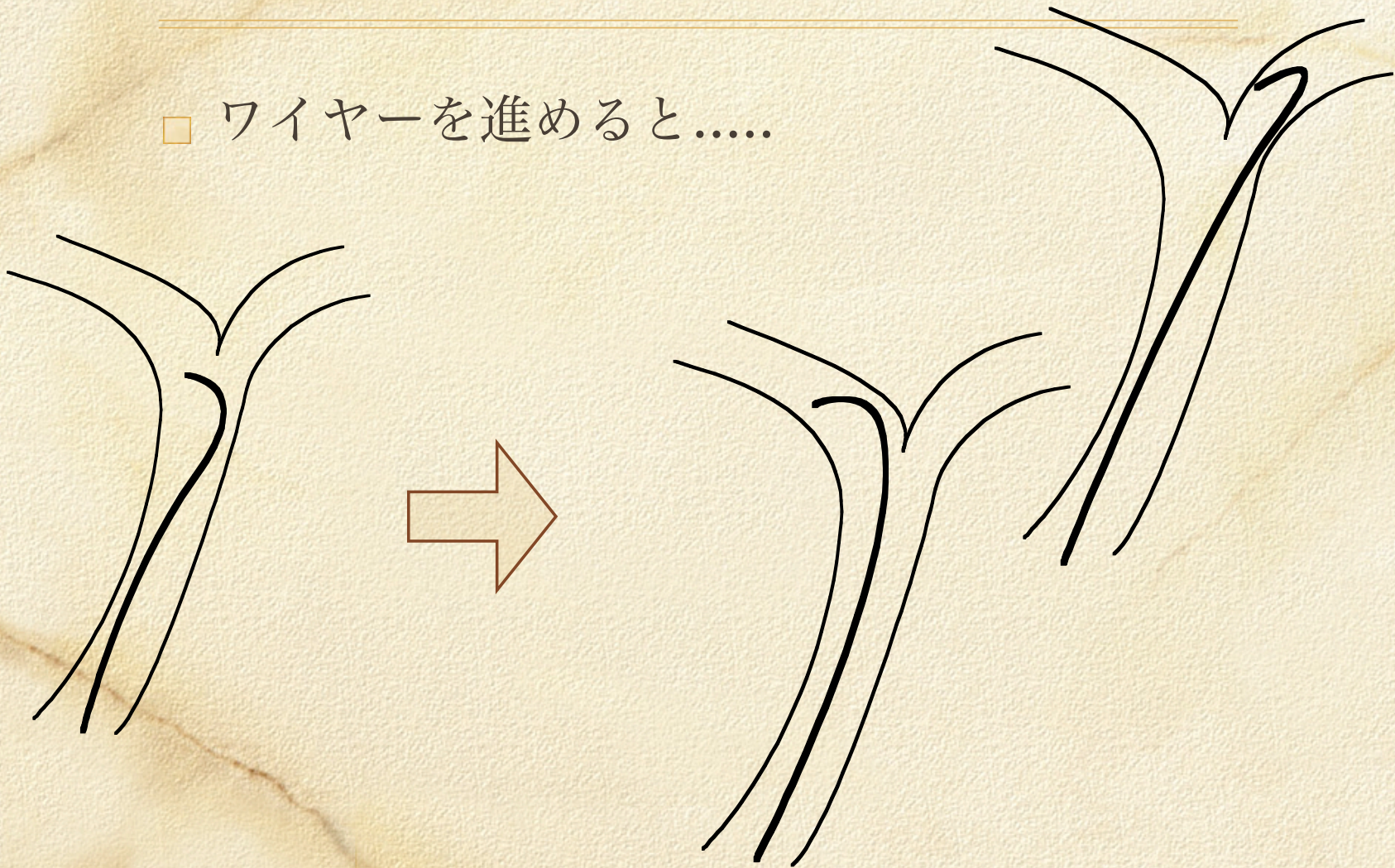
- マイクロカテ、ガイドワイヤーの動き
  - 術者の操作
  - カテ、ワイヤーの特性
  - 血流
  - 血管壁などとの間の摩擦
  - 先端形状 (カテ先 - ワイヤー間の段差)
  - カテーテルの長軸の圧縮 (摩擦による)
  - 血管の形状と変形



# カテーテル操作

---

- ワイヤを進めると.....

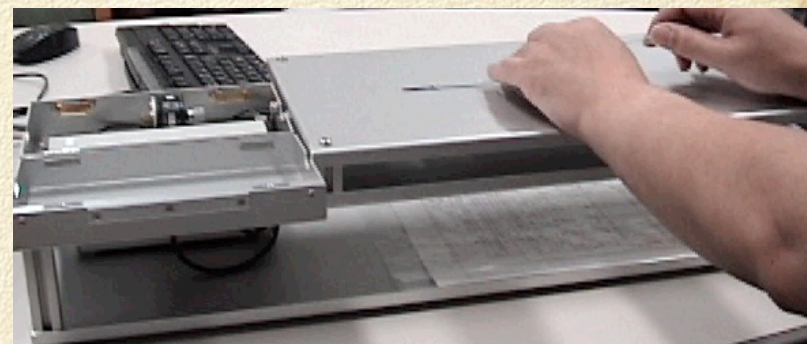




# カテーテル操作シミュレータ

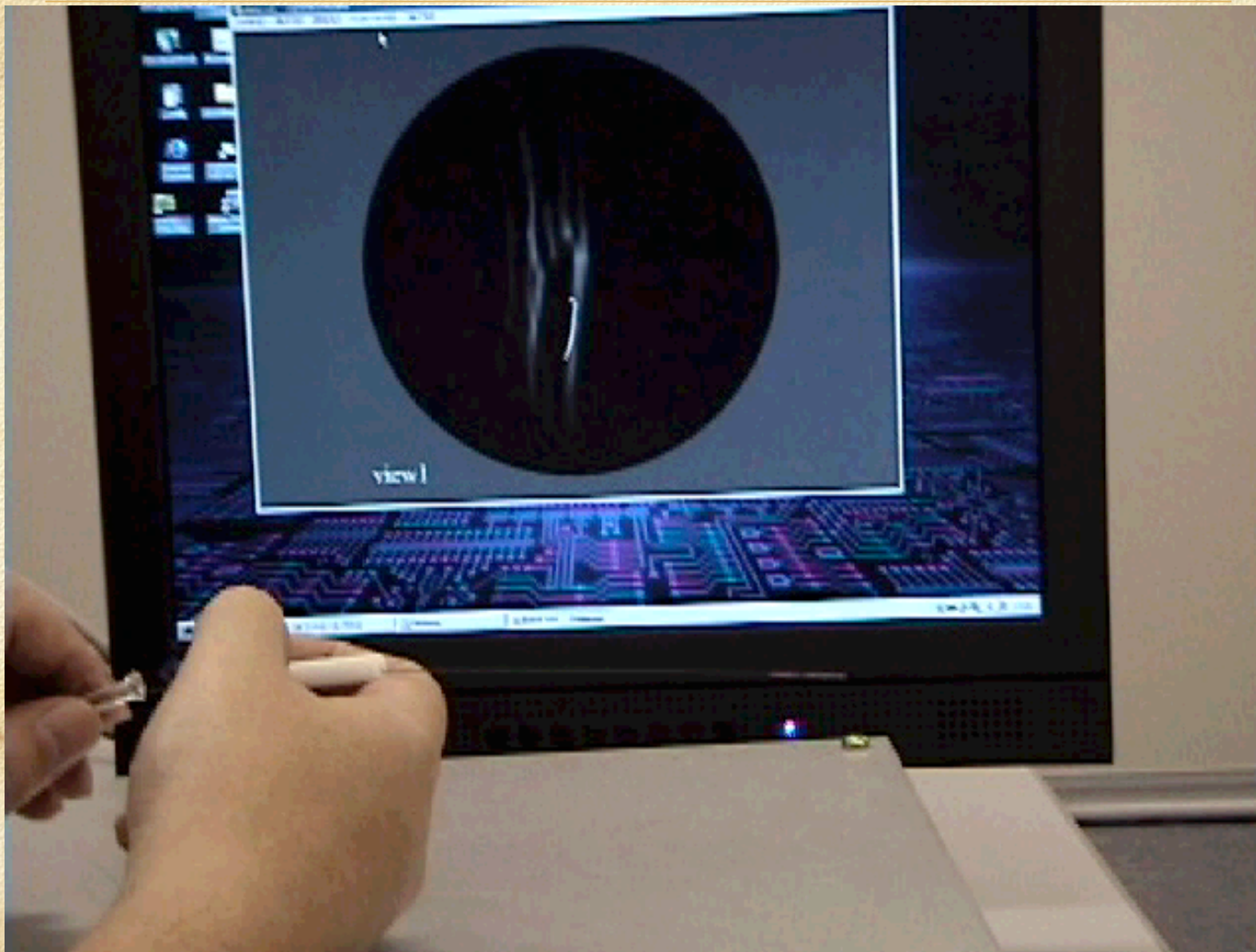
---

- 飛行機の操縦にはあるのに.....





# ガイドワイヤー シミュレータ



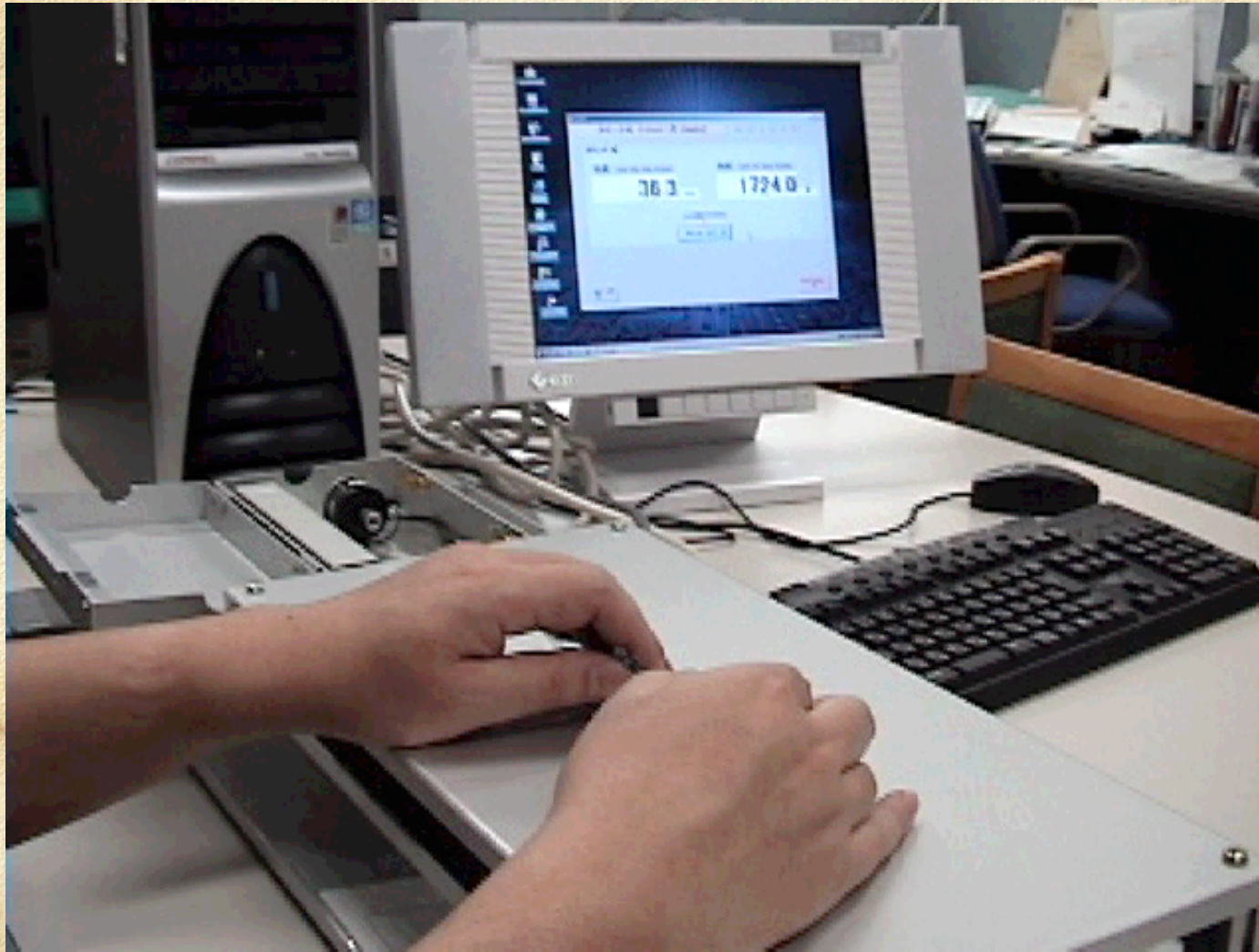


# ガイドワイヤー シミュレータ Master/Slave System





# ガイドワイヤー シミュレータ “Flight Recorder” ?

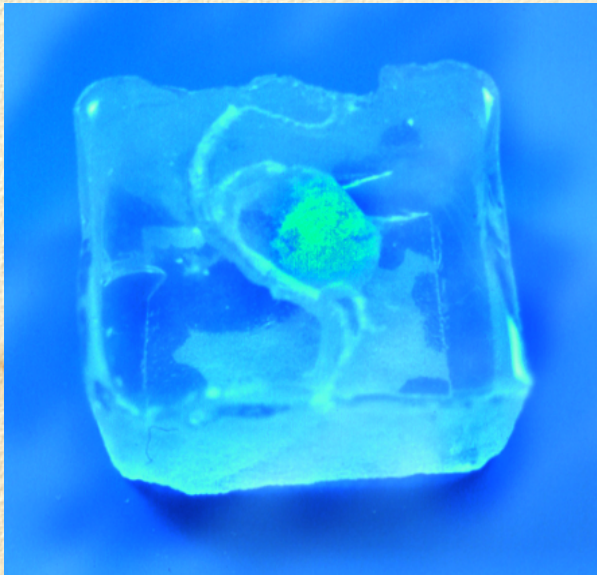




# 中空モデル

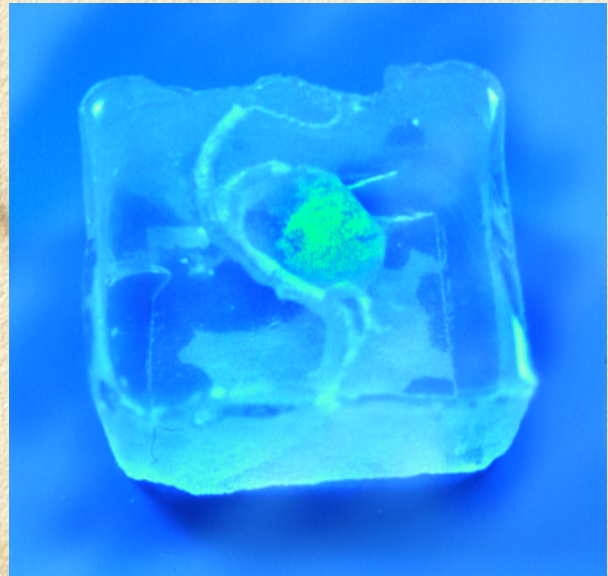
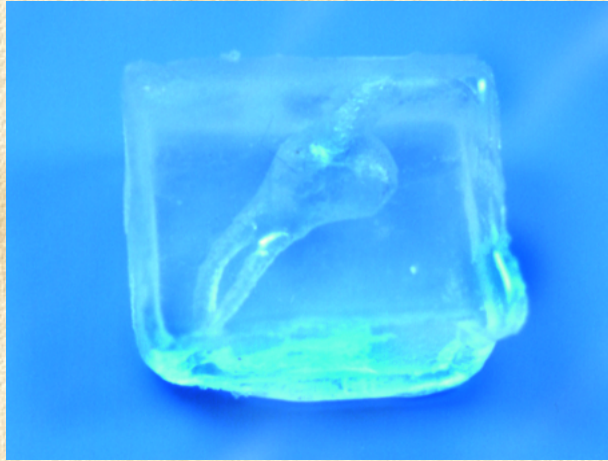
---

- 流体解析モデル
- 形状記憶合金による Tailor Made コイルの可能性





# 中空モデル





# 虚血性疾患

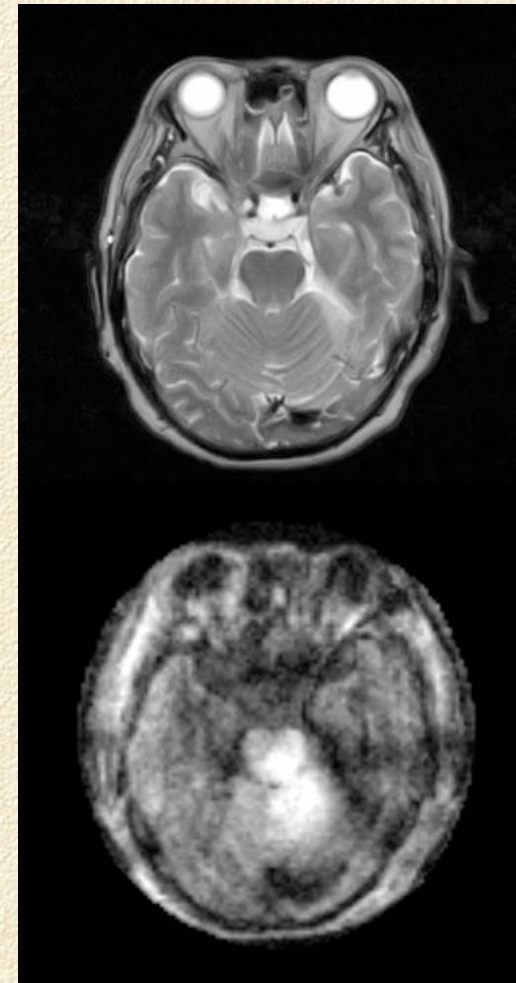
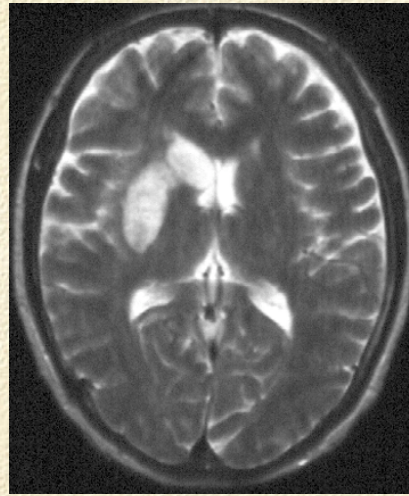
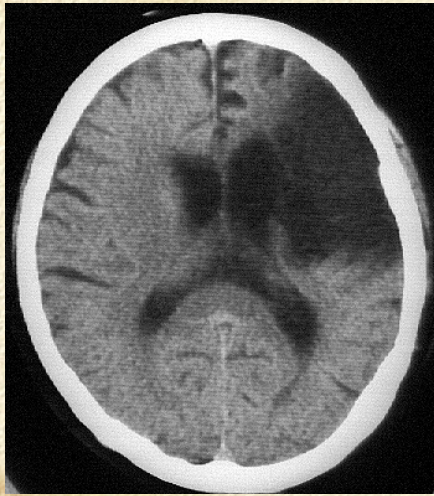
---

- 脳組織への血流不足
  - 脳動脈の閉塞
    - 血栓症（狭窄の進行による閉塞）
    - 塞栓症（他所でできた debris が流れてきて詰まる）
  - 灌流圧の低下
    - 頸部頸動脈など主幹部での狭窄、閉塞に伴う末梢の還流圧低下
  - 解離（解離性動脈瘤）に伴う閉塞



# 脳梗塞の各病型

---





# 脳（内）出血

---

- 脳内の細い血管に生じる壁の壊死、微小動脈瘤
- その他
  - Arterio-venous Malformation
  - Sinus Thrombosis (Stenosis?)
  - Amyloidosis
  - Brain Tumor
  - Others



# 脑（内）出血

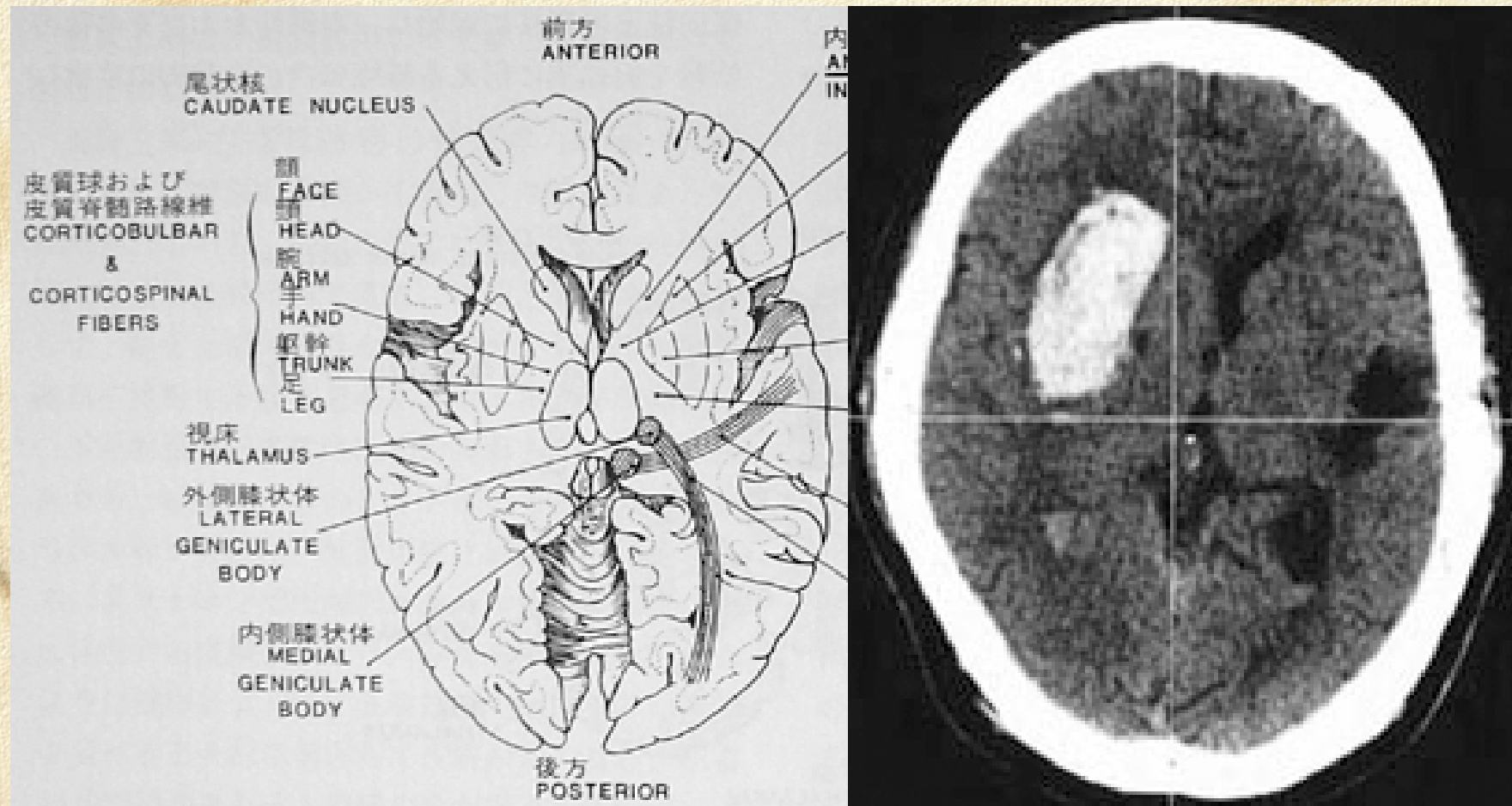
---





# 脳卒中後遺症 - 片麻痺

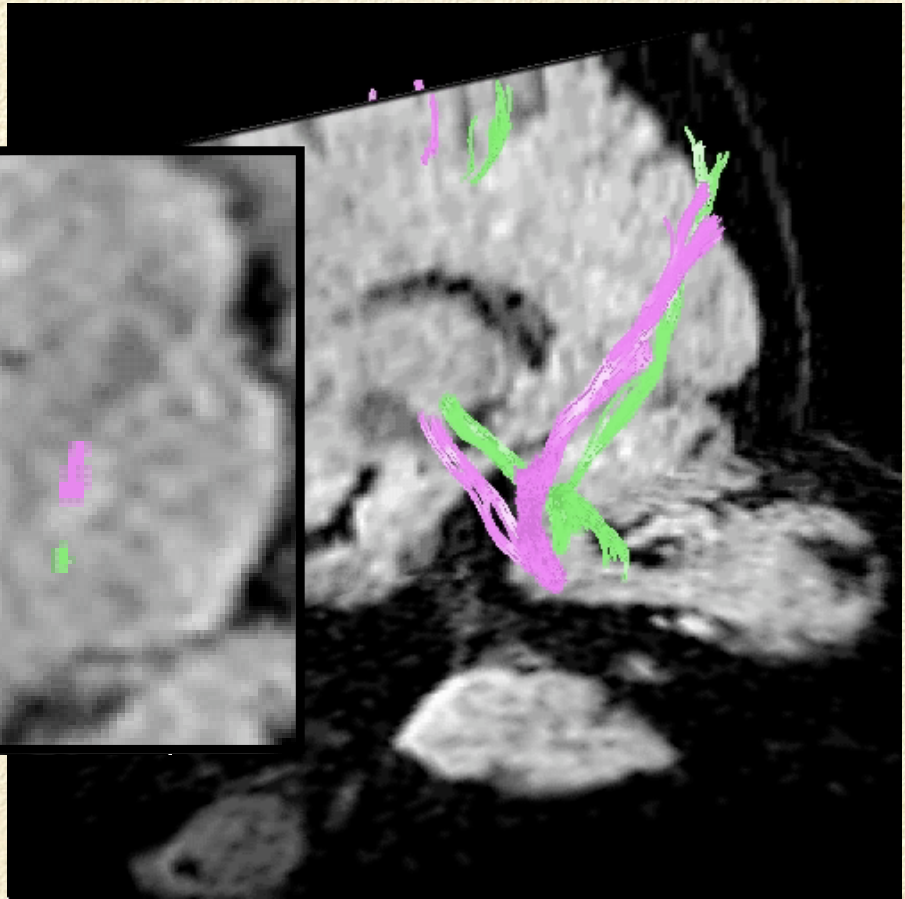
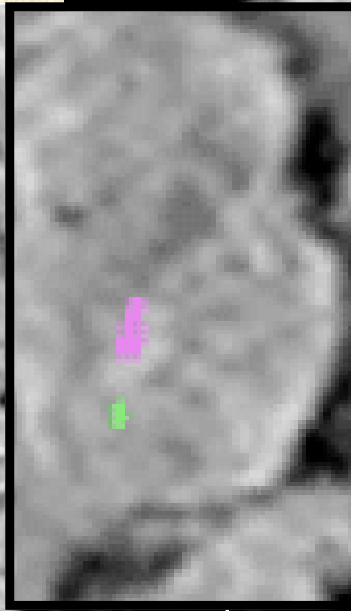
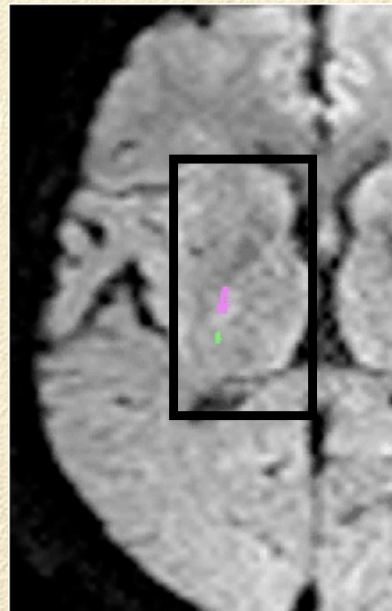
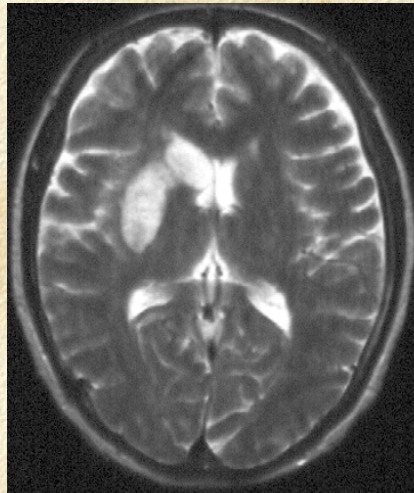
- 不幸にも好発部位を運動神経が走行している





# 腦卒中後遺症 - 片麻痺

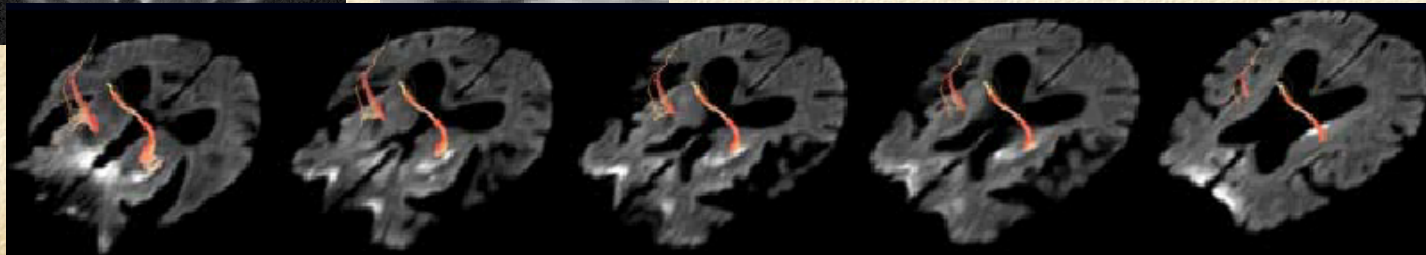
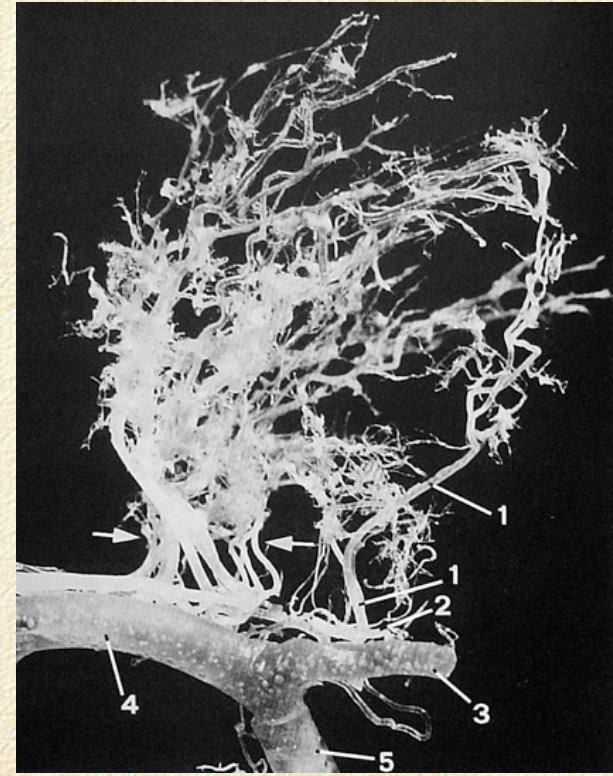
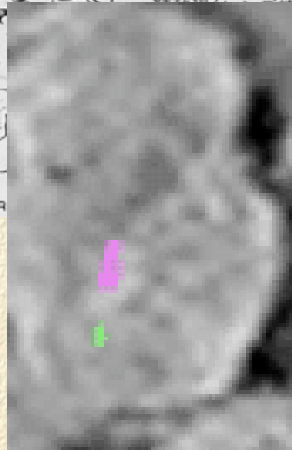
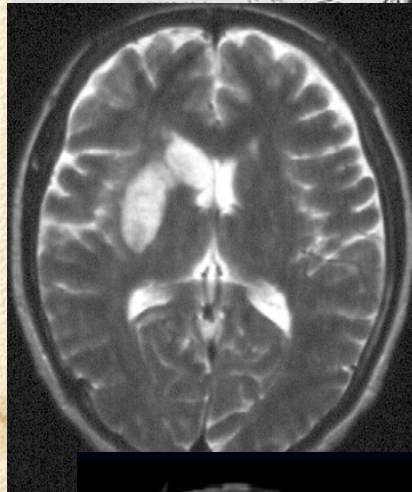
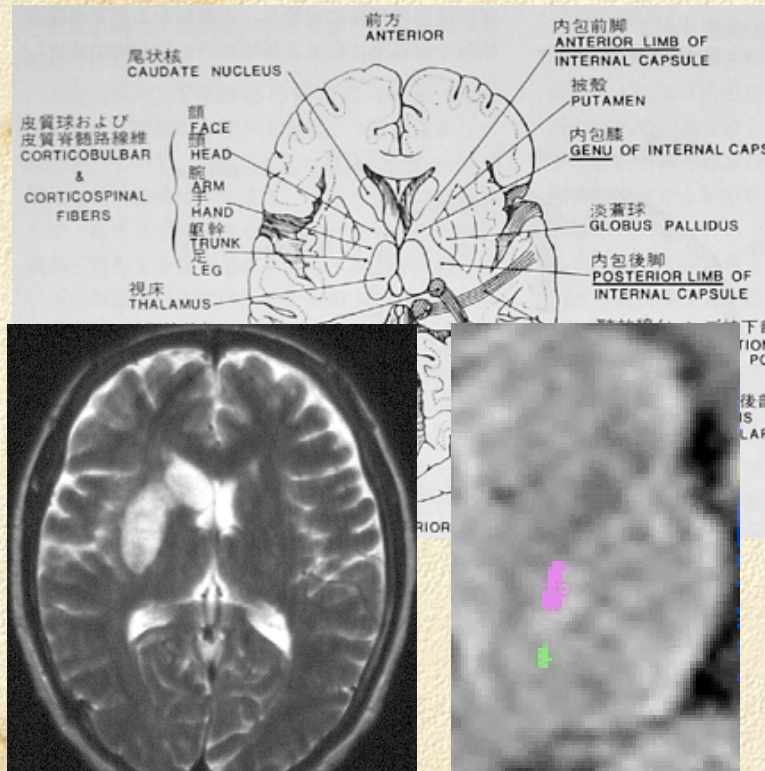
## Tractography





# 脳卒中後遺症 - 片麻痺

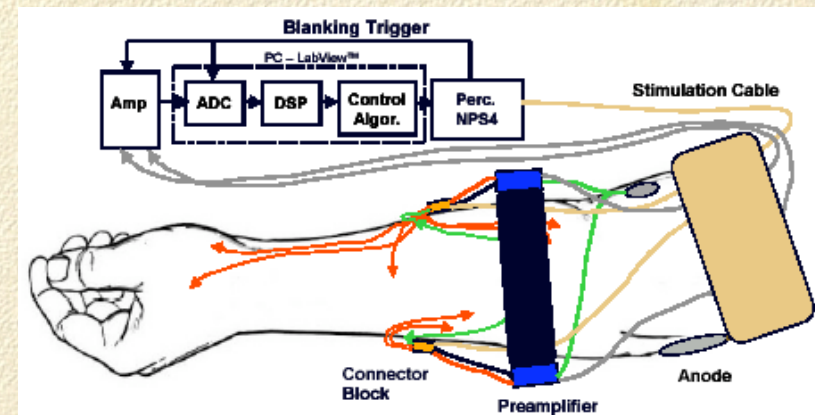
- 不幸にも好発部位を運動神経が走行している





# 脳卒中後遺症 - 片麻痺

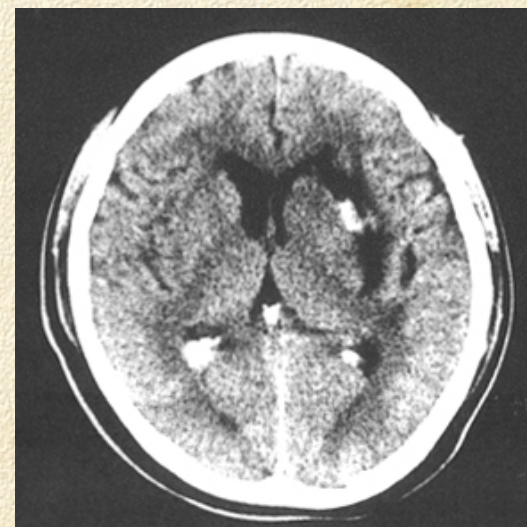
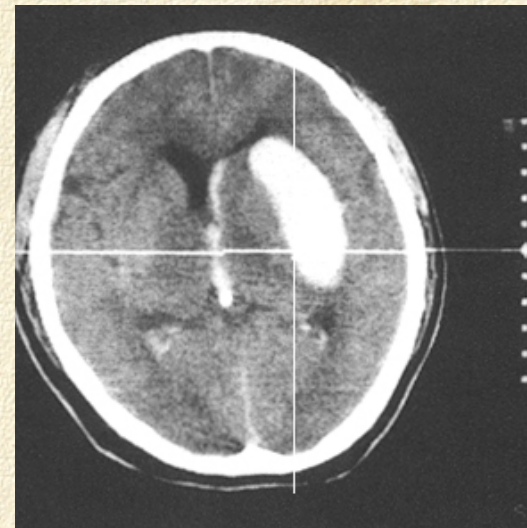
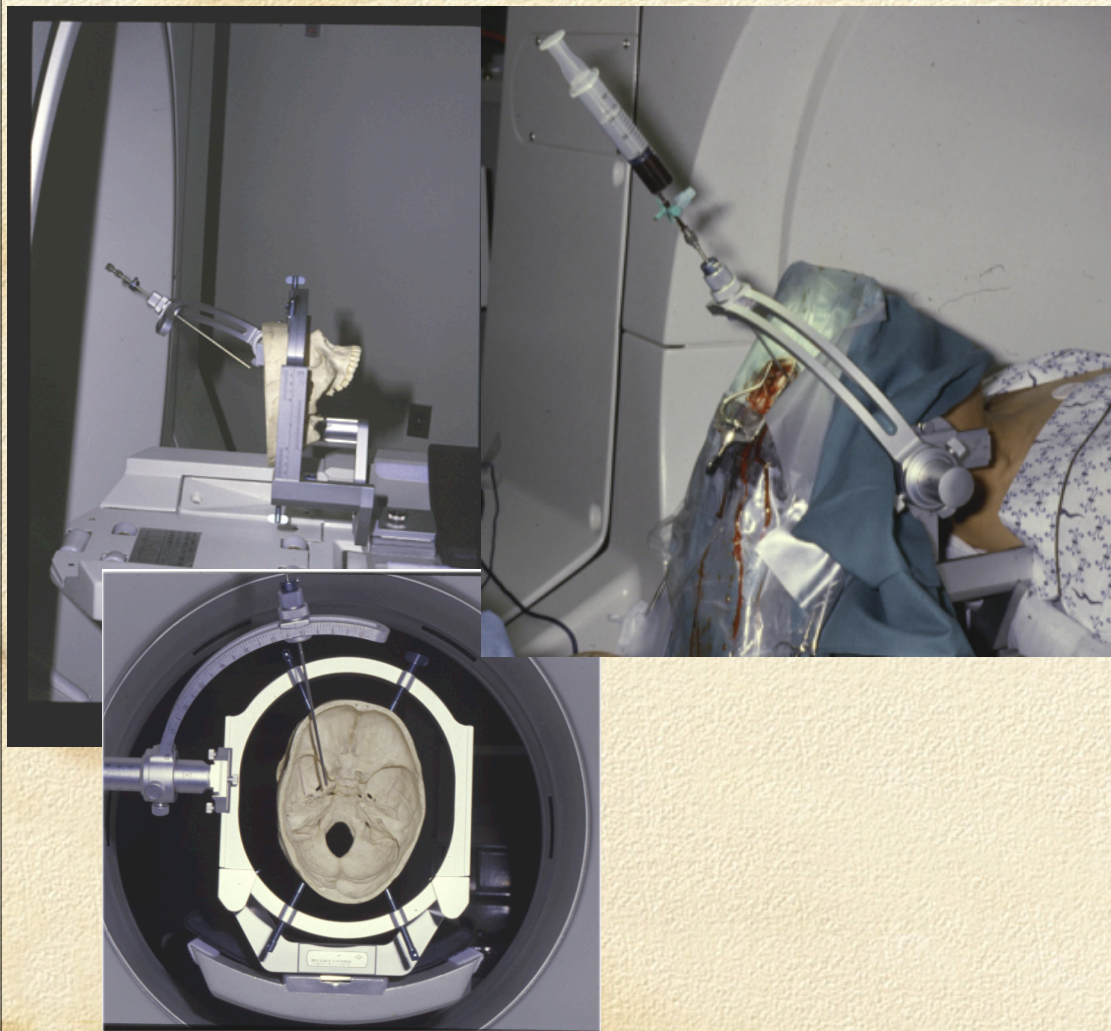
- ❑ 破壊された脳組織の修復法は、ない
- ❑ 残存機能をうまく使うためのリハビリテーション



- ❑ Electrical Stimulation to the Peripheral Nerves;  
FES (Functional Electrical Stimulation)
- ❑ 健側との協調運動、フィードバック感覚が問題



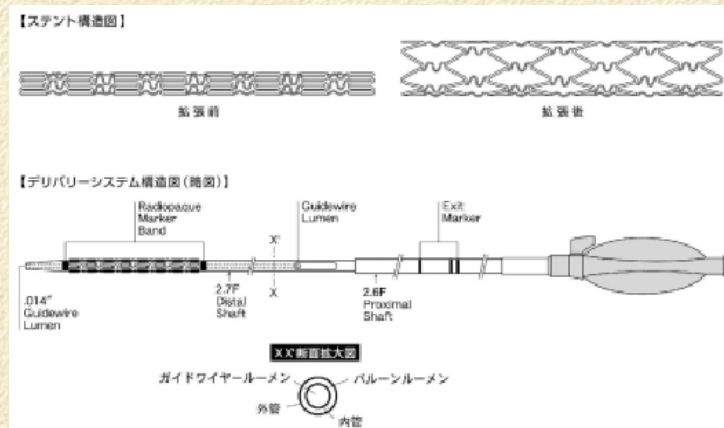
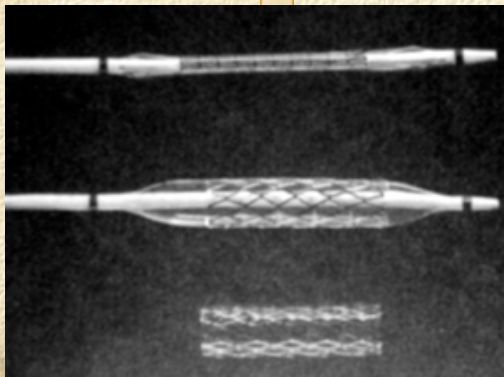
# 脳出血の治療 - 定位脳手術





# 虚血に対する治療 - Stenting

- Coil Stent and Tubular Stent

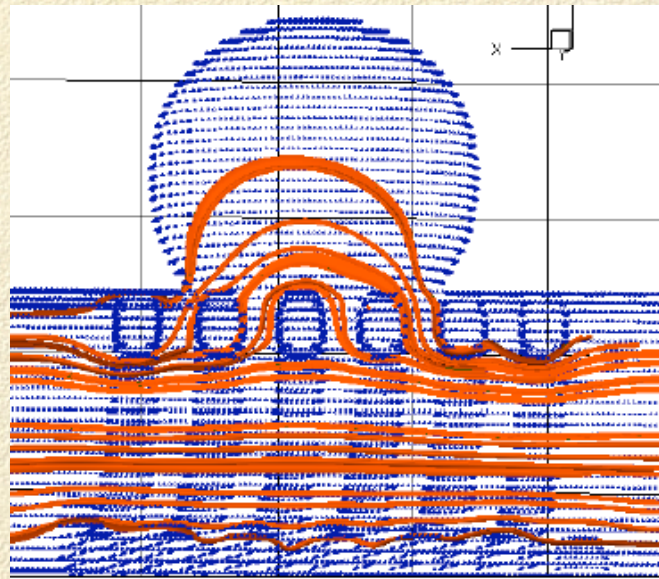


- Prevention of In-Stent Thrombosis



# Stenting

- Flow Pattern Around Stent?



Coil Stent

In Stent Thrombosis

Same Anti-Plt

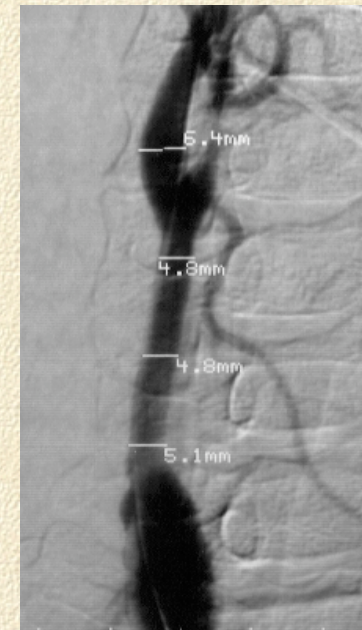
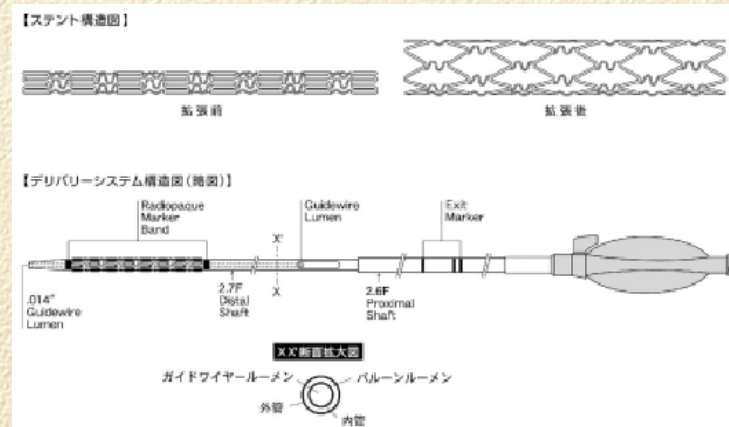
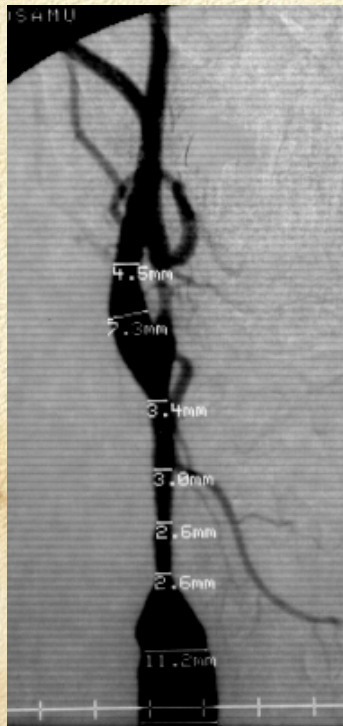
Tube Stent

No Thrombosis



# Stent の問題点

- 末梢への塞栓
- Hyperperfusion/Overload 現象





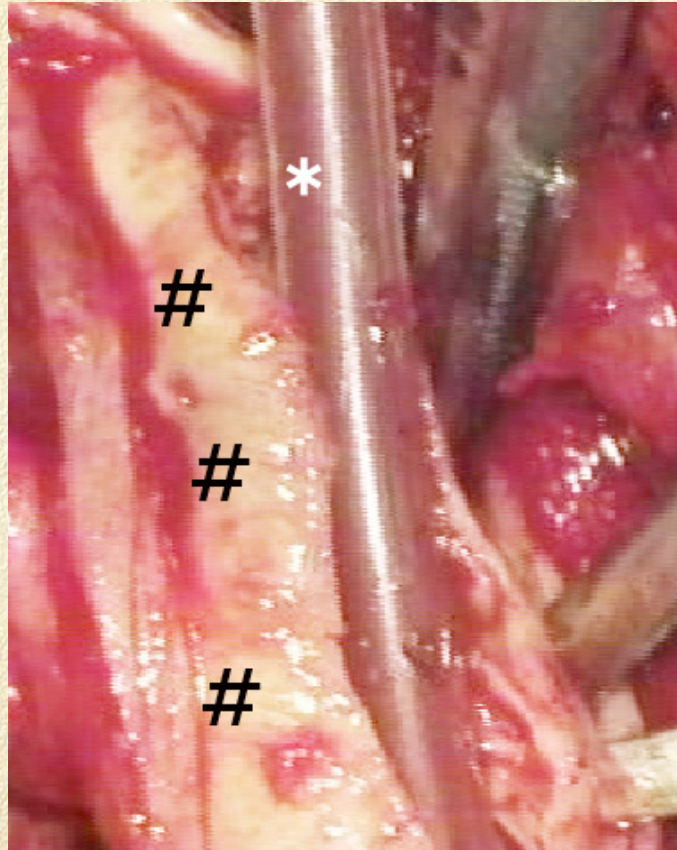
# 血栓内膜剥離術

---

- 頸部頸動脈由来の脳梗塞の治療
- 動脈硬化性の粥腫を外科的に切除
- 適応
  - 血行力学的に問題である場合
  - 塞栓源となっている場合

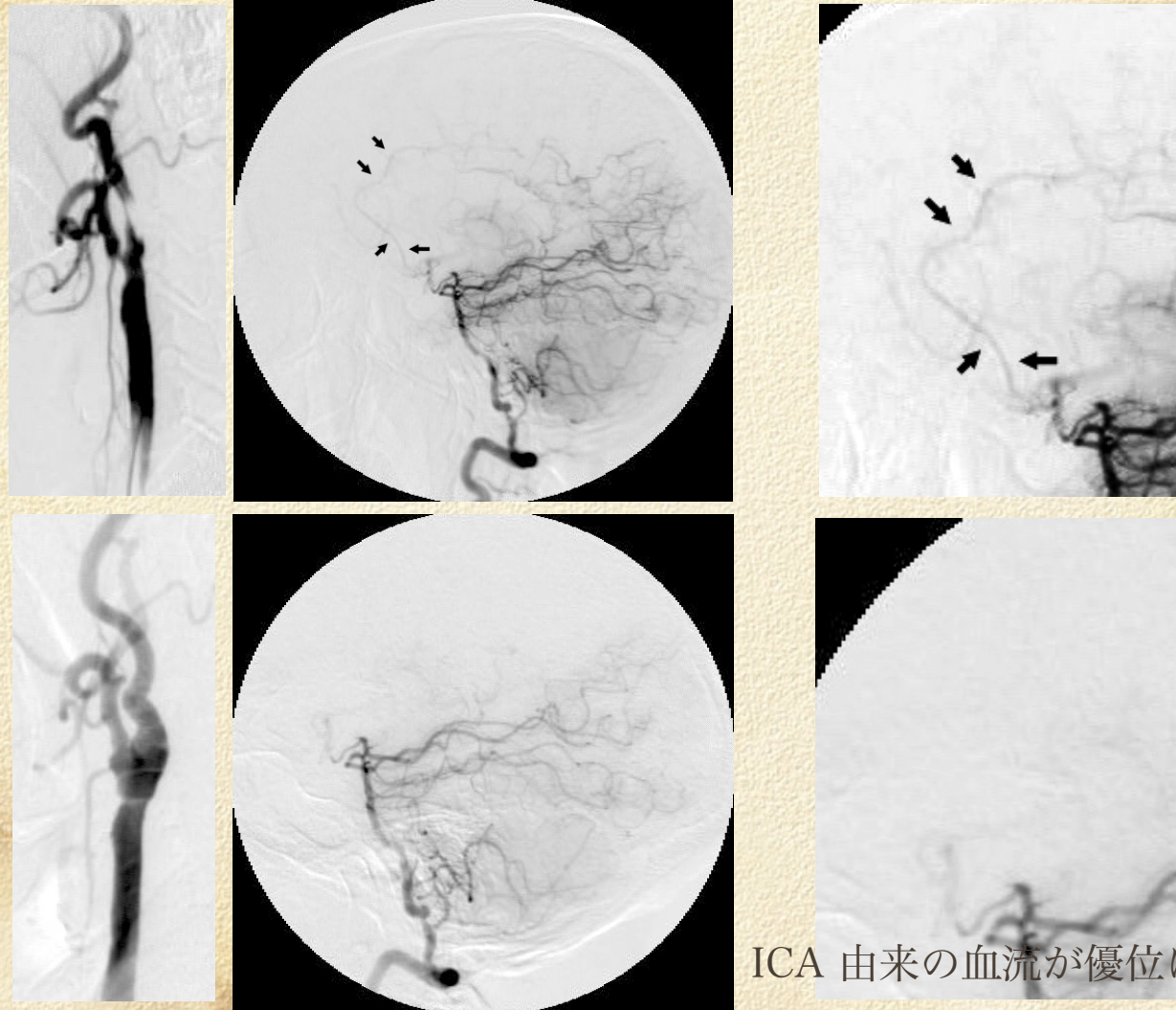


# 血栓内膜剥離術





# 血栓内膜剥離術



ICA 由来の血流が優位になった



# 血栓内膜剥離術

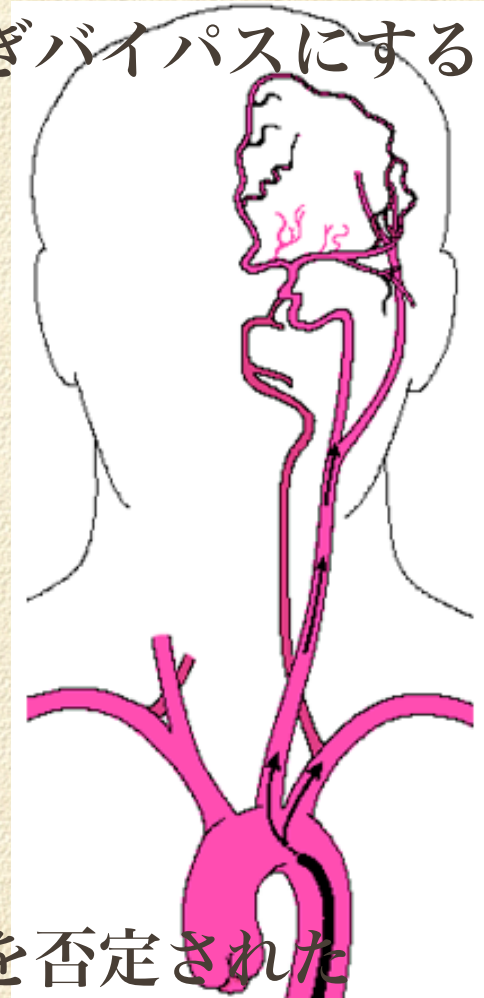
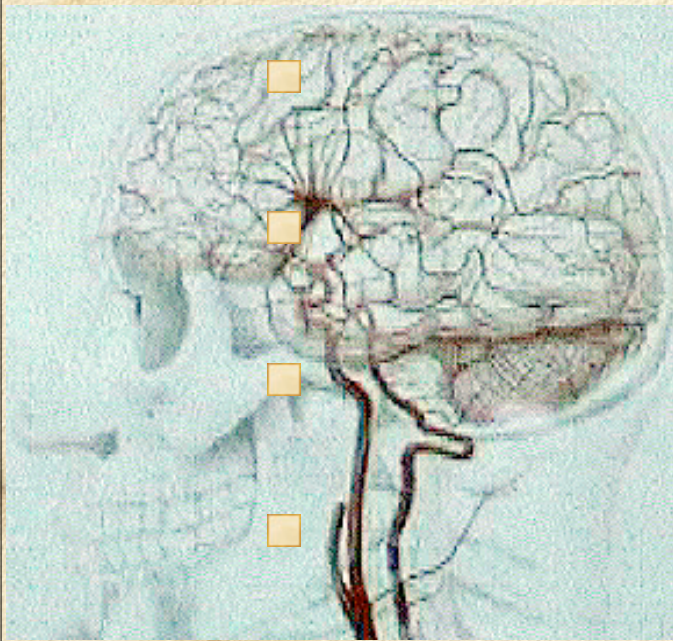
---

- Indication
  - Hemodynamic Compromise
  - Source of (Micro?) Emboli
    - At Ulcer? At Severe Turbulance?
- Hyperperfusion after Surgery?
  - Stent or CEA



# 浅側頭動脈中大脳動脈吻合術

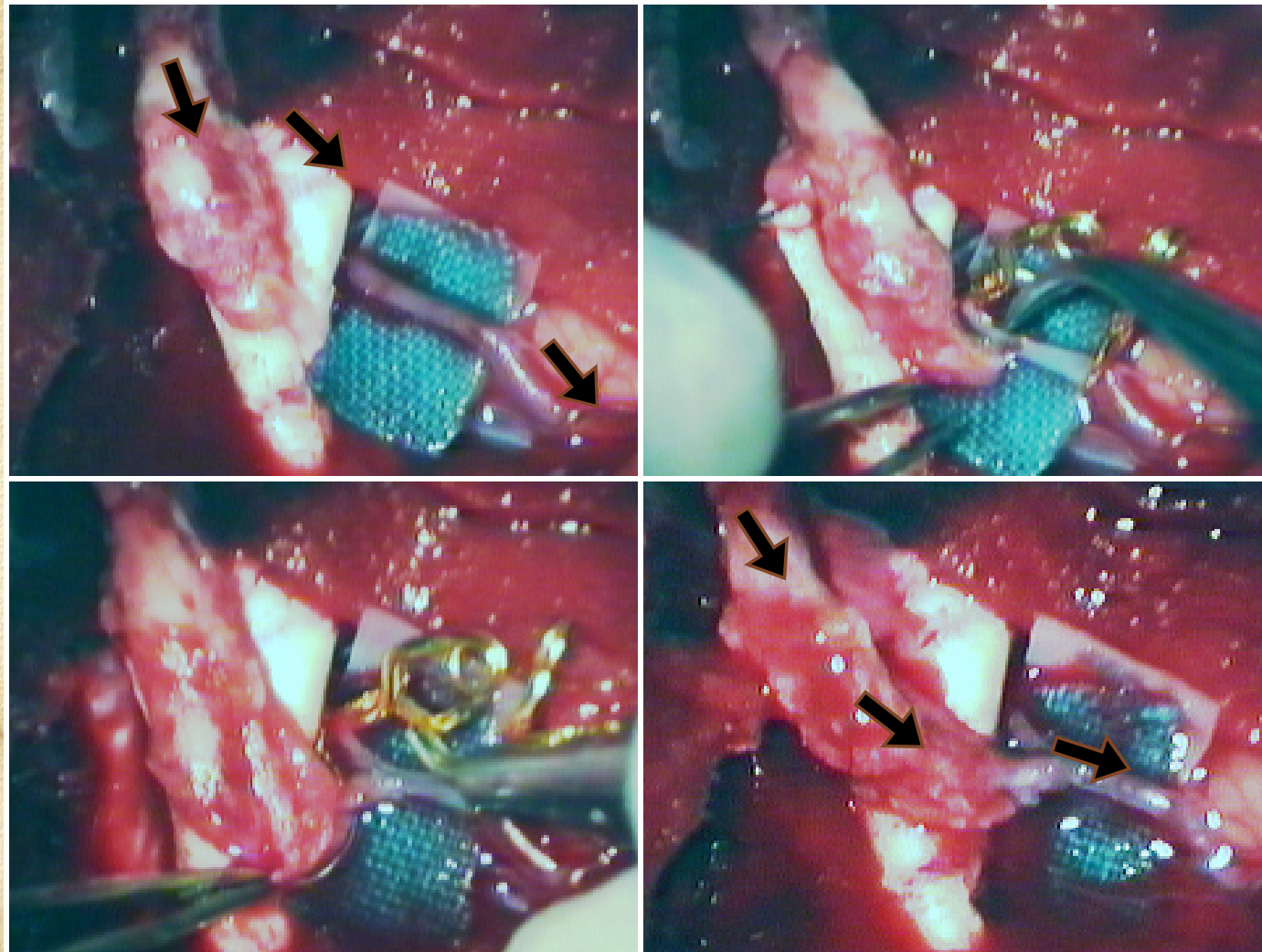
- 頭皮の血管を脳の血管につなぎバイパスにする



- かつて大規模臨床評価で効果を否定された



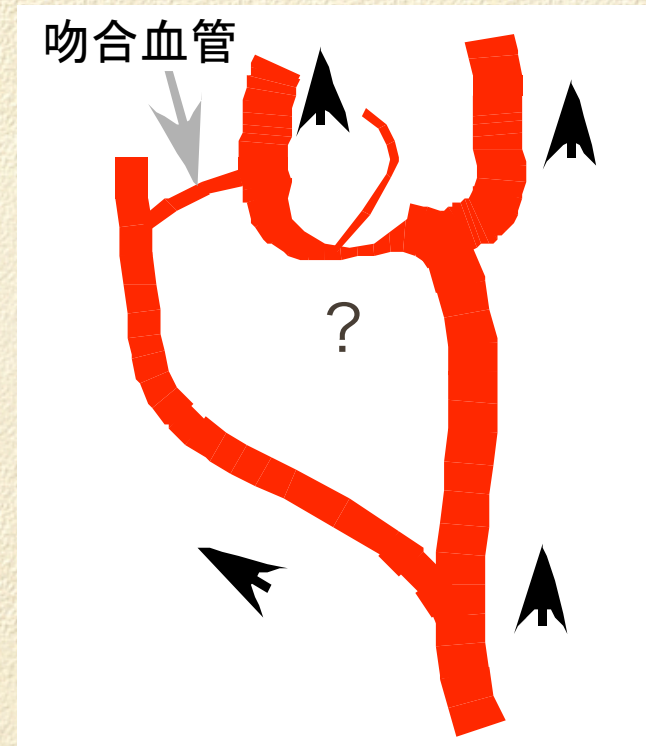
# 浅側頭動脈中大脳動脈吻合術





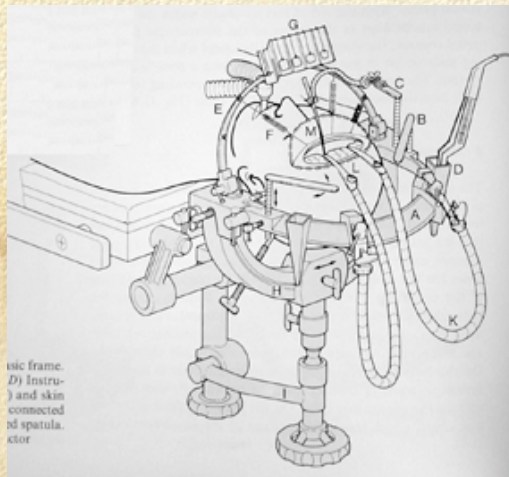
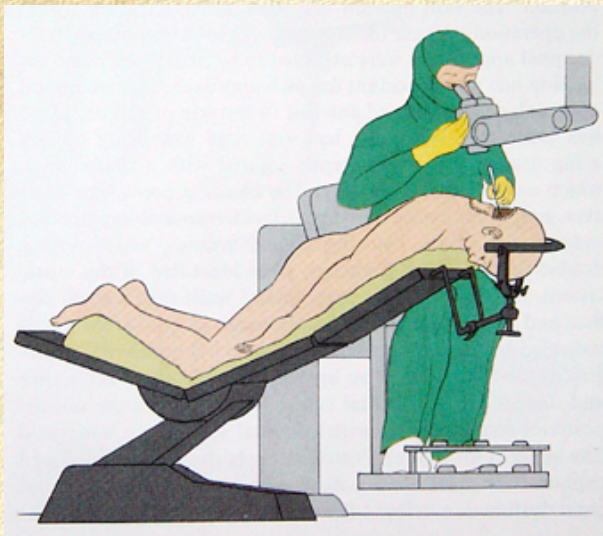
# 浅側頭動脈中大脳動脈吻合術

- 狭窄性病変への効果は？





# 開頭術と体位



Basic frame.  
D) Instru-  
) and skin  
connected  
nd spatula  
ctor

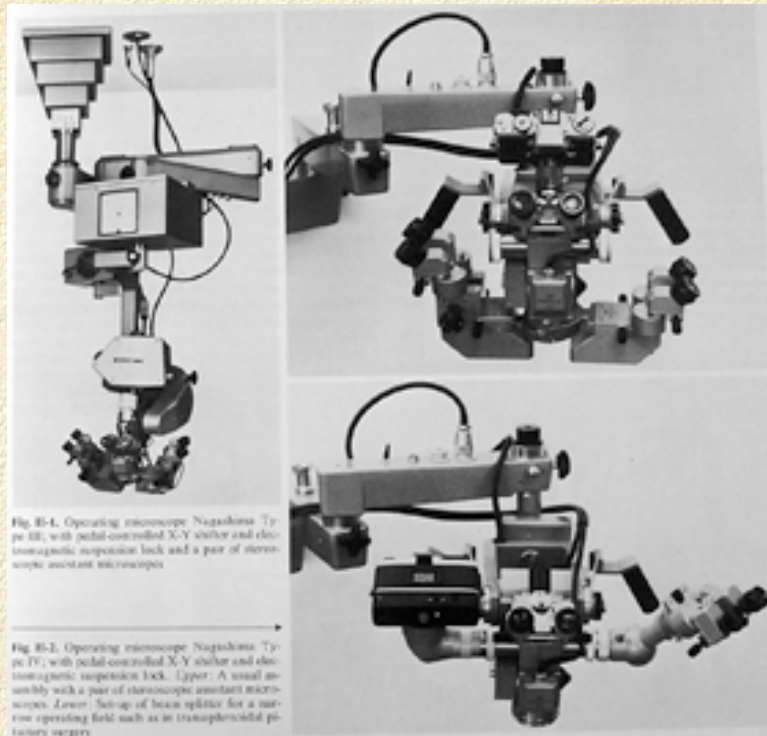
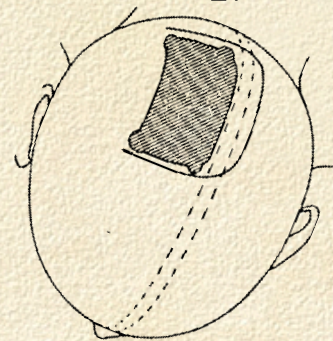
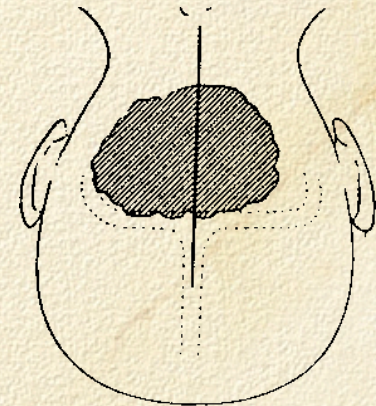
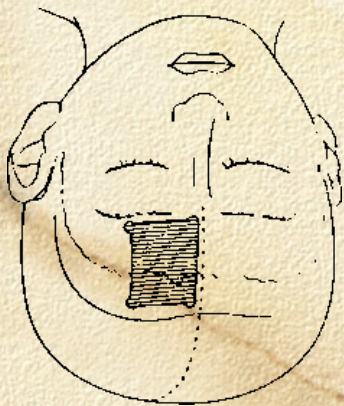
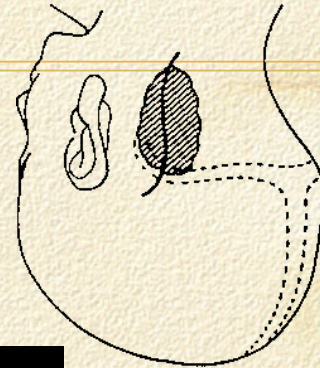


Fig. 8-4. Operating microscope Nagashima Type III; with pedal-controlled X-Y shifter and electromagnetic suspension lock and a pair of stereoscopic assistant microscopes

Fig. 8-2. Operating microscope Nagashima Type IV; with pedal-controlled X-Y shifter and electromagnetic suspension lock. Upper: A usual assembly with a pair of stereoscopic assistant microscopes. Lower: Set-up of beam splitter for a narrow operating field such as in transphenoidal pituitary surgery

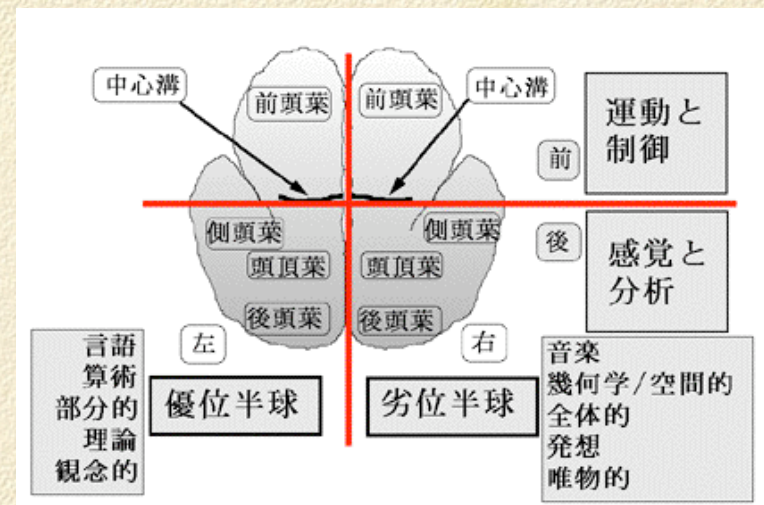
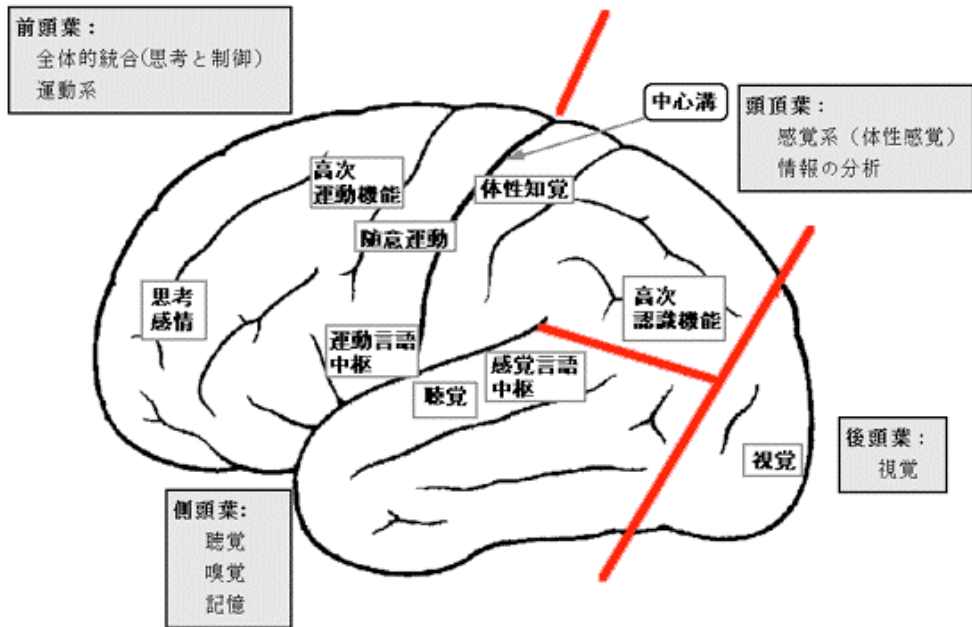


# 開頭術と体位



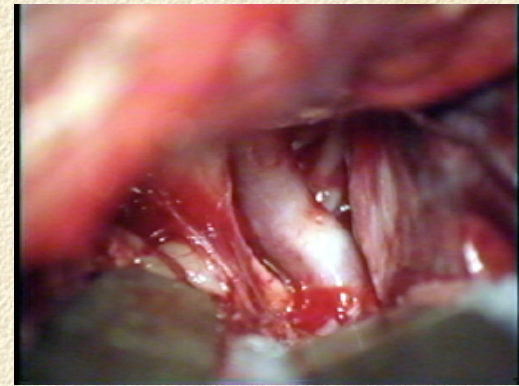
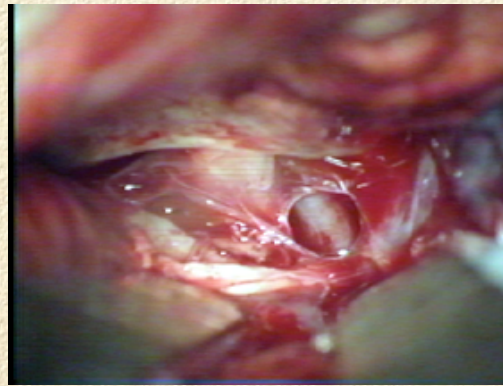
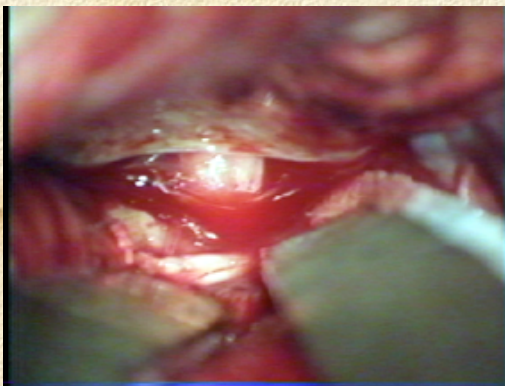
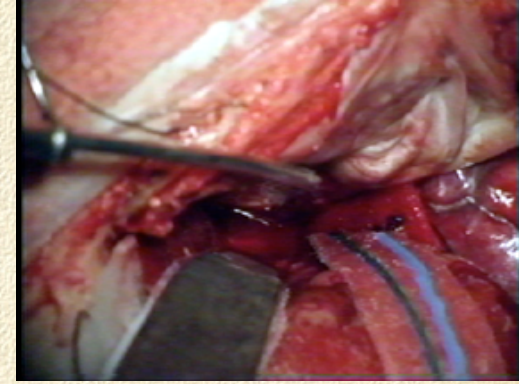
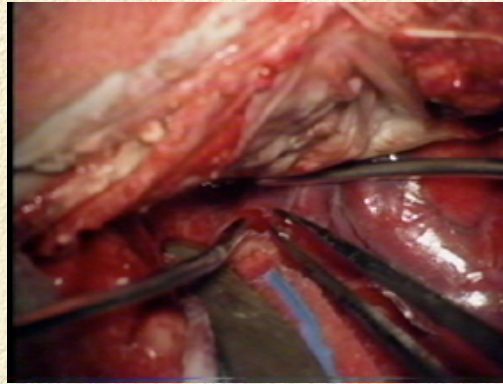
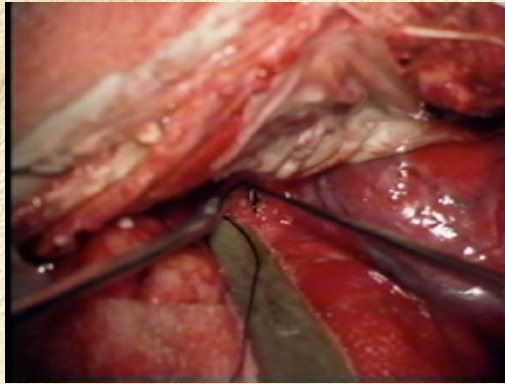


# 開頭術と体位





# 脳の圧排

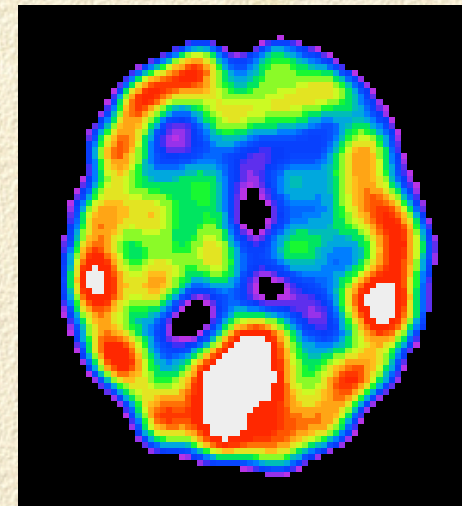




# 脳の圧排

---

- 脳組織を切開することはできない
- 大きなしわを押し開いて手術する
- 術後脳血流の低下？
- 圧排を最小にするアプローチは？





# まとめ

---

- 脳動脈瘤を主に脳神経外科領域に対する生体力学研究の応用に関して報告した。
  - 流体解析の脳動脈瘤への応用、合併症などへの解析の期待
  - 臨床診断から得られる境界条件の計測
  - 流体解析から派生した中空モデルの作成、今後期待できる進展
- 血管内治療のシミュレータと手術記録装置への発展
- リハビリテーションへの応用
- 開頭術での応用の可能性
- 
- **Tailor Made Medicine への進展**





*Thank You for Your Attention*



# Conclusion

---

- BioMechanics/Human Simulator
- **Tailor Made Medicine**
  - Not Only Medicine Based on Mass Study
    - Operate or Not for Incidental Lesions
  - Indication
  - Tailor Made Materials, Approach
    - Increase Safety of Craniotomy
    - Make Safer Embolization
    - Design of Materials
- Robotic Surgery