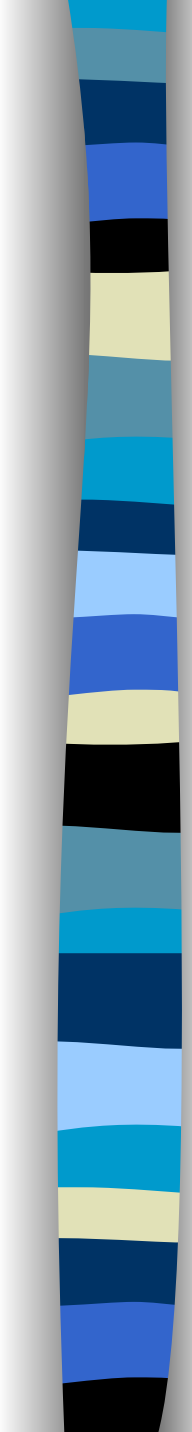




# 動的陽解法FEMによる 生体硬・軟組織構造の 衝突損傷解析

平田 忍(理化学研究所)  
仲町 英治(大阪工業大学工学部)



# 人体の材料構成式の提案と材料パラメータの同定 (米国や韓国)

例) 脳の材料パラメータ同定方法

多くの検討の余地が残されている

骨および脳組織の損傷・破壊を予測するための数理モデルおよび判定基準に関する研究は非常に少なく実験検証も不十分

## 課題

頭蓋骨および脳に生じる損傷を予測する  
シミュレーション手法の開発

# 目的

有限要素人体材料モデル: E S I モデル頭部

動的陽解法有限要素法PAM-CRASH

硬組織である頭蓋骨および軟組織である脳の  
応力伝播に関する解析結果を検討

損傷モデル構築の基礎となる知見を得る

## 弱形式の仮想仕事率の原理式

$$\int_V \delta \mathbf{D} dV + \int_V \delta \dot{\mathbf{u}}^T (\rho \ddot{\mathbf{u}} + \nu \dot{\mathbf{u}} - \mathbf{f}) dV - \int_{S_T} \delta \dot{\mathbf{u}}^T \bar{\mathbf{T}} dS + \int_{S_c} \delta (\dot{\mathbf{u}}_c^T \mathbf{f}_c) dS \geq 0 \quad (1)$$

$\mathbf{u}$  : 変位ベクトル, 記号  $(\dot{\quad})$  : 時間微分,  $\mathbf{f}$  : 物体力,  $\rho \ddot{\mathbf{u}}$  : 慣性力,  $\nu \dot{\mathbf{u}}$  : 減衰力,  $\sigma$  : コーシー応力,  
 $\mathbf{n}$  : 単位法線ベクトル,  $\mathbf{D}$  : 変形速度テンソル,  $\mathbf{T}$  : 表面力

$$\int_{S_c} \delta (\dot{\mathbf{u}}_c^T \mathbf{f}_c) dS = \int_{S_c} (\delta \dot{\mathbf{u}}_c)^T \mathbf{f}_c dS + \int_{S_c} \dot{\mathbf{u}}_c^T \delta \mathbf{f}_c dS \quad (2)$$

$\dot{\mathbf{u}}_c$  : 境界速度,  $\mathbf{f}_c$  : 接触力

## 運動方程式

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{G}^T \lambda + \mathbf{F} = \mathbf{P} \quad (3a)$$

$$\mathbf{G} \dot{\mathbf{u}} \leq 0 \quad (3b)$$

$\mathbf{M}$  : 集中質量,  $\mathbf{C}$  : 減衰マトリクス,  $\mathbf{P}$  : 外力ベクトル,  $\mathbf{F}$  : 内力ベクトル  
 $\lambda$  : ラグランジ未定乗数,  $\mathbf{G}$  : 接触境界条件マトリクス

# 接触判定法

相手物体表面上で決定された位置ベクトル $\mathbf{x}$ と接触判定された有限要素節点 $I$ の位置ベクトル $\mathbf{x}^I$ を用いることで食い込み量  $g$ を求めることができる。

$$g = \mathbf{n} \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}^I) \quad (4)$$

# ペナルティ法

接触力ベクトル $\mathbf{P}$ は接触接平面に対して垂直方向および接線方向の成分に分解できる。垂直方向成分 $\mathbf{P}_n$ は食い込み量 $g$ とペナルティ数 $p^n$ によってつぎのように求められる。

$$\mathbf{P}_n = p^n \cdot |g| \cdot \mathbf{n} \quad (5)$$

$$\mathbf{u}^{t+\Delta t} = \left[ \left( \frac{1}{\Delta t^2} \mathbf{M} + \frac{1}{2\Delta t} \mathbf{C} \right) \right]^{-1} \left[ \mathbf{P} - \mathbf{F} + \mathbf{M} \frac{1}{\Delta t^2} (2\mathbf{u}^t - \mathbf{u}^{t-\Delta t}) + \mathbf{C} \frac{1}{2\Delta t} \mathbf{u}^{t-\Delta t} \right] \quad (6)$$

## ラグランジ未定乗数法

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}^t + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}^t + (\mathbf{G}^{t+\Delta t})^T \boldsymbol{\lambda} + \mathbf{F}^t = \mathbf{P}^t$$

$$\mathbf{G}^{t+\Delta t} \{\mathbf{u}^{t+\Delta t} + \mathbf{X}\} = 0$$

$$\mathbf{u}^{t+\Delta t} = \hat{\mathbf{u}}^{t+\Delta t} + \mathbf{u}_c^{t+\Delta t}$$

$$\mathbf{u}_c^{t+\Delta t} = -(\Delta t)^2 \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{G}^{t+\Delta t})^T \boldsymbol{\lambda}^t$$

$$\boldsymbol{\lambda}^t = [(\Delta t)^2 \mathbf{G}^{t+\Delta t} \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{G}^{t+\Delta t})^T]^{-1} \mathbf{G}^{t+\Delta t} \{\hat{\mathbf{u}}^{t+\Delta t} + \mathbf{X}\}$$

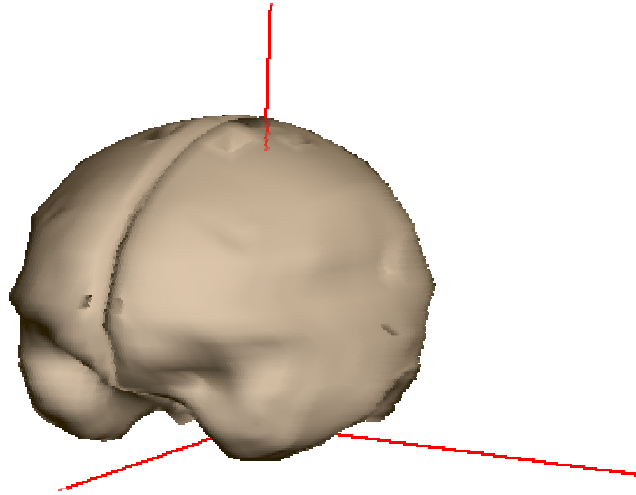
$$(\hat{\mathbf{x}}^{t+\Delta t} = \hat{\mathbf{u}}^{t+\Delta t} + \mathbf{X})$$

## 頭蓋骨



頭蓋骨は内板，間板層および外板から構成される三層構造となっており脳を保護している．内板と外板は皮質骨，間板層は造血器官としての海面骨からなっている．

## 脳の構造

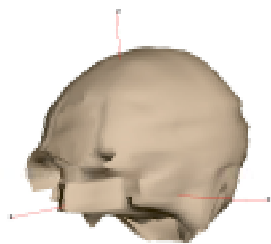


真ん中に大きな溝があり，その溝により左右に分けられた大脳半球から成り立っている．  
脳の中身を容積で言うと，脳実質が1200ml，CSFが100~150ml，血液が100~150mlとなっている．

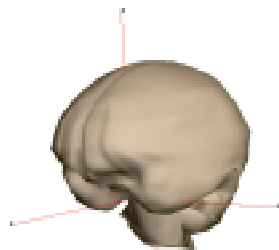


Table. Material parameter of solid finite elements

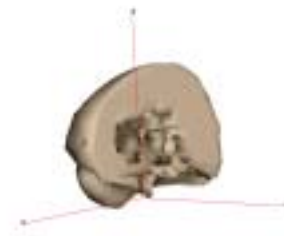
Item	Density	Shear modulus	Tangent modulus	Bulk modulus	Yield Stress
	(kg/mm <sup>3</sup> )	(GP)	(GP)	(GP)	(GP)
Skull	2.10E-06	2.27	2.5	3.29	0.042
CSF	1.04E-06	5.00E-07	1.49E-05	0.219	10
Bony sinus	2.10E-06	1.64E+00	2.5	2.42	0.042
White matter-left	1.04E-06	2.68E-04	5.00E-05	0.349	2
Gray matter-left	1.04E-06	1.68E-04	5.00E-05	0.219	2
Ventricle-left	1.04E-06	5.00E-07	1.49E-05	0.219	10
Brain-stem-left	1.04E-06	2.68E-04	5.00E-05	0.349	2
Venous sinus	1.04E-06	5.00E-07	1.49E-05	0.219	10
White matter-right	1.04E-06	2.68E-04	5.00E-05	0.349	2
Gray matter-right	1.04E-06	1.68E-04	5.00E-05	0.219	2
Ventricle-right	1.04E-06	5.00E-07	1.49E-05	0.219	10
Brain-stem-right	1.04E-06	2.68E-04	5.00E-05	0.349	2



Skull



CSF



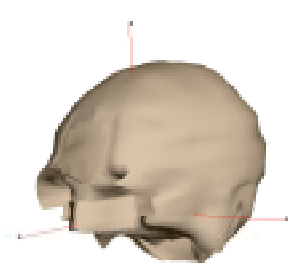
Gray matter left



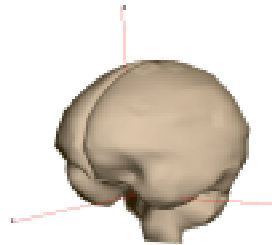
Ventricle-right

Table. Material parameter of shell finite elements

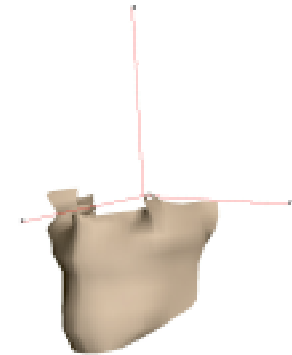
Item	Density (kg/mm <sup>3</sup> )	Young's modulus (GP)	Poisson's ratio	Thickness (mm)
Scalp	1.20E-06	0.0167	0.42	6
Dura	1.13E-06	0.0315	0.45	1
Pia	1.13E-06	0.0115	0.45	0.1
Falx	1.13E-06	0.0315	0.45	1.5
Tentorium	1.13E-06	0.0315	0.45	1
Facial bone	3.00E-06	5.54	0.22	9



Scalp



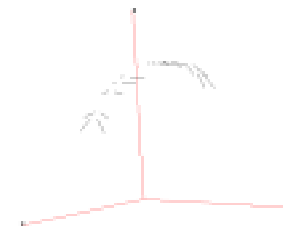
Pia



Facial bone

Table. Material parameter of bar finite elements

Item	Density (kg/mm <sup>3</sup> )	Linear elastic stiffness
Bridging veins	1.13E-06	0.0019

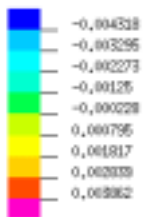


Bridging veins

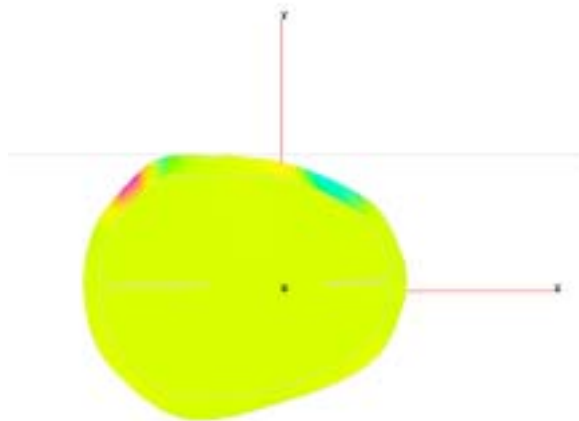
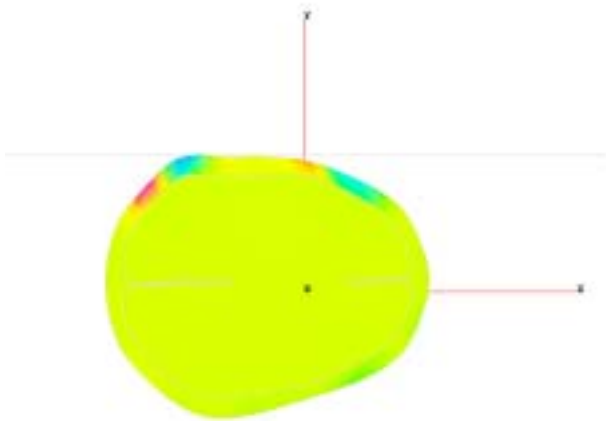
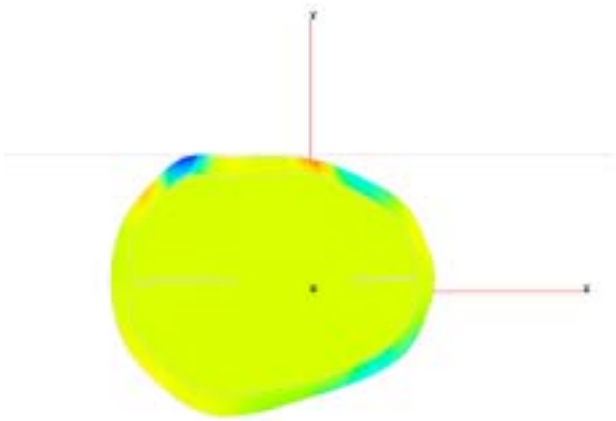
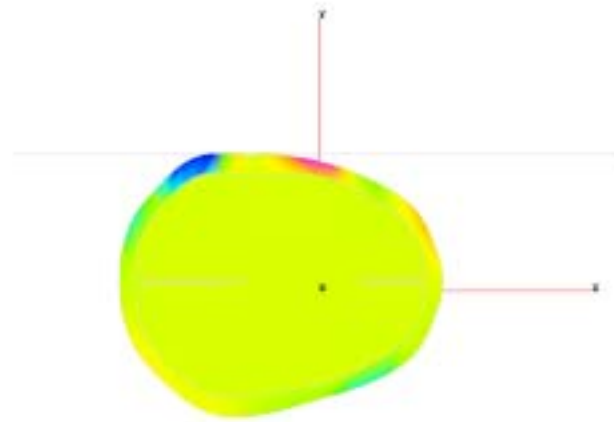
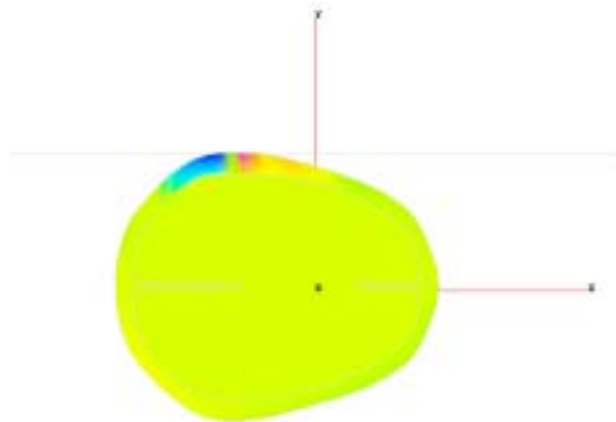
Table. Nodes and elements of each elements

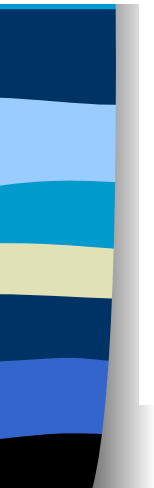
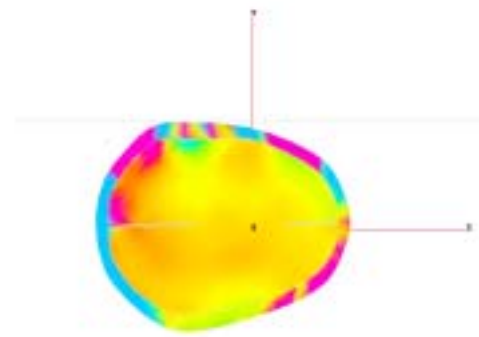
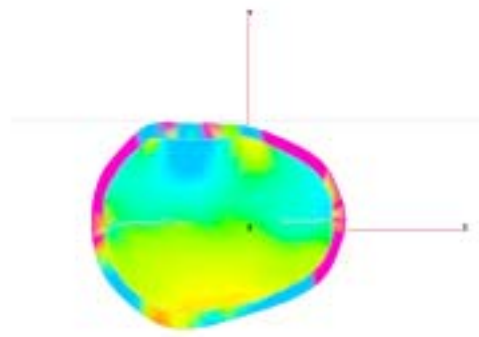
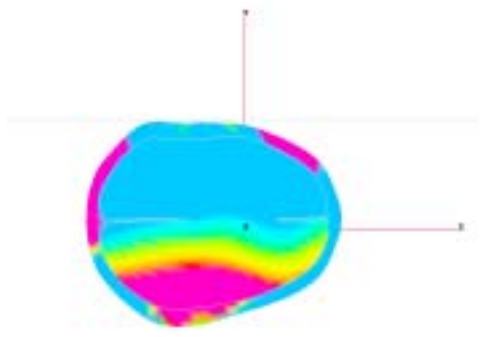
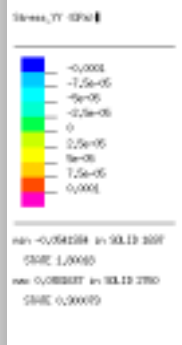
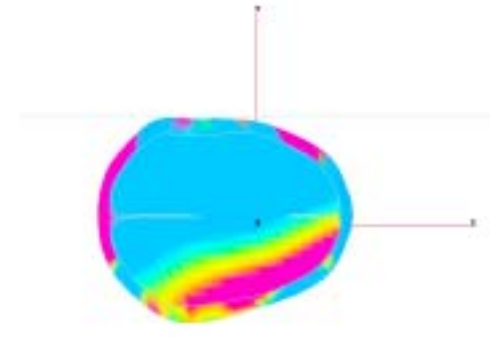
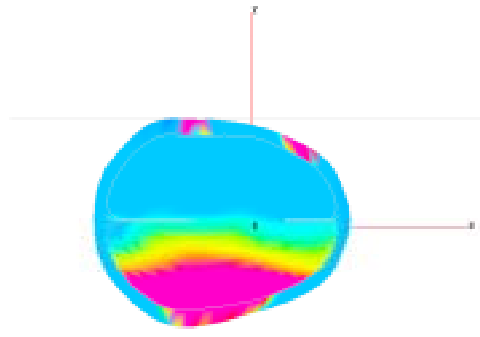
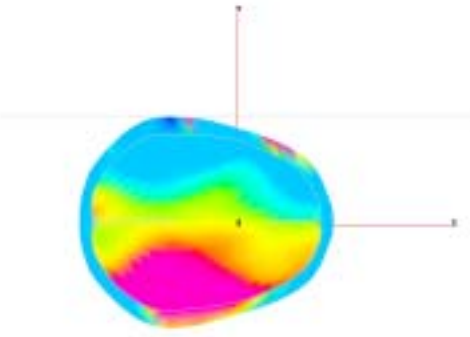
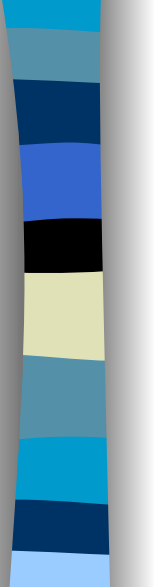
Item	Element type	Nodes	Elements
skull	Solid	5392	2672
csf	Solid	6598	3376
bony sinus	Solid	330	126
white matter-left	Solid	3343	1642
gray matter-left	Solid	4931	2790
ventricle-left	Solid	336	109
brain-stem-left	Solid	400	223
venous sinus	Solid	448	138
white matter-right	Solid	3343	1642
gray matter-right	Solid	4931	2790
ventricle-right	Solid	336	109
brain-stem-right	Solid	400	223
scalp	Shell	2728	2702
dura	Shell	394	330
pia	Shell	3437	3376
falx	Shell	274	227
tentorium	Shell	223	184
facial bone	Shell	363	318
bridging veins	Bar	40	20

Stress\_XY (Pa)



min -0.0021139 in SOLID 2472  
STATE 2,10021  
max 0.002722 in SOLID 2490  
STATE 1,10009







## 結言

- 応力波の伝播具合を把握することが出来た．
- 骨と脳においては伝播速度の絶対値が違うことが分かった．

今後，実際に実験を行うなどしてデータを比較し，モデルの信頼性を検討していきたいと考えている．