

硬・軟組織生体材料の力学応答解析と力学適応評価手法の開発

阪工大 仲町英治

Development of Mechanical Response Analysis and Evaluation Method of Mechanical Adaptability of Hard · Soft Bio-Materials

Eiji Nakamachi

Key Words : mechanical adaptability, mechanical response, bio-material, finite element analysis

1. 緒言

生体構造は硬・軟組織複合材料により構成されており、本研究で対象とする人体頭部は、硬組織である頭蓋骨および軟組織である脳によって構成されている。この人体頭部が交通事故、転落事故、格闘技などでの打撲により衝撃荷重を受けた場合の頭蓋骨および脳に生じる応力と損傷を予測し、衝撃力に対する力学適応機能、つまり材料特性の能動的変化能力を評価するためのシミュレーション手法の開発を主要な課題とする。衝撃側に生じる coup 型脳挫傷のみならず、衝撃の対局側に生じる contre-coup 型脳挫傷の発生メカニズムについてはさまざまな学説が提唱されているが¹⁾、完全に解明されたとはいえない。また、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の構築を目指す研究は少なく実験検証も不十分といえる。本研究では、人体頭部を有限要素モデル化し、頭部が剛体壁に衝突した場合の動的変形挙動を動的陽解法有限要素法プログラム PAM-CRASH を用いて解析を行う。さらに実際の人体頭部に近い力学的特性をもつ材料モデル構築を目的とした生体外材料試験を行う。ここでは、豚脳（ホルマリン漬け）を用いて粘弾性材料特性値を求めた。頭蓋骨の衝突解析の妥当性を検討するための実験も行う。

2. 人体頭部の構造

2.1 頭蓋骨¹⁾³⁾

頭蓋骨の内部は、脳を収めるための大きな空間となっており、15 種 23 個の骨より構成されている。脳を覆っている部分を脳頭蓋、顔面を構成している部分を顔面頭蓋という。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で、脳などの中枢神経系や目、鼻、耳などの主要感覚器官を保護している。また、内板と外板は皮質骨、間板層は海面骨からなっている。

2.2 脳⁴⁾⁵⁾

頭蓋骨の中にあり、大脳および小脳とそれらにつつまれた脳幹から構成されている。脳の表面は外側より硬膜、クモ膜および軟膜という 3 枚の膜で覆われ、クモ膜と軟膜の間は脳脊髄液（CSF）で満たされている。大脳は左右二つの半球に分けられている。表層は灰白質（皮質）といわれる神経細胞の集まりで、内部は白質（髄質）といい神経線維の集まりである。

3. 有限要素人体頭部モデル²⁾

今回の計算解析については、日本 ESI (株) 社が米国および韓国の研究者に依頼して測定した材料特性と幾何形状を基にモデル化した有限要素人体

頭部モデル (BIO HEAD モデル) を採用した。このモデルは標準的な成人の頭部をモデル化したものであり、ソリッド要素、シェル要素、バー要素により有限要素モデル化されている。BIO HEAD モデル (Fig. 1-2) では、Table 1~3 で示される材料パラメータが採用されている。これらの材料パラメータは米国の Wayne State University によって同定された値である。頭部は頭蓋骨と顎部分に分かれており、頭皮は 6 mm 厚の弾性 Shell 要素として頭蓋骨に接している。顔面頭蓋 (facial bone) は実際の人体頭部の総重量と BIO HEAD モデルの総重量を等しくするという役割が主であるために、その密度は脳頭蓋 (skull) のそれよりも大きく、9mm 厚の弾性 Shell 要素として定義されている。材料モデルは全て弾性体として定義されている。

しかし、生体組織を取り扱う場合、粘性効果を見捨てることは妥当とはいえない。特に骨などの硬組織に比べ脳などの軟組織ではその効果は顕著であると考えられる。そこで、生体外・脳の材料試験を行い軟組織である脳の材料モデルとして粘弾性体を採用し、その材料パラメータを同定した。

脳の材料モデルが弾性体の場合と粘弾性体の場合について計算解析を行い衝撃応答の違いを比較した。

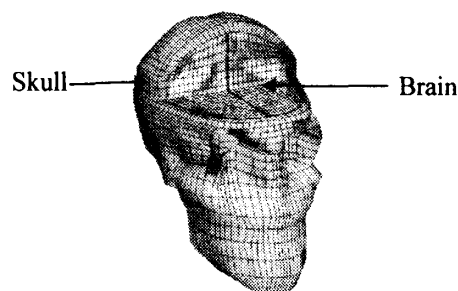


Fig. 1 BIO HEAD Model

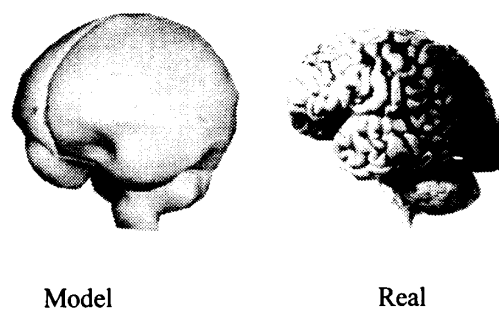


Fig. 2 Brain

Table. 1 Material parameter of solid finite elements

Item	Density (kg/m ³)	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio
skull	2100	5540	0.22
Bony sinus	2100	4010	0.22
csf	1040	0.00150	0.49
White matter	1040	0.804	0.49
gray matter	1040	0.504	0.49
Brain-stem	1040	0.804	0.49

Table. 2 Material parameter of shell finite elements

Item	Density (kg/m ³)	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio	Thickness (mm)
scalp	1200	16.7	0.42	6.0
dura	1133	31.5	0.45	1.0
pia	1133	11.5	0.45	0.1
facial bone	3000	5540	0.22	9.0

Table. 3 Material parameter of bar finite elements

Item	Density (kg/m ³)	Linear elastic stiffness (N)
riding veins	1133	1.9

4. 粘弾性材料モデル⁶⁾⁷⁾

BIO HEAD モデルは生体組織に特徴的な粘性効果を無視している。特に骨などの硬組織に比べ脳などの軟組織ではその効果は顕著であると考えられる。そこで、脳組織に対して線形粘弾性モデル (Fig. 3 Kelvin model) を採用した⁸⁾。時間依存の弾性係数 $E(t)$ は以下ようになる。

$$E(t) = E_{\infty} + (E_0 - E_{\infty})e^{-\beta t} \quad (1)$$

ここで、 t はひずみの作用時間 E_{∞} は $t = \infty$ における緩和弾性係数、 E_0 は $t = 0$ における瞬間弾性係数、 β は緩和時間を表わす。(1)式で表わされるモデルにステップひずみ(一定)を与えた場合の時間依存の弾性係数 $E(t)$ のグラフは Fig. 4 の実線のようになる。

この材料モデルを計算解析で用いるために脳の材料パラメータ (E_{∞} , E_0 , β) を実験により同定する必要がある。そこで生体外での豚脳(ホルマリン漬け)を試験材料として、単軸圧縮の応力緩和試験を行い材料パラメータを同定した。生体軟組織の多くは 80%以上もの多量の水を含むので、変形しても体積が不変であり、いわゆる比圧縮性材料とみなしても差し支えないので豚脳のポアソン比を 0.49 と仮定した。

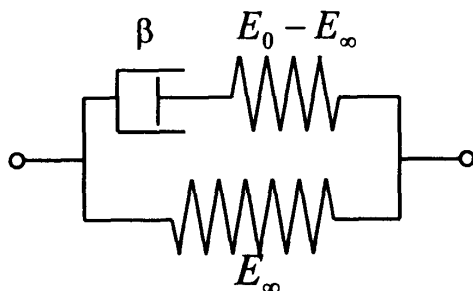


Fig. 3 Kelvin model

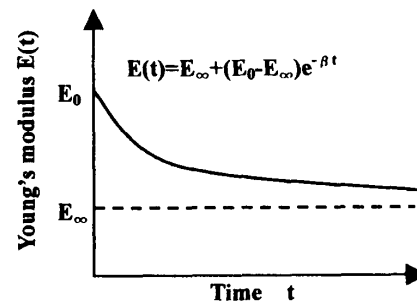


Fig. 4 Time history of Young's modulus

5. 生体外・脳の材料試験

豚脳(ホルマリン漬け) Fig. 5 を用いた応力緩和試験を行い材料パラメータの同定を行った。



Fig. 5 Pig brain

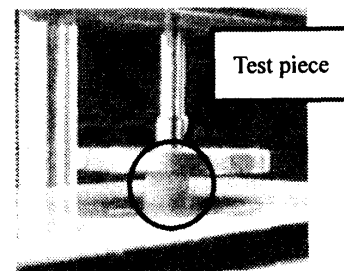


Fig. 6 Test piece

5.1 試験片

豚脳の試験片は内径 10mm の金属製円筒で脳のしわのない部分を選んでくり貫きカッターで高さを 10mm として製作した。豚脳については死後約 1 ヶ月が過ぎており、その間はホルマリン内で保存されたものを使用した。試験片の寸法については柔らかい材料であるため、自重による影響を抑えるために縦横比をおよそ 1 対 1 になるように摘出した。

5.2 試験条件

試験片にステップひずみを与えそのときに生じる応力の時系列変化を記録した。ひずみ量は -0.1 と -0.2 の 2 種類の場合についてそれぞれ 2 回ずつ計 4 回試験を行った

5.3 試験結果

4 回行った応力緩和試験から横弾性係数と時間の関係をそれぞれ求めた。その平均値を Fig. 7 に示す。

最小自乗法により実験値から(1)式の形であらわされる近似曲線を求めた. 近似曲線の式は(2)式のようになった.

$$E(t) = 0.0219 + 0.0075e^{-0.6t} \quad (2)$$

(1)式(2)式より E_{∞} , E_0 , β が求まりその値を Table.4 に示した.

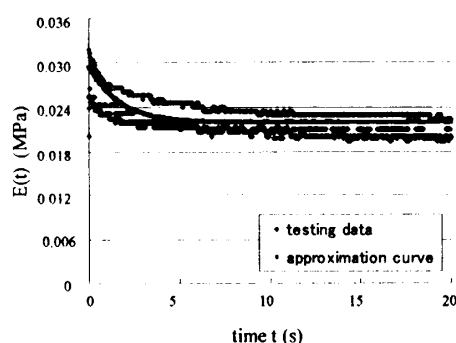


Fig. 7 Time history of Young's modulus

Table. 4 Material parameter of brain

$E_{\infty}(\text{MPa})$	$E_0(\text{MPa})$	$\beta(\text{s}^{-1})$
0.0219	0.0294	0.6

計算解析条件

人が転倒し, 地面に側頭部を強打した場合を想定し条件を設定した. BIO HEAD モデルをFig. 8に示すように初速度 6.33m/s で剛体壁に衝突させた. 脳の材料モデルを弾性体と粘弾性体の 2 種類の場合について解析を行った.

なお, 与えた初速度は, 物体を地上約 2m から自由落下させたとき地上に衝突する瞬間の速度に相当する.

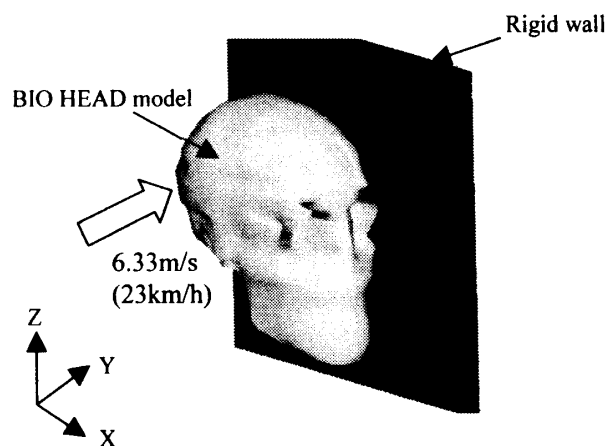


Fig. 8 BIO HEAD model with Rigid wall

6. 解析結果

側頭部を剛体壁に衝突させたときに生じる頭蓋骨の Y 軸方向応力分布をFig. 9に示す. 衝突後 0.6ms に眼底部に約 2MPa の引っ張りの応力集中が発生することが確認された. これは, 頭蓋骨の形状が原因となって生じたと考えられる. 脳組織中の A~C 各点(Fig. 10)における Y 軸方向応力成分の時系列線図をFig. 11に示す. この図から脳内で生じる応力の絶

対値は脳中央部すなわち B 点付近で最小となることがわかった. このことから脳中央部は脳外周部に比べると損傷しにくいと考えられる. 弾性体と粘弾性体の衝撃応答を比べると衝突側では, 粘性効果のために応力値のピークが下がっている. しかし, 衝突側の対局側では, 逆に応力値のピークが弾性体の場合よりも粘弾性体の場合で高くなっている. 実際の脳損傷現象では衝撃の対局側に生じる contre-coup 型脳挫傷が確認されていることから脳の材料モデルには粘弾性体を採用することが妥当だと考えられる. なお, Fig. 10は BIO HEAD モデルのこめかみ付近の XY 平面の断面図である.

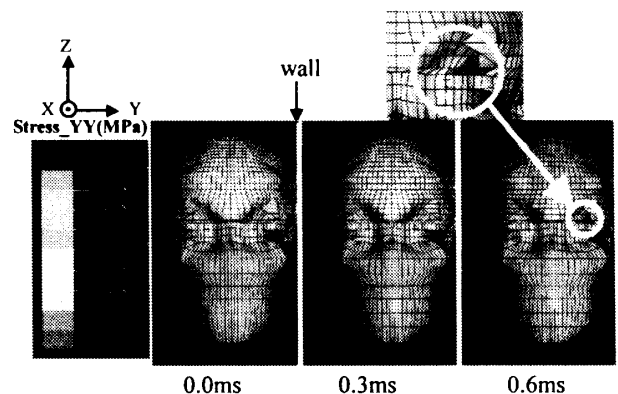


Fig. 9 Distributions of stress-YY

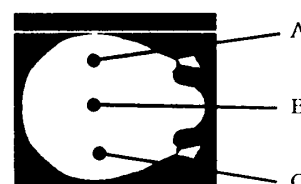


Fig. 10 Sampling position of time history data

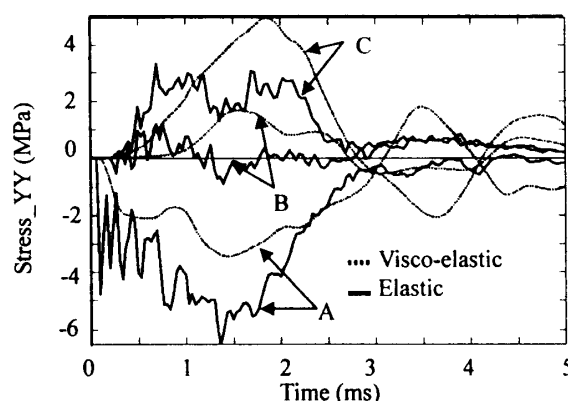


Fig. 11 Time histories of stress-YY

7. 頭蓋骨の衝撃応答

ここまで軟組織である脳の衝撃応答について調べた. 次にその脳を外力から保護する働きを担う頭蓋骨の衝撃応答について調べた. BIO HEAD モデルを用いた F E M 解析では頭蓋骨眼底部に応力が集中するという結果が得られた. その検証実験として実際の頭蓋骨と形状が等しいポリ塩化ビニル(PVC)製の頭蓋骨複製模型を用いた衝突実験とその F E

M解析を行った。

衝突実験の実験条件はFig. 12のように頭蓋骨模型の後頭部をボルトで固定し、初速 5m/s でアルミ製のインパクトを前頭部に衝突させるものとした。頭頂部と前頭部の中間点と眼底部の2個所にひずみゲージを貼りその点におけるX軸、Y軸方向の最大応力を求めた。得られた値はTable. 5のようになった。頭蓋骨模型の材料パラメータは頭蓋骨模型から試験片を作成し引張試験を行いTable. 6のように決定した。

衝突実験と同条件となるように条件を設定しFEM解析を行った。衝突により生じた応力分布をFig. 13Fig. 14に示す。この図からも眼底部に応力が集中していることがわかる。また、衝突実験でひずみゲージを貼った位置に相当する位置での応力の値はTable. 7のようになった。

Table. 5とTable. 7を比較すると Gage 1 と No.1 の σ_y の値に若干の違いが見られるがその他の値は比較的よい一致を示しているといえる。この結果から衝突実験においても FEM 解析でみられた眼底部での応力集中が生じたと考えられる。

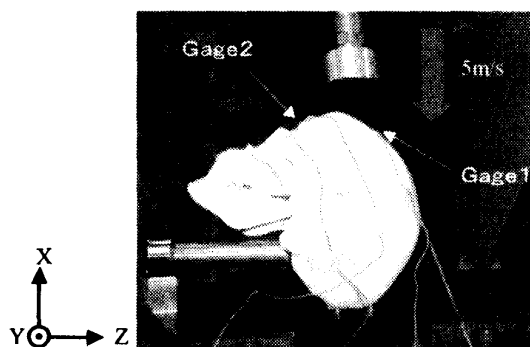


Fig. 12 collision test

Table. 5 Experimental results

Gage	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)
1	-2.14	-3.66
2	-3.17	4.10

Table. 6 Material parameter of PVC

Density (kg/m ³)	1120
Young's modulus (MPa)	345
Poisson's ratio	0.475

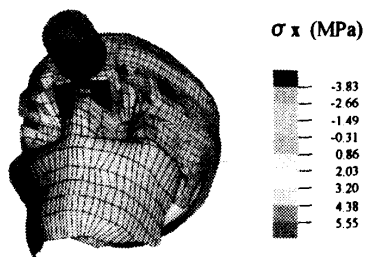


Fig. 13 Distributions of σ_x

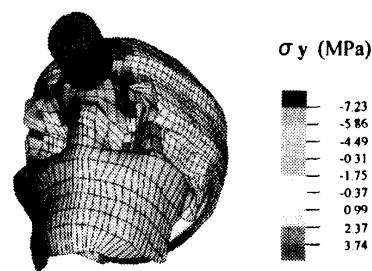


Fig. 14 Distributions of σ_y

Table. 7 Numerical results

No.	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)
1	-1.15	0.35
2	-8.07	5.41

8. 結言

軟組織である脳の中心部に発生する応力の絶対値がその他の脳部分と比べると最も小さくなっていることが分かった。このことから頭部損傷ではの中心部は損傷しにくいと考えられる。また、脳を粘弾性体とした場合、衝突側の対局側での応力値のピークが弾性体の場合よりも高くなっていた。実際の脳損傷現象では衝撃の対局側に生じる contre-coup 型脳挫傷が確認されていることから脳の材料モデルには粘弾性体を採用することが妥当だと考えられる。また、弾性体近似を行った頭蓋骨の衝突解析では眼底部に応力の集中、つまり、損傷発生の可能性が示唆された。さらに、頭蓋骨模型による衝突実験を行い、同様な結果を得ることで解析の妥当性が示された。

本研究ではホルマリン漬けの豚脳を用いて材料パラメータを同定したが、生体内の脳の材料特性を同定するための実験手法の開発が必要と考える。また、細胞レベルで定義される損傷の判定基準についても検討が必要である。

参考文献

- 1) 西本哲也, 村上成之, 「脳挫傷の発生に関する実験的研究」, 日本材料強度学会誌第 29 巻第 3 号(1995), 90-101
- 2) E. Hang, A. Tramecon and L. Hyncik "Current Status of Articulated and Deformable Human Model for Impact and Occupant Safety Simulation at ESI" PUCA'98 291-307(1998).
- 3) 山本敏行, 鈴木泰三, 田崎京二, 「新しい解剖生理学」, 南山堂(1969), 59-63.
- 4) 高橋長雄 「からだの地図帳」, 講談社(1989), 12-15.
- 5) 多田幸生, 長嶋達也, 高田昌紀, 「脳のバイオメカニクス」, 機論 58-551, A(1992), 1115-1116.
- 6) 日本機械学会, 生体機械工学, (1997), 17-19
- 7) 村上兼吉, レオロジー基礎理論, (1991), 79-95
- 8) PAM-CRASH Solver Notes Manual 1998