

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 30 日現在

機関番号：32619

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23791618

研究課題名(和文) 衝撃解析用超精密頭部シミュレーションモデルの開発

研究課題名(英文) Development of a detailed head simulation model for an impact analysis

研究代表者

渡邊 大 (Watanabe, Dai)

芝浦工業大学・システム工学部・准教授

研究者番号：60535912

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はボクセル法を用いた超精密頭部有限要素モデルを構築するためにthe National Library of Medicineが提供する断層画像データセットを元に組織分類を行ったモデル構築用ビットマップ画像を作成した。そしてそのビットマップ画像を用いてビットマップ画像を3次元化し有限要素モデルに変換するためのコンバータソフトウェアの開発を行った。さらにこのコンバータソフトウェアを用いて複数のビットマップ画像から構築された頭部有限要素モデルに各組織の材料特性を与えて既存人体実験データの挙動の比較を行い、モデルの再現性について検証を行いモデルの妥当性を確認した。

研究成果の概要(英文)：Currently, several simulation models have been proposed to evaluate damages to a brain. However, their models are available for particular researchers because of the copyright. If a simulation model of a head can be used freely, many researchers could start a lot of works on an injury prediction. As results, many researches about head protection technology will be accelerated. In this study, a finite element model of a head which can be used freely was developed. In addition, some software associated with the model was also developed.

研究分野：計算力学

キーワード：生体力学

1. 研究開始当初の背景

交通事故における死傷者は取締りの強化、厳罰化に加え自動車の衝突安全技術の飛躍的向上により減少傾向にあるが、平成 20 年においても約 95 万人と依然として高水準にある。その中において特に問題となるのが頭部外傷で、死亡者 5,155 人のうち頭部外傷が致命傷となった割合は半数を超える。一方、重傷者 56,803 人のうち重傷頭部外傷の割合は約 12%に過ぎないが、頭部外傷データベース[1]によれば重傷頭部外傷のうち転帰良好であるケースはわずか 1/4 に過ぎない。ゆえに交通事故による死亡者の更なる減少、受傷後の Quality of Life の維持のために、乗員あるいは歩行者が事故時に頭部に重大な損傷を受けないようにすることが最も重要であるといえる。ところが頭部外傷における脳損傷がどのようにして起こるかについては未だ不明な点が多い。例えば、脳挫傷、急性硬膜下血腫に代表される局所性脳損傷(focal brain injury)において、しばしば衝撃位置と反対側に損傷が発生することがあり、これを対側損傷(contrecoup injury)と称するが、なぜそのような現象が起こるのかよくわかっていない。諸説はあれどどの説にも一長一短があり一貫性のある損傷メカニズムは見出せていない。

そこで私は、頭部 CT 断層画像を元に頭部有限要素モデルを構築し数値解析手法を用いて一貫性のある局所性脳損傷メカニズム解明を試みてきた[2][3]。近年の倫理的背景により人体実験が極めて困難なことから、数値シミュレーションによるアプローチは大変有効な手段であると考え。さらに、この構築したモデルを用いてびまん性脳損傷という病態についてもその発生メカニズムについて検討を行っている[4]。びまん性脳損傷とは意識障害に基づく臨床診断名であるが、重篤な場合を除き画像所見での明らかな組織異常が認められないため X 線 CT や MRI の画像診断装置が発達した現代においても意識障害と解剖学的損傷との因果関係について明らかになっていない病態である。一般的に交通事故により発生しやすいことが知られているが、明確な所見が無いため有効な治療手段が無く、また損傷部位の特定が困難なため傷害と事故との因果関係が認められず後遺障害認定から漏れる恐れがあり、社会的問題もはらんだ病態である。

2. 研究の目的

このびまん性脳損傷のメカニズムについて検討を行うことで、意識障害と脳の損傷部位との関係が明らかになれば可及的速やかに損傷部位を特定し有効な治療を行えることが期待できるほか、損傷を起こさせないための有効な保護デバイスの考案につながる。しかし、これまで行ってきた研究にて開発した頭部有限要素モデルの元となった頭部 CT 断層画像は慈恵医大の倫理委員

会を経て提供されたものを用いており、その性質上、構築したモデルを一般に公開することが出来ない。そこで一般公開された頭部断層画像を用いて作成した超精密頭部有限要素モデルを構築し、一般公開することが出来たなら、多くの研究者や技術者が同様の研究に着手することができ、頭部を損傷から守るための研究がより加速され一人でも多くの命が救うことができると考える。

そこで本研究では上記の背景に鑑み、一般公開するための超精密頭部有限要素モデルを開発する。

3. 研究の方法

(1) 精密な頭部有限要素モデルの開発

ボクセル法という手法を用いて精密な頭部有限要素モデルを新たに開発する。自動車メーカや世界中の研究者へモデルの公開を考えているので、ボクセル法に用いる断層画像データは一般公開されている米国の the National Library of Medicine が提供するデータを元に構築する。

ボクセル法とは断層画像の 1pixel を 1 有限要素として有限要素モデルを構築する手法である。ゆえに三次元ボクセルモデルの構築には元となるビットマップ断層画像が必要である。そこで米国の the National Library of Medicine が提供する頭部断層データ約 400 枚を元に、力学的構造上重要と思われる組織の分類を行う。Adobe Photoshop のような画像処理ソフトウェアを用いて断層画像より組織を抽出し、一枚一枚グレースケールで塗り分けることで組織分類を行う。一枚の頭部断層データより複数の生体組織すべてを抽出することが困難と予想されるため、同じ断層位置の異なる画像を用いてそれぞれ分類しやすい組織を抽出し合成することでボクセルモデル構築用のビットマップ画像を構築する(図 1)。

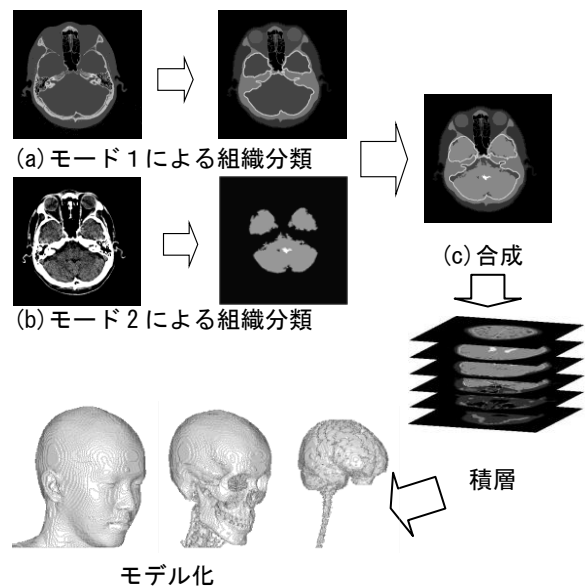


図 1 ボクセルモデル構築用ビットマップ画像構築概略図

(2) ファイルコンバータソフトウェアの開発

ビットマップ画像に 1pixel あたりの寸法と断層間距離を入力しすべての断層画像を読み込むとそこから節点座標と要素コネクティビティを生成し、商用解析コード LS-DYNA や PAM-CRASH などが読み込むことの可能なファイル形式に変換するソフトウェアの開発を行う。概略図を図 2 に示す。ボクセルメッシュモデルは大規模モデルとなる傾向があるため、商用解析コードが読み込むことの出来るモデルファイル形式でのファイルサイズは数百メガバイトを要する可能性があり、データの携帯性に問題がある。そこで、すべての要素形状は同じというボクセルメッシュの性質を利用したモデル中間ファイル(図 2 中位)をいったん生成し、さらに商用解析コードで計算する直前で適宜商用コードのモデルファイル形式に変換することで、モデルファイルのポータビリティの向上を図る。

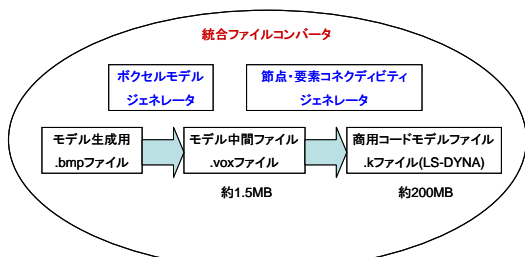


図 2 ファイルコンバータの概略図
(図中のファイルサイズは 100 万要素モデルにおける予想ファイルサイズ)

(3) モデルの妥当性の検討

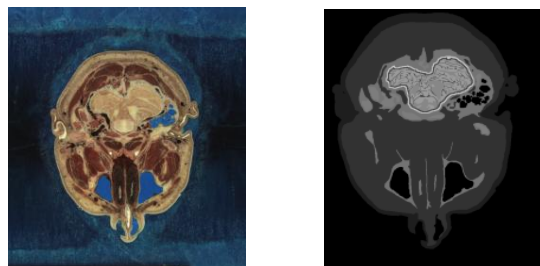
以上の研究成果を元に、構築したモデルの検証を行う。商用解析コード LS-DYNA を使って構築された頭部モデルを用い過去死体実験を模擬した数値解析を実施しモデルの精度について検討を行った。過去死体実験では衝撃下の頭蓋内の圧力応答を測定した報告 [5] を用いる。これまで研究に用いていた頭部有限要素モデル [2] と本成果による有限要素モデルとの挙動を比較し、その妥当性を検証する。

4. 研究成果

(1) 頭部ボクセルモデル

まず NLM (National Library of Medicine: アメリカ国立医療図書館) から提供を受けた画像を用いてボクセルモデル構築に必要なビットマップ画像を作成した。提供を受けた断層画像は CT 断層画像の他に冷却切片画像があり、各組織が鮮明だったのでこれを組織分類し、モデル構築用のビットマップ画像を作成することとした。頭部の組織を力学上重要と思われる 12 種類の組織(皮膚, 軟部組織, 髄液, 目, 海綿骨, 緻密骨, 白質, 灰白質, 大脳鎌, 硬膜, 小脳テント, 脳室)に分類し、グレースケールにて組織分類を行った。ビッ

トマップ画像は、画像処理ソフトウェア (Adobe Photoshop) を使用し、人間の目視によって冷却切片画像の上から各組織に対応した色を塗ることで作成した。作成したビットマップ画像を図 3 に示す。



(1) 冷却切片画像 (2) ビットマップ画像
図 3 断層画像(150 枚目)

このようにして作成した約 400 枚のビットマップ画像を後述する統合ファイルコンバータに読み込ませてモデルファイルの生成を行い、そのモデルファイルを LS-PrePost に読み込ませて有限要素モデルが正常に表示できるか確認を行った。組織別の有限要素モデルを図 4 に示す。モデル全体の要素数は約 600 万要素である。

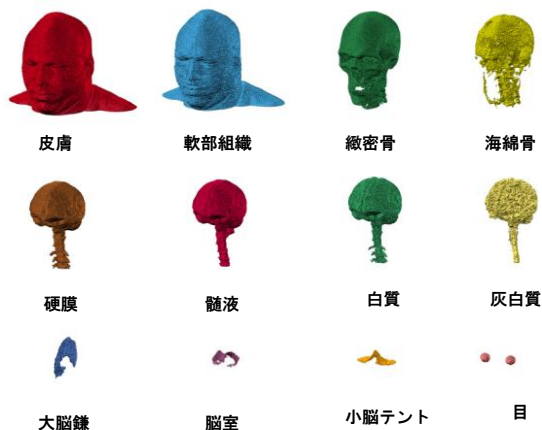


図 4 頭部有限要素モデル (600 万要素)

(2) ファイルコンバータソフトウェア

ビットマップ画像に 1pixel あたりの寸法と断層間距離を入力しすべての断層画像を読み込むとそこから節点座標と要素コネクティビティを生成し、商用解析コード LS-DYNA などが読み込むことの可能なファイル形式に変換するソフトウェアの開発を行った。なお、600 万要素の有限要素モデルのデータサイズは約 700MB となりデータの携帯性に問題があった。そこで、すべての要素形状は同じというボクセルメッシュの性質を利用したモデル中間ファイルを一旦生成し、さらに商用解析コードで計算する直前で適宜商用コードのモデルファイル形式に変換することで、モデルファイルのポータビリティの向上を図った。これら中間ファイルコンバータにより、700MB のモデルファイルが、コンバータソフトを含め 10MB 程度とサイズ縮小が可能になった。中間ファイルのファイ

ル形式を図5に示す。

```

*総要素数
6046740
*材料数
18
*材料0の要素数
0
*材料1の要素数
630181
*材料2の要素数
3123983
*材料3の要素数
451530
*材料4の要素数
505760
*材料5の要素数
61022
*材料6の要素数
181153
*材料7の要素数
18980
*材料8の要素数
646370
*材料9の要素数
545360
*材料10の要素数
7225
*材料11の要素数
5775
*材料12の要素数
13401
*1要素の大きさ (X軸方向 Y軸方向 Z軸方向)
0.001000 0.001000 0.001000
*元数 (X軸方向 Y軸方向 Z軸方向)
360 250 250
*メッシュ数
763950
*連続数 材料番号
90000 0

42641 0
7 1
352 0
9 1
end

```

図5 中間ファイル(. vox ファイル)

(3) モデルの妥当性の検討

以上の研究成果を元に、開発したボクセル頭部モデルの生体忠実性について検証を行う。商用解析コードLS-DYNAを用いた過去死体実験を模擬した数値解析を実施しモデルの精度について検討を行う。過去死体実験では衝撃下の頭蓋内の圧力応答を測定した報告[5]を用いる。

報告[5]の実験をシミュレートすることで構築した頭部モデルの検証を行った。Nahumらは頭部における外力に対する頭蓋内の応答を観察するために屍体による頭部衝撃実験を行っている。そこでこの実験をシミュレートすることで頭蓋内の圧力応答の比較を行った。各組織の力学的物性値は文献[3]と同じものとShigetaら[6]における物性値を使用した。文献[3]のものとShigetaらにおける物性値とそれぞれ旧物性値および新物性値と称する。使用した物性値を表1に示す。なお、本モデルは骨組織は海綿骨及び緻密骨、脳組織は白質及び灰白質と別れているが、旧物性値においてはそれぞれ単一組織として同じ物性値を入力している。圧力特性の比較を図5に示す。双方とも圧力特性は良好に対応していることがわかる。新物性値と旧物性値によるシミュレーションによる差がほとんど見られないのは体積弾性率が同じであるため、圧力応答に大きな差が発生しなかったと考えられる。

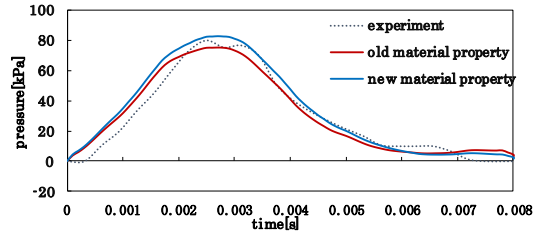
Table 1 各組織における力学的特性値

(a) 旧物性値

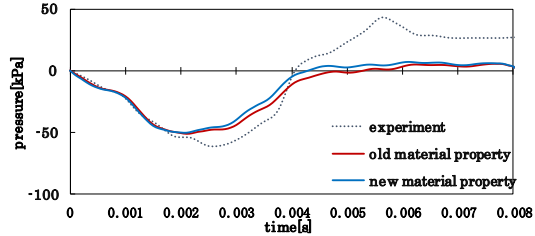
組織名	密度[kg/m ³]	ヤング率[Pa]	ポアソン比	降伏応力[Pa]	接線係数[Pa]
頭蓋骨 皮質骨	1456	8.75 × 10 ⁹	0.261	4.18 × 10 ⁷	4.62 × 10 ⁹
頭蓋骨 海綿骨	1456	8.75 × 10 ⁹	0.261	4.18 × 10 ⁷	4.62 × 10 ⁹
皮膚	1300	1.67 × 10 ⁷	0.42	-	-
硬膜	1130	3.15 × 10 ⁷	0.45	-	-
大脳髄	1130	3.15 × 10 ⁷	0.45	-	-
小脳テント	1130	3.15 × 10 ⁷	0.45	-	-
	密度[kg/m ³]	体積弾性係数[Pa]	短期せん断性係数[Pa]	長期せん断性係数[Pa]	時定数[s ⁻¹]
軟部組織	1040	2.19 × 10 ⁹	1.25 × 10 ⁴	2.50 × 10 ³	80
脳脊髄液	1040	2.19 × 10 ⁹	5.00 × 10 ²	50	5.00 × 10 ⁵
脳 灰白質	1040	2.19 × 10 ⁹	1.25 × 10 ⁴	2.50 × 10 ³	80
脳 白質	1040	2.19 × 10 ⁹	1.25 × 10 ⁴	2.50 × 10 ³	80
脳室	1040	2.19 × 10 ⁹	5.00 × 10 ²	50	5.00 × 10 ⁵
目	1040	2.19 × 10 ⁹	1.25 × 10 ⁴	2.50 × 10 ³	80

(b) 新物性値

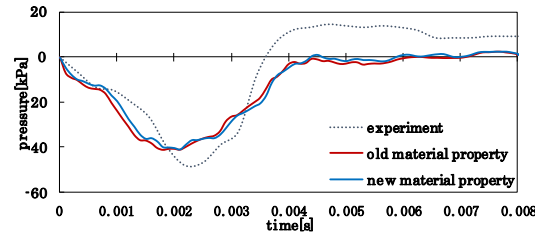
組織名	密度[kg/m ³]	ヤング率[Pa]	ポアソン比	降伏応力[Pa]	接線係数[Pa]
頭蓋骨 皮質骨	1456	8.75 × 10 ⁹	0.261	4.18 × 10 ⁷	4.62 × 10 ⁹
頭蓋骨 海綿骨	1456	8.75 × 10 ⁹	0.261	4.18 × 10 ⁷	4.62 × 10 ⁹
皮膚	1300	1.67 × 10 ⁷	0.42	-	-
硬膜	1130	3.15 × 10 ⁷	0.45	-	-
大脳髄	1130	3.15 × 10 ⁷	0.45	-	-
小脳テント	1130	3.15 × 10 ⁷	0.45	-	-
	密度[kg/m ³]	体積弾性係数[Pa]	短期せん断性係数[Pa]	長期せん断性係数[Pa]	時定数[s ⁻¹]
軟部組織	1040	2.19 × 10 ⁹	1.25 × 10 ⁴	2.50 × 10 ³	80
脳脊髄液	1040	2.19 × 10 ⁹	5.00 × 10 ²	50	5.00 × 10 ⁵
脳 灰白質	1040	2.19 × 10 ⁹	1.25 × 10 ⁴	2.50 × 10 ³	80
脳 白質	1040	2.19 × 10 ⁹	1.25 × 10 ⁴	2.50 × 10 ³	80
脳室	1040	2.19 × 10 ⁹	5.00 × 10 ²	50	5.00 × 10 ⁵
目	1040	2.19 × 10 ⁹	1.25 × 10 ⁴	2.50 × 10 ³	80



(a) Parietal Pressure



(b) Occipital Pressure



(c) Posterior Fossa Pressure

図5 圧力応答の比較

(4) 研究成果のまとめと今後の展望

本研究はボクセル法を用いた超精密頭部有限要素モデルを構築するために the National Library of Medicine が提供する断面画像データセットを元に組織分類を行ったモデル構築用ビットマップ画像を作成した。そしてそのビットマップ画像を用いてビットマップ画像を3次元化し有限要素モデルに変換するためのコンバータソフトウェアの開発を行った。さらにこのコンバータソフトウェアを用いて複数のビットマップ画像から構築された頭部有限要素モデルに各組織の材料特性を与えて既存人体実験データの挙動の比較を行い、モデルの再現性について検証を行いモデルの妥当性を確認した。

ボクセル法による衝撃解析用頭部有限要素モデルは本研究を置いて他に無く、今後頭部外傷について詳細な検討がなされることが期待できる。また、本モデルはその開発当

初は主に交通頭部外傷をターゲットとしていたが昨今問題となっている格闘技やサッカー、ラグビーなどで問題となっているスポーツ頭部外傷などに本モデルを適用し解析することでこれら問題の解明に寄与することが期待できる。

<引用文献>

[1] JNTDB データ, 日本神経外傷学会「頭部外傷データバンク検討委員会」発行

[2] Dai Watanabe, Kohei Yuge, Tetsuya Nishimoto, Shigeyuki Murakami, Hiroyuki Takao

Impact Injury Analysis of the Human Head FISITA Autotechnology Cover story Dec Issue 2007, pp. 34-37

[3] 渡邊大, 弓削康平, 西本哲也, 村上成之, 高尾洋之

ボクセル法による衝撃解析用人体頭部有限要素モデルの開発と局所性脳損傷の評価シミュレーション, 日本機械学会論文集, 074 巻 740 号 A 編(2008) pp. 611-620

[4] 渡邊大, 弓削康平, 西本哲也, 村上成之

ボクセル頭部モデルを用いた横回転衝撃解析とびまん性軸索損傷の発生メカニズムに関する検討, 日本機械学会論文集, 075 巻 752 号 A 編(2009) pp. 529-537

[5] Nahum, A.M. et al., Intracranial Pressure Dynamics During Head Impact, Proc. 21st Stapp Car Crash Conf., SAE Paper, No. 770922(1977), pp. 339-366

[6] Shigeta, K. et al, Development of Next Generation Human FE Model Capable of Organ Injury Prediction, Proceedings of the 21ST International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles(2009)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 4 件)

1. 渡邊大 西本哲也 大田京一郎
NLM 頭部断層画像を用いたボクセル頭部モデルの開発, 第 20 回計算工学講演会, 2015. 6. 10, つくば国際会議場 (茨城県・つくば市)

2. 渡邊大 西本哲也 大田京一郎
一般公開を目的とした衝撃解析用頭部ボクセル有限要素モデルの開発, 第 19 回計算工学講演会論文集, 2014. 6. 11, 広島国際会議場 (広島県・広島市)

3. 大田京一郎 渡邊大 西本哲也
ボクセル型有限要素法による人体頭部モデルの開発, 2013 年日本機械学会年次大会, 2013. 9. 6, 岡山大学 (岡山県・岡山市)

4. 渡邊大 桂 浩太 西本哲也

一般公開を目的とした衝撃解析用頭部ボクセルモデルの開発, 第 18 回計算工学講演会論文集 2013. 6. 19, 東京大学生産技術研究所 (東京都・目黒区)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡邊大 (WATANABE, Dai)

芝浦工業大学・システム理工学部・准教授
研究者番号: 60535912