

年齢別子ども頭部有限要素モデルの構築と遊具転落時の脳損傷危険度の評価

Construction of Children Head Finite Element Models and the Application for Brain Injury Analysis in Case of Playground Accidents

○正 宮崎祐介 (金沢大) 村井庸平 (金沢大) 正 持丸正明 (産総研) 河内まき子 (産総研)
西田佳史 (産総研) 正 立矢宏 (金沢大) 正 放生明廣 (金沢大)

Yusuke Miyazaki, Youhei Murai, Hiroshi Tachiya and Akihiro Hojo, Kanazawa Uni., Kakuma, Kanazawa, Ishikawa, 920-1192
Masaaki Mochimaru, Makiko Kouchi and Yoshifumi Nishida, AIST, 2-41-6 Aomi, Koto-ku, Tokyo, 135-0064

Key Words: Construction of child FE models, Free Form Deformation, Children Safety, Playground equipment

1. 緒言

我が国における子どもの死亡原因の第一位は不慮の事故であり、子どもの事故予防対策を確立させることが急務である。著者らは、事故が発生したらせん階段つきすべり台を対象に、年齢別の子どもマルチボディモデルを用いた大量のシミュレーションを利用し、頭部外傷の発生危険度マップの構築を行った⁽¹⁾。さらに、子ども頭部有限要素 (FE) モデルによる脳損傷解析によりその傷害発生メカニズムを明らかにする必要があるが、成人とは全く異なる形状を持つ子ども頭部の FE モデルは構築されていない。

そこで、本研究では子ども頭部形状を忠実に有する FE モデルを構築することを第一の目的とする。さらに、先行研究⁽¹⁾で対象とした遊具の転落事故について、子ども頭部 FE モデルを用いた脳損傷解析を行い、遊具転落時の脳外傷発生メカニズムについて考察することを目的とする。

2. 年齢別子ども頭部有限要素モデルの構築

2.1 構築手法

本研究では図 1 に示す流れにより、3 歳もしくは 7 歳の平均寸法を有する子ども頭部 FE モデルを構築する手法を開発した。本手法では、あらかじめ構築しておいた成人男性の基本頭部 FE モデルを、FFD (Free Form Deformation) 法を用いて、子どもの個体形状を有するように形状変換することにより、特定個体の子ども頭部 FE モデルを構築する。さらに、対象年齢の 12 項目の平均寸法を有するように FFD 法を用いてその個体 FE モデルの形状を変形することにより標準子ども頭部 FE モデルを構築する方法である。本手法は、三次元ポリゴンモデルの点群から抽出した 238 点からなる疎な相同点データのみを FFD 変換に利用するため、CT もしくは MR 断層画像の解像度やスライス厚の粗さによる三次元ポリゴンの穴などのポリゴンモデルの欠損があっても、ロバストに対象個体の FE モデルの構築を行うことが可能である。また、対象空間全体を B-Spline 関数で近似する FFD 法を利用して、脳などの内部構造を持つ基本有限要素モデルを形状変換し、対象個体の頭部 FE モデルを構築するため、頭蓋骨標本のように内部組織を持たない検体しか入手できなくても、内部組織まで含んだその検体の FE モデルを構築することができる。

なお、本手法で用いる基本頭部 FE モデルは 3 層構造の頭蓋、脳脊髄液、脳、膜類から構成され総節点数は 15500、総要素数は 22600 からなるモデルである。また、対象とした子どもの個体は、東京大学形態人類学教室の提供を受けた推定 2-3 歳児、5-6 歳児の頭蓋骨標本であり、それを千葉大学放射線科にて CT 撮影を行うことにより頭蓋骨標本の断層画像を取得した。

2.2 特定個体の子ども頭部有限要素モデルの構築結果

図 1(a) の手法により、推定 2-3 歳及び 5-6 歳の頭蓋骨標本と同一頭蓋骨形状を有する頭部有限要素モデルを構築した。その例として、推定 2-3 歳の三次元ポリゴンモデルと有限要素モデルの形状を比較したものを図 2 に示した。本手法を用

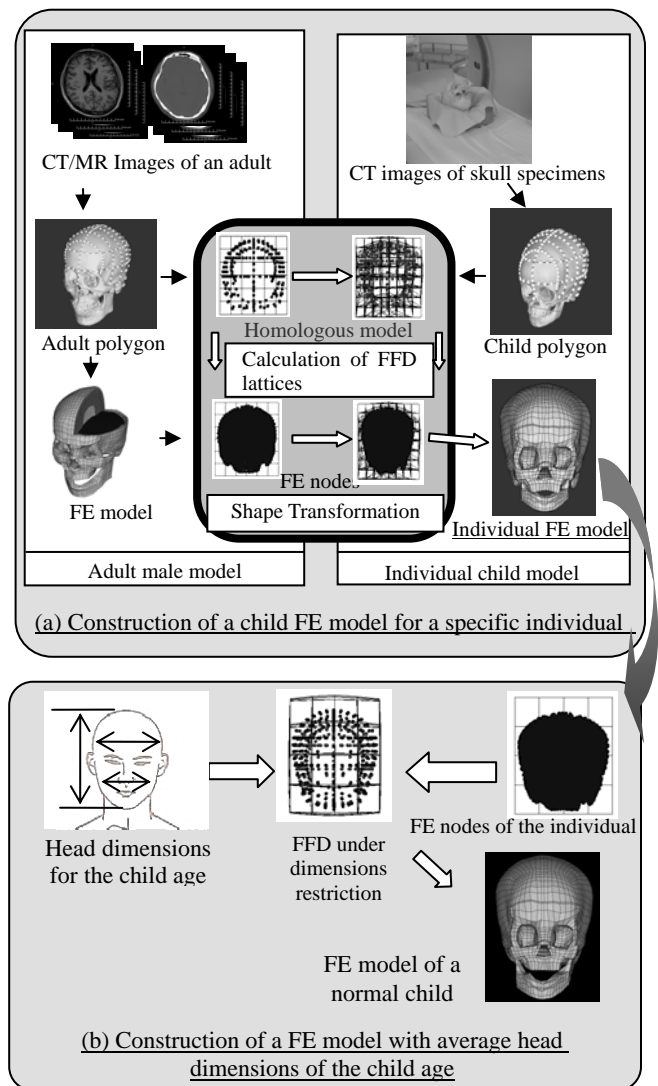
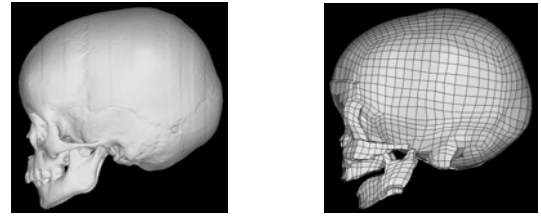


Fig.1 Construction of a child head FE model using FFD method

いることにより、局所的な形状についても精度よく構築できていることがわかる。また、代表寸法及び頭蓋厚に関して比較したところ、寸法誤差は最大でも 1mm 程度であることがわかり、本手法により発生する寸法誤差は小さかった。

2.3 平均寸法を有する 3, 7 歳児の頭部 FE モデルの構築結果

前節で構築した推定 2-3 歳モデルを図 1 (b)の方法により、形状変換することにより 3 歳児の平均寸法を有する頭部 FE モデルを構築した。同様に推定 5-6 歳の個体のモデルを形状変換することにより 7 歳児のモデルも構築した。



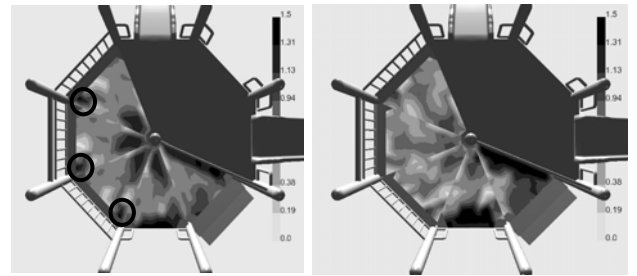
(a) polygon model (b) FE model

Fig.2 Comparison of head shapes between a FE and polygon model

3. 遊具転落事故の脳損傷解析

3.1 全身マルチボディモデルによる遊具転落事故の解析

著者らは3もしくは7歳の子どもの全身マルチボディモデルを構築し、それらを用いてらせん階段付きすべり台からの転倒事故シミュレーションを大量に行い、転倒箇所ごとに頭部傷害危険度を遊具 CAD モデル上にマッピングすることにより可視化し、遊具に潜む致命的な危険箇所を明らかにした⁽¹⁾。図 3 は 3 もしくは 7 歳児のらせん階段付きすべり台の頭部傷害危険度マップを示したものであり、色が濃いほど傷害危険度が高いことを示している。いずれの年齢においても階段内側において危険度が高い。また、3 歳児の場合は図中○で示された階段外側に危険度が高い場所があることがわかる。図 4 にその場所から転倒した際の、3 歳児及び 7 歳児の転倒挙動を示したが、3 歳児では他の体節より先に頭部が階段面に直接衝突するため、危険度が高いことが推測される。そこで、マルチボディモデルから得られたこの時の頭部の姿勢や速度などの衝突条件を、頭部 FE モデルに与え、剛体床に衝突させることにより脳損傷解析を行った。



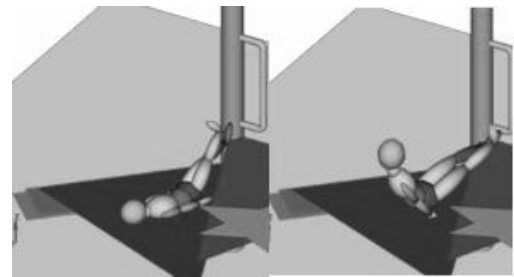
(a) 3 years children (b) 7 years children

Fig.3 Head injury hazard maps

3.2 頭部 FE モデルを用いた脳損傷解析

図 5 に階段外側からの転落時における脳の圧力分布を示した。これより 7 歳児と比較して 3 歳児において、衝撃側及び対側において非常に高い圧力が生じていることがわかる。

図 6 に脳の衝撃側における最大正圧を、衝撃対側における最大負圧の最大圧力応答を示した。3 歳児では 7 歳児よりも正負圧ともに 3 倍以上高く、脳組織の損傷の観点から見ても 3 歳児のほうがかなり危険であることが明らかになった。



(a) 3 year old (b) 7 year old

Fig.4 Falling behaviors from outside of the step

4. 結論

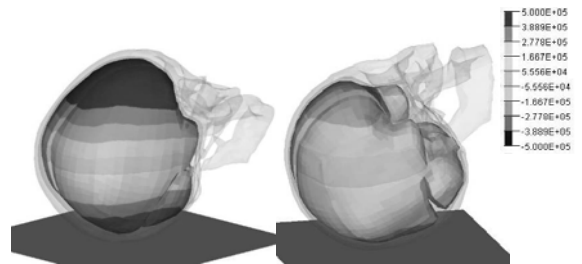
本研究では、子どもの頭部形状を忠実に有する有限要素モデルの構築法を開発した。本手法は標準モデルを形状変換する手法であるため、容易にかつ高精度に特定個体のモデルを構築することが可能であり、対象個体の頭部 FE モデルを高精度に構築することが出来た。さらに、らせん階段付き遊具の転落事故について、先行研究で得られた全身マルチボディモデルの解析結果と接続することにより、子ども頭部 FE モデルによる脳損傷解析を行った。その結果、幅広い年齢の子どもが被る遊具の転落事故の再現シミュレーションが可能となり、遊具転落事故の危険度評価を包括的に行うことが可能となった。

参考文献

(1) 宮崎ら, 年齢別子ども転倒シミュレータによる遊具の転倒傷害危険度の可視化, 日本ロボット学会 CD-ROM 講演論文集, (2007)

謝辞

子どもの頭蓋骨標本を提供して頂いた東京大学諏訪元教授, 近藤修准教授およびその CT 撮影にご協力いただきました千葉大学山本正二講師に厚く御礼申し上げます。



(a) 3 year old (b) 7 year old

Fig.5 Contour map for brain pressure distribution

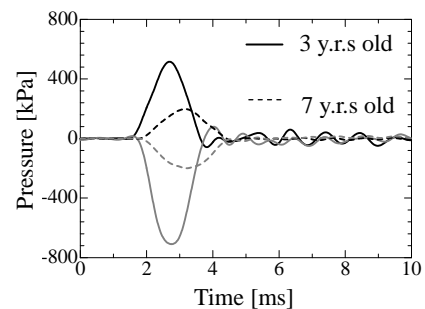


Fig.6 Brain pressure responses at coup and contrecoup sites for 3 or 7 years old