8G-04 乳児の頭部物理モデルを用いた揺さぶり時の脳-頭蓋骨間の相対運動計測

Measurement of relative motion between skull and brain in shaking events using an infant physical model

○西村剛 (金沢大院) 正 宮崎祐介 (金沢大学) 西田佳史 (産総研)
山崎麻美 (国立大阪医療センター) 山中龍宏 (産総研/緑園子どもクリニック)

Tsuyoshi NISHIMURA, Kanazawa University, Kakuma, Kanazawa-shi, Isikawa,
Yusuke MIYAZAKI, Kanazawa University
Yoshihumi NISHIDA, AIST
Mami YAMASAKI, ONH
Tatsuhiko YAMANAKA, AIST

Key words : Brain injury, Subdural hematoma, Child abuse, Physical model

1. 緒言

近年、子どもに対する意図的な傷害行為、すなわち虐待が大きな社会問題になっている。虐待による頭部外傷の受傷機転の一つである揺さぶり行為は、重篤な症状である架橋静脈の破断による急性硬膜下血腫(ASDH)を起こしうる。それは架橋静脈の破断による ASDH が、脳-頭蓋骨間の相対運動により生ずる架橋静脈のひずみに起因すると考えられているためである。しかし、揺さぶり行為によって生ずる頭蓋骨内の脳の挙動は屍体実験もしくは有限要素解析といった従来手段では観察できなかったため、そのメカニズムは仮説の域を出ていない。そこで、本稿では、揺さぶり時の頭蓋骨内における脳の挙動を可視化できる乳児の透過三次元物理モデルを構築することを目的とした。さらに、本モデルを既存乳幼児ダミーに取り付けることで頭蓋内運動が可視化可能なダミーモデルを構成し、成人男性が揺さぶり行為を行った際の脳-頭蓋骨間の相対運動計測を試みた。

2. 頭蓋内を可視化可能な乳児頭部物理モデルの構築

ASDH の発生メカニズムを考慮すると、頭部のモデル化には次の三点の要素をモデル化する必要がある。一つは、頭蓋内での脳の運動を可視化し、架橋静脈ひずみを計測できるモデルである。二つは頭蓋内での脳の相対運動を表現するために、頭蓋と脳間のくも膜下腔内を満たす脳脊髄液をモデル化することである。三つは、頭蓋骨と脳の相対運動をより実現象に近づけるために、大脳鎌および小脳テントによる運動拘束を表現することである。したがって本稿で構築するモデルでは、頭蓋骨を透過率の高いポリカーボネイトにより構成することにより頭蓋内部の脳表の運動を可視化した。また、乳児特有の頭部形状を再現するために CT 画像から再構成された三次元ポリゴンモデルを用いた。また、頭蓋骨と脳の間隙を水で満たすことにより脳脊髄液を表現した。さらに大脳鎌および小脳テントを頭蓋骨内面にモデル化することで脳の運動拘束を表現した。

頭蓋骨モデルは内部が可視化可能なポリカーボネイト製で四カ月乳児の個体頭部の CT 画像より再構成された三次元ポリゴンモデルを用いることにより乳児特有の形状特徴を再現したものである。図 1 に示すように乳児の頭蓋骨モデルは、成人男性頭部の頭蓋骨および脳の三次元ポリゴンモデルをベースモデルとし、それを FFD 法を用いて形状変換することで構築した。この手法の利点は、質の高いメッシュを持つベースモデルを構築しておけば、特定個体のモデルを容易に構築することができる点である。成人男性頭部のベースモデルは特定個体の CT および MR データより構築されたもの

Fig.1 Process of physical model of infant

Fig.2 Infant skull model

Fig.3 Falx cerebri and tentorium

Fig.4 Physical model of brain

Fig.5 Physical model of head

で、頭蓋骨と脳のモデルを含んでいる⁽¹⁾。

さらに、CT 画像より構築した四カ月乳児の頭蓋骨三次元ポリゴンモデルも用意した。次に成人男性および乳児の三次元ポリゴンモデルについて相同な 259 点群から構成される相同点モデルを構築し、相同点間距離が最小となるように FFD 格子を算出した。この空間ひずみ情報をベースモデルに与えることで、特定個体の乳児頭蓋骨ポリゴンモデルを構築した。それを利用して、五軸マシニングセンタ(大阪機工: VP9000-5AX)によってポリカーボネイト丸棒を切削加工し、

頭蓋骨モデルの製作を行った。図2に示すように製作した頭蓋骨モデルは、乳児の頭部形状を有し、透明であるため頭蓋内部まで視認可能である。

また、図3に示すようにポリウレタンシートを用いて、大脳鎌と小脳テントも再現した。この2つの膜は頭部が回転運動を行うときに頭蓋骨内の脳の変形挙動を拘束する。

脳のモデルは、頭蓋骨のFFD格子を用いてベース脳ポリゴンモデルの形状変換をおこなうことで対象乳児の脳ポリゴンモデルおよびその型を構築し、それにシリコンゲルを注入・硬化させることで構築した(図4)。

さらに、脳モデルを頭蓋骨モデルに挿入し、間隙を水で満たすことで脳脊髄液を模擬した(図5)。これにより頭蓋の回転運動により頭蓋骨と脳は相対運動を生ずる。

3. 揺さぶりにおける架橋静脈伸縮比の計測実験

二章で構築した乳児頭部物理モデルを CRABI(Child Restraint Air Bag Interaction) 6-month-oldの頭部として取り付けることで、揺さぶり実験に用いる乳児ダミーとした(図6)。

頭蓋骨内面と脳表の架橋静脈付着位置に白色マーカを塗布し、この点を計測することにより図7中bv1~3の架橋静脈付着位置の伸縮比を計測した。まず頭部挙動を2台のハイスピードカメラ(k-III:カトウ光研)で撮影し、マーカの変位時刻歴を計測、DLT法(Direct Liner Transformation Method)を用いて三次元運動に変換することで相対運動を計測し、架橋静脈付着位置伸縮比を算出した。

この乳児ダミーに対し、成人男性一名に、乳幼児虐待の一つである Shaken baby syndrome(SBS)の要因と考えられる揺さぶり外力を与えさせた。揺さぶり実験の条件は、ダミーの肩部を両手で把持する座位(図8)、ダミーの脇を両手で把持した状態で揺さぶる立位(図9)の二条件とした。前後方向に5往復以上、全力で揺さぶらせ、その動作を5回実施させた。

4. 実験結果と考察

図10に座位での揺さぶりにおける各架橋静脈伸縮比の時刻歴を示した。図中0msは頭部が前方に振り切り、後方運動を開始する時点と定義した。頭部の全体的な運動の傾向として、0msから後方運動を開始し、160msにおいて頭部は後方に振り切り、逆方向の前方運動を開始し、300ms付近で一周りが終了した。一方、伸縮比は図中40msおよび240ms付近にピークが生じ、240msにおいて最大値を示した。これより、頭蓋骨と脳間に顕著な相対運動が生じたことがわかる。なお、最大伸縮比を示した240ms付近は頭部が前方へ運動を行っている過程である。これは立位での揺さぶりでも同様の傾向を示していた。また、図11に座位、立位でのゆさぶり実験で得られた各架橋静脈付着位置の最大伸縮比を示した。座位では全ての位置において4.0を越える最大伸縮比が計測された。一方、立位では座位ほどではないまでも、最も大きな平均最大伸縮比を計測したbv1で3.99であり、bv2、bv3もまた3.0を越える伸縮比を計測した。これらの値は、Leeらによって報告されている架橋静脈が破断する際の伸縮比1.5⁽²⁾と比較して、十分に大きい。本モデルはクモ膜小柱等の拘束構造をモデル化していないとはいえ、架橋静脈が破断するほどの頭蓋骨と脳の相対運動が発生していると考えられる。したがって、揺さぶり外力のみでも脳-頭蓋骨間に顕著な相対運動が生じその結果として架橋静脈破断による急性硬膜下血腫が発生しうることがわかった。

5. 結言

本稿では乳幼児が頭部を揺さぶられた際に発生するとされる架橋静脈の破断による急性硬膜下血腫の発生メカニズ

Fig.6 Infant dummy

Fig.7 Markers positions

Fig.8 Shaking condition(sit)

Fig.9 Shaking condition(stand)

Fig.10 Bridging vein stretch ratio responses in sitting

Fig.11 Max. bridging vein stretch ratio in shaking events

ムを解明するために、頭蓋内を可視化可能な乳児頭部物理モデルを構築し、本モデルを用いることにより揺さぶり時の脳挙動を可視化し、架橋静脈付着位置の伸縮比も計測可能であることを示した。また、本モデルを用いた実験結果より、乳幼児が揺さぶられる際には架橋静脈の破断が十分に起こりうるということが示された。

謝 辞

本研究は JST RISTEX 研究開発領域「犯罪からの子どもの安全」の助成により行われた。ここに謝意を表する。

参考文献

- (1) 宮崎ら, 三次元透過頭部物理モデルによる頭蓋骨-脳間相対運動計測, シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマンダイナミクス講演会論文集, (2010)
- (2) M.C.Lee, R.C.haut, Insensitivity of Tensile Failure Properties of Human Bridging Vein to Strain Rate, Vol.22, No.6/7, (1989), 537-542