

子どもの転倒時のデータ収集と、衝撃吸収性能を備えた床における転倒衝突時の子どもへの影響についての検証

永大産業株式会社



目的

日常転倒データベース構築とシミュレーション検証

病院を受診する子どもの傷害で最も多いのが転倒・転落で事故原因の 55% を占めている (図 1)。更に、これらの事故の傷害部位の 45% 程度を頭部が占めているため、重症化するケースが多い。従って、転倒・転落事故による傷害のリスクを低減するべく、日常生活空間の環境改善をする必要があり、またキッズデザイン製品開発には転倒による傷害の程度を評価した上で取り組む必要がある。そのために現在、有限要素シミュレーションを用いて転倒を再現し、転倒により体に加わる力を計算することで転倒による傷害の程度を評価する研究がされている。しかし従来は、人が勘や経験則に基づいて転倒の状況を与えていたため、実際には起こり得ない転倒を起こす可能性があった。日常生活で自然に発生する転倒を再現するためには、実際に発生した転倒の動力学値データ (姿勢や速度、加速度) をシミュレーションの初期値として入力する必要であるが、実際に起こった転倒

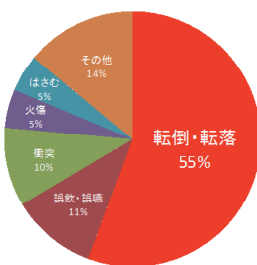


図 1. 病院を受診する子どもの事故原因

の動力学特性に関するデータを得ることは困難であった。そこで本プロジェクトでは、日常生活空間で生じる子どもの転倒の動力学特性に関するデータベースを構築し、ここで得たデータをシミュレーションの初期値に用いることにより、現実に関わり得る転倒を再現して、衝撃吸収構造付き床で転倒時のシミュレーションを行い、子どもへの衝撃低減効果の検証を行う。

実施方法・内容

転倒動力学値確率分布データベースの構築

本プロジェクトで構築するデータベースでは、日常生活下で自然に発生する転倒を扱う。従ってまず、子どもの日常行動を計測する。次に得られた膨大なデータから転倒前後のデータのみを抽出し、抽出された映像を用いて転倒姿勢解析を行うことにより、転倒の動力学データを得る。その後、得られた動力学データを蓄積することにより転倒動力学値確率分布データベースを構築する。



図 2. 転倒による傷害予防までの流れ

センサルームを用いた日常行動計測システムの整備

日常行動計測では、以下の 2 つのデータを同期が取れた形で記録する必要がある。

- 加速度・ジャイロセンサデータ：転倒箇所発見に用いる
- カメラ映像データ：転倒姿勢解析に用いる

以上の要件を満たす行動計測システムを通常の住宅内に開発した (図 3)。計測場所であるリビング・ダイニングには、隣の部屋の PC と接続された 6 台のビデオカメラと、センサデータを受信するための Bluetooth 受信機が設置され、PC にカメラ映像データ

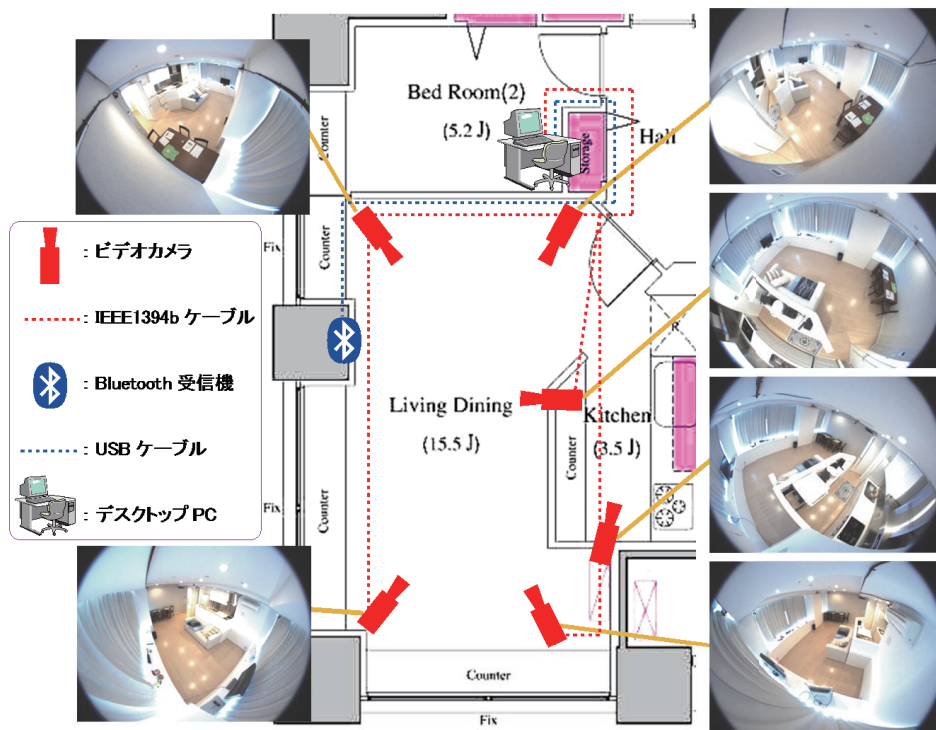


図 3. 行動計測システム



図 4. 被験者実験の様子



図 5. 実験用衣服

(30fps) とセンサデータ (167Hz) を記録する。リアルタイムで入ってくるセンサデータの後ろに、その瞬間における各カメラ映像のフレーム番号を付加して保存することで、センサとカメラの同期を取っている。また転倒を扱う実験であるため、壁の角やドアの蝶番部分といった危険が予測される箇所はカバーやクッションで覆うといった安全対策を施している。

1 ～ 2 歳の歩き始めの子どもを対象に実験

行動計測は被験者実験によって行う。図 4 は実際に行った被験者実験の様子である。計測条件は以下のとおりである。

- 計測対象者：1～2 歳の歩き始めの子ども
- 計測時間：1 時間
- 1 回の計測対象人数：1 人

計測対象は転倒が多いと思われる 1 ～ 2 歳の子どもとしている。計測時間は子どもの体力を考慮して 1 時間としている。またセンサ記録の関係から 1 回の計測対象人数を 1 人としている。計測においてはまず、保護者からデータの記録と公開に関する同意書にサインを得る。その後、データベースでの検索条件となる身長や体重などを記録し、また計測対象者には図 5 のような実験用衣服を着せる。この衣

服の背部に作ったポケットにセンサを入れることにより、子どもの体に負担を掛けることなく、しっかりとセンサを体に固定することが可能となる。

ここまでの準備が整ったら計測を開始する。計測場所には活発な行動が誘発されるような玩具などが置いてあり、子どもにはそれらを自由に使って、保護者と普段通りに遊んでもらう。本プロジェクトで扱うのは自然に発生した転倒であるため、計測中に故意に転倒してもらうことはない。

転倒特徴強度を算出し、転倒を自動検出

行動データを得たら、センサデータを用いて転倒箇所を発見し、その前後のカメラ映像を抽出する。図 6 の Gy, Gz, ωx はセンサから得られる加速度・角速度データの中で、転倒の特徴が特に強く表れるデータの時間変化を示したものである。これら 3 つのデータを用いて転倒特徴強度を算出し、この値が閾値を超えたら転倒と判断する。

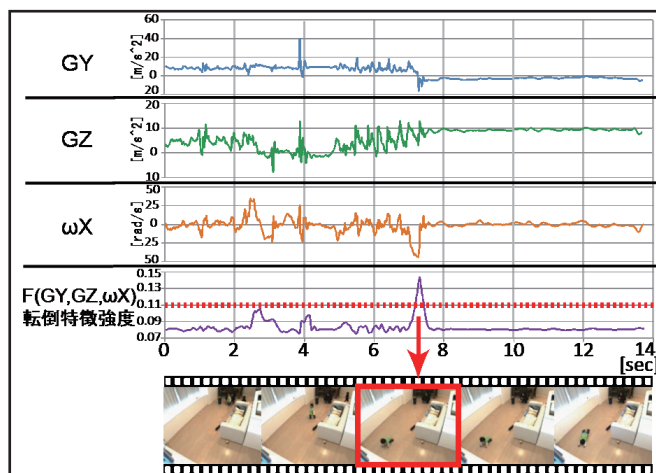


図 6. センサデータを用いての転倒検出

図 6 の例では、算出された転倒特徴強度が、赤点線で示された閾値を大きく上回る箇所があり、動画データの対応するフレームを見ると実際に転倒が起こったことが分かる。このようにして自動的に転倒前後の映像を抽出するが、認識できなかった転倒は手動で前後映像を抽出している。

検出された転倒映像を用いて転倒姿勢を解析

転倒映像を抽出したら、市販の 3 次元姿勢解析ソフトウェア「Frame-DIAS IV」(株式会社ディケイエイチ)を用いて転倒姿勢解析を行い転倒動力学データを得る。行動計測において複数台のカメラで撮影しているため、Frame-DIAS IV を用いてステレオ視の

対応点をマウスで与えることにより体の各部位の3次元位置を算出することが可能である。このソフトを用いて以下の項目の時間変化データを出力する。

- ・ 体軸 (頭頂点→耳珠点→首の付け根→腹部中央) の3次元位置
- ・ 頭部の速度 (鉛直方向, 合成)
- ・ 頭部の加速度 (鉛直方向, 合成)
- ・ 頭部角度 ($\angle$ 頭頂部 - 耳珠点 - 鉛直方向)
- ・ 体軸角度 ($\angle$ 首の付け根 - 腹部中央 - 鉛直方向)

図6において検出した転倒を姿勢解析した結果を図7に示す。

転倒データの蓄積とデータベースの構築

転倒動力学データを得たらそれらを蓄積していく。蓄積する際、転倒して着地する瞬間の値を代表値として全ての転倒データが記載されているCSVファイルに記入し、同時に転倒者の属性や転倒状況も記入する。このCSVファイルを用いてデータベースファイルを作成する。また、代表値の記入とは別に各転倒の動力学値時間変化データもCSVファイルとして蓄積し、データベース閲覧ソフトで参照可能な状態にしておく。

結果・考察

転倒データベースの検索・閲覧が可能

現在までに生後11～28か月の子どもの行動計測を行い、67回の転倒をデータ化し、データベースで検索可能な状態にした。また図8のような独自にデータベース閲覧ソフトウェアを開発し、容易に転倒データを検索・閲覧したり、データを出力したりすることを可能にした。開発したデータベースには

1. 転倒者の属性 (年齢や身体的特徴) や転倒状況の条件 (走行時, 歩行時など) を付けて転倒データを検索する機能
2. 検索された転倒動力学データのヒストグラムや累積相対度数分布 (パーセントail曲線) を可視化する機能
3. 個別の転倒動画や姿勢解析結果動画を表示する機能
4. 動力学値の確率分布や時間変化データを出力する機能

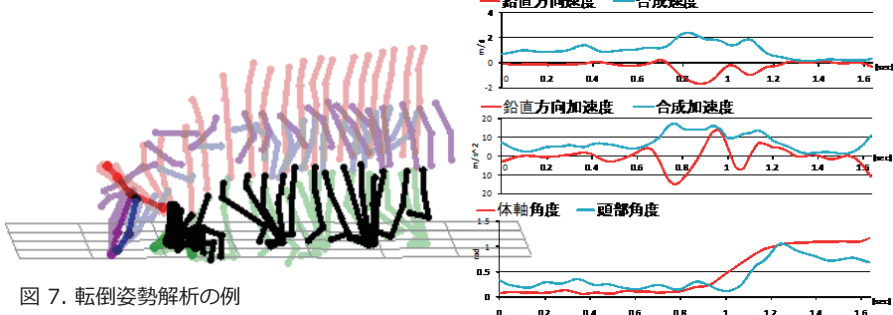


図7. 転倒姿勢解析の例

が実装されている。本プロジェクトで開発したデータベースを用いることで、日常的にあり得る転倒のワーストケースのデータを得ることができる。ここで得たデータを用いて生体物理シミュレーションを行うことにより、実際の転倒に近い現象を再現でき、製品の安全面における最適設計が可能となる。

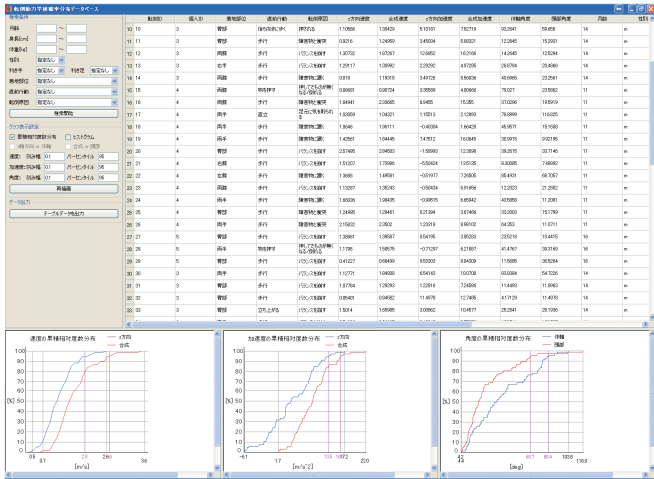


図8. 転倒動力学値確率分布データベース閲覧ソフトウェア

シミュレーションによる床の衝突安全性の評価

(1) 頭部有限要素モデル

解析対象を3歳児とした。頭部の有限要素モデルは、頭蓋骨、脳脊髄液、脳 (左右大脳、小脳、脳幹)、膜類 (硬膜、大脳鎌、小脳テント、軟膜) の16パートから構成されており、平成21年度安全知識循環型社会構築事業において用いたモデルと同一のものである (図9)。なお、本モデルは2歳児のCT画像より構成された三次元頭蓋骨形状に基づくモデルであり、全体の節点数31467、要素数35495である。なお、子どもの頭部の各組織の材料特性はほとんど取得されていないため、成人の材料特性に基づいているが、頭蓋骨については、Irwinら(1)によって報告されている、3歳児の特性を与えた。

(2) 頭蓋骨骨折危険度の評価基準

頭蓋骨骨折の評価方法として、頭部

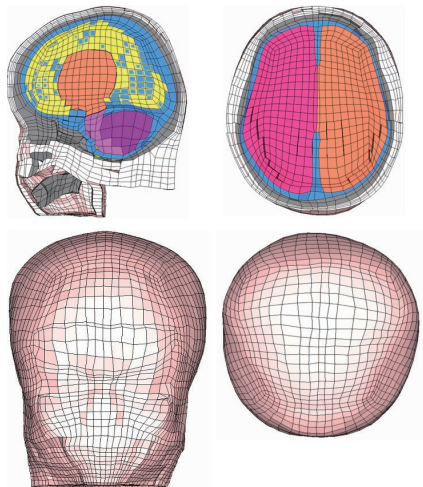


図9. 子どもの頭部有限要素モデル

有限要素モデルを用いた床面衝突シミュレーションを行い頭蓋骨の主ひずみを算出し、その主ひずみ値によりさらに頭蓋骨骨折発生確率を算出することにより評価する方法を構築した。

本研究で用いたMarguliesら⁽²⁾によって報告されている生前から生後13ヶ月までの乳児後頭部の頭蓋骨3点曲げ試験のデータ25例の極限ひずみのヒストグラムを示した。このヒストグラムより、極限ひずみ1%以下の部分のN数が多く、対数正規分布と仮定することができる。そこで、極限ひずみと頭蓋骨骨折発生の確率分布を

図 11 に示すように定義した。この極限ひずみと頭蓋骨骨折発生確率の関係に、床面衝突シミュレーションで算出されるひずみ値を代入すると、その場合の骨折発生確率を算出することができる。なお、乳幼児の頭蓋骨の骨折発生には最大主応力説に従うことが知られている⁽³⁾ため、骨折の発生を支配するひずみの種類として最大主ひずみを用いることとした。コンクリート、木質フローリング、クッションフロア、衝撃吸収構造付きフローリングの4種類の有限要素モデルを構築した。形状および構造は実床材と同様の形状を有し、各構造の材料特性は平成21年度安全知識循環型社会構築事業と本プロジェクトで実施した材料試験より取得したものを与えた。

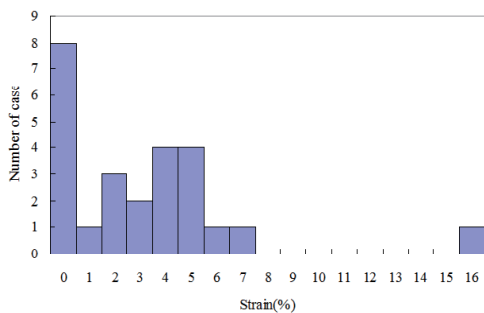


図 10. 極限ひずみのヒストグラム

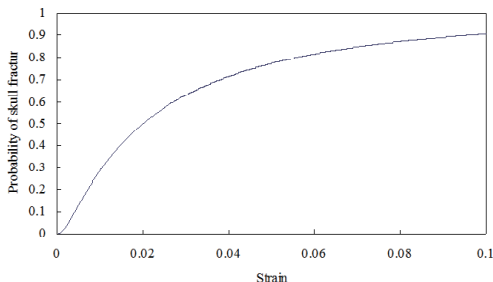


図 11. 頭蓋骨骨折発生の確率分布

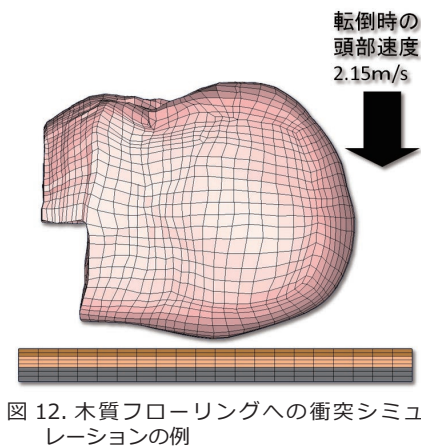


図 12. 木質フローリングへの衝突シミュレーションの例

床面との衝突による頭蓋骨骨折危険度の評価

(1) シミュレーション条件

コンクリートのみ、コンクリートの上に12mm厚根太貼用複合フローリング(以下、木質フローリング)、クッションフロア、衝撃吸収構造付きフローリングを施工した床面に対して頭部が衝突する状況のシミュレーションを行った。上記2で述べた幼児の行動計測データから、手より先に接地した16例の中から接地直前の頭部の速度が最大となるケースを抽出し、その速度である2.15m/sを本シミュレーションのz方向衝突速度として与えた。

(2) 有限要素モデルに与える材料特性の取得

各種床材、下地台の各構成部材の材料特性は、各材料から試験片を切り出し静的圧縮試験等をおこない基礎的な材料特性を取得した。なお、各試験には万能材料試験機((株)島津製作所AG-IS 図13)を使用した。

(3) シミュレーション結果

床面との衝突シミュレーションから得られた頭蓋骨の最大主ひずみより頭蓋骨骨折の発生確率を算出した。表に頭蓋骨の生じた最大主ひずみとそれより算出される頭蓋骨骨折発生確率を示した。最大主ひずみはコンクリート、木質フローリング、クッションフロア、衝撃吸収床の順に小さかった。またこれより算出される頭蓋骨骨折発生確率は、コンクリートの12%に対し、衝撃吸収フローリングでは2%と6分の1程度になることがわかった。

以上より、幼児が生活環境にて行動する際の転倒速度を考慮した床面の衝突安全性の定量評価が可能となった。

	コンクリート	木質 フローリング	クッション フロア	衝撃吸収 フローリング
最大主ひずみ	0.00466	0.00414	0.00270	0.00148
骨折確率	12%	10%	5%	2%

表 1. 頭蓋骨内板の主ひずみとそれより算出される頭蓋骨骨折確率

※今回使用した木質フローリングは、根太貼り用を使用されるものであるが、条件を一定にするため、コンクリートの上に施工した条件でシミュレーションを行った。



図 13. 万能材料試験機

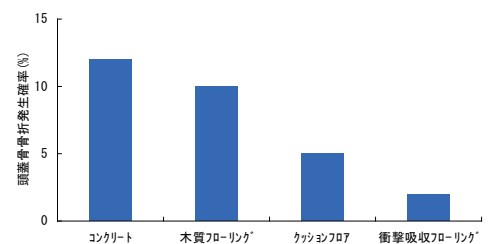


図 14. 頭蓋骨骨折発生確率

今度の展開

転倒衝突時の衝撃を吸収する床材の開発

転倒動力学値確率分布データベースを利用して、様々な転倒パターンについてシミュレーションを行い、床への転倒衝突時の衝撃を吸収する床材の開発を進める。

参考文献

- [1]A. Irwin, H. J. Mertz, Biomechanical Basis for the CRABI and HYBRID III Child Dummies, Society of Automotive Engineers, (1997), 261-272
- [2]BRITTANY COATS and S. S.MARGULIES, Material Properties of Human Infant Skull and Suture at High Rates, JOURNAL OF NEUROTRAUMA, Vol. 23 (2006), 1222-1232
- [3]BRITTANY COATS and S. S.MARGULIES, Parametric Study of Head Impact in the Infant, Stapp Car Crash Journal, Vol.51(2007),1-15
- [4]独立行政法人産業技術総合研究所, 平成21年度中小企業支援調査安全知識循環型社会構築事業報告書, 2010.