

# 階段転倒における衝突安全性の評価に対する研究

東京工業大学 宮崎祐介准教授と株式会社川口技研共同研究

株式会社川口技研は、中空構造を有する滑り止め「スベラーズ」のクッション性能を東京工業大学 工学院 システム制御系 准教授 博士(工学) 宮崎祐介研究室との共同研究として「スベラーズ」のクッション構造に関する衝撃安全性の検証実験と解析を実施いたしました。

## 1. 研究背景

家庭内の事故発生場所は『階段』が最も多い。擦過傷、挫傷、打撲傷等の軽傷が多いが骨折や脱臼の他、筋・腱・血管の損傷、頭蓋内損傷、神経・脊髄損傷などの後遺症が起きやすいけがも多く発生している。

事故を未然に防ぐため階段の段鼻に取付ける滑り止めは、転倒・転落を防ぐため効果を発揮している。しかし滑り止めが付いていてもつまずきや踏みはずしによる事故が発生する。特に急激に運動能力が発達しはじめる0歳～4歳の乳幼児は身体に比較して頭部が大きいいため、後遺症が起きやすい首から上の怪我が多い。

滑り止めにくッション性のある中空構造を有する滑り止め「スベラーズ」(図 1)は転落・転倒による衝撃を吸収し、怪我を防ぐ効果が期待されている。しかしクッション効果を評価する明確な手法がなく経験に頼り設計しているのが現状である。

本研究は仮定とするクッションモデルと頭部モデルの衝突解析により、頭部に作用する衝撃の程度と皮膚の変形状態を評価し、衝撃安全性に配慮したクッション性のある中空構造を有する滑り止め「スベラーズ」の評価指標を確立することが目的である。

## 2. 実施方法

階段からダミー人形を落下させる実験により、クッション構造ありとなしの頭部にかかる衝撃の程度について頭部障害値の観点から実験的に検討する。さらに有限要素法による衝突解析により後頭部皮膚の裂傷リスクについて構造設計の違いによる影響を評価する。実験で使用するダミー人形と解析用の頭部のモデルは3歳児を想定する。また事故で最も致命傷になりやすい後頭部に衝突することを想定する。

### 2.1. 3歳児ダミー人形の落下実験

3歳児ダミー人形は、Hybrid-III (体重: 15kg、身長: 95cm) を使用した。踏幅 25cm、蹴上げ 20cm の木製階段の上段から座り姿勢背後から落下をさせる。後頭部が踏面に対して 45° の角度で落下し階段の角に衝突するようにする(図 2)。段鼻に何も貼っていない段鼻(A)とクッション性のある中空構造を有する滑り止め「スベラーズ」(B)を取付けたものとで比較する。(図 3)

後頭部に加速度センサーを付けて落下の加速度を測定する。落下の様子はハイスピードカメラで撮影しクッション構造の挙動を観察する。

図 1 クッション性のある  
中空構造を有する滑り止め  
「スペラーズ」

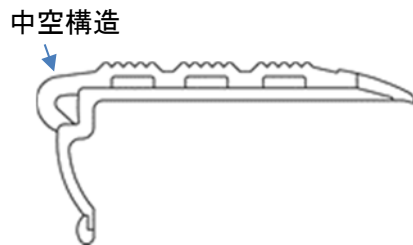


図 2 3歳児ダミー人形落下実験

(a) 座り姿勢 (b) 後頭部から落下

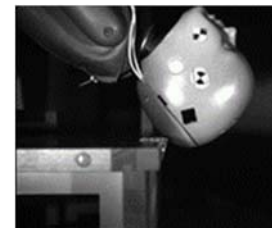
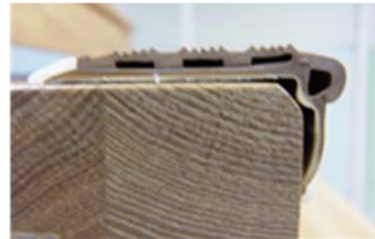


図 3 階段角部の状態

A 何も貼っていない段鼻



B クッション性のある中空構造を有する  
滑り止め「スペラーズ」



### 2.1.1 中空構造の挙動

図 4 はハイスピードカメラによりダミー人形頭部が B を取付けた階段に衝突する瞬間を撮影したものである。頭部が接触した直後は中空部分が潰れ、その後は滑り止めと階段踏面の接触面を支点にしてたわむ挙動をした。中空構造が衝突の瞬間に頭部への衝撃をやわらげるクッションの効果を果たしていることが目視から推測できる。

図 4 衝突の瞬間の「スペラーズ」中空構造の挙動

### 2.1.2 加速度最大値の比較

図 5 は頭部と加速度センサーの力の方向である。図 6 は加速度センサーで得られる頭部重心の合成加速度である。頭部に作用する加速度の大きさは頭部に作用する衝撃力の大きさにほぼ比例する。したがって、加速度の最大値を計測することにより頭部に作用する衝撃力の程度を評価することができるのは衝突対象物 A、B の  $a_{max}$  と A を基準としたときの減少量 (%) である。

図 5 頭部と加速度センサー

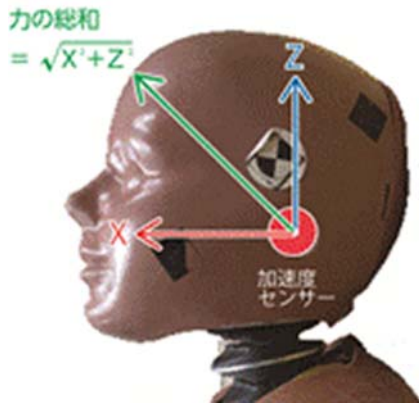
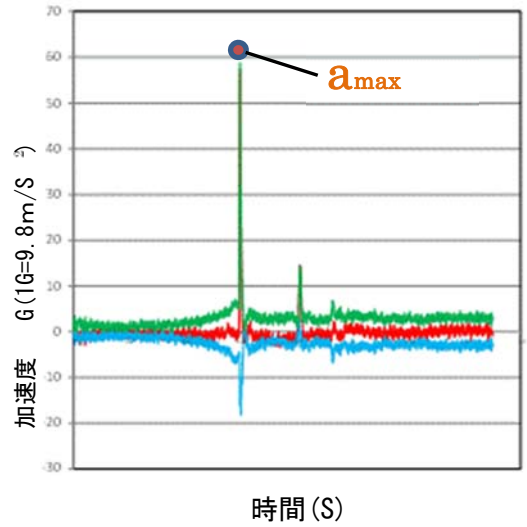


図 6 加速度と時間

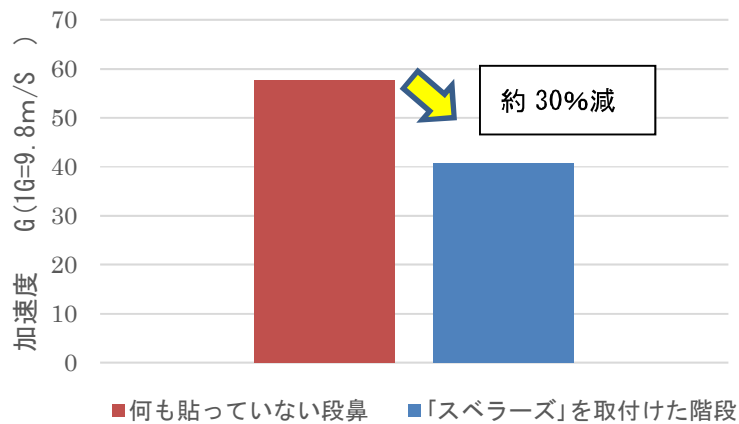


— X 方向の力      — 力の総和  
 — Z 方向の力      =  $\sqrt{X^2+Z^2}$

図 7  $a_{max}$  と減少量の比較

衝突対象物	$a_{max}$ (G)	A を基準とした減少量 (%)
A 何も貼っていない段鼻	57.53	-
B クッション性のある中空構造を有する「スペラーズ」を取付けた階段	40.69	29.27

$a_{max}$ 比較表



## 衝突解析

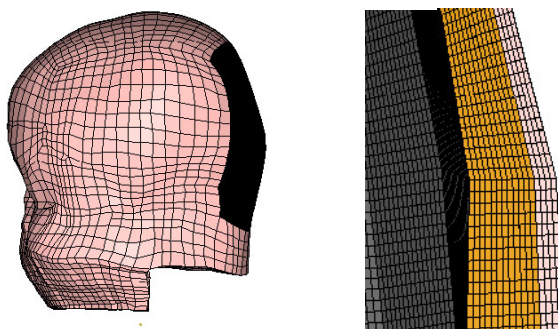
### 2.2.1. 3歳児頭部有限要素モデル

子どもの頭部の皮膚に作用する応力分布を検討するために子どもの頭部形状を有するコンピュータ・シミュレーションにより分析を行った。なお、コンピュータ・シミュレーションにおいても実験で用いたダミーと同じ3歳児を想定した。

本解析で使用した頭部有限要素モデルは3歳児の平均頭部寸法を有するモデルである。角への衝突問題の安定的な解析を図るために、角との衝突部位近傍の要素を微細化し、その要素数は60万要素程度である。なお、解析コストを考慮し衝突点近傍の皮膚要素のみを微細化した。微細化領域以外の皮膚および頭蓋骨に関しては剛体で定義しており、等価質量を重心に付与した。皮膚は16層の要素でモデル化されており、その厚さはおよそ5mmである。皮膚モデル中の皮下組織層は12層、皮膚は4層で構成した。

皮膚の材料モデルとして超弾性体を採用し、皮膚層のせん断弾性パラメータは、660kPa 皮下組織層は37.72kPaとした。これは各々縦弾性率においておよそ1.98MPaと0.1011MPaに相当する。

図 8 3歳児頭部有限要素モデル



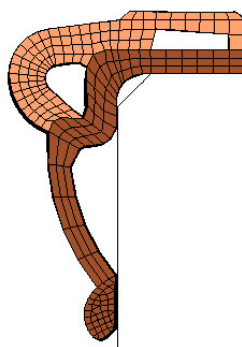
### 2.2.2. クッション形状

クッション性のある中空構造の裂傷リスク低減機能を確認するために図9にクッション性のある構造の有限要素モデルを示す。

なお、クッション部およびベース部については線形弾性体でモデル化した。クッション部のヤング率は引張試験結果に基づき19.7MPaとし、ベース部については2001MPaとした。

階段踏面に接するベース部については階段に固定し、前面については滑り接触を定義した。

図 9 クッション性のある構造の有限要素モデル



### 2.2.3. 解析条件

頭部モデルと階段+クッションモデルとの衝突速度は実際の乳幼児の転倒行動計測結果に基づき 1.52m/s とした。衝突角度として斜め 45° から後方に転倒する状況を想定し、頭部モデルの角度を 45° に傾けた(図 10)。木製階段の角部は一般木造住宅の実測値平均より C1.5 とした(図 11)。

図 10 衝突シミュレーション(側面視)

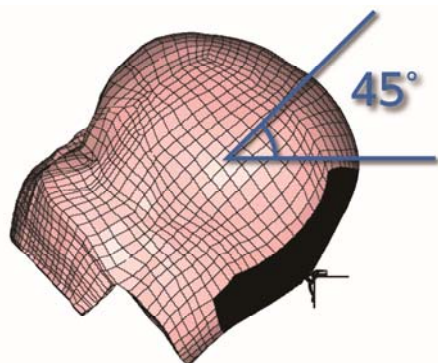
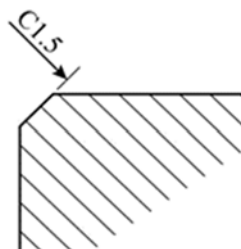


図 11 木造階段の角部



### 2.2.4. 解析結果

図 12~13 に各ケースにおける皮膚断面内の vonMises 応力分布を示す。皮膚構造内における最大応力は皮膚の裏面に生ずることがわかる。

図 14 に各ケースにおける最大 vonMises 応力を示している。木材との衝突と比較し、クッション性のある中空構造を有する滑り止め「スペラーズ」を設置した場合にはその応力は 14%程度まで低減することがわかり、皮膚の裂傷リスクは大幅に低減することがわかる。

図 12 階段に衝突時の皮膚の応力分布

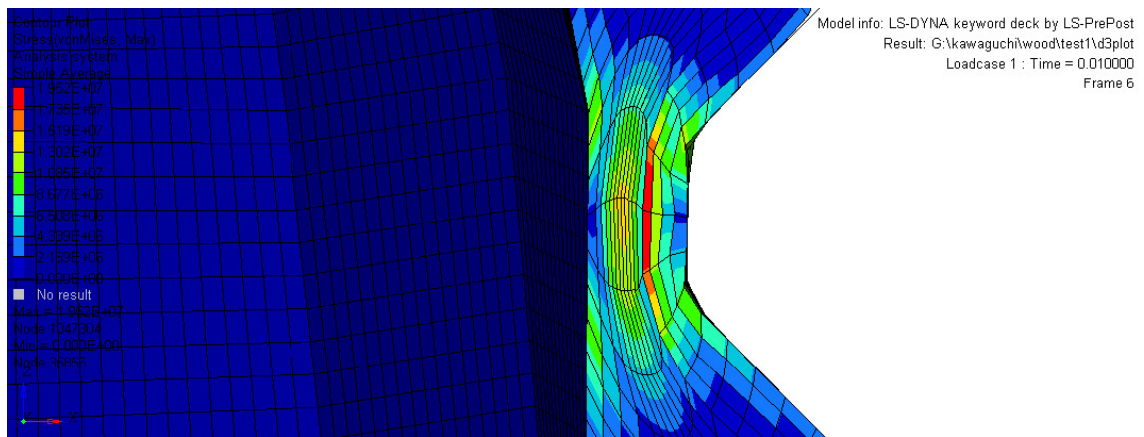


図 13 「スベラーズ」を取付けた階段に衝突時の皮膚の応力分布

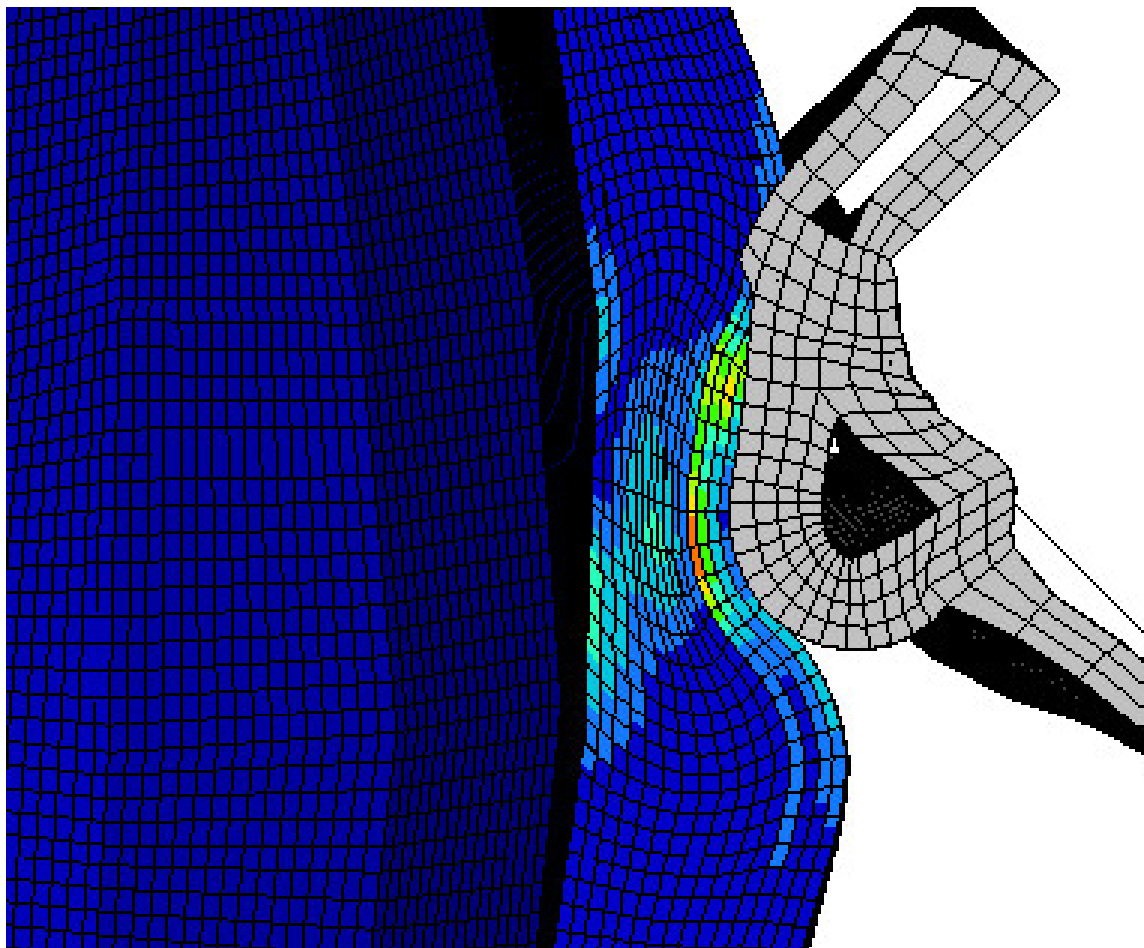
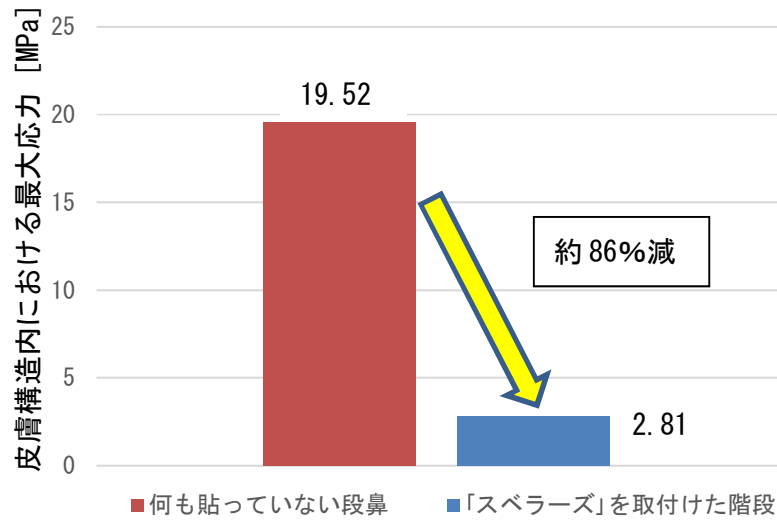


図 14 衝突時に皮膚にかかる vonMises 応力分布



参考文献

- (1) 国民生活センター 家庭内事故に関する調査報告書



〈実験解析者〉

東京工業大学 工学院 システム制御系  
宮崎 祐介准教授 博士(工学)

2012年東京工業大学 大学院 情報理工学研究科 情報環境学専攻(機械系) 准教授。

2016年より現職。

材料力学、機械力学的手法を基軸に医学・情報学的手法を融合させることにより、人間の構造・運動・感覚・感性を観察・モデル化する人間モデリング(デジタル・ヒューマン)に関する研究を行っている。

子どもを無理に泣き止まそうと強く揺さぶることで障害をおよぼす「乳幼児揺さぶられ症候群」において、ダミー人形による衝撃を計測し脳にダメージおよぼすメカニズムを解明した。