

人体頭部多層構造を模した超高性能頭部保護デバイス開発のための基礎解析

代表研究者 芝浦工業大学システム理工学部 准教授 渡邊 大

【まとめ】

人の頭部は脳をあらゆる外力から保護するため巧妙な多層構造を有している。この構造を模擬したヘルメットモデルを作成し通常のヘルメットと衝撃吸収特性について比較した。低速での衝撃では通常のヘルメットモデルがその性能について優位であったが高速での衝撃については頭部構造を模したヘルメットが優位であった。

1. 研究の目的

1-1 研究背景

従来の頭部保護デバイスとしてのヘルメットはオートバイや自転車、工事現場や災害現場など様々な場面で利用されている。ヘルメットの構造をみると、外装のシェルと内装のライナーに分かれる。シェルは複数の化学繊維を積層させて作られる帽体である。一方でライナーは主に発泡スチロールを素材としており、発泡体がつぶれることで衝撃を和らげる役割を持つ。そのため落下物や衝撃から頭部を保護するために厚い構造を有するが、ヘルメットを厚くするとその分大きくなり、装着したままの動作に制限が生じてしまう。

一方、人体頭部は図1に示す通り脳という学力から脆弱な組織を保護するために僅か厚さ2~30mmの間で巧妙な多層構造を有している。従来のヘルメットと人体頭部の多層構造を比較すると、外装は硬い防御層で共通しているが内装はヘルメットが厚みのある発泡体で衝撃を吸収しているのに対し、人体頭部は液層で衝撃を吸収するだけでなくウォータージャケットのように外力を分散させて局所的な損傷を防いでいると考える。

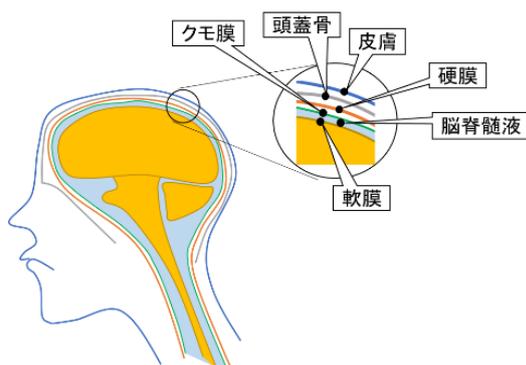


図1 人体頭部構造の概要

1-2 研究目的

そこで人体頭部の防御機能に着目し、この構造をヘルメットに応用し、脳脊髄液のようにライナーに液層を配置し、衝撃の緩和だけでなく頭部を包み込むような分散された力に変換させることが出来れば、今まで以上に保護性能の向上を図るとともに薄型のヘルメットにすることが期待できる。そこで本研究は、人体頭部の多層構造を模したヘルメットの開発を目的とし、まず、頭部の半球状のヘルメットモデルを作成し、従来のヘルメット構造との衝撃吸収能力について比較を行い、その有効性の検討を行う。

2. 研究方法と経過

2-1 研究方法の概要

簡易ヘルメットおよび頭部の有限要素モデルを作成して、有限要素法を用いた数値解析によって衝撃試験を行い、定点の応力や加速度を参照し、人体頭部構造を模擬した構造を有するヘルメット（以下、試作モデルとする）と、緩衝材として発泡スチロール（以下 EPS）を使用したヘルメットとを比較して両者の衝撃吸収性能の解析および評価を行う。なお、解析ソフトに関しては、汎用解析ソルバ LS-DYNAを使用することとする。

2-2 有限要素モデルの作成

本研究では、試作モデルと EPS モデルの2つの有限要素モデルを作成した。まずは試作モデルについて述べる。

人体頭部構造は以下の図1のような構造となっているため、これを模擬して、図2のようなヘルメットの有限要素モデルを作成した。ただし、くも膜は頭部保護構造に大きく寄与しないと考えたためこれら構造を省略した。一方、比較として脊髄液層を EPS ライナーに置き換えたものを同時に作成し、衝撃に対する挙動を比較した。

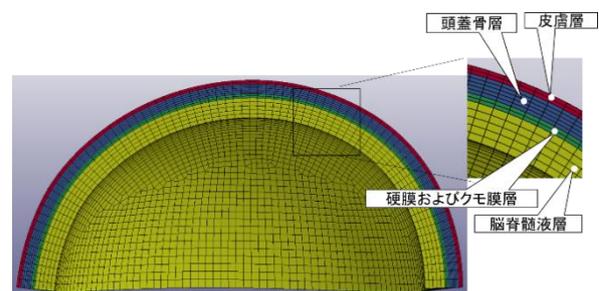


図2 試作モデルの概要

EPSモデルに関しては、まずEPSをシミュレーション上で再現する必要がある。そのためには、EPSの応力-ひずみ曲線のデータを入力しなければならない。そこで、文献1に掲載されているEPSの応力-ひずみ曲線を利用したい。しかし、この曲線はひずみが0.7のところまでしか描かれていないため、これを延長する必要がある。そこで、Vladimírら[2]の提案する材料モデルの構成式(1)にパラメータ(表1)を用いて文献1の曲線に近い曲線を作成し(図3)、それにより得られた応力ひずみ曲線データを入力し、図2の脳脊髄液層の部分にEPSを割り当てた。

$$\sigma = e^{-\frac{k\varepsilon}{c}}(-1 + e^{k\varepsilon})c + \{k_p + \gamma(1 - e^\varepsilon)^n\}\varepsilon \quad (1)$$

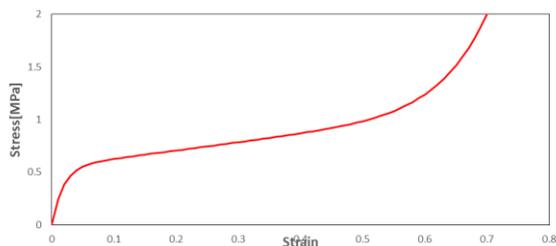


図3 EPS 応力ひずみ線図

表1 各パラメータの値

k	c	k _p	γ	n
30	0.55	0.78	1.2	6

そのほかヘルメットモデルに使用した皮膚、骨などの材料特性値は文献3に示す渡邊らの値を使用した。

2-3 ヘルメットモデルの衝撃解析

以下の図4に示すように、質量3kgのインパクトを初速度5m/s、7m/s、9m/sとしてそれぞれヘルメットモデルに衝突させる解析を行った。なお、頭部モデルの下部はxyz方向に関して拘束してある。

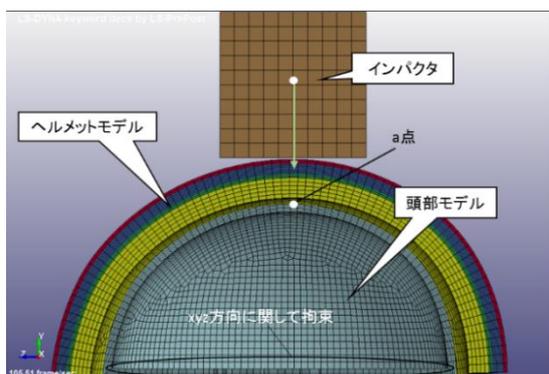


図4 衝撃解析の概要

2-4 解析結果および考察

衝撃試験の結果として、a点におけるミーゼス応力を以下の図5, 6, 7に示す。

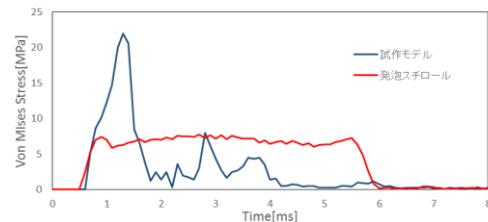


図5 インパクトの速度=5m/s

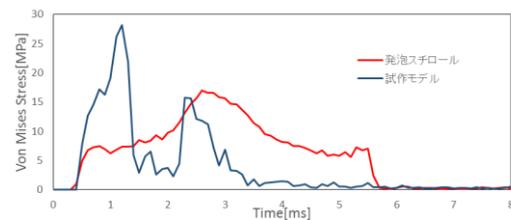


図6 インパクトの速度=7m/s

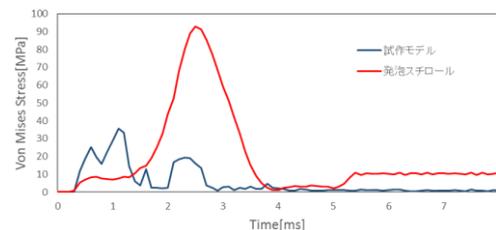


図7 インパクトの速度=9m/s

上図5, 6, 7より、インパクトの速度が低く、加わる衝撃が小さい場合にはEPSのほうが高い衝撃吸収性能を有することがわかる。しかし、インパクトの速度が高くなると結果が逆転し、試作モデルのほうが高い衝撃吸収性能を有することがわかる。これは、EPSモデルの場合においては、衝撃が大きくなるとEPSが潰れてしまい、衝撃吸収性能を発揮できなくなってしまったためであると考えられる。一方試作モデルでは、緩衝材として水が利用されるが、水の体積弾性率は2.19GPaと高いため、強い衝撃が加わっても圧縮されにくく、衝撃吸収性能が保たれたと考えられる。

2-4 頭部およびヘルメットの落下解析

液層を含む構造を適用した頭部保護デバイスモデルを用いて、JIST8133乗車用ヘルメット規格内の衝撃吸収性試験を数値解析にて行う。この試験はヘルメットを自由落下させ、アンビル衝突時の人頭模型にかかる1軸加速度を基に衝撃吸収性を判定する試験である。試験装置は台に固定した直径130[mm]の平面円形アンビルは半径50[mm]の半球形アンビル、自由落下誘導装置、加速度計を取り付けた

金属製又は樹脂製の人頭模型, ヘルメットを装着した人頭模型を保持する可動装置の 4 つである。

1 種ヘルメットの平面円形アンビル試験では落下速度 5.8[m/s] (落下高さ 1.72m) で衝撃を加え, 半球形アンビル試験では落下速度 4.8[m/s] (落下高さ 1.17m) で衝撃を加える. 衝撃吸収性を判定するための規定を以下の表 2 に示す

表 2 衝撃吸収性の規定

最大衝撃加速度	2940[m/s ²]以下
1470[m/s ²]以上の継続時間	4[ms]以下

次に工業材料を用いた落下衝撃解析用のヘルメットモデルを図 8 に示す. 外装シェルにポリカーボネートを用い, ライナー部分には液層または EPS を用いたもの 2 種類を作成し, その挙動について比較を行う. なお本解析の液層についてはより液体としての振る舞いが再現できるように SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)要素で構築している.

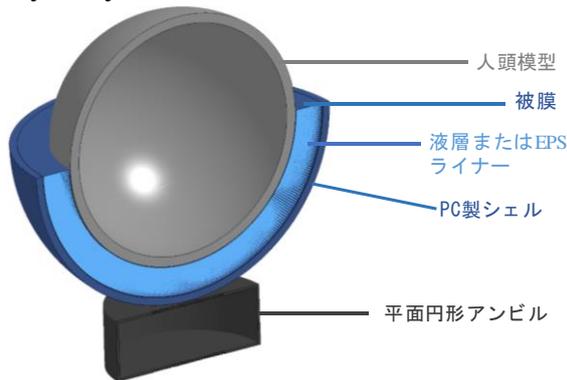


図 8 落下解析モデル

解析に用いた材料特性値および各諸元を表 3 および表 4 に示す.

表 3 材料特性値

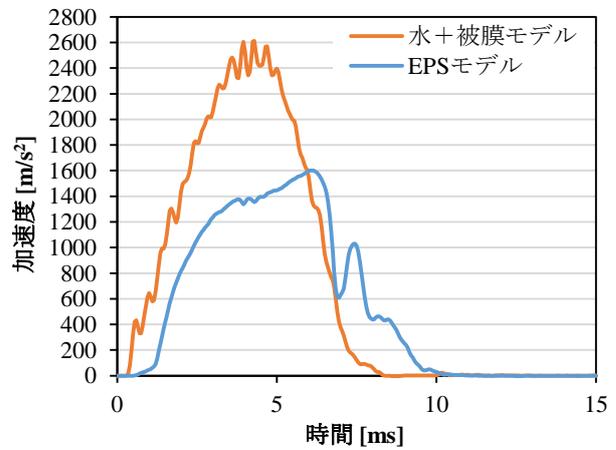
	密度 [kg/m ³]	ヤング率 [GPa]	ポアソン比	降伏応力 [MPa]	接線係数 [MPa]	材質
シェル	2100	2.2	0.37	66	2.2	弾塑性体
人頭模型	5378	2.05×10 ²	0.27	-	-	弾塑性体

表 4 各パーツの諸元

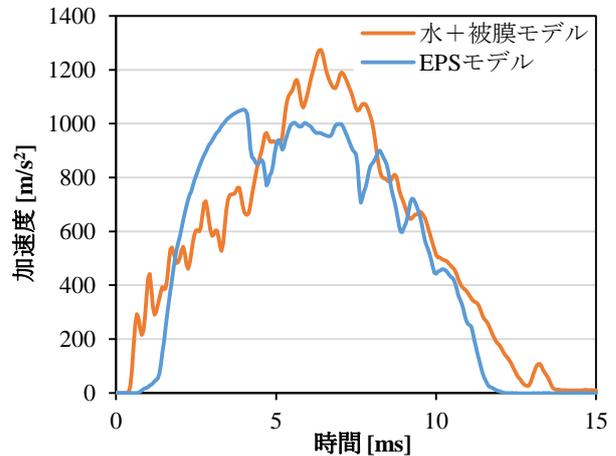
	半径, 厚み[mm]	質量[g]
人頭模型	94.5, 8.0	5600
水	103.0, 23.0	2001
被膜	-----, 0.5	209
シェル	127.0, 6.0	765
EPS	103.0, 24.0	32

なおシェルの厚さを 6mm ライナーの厚さを 24mm にしている.

人頭模型パーツの 1 軸加速度のグラフを図 9 に示す.



(a) 平面円形アンビル試験



(b) 半球アンビル試験

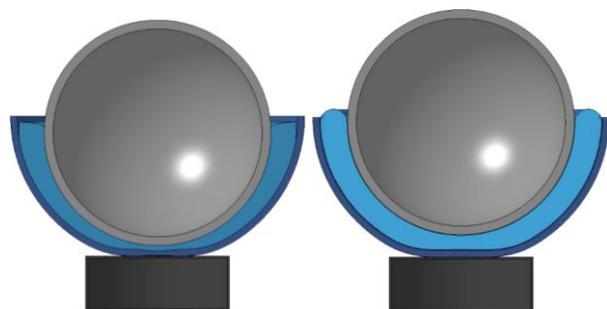
図 9 アンビル試験解析における人頭模型での加速度履歴

両モデルとも最大衝撃加速度と, 1470[m/s²]以上の持続時間の衝撃吸収性の規定を満たしていることを確認した. しかしながら, 従来の EPS モデルが液層モデルに比べて最大衝撃加速度をより抑えていることが分かった.

EPS モデルの衝撃加速度は, アンビルと衝突して上昇し, 一旦低下した後再び上昇した. これは発泡体が完全につぶれると急激に圧縮応力が上昇する性質を持つため, 衝突して間もないときは EPS がつぶれながら衝撃を吸収しているが, 完全につぶれた後は急激に EPS が硬化し, 衝撃を吸収しきれずに再び加速度が上昇したと考えられる.

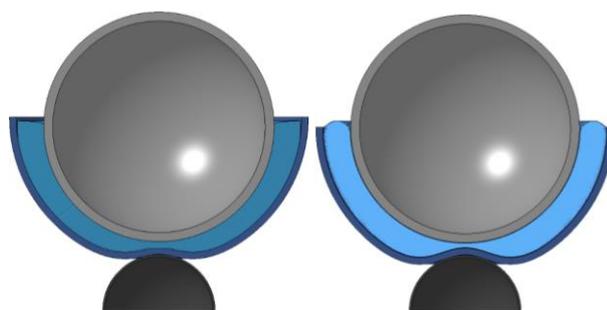
試作モデルは EPS モデルに比べて高い衝撃加速度を示した. これは, 水が EPS より圧縮されにくい性質によるものであると考えられる.

6.0[ms]時における平面アンビルに衝突した時の挙動の断面を図 10 に、半球アンビルに衝突した時の挙動の端面を図 11 に示す。



(a) EPS モデル (b) 試作モデル

図 10 平面アンビル衝突時の挙動



(a) EPS モデル (b) 試作モデル

図 11 半球アンビルに衝突時の挙動

EPS モデルはこの時点で発泡体が圧縮されて高密度化しているが、試作モデルはあまり液層が圧縮されていないことがわかる。

一方半球アンビル試験では、試作モデルが EPS モデルとほぼ同等の衝撃吸収性を示した。これは先述の平面アンビルと比べてシェルとの接触面積が小さく、頭頂部に集中して衝撃が加わったため、液層がより圧縮されて時間をかけて衝撃を分散・吸収したものと考えられる。

3. 研究の成果

3-1 実施方法について

本研究では頭部多層構造を模擬した頭部保護デバイスの開発を目的として、半球状の簡易ヘルメットモデルの製作を行い、インパクトによる衝撃解析および JIS に規定されている落下解析の実施を行った。

3-2 インパクト衝撃解析について

インパクトの初速度を 5,7,9m/s と変化させ解析を行った結果、低速では EPS モデルの方が高い保護性能を有していることが確認された。一方で高速になるにしたがって EPS がつぶれ切ってしまうインパクトの衝撃を吸収しきれないのに対し、試作モデルでは衝突速度が速くなっても生じる曲げ応力が大きく上昇す

ることなく良好な性能を有していることを確認した。

3-3 落下解析について

落下解析においては JIS に規定される性能を満たしたものの、試作モデルは EPS の性能に対し優位にはならなかった。半球アンビルに対して加速度はほぼ同等といえるが、平面アンビル落下については EPS モデルに比べ加速度は 1.6 倍程度の増加となった

4. 今後の課題

高エネルギー衝突時には提案する試作モデルが従来のヘルメットより頭部保護性能が高いと考えられるが、低速での保護性能においては従来の EPS ライナーを有するヘルメットの方が高い。これら二つを組み合わせることで全衝突範囲で高い頭部保護性能が得られると考える。これら 2 つを最適に組み合わせる方法について検討したい。

5. 研究成果の公表方法

この研究成果は第 25 回計算工学講演会にて発表予定であり、日本機械学会スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2020 にて発表を考えている。

6. 参考文献

- [1] Ricardo Alves de Sousa et al, Assessing the effectiveness of a natural cellular material used as safety padding material in motorcycle helmets, 2012
- [2] Goga Vladimír et al, Testing and Application of New Phenomenological Material Model for Foam Materials, 2010
- [3] Watanabe, D. et al., Development of a Human Head FE Model for the Impact Analysis Using VOXEL Approach and Simulation for the Assessment on the Focal Brain Injury, *Trans. of JSME, Series A*, Vol. 74(2008), pp. 611-620

以上