

お洒落な自転車ヘルメットの開発

Development of Stylish Bicycle Helmets

佐々木 淑恵¹⁾, 戸倉 直²⁾, 萩原 一郎³⁾

Toshie Sasaki, Sunao Tokura and Ichiro Hagiwara

- 1) 研究員 明治大学 (〒164-8525 東京都中野区中野4-21-1 E-mail: tsasaki8@meiji.ac.jp)
2) 工博 株式会社トクラシミュレーションリサーチ (E-mail: tokura.sunao@tokurasimresearch.com)
3) 工博 明治大学 研究特別教授(〒101-8301 千代田区神田駿河台1-1 E-mail: ihagi@meiji.ac.jp)

It is expected to increase bicycle helmet wearing rate. But mothers do not wear helmets although they encourage children to wear helmets. This is because mothers think that wearing a helmet will mess up their hair and they find it difficult to carry around the helmet after using the bicycle. And so we have developed helmets that can be worn like a normal hat which is Good ventilation, foldable and fashionable based on origami engineering. Ultimately, we aim to satisfy requirements for impact properties of bicycle helmet but here we consider whether the requirements of work helmet, whose requirements are clear, can be met.

Key Words : Origami Hat, Improved Type Sea Cucumber Fold, Origami Helmet, Energy Absorption, Crash Simulation Model, Bicycle Helmet, Work Helmet

1. はじめに

2023年4月, 日本では自転車利用時にヘルメットの着用が義務化された。これは, 近年の自転車事故によるけがの増加に歯止めをかける措置である。ヘルメットの着用義務により, 自転車利用者の頭部が保護され, 転倒や衝突による障害値を軽減することが期待されている。しかし, 自転車に乗る際に, 子供には, ヘルメットを被せるが, 自転

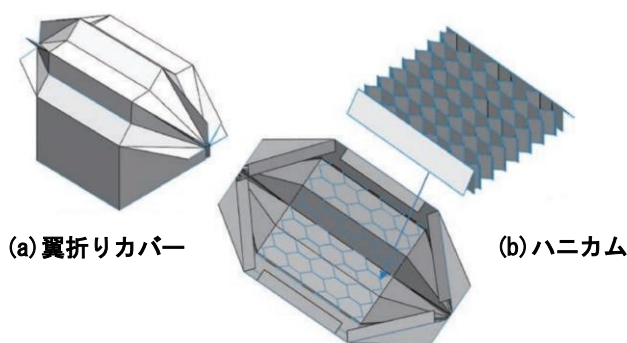


図2 先に開発したダンボール製折紙ヘルメット(蛇腹折りのカバーとハニカムから構成される折り畳みヘルメット)

車を運転する本人は, ヘルメットを被らないということもしばしばである。そこで, 図1に示すように, 「折り畳めることにより, 鞆に収納可能で, 持ち運びが容易でありながら, 着用時の快適性を損なうことなく, さらにスタイリッシュなデザインを実現する「折紙帽子型ヘルメット」を提案する。これにより, ヘルメットの着用率向上を目指したい。この帽子/ヘルメットは「改良型なまこ折り」という折紙手法[1]を用いて, 図1に示すように, 折紙構造特有の美しい外観の上, 優れたエネルギー吸収特性と快適な装着感の双方を目指している。以上のようにヘルメットを目指すため, 衝撃特性を確認する必要がある。そこで, ここでは, 既に開発の経験があり, 衝撃に対する要件が明確な作業ヘルメットの要件を満たすか検討する。

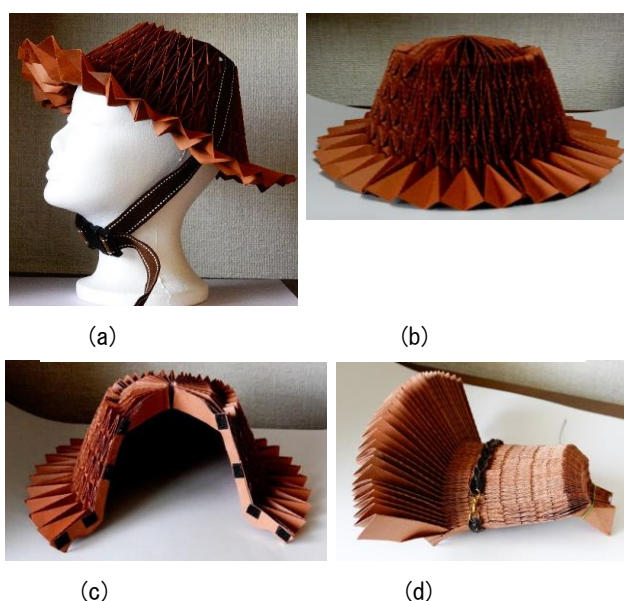


図1 提案する折紙ヘルメットの外観 (a) なまこ折りヘルメット装着時 (b) 外観: てっぺんとひさはしは, じゃばら折り, 側面は, 改良なまこ折り (c) マジックテープによる接続 (d) 折り畳み時の形状

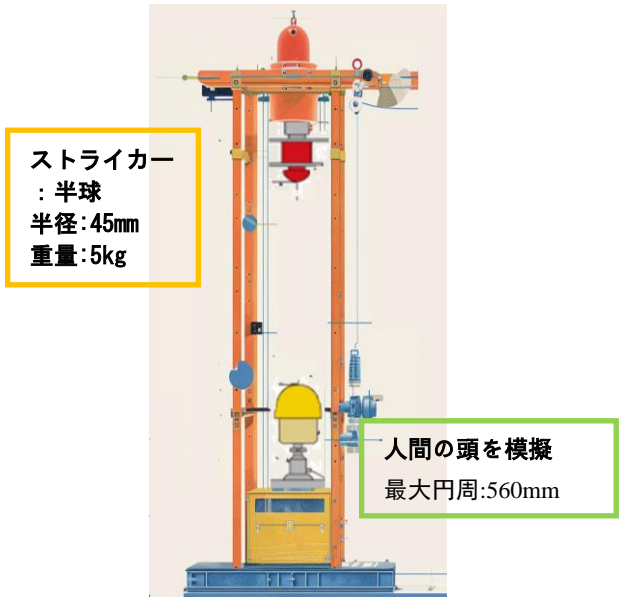


図3 作業用ヘルメットの衝撃力検査システム

2. ハニカムヘルメット

(1) 設計仕様と解析モデル

著者らはすでに好評裏に販売されている、図2に示すような、ダンボール製の作業ヘルメットを製作している [2-4] . これを開発した際も図3に示す作業ヘルメットの試験に対応するシミュレーションを行っている. 今回提案の図1のモデルでこれに優る特性を目指すため、ここで議論ができる程度に文献[4]の結果を記す.

図2のヘルメットは、翼折りカバー[5]と六角形のハニカム構造からなる. カバーは、じゃばら折りを一点にまとめた翼折りで、衝撃吸収材としての六角形ハニカムは、平らな紙に互い違いに接着剤を条線状に塗布したもので接着し、縦方向に沿って展張して製造した展張パネル方式のハニカムを使用している. 展張時にコア壁の倒れが発生しないように厚手の段ボールを材料にしている. この展張式ハニカムを翼折り[5]のカバーで覆った帽子／ヘルメットである. 「エネルギー吸収に、重量当たりの曲げ剛性が最大のハニカム構造」を利用しているため、従来の曲面構造のカバーにウレタンなどの柱構造を加えたヘルメッ

トに比し、160gと表1の代表的な市販品に比し大幅な軽量化が得られている.

図4の解析モデルで、頭モデルの下面を完全拘束する. 半球形ストライカーを高さ $h=1000\text{ mm}$ から自由落下させると、ヘルメット表面に到達する時の速度 v は $v = \sqrt{2gh}$ (重力加速度 $g = 9800\text{ mm/s}^2$) で得られる. 半球形ストライカーがヘルメットに接触した状態から、上記の速度 v を初期速度として、解析を開始する. ヘルメットの中央部にストライカーが衝撃した時以降に発生する頭モデルの荷重値として評価する. 鉄製の半球ストライカーを3次元ソリッド要素でモデル化し、節点数は1027, 要素数1036である. その材料特性値は、質量密度 $2.31 \times 10^{-4}\text{ kg/mm}^3$, 弾性ヤング率 $2.1 \times 10^5\text{ N/mm}^2$, ポアソン比 0.3である. 一方、図4のアルミ製の頭部も、3次元ソリッド要素でモデル化して、節点数2078, 要素数10395である. 物性値は、質量密度 $2.7 \times 10^{-6}\text{ kg/mm}^3$, 弾性ヤング率 $6.89 \times 10^4\text{ N/mm}^2$, ポアソン比 0.3である. カバーの計算モデルは図4に示すように、シェル要素を用い、節点数, 要素数は、それぞれ6711, 13110である. ハニカムもシェルでモデル化し、節点数, 要素数は、節点数, 要素数は11442, 25408である. カバーもハニカムもポアソン比は0.34, 密度は $2.569 \times 10^{-7}\text{ kg/mm}^3$, ヤング率は 664 MPa とした.

(2) 衝撃特性

作業ヘルメットの要件は、図3の試験でダミーヘッド頂点にかかる荷重が 4.9 kN 以下であることである. 重量最小を目的とし、ダミーヘッドの頂点にかかる荷重が 4.9 kN 以下という拘束条件を付与した最適化で得られた設計仕様のエネルギー時間線図を図5に示す. 同図で赤線はカバー, 青線はハニカムである. 同図Aは、衝撃を受けた後、カバーの頂面がまずへこみ、ハニカムはカバーの拡張につれて外側に拡張する. 赤い線に示されるように、上から加えられた荷重はカバーとハニカムの接続部を通じてハニカム構造に伝わり、たちまちハニカム構造底部は頭に沿い縦方向固定の状態となり、ハニカム構造全体は頭の形に沿って曲げ変形し、衝突後の早い段階から衝突エネルギー吸収に貢献するカバーに加え、ハニカムもエネルギー

表 1 現在市販されている代表的なヘルメット

Products			
Size(L*W*H)	280mm*225mm*150mm	332mm*221mm*35mm	358mm*197mm*45mm
Material	ABS	PP+PE	PP+PE+ABS
Weight	400g	370g	370g

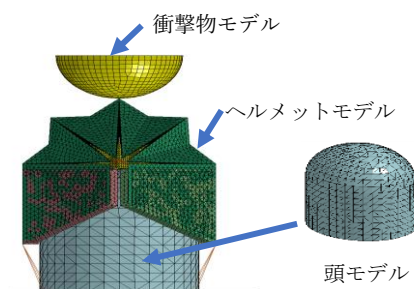


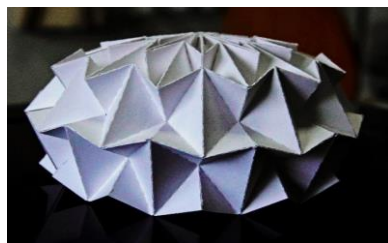
図 4 衝撃解析モデル

吸収に寄与し始める。同図Bで、半球形ストライカーはカバーを通じてハニカムと接触し始め、ハニカムコアの圧潰変形が始まり六角形柱を構成するコア壁は上端からアコーディオンの蛇腹のように折り畳まれる。このようなコア壁の座屈によりハニカムコアのエネルギー吸収量が格段に大きくなり、12.8msからハニカムの衝撃エネルギー吸収の寄与がカバーによるものより大きくなる。同図Cで、ストライカーの落下が最大位置に達し速度が零になると、ハニカム構造とカバー構造のスプリングバックが生じ、半球形ストライカーの跳ね返りが起こりエネルギー吸収量はどんどん小さくなる。同図Dでカバー構造のスプリングバックが続き、遂に半球形ストライカーがハニカムから離れる。半球形ストライカーがカバーから離れた後の同図Eからは、ハニカムとカバーのエネルギー吸収量は共に0に限りなく近づいてゆく。

3. 提案するお洒落な折紙帽子／ヘルメット

(1) 設計仕様

提案する折紙ハットは、改良なまこ折りという折紙手法を使っている。通常のなまこ折りとは改良なまこ折りの違いを図6に示す。改良なまこ折りは、図6(a)にあるなまこ折りを基本としているが、通常のなまこ折りでは図6(b)のように、頭にあたる部分が尖ってしまい、痛い。そのため、改良なまこ折りでは、図6(c)のように尖った部分を折り込むことで、へこませた折り方を採用している。



(a)



(b)



(c)

図 6 通常のなまこ折りと改良なまこ折りの違い

(a) なまこ折り (b) 裏から見たなまこ折り、尖った部分がある (c) 改良なまこ折り、なまこ折りの尖った部分をへこませて改良している

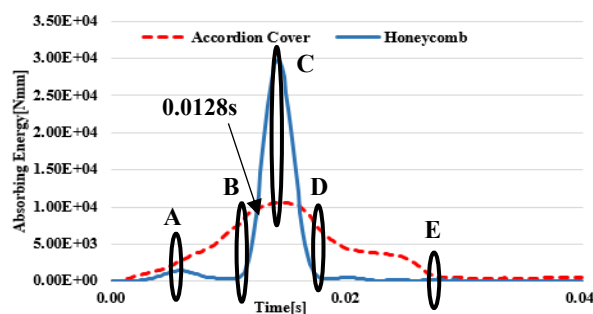


図 5 カバー（赤い線）、ハニカム（青線）のエネルギー - 時間曲線

折紙ハットとして、折ったものが図1である。ヘルメットとして着用したときは、図1(a)のようになる。その外観は、図1(b)であり、茶色の画用紙で作られた折紙の帽子／ヘルメットは、上面とひさはじゃばら折り、側面は改良なまこ折りの折紙手法で構成されている。この帽子／ヘルメットは、複雑な幾何学模様を持ち、繊細な構造とユニークな特徴を強調している。複雑な折り目や幾何学模様が深みと質感を与え、エレガントなデザインを生み出している。この折り畳み技法は、細かい彫刻のように表現され、帽子に独特の美しさと機能性をもたらす。

折紙で製作したハット型ヘルメットは、伸縮性に優れ、頭部との接触部分が柔軟になる。これにより、頭にぴったりと合っけていても窮屈さを感じにくくなる。通気性にも優れ、頭に固定されていても蒸れにくい構造である。ヘルメットが髪に張り付くことを軽減し、髪スタイルに影響を与えない。素材は紙で、汗などの成分をある程度吸収するため、べとつきにくく、重量も開発した図2のヘルメットよりも更に軽い64グラムである。図1(c)のように両端にマジックテープを付けて組み立てられるようにしており、折り畳むと図1(d)のようにコンパクトに収納できる。

(2) 折紙帽子／ヘルメットの制作過程

折紙ハットの制作について述べる。まず、どのような帽子にするか、デザインする。模様となるなまこ折りの段数や、頭のとっぺんを平らにするか丸く頭に沿うようにす

るか、ひさしを付けるかなど、おおまかな形状を考える。

次に展開図を描く。テセレーション模様やじゃばら折りは、繰り返しパターンなので、プログラミングに `processing` 言語を利用することで、繰り返しパターンの多い図面作業を効率化し、展開図の作成を容易にした。展開図を描く際、ハットのでっぺんの半径、側面の高さ、なまこ折り1辺の長さ、ひさしの長さを変数とした。これにより、変数の値を変更するだけで、ハットの大きさを自由に設計することが可能になった。カット部分は実線で切りとり、折り線は、点線にカットすると、折り目に沿って、正確に折ることが可能になる。

ハットの展開図を基にして、B4サイズの画用紙の切断を行う。カッティングプロッターを使い、デザインに沿って描いた展開図通りにカットを行う。カッティングプロッターは、専用のCADをインストールしたPCとUSBで接続されており、ベクター形式のカット情報から、展開図通りにカットすることができるツールである。

制作は、同じ図面を7枚カットの後、折ってから、7枚をボンドで繋ぐ。トップ側の端辺には、ボンドを付け、一点にまとめる。円形に拵げること、ハットを形成する。このような手順で、ハットの制作を行った。

(3) 応力シミュレーションによる形状の確認

図7のような環境の元、応力シミュレーションを行った。計算モデルとして、z方向に-20Nの荷重を加える。拘束

は、ひさしの底部で、固定拘束とする。応力計算結果は、図7(c)に示し、中央部にへこみが生じる。トップに均等の荷重をかけたが、稜線は、中央に集中しているために、中央部分の荷重が増え、へこむものと考えられる。この対策として、まず、ハットの中央にトップの直径の20%にあたる部分に補強を設けたがへこみはほとんど改善されなかった。次に図7(d)に示すようにハットのトップの直径の80%に円形の補強を設けた。厚さは3mmとする。その結果、図7(e)に示すようにへこみが軽減された。この結果を実際にハット製作にも反映させて、図7(f)のような円形の補強を加えた。補強の重量は、20gほどで、ハットの重さは、84gになるが、それでも、現行のヘルメットより、軽い。

次に図8(a)に示すひさしの部分に20Nの荷重をかけ、応力を計算した。その結果は、図8(b)になり、ひさしの端は、応力が強いが、頭に近くなるほど、応力が弱まっていることが確認される。この検証から、ひさしは衝撃力を緩和する機能を有することが示唆される。

(4) 衝撃のシミュレーション

a) シミュレーションモデル

図3のように、作業ヘルメット審査では、半径45mm、質量5kgの半球形ストライカーを高さ $h=1000$ mmから自由落下させ、頭モデルの頂点に発生する荷重として評価している。頭モデルの周囲は、56cmなので、頭囲56cm以上

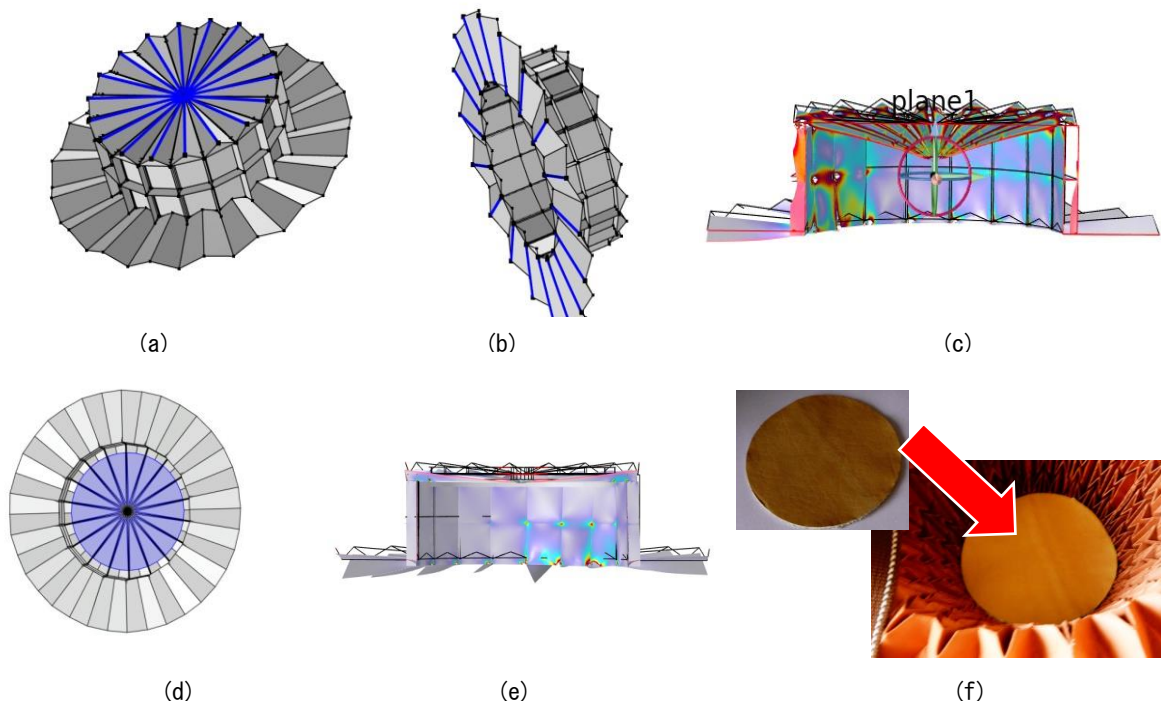


図7 応力シミュレーションと対策：材料はダンボール：厚さ：2mm、密度：256.9kg/m³、ヤング率：0.664GPa、ポアソン比：0.34 (a) ハットトップのじゃばら折り稜線に上から20Nのエッジ荷重を加える。(b) ひさしの底部は固定拘束(c) 応力分布計算結果：中央部にへこみが生じる。(d) その対策として、頭部に補強材を設ける。(e) 補強後のシミュレーション結果：へこみが軽減される。(f) 制作帽子にも反映させて、帽子の中に円形の補強を加えた

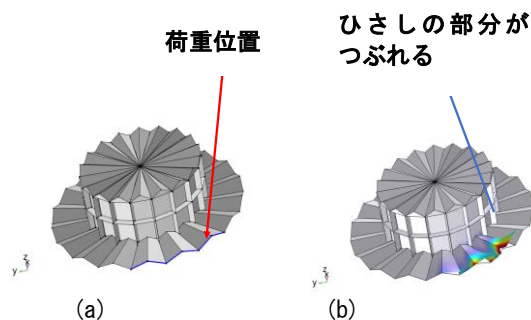


図8 横からの力に対するひさしの効力

(a) 荷重位置

(b) ひさしの応力は高いが、頭付近では、力が弱まる。

のハットの試験を行うこととなる。

これを基にした衝撃シミュレーション解析モデルを図9(a)に示す。ストライカー、頭部、ロードセルの幾何学モデルは、3D CADで作成し、プリプロセッサ LS-PREPOST にインポートした。シミュレーションのモデルは、次のとおりである。衝撃の対象となるハットは、同図(b)である。ハットの材料はダンボールで、厚さ2mmである。節点数は11971、要素数 12168 である。材料特性値は、密度: $2.57 \times 10^{-7} \text{kg/mm}^3$ 、ヤング率: 664N/mm^2 、ポアソン比:0.34である。

ロードセルは、2節点を結ぶバネ要素でモデル化する。ロードセルの上端節点は、頭部の重心位置に置いた。この節点は、頭部と一体化しており、頭部の動きに追従して移動する。ロードセルの下端節点は、上部節点の真下に置いた。この節点は、空間に固定した。ロードセルのバネ乗数は、10mmたわんで20kNとなるようバネ乗数=2kN/mmとした。

人間の頭を模擬したダミーヘッドは、質量4.5kgとした。z方向以外の自由度を拘束した。頭部の材料は、アルミ製で、3次元ソリッド要素でモデル化して、節点数 3365、要素数 3379である。材料特性値は、質量密度 $2.7 \times 10^{-6} \text{kg/mm}^3$ 、弾性ヤング率 $6.89 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ 、ポアソン比 0.34である。

所定の高さから落下させる半球ストライカーは、ソリッド要素でモデル化し、節点数は685、要素数 652である。衝撃力検査試験に合わせ、質量は、5kgとした。材料は、鉄である。その材料特性値は、質量密度 $2.31 \times 10^{-4} \text{kg/mm}^3$ 、弾性ヤング率 $2.1 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ 、ポアソン比 0.3とする。衝撃力検査試験に合わせ、半球のストライカーを高さ1000mm から自由落下させる。シミュレーションは、半球形ストライカーがヘルメットに接触した状態から、上記の速度 v を初期速度として、解析を開始した。

高精度な解析を行うためのメッシュ分割のポイントとして、帽子／ヘルメットモデルのメッシュは、アスペクト比の小さい、正方形に近い四角形メッシュとした。ハットと頭部間、ハットとストライカー間に接触条件を定義した。ハットに自己接触を定義した。

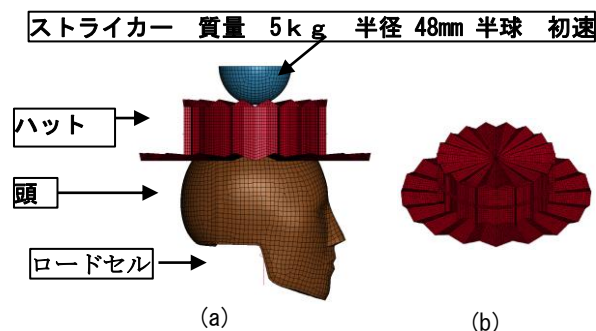


図9 シミュレーションモデル

(a) 全体解析モデル (b) 帽子／ヘルメットモデル

b) 解析結果

解析は、ダンボールの場合とスチールの場合の2種類の材料で比較した。ダンボールの材料特性値は、先に示したとおり、密度: $2.57 \times 10^{-7} \text{kg/mm}^3$ 、ヤング率: 664N/mm^2 、ポアソン比:0.34である。また、スチールの材料特性値は、質量密度 $7.89 \times 10^{-6} \text{kg/mm}^3$ 、弾性ヤング率 $2.1 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ 、ポアソン比 0.3とする。ここで、(3) 応力の検討で記述した補強は加えないで、ダンボール材では64gのモデルでまずその実力を把握する。

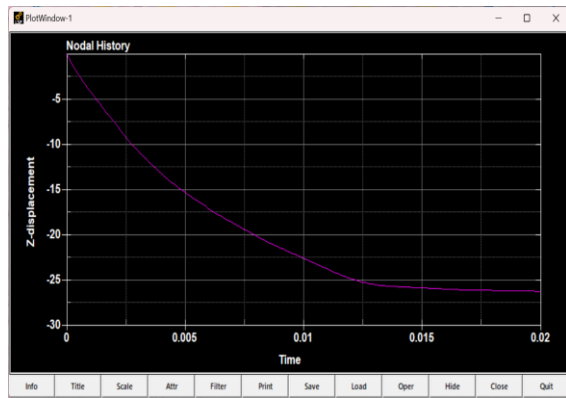
材料がダンボールの場合のストライカーのヘルメット頂点に衝撃してからストライカーの移動-時間線図を図10(a)に示す。図10(a)を見ると、ストライカーは、沈みハットは、反発していない。これは、この形状で、材料がダンボールでは、ヘルメットとしては、不十分であることを示す。これについては、今後、より詳しい解析が必要であると考え。次に、材料をスチールに変更したときの移動-時間線図を図10(b)に示す。ストライカーがヘルメットに衝撃したとき、一旦、沈むが、反力によりストライカーは、上方向に弾き飛ばされることがわかる。

次にダミーヘッド頂点の加速度-時間線図を図11に示す。図11(a)は、ダンボールで、加速度は、0を中心に上下が続く。一方、図11(b)は、スチールの場合で、ストライカーがヘルメットに衝撃すると直ぐダミーヘッドに加速度が発生するが、その後はヘルメットが反力を出しダミーヘッドの加速度は小さくなってゆく。ヘルメットが押し潰されストライカーがダミーヘッドに直接あたった瞬間、加速度は最大となる。しかし、十分にエネルギー吸収がなされているため、加速度は、徐々に下がっている。

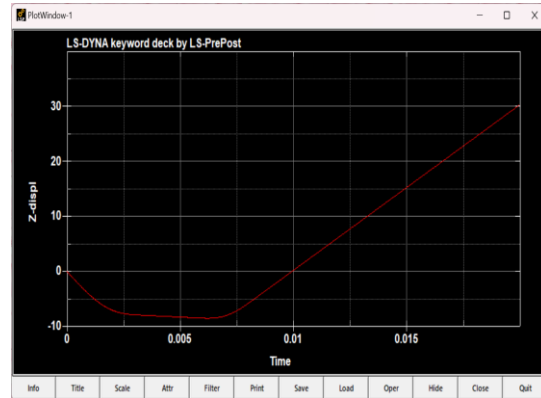
4. 結論

本研究では、改良型なまこ折りをを用いたハットの設計を行い、その結果、頭に適切にフィットし、長時間の着用でも快適さを提供するハットを製作した。また、ハットに対する解析シミュレーションモデルを構築した。

応力のシミュレーションでは、ヘルメットが力を受けた際に効果的にエネルギーを分散し、頭部への負担を軽減できることが確認された。応力シミュレーションを基



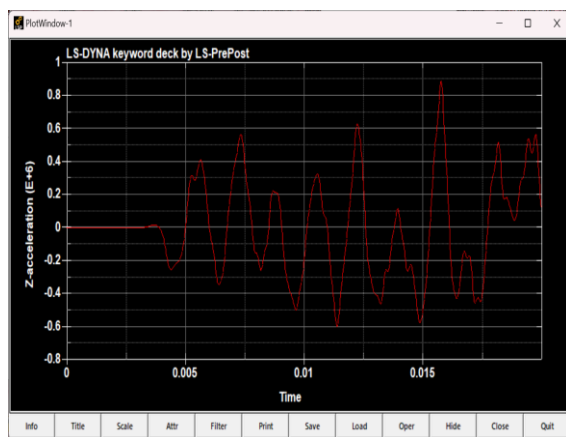
(a)



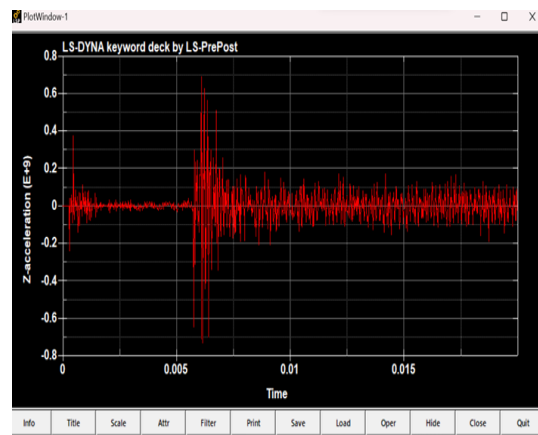
(b)

図 10 ストライカー 移動-時間線図

(a) ダンボールの場合 (b) スチールの場合



(a)



(b)

図 11 加速度 - 時間線図

(a) ダンボールの場合 (b) スチールの場合

に、ハットの形状についての検討も行った。てっぺんに円形の補強を設けることで、中央部に集中する力を抑え、荷重がある場合に中央部をへこませないようにできることを検証した。また、ひさしがあるほうが、外力の伝達をおさえることができ、ヘルメットの形状としては、有効なことも検証した。

衝撃シミュレーションでは、折り紙の技術を活用した衝撃テストモデル構築を検討した。ストライカーの移動-時間線図から、現状モデルでは作業ヘルメットの衝撃要件を満たさない。今後は、剛性対策として有効な補強を加えたり、材料を検討するなどを行ってゆく。

参考文献

- [1] 萩原一郎, 佐々木淑恵, 帽子, 特願 2023-194075 (2023 年 11 月 15 日).
- [2] 萩原一郎, 奈良知恵, 折り畳み構造物, 登録番号: 特許 6628308 号 (2019 年 12 月 13 日)
- [3] 萩原一郎, 奈良知恵, 小澤範雅, ヘルメット, 実用新案 3205084 (2016 年 6 月 15 日)
- [4] 楊 陽, 奈良 知恵, 萩原 一郎 “折紙構造による折り畳みヘルメット適用に関する検討”, 日本シミュレーション学会論文誌 vol.11, No.1, pp1-13, 2019.
- [5] Nara, C.: Continuous flattening of some pyramids. *Element der Mathematic*, **69**, 45/56 (2014).
- [6] 萩原一郎, 山本千尋, 陶 鑫, 野島武敏, ”反転らせん型モデルを用いた円筒形折り紙構造の圧潰変形特性の最適化検討, 日本機械学会論文集 (A 編) 70 巻 689 号