

ハニカム構造の探究

学校法人静岡理工科大学 星陵高等学校

1年 上杉 朋花

1 動機

私の祖父は以前、雨の日に滑って転倒し頭部を強打した。日本では高齢化が進み、2019年9月15日時点65歳以上の高齢者は3588万人で、高齢化率は28.4%と過去最高の数値である。高齢者が増加することは、祖父のように転倒したり、そこから重篤な事故に繋がったりすることも増えるはずだ。もしかしたら家族が事故を心配して高齢者の方々は自由に散歩すらもできなくなるかもしれない。そこで私は、高齢者の方が散歩をするときなどに装着できる簡易のヘルメットを作製したいと思った。頭を守ることができれば、大事故に繋がるリスクを減らすことができ、家族も少しは安心につながると思ったからだ。しかし、市販のヘルメットは重くてかさばる。見た目を気にする人もいるだろう。しかし帽子では頭を守りきれない。そこで軽くて折り畳みが可能な紙製のヘルメットを考案する。強度は、ハニカム構造という六角形の敷き詰められた構造を紙で作ることでカバーできると考えた。本研究は高齢者が安心して外出できるような手助けをしたいという思いから始まった、ハニカム構造を利用した紙製ヘルメット製作にむけた強度実験である。

2 先行研究

ハニカム部材の衝撃吸収について

従来からアルミ合金製のハニカム（以下、アルミハニカムとする）に面外から衝撃が加わる場合を考えると、アルミ合金製のハニカムは衝撃エネルギーの吸収性能が高い部材であることが知られている。これについては1980年代にWierzbickiらを中心に詳しい検討がなされている。そこではアルミハニカムに対して以下のような性質があることが明らかにされている。

- (1) アルミハニカムの断面に対して垂直に十分大きな圧縮力がかかると、図1に示すように力が加わったエッジのほうから波状に折りたたまれるような変形がおき、元の形には戻らない（永久変形）
- (2) この波状の永久変形は、くの字に折れ曲がった部分の折れ曲がり部（この部分はヒンジのように見なせるので以下ヒンジ部とする）が元に戻らないことによって主に生じている。
- (3) 正六角形ハニカムに、ハニカムの断面に対して垂直に力をかけた場合、図2に示すようにハニカムの壁の厚さを t 、ハニカムの辺の長さを L とするとハニカムが永久変形し始める力 P_C は理論的には以下の関係にある。

$$P_C \propto \sigma_{ys} \cdot \left(\frac{t}{L}\right)^{\frac{3}{5}}$$

ここで σ_{ys} はハニカムの素材に力を加えたときに、ハニカムの素材が永久変形し始めるのに必要な力に相当する（降伏応力）。

十分に硬い物体がハニカムに垂直にぶつかる場合を考えると、物体の速度はヒンジ部を次々と作り出すことで減速していく。これをエネルギーの観点から言い換えると物体の持つ運動エネルギーは、ヒンジ部を次々と永久変形させるためのエネルギーに費やされることで減速していき、ついには停止する。

そのため理論的には、衝撃吸収エネルギーが大きなハニカム構造体とは上記の式の値が大きなハニカム構造体である。言い換えると、構造面ではハニカムの壁の厚さが厚く、ハニカムの辺の長さは短いものが衝撃吸収エネルギーに優れており、素材面ではハニカムの素材を永久変形させるのに必要な力(=降伏応力)が大きいかつ波状に曲がってもひび割れて壊れない素材が好ましいことを意味している。

一方、本研究が対象とするペーパーハニカムについて考えると、アルミハニカムでは起こりえない吸湿によるハニカム素材の材料特性の変化が避けられない。そこに着目してペーパーハニカムのエネルギー吸収性能の変化について検討した先行研究はみられない。

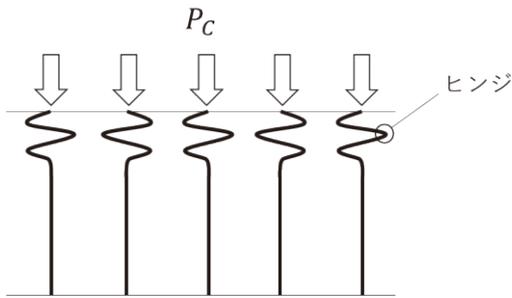


図 - 1 圧縮力を受けるハニカムの断面の模式図

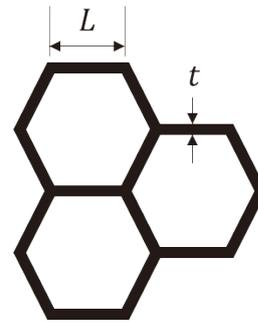


図 - 2 正六角形ハニカムの形状の定義

3 従前の自己研究

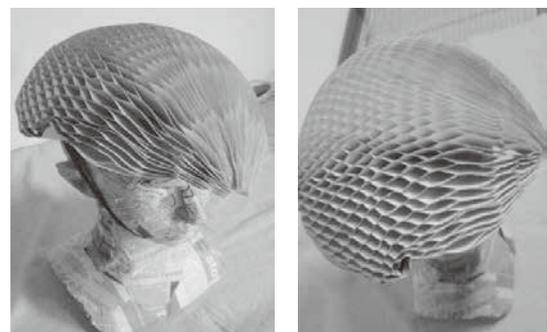
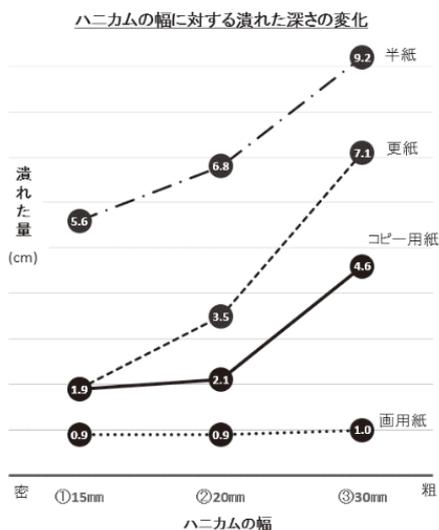
実験方法

- (1) 画用紙・コピー用紙・更紙・半紙を用意し、各紙 20 枚ずつでハニカムの幅 10mm・20mm・30mm のハニカム構造を作製した
- (2) (1) の上から 1.0kg のおもりを 1m の高さから落下させた
- (3) ノギスで凹んだ深さを測定した



結果

ハニカムの幅と潰れた深さの関係を図に示す。画用紙ではハニカムの幅に関わらず、潰れた量はほとんど変化しなかった。しかし幅が小さくなるにつれておもりの跳ね返る高さが高くなった。半紙で作ったハニカムは幅を小さくしても深く潰れた。更紙・コピー用紙は幅を 30mm にすると急激に潰れが大きくなった。



実験結果をもとに作成したヘルメット

考察

画用紙はおもりの跳ね返りの様子から、十分にエネルギーを吸収できていないと考えられる。半紙はつぶれた深さが大きく、落下物が貫通する可能性があり、ヘルメットには不適切だった。同様にコピー用紙や更紙も幅を大きくしすぎると危険性が高くなる。以上より、コピー用紙もしくは更紙を用い、幅は15~20mmにしたハニカム構造が最適なヘルメットの材料であると考えられる。

4 検証内容

ハニカム構造を利用したペーパーヘルメットの実用化に向け、雨天時や高湿度での使用を想定し、ハニカムペーパーの保管湿度を変えて衝撃エネルギー吸収量を比較した。

5 仮説

紙が含む水分量により、ハニカムペーパーの強度・潰れ具合は変化するが、いずれもヘルメットとしての機能面での条件は満たされる。

6 検証

実験方法

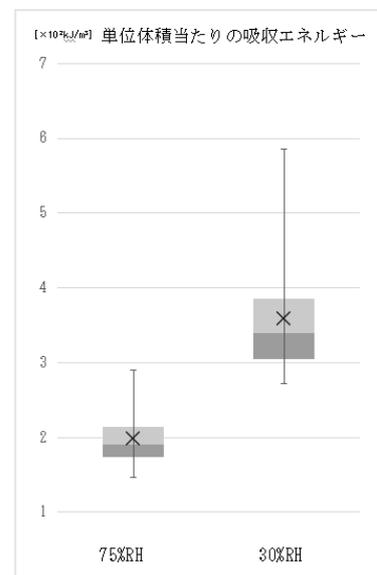
- (1) 従前の自己研究で導き出されたヘルメットに最適なハニカム構造の幅20mmを用いた
- (2) 飽和塩法を用いてデシケーター内で湿度調節を行った ※NaClを用い湿度約75%RHとした
- (3) デシケーターの中にハニカムペーパーを入れ、一定期間放置した
- (4) 比較対象として別のデシケーターにシリカゲル(Na_2SiO_3)を入れ、③を行った
※ Na_2SiO_3 の入ったデシケーター内の湿度は約30%RH
- (5) おもりの底面に0.1m×0.1mの亚克力板をつけ、一定の高さからおもりを自由落下させた。
- (6) つぶれた深さをハイトゲージで計測した。
※ 四隅と中心部を測り5点の平均値を深さとし、おもりとハニカムの接触面積から体積を求めた。
- (7) 単位体積当たりの衝撃エネルギー吸収量を計算した。
衝撃エネルギーを位置エネルギーから計算し、($=5.39 \times 10^3$ [kJ])潰れた体積で割って値を求めた。落下の様子は高速度カメラで撮影し、データに跳ね返りによる支障がないかを確認した
※ (4)~(7)を1つのサンプルに対して3回繰り返し、(3)(4)を各15サンプルずつ検証した
- (8) 先行研究と緩衝性を比較した

結果

実験によって変形したハニカムペーパーの体積は湿度30%RHで 1.58×10^{-5} m³、75%RHで 2.84×10^{-5} m³であった。これらの結果により単位体積当たりの吸収エネルギーを計算すると湿度30%RHで355kJ/m³、湿度75%RHの場合は176kJ/m³である。75%RHのエネルギー吸収量は30%RHの時から47%減であった。

7 考察

本来の保護帽における強度規格は、衝突させるおもりの最下点での運動エネルギーを用いて衝撃エネルギー吸収量を導き出している。しかし設備上、運動エネルギーを計算することは困難であるため、力学的エネルギー保存則より、おもり落下時の位置エネルギーを用いて計算を行う。



今回は衝突物体がハニカムに衝突する時の運動エネルギーを計測することなく、衝突物体の位置エネルギーとへこみ部の体積を測るだけで、衝撃吸収材の材料特性としての衝撃吸収能力の一般的な指標である「単位体積あたりの衝撃エネルギー吸収量」が計測できる実験方法を考案したことになる。

本研究で得られたデータと自動車用発泡スチロールの緩衝性を比較すると

- (1) 自動車用発泡スチロール・・・吸収エネルギー(U)=600[kJ]
- (2) ハニカムペーパー (湿度 30%RH)・・・吸収エネルギー(U)=355[kJ]
- (3) ハニカムペーパー (湿度 75%RH)・・・吸収エネルギー(U)=176[kJ]

※Uは各15の検証データの平均値より算出

ここで、先行研究「Deformation mechanisms and energy absorption of polystyrene foams for protective helmets」との比較を行う。28g/lの比較的軽い発泡スチロールの場合には120kJ/m³、70g/lの比較的重い発泡スチロールの場合は390kJ/m³である。一方、市販の自転車用ヘルメットに使われている発泡スチロールの密度は先行研究「Protective capability of bicycle helmets」より、50~90 g/l (=kg/m³)である。よって自転車用のヘルメットでは、衝撃エネルギー吸収量が300~400 kJ/m³あれば市販のものと同程度であることが分かる。

従って、湿度30%RHで保管したハニカムペーパーは発泡スチロールを使った市販のヘルメットと同程度で十分な強度があるといえ、湿度75%RHで保管したハニカムペーパーは強度がやや低いという結果になる。

この結果から、今回のハニカムの衝撃エネルギー吸収量は約200~350 kJ/m³で、市販のヘルメットに使われている発泡スチロールの衝撃エネルギー吸収量300~400kJ/m³と比べると同程度かやや劣る程度であり、十分な強度を有していると考えられる。

ただし実用上、今回のハニカムの衝撃エネルギー吸収量が不足していると判断された場合でも、ハニカムの寸法を小さくすることで簡単にエネルギーの吸収量を向上させることが可能である。計算上、ハニカムの一片の長さを0.5倍とすれば、衝撃エネルギー吸収量は約1.5倍に増やすことが可能である。今回のハニカムを例にとると、ハニカムの一片の長さを半分にするだけで、300~525kJ/m³にまで衝撃エネルギー吸収量を向上させることが可能となると予測できる。これは市販のヘルメットに使われている発泡スチロールの衝撃エネルギー吸収量300~400kJ/m³と比べて同等もしくはそれ以上の値である。これは、ヘルメットの衝撃吸収エネルギー部材としてペーパーハニカムが十分に使用可能なことを意味している。

8 結論

よって、仮説「構成物である紙が含む水分量の多少により、ハニカムペーパーの強度・潰れ具合は変化するが、いずれもヘルメットとしての機能面での条件は満たされる。」は実証された。

9 展開の可能性

紙製のハニカム構造の強度について実験することで、使用環境の制約が狭まりハニカム構造の使用用途が広がる可能性が見えてくる。私の考案した高齢者向け紙ヘルメットが実用化すれば高齢者の怪我リスクを低減し、高齢化の加速する日本に大きな貢献ができるだろう。

10 今後の課題

(1) 湿度調節

30%RH・75%RH以外の湿度条件で強度を検証する(湿度100%RH以上など)

(2) 雨天を想定した場合の強度実験

紙の強度が落ちることが予想されるため、対策も考え再実験まで行う(防水スプレーをかけるなど)

(3) 測定方法の改善

今回はハイトゲージを用いて落下部分の5点の深さを計測し、体積を求めた。しかし5点というのは四隅と中央あたりを計ったものであり、測定者が変われば値も多少は変化することが予想される。誰が計測しても同じ値が出るような方法を考案したい。

11 謝辞

本研究を行うにあたり、丁寧なご指導をいただいた静岡大学の島村教授と星陵高校の渡辺先生に心より感謝いたします。

本研究はナゴヤ芯材工業株式会社様より資材を提供していただいております。

ご協力に心より感謝申し上げます。

ナゴヤ芯材工業株式会社 〒485-0831 愛知県小牧市東4丁目155

現在はグローバルサイエンスキャンパス 静岡大学 未来の科学者養成スクールにて研究を進めております。

12 参考文献

- ・ L. J. Gibson, M.F. Ashby, Cellular Solids, Pergamon Press, 1988
(日本語版: 大塚正久訳 セル構造体 内田老鶴圃 1993)
- ・ 塩類の飽和水溶液による湿度定点の実現方法
北野寛・高橋千晴・稲松照子 計測自動制御学会論文集 Vol. 23, No. 12 (昭和62年12月)
- ・ 自動車用発泡スチロールの圧縮変形に及ぼすひずみ速度の影響
野崎兼介・堀川敬太郎・小林秀敏・渡辺 圭子
- ・ Polymer Testing 21 (2002) 217-228 Product Performance Deformation mechanisms and energy absorption of polystyrene foams for protective helmets
Luca Di Landro, Giuseppe Sala, Daniela Olivieri
- ・ Br. J. Sp. Med., Vol 24, No. 1 Protective capability of bicycle helmets N. J. Mills, Ph