

ペーパーヘルメットの衝撃エネルギー吸収量に及ぼす ハニカムの形状と湿度の影響

学校法人静岡理工科大学星陵高等学校
2年・上杉朋花

1 動機

私の祖父は70歳を超えていて、足もとのふらつきも多い。雨の日に滑って転倒し、頭部を強打し血が止まらなくなる大怪我をしたこともあった。

日本では高齢化が進み、高齢化率は2025年に30.0%、2040年には35.3%になると見込まれている¹⁾。高齢者の増加に伴い、祖父のように転倒したり、そこから重篤な事故が増加したりすることが予想される。高齢者の安全を守るため、高齢者向けの軽量ヘルメットの作製をすることにした。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る。市販のヘルメットは重くてかさばるが、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した。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。

これまでの実験で、ハニカムペーパーは湿度75%RH以下の条件下ではヘルメットとしての強度を十分に有するということが証明された。そこで本研究では、より高い湿度条件下ハニカムセルの形状を変えた時の強度の変化などの実験を加えるなど、発展した実験を行うことにした。

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 実験方法

落下実験装置を図1に示す。一定の高さからおもりを落下させ、潰れた深さをハイトゲージで計測し、潰れた体積を求めた。おもりはペットボトルと油粘土で製作した。1条件に対して5ヶ所の測定点を設け、各条件に対し5回測定した。

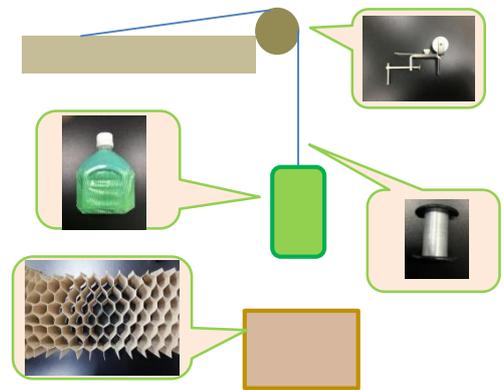


図1 落下実験装置の概要

（1）（面積依存性）セルの形状の変化による衝撃エネルギー吸収量の変化

ハニカムペーパーは広げることでセルの面積が図2のように変化する。セルの面積を7段階に変化させ、衝撃エネルギー吸収量の変化を求めた。

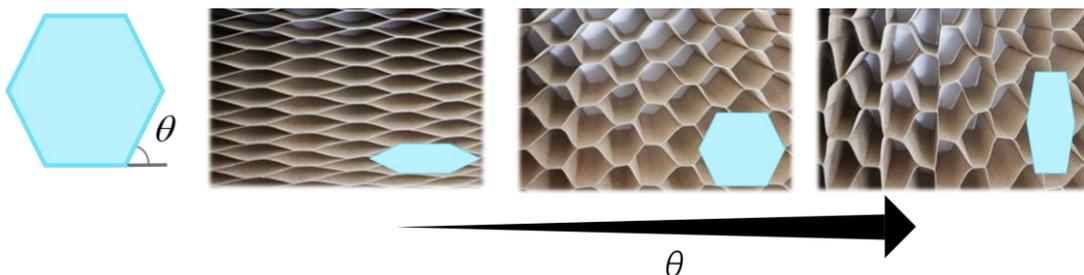


図2 ハニカムの辺の定義

(2) (湿度依存性) 保管湿度の変化による衝撃エネルギー吸収量の変化

飽和塩法²⁾やシリカゲル (Na₂SiO₃)、防湿庫を用いてハニカムペーパーを保管する湿度 31%RH~78%RH まで変化させ、紙の含む水分量による衝撃エネルギー吸収量の変化を調べた。

デシケーターの中にハニカムペーパーを入れた後は、ハニカムの質量に変化が見られなくなるまで放置した。(5日以上) 飽和塩法 (NaCl) で湿度調節を行いながら、試料を電子ばかりの上に放置し、定期的に質量の計測を行った。本研究で使用している試料の質量に変化が見られなくなったのは計測開始5日後だった。

3 結果

(1) (面積依存性) セルの形状の変化による衝撃エネルギー吸収量の変化

位置エネルギーを潰れた空間の体積で割ったハニカムペーパーとしての強度を図 3 に、位置エネルギーを潰れた紙の体積で割った構造強度の変化を図 4 に示す。衝撃エネルギー吸収量が最大となったのは $\theta = 55^\circ$ のときであった。図 4 が右上がりなのに対し、図 3 は横ばいの結果となった。

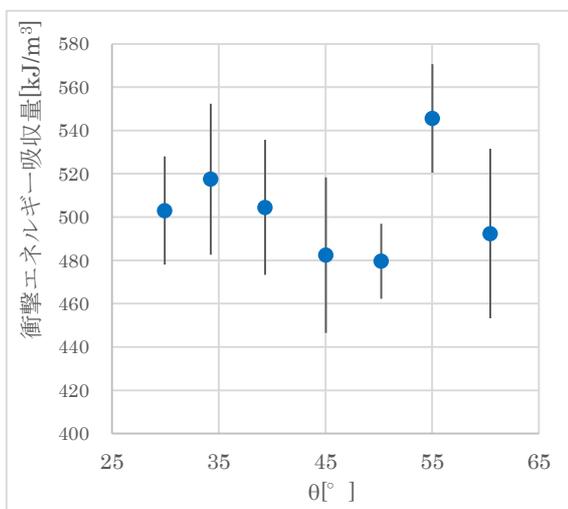


図 3 ペーパーハニカムとしての強度

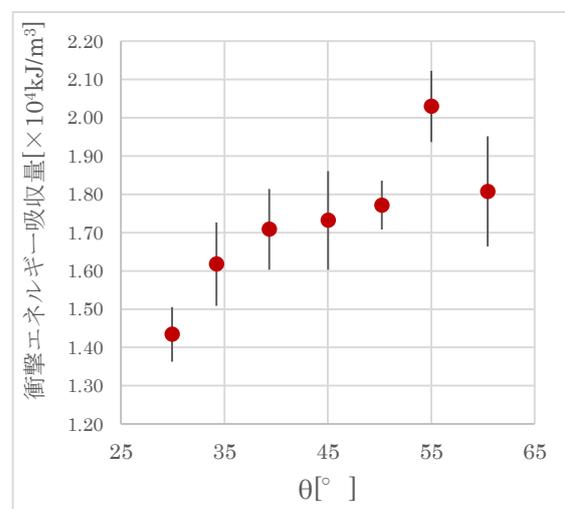


図 4 構造としての強度

(2) (湿度依存性) 保管湿度の変化による衝撃エネルギー吸収量の変化

湿度変化によるエネルギー吸収量を図 5 に示す。湿度 31%RH から 43%RH にかけては衝撃エネルギー吸収量が大きく減少し、その減少は 56%であった。湿度 43%RH から 78%RH にかけては比較的なだらかに減少し、10%の減少が見られた。

4 考察

図 6 は構造としての強度を示した結果 (図 4) に、セル面積の変化を重ねたものである。ハニカム1つ当たりの面積が最大となるとき ($\theta \cong 55^\circ$)、衝撃エネルギー吸収量が最も大きくなった。六角形内の面積が最大となる $\theta \cong 55^\circ$ のとき、衝撃エネルギー吸収量が大きくなるのは、構造としての強度がより大きくなるからだといえる。

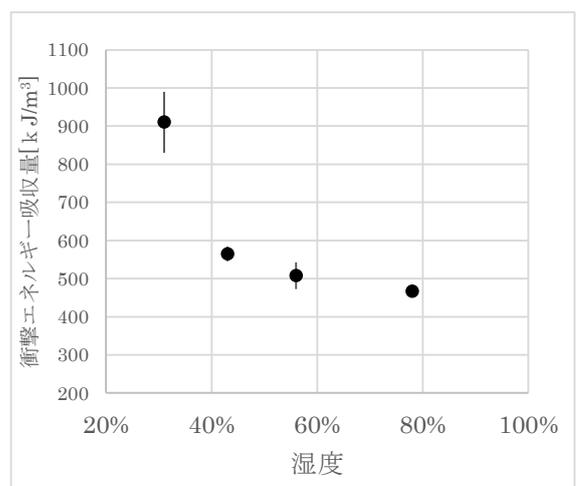


図 5 湿度変化による衝撃エネルギー吸収量

図 7は、ペーパーハニカムとしての強度を示した結果（図 3）に、セルの面積変化と、紙の密度の変化を重ねたものである。また、この 2 つの曲線の和を表したものを実線で示す。今回の横ばいになっている結果は紙の密度としての強度と、ハニカムの構造としての強度が互いを打ち消しあっている、つまり実線に近いような分布となったと考えられる。ハニカムペーパーの密度が低下しても、構造としての強度が増加するため、ハニカムペーパーは強度を保持し続けられる。よって、ペーパーヘルメットを作製する際は、ハニカムペーパーを広げても強度を損なうことなく軽量化を図ることが可能である。

先行研究「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」での実験方法や衝撃吸収能力の計算方法^{3,4,5)}は本研究と違うが、双方とも「単位体積あたりのエネルギー吸収量」を算出しているため、本研究での検証結果をそのまま比較する。衝撃エネルギー吸収量をヘルメットの規格と照らし合わせると、衝撃エネルギー吸収量 400kJ/m³ がボーダーラインとなる。基準となる衝撃エネルギー吸収量と今回の検証結果を重ねたものを図 8 に示す。湿度が 78%RH の時でもヘルメットとして十分な強度を保てることが分かった。どれだけ高湿度でも、衝撃エネルギー吸収量は負の値を示さず、湿度が 0% に近づくにつれて強度は大きくなる考えられるので、関数を求めようとしたが、データ数も少なく、信憑性が高いものは求められなかった。今後は防湿庫を用いてさらに複数の湿度条件で実験を行いたい。また、紙の圧縮強度を測定するリングクラッシュ法を用いて素材の性質を調べ、今回の結果と合わせて関数の検討を行う。

5 結論

セルの面積が最大となる時、エネルギー吸収量は最大の値を示した。ペーパーハニカムを広げることで紙の面密度が低下しても、構造起因の強度が増加するため、総合的な強度は低下しなかった。しかし、誤差が大きいため、実験方法を再検討する。

湿度の増加とともに衝撃エネルギー吸収量は指数関数的に低下したが、湿度 78%RH まではヘルメットとして十分な強度を保つことが分かった。

6 今後の課題

(1) 誤差

本研究では以前の実験よりも落下位置を高くすることで位置エネルギーを大きくし、誤差の改善を図った。そして考察で、誤差範囲の表示をデータの最小値-最大値から

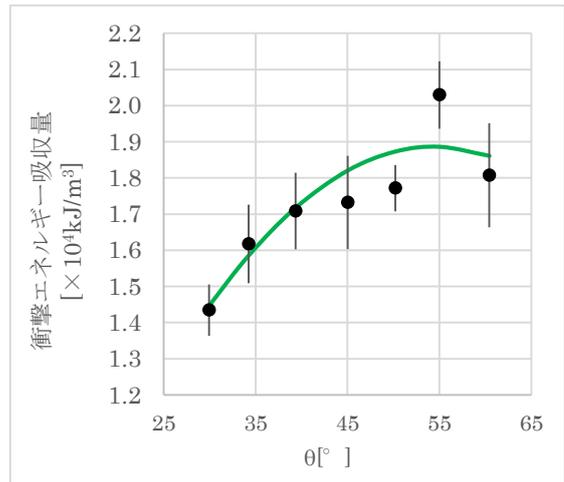


図 6 セル面積と強度の相関

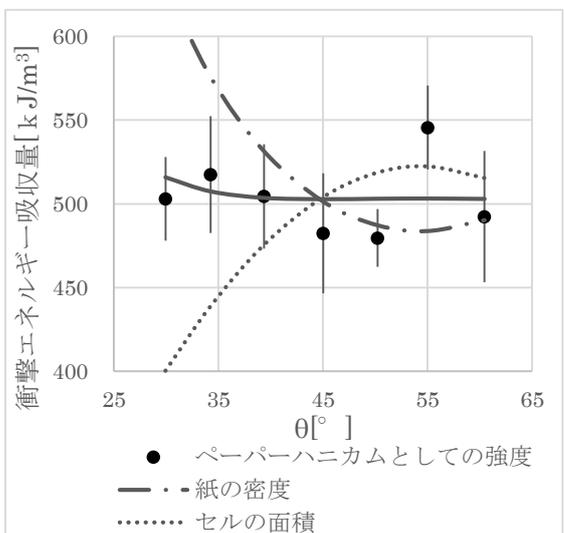


図 7 密度と構造の影響による衝撃エネルギー吸収量変化の打ち消し

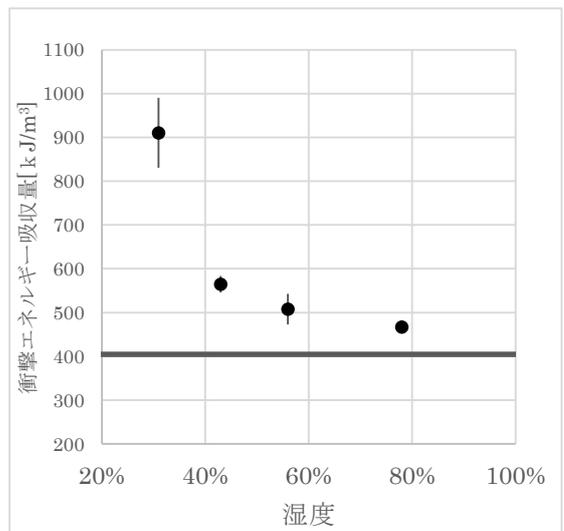


図 8 ヘルメットの規格との比較

標準誤差に変更した。しかしまだ特に面積依存性の検証での誤差が大きい。これはおもりで潰れる深さが浅いため、測定誤差の影響が大きくなってしまおうと考えられる。位置エネルギーだけではなく、おもり自体を 1 kg よりも重くしてエネルギーを大きくし、潰れ量を多くして検証する。

(2) 衝撃エネルギー吸収量の計測

本研究では潰れた体積をへこんだ部分の四隅及び中央の値を計測・平均し、おもりの最下部にある亚克力板の面積との積で算出している。しかし図 9 に示すように実際はおもりが傾いて落下してしまう場合もあり、落下面積が変わってしまうなど、最適な計測方法とは言いきれない。

そこで、おもりを球体である鉄球にして、その頂点を基準に計測し計算することでより正確な体積を求める。図 10 に示すように、床に対して平行にハイトゲージを置いて計測すれば、おもりの最頂点を計ることができる。

(3) 素材の紙の強度

紙の研究の先行研究をあまり見つけることができず、湿度依存性の考察が深くできなかったのは反省点である。紙に関する先行研究を調査するとともに、新たな実験を追加する。

リングクラッシュやショートスパンを行うことで圧縮強度を測定し、紙の素材そのものの強度を計測する。その結果をもとに、考察しきれなかった湿度依存性における一般式を再検討したい。

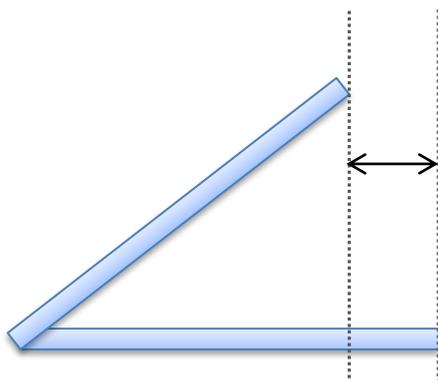


図 9 斜めに落下した場合の想定

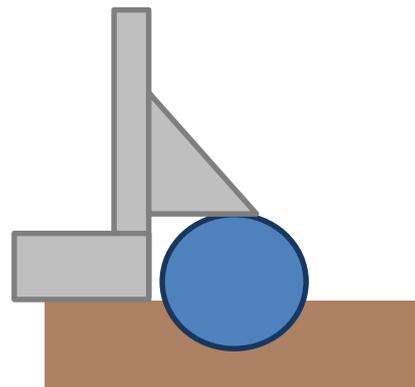


図 10 鉄球の測定

7 発展の可能性

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く貢献することができるだろう。

ハニカム構造という六角形が敷き詰められた構造は、その六角形を形成する面積が最大となる時最も高い強度を発揮する。しかし、実際にヘルメットを作成するとなると、ヘルメット全てを面積最大の六角形で埋め尽くすことは困難である。

そこで、ハニカムペーパーを二段に重ねて強度実験を行いたい。1段から2段に変化させることで、衝撃エネルギー吸収量が増加すれば、ハニカム1つ当たりの面積を最大にできない場合の強度を補えるかもしれない。ハニカムペーパーを応用した製品を開発するため、現在、本研究の他にペーパーベッドの研究も並行して行っ

ている。これは災害発生時に避難所で使用するベッドを想定したもので、圧力分布や遮音性、保温性などを他の寝具と比較している。

将来的には本研究とペーパーベッドの研究の結果を合わせて、ヘルメットとベッドのセットを作り、災害時に役立てたいと考えている。高齢者の安全だけでなく、昔から予想されている南海トラフ地震に備えるためにも、2つの研究を並行して継続する。

8 謝辞

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。

静岡大学の島村教授と、星陵高等学校の渡辺先生には熱心なご指導をいただきました。

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発展コース生として研究を進めております。

9 参考文献

1. 総務省統計局 高齢者の人口及び割合の推移

国立社会保障・人口問題研究所 推計 <https://seniorguide.jp/article/1207592.html>

2. 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)

3. Deformation mechanisms and energy absorption of polystyrene foams for protective helmets, Luca

Di Landro, Giuseppe Sala, Daniela Olivieri,

Polymer Testing 21 (2002) 217-228

4. Protective capability of bicycle Helmets, N. J. Mills, PhD School of Metallurgy

and Materials, University of Birmingham

5. 自転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 小林秀敏 堀川敬太郎 渡辺恵子

年次大会講演論文集 2008. 6 (0), 267-268, 2008 一般社団法人 日本機械学会