

# 構造による紙の強度の変化

磐田市立神明中学校  
1年 上川 誉斗

## 1 動機

浜松科学館の「生き物から学ぼう！展」に行ったとき、ハチの巣の構造のハニカム構造は、強くて並べたときにすき間ができない効率の良い形で、ハチの巣の中には、巣の重さの30倍の重さのはちみつをためておけると紹介されていた。ハニカム構造とは六角形がたくさん並んだ形のようなのだ。他の四角形や三角形、円に比べてどのような点で優れているのかを調べるとともに、高い強度の理由を調べ、強度の高い構造の条件を研究することにした。

## 2 研究の方法

### (1) 予備実験 ～本当に六角形は強いのか～

A4サイズのコピー用紙を四等分し（紙一枚210×74mm 面積147cm<sup>2</sup>）三角柱、四角柱、六角柱、円柱を作製した。それぞれの立体に本を積み重ね耐えられる冊数を調べた。B6サイズの本、平均135gの本を使用した。

### (2) 実験1「三角柱、四角柱、六角柱、及び円柱の強度実験」～立体を並べたら強くなるのか～

予備実験と同様の紙で、三角柱、四角柱、六角柱、円柱を作製し、同じ形を2つ以上くっつけて強度を測定した。本は予備実験よりも重い平均433gを使用した。

### (3) 実験2「四角柱と六角柱の構造の強度比較」

A4サイズのコピー用紙で、一辺の長さを3.3cmにそろえて四角柱、六角柱を作製し、強度を測定した。

### (4) 実験3「立体の並べ方と強度との関係」

実験2で使用した六角柱を合計7つ使い、3列に並べたときと2列に並べたときの強度を測定した。

### (5) 実験4「ハニカム構造より強い形を作る」

A4サイズのコピー用紙で三角柱、四角柱、及び六角柱を組み合せ、ハニカム構造より強い構造ができるか検討した。



図1 三角柱 図2 四角柱 図3 六角柱 図4 円柱

## 3 結果と考察

### (1) 予備実験 ～本当に六角形は強いのか～

図1から図4に示す立体を作製し強度を比較した。結果を表1に示す。強度は、円柱、六角柱、四角柱、三角柱の順で高かった。予想に反して六角形よりも円柱の方が強かった。

小学5年生の国語で学んだ「生き物は円柱形」に記されていた通り、円柱は強かったようだ。円柱に近づけるよう八角柱、十二角柱を作製し同様に比較をしたが六角柱と同じ強度であった。

表1 立体の種類と強度との関係

立体の種類	重り本の冊数	耐えた重さ(g)
三角柱(A)	3	410
四角柱(B)	4	556
六角柱(C)	5	676
円柱(D)	6	801
八角柱	5	676
十二角柱	5	676

(2) 実験1「三角柱、四角柱、六角柱、及び円柱の強度実験」～立体を並べたら強くなるのか～

三角柱、四角柱、六角柱、及び円柱をそれぞれ2～4つ使用し、並び方を変え強度を測定した。図5に並び方の一例、三角柱の配置を示す。四角柱、六角柱、及び円柱も同様に並び比較した。結果を表2に示す。四角柱と円柱の4つが一番強かった。ここで気になったのは、四角柱が六角柱よりも強度が高いことである。立体と立体との接着面がいくつかあり、立体数×接着面の数値が大きい方が強いということがわかった。図6に立体の接着面数と強さの関係を示す。同じ紙で作ったため、四角柱の一边の長さが六角柱の一边の長さよりも長い。辺が少ない四角柱の接着面が長さく、六角柱よりも強度が出ていると考えられる。(四角柱の一边の長さ4.95cm 六角柱3.3cm) 立体の数が1つの時は、接着面が無かったため、六角柱の方が強かった。そこで、六角柱と一边の長さが同じ四角柱を用意することにした。

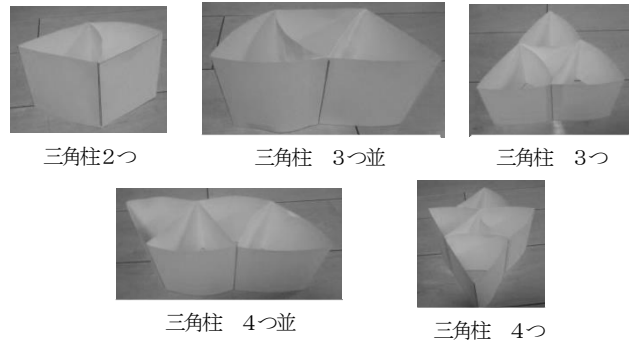


図5 比較実験における立体の並び方(三角柱の場合)

表2 立体の種類・数・並びと強度との関係

種類 \ 立体数	2つ	3つ並	3つ	4つ並	4つ
三角柱	1冊 511g	3冊 1,474g	6冊 2,811g	7冊 3,257g	6冊 2,811g
四角柱	1冊 511g	7冊 3,257g	7冊 3,257g	10冊 4,652g	13冊 5,980g
六角柱	3冊 1,474g	5冊 2,368g	6冊 2,811g	10冊 4,652g	7冊 3,257g
円柱	6冊 2,811g	8冊 3,702g	7冊 3,257g	8冊 3,702g	13冊 5,980g

(3) 実験2「四角柱と六角柱の構造の強度比較」

一边の長さを3.3cmとした四角柱を作製し、同じ辺の長さを持つ六角柱と強度を比較した。結果を表3に示す。一边の長さが同じで立体が1つの場合、四角柱も六角柱も同じ強度であった。しかしながら、立体の数が増えるにつれ六角柱の強度が高まった。立体を4つ組合せたときの強度は、四角柱が2,368g、六角柱が4,652gで、約2倍の強度の差があった。

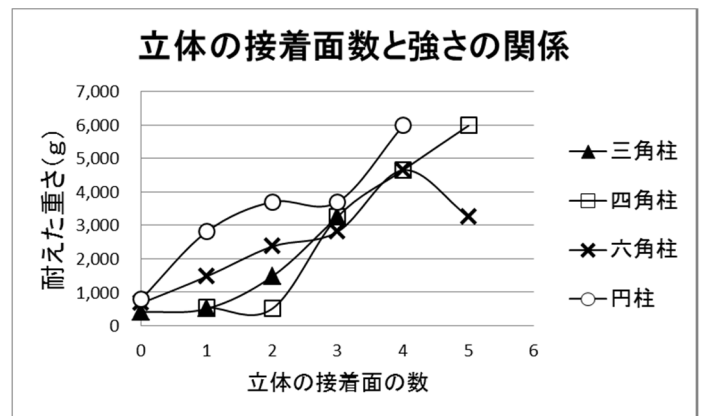


図6 立体の接着面の数と強さの関係

(4) 実験3「立体の並び方と強度との関係」

構造の辺の長さを等しくし立体を並べることで、六角柱は他の立体より、強度が高いことがわかった。

実験2で使用した六角柱を合計7つ用い、3列に並べた構造(検証1)と2列に並べた構造(検証2)の強度を測定した。立体の配置を図7に示す。検証1は、三列からなる前段と後段が2つの立体で構成され、それぞれ4つの接着面を持っている。検証2は、3つと4つの立体で構成され6つの接着面を持っている。検証1は検証2の構造に比べ、接着面が少ないため前段と後段に力が加わると、

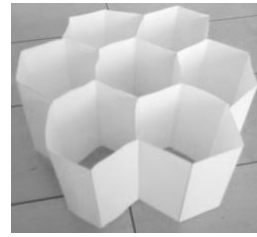
表3 辺の長さを等しくした四角柱と六角柱の強度

種類 \ 立体数	1つ	2つ	3つ	4つ
四角柱	5冊	1冊	4冊	5冊
一边3.3cm	654g	511g	1,922g	2,368g
六角柱	5冊	3冊	6冊	10冊
一边3.3cm	654g	1474g	2,811g	4,652g

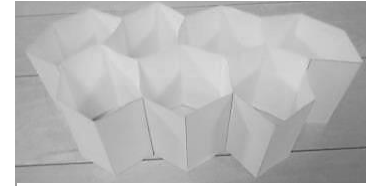
力が分散できず潰れてしまうと予想した。

強度の測定結果を表4に示す。検証1は4,211gであり、検証2は7,952gであった。検証2が検証1の配置より、約1.9倍強い並べ方であった。

検証1は予想の通り、前段と後段の2つの立体で構成されている部分から潰れていた。この部分は中心部よりも強度が低く、中心は潰れてないのに端は潰れてしまっていた。しかし、検証2の場合は、前段が3つ、後段が4つの立体で構成されており、2つの部分がないため、検証1よりも強度が高かったと考えられる。このことから分かることは、「①立体を並べ、形を作るとき、なるべく上下同じ数に並べているとバランスが取れる。」「②検証1のように2つの部分や、1つの部分が無いように並べると、強度が高くなる。」「③形だけではなく、並べ方によっても強度が変わってくる。」ことがわかった。



六角柱 検証1



六角柱 検証2

図7 六角柱の並べ方と強さの関係

表4 六角柱の配置と強度の関係

種類	重り本の冊数	耐えた重さ(g)
六角柱 検証1	9	4,211g
六角柱 検証2	18	7,952g

#### (5) 実験4 「ハニカム構造より強い形を作る」

これまでの実験を通じて、強度の高い構造の条件として、立体の並べ方と接着面の数が大きく影響することがわかった。より強い形として、六角柱の中に三角柱と四角柱を入れ接着する図8の構造を考え、強度を測定した。この構造は、三角柱が2つ、四角柱が2つ、六角柱が1つ、合計5つの立体で構成されていることになる。よって、強度の比較として六角柱を5つ配置したハニカム構造と強度を比較した(図9)。

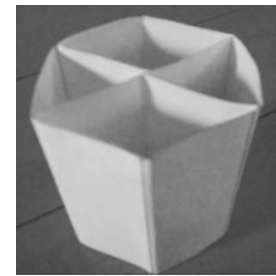


図8 六角柱より強いと考えた構造

六角柱の中に三角柱と四角柱を入れた構造体は、本を9冊3,897g積むことで、10冊目で接着部がゆがみ潰れてしまった。一方、六角柱を5つ配置したものは、本を15冊6,495g積んでも潰れることはなかった。六角柱1つの強度は679gであるため、単体で比較すると5.7倍の強度を示したが、接着面数を同じとした六角柱5つ配置したハニカム構造よりは、強度が低い結果となった。

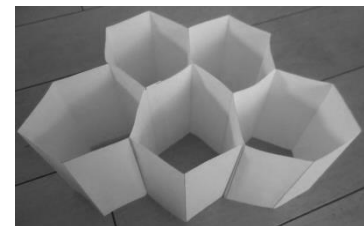


図9 六角柱の5つ配置 (強度比較)

#### 4 まとめと感想

立体の強度は、形状、数、辺の長さ、及び並べ方により異なることがわかった。

- ①立体を単体、形状そのもので比較した場合は、円柱、六角柱、四角柱、及び三角柱の順で強度が高かった。
- ②立体の数が増えると六角柱は円柱よりも強くなる。並べたときにすき間ができないとより強度が高まり、立体を並べたときにすき間ができると強度が低くなる。
- ③立体の高さが低くなると、強度は高くなる。
- ④同じ数の同じ立体でも並べ方を変えるだけで強度は大幅に変わる。
- ⑤接着面の数×接着面一つの長さの値が大きいと強度が高い。

立体の強度が高まるポイントを踏まえ、六角柱（ハニカム構造）の優れている点を考察すると、「①並べたときにすき間ができず強度が高い。」「②六角の集合体であるため中の空間が広く軽い。」「③潰れるときにきれいに潰れる（衝撃吸収の役割）」ということが言える。これらの実験結果からもわかるようにハニカム構造は優れた構造であり、いろいろなところで活用されている。ヨット、人工衛星、パラボラアンテナ、スタジアム、新幹線の床や側面、オフィスのパーティション、ドアなどの強度、軽量部材として広く使われている。

また、ハニカム構造の空間を活かすことで、音を伝えにくくする遮音、ビルの外壁など熱を伝えにくくする断熱なども実現されている。ショーケースの冷気の吹き出し口にも使用され、空気の流れをそらせる制御にも活用されていることを学んだ。自然界では、ハチの巣や亀の甲羅、昆虫の複眼などハニカム構造は多くのところで見られる。

今回の研究では、ハニカム構造を中心に立体の構造について実験してきた。はじめは実験の要領がわからず工作用紙でハニカム構造を作った。工作用紙で作製したハニカム構造はとても強度が高く本を積み重ねても潰すことができなかった。小5の弟（33.4kg）が乗っても、父（64kg）が乗っても潰れなかった（図10）。

工作用紙のハニカム構造は、人を支えられる程の強度を発揮することが分かったが、実験にならなかったのでA4のコピー用紙を使って実験することにした。コピー用紙は薄く、弱々しく本当にこれで実験ができるのか不安だった。六角柱を6つ並べ実験したとき、本をなんと30冊（11.7kg）積み上げてもつぶれなかった。予想以上の強度で本当に驚いた。このような失敗や体験を通して、構造の奥深さを知ることができた。また、六角形、ハニカム構造の強度が高い理由、優れている点を調べることができて、世の中にはなくてはならない構造であることを学ぶことができた。今年は、ハニカム構造より強い立体を作れなかったが、来年こそは、作ってみたいと考えている。構造の研究は、建築をはじめ、様々な分野で活躍している。もし、構造の技術が発展したら、様々な分野にも大きな発展をもたらし、暮らしを便利にしてくれると思う。

## 5 参考文献

「ヤモリの指から不思議なテープ」 監修 石田 秀輝  
 国語五銀河 光村図書「生き物は円柱形」 本川 達雄

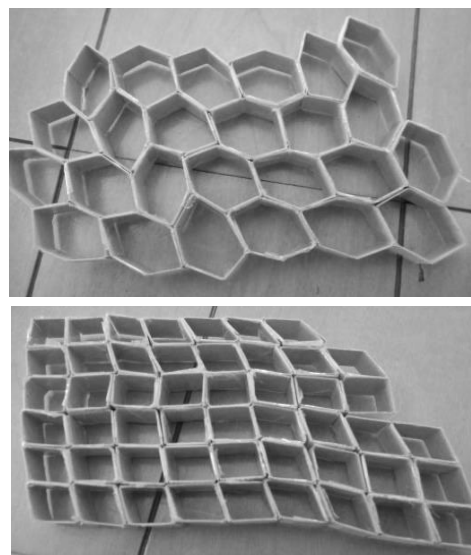


図10 工作用紙で作製した構造体  
 上：六角柱（ハニカム構造） 下：四角柱



図10 工作用紙で作製したハニカム構造  
 左：沢山の本を積んでも潰れない様子  
 右：弟が乗っても潰れない様子



図11 コピー用紙で作製したハニカム構造の強度（六角柱6つ配置）