

ハニカム構造で軽くて丈夫な板を作る

1 年 R. H.

1. はじめに

1.1 研究のきっかけ

この研究をしようと思ったきっかけは、技術の時間に折板構造の学習で紙を折って強度を測ったことが楽しかったからだ。そして「そういえば蜂の巣の形が強いんだっ」となんとなく思いだし、ハニカム構造の強度を調べて、自分の考えた強い板を作ってみたいと思った。そこでまずは、ハニカムの寸法と強さの関係を知らうと考えた。そして軽くて強いハニカムパネルを作ろうと考えた。

1.2 ハニカム構造とは

平面を隙間なく敷き詰めることを「平面充填」と言う。全て同じ形で平面充填が可能なのは三角形・四角形・六角形の場合のみだ。その中でも六角形を敷き詰めた形は、外周の長さが等しい場合、最も中の面積が大きい形であり、英語で「Honeycomb：ハチの巣」という意味から「ハニカム構造」とよばれている。ハニカム構造は軽くて強いので、航空機や駅のホームにある落下防止ドア、新幹線、建造物などの構造材料として幅広く使われている[1]。

1.3 実験材料について

ハニカム構造は垂直荷重に強いことが報告されている[2]。しかしハニカムは一般的には板として曲げ荷重が加えられることが多い。そこで今回の実験では、2枚の板でハニカムを挟んだパネルを作り、三点曲げ試験で曲げ荷重を加えることにした。最初は紙で作成したが、下の板がゆがんだり上の板が上手く付けられなかったりして正確性に欠け、実験結果に影響した。そこで、ちょうど学校のプロジェクトで3Dプリンターについて知ることができたので、そこでおすすめされていた3Dプリンター(ANYCUBIC MEGA-S)を購入し、材料はPLA樹脂を使用して3Dプリンターで正確にプラスチックのハニカムパネル(図1)を作成する方法に切り替えた。3Dプリンターのデータを作るために、CADはFreeCAD 0.19を使用した。スライサーはUltimaker Cura3,2,1を使用した。

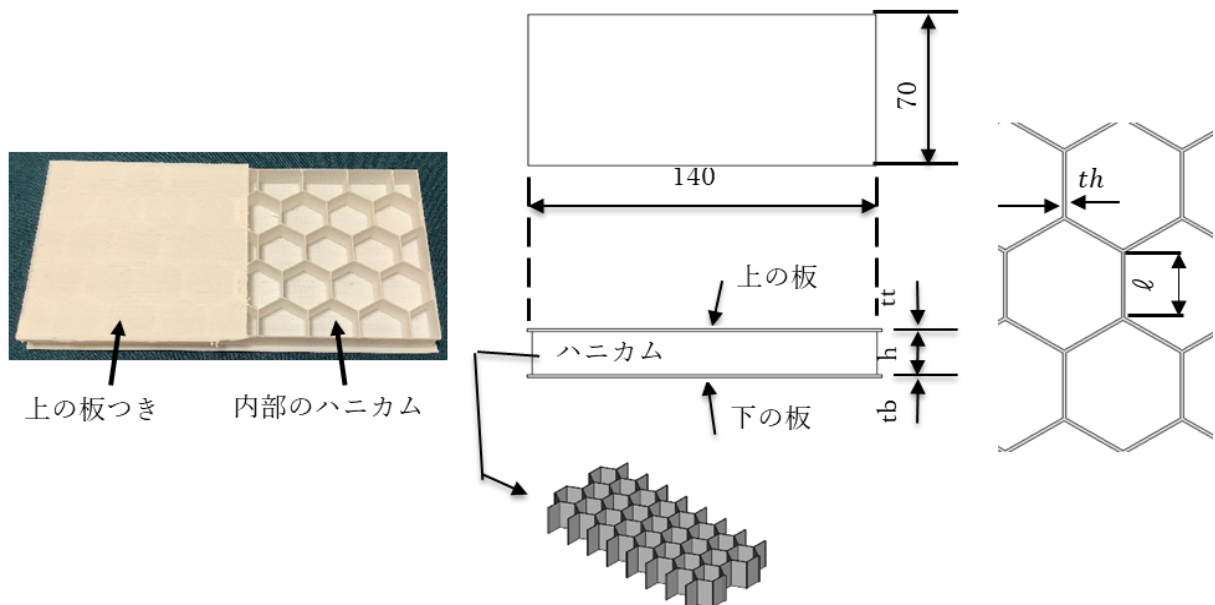


図1 ハニカムパネルの構造

1.4 測定方法について

板の強度を調べる場合には、三点曲げ試験がより一般的に行われている方法であるため[3] [4]、三点曲げ試験で測定することにした。三点曲げ試験とは、荷重・支持・支持の3点で曲げる試験のことである。今回の実験では、図2のような三点曲げ試験装置を独自に作成し、荷重によって板がどの程度曲がるかを測定することにした。変位計測にはデジタルダイヤルゲージ（Neoteck TL155）、荷重計測にはデジタルはかり（ドクターメーターES-PSOI）を使用した。

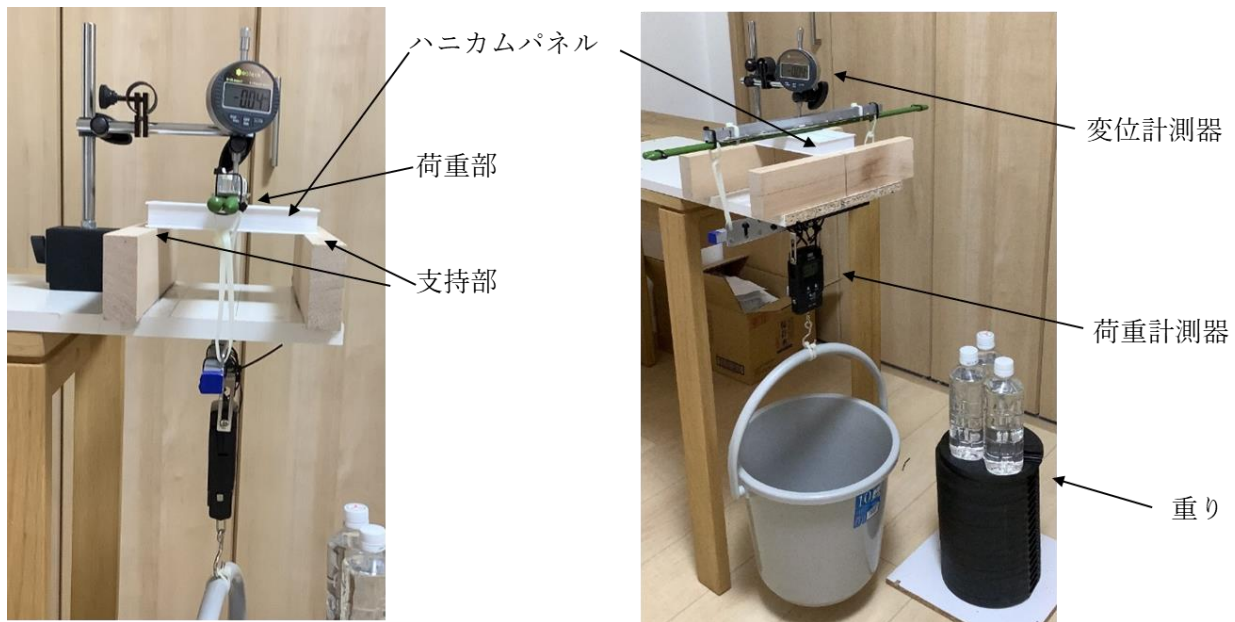


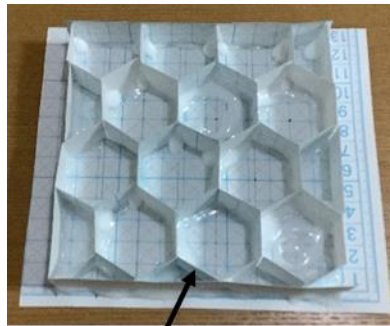
図2 三点曲げ試験装置

重りとして、約 500 g に調整したペットボトルと筋トレ用のダンベルの重り（1000g と 2000g）を使用した。重りは下につるしたバケツに入れた。約 500g ずつ重りを増やしていくことにした。重りを追加した結果ハニカムパネルが壊れた場合は、その重りを追加する直前の荷重を「耐えた重さ」とした。今回の目的は軽くて丈夫な板を作ることなので、作成したハニカムパネルの重さを測って、ハニカムパネル 1g あたりの耐えた重さ（g/g）でハニカムパネルを評価することにした。

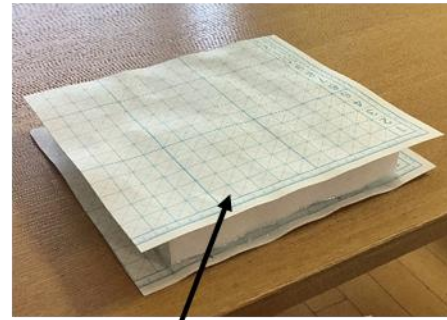
2. 実験

2.1 紙製のハニカムパネルの再現性確認実験

図3のような紙と木工用ボンドでハニカムパネルを作り三点曲げ試験を行った。実験の再現性を確認するためにハニカムパネルは同じ寸法のものを4つ作った。寸法と耐えた重さを表1に示す。変形量を図4に示す。実験の結果、変形量も耐えた重さもばらばらで、再現性がなかった。再現性がなかった理由としては、人間が作ったので組み立ての誤差が大きくて形がばらばらだったためと考えられる。木工用ボンドで貼り合わせたときに紙が水分で変形して板がでこぼこになったことも原因と考えられる。この問題を解決するために3Dプリンターを使うことにした。



内部のハニカム



上の板つき

図3 紙製のハニカムパネル

表1 ハニカムパネルの寸法と耐えた重さ

番号	辺の長さ(ℓ)	高さ(h)	上の厚み(tt)	下の厚み(tb)	壁の厚さ(th)	耐えた重さ
	mm	mm	mm	mm	mm	g
1	20	20	0.2	0.2	0.2	3888
2	20	20	0.2	0.2	0.2	3463
3	20	20	0.2	0.2	0.2	3459
4	20	20	0.2	0.2	0.2	4451

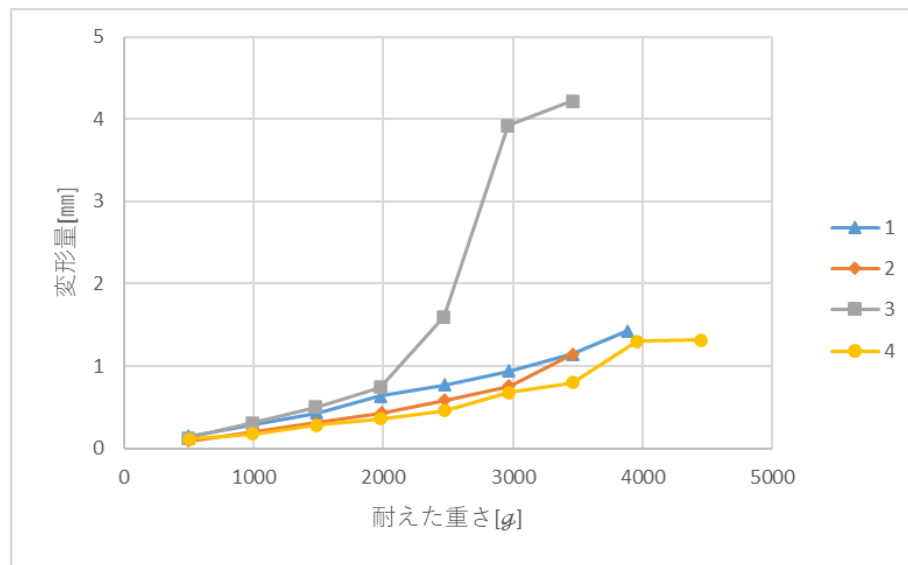


図4 ハニカムパネルの変形量

2.2 プラスチック製のハニカムパネルの再現性確認実験

3D プリンターでハニカムパネルを作り三点曲げ試験を行った。まず、実験の再現性を確認するために同じ寸法のハニカムパネルを3つ作った。寸法と耐えた重さを表2に示す。変形量を図5に示す。実験の結果、変形量も耐えた重さもよく一致していた。再現性が得られた理由として機械で作っているため図面の通りに精度よく作れたためと考えられる。以降の実験では、3D プリンターでプラスチック製ハニカムパネルを作って実験する。

表 2 ハニカムパネルの寸法と耐えた重さ

番号	辺の長さ(ℓ)	高さ(h)	上の厚み(t_t)	下の厚み(t_b)	壁の厚さ(t_h)	耐えた重さ	
	mm	mm	mm	mm	mm	g	g/g
1	10	5	0.5	0.5	0.5	7782	486
2	10	5	0.5	0.5	0.5	7806	488
3	10	5	0.5	0.5	0.5	7795	487

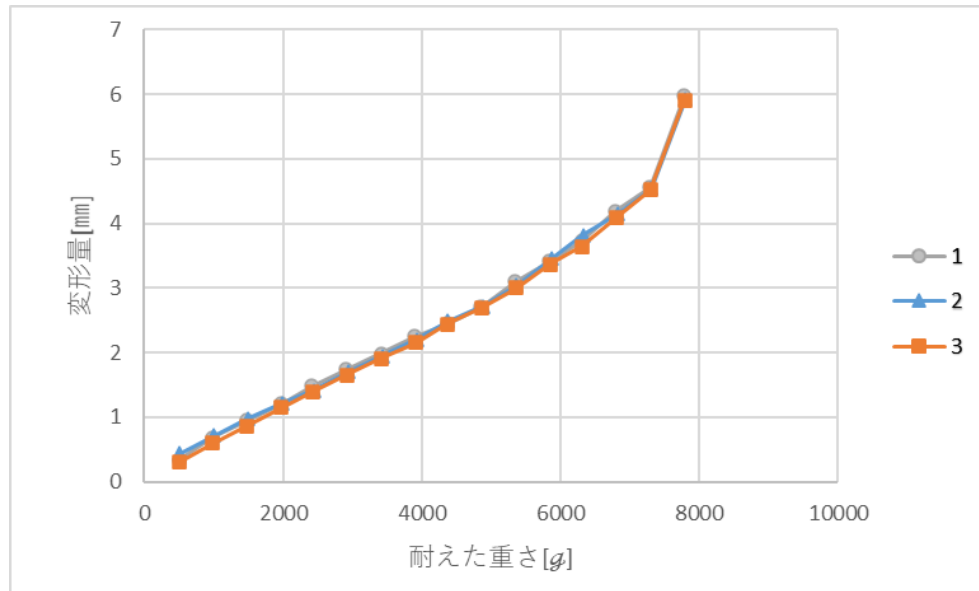


図 5 ハニカムパネルの変形量

2.3 ハニカムプレートの壊れ方

図 6 は壊れたハニカムプレートである。壊れ方の特徴として以下のことが分かった。①上の板が壊れた。②8000g を超えると荷重を増やしていないのに変形量が増えていき壊れる。③六角形の対角線に沿って割れた。

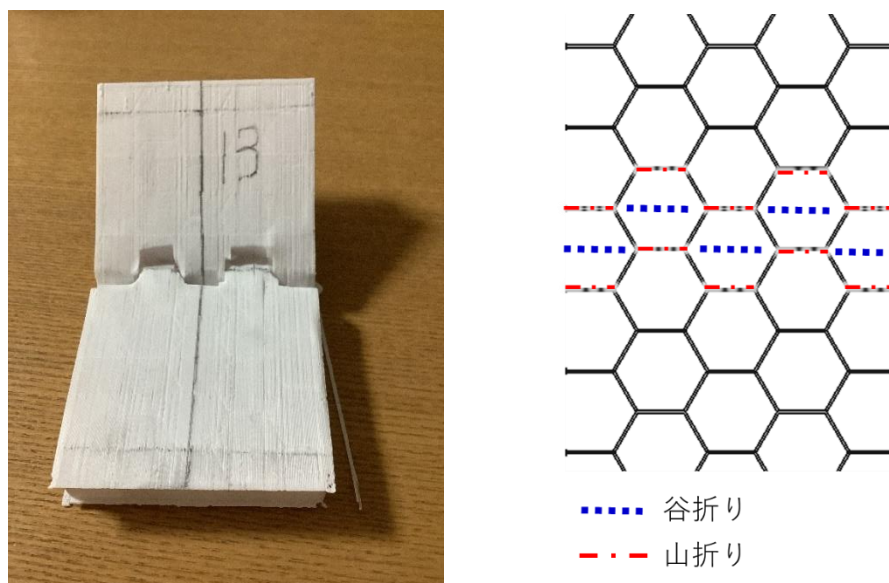


図 6 真ん中で割れたハニカムパネル

ハニカムパネルの変形は座屈であることが知られている[5]。薄い物体は、引っ張り力よりも圧縮力に対して弱くて材料が持つ強度よりかはるかに小さな力で壊れる。ある荷重を超えると急激に折れ曲がって破壊される。これを座屈という。今回の場合は、図 7 のように上の板には圧縮荷重がかかっていたので座屈しやすい状況だったと考えられる。8000g を超えると荷重を増やしていないのに変形量が増えていき壊れた。時間と変形量の関係を明らかにするため、変位計測器の液晶画面をビデオで撮影しておいて後からビデオを見ながら時間と変形量を Excel に入力してグラフを作成した（図 8）。時間は最後の重り（約 500g）を加えてから経過した時間である。図 8 から、変形量が増えるにつれて荷重を増やしていないのに変形速度が速くなっていることがわかる。なぜ上の板が六角形の対角線に沿って割れたかについて考えた。上の板が六角形の対角線に沿って割れたが、六角形の対角線は上の板を支えているハニカムの壁から一番遠いので、対角線に沿って変形したと考えられる。

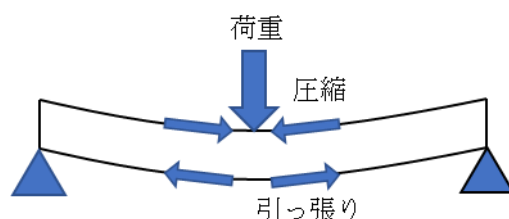


図 7 上の板下の板の荷重

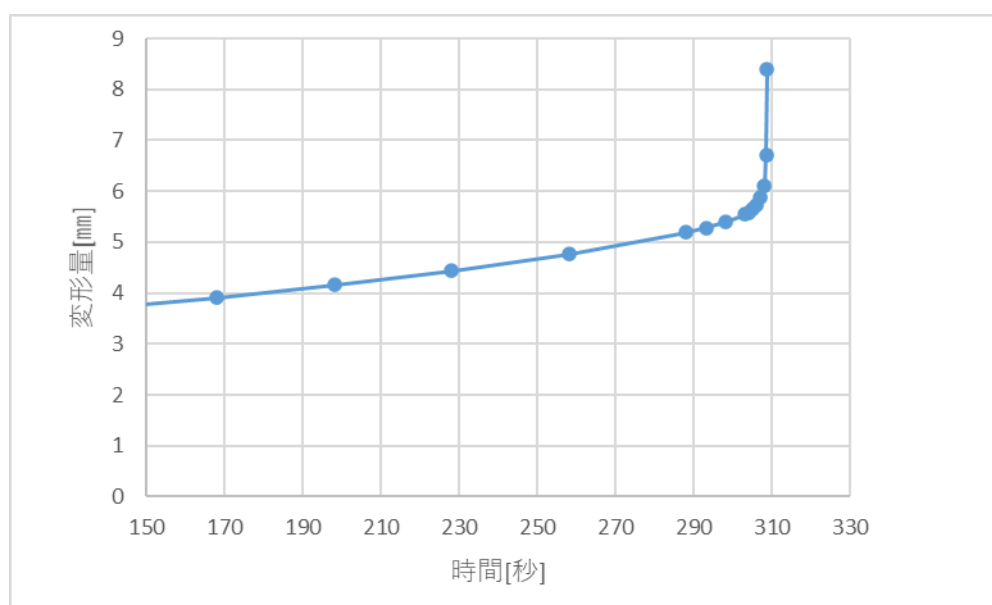


図 8 座屈のグラフ

2.4 プラスチック製のハニカムパネルの六角形の一边の長さを変えた実験

次に、一边の長さと耐えた重さの関係性を知るために、六角形の一边の長さが違う 4 種類のハニカムパネルを 3D プリンターで作り、三点曲げ試験を行った。寸法と耐えた重さを表 3 に、変形量を図 9 に示す。実験の結果、一边が短いほうが強かった。ただし 4 番と 5 番はほとんど変わらなかった。図 10 は壊れたハニカムパネルである。5 番 1 番 6 番は上の板が壊れた。荷重した位置の六角形の対角線に沿って板が割れている。4 番は上の板が壊れなかったが下の板が裂けた。

一辺が短いほど強かった理由は、六角形が小さいほど沢山の辺で上の板を支えているので、上の板が座屈しにくいと考えられる。4番が下の板が裂けた理由は上の板が座屈しにくくなった結果、下の板に強い引っ張り荷重が加わって下の板が裂けたと考えられる。上の板には下の板と同じ強さの圧縮荷重が加わっていると思われるので、上の板も少し潰れているかもしれない（図7）。

表3 ハニカムパネルの寸法と耐えた重さ

番号	辺の長さ(ℓ)	高さ(h)	上の厚み(t_t)	下の厚み(t_b)	壁の厚さ(t_h)	耐えた重さ	
	mm	mm	mm	mm	mm	g	g/g
4	2.5	5	0.5	0.5	0.5	11590	483
5	5	5	0.5	0.5	0.5	12560	661
1	10	5	0.5	0.5	0.5	7782	486
6	20	5	0.5	0.5	0.5	4840	323

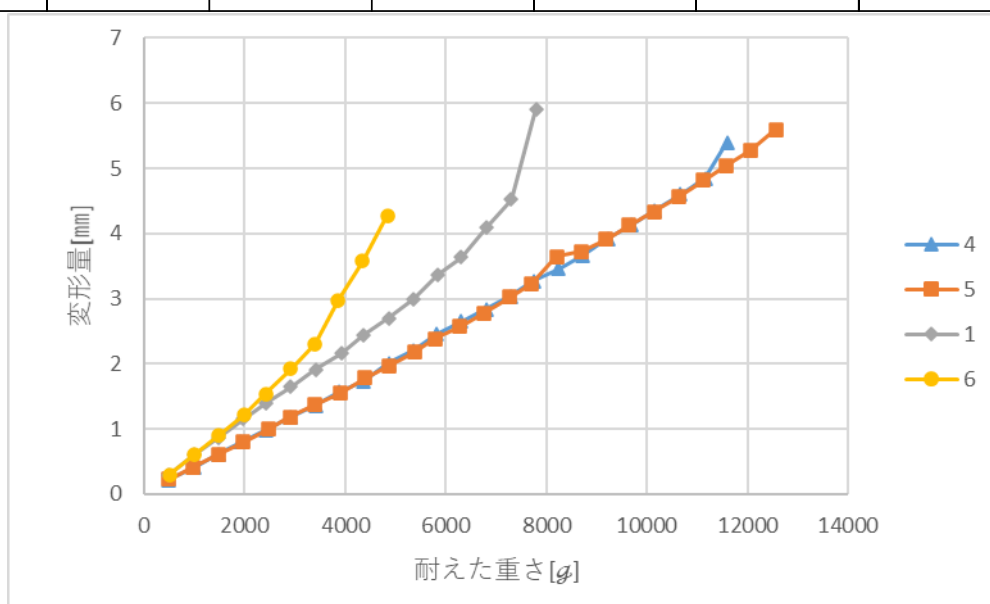


図9 ハニカムパネルの変形量

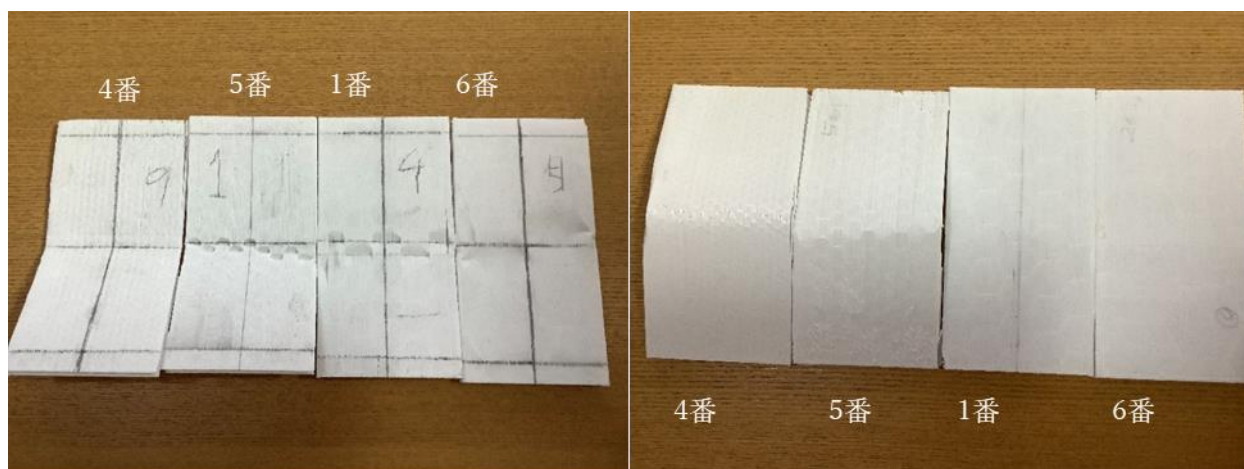


図10 実験後のハニカムパネル

2.5 プラスチック製のハニカムパネルの上下の板の厚さを変えた実験

前回の実験では、一辺の長さを短くすることで、上の板を座屈しにくくできることがわかった。そこで今回は、上下の板の厚さを厚くすることで座屈しにくくできるか確かめるために実験を行った。寸法と耐えた重さを表4に示す。変形量を図11に示す。実験の結果、上下の板を厚くすることで、ハニカムパネルが壊れにくくなった。1番は上の板が壊れた。7番は下の板が裂けた。8番の板が耐えた重さが一番大きかった。また8番の板は上の板が壊れた。この実験から板を厚くすることで座屈しにくくなることが分かった。

表4 ハニカムパネルの寸法と耐えた重さ

番号	辺の長さ(ℓ)	高さ(h)	上の厚み(tt)	下の厚み(tb)	壁の厚さ(th)	耐えた重さ	
	mm	mm	mm	mm	mm	g	g/g
1	10	5	0.5	0.5	0.5	7782	486
7	10	5	1	0.5	0.5	12610	573
8	10	5	1	1	0.5	20410	756

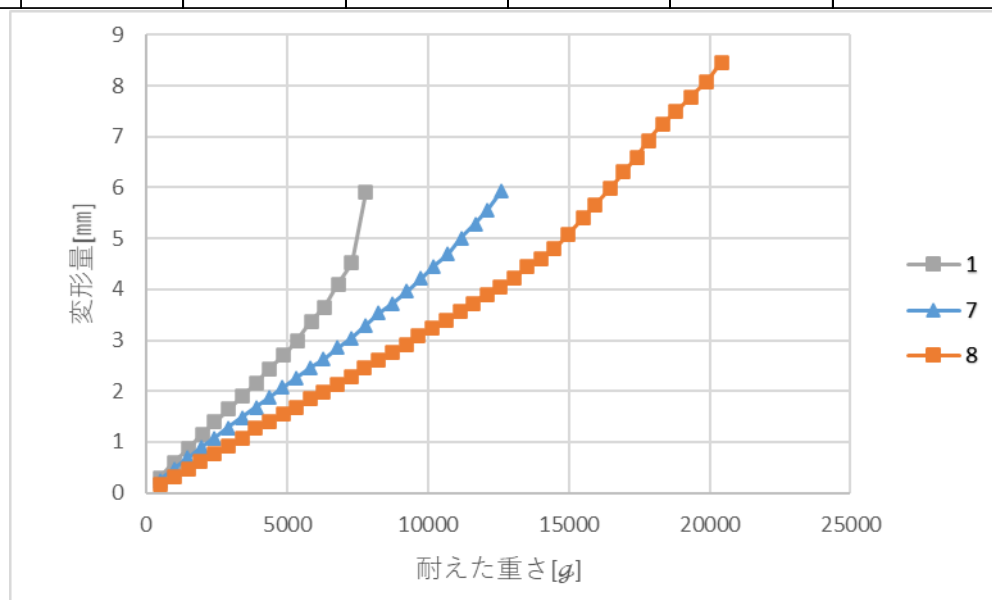


図11 ハニカムパネルの変形量

2.6 プラスチック製のハニカムパネルの高さを変えた実験

つぎに、高さで耐えた重さの関係性を知るために高さが違うハニカムパネルを3つ用意した。寸法と耐えた重さを表5に示す。変形量を図12に示す。実験の結果、高さが高いほうが強かった。3つとも上の板が座屈した。高さで耐えた重さは、だいたい比例していた。

表5 ハニカムパネルの寸法と耐えた重さ

番号	辺の長さ(ℓ)	高さ(h)	上の厚み(tt)	下の厚み(tb)	壁の厚さ(th)	耐えた重さ	
	mm	mm	mm	mm	mm	g	g/g
1	10	5	0.5	0.5	0.5	7782	486
9	10	10	0.5	0.5	0.5	16970	849
10	10	15	0.5	0.5	0.5	24180	1008

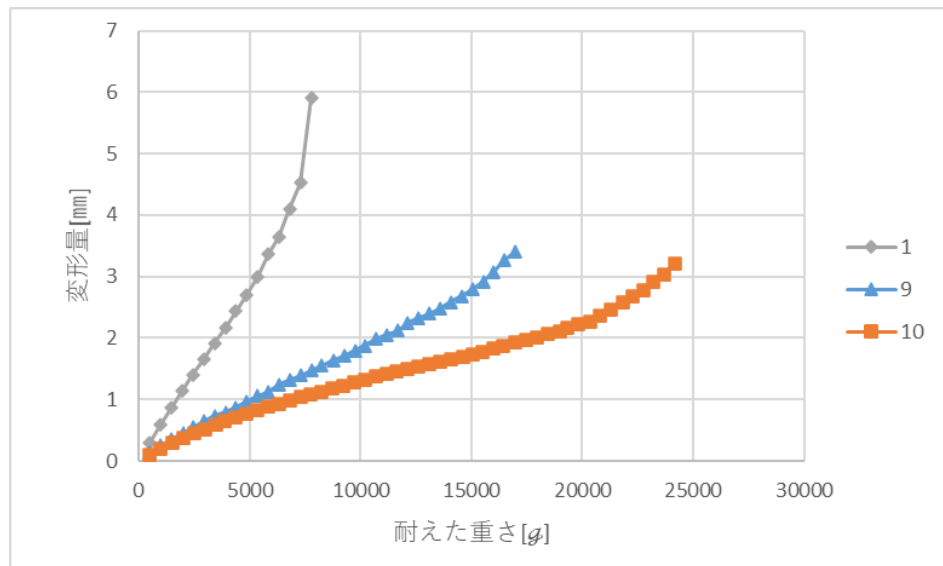


図 12 ハニカムパネルの変形量

2.7 プラスチック製のハニカムパネルの六角形の壁の厚さを変えた実験

六角形の壁の厚さと耐えた重さの関係性を知るために、壁の厚さが違うハニカムパネルを 3 つ用意した。寸法と耐えた重さを表 6 に示す。変形量を図 13 に示す。実験の結果、壁が厚いほうが強かった。3 つとも上の板が座屈していた。

表 6 ハニカムパネルの寸法と耐えた重さ

番号	辺の長さ(ℓ)	高さ(h)	上の厚み(tt)	下の厚み(tb)	壁の厚さ(th)	耐えた重さ	
						g	g/g
11	10	5	0.5	0.5	0.25	5360	357
1	10	5	0.5	0.5	0.5	7782	486
12	10	5	0.5	0.5	1	10180	566

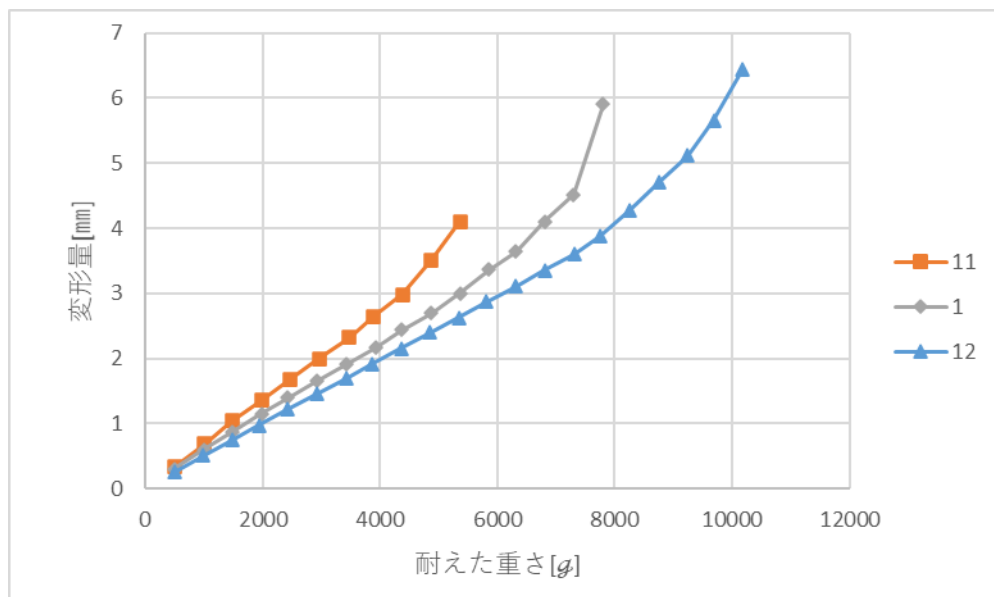


図 13 ハニカムパネルの変形量

2.8 プラスチック製のハニカムパネルの、上の板、ハニカム、下の板を同時に壊す実験

今までは、辺の長さ(ℓ)・高さ(h)・上の厚み(tt)・下の厚み(tb)・壁の厚さ(th)を変えて実験した。その結果をふまえて、最後に、軽くて強いハニカムパネルを作る。ただし負荷が30000gを超えると、自分で作った三点曲げ試験装置が壊れてしまうので、辺の長さは10 mm・高さは15 mm・壁の厚さは0.5 mmに固定した。つまり、上の板と下の板を調整して、軽くて強いハニカムパネルを作ることにした。

これまでの実験で、最も軽くて強かったハニカムパネルはハニカムパネルの重さ1gあたりの耐えた重さが一番大きかった10番である(表7および図13参照)。このハニカムパネルは上の板が座屈して壊れたので、上の板を厚くすればさらに強くなると考えて、上の板を0.7 mm・0.8 mmに変えて実験してみた。寸法と耐えた重さを表8に示す。変形量を図14に示す。

実験の結果、10番のハニカムパネルは上の板が座屈して壊れたが、図15のように13番のハニカムパネルは上の板・ハニカム・下の板が全て同時に壊れた。14番は上の板は壊れず中のハニカムは壊れて下の板も裂けた。

ハニカムパネルの重さ1gあたりの耐えた重さは、13番が一番大きかった。14番より13番のほうが大きかった理由としては、13番と14番の耐えた重さ(g)はほぼ同じだったが、14番の板の方が重く、上の板が壊れていないことから上の板が無駄に強く重さが重くなったため、耐えた重さ(g/g)は小さくなったと考えられる。

表7 ハニカムパネルの寸法と耐えた重さ (これまでのすべての実験)

番号	辺の長さ(ℓ)	高さ(h)	上の厚み(tt)	下の厚み(tb)	壁の厚さ(th)	耐えた重さ	
	mm	mm	mm	mm	mm	g	g/g
1	10	5	0.5	0.5	0.5	7782	486
2	10	5	0.5	0.5	0.5	7806	488
3	10	5	0.5	0.5	0.5	7795	487
4	2.5	5	0.5	0.5	0.5	11590	483
5	5	5	0.5	0.5	0.5	12560	661
6	20	5	0.5	0.5	0.5	4840	323
7	10	5	1	0.5	0.5	12610	573
8	10	5	1	1	0.5	20410	756
9	10	10	0.5	0.5	0.5	16970	849
10	10	15	0.5	0.5	0.5	24180	1008
11	10	5	0.5	0.5	0.25	5360	357
12	10	5	0.5	0.5	1	10180	566

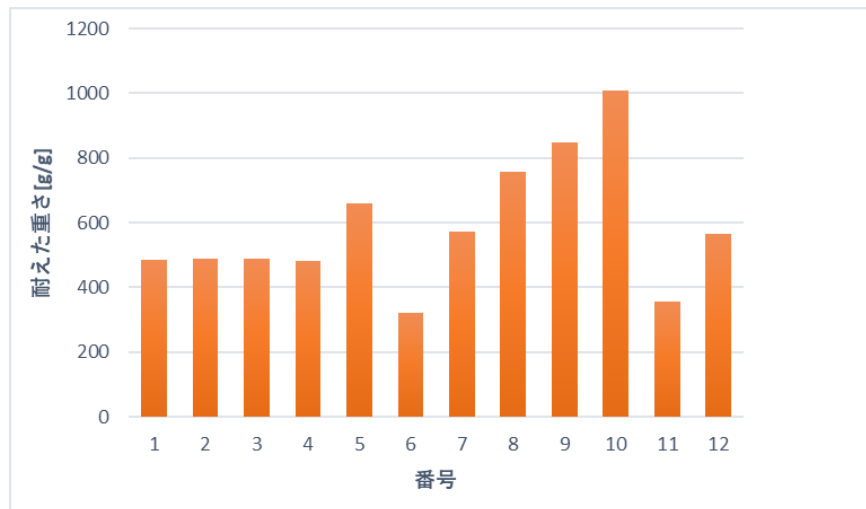


図 13 ハニカムパネルの耐えた重さ

表 8 ハニカムパネルの寸法と耐えた重さ

番号	辺の長さ(ℓ)	高さ(h)	上の厚み(t_t)	下の厚み(t_b)	壁の厚さ(t_h)	耐えた重さ	
	mm	mm	mm	mm	mm	g	g/g
10	10	15	0.5	0.5	0.5	24180	1008
13	10	15	0.7	0.5	0.5	28130	1082
14	10	15	0.8	0.5	0.5	28120	1041

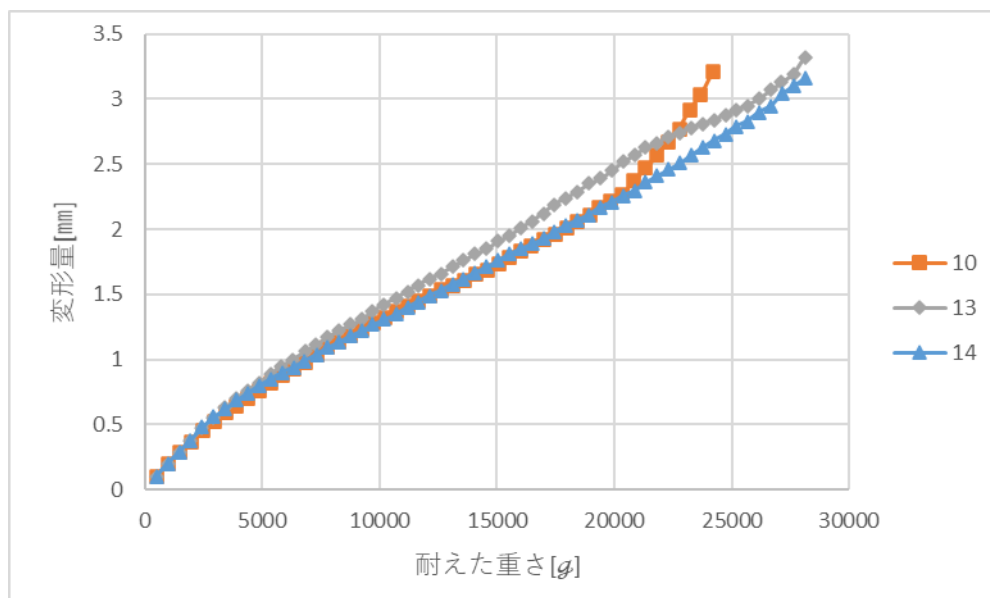


図 14 ハニカムパネルの変形量

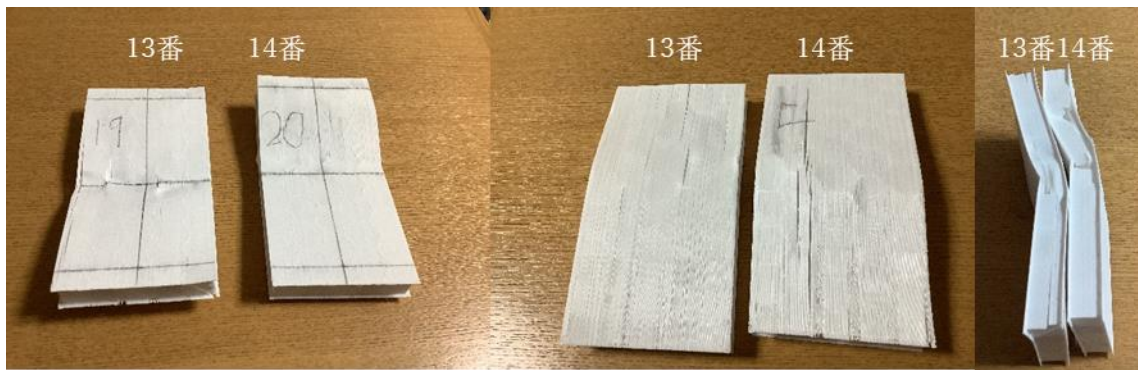


図 15 実験後のハニカムパネル

3. まとめ

3D プリンターでハニカムパネルを作って、三点曲げ試験を行い、様々な条件と耐えた重さの関係を調べた。

その結果、六角形の一边の長さは短いほうが強かった。上下の板の厚みは厚いほうが強かった。ハニカムパネルの高さは高いほうが強かった。六角形の壁の厚さは厚いほうが強かった。そして、一番軽くて丈夫な板は、上の板・ハニカム・下の板が同時に壊れるハニカムパネルであることがわかった。同時に上の板・ハニカム・下の板が壊れるハニカムパネルが一番軽くて強い理由としては、無駄に強いところをなくして軽くすることによって、ハニカムパネル 1g あたりの強度を最大にできたからだと考えられる。単純に強い板を作るのであれば、厚くしたり高くしたりすればよいが、「軽くて」丈夫な板を作るためには、各部分の強度のバランスが大切であることが分かった。

今回の実験では、ハニカムパネルの強さについて実験したが、実生活ではハニカム構造だけでなく、屋根などでよく使われる波板構造、鉄橋などに使われる三角形のトラス構造など様々な構造が使われている。今後は、そうした様々な構造とハニカム構造を比較して、それぞれの強さや特徴を調べてみるのも面白いと思った。

参考文献

- [1] 佳秀工業株式会社, 強度抜群のハニカム構造とは,
<https://kasyu-kogyo.com/2019/04/27/honeycomb/> (参照日 2021/08/10)
- [2] 大阪教育大学附属天王寺中学校, ハニカム構造の不思議, 大阪教育大学附属天王寺中学校自由研究 第 41 集 (2016), pp. 43-48.
<https://f.osaka-kyoiku.ac.jp/tennoji-j/wp-content/uploads/sites/4/2020/09/41-08.pdf>
(参照日 2021/07/21)
- [3] 紫田俊忍・大谷隆一・駒井謙治郎・井上達雄, 材料力学の基礎, 培風館 (1992)
- [4] 小林秀敏・臺丸谷政志・奥戸行一郎, 溶接接合ハニカムパネルの弾塑性曲げ変形, 日本機械学会論文集 A 編, 60 巻 572 号 (1994), pp. 103-108.
- [5] 株式会社 RE ものづくりウェブ事業部, 機械設計エンジニアの基礎知識-座屈とは,
<https://d-engineer.com/zairiki/zakutu.html> (参照日 2021/08/26)