

# 54 貝殻の強さの秘密を探る

## Discovering the secret behind the strength of seashells

### 要旨

バイオミメティクスとは、生物の構造や機能、生産プロセスを観察・分析し、そこから着想を得て新しい技術の開発やものづくりに生かす科学技術のことである。今回取り上げるシェル構造もバイオミメティクスの一例であるが、実現にはいくつかの課題がある。そこで本研究では、シェル構造を建築に応用することを最終的な目標とし、その可能性を探ることとした。具体的な実験操作としては、（シェル構造の最も基本的な形である）ドーム型モデルを複数作成し、自作の荷重試験機を用いて強度の比較を行った。実験の結果、上方向からの荷重に対して、ドームの円周が小さく、ドーム状になっているモデルほど強度が高いことが明らかになった。

### Abstract

Biomimetics is a field of science and technology that involves observing and analyzing the structures, functions, and production processes of living organisms to inspire the development of new technologies and innovations in manufacturing. The shell structure discussed in this study is an example of biomimetics. However, there are several challenges to its practical implementation. Therefore, the goal of this research is to explore the potential of applying shell structures in architecture. To this end, a series of dome-shaped models, the most fundamental form of shell structures, were fabricated, and their strengths were evaluated using a self-constructed pressure testing apparatus. The experimental results revealed that the models with smaller perimeters and more pronounced dome shapes exhibited higher durability when subjected to vertical pressure.

## 1 研究背景と研究目的・意義

### 1.1 研究背景

日本列島は大陸プレートと海洋プレートの境界に位置しており、世界有数の地震多発地域である。直近の例として、令和6年（2024年）1月1日に石川県能登地方を震源として発生したマグニチュード7.6、最大震度7の地震では、住家の被害が全壊7,704棟、半壊9,467棟に達した（内閣府ホームページ）。このように、大規模地震による甚大な被害が現実には発生していることから、我が国においては、災害に強い構造物の整備が常に強く求められている。本研究では、バイオミメティクス（生物模倣）の一例である「シェル構造」に着目し、実験的にその耐衝撃性を考察した。バイオミメティクスとは、生物の構造や機能、生産プロセスなどから着想を得て、新たな技術の開発やものづくりに応用しようとする科学技術である。たとえば、カワセミのくちばしの形状を模倣した500系新幹線や、蓮の葉の撥水性を参考にしたヨーグルトの蓋などがよく知られている。またシェル構造とは、曲面状の薄い構造体であり、外力を面全体で受け止めて分散させるという特徴を持つ。そのため、材料の使用量を抑えつつ、高い強度を実現できる。しかしながら、シェル構造の性能には未解明な点も存在する。たとえば、オーストラリアのシドニーにあるオペラハウスは、当初シェル構造を用いた建築物として

設計されたが、構造上の条件を満たさなかったため、最終的にはリブ構造が採用された〔諏訪，藤井，中島，2008〕。このような経緯は、シェル構造が理論上有効であるにもかかわらず、実際の設計・施工において課題があることを示唆している。そこで本研究では、シェル構造の強度を実験的に検証することにより、その実用性と有用性を確認し、貝殻のような形状が「美しさ」と「強さ」を兼ね備えたとされる理由の解明を試みた。

## 1.2 リサーチクエスチョンと先行研究・事例

先行研究〔岡山県立岡山一宮高等学校理数科3年生，ほか，2025〕では、貝殻の強度を測るために実物の貝殻を採取し、力を加えて貝殻が割れたときの数値を握力測定器によって測定するという実験を行っていた。この研究において改善が望まれる点として、1種類の貝殻のみで実験を行っていたことと、自然界の貝殻では素材や大きさなどの条件を統一することが困難なため、複数の貝殻の強度を検証することができないことの2点が挙げられる。



画像 1 参考文献〔岡山県立岡山一宮高等学校理数科3年生，ほか，2025〕より引用

## 1.3 研究の目的・意義

貝殻の構造を建築に落とし込むことにより、自然災害が多い日本で適合できるような頑丈な構造の建築方法を見出すこと。

## 1.4 仮説とその根拠

貝殻を模倣したモデルを製作し、荷重試験を行うことで、強度が高い形の特徴を考察することができるのではないか。

# 2 研究方法 1 パスタによる貝殻の模型を用いた荷重試験

## 2.1 研究の目的

貝殻の形状の違いによる強度の変化を調べた。今回は、パスタ生地で貝殻のモデルを製作し、貝殻の形状以外の条件（構成物質や厚みなど）を統一することによって、対照実験を行った。

## 2.2 研究と分析方法

用いたもの

・貝殻のモデル ・はかり ・スタンド(撮影用)・スマートフォン(記録用)

## ・ 試料製作過程

**材料選定** …パスタ、レジン、陶器 etc. →パスタを採用

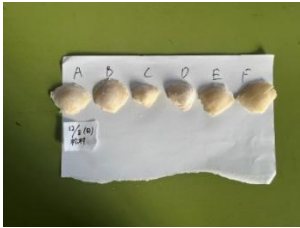


**型の製作** …セメントで貝殻の型を取る



**試料製作** …厚みを均等に延ばしたパスタ生地を型に押し当て乾燥※1させる。

※1 手作りのパスタ生地は、乾燥期間によって割れずに曲がったり、ひび割れたりしてしまうため、乾燥期間を変えた 3 種類のモデルを製作した。



画像 2 制作したパスタのモデル

### 制作条件

・厚み---2mm

・乾燥時間---3,4,5 日間

今回は、二人(ア・イ)がこれらの同一条件のもと、1 セットずつ製作した。

## 2.3 実験方法

はかりにモデルを置き、直接指で荷重を加えた。同時に、はかりの目盛りが変化する様子を映像に収め、その映像を確認してモデルが破壊された時の値を記録した(エラー! 参照元が見つかりません。3 画像



画像 3 4 実験の様子



画像 4 3 スケールに置いたモデル

4)。

## 2.3 結果

表 1 研究方法1 荷重試験の結果（乾燥時間※1 とモデル別の耐荷重）（g）

乾燥時間	製作者	A	B	C	D	E	F
5日間	ア	590	550	290	820	220	180
5日間 ※1	イ						
4日間	ア	545	320	770	550	670	320
4日間	イ	650	520	1200	800	900	555
全平均	---	595	460	753	723	597	352

※1- 乾燥時間 3 日間のモデルは水分が多かったため測定不能とし、表には入れていない。

※2- 「5日間・イ」は模型がもともと割れていたため測定不能とした。

## 2.4 考察

実験結果から、4日間乾燥させたモデルが一番実験に適しており、全体のモデルの強度の差から C のモデルの強度が高いことがわかった。また、C のモデルのように半径が小さく高さが高い

ほど強度が高くなり、B や F のモデルのように半径が大きく、高さが低いものほど強度が低くなることがわかった。このことから、曲率が大きいほど荷重に強いと考察した。しかし、今回の実験では模型の精度にばらつきがあり、得られたデータの信頼性が低い。

## 3 研究方法2 チョコレートによるドーム構造の模型を用いた荷重試験

### 3.1 研究の目的

「研究方法1」ではモデルの精度にばらつきがあり、得られたデータが非常に曖昧であった。より精度の高い方法を検討した結果、チョコレートを型に流し込み、固めることで、常に一定の形状が確保されると考えた。また、貝殻のように荷重をかけたときにパキッと割れるように「研究方法1」をベースにチョコレートを原料に用い再度実験を行った。

また、本物の貝殻から石膏で型をとり、原料を入れる方法は型としての精度も非常に曖昧であり、実験に適さないと考えたため、この「研究方法2」では3Dプリンタを用いて、疑似的に貝殻の形状を再現した近似モデルを製作した。

### 3.2 研究と分析方法

まず初めに、今回の実験において「貝殻」について中空のドーム形状をした立体構造（すなわち中空の球欠）と定義する。

よって、今回製作する近似モデルは、直径が異なる中空の球欠とし、体積が一定となるようにそれぞれ高さを設定する。また、この近似モデルは一部の貝殻にあるような表面の線状の凹凸は無く、平滑なものとする。これらの条件設定に基づき以下のように実験を進めていく。

型の製作 → チョコレートモデルの製作 → 荷重試験

### 3.2-1 型の作成

型の製作における今回の対照実験の条件は以下のとおりである。

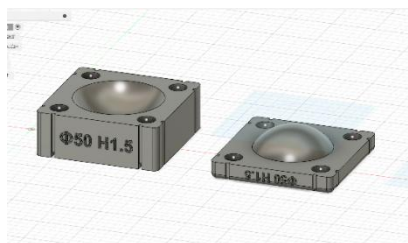
- ・厚みは 3mm
- ・底面の直径は 60mm, 55mm, 50mm, 45mm, 40mm の 5 種類とし、それぞれ体積が 6.47cm<sup>3</sup> となるように高さを設定する
- ・モデルの形状は以上の条件に対応した中空の球欠とする

以上の条件より以下の球欠の体積を求める式を参考に高さを計算する。

(切り口の半径を  $r$  切り口の円の中心から球冠までの距離を  $h$  とする)。

$$\frac{\pi h}{6}(h^2 + 3r^2)$$

CAD を用いて、以上の条件に基づき、3D モデルを製作し、3D プリンタで各型を印刷した (画像 5 画像



画像 5 6 製作した 3D モデル

画像 6 5 印刷された型

6 )。

### 3.2-2 チョコレートモデルの製作

型に基づき、チョコレートのモデルを製作する。トをテンパリングし、6 型の結晶<sup>1</sup>を作れるように板チョコを湯煎で溶かし 45℃程度に加熱、その却し、27℃までチョコレートの温度を下げる。

チョコレートを 35℃付近まで加熱したものを、3.2-1 で作成した型 (内側にアルミホイルを張り付け、固まったチョコレートをはがしやすいように加工したもの) に流し込み、冷蔵庫に一日入れて冷やし、固める。型から外したチョコレートのモデルは、冷凍庫に移し、実験当日まで保存する。

以上の手順を 4 日間行い、5 種類のモデルを 4 個ずつ製作した。

また、これ以降の内容では、製作日別にモデル A—D で区別することとする。



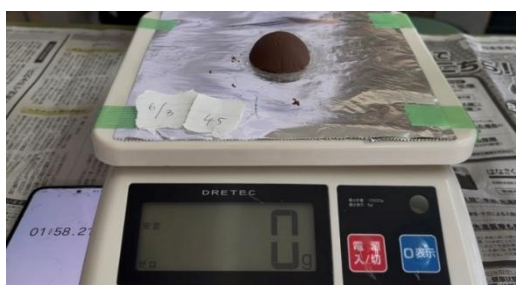
チョコレートをした。後冷水で冷その後再度

### 3.2-3 荷重試験の実験方法

用いたもの

- ・デジタルスケール (10kg 対応)
- ・チョコレートモデル (各サイズ)
- ・スタンド (撮影用)
- ・スマートフォン (撮影用)

モデルがデジタルスケールに乗ったときの重さを 0g とし、モデルの一点に手と平面の容器の底を用いて、荷重を加え、モデルが割れたときの数値を計測する。(画像 7, 画像 8)



画像 78 スケールのメモリを撮影した映像より



画像 87 モデルが割れた様子

なお、「研究方法 1」より人の手で荷重をかけるというものが研究方法として曖昧なデータを生んでしまう可能性が高く、他の方法を検討したが、今回の「研究方法 2」を行うまでには準備をすることができず断念した。

実際に実験を行ったところ〔モデル A〕を荷重試験にかけた際、10kg 以上の荷重を加えても割れないモデルがあったため、〔モデル B〕では冷凍庫からモデルを取り出して 1 分経過後から力を加えるという方法に変更した。それでも 10kg を超えるものがあったため〔モデル C, D〕では冷凍庫からモデルを取り出して 2 分経過後から力を加えるという方法に変更した。

### 3.3 結果

「研究方法 1」の結果から予想した通り、底面の直径が小さくなるにつれて割れるまでに加える力は大きくなる傾向がある。また、底面の直径が小さいモデル(45mm, 40mm)では 10kg を超える荷重を加えても割れなかった。

表 2 研究方法 2 荷重試験の結果 (直径とモデル番号別の耐荷重) (g)

モデル\ 直径(mm)	60	55	50	45	40	備考 *1
A	2975	6450	7605	10000+*2	9395	冷凍庫出してすぐ
B	2850	6280	8320	10000+*2	10000+*2	冷凍庫から 1 分後
C	2830	3915	3935	4830	3750	冷凍庫から 2 分後
D	2390	3445	5250	5310	5390	冷凍庫から 2 分後
A-D 平均 *3	2761.25	5022.5	6277.5	7535	7133.75	
C,D 平均 *4	2610	3680	4592.5	5070	4570	

\* 1- 備考より ABCD はそれぞれ、冷凍庫から出した後から実験開始までの時間が異なる。

\* 2- 10000+とは 10kg デジタルスケールで error すなわち 10kg を越え、正しく値が出なかったもの。平均を出すにあたっては、10000g として計算している。

\* 3- 「A-D 平均」は各列 (直径) の A, B, C, D の平均値。10000+がいくつかあり、推測値が平均に含まれるため確実ではない。

\*4- 「C,D 平均」は各列の C,D の平均値。すべて実測値であり、実験開始までの条件も統一されている。

### 3.4 考察

直径 45mm のものがこの中で最も強いことが分かったが、直径 40mm のものもそれに匹敵するような強度を持っている。また、直径 45mm のモデルの次に「C,D 平均」の値が大きいのは直径 50mm のモデルであった。対して直径 60mm のものは他のモデルに比べて耐荷重が非常に小さい。

## 4 二つの研究の関係性

二つの研究から関係を見出すために、研究方法 1 で用いた貝殻の長軸と短軸から底面積を求めた。そのうえで、パスタモデルと近似モデル（チョコレートモデル）の底面積と高さの関係を一つの散布図にプロットし、近似線形を描画した。図 1 二つの研究で用いたモデルの底面積と高さの関係

第一に判明したことは、今回「研究方法 2」で用いたチョコを用いた貝殻の近似モデルは本物の貝殻と底面積と高さの関係に違いがあるということだ。近似モデルは底面積に対する高さが 0.25cm ほど高く見積もられており、疑似的な検証を行うには近似モデル自体に設計ミスがある可能性があることが分かった。

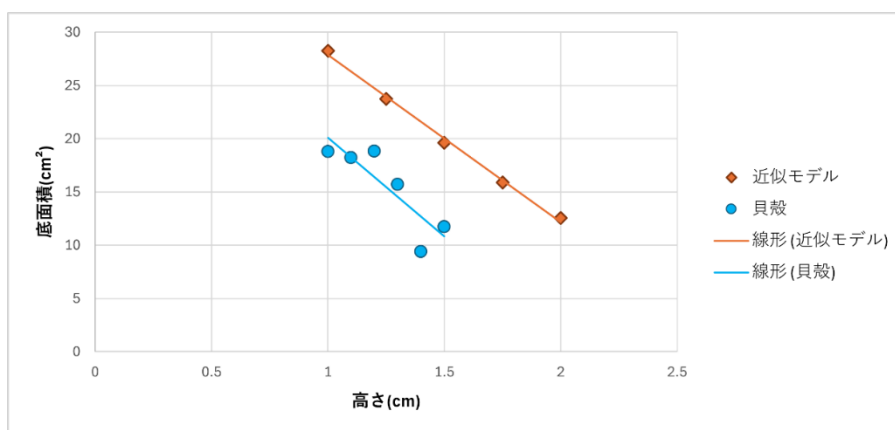


図 1 二つの研究で用いたモデルの底面積と高さの関係

以下の表 3、表 4 は「研究方法 1」「研究方法 2」で得られた結果を強度の高いものから順番に並べたものである。また表 1、表 2 と異なり、底面積（表 3 においては貝殻から型を取ってモデルを作成しているため、貝殻を楕円と見立て、長軸と短軸から楕円の公式を用いて底面積とした）と高さを追加し、高さをそれぞれの底面積における半径で割った値(H/R 比)を求めた。

表 3 研究方法 1 モデルの底面積と強度の関係

モデル名	c	d	e	a	b	f
底面積(cm <sup>2</sup> )	11.75	9.42	15.71	18.85	18.79	18.22
高さ(cm)	1.5	1.4	1.3	1.2	1	1.1
H/R 比	0.7756	0.8085	0.5813	0.4899	0.4089	0.4568

表 4 研究方法2 モデルの底面積と強度の関係

モデル名	45	50	40	55	60
底面積(cm <sup>2</sup> )	15.9	19.63	12.57	23.76	28.27
高さ(cm)	1.75	1.5	2	1.25	1
H/R 比	0.7778	0.6	1	0.4545	0.3333
3,4 平均	5070	4592.5	4570	3680	2610

表 3, 表 4 をもとに、H/R 比を横軸に、強度を縦軸に設定した表をそれぞれ作成する。また、それをもとに近似曲線を作成する (図 2, 図 3)。これより、H/R 比が 0.75-0.80 あたりの値で強度が最大になることがわかる。

よって、最も強度が高い球欠は H/R 比が 0.75-0.80 (球欠の高さは半径の 0.75-0.80 倍) になるのではないかと推測することができる。

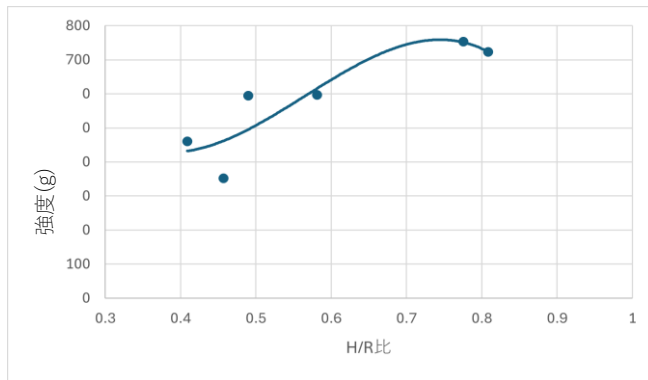


図 2 研究方法 1 における H/R 比と強度の関係

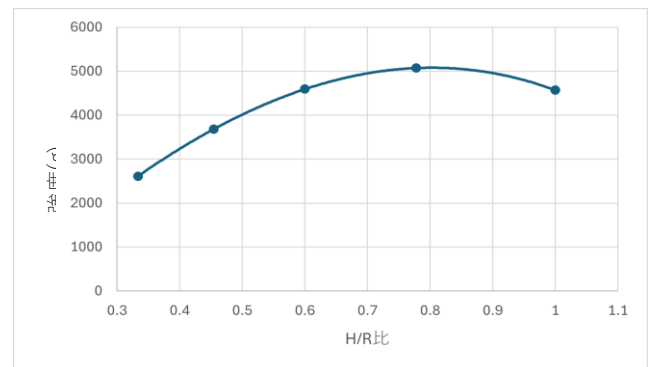


図 3 研究方法 2 における H/R 比と強度の関係

## 5 結論と今後の展望

### 5.1 結論

今回の実験では、貝殻の形状による強度の違いを調べるために、パスタ生地やチョコレートを用いて貝殻をモデル化し、荷重試験でそれらの強度を検証した。その結果、H/R 比が 0.75-0.80 あたりになる球欠が最も強度が高くなることが分かった。また、そこからドーム形状は半径が小さく、高さが高くなるほど強度が高くなるわけではないことがわかった。しかし、パスタ生地の水分量やチョコレートの温度、試験の精度不足などによってデータが曖昧になってしまうことがあった。

今回の研究では、パスタやチョコレートを用いて構造の強度を測定する方法を確立することができた。これらの方法は今後の様々な強度試験に応用できると考えられる。

### 5.2 展望

- (1) モデルに使う材料の見直しや試験方法を改善し、実験精度の向上を図る。
- (2) 貝殻のほかの特徴 (表面の筋や分子構造など) に注目した実験を行い、その利点や強度を明らかにする。

この2点の研究を深めて、さらにこの研究に貢献していきたい

## 6 謝辞

半田工科高等学校建築デザイン科の稲垣孝一教諭には3Dプリンタでモデルを造形していただきました。厚く御礼申し上げます。

半田高等学校の新帯聖文教頭、並びに竹内正人教諭には研究の方針立て、論文やポスター制作において終始適切なお指導を賜りました。深く感謝申し上げます。

本研究の遂行にあたり、協力頂いた皆様に感謝いたします。

## 6 引用文献・参考文献

LOTTE. (2025年6月5日). LOTTE テンパリング. 参照先: お菓子作りの基本テクニックとアイデア:  
<https://www.lotte.co.jp/entertainment/recipe/technique/food1/>

岡山県立岡山一宮高等学校理数科3年生, 古松秀章, 清水将之, 小坂俊樹, 内藤晃介, 川村直也. (2025年6月9日). 貝の強度と形状の関係. 参照先: 貝の強度と形状の関係: [https://pesj-cs.hiroshima-u.ac.jp/old\\_html/shibukai2008/JD-02.pdf](https://pesj-cs.hiroshima-u.ac.jp/old_html/shibukai2008/JD-02.pdf)

岩崎泰穎. (1976). 貝殻構造について. 熊本大学.

諏訪正樹, 藤井晴行, 中島秀之. (2008). 構成論的方法論から見たイノベーションの諸相-建築を題材として.

藤井大地. (日付不明). 建築構造学講義(2) 建築構造の基本原則 各種構造の構造原理(1). 近畿大学工学部建築学科.