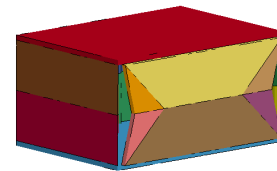


日本数学会 市民講演会

折り畳み式製品の数理工学
ー折り紙から厚板ボックスへー



奈良 知恵
(明治大学 MIMS)



2017年9月10日(日)
山形テルサ アプローチ

折り畳み式〇〇

「折り畳み傘」「折畳椅子」...

折り畳み式は**収納**や**携帯**に便利！

「エアバッグ」「扇子」「和服」「洋服」「ショッピングバッグ」
「テント」「ビーチボール」「折畳テーブル」「折畳梯子」
「リュックサック」「**折り畳み式ヘルメット**」「譜面台」
「ベビーカー」「スイス・アーミー・ナイフ」「掛け軸」
「ブラインド」「カーテン」「提灯」...

日本の伝統的な「折り紙」

1枚の正方形の紙⇒種々の立体：折り鶴，風船，箱…



ユニット折紙：多面体，花…

芸術作品：悪魔，無限折り，人形，女子高生…

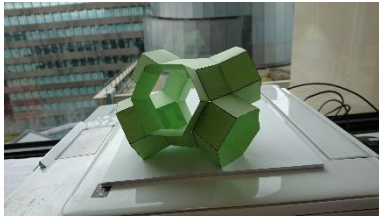
国際語としての「オリガミ(Origami)」

「折る」という操作によって種々の形状への変化が
建築，医療，デザインなど多様な分野で注目される

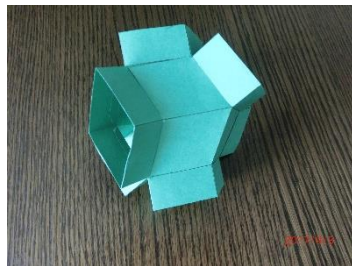
アメリカの研究資金：NSF(国立科学財団) 2012 補助金: **Origami** Design
for Integration of Self-assembling Systems for Engineering Innovation (ODISSEI)
8件各2億円以上

ハーバード大学の研究グループが開発したパズル

<http://www.boredpanda.com/shapeshifting-paper-puzzle-harvard/>



- (1) Obervelde, J.T. et al . A three-dimensional actuated **origami-inspired** transformable metamaterial with multiple degrees of freedom. *B. Nat. Commun.* 7, 10929 (2016).
- (2)) Obervelde, J.T.B. et al . Rational design of reconfigurable prismatic architected materials. *Nat.* 541 (2017) 347-352.



ひし形12面体による他の例

(奈良知恵, 平行多面体の平坦折り畳みと形状シフト, 日本応用数理学会, 2017.)

Chie Nara at Meiji Univ.

アメリカ機械学会(ASME) 2017
国際デザイン工学 テクニカル コンファレンス (IDECT)

折紙に基づく工学デザイン

特別講演 1本, 一般講演 17本 (内 4本が日本)
の題名に含まれる「オリガミ」

Origami-based Engineering, Origami-based Corruptions,
Origami-based Mechanisms, Origami Architecture,
Origami Channels, Origami-inspired, Origami Mechanism,
Origami Structures, Rigid-foldable Origami,
Origami Patterns, Four-fold Origami,
Origami Metamaterials, Origami Folding,
Origami Reverse-fold

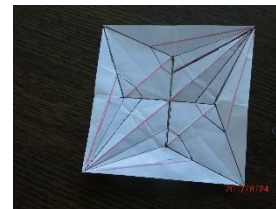
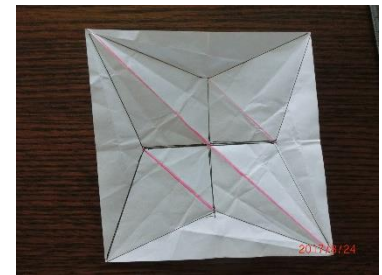
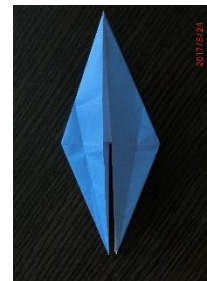
折り目の基本構造

平坦折りできるための折り目の必要条件

折り目の交差する各点について

- ①分岐する折り目は偶数本
- ②山折と谷折の本数の差は2
- ③1つ置きに交互に中心角をとると和は 180°

(村田三良,1966)



折り目の基本構造

ローカルな条件から全体的な条件への拡張すること

折り目のデザインと立体の関係

手順や実現可能性などコンピューターを用いた研究

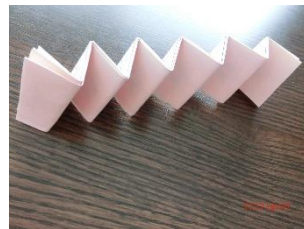
ミウラ折り

特長：開閉が1つの方向のみで可能
(斜めのコーナーを結ぶ方向に伸縮)

応用例：宇宙でのソーラー・パネル，地図
(イカロスのソーラー・セイルは異なる構造)

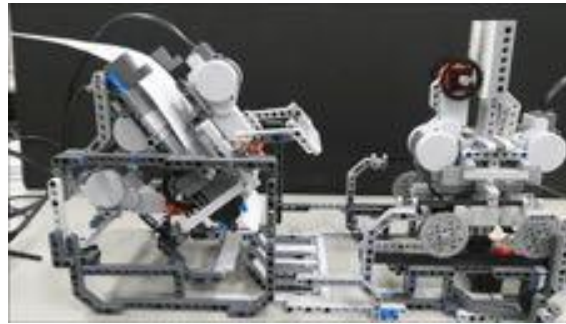


By Mari-jo Ruiz



ジグザグの方向の折り目を先に山谷の蛇腹折り
複雑な手作業⇒産業化への壁

蛇腹折りと糊付けのロボット



By J. A. Romero et al., 2016

課題: 複雑な折り目をロボット化するには?

名刺にみる数理



ミウラ折り

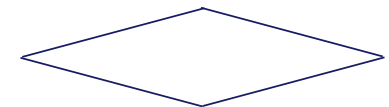
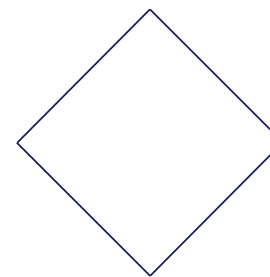
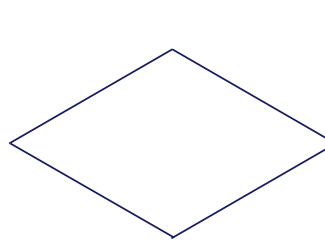
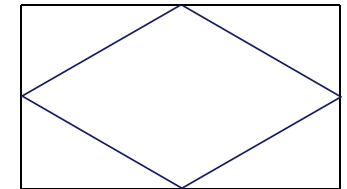
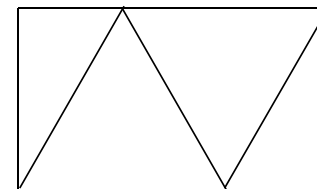
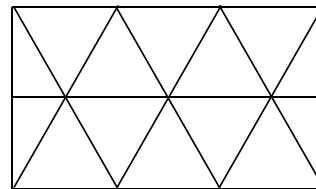
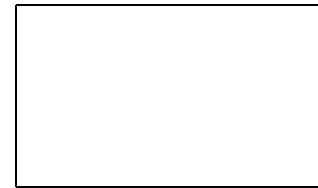
By Yves Klett氏



ユニット折り

By Jason S. Ku氏

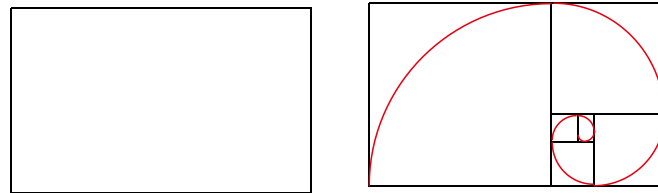
縦横の比が $1:\sqrt{3}$



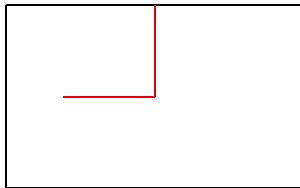
エンブレムのパーツ

名刺にみる数理

縦横の長さの比が黄金比 $1:(1 + \sqrt{5})/2$



黄金螺旋



3枚の名刺からサッカーボールへ



参考文献: 中村義作著, マンホールのふたはなぜ丸い? 日本経済新聞社, 1984



ランプシェード(プラスチック製)

ホテルの客室 (2017年8月,
Doubletree by Hilton in Cleveland)

折紙で折り畳み式



By Chie Nara

Reverse-engineering of Origami Models による産業化

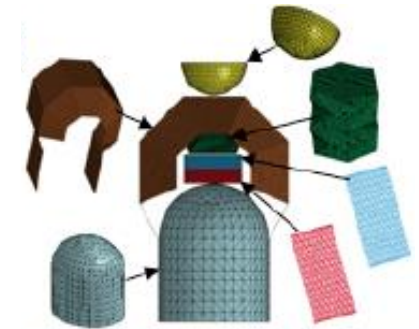
Chie Nara at Meiji Univ.

蛇腹折りに限定！

ロボットでも可能



折り畳み式ヘルメットの開発に応用

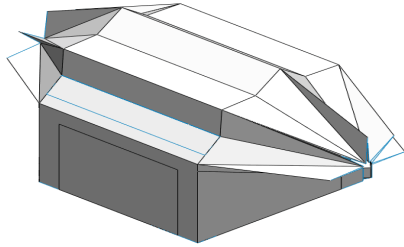


超絶凄ワザー最強の帽子対決—
NHKスタジオにて, 2016年

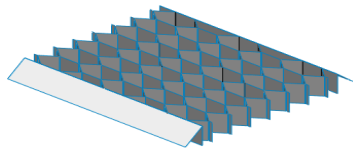
参考文献：奈良知恵, 折り紙のヘルメットの話, 折り紙探偵団 159号(2016) 13-15.

萩原一郎, 奈良知恵, 小澤範雅, ヘルメット, 実願2016-000870, 出願日:2016年2月26日

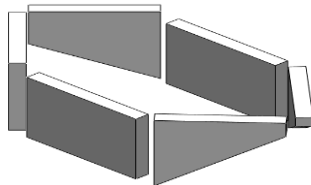
市販された折り畳みヘルメット



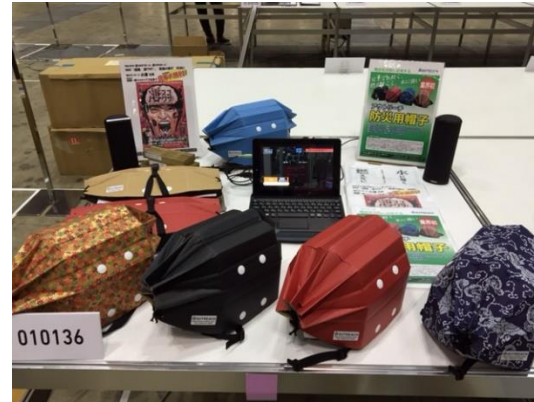
蛇腹折りカバー



ハニカム構造



ウレタン保護材



協力: 有限会社 秦永ダンボール

ダンボールは程よく柔軟な素材
加工によって水にも火にも強い!

ヘルメットのカバー

ステップ1: 蛇腹折り

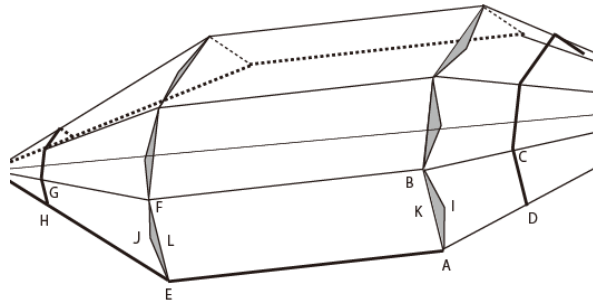
ステップ2: 糊代部分を糊付けまたはホチキス留め

ステップ3: 開く

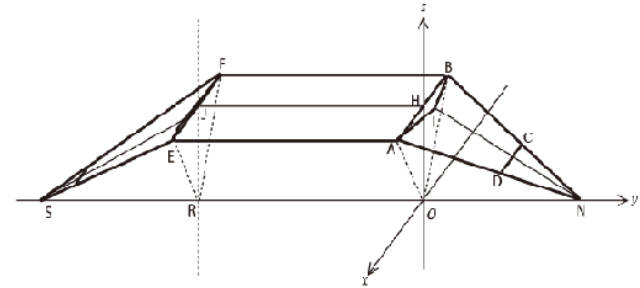
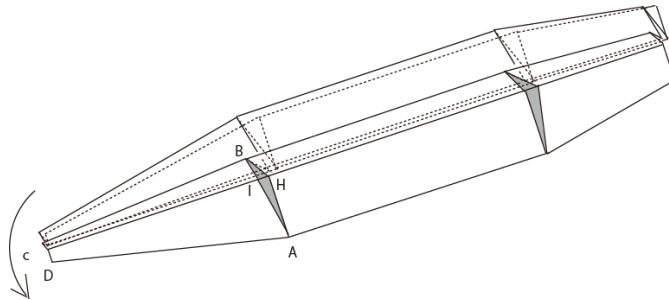


簡単な手作業⇒産業化可能

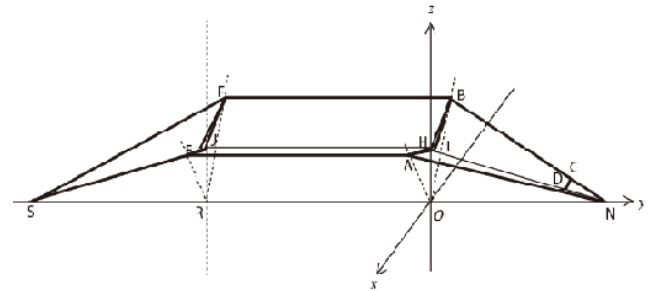
ヘルメットのカバーの構造は蛇腹折り



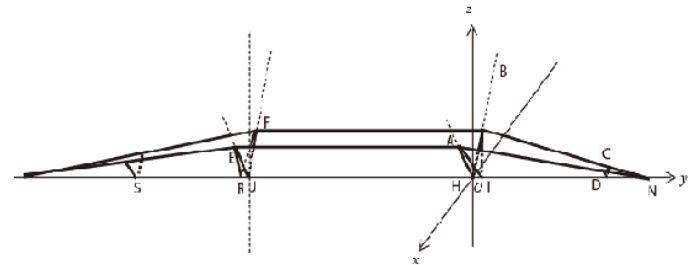
影の部分は開閉時に
二面が交差するところ
⇒ 隙間または柔軟素材



(a)



(b)



(c)

連続的折り畳みの数理

完全密閉型多面体を切ったり伸ばしたりしないで
平坦に折り畳めますか？

- E. Demaine, M. Demaine and A. Lubiw,
“Flattening Polyhedra”, unpublished paper, 2001



薄い素材で紙のように折り目で折れる
ならば平坦化可能！

参考文献：“Geometric Folding Algorithms, Linkage, **Origami**,
Polyhedra”, E. Demaine and J. O’Rourke, Cambridge, 2007

— 基本定理 —

コーシー (Cauchy) の剛性定理 (1813)

凸多面体は面の形が変わらなければ (合同変形を除いて) 連続的に変形しない。

コネリー (Connelly) の反例 (1978)

凸でない多面体の中には、面の形を変えずに、合同でない多面体へ連続的に変形できるものがある。

サビトフ (Sabitov) の体積保存定理 (1995)

(\Rightarrow **フィゴ定理** (Connelly · Sabitov · Walz) (1997))

多面体が面の形を変えずに連続的に変形してもその**体積は不変**である。

既知の結果

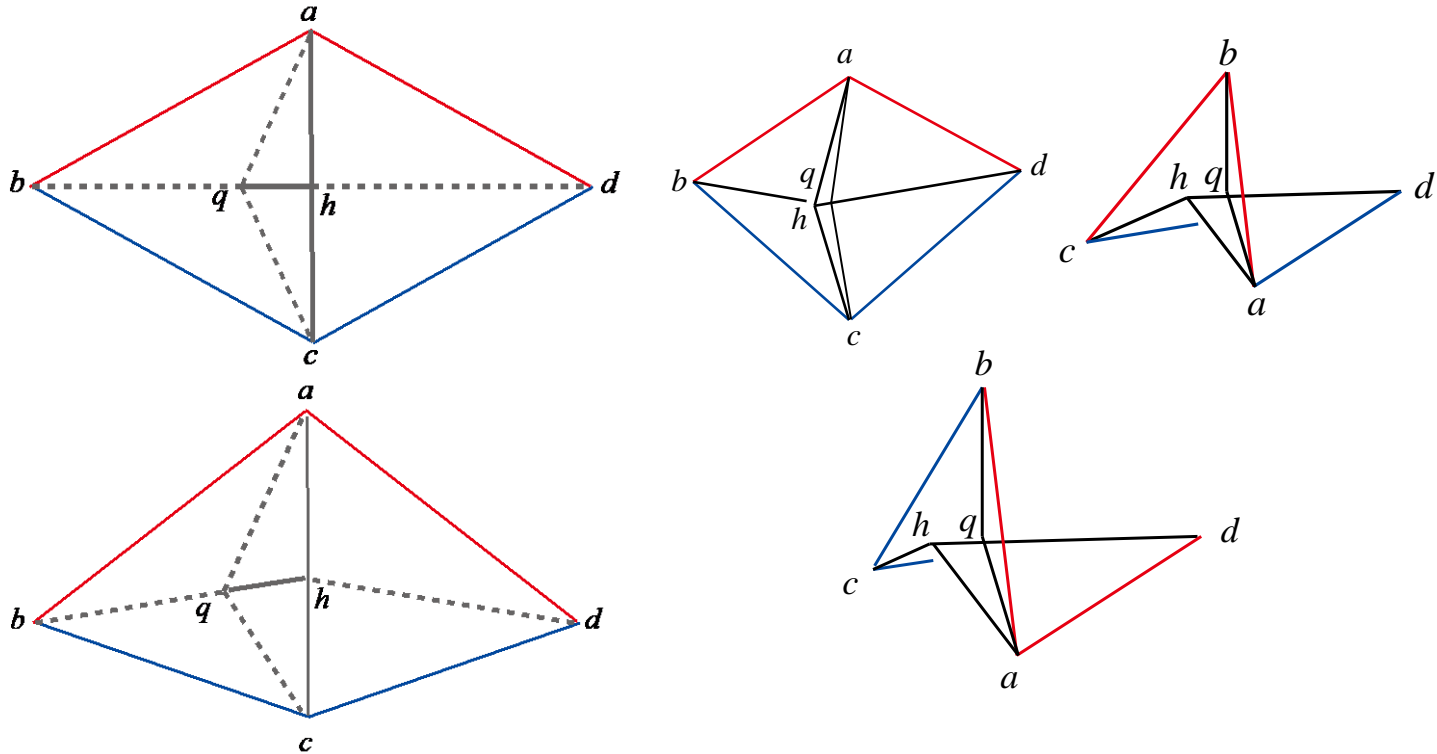
種類	著者	出版	方法
正多面体	Itoh-Nara	2010	① ひし形
凸多面体	Itoh-Nara-Vîlcu	2011	② カット・ローカス/A
ピラミッド	Nara	2014	① タコ (凧) 型
凸多面体	Abel-E.Demaine-M.Demaine-Itoh-Lubiw-Nara-O'Rourke	2014	③ ストレート・スケルトンと順位付け
直交多面体	E.Demaine-M.Demaine-Itoh-Nara	2016	① タコ 型
α -多面体	Matsubara-Nara	2017	① タコ 型

タコ型の方法は**移動折り目の領域が小さい**

応用に有利⇒厚板では**柔軟素材**に置換または**隙間**

隙間の数理

対角2頂点間の距離を随意に調整できる



ひし形(タコ型)の翼折

参考文献: C. Nara, Continuous flattening of some pyramids, *Element der Math.*, 69 (2014) 45–56.

折り畳み式厚板ボックス

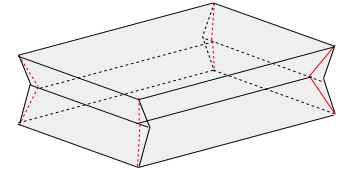
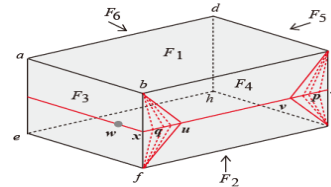
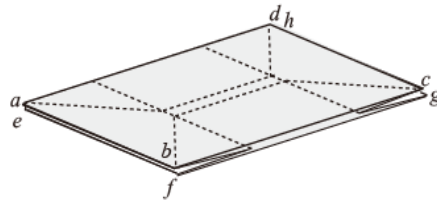
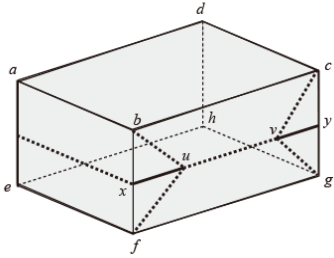
適度な柔軟性が期待できない**剛性**素材で制作

1. 小さい隙間
2. 平坦化と立体化の操作が簡単
3. 上面と底面は折り目を入れないこと

数理的アプローチ...

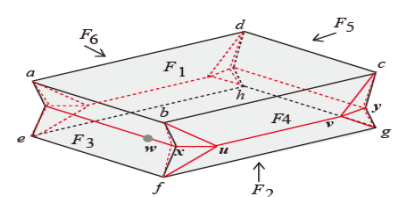
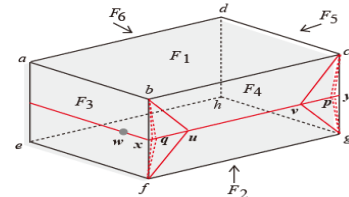
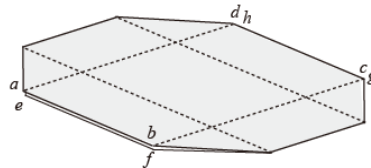
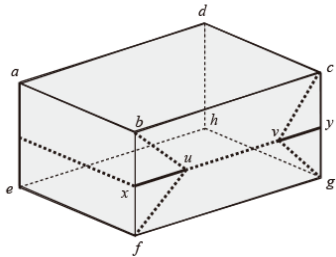
参考文献: 奈良知恵, 萩原一郎, 楊陽, 暁詩, 厚板の折り畳み式ボックスと連続変形, 投稿中

ボックスの設計



内側に折り畳み

赤線分が交差

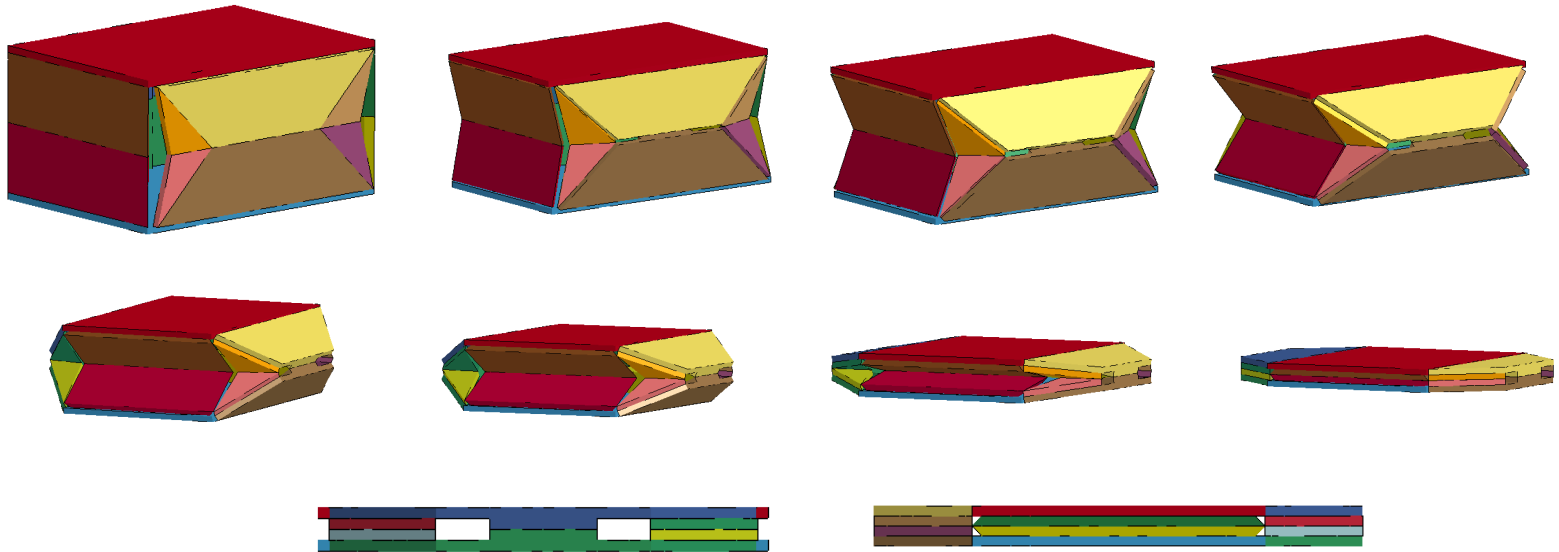


外側に折り畳み

交差部分がより少ない

参考文献: E. Demaine, M. Demaine, J. Itoh, C. Nara, Continuous flattening of orthogonal polyhedral, LNCS, vol. 9943, Springer (2016), 85–93.

シミュレーションモデルと結果



A model: $300 \times 400 \times 20$ with thickness 10

The height of removed triangles is 25 (unit: mm)

参考文献: Chie Nara, Yang Yang, Xiaoshi Chen, Ichiro Hagiwara,
Flat-foldable boxes of thick panels –hinges and supporters –,
The proceedings of ASME 2017/IDETC/ IDETC2017-67395.

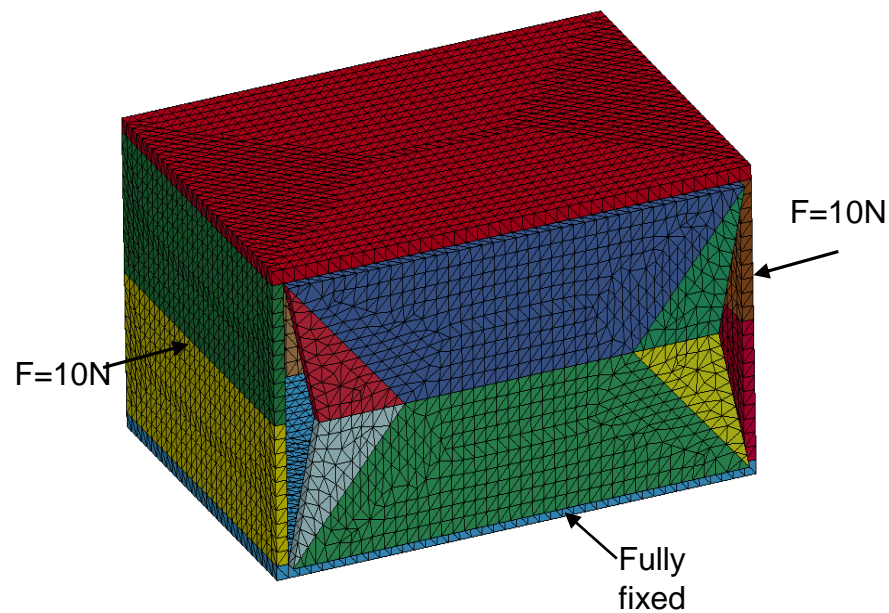
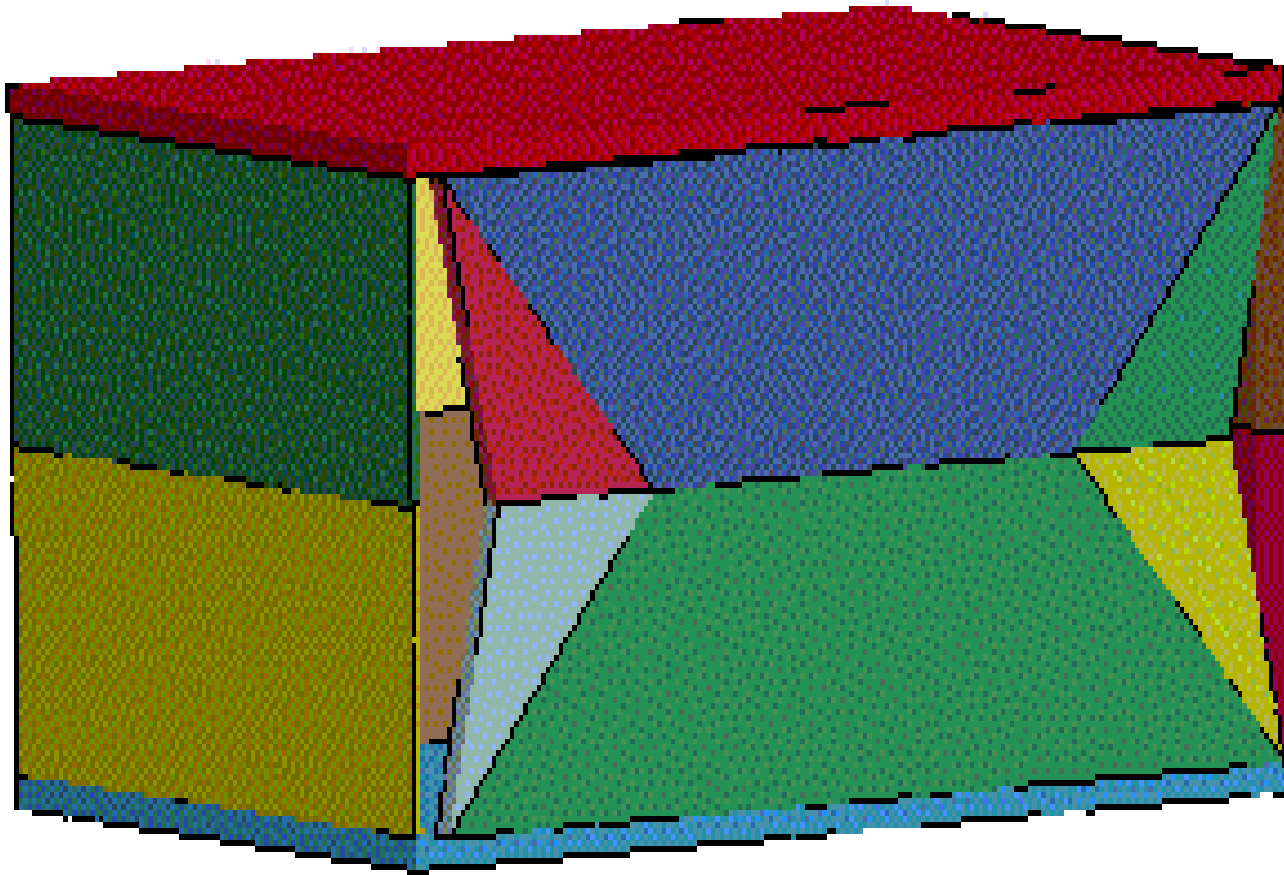


Fig shows the structural model of box. The box structure is divided into 18 parts and modeled by three-dimensional solid element. The total number of elements is 34488, and the total number of points is 12268. The bottom part of box (azure color) is fully fixed. The horizontal forces are applied to both sides of box. The box structure is made of cardboard and the material characteristic value is shown as follows:

Mass density	$4.489 \times 10^{-11} \text{ kg/mm}^3$
Young's modulus	$664 \times 10^{-11} \text{ N/mm}^2$
Poisson's ratio	0.3

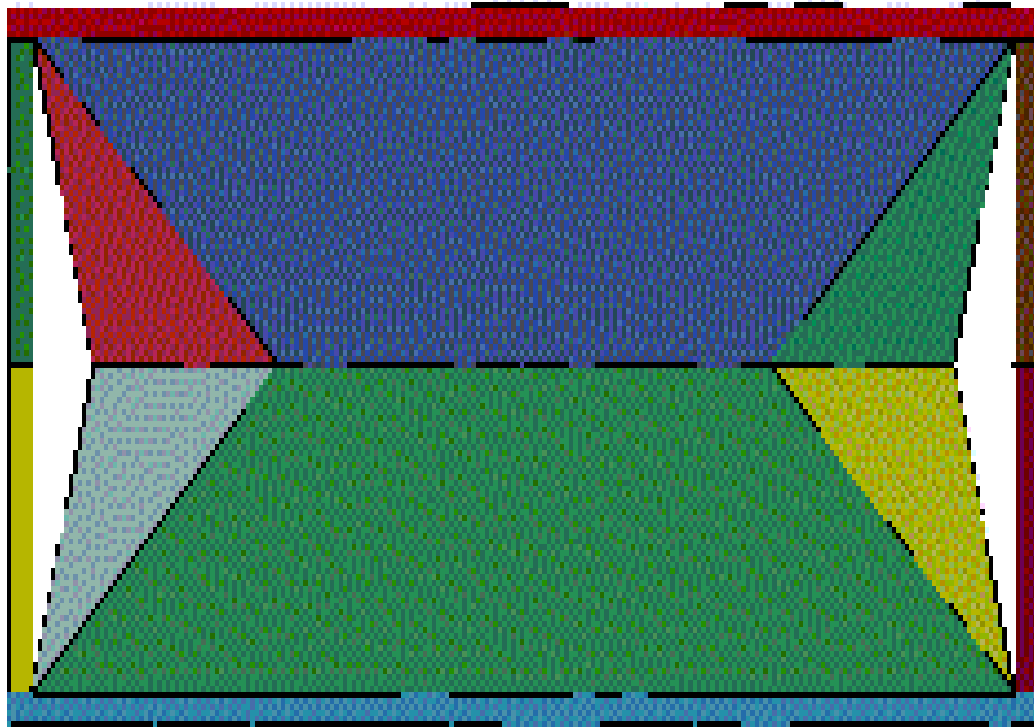
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost

Time = 0



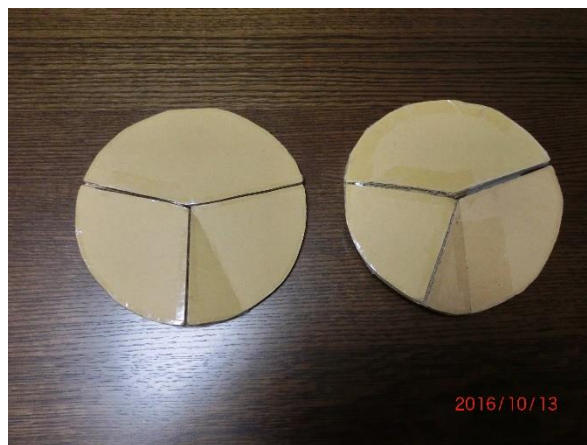
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost

Time = 0



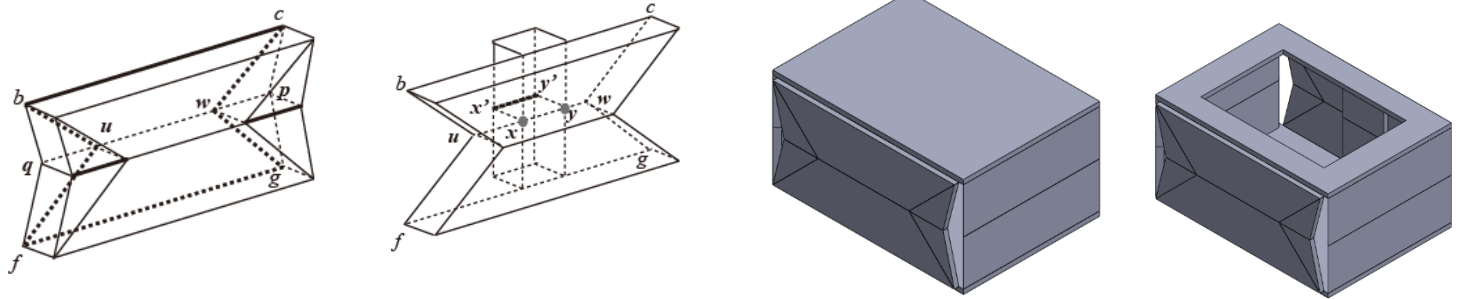
ヒンジの数理:1点のまわりの条件

“**Origami** of thick panels”,
Yan Chen, Rui Peng, Zhong You,
Science, vol. 349 (July 2015) 396-400.



閉じた立体についての議論は見当たらない…

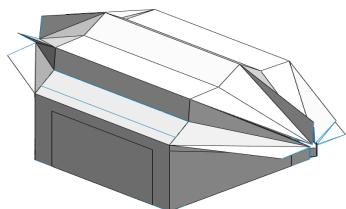
ヒンジ・サポーター



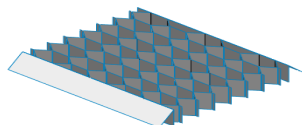
立体形状の安定性の強化



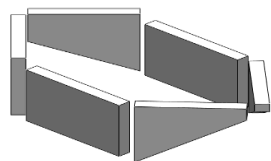
ねじり角柱・反転らせん構造



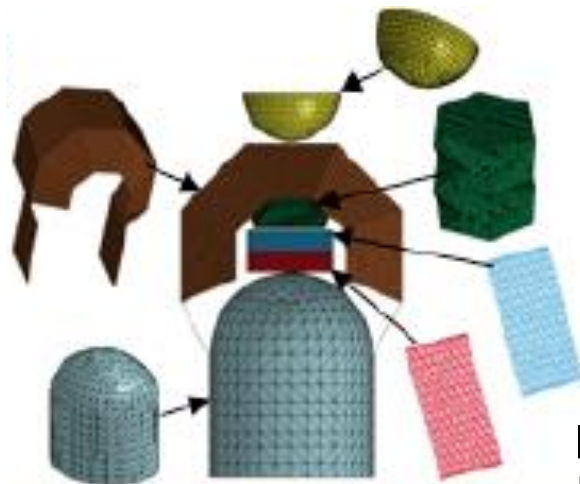
蛇腹折りカバー



ハニカム構造

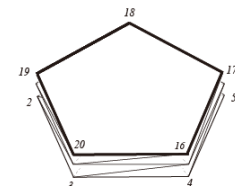


ウレタン保護材



NHK総合 超絶 凄(すご)ワザ!
「最強の帽子対決」2016

ねじり角柱構造



イノベーション・ジャパン2017 ～大学見本市とビジネスマッチング～

2017年8月31日～9月1日
国際展示場 東京ビッグサイト

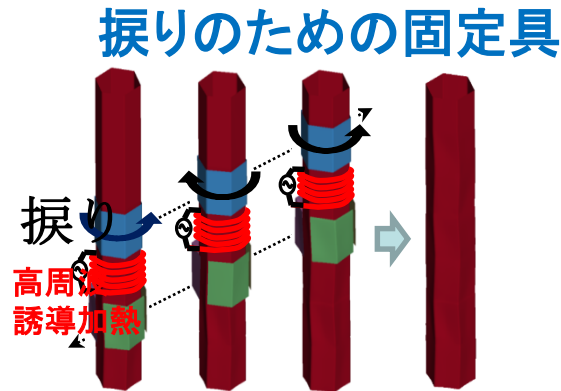
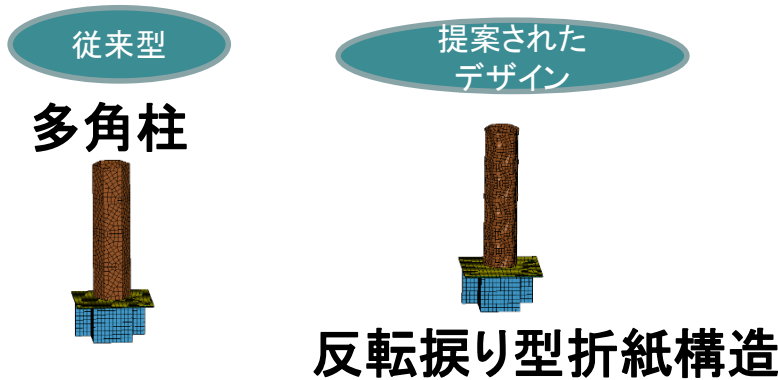
折紙工学 ～新たな工法による折紙工学の新展開～

-
4. 新しいエネルギー吸収材／反転振り型折紙構造
 5. 防振器（折りたたみ構造の非線形ばね特性を利用した2種類の防振器）

反転らせん構造の応用

自動車用衝撃吸収バンパー

防振器



力を与えるための固定具



PP製折り畳み可能な構造体とばね

参考文献: 萩原一郎, 趙希祿, 衝撃吸収体の製造装置および衝撃吸収体の製造方法,
特願2017-089216, 出願日: 平成29年4月28日

ご清聴ありがとうございました！