

クレジット：

UTokyo Online Education 学術俯瞰講義 2016 舘 知宏

ライセンス：

利用者は、本講義資料を、教育的な目的に限ってページ単位で利用することができます。特に記載のない限り、本講義資料はページ単位でクリエイティブ・コモンズ 表示-非営利-改変禁止 ライセンスの下に提供されています。

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

本講義資料内には、東京大学が第三者より許諾を得て利用している画像等や、各種ライセンスによって提供されている画像等が含まれています。個々の画像等を本講義資料から切り離して利用することはできません。個々の画像等の利用については、それぞれの権利者の定めるところに従ってください。



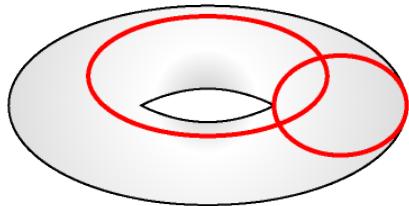
折紙のメカニズム

館 知宏

東京大学 教養学部 学際科学科

前回の補遺：紙の縁の話

- 一つ目の話：
紙の縁をどこに配置する
必要がある

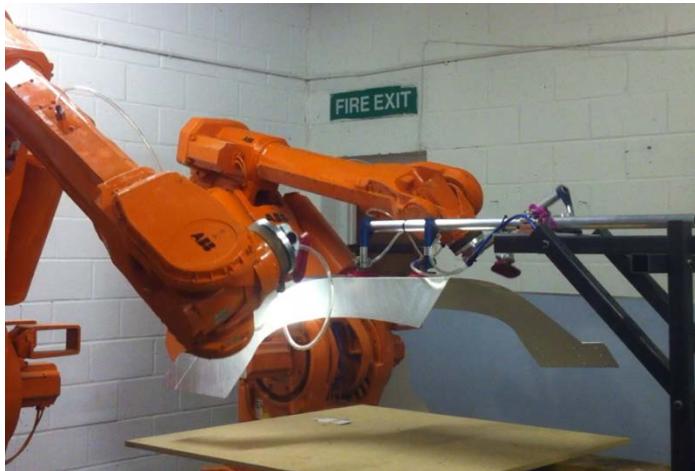


- 二つ目の話：
トーラスだと、紙の縁をどこに配置してもよい形がある
 - トーラスの全曲率(ガウス曲率の面積分)が0
 - 球は全曲率が 4π
紙部分の全曲率は0なので、
紙の縁に曲率が集中する



前回のあらすじ：

- 一枚のシートを折るだけで作れる
 - 材料を伸び縮みさせない
 - 組み立てを簡略化
- パターンを変えるとかたちが変わる



Robofold (Gregory Epps)

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました

RoboFold
ARUM for Zaha Hadid Architects
<http://www.robofold.com/make/consultancy/projects/arum-for-zaha-hadid-architects>

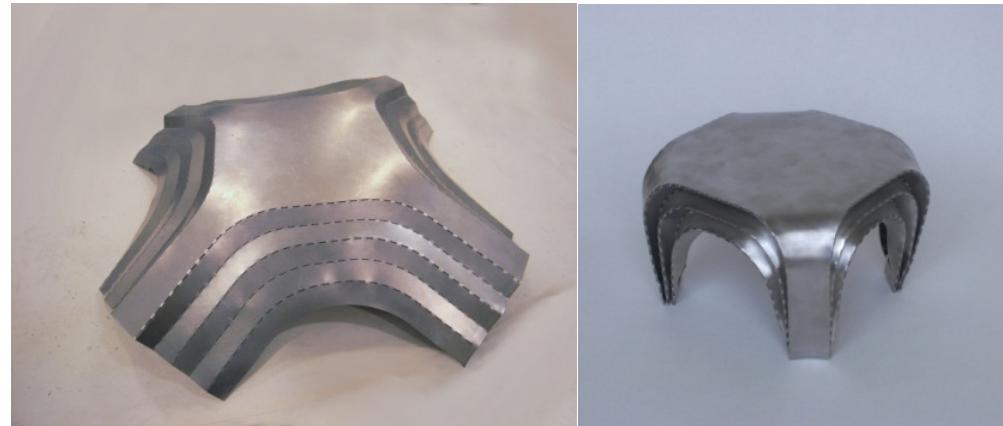
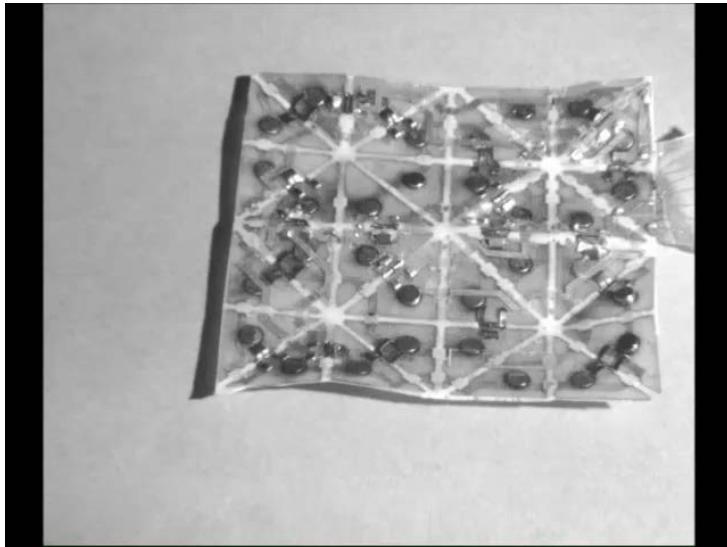


Table 2008
(T. Tachi and D. Koschitz)

何でも作れる！
でも、たいへん！



自己折り (Self-Folding)



Programmable matter
[Hawkes, An, Benbernou, Tanaka,
Kim, Demaine, Rus, Wood 2009]

E. Hawkes, B. An, N. M. Benbernou, H. Tanaka, S. Kim, E. D.
Demaine, D. Rus, R. J. Wood
Proc Natl Acad Sci U S A. 2010 July 13; 107(28): 12441–12445.
Published online 2010 June 28. doi: 10.1073/pnas.0914069107
<http://vs2ga4mq9g.scholar.serialssolutions.com/?sid=google&auini=E&aulast=Hawkes&atitle=Programmable+matter+by+fold+ing&id=pmid:20616049>
Supplemental Material
Movie S1 (0914069107_SM01.mpg)

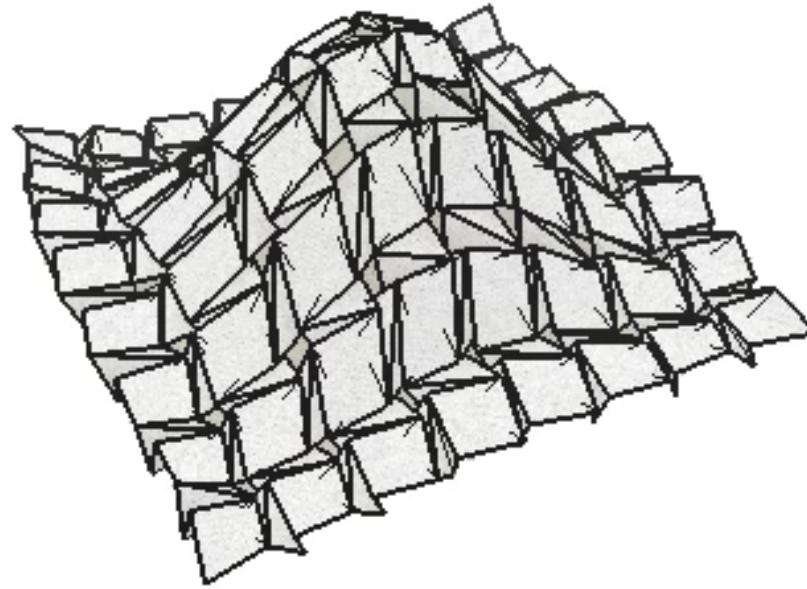
著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました

J.-H. Na, A.A. Evans, J. Bae, M.C. Chiappelli, C.D. Santangelo, R.J. Lang, T. Hull, R.C. Hayward, “Programming reversibly self-folding origami with micropatterned photo-crosslinkable polymer trilayers”, Advanced Materials, 27, 79-85 (2015). DOI: 10.1002/adma.201403510
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.201403510/full> p. 83, Figure 5 Origami tessellation.

Self-folding Polymer Gel
[Na, Santangelo, Lang, Hull,
Hayward 2014]

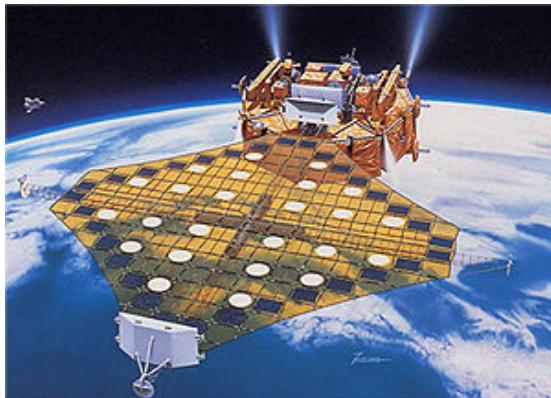
手で折らなくても良い方法がある！

折りの「動き」を考える必要がある



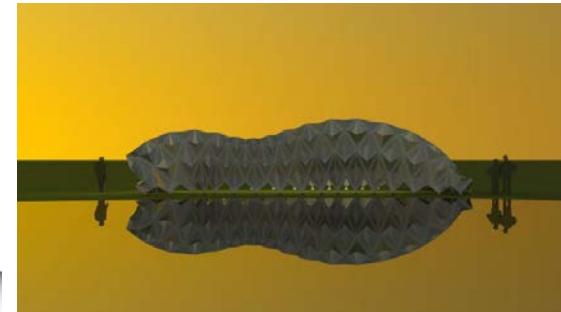
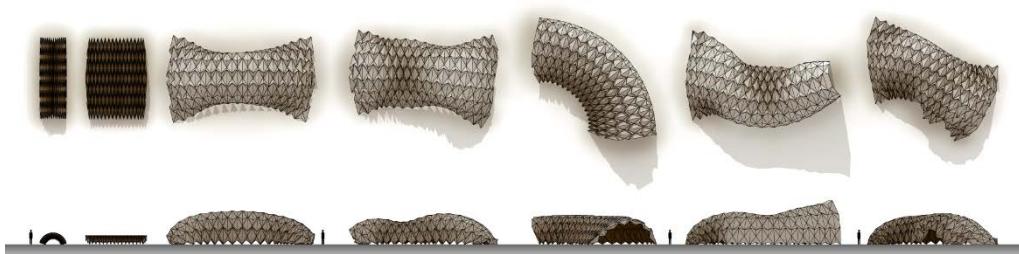
折りの動きがあるか？

折紙の良さ：動く！（展開構造物）



solar array folding using Miura-ori
SFU, ISAS JAXA

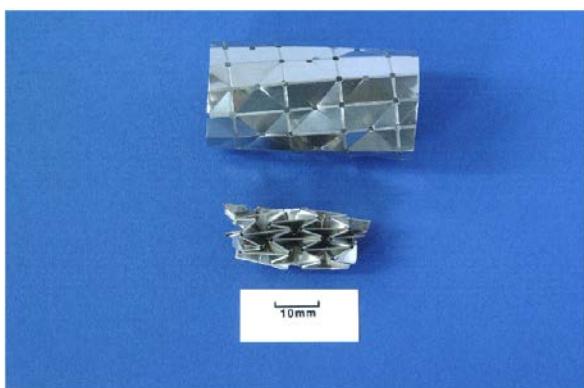
宇宙科学研究所
2D Array(2次元展開実験)
http://www.isas.jaxa.jp/j_enterp/missions/sfu/2dsa.shtml
2d01.jpg



reconfigurable Pavilion
[Tachi Masubuchi Iwamoto 2011]

Ori gami Stent Graft
(You and Kuri bayashi)

Kaori Kuri bayashi, "A Novel Foldable Stent Graft"
http://www.eng.ox.ac.uk/civil/publications/theses/kuri_b.pdf
p. 119, Figure 6.5 Stent graft with helical folds
in its fully folded and deployed configurations.
Again holes exist in the folding pattern.



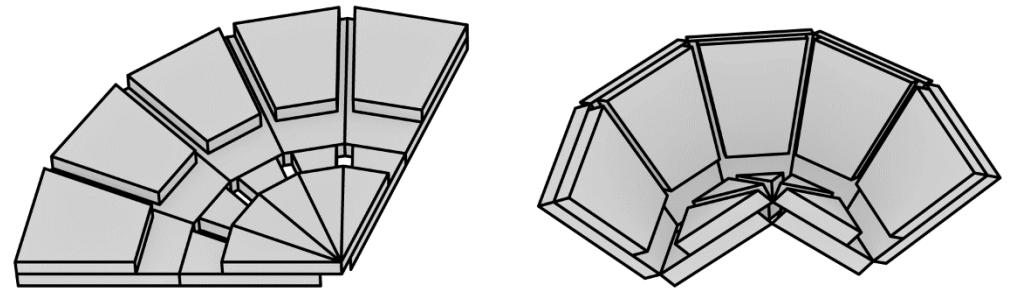
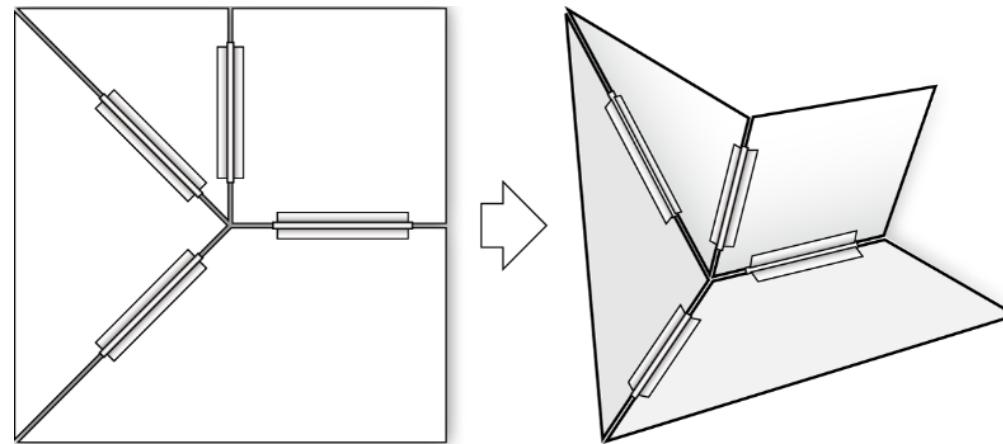


剛体折紙

Rigid Origami

剛体折紙

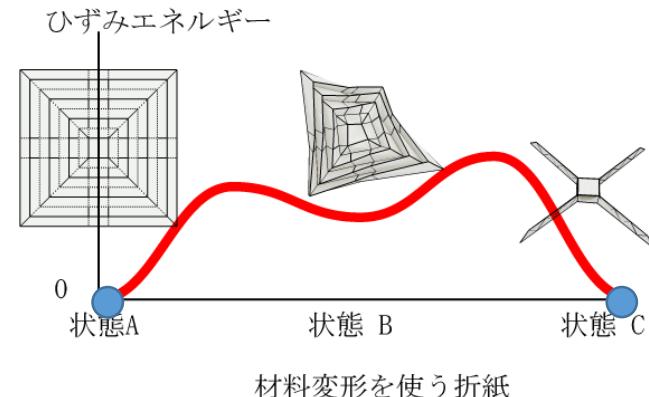
- パネルと蝶番のメカニズム
- 厚みのあるパネル
- 大きなスケールへ応用可能



剛体折紙モデルでメカニズムになるか？

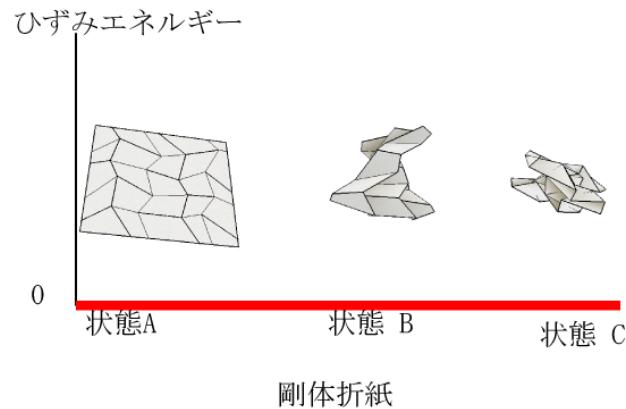
- 折り状態の存在(Existence of Folded State)

それぞれの面が合同な立体状態があるか？



- 剛体折り可能性(Rigid Foldability)

ある状態からある状態への連続的な変形があるか？



機構

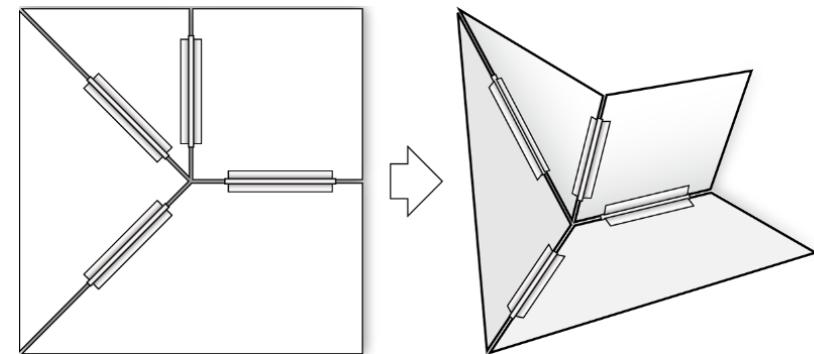
Kinematic System

- 変数 Variables

折り線の「折り角」

(180° – 二面角)

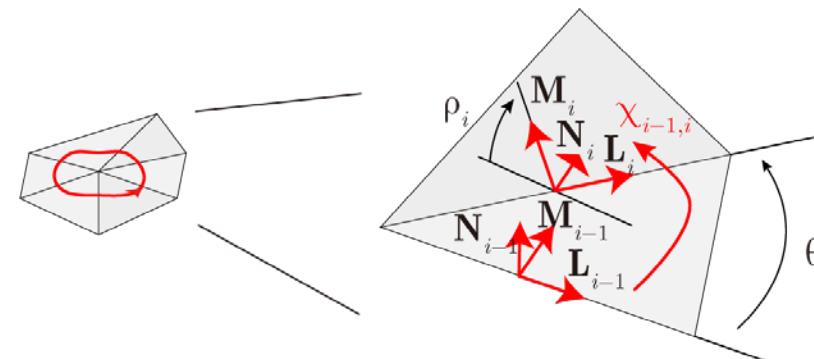
変数：各折り線につき1



- 等式 Equations

拘束：各頂点につき3

(回転の合同)



$$\mathbf{R}(\rho_0, \dots, \rho_{n-1}) = \chi_{0,1} \cdots \chi_{n-1,n} = \mathbf{I}$$

$$\chi_{i-1,i} = \mathbf{Y}_{i-1,i} \mathbf{P}_i$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta_{i-1,i} & -\sin \theta_{i-1,i} & 0 \\ \sin \theta_{i-1,i} & \cos \theta_{i-1,i} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \rho_i & -\sin \rho_i \\ 0 & \sin \rho_i & \cos \rho_i \end{bmatrix}$$

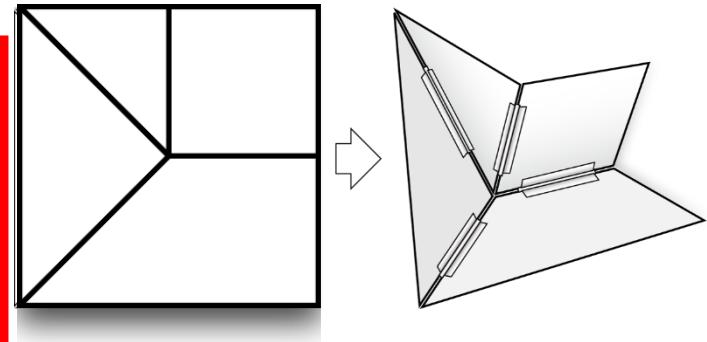
- 連立方程式

だいたい、こんなかんじ

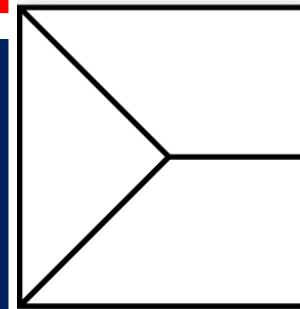
- もし縮退が無ければ

➤ #変数 - #等式 = 自由度 > 0
不安定
(機構)

变形可能

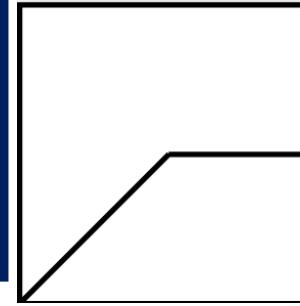


➤ #変数 - #等式 = 0
安定構造
(静定)



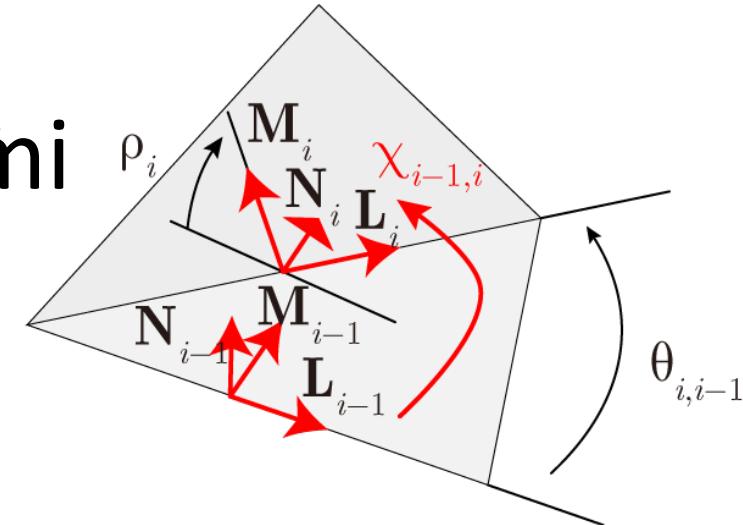
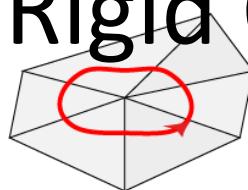
➤ #変数 - #等式 < 0
安定構造
(不静定)

变形不可能



单頂点剛体折紙

Single Vertex Rigid Origami



[Belcastro and Hull 2002]

$$\mathbf{R}(\rho_0, \dots, \rho_{n-1}) = \chi_{0,1} \cdots \chi_{n-1,n} = \mathbf{I}$$

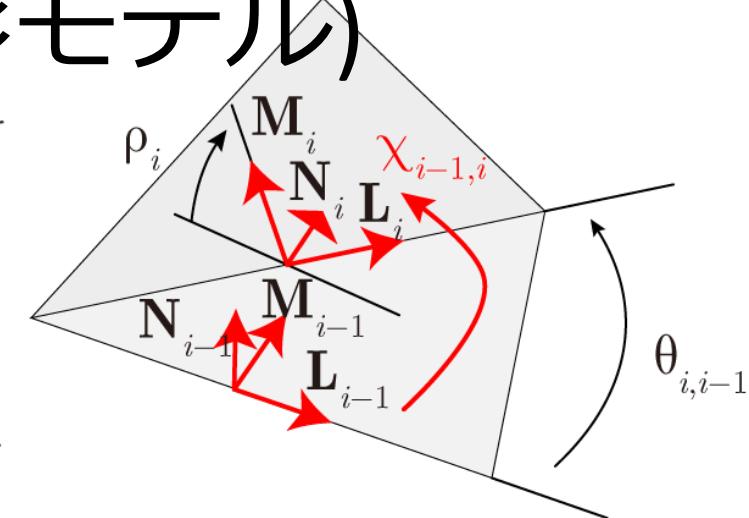
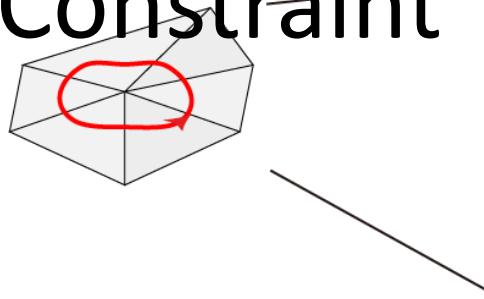
where

$$\chi_{i-1,i} = \mathbf{Y}_{i-1,i} \mathbf{P}_i$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta_{i-1,i} & -\sin \theta_{i-1,i} & 0 \\ \sin \theta_{i-1,i} & \cos \theta_{i-1,i} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \rho_i & -\sin \rho_i \\ 0 & \sin \rho_i & \cos \rho_i \end{bmatrix}$$

拘束の微分 (微少変形モデル)

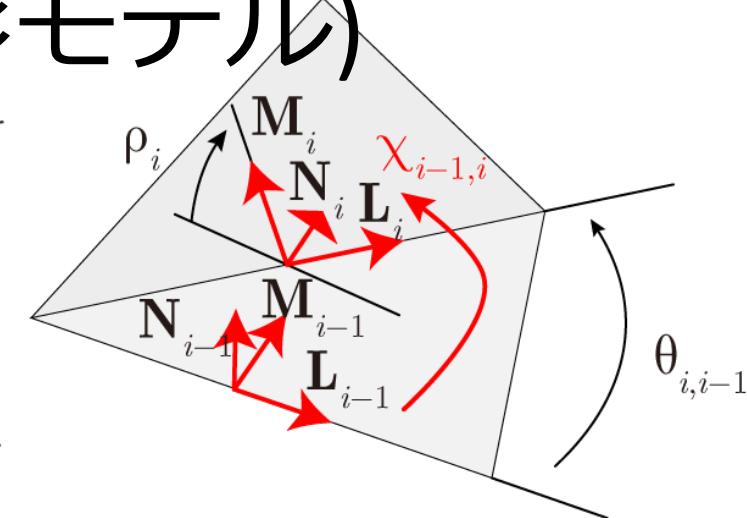
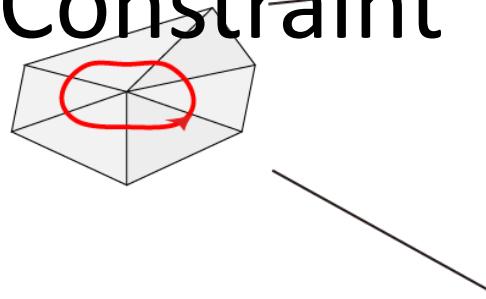
Derivative of Constraint



$$\frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \rho_i} = \chi_{0,1} \cdots \frac{\partial \chi_{i-1,i}}{\partial \rho_i} \cdots \chi_{n-1,n} \Big|_{\mathbf{R}=\mathbf{I}} = \begin{bmatrix} 0 & -L_i^z & L_i^y \\ L_i^z & 0 & -L_i^x \\ -L_i^y & L_i^x & 0 \end{bmatrix}$$

拘束の微分 (微少変形モデル)

Derivative of Constraint



$$\frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \rho_i} = \chi_{0,1} \cdots \frac{\partial \chi_{i-1,i}}{\partial \rho_i} \cdots \chi_{n-1,n} \Bigg|_{\mathbf{R}=\mathbf{I}} = \begin{bmatrix} 0 & -L_i^z & L_i^y \\ L_i^z & 0 & -L_i^x \\ -L_i^y & L_i^x & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{3,2} \\ \mathbf{R}_{1,3} \\ \mathbf{R}_{2,1} \end{bmatrix}, \quad \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \rho_i} = \begin{bmatrix} L_i^x \\ L_i^y \\ L_i^z \end{bmatrix}$$

3 conditions related to angular constraint

DOF in Generic Triangular Mesh

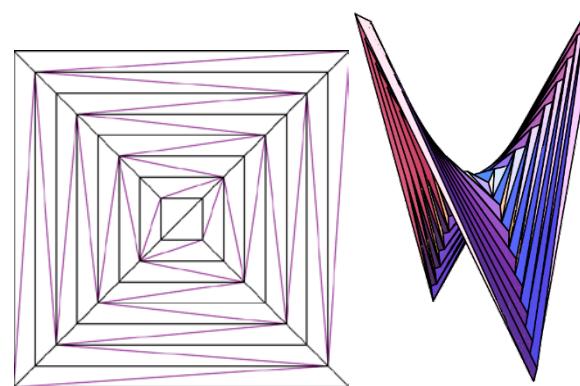
Euler's: $(V_{in} + E_{out}) - (E_{out} + E_{in}) + F = 1$

Triangle : $3F = 2E_{out} + E_{in}$

Mechanism: $DOF = E_{in} - 3V_{in}$

Disk with E_{out} outer edges

$$DOF = E_{out} - 3$$



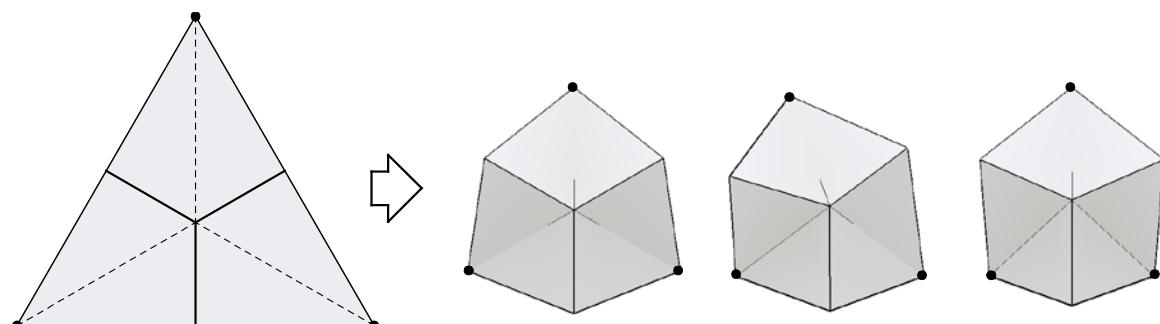
Ex. Hexagonal boundary:

$$E_{out} = 6 \quad DOF = 6 - 3 = 3$$

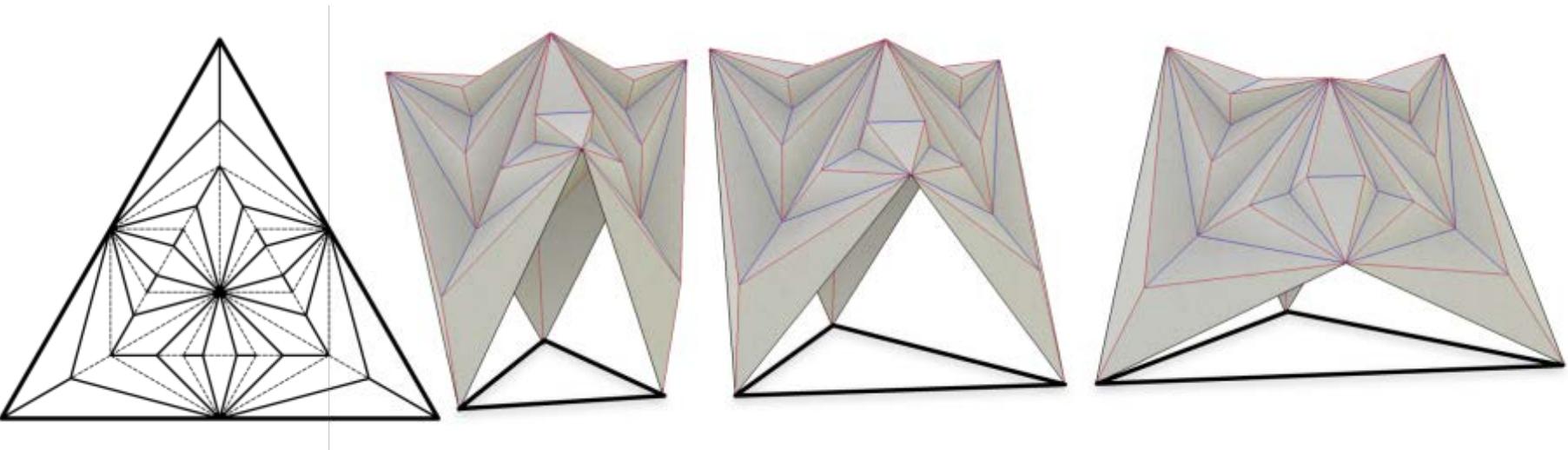
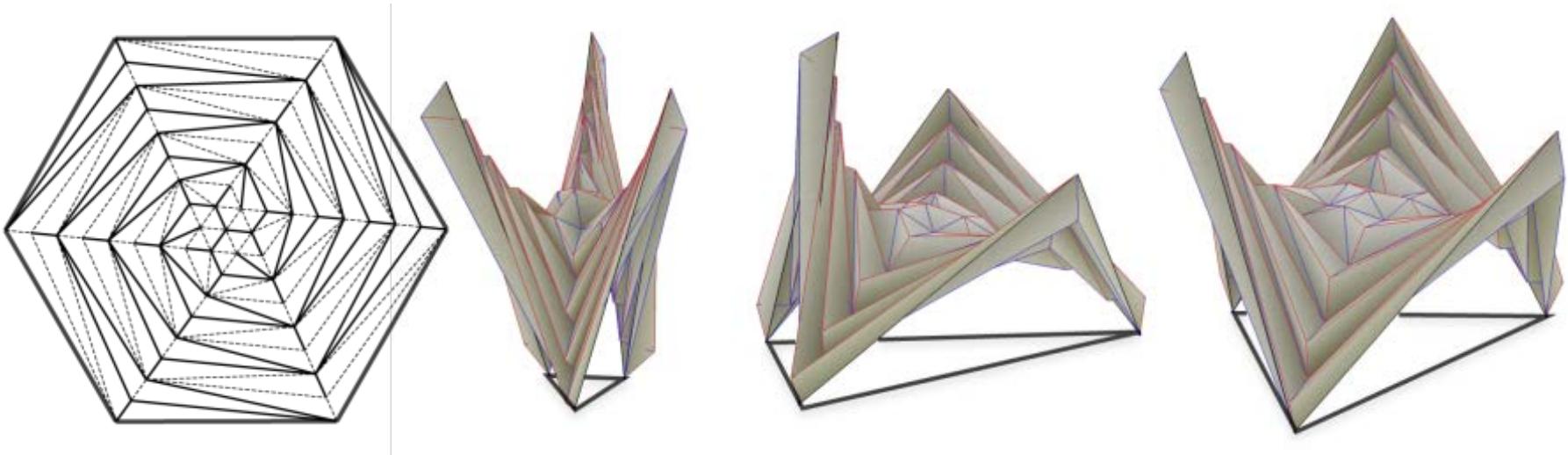
3 pin joints (x,y,z):

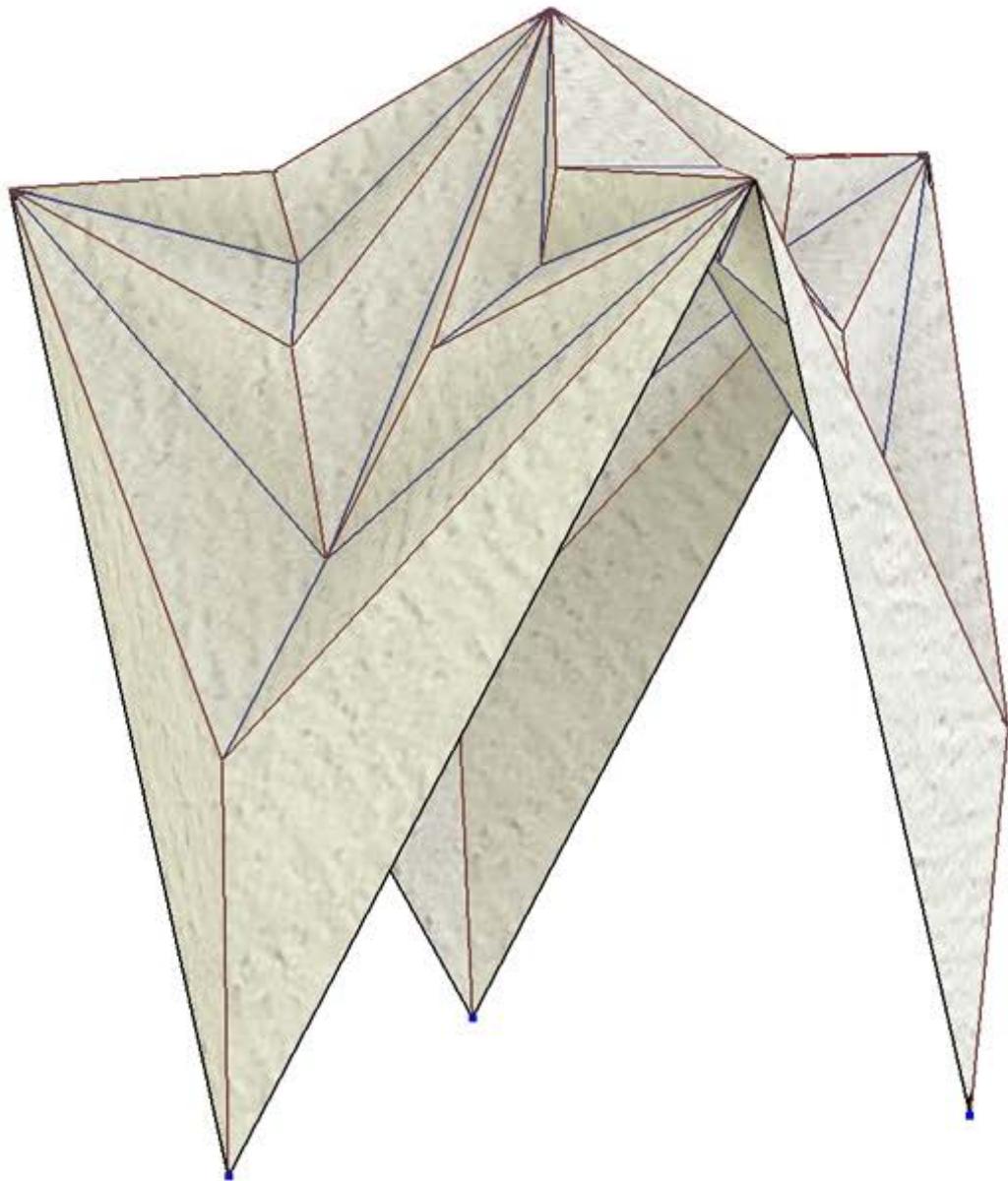
$$\therefore 3 \times 3 = 9 \text{ constraints}$$

$$\text{rigid body DOF} = 6$$

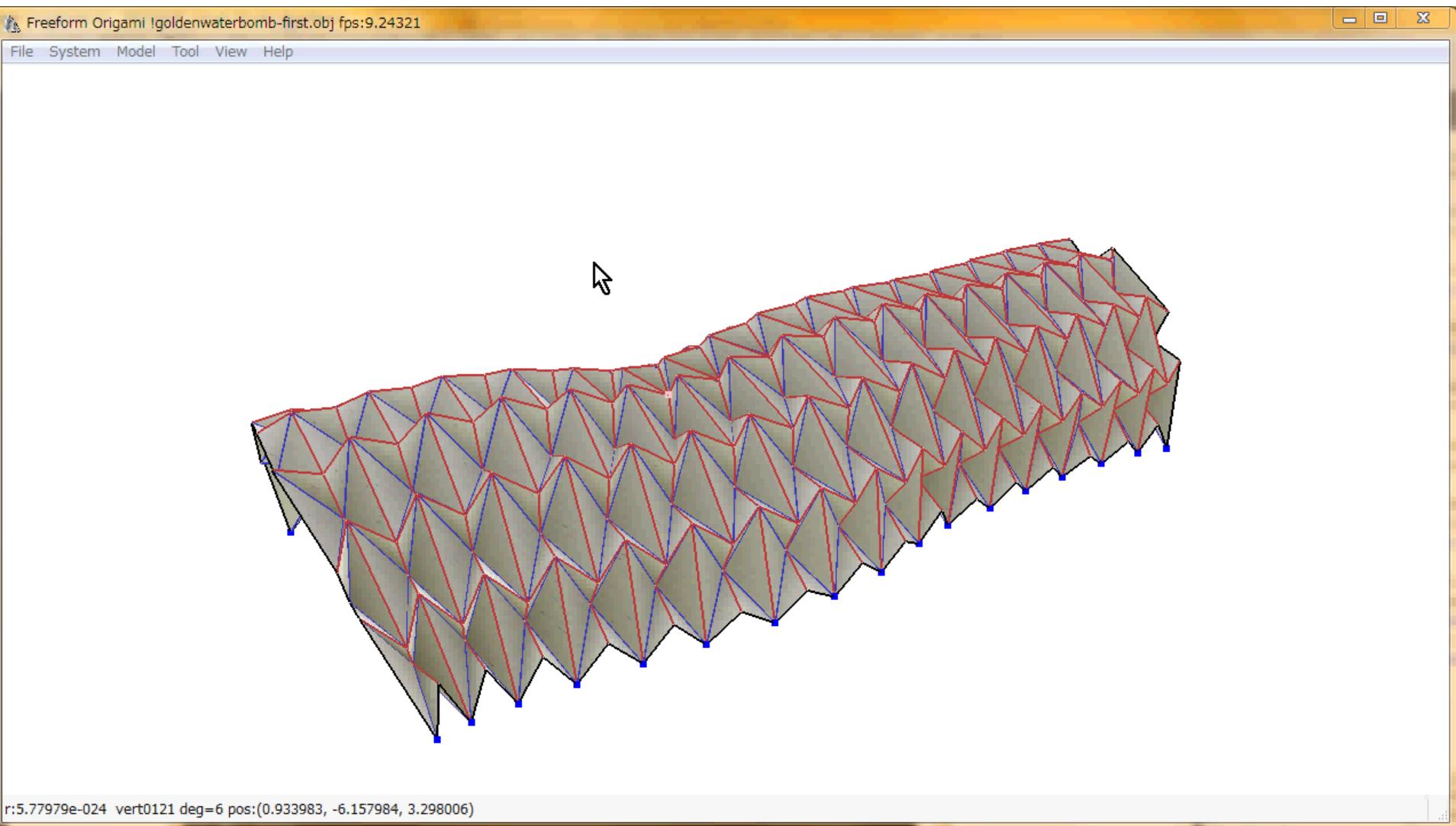


Hexagonal Tripod Shells



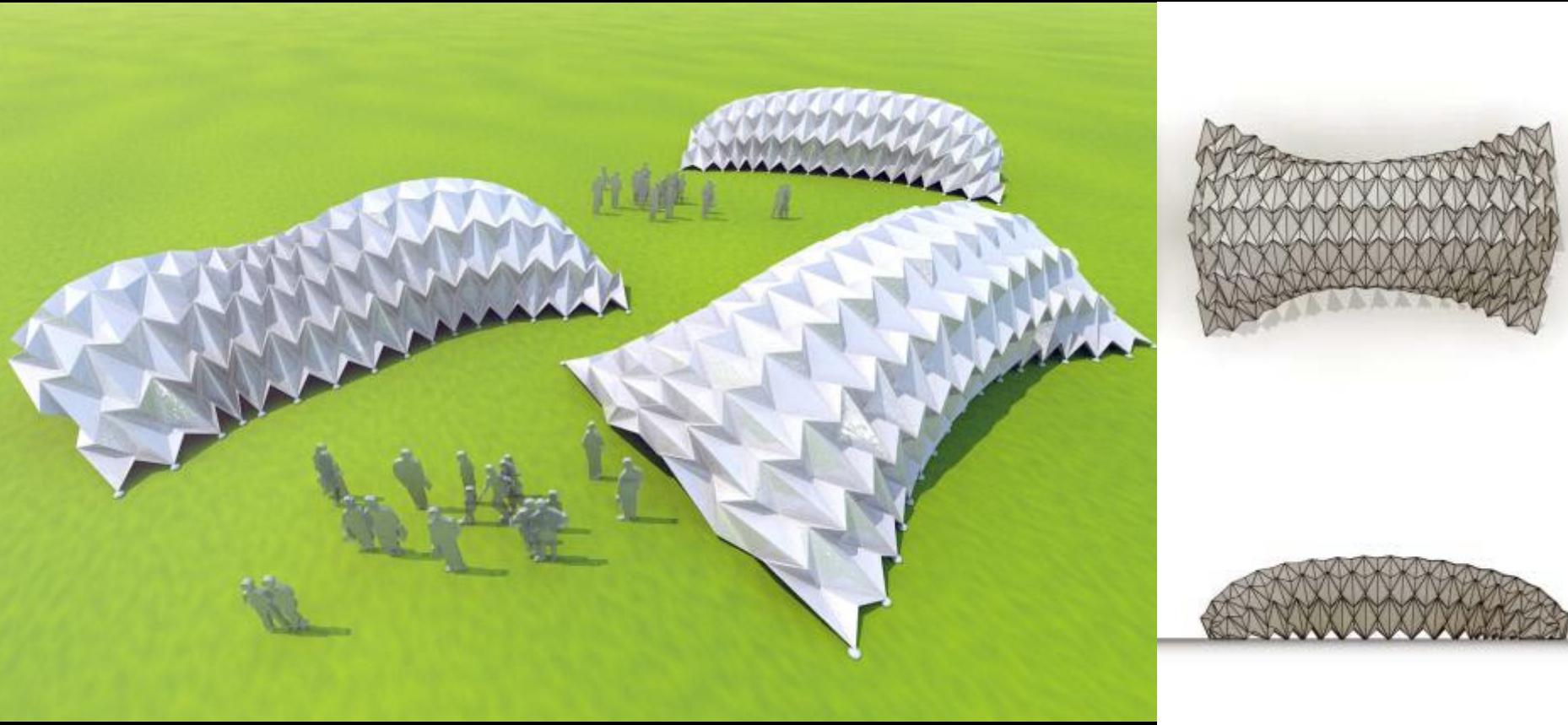


Large # of DOFs



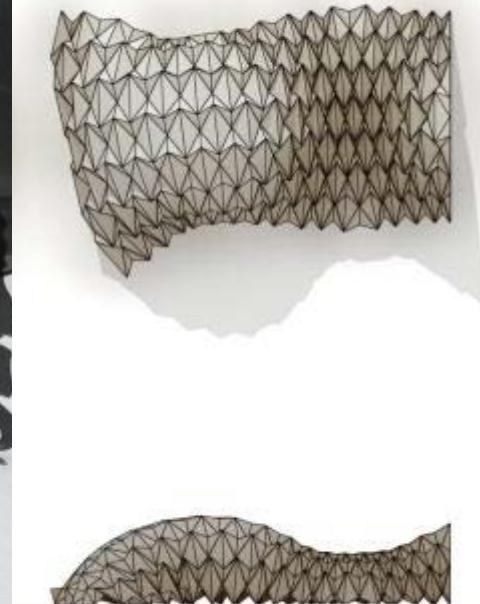
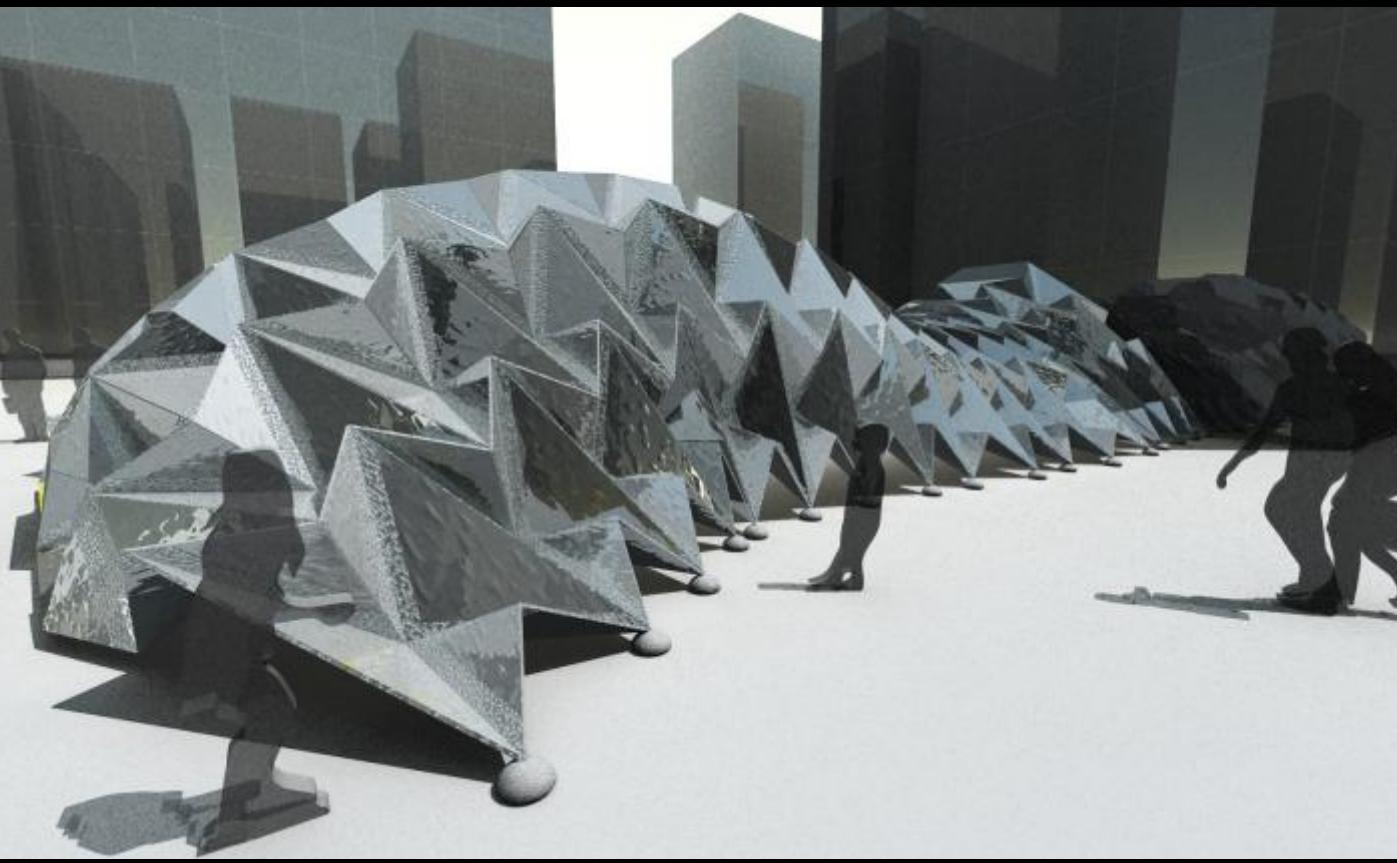
日本建築学会 コロキウム構造形態の解析と創生2011 形態創生コンテスト
岩元真明 舘知宏 増渕基「柔らかな剛体」
http://news-sv.aij.or.jp/kouzou/s17/colla2011/contest/sakuhi_n/1-2.pdf

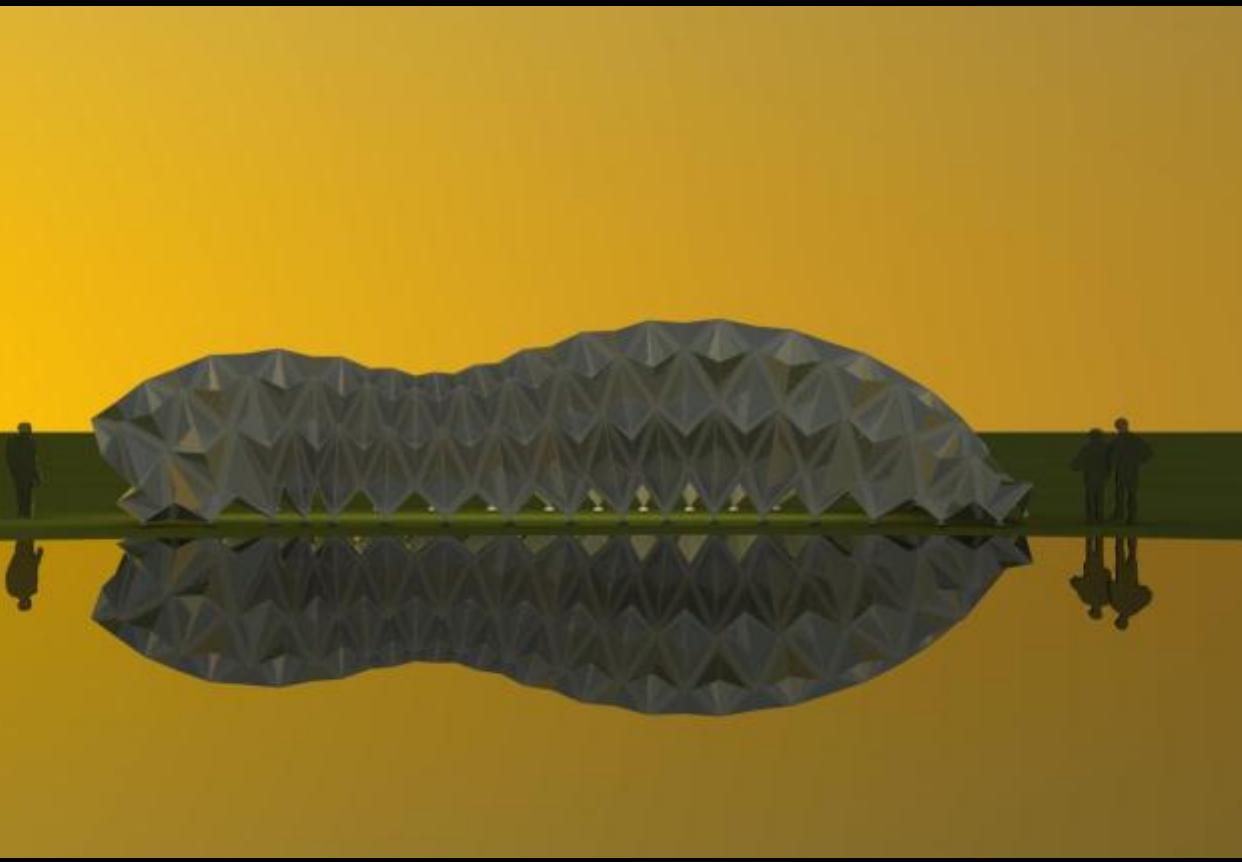
Tomohiro Tachi, Motoi Masubuchi, and Masaaki Iwamoto, "Rigid Origami Structures with Vacuumatics: Geometric Considerations", in Proceedings of the IASS-APCS 2012, Seoul, Korea, May 21-24, 2011
<http://www.tsg.ne.jp/TT/cg/VacuumaticorigamiIASS2012.pdf>
Fig. 8



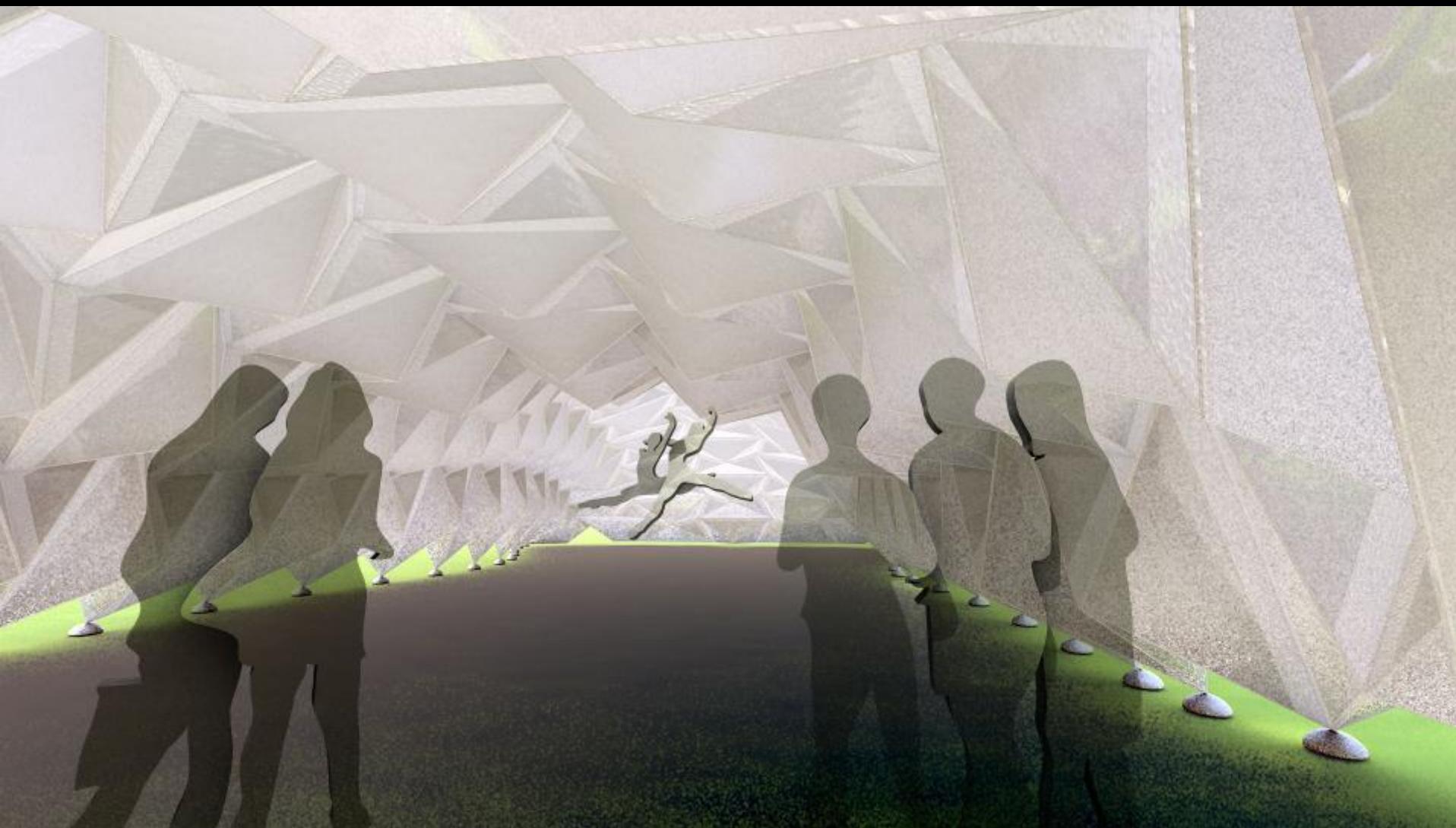
Tomohiro Tachi, Motoi Masubuchi, Masaaki Iwamoto



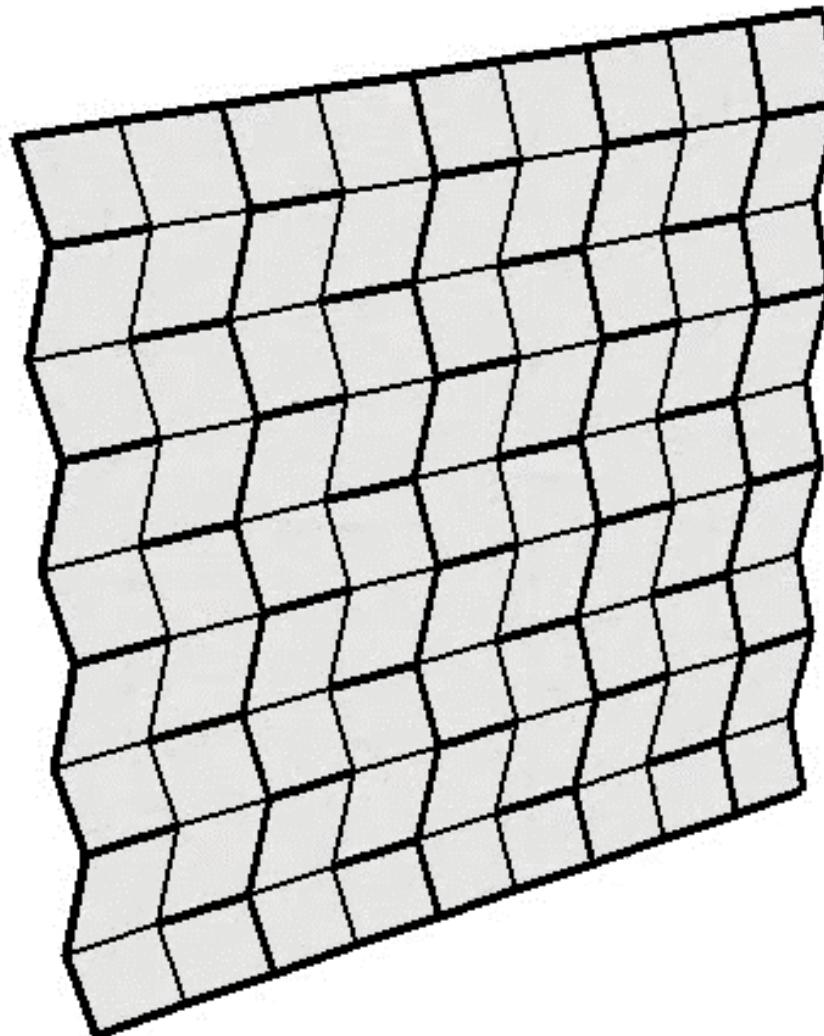




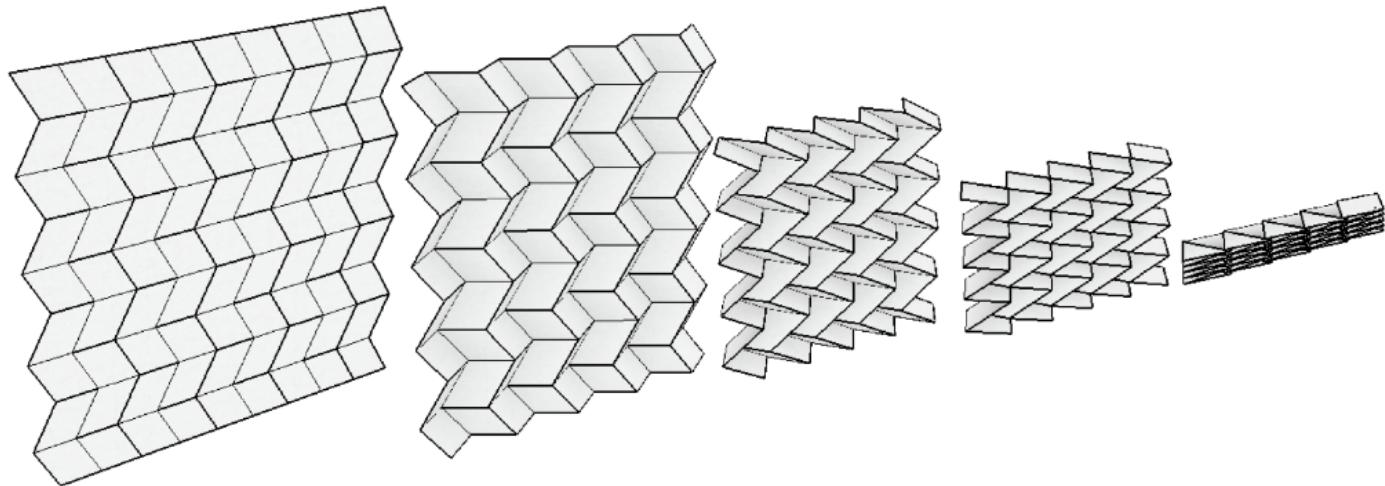
Tomohiro Tachi's Page
Research Projects
<http://www.tsg.ne.jp/TT/cg/>
Rigid Origami Structures with
Vacuumatics
collaboration with Motoi Masubuchi,
and Masaaki
Iwamoto (origami vacuumatics.jpg)



閑話休題 ミウラ折りはなぜ折れる？



数える



- $n \times m$

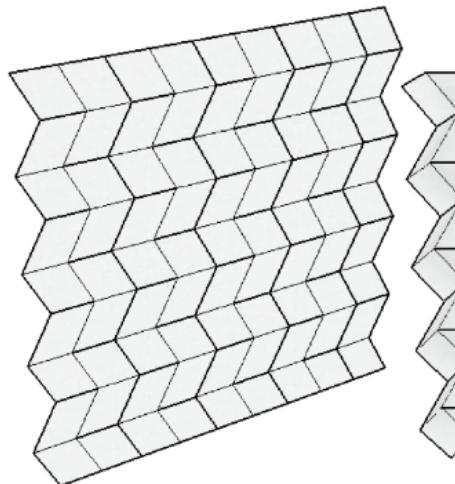
$$\#var - \#eq. = -(n-2)(n-2) + 1$$

変数の数 < 拘束の数

数える

変形可能性と自由度

- もし縮退が無ければ



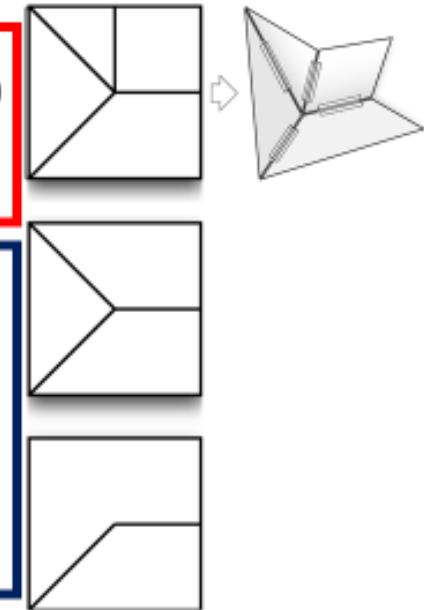
➤ #変数 - #等式 = 自由度 > 0
不安定
(機構)

変形可能

➤ #変数 - #等式 = 0
安定構造
(静定)

➤ #変数 - #等式 < 0
安定構造
(不静定)

変形不可能



- $n \times m$

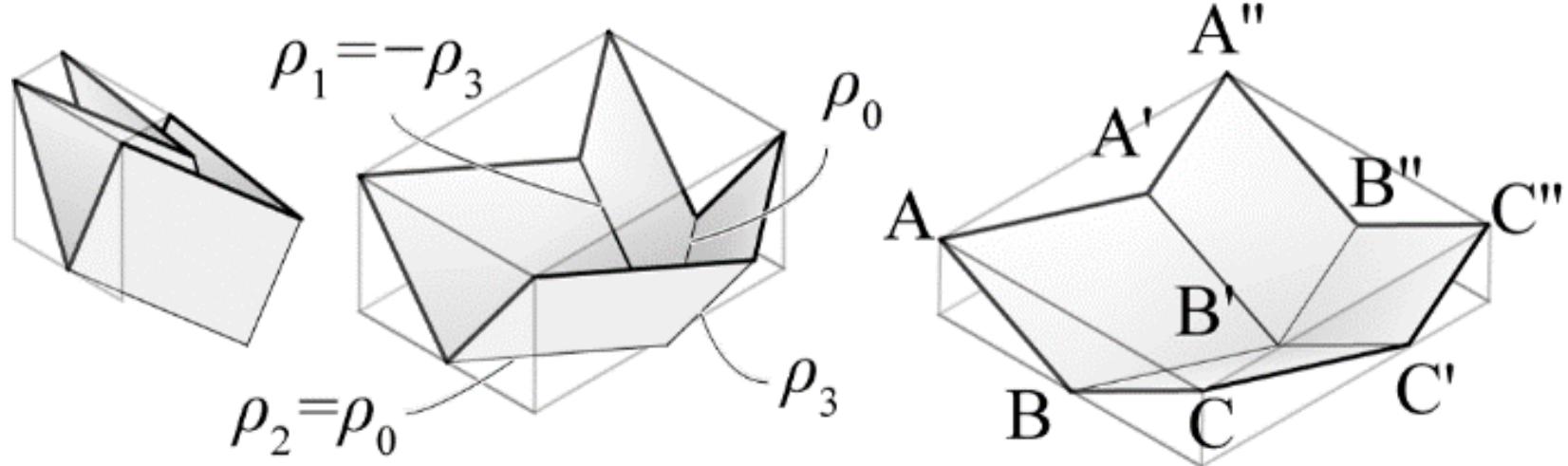
$$\#var - \#eq. = -(n-2)(m-2) + 1$$

変数の数 < 拘束の数

普通だったら、折れないはず

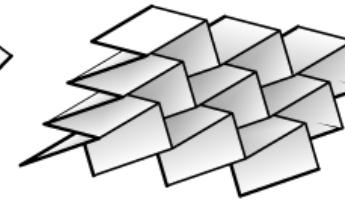
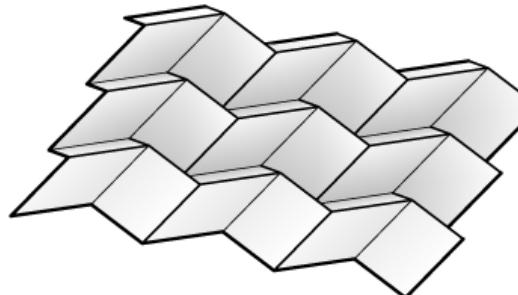
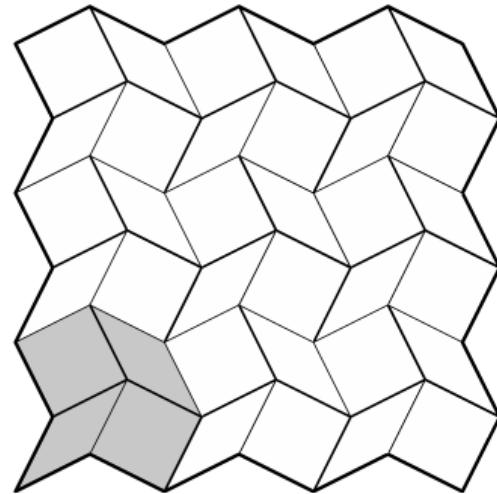
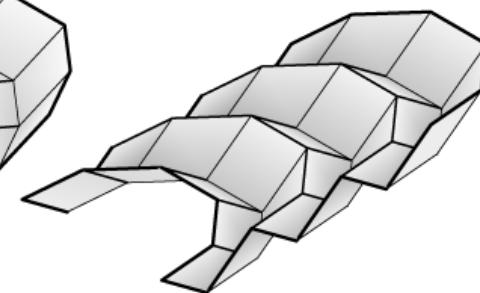
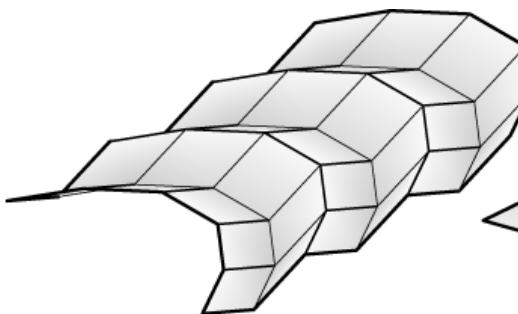
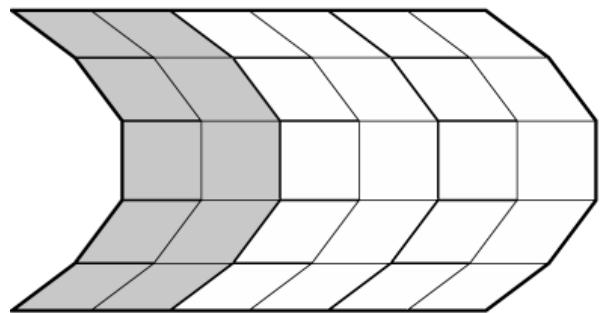
ミウラ折りは「普通」ではない。
拘束が縮退している

繰り返しの対称性が冗長性を生む



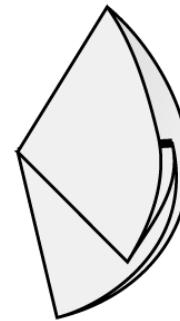
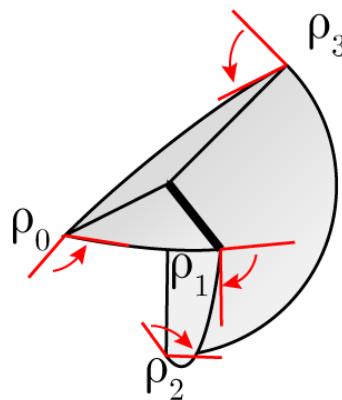
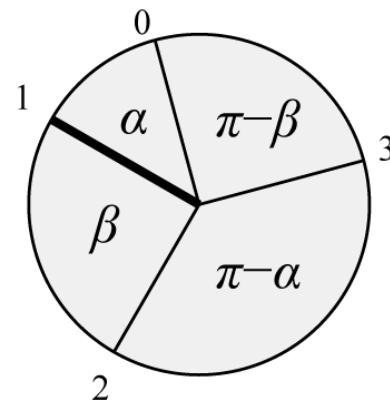
- 繰り返しの対称性によって、拘束が冗長になっている
- この特異性は、メカニズムに沿った変形によって変化しない
- Finite Mechanism with Excess constraints:
過拘束メカニズム
“Overconstrained Mechanism”

繰り返し型の一般化



- 繰り返しがない構造で、過拘束メカニズムが作れないか？
- **Can a quad mesh foldable even without repeating symmetry ?**

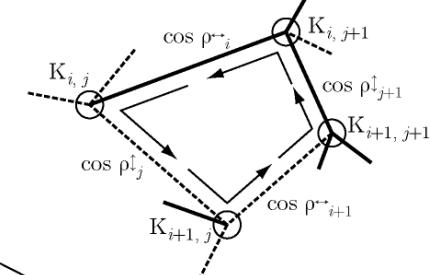
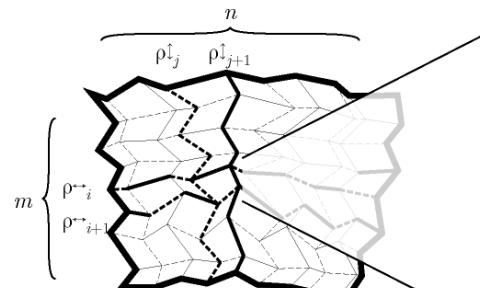
繰り返しのない一般化



- 内角の対角和が 180° の場合
($\alpha, \beta, \pi - \alpha, \pi - \beta$)
- 折り角は対が等しくなる
 $\rho_0 = \rho_2$ and $\rho_1 = -\rho_3$

定数！

$$\tan \frac{\rho_3}{2} = \frac{1 - \tan \frac{\alpha}{2} \tan \frac{\beta}{2}}{1 + \tan \frac{\alpha}{2} \tan \frac{\beta}{2}} \tan \frac{\rho_0}{2}$$



- 形の条件

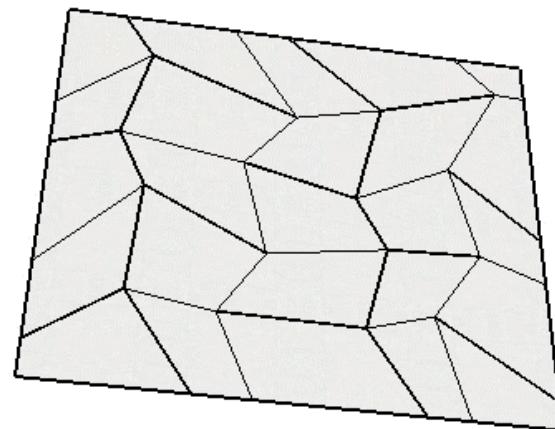
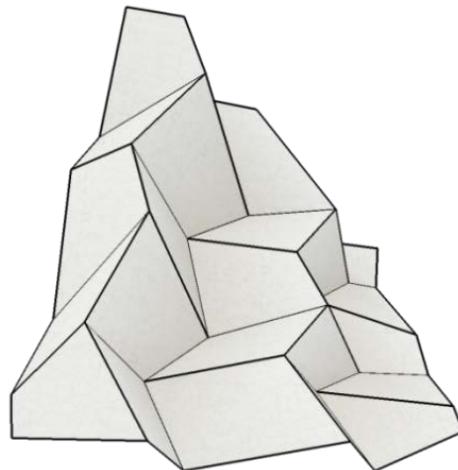
- 可展性 Developability
- 平坦可折性 Flat-foldability
- 面の平坦性

$$\begin{bmatrix} \tan \frac{\rho_1(t)}{2} \\ \tan \frac{\rho_2(t)}{2} \\ \vdots \\ \tan \frac{\rho_N(t)}{2} \end{bmatrix} = \lambda(t) \begin{bmatrix} \tan \frac{\rho_1}{2} \\ \tan \frac{\rho_2}{2} \\ \vdots \\ \tan \frac{\rho_N}{2} \end{bmatrix}_{t=t_0}$$

- 形の問題

↔

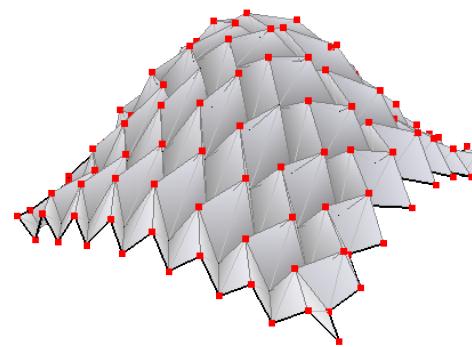
動きの問題



Generalization of Rigid-Foldable Quadrilateral-Mesh Origami
[Tachi 2009]

形態創生 Form-Finding

- 変数
 - 頂点座標 ($3N_V$)
- 拘束 ($2N_{V_{in}}$)
 - 可展性
 - 平坦可折性
 - 四辺形の平面性



$$\mathbf{g}_v = 2\pi - \sum_{i=0}^{kv} \theta_i = 0$$

$$\mathbf{f}_v = \sum_{i=0}^{kv} \text{sgn}(i) \theta_i = 0$$

$$h_{pq} = \rho_{ij} = 0$$

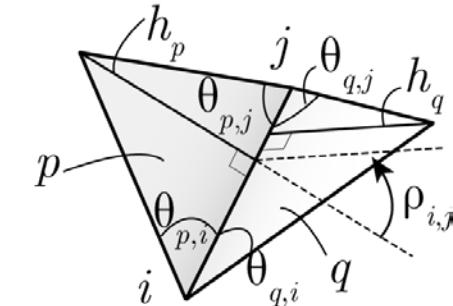
変数の数 > 拘束の数のシステムとなる

underdetermined system

→ 多次元の解空間で、自由にデザイン可能

Multi-dimensional Solution Space

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ \vdots \\ x_{N_v} \\ y_{N_v} \\ z_{N_v} \end{bmatrix}$$

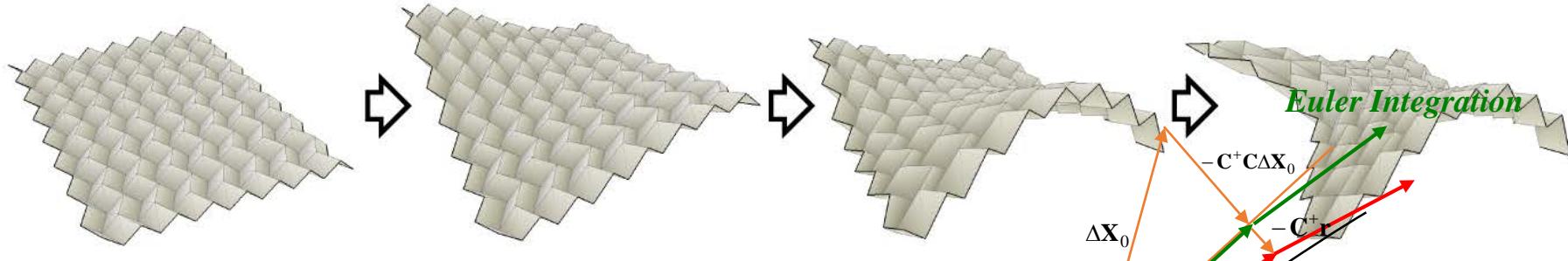


解から別の解を導く

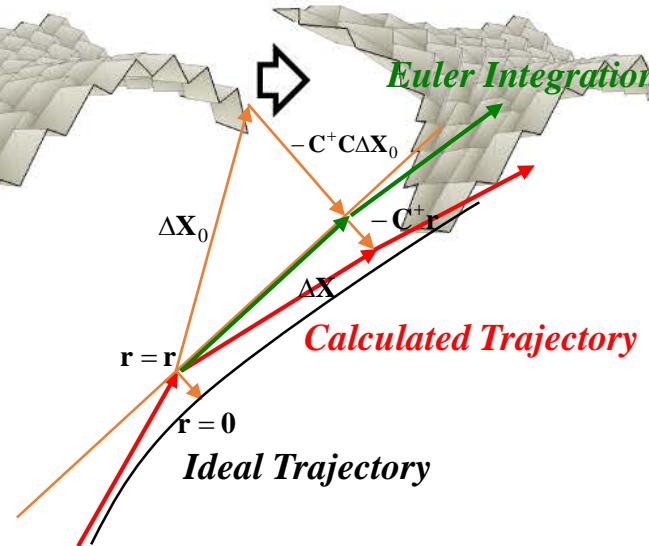
$$C\Delta X^i = \begin{bmatrix} \frac{\partial g(X^i)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g(X^i)}{\partial z_V} \\ \frac{\partial f(X^i)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f(X^i)}{\partial z_V} \\ \frac{\partial h(X^i)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial h(X^i)}{\partial z_V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \vdots \\ \Delta z_V \end{bmatrix} = 0$$

となる変位 ΔX_i を求めて、
解のバリエーションを出す

$$X_{i+1} = X_i + \Delta X_i$$

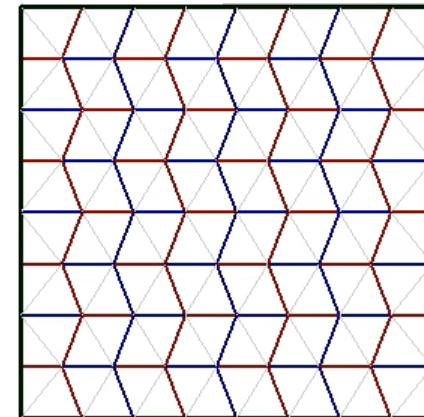
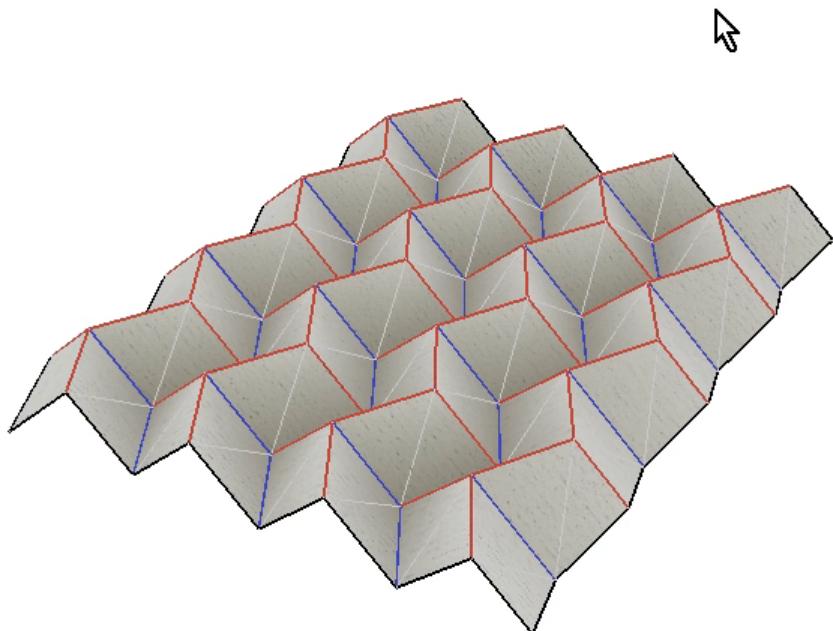


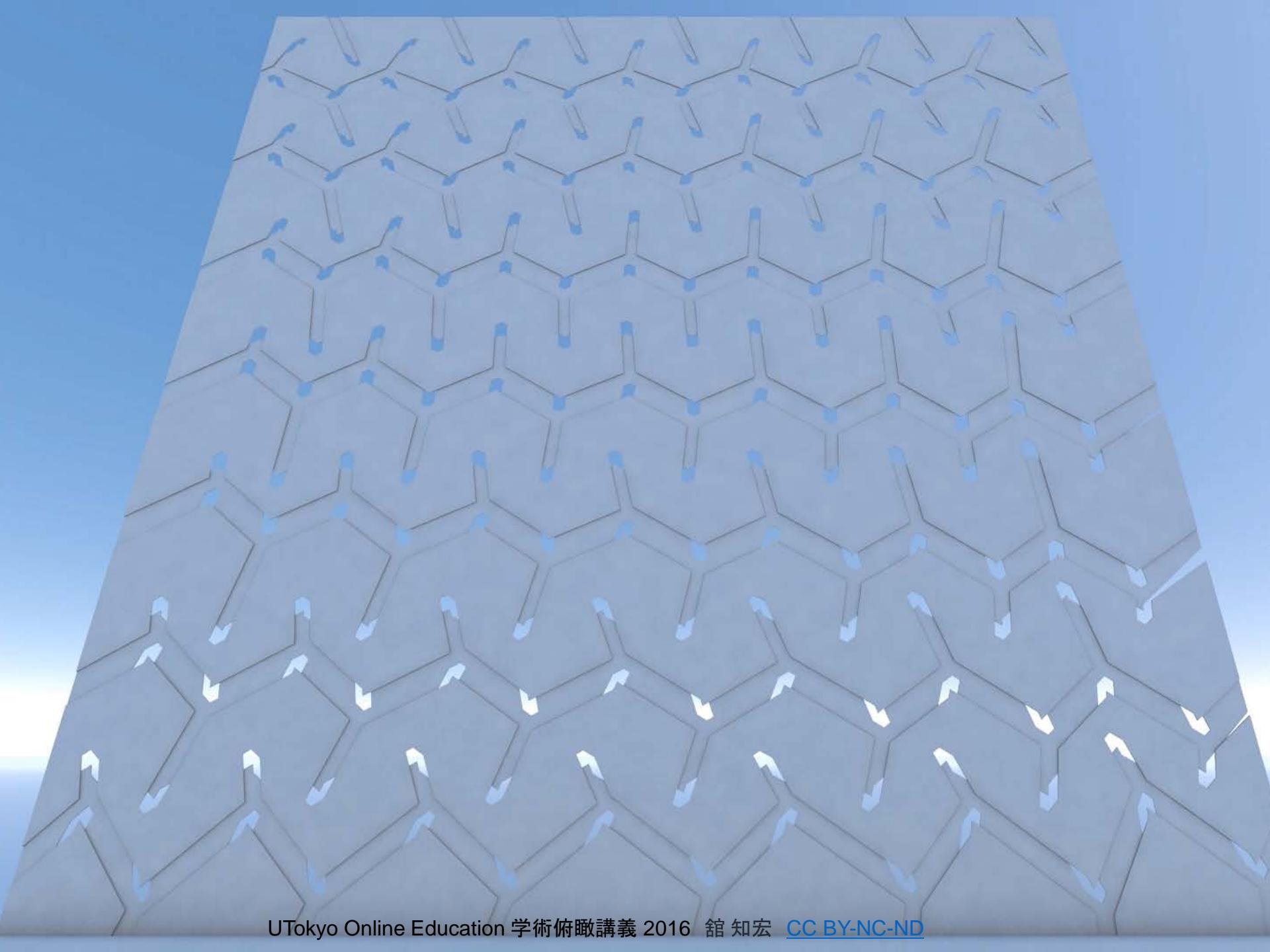
$$\Delta X = -C^+ r + (I_{3N_v} - C^+ C) \Delta X_0$$

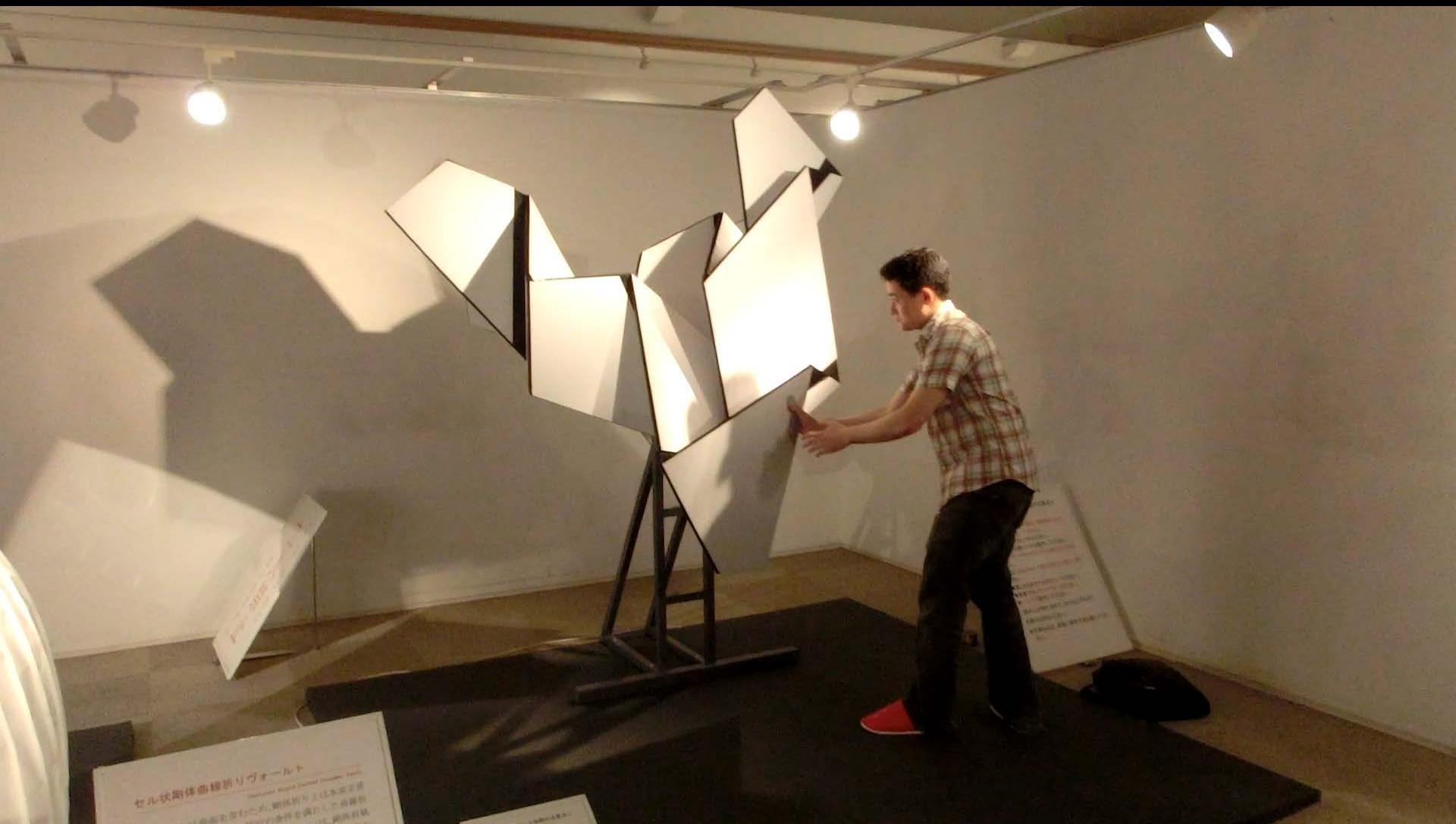


Interactive Form Finding (Freeform Origami)

File System Model Tool View Help

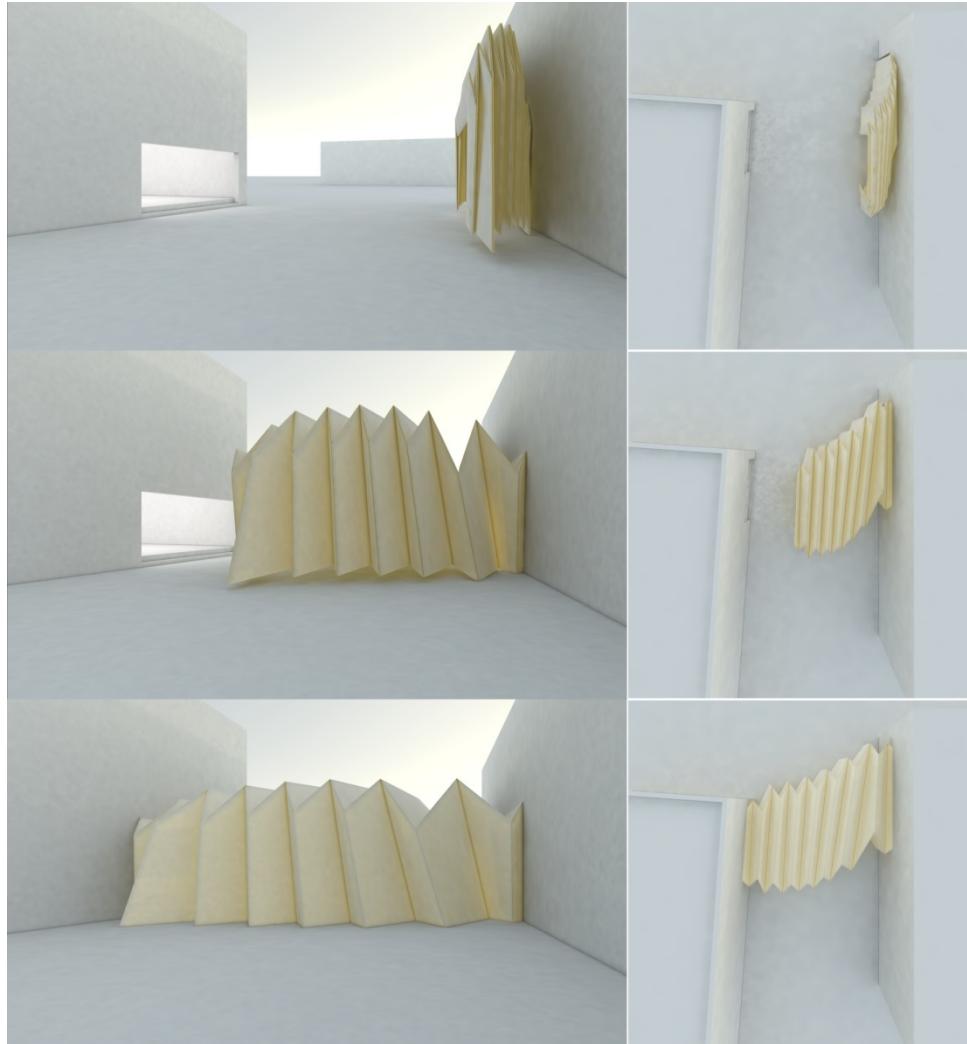






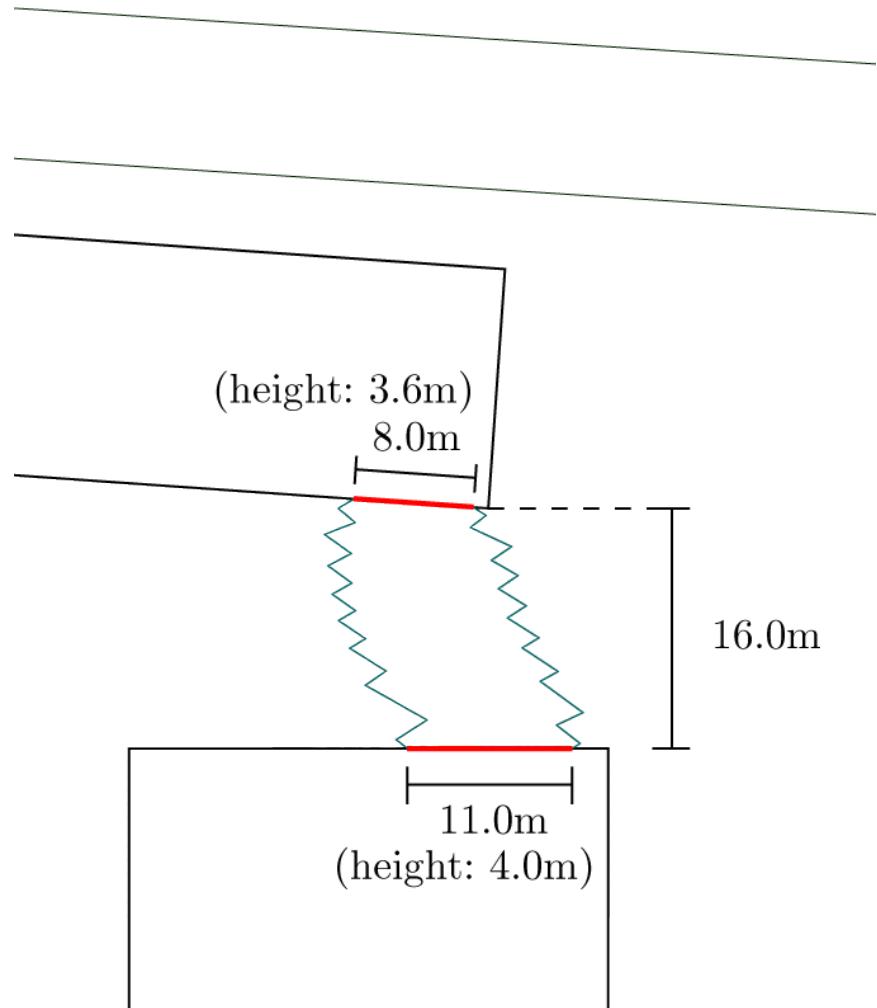
既存の二つの建築物にフィットする 展開構造

- 空間:フレキシブル
 - 展開時気密に接続
 - 形状・方向共にずれた開口
 - 一体のギャラリースペースとして利用
 - コンパクトに折りたたまれる
 - ファサードに同化する
- 構造:ロバスト
 - 剛なパネルとヒンジによる低自由度構造

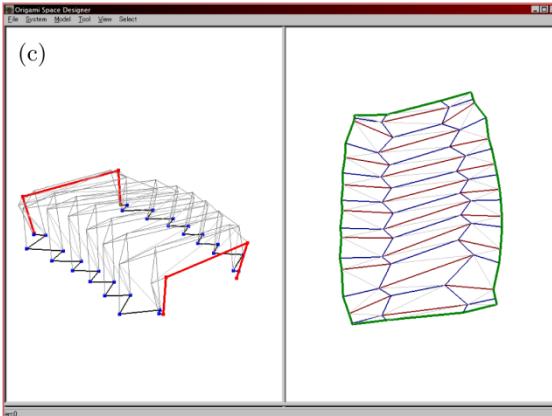
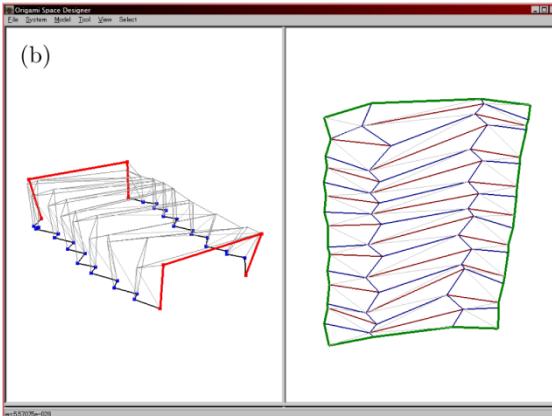
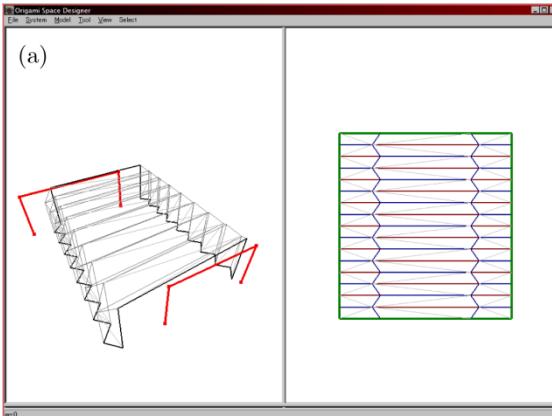


既存の二つの建築物にフィットする 展開構造

- 空間:フレキシブル
 - 展開時気密に接続
 - 形状・方向共にずれた開口
 - 一体のギャラリースペースとして利用
 - コンパクトに折りたたまれる
 - ファサードに同化する
- 構造:口バスト
 - 剛なパネルとヒンジによる低自由度構造



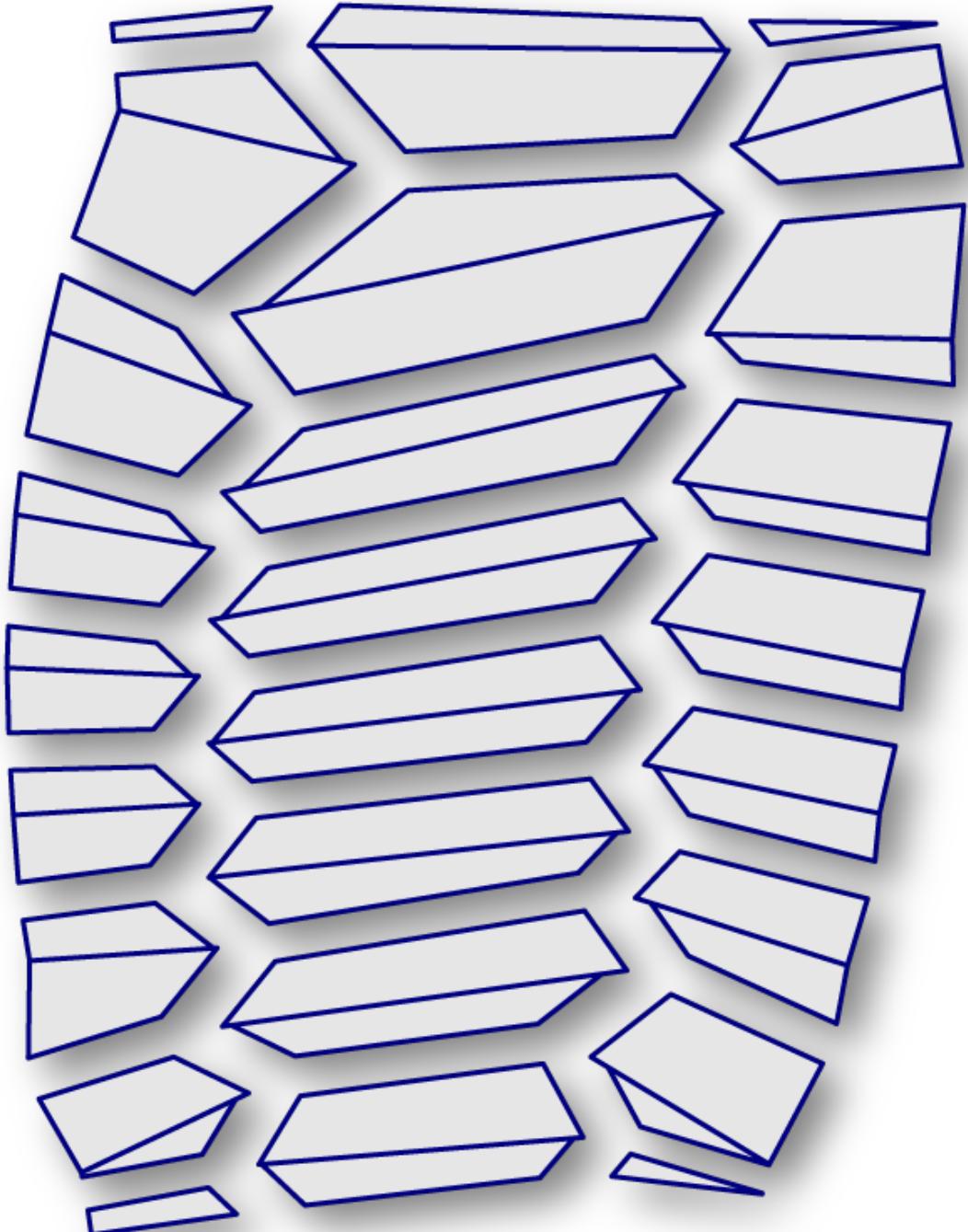
幾何学条件の解法と条件に従った形



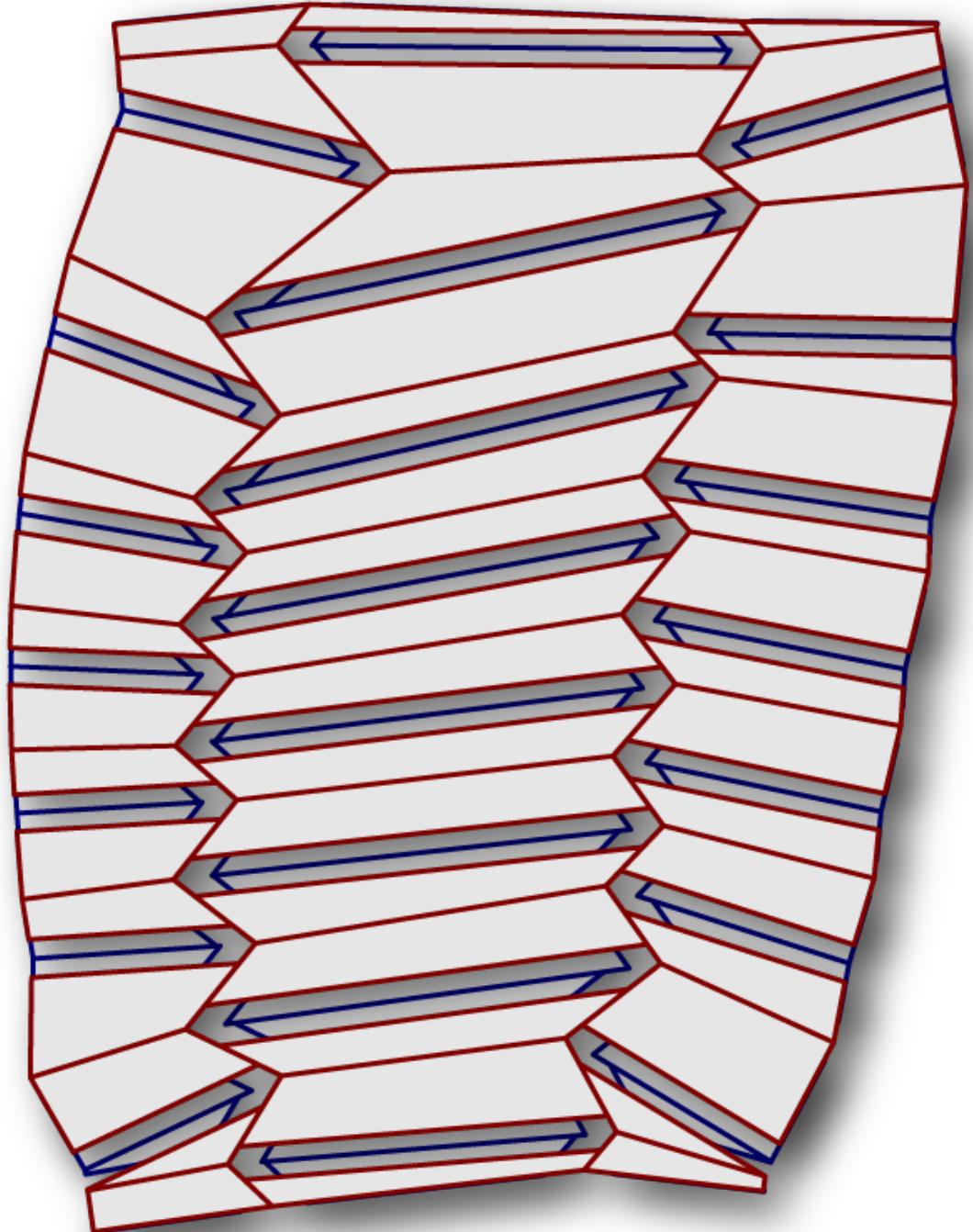
- 展開時に周辺部が地面にすきまなく接触
- 与えられた端部形状と一致
- 平坦折り可能

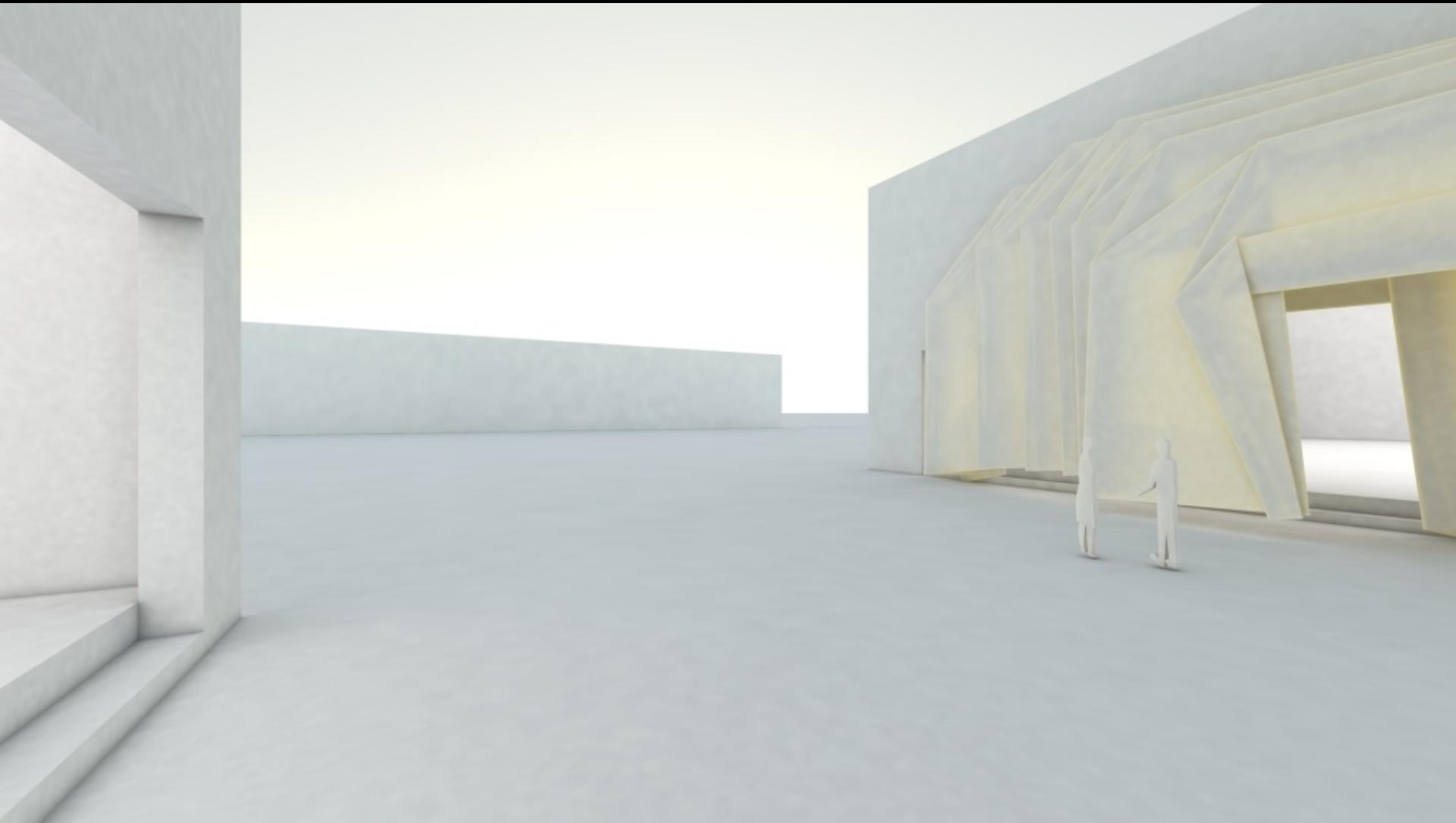
- 厚板で剛体折り可能
- 特異な一自由度剛体折り機構

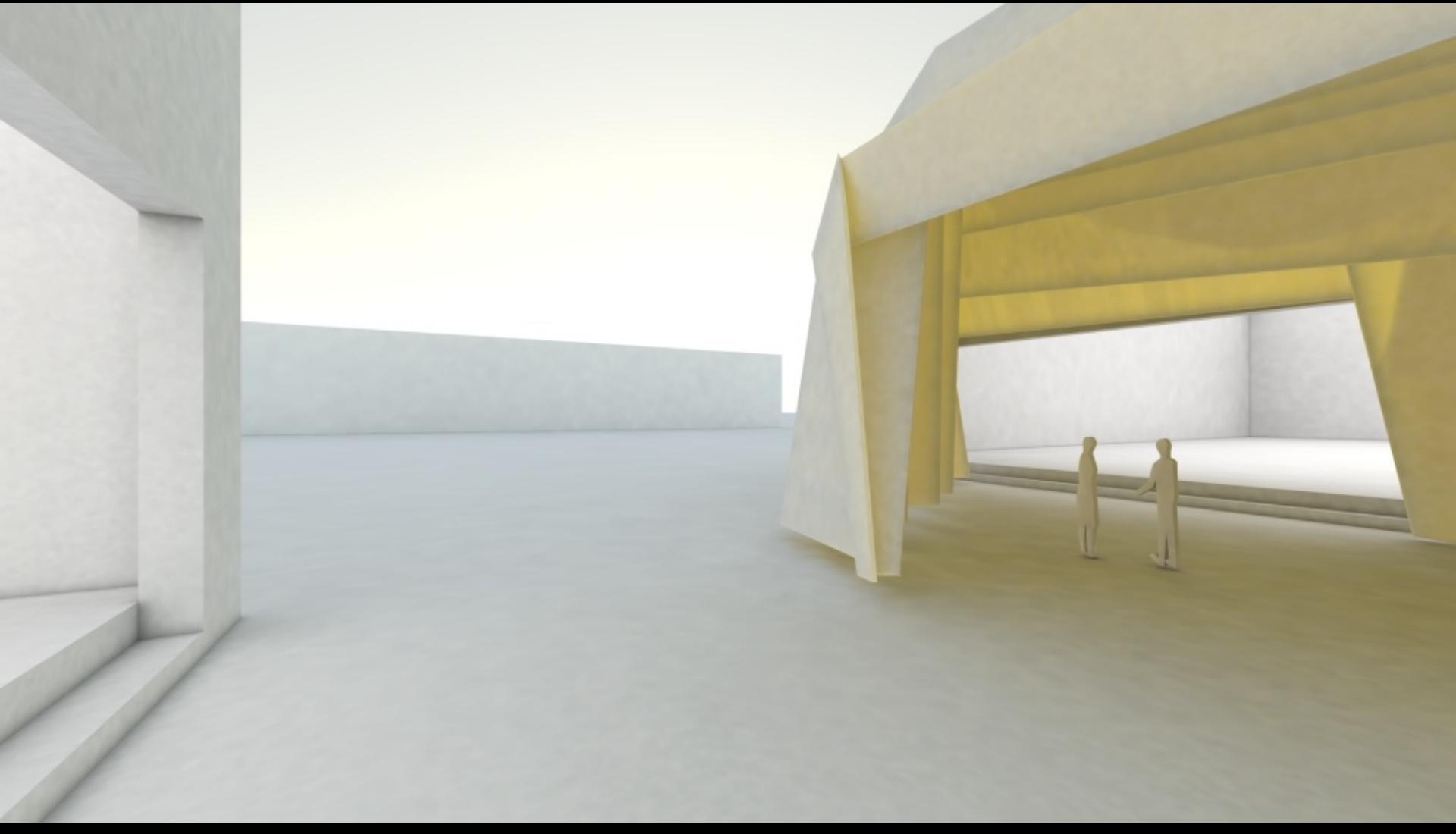
Panel Layout

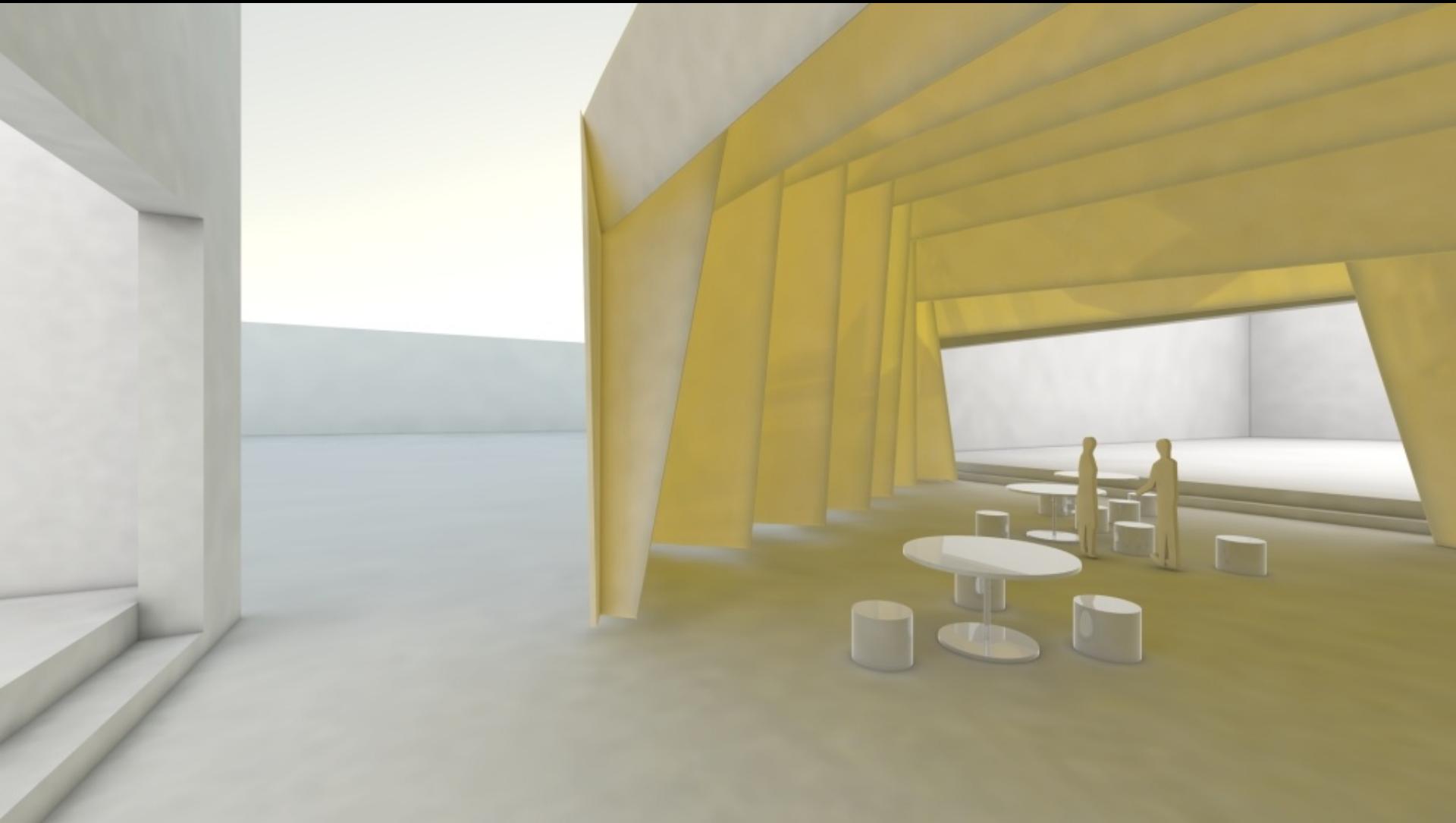


Panel Layout





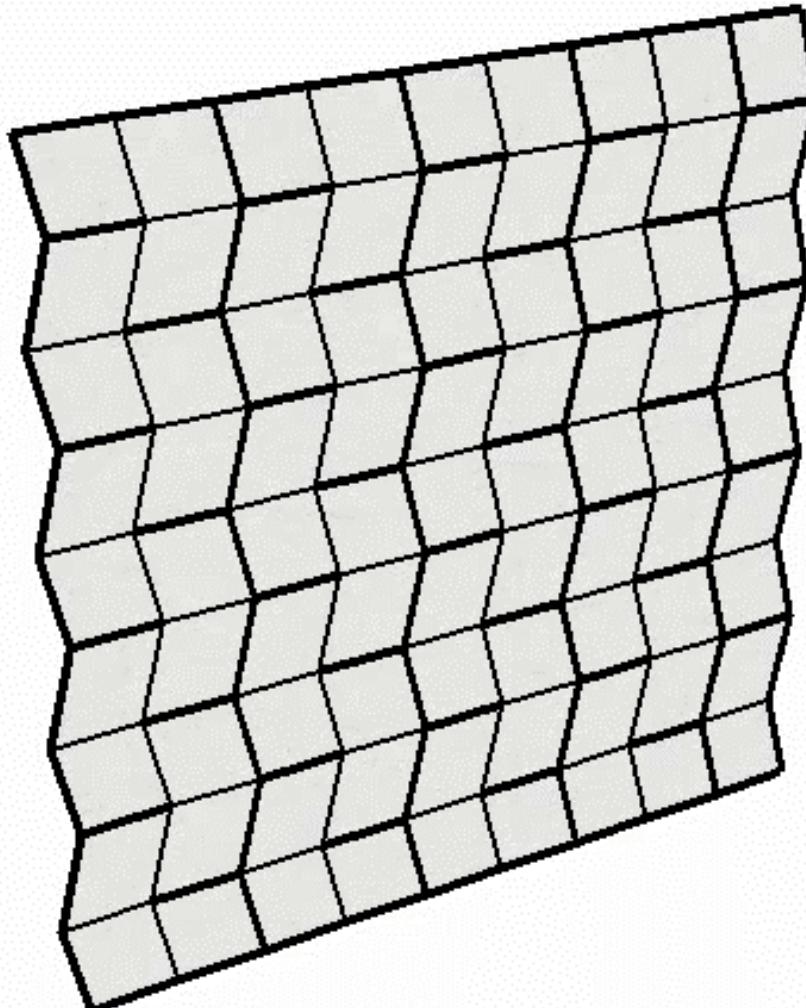




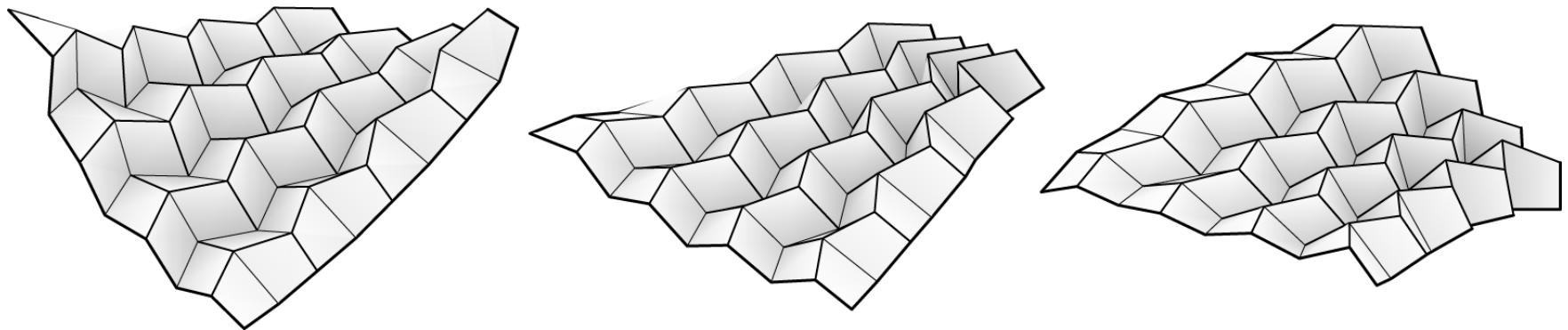




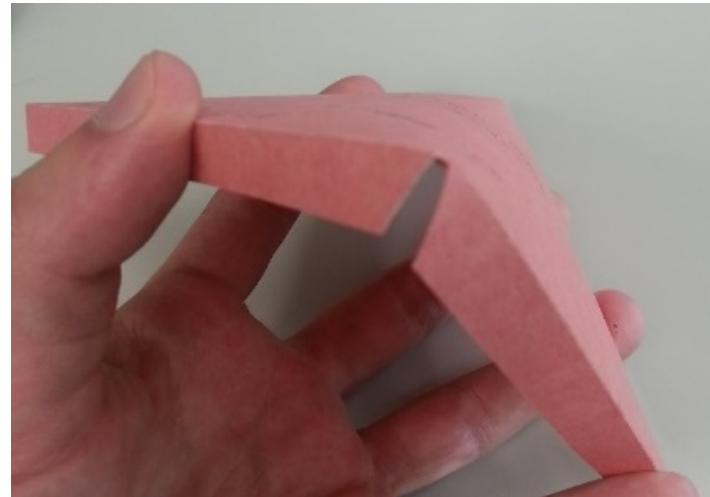
理想のミウラ折り



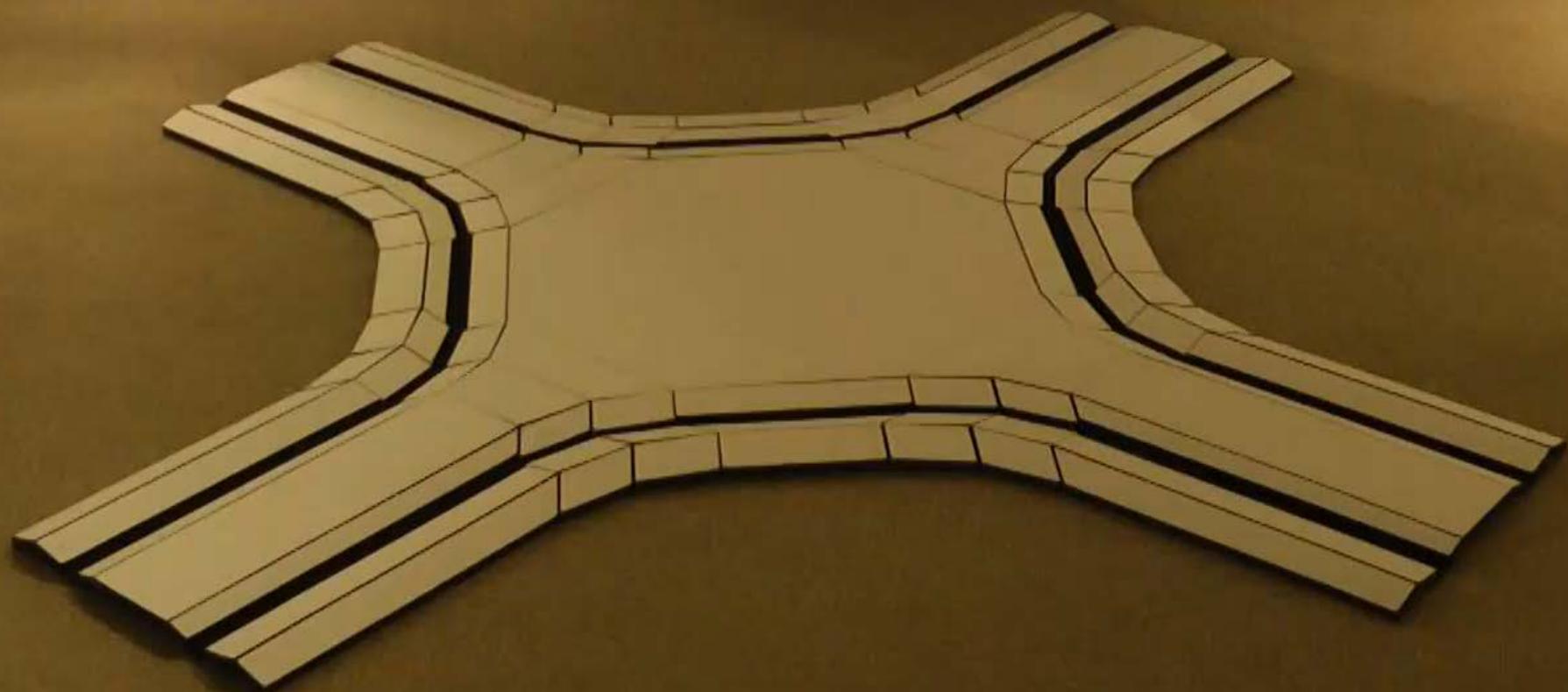
現實

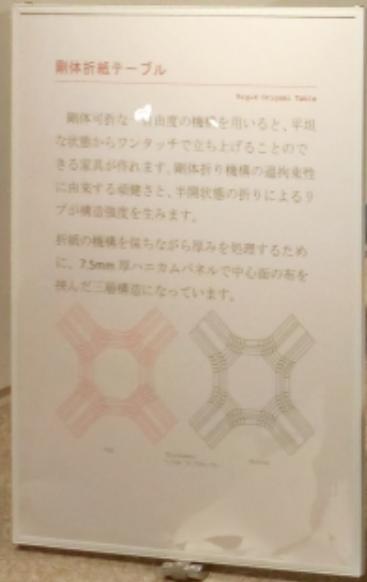


- Twisting
- Bending
- Local folding



厚みで曲げに对抗したらどうか？

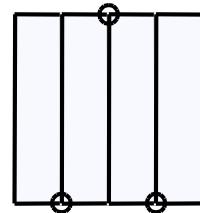
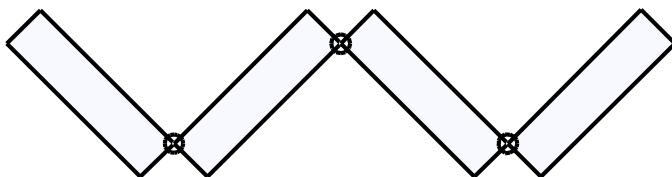
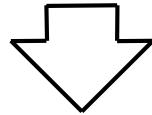




Rigid Origami Table
[Tachi 2013]

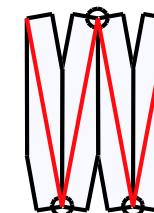
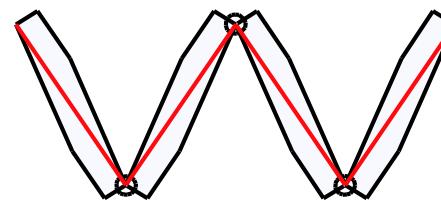
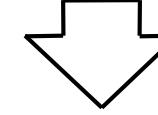
Thickness

- Hinge Shift



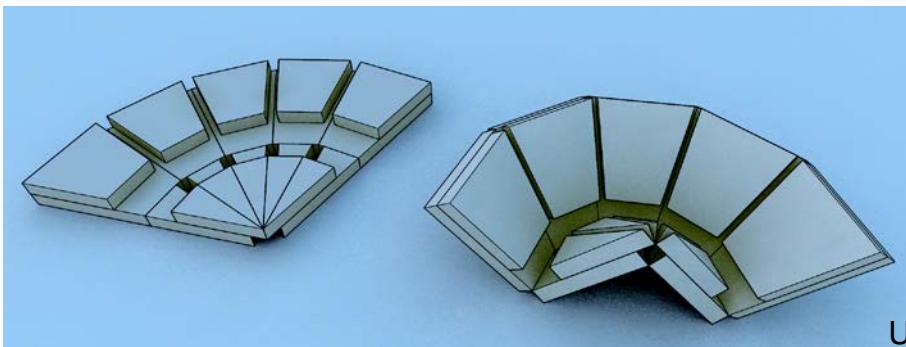
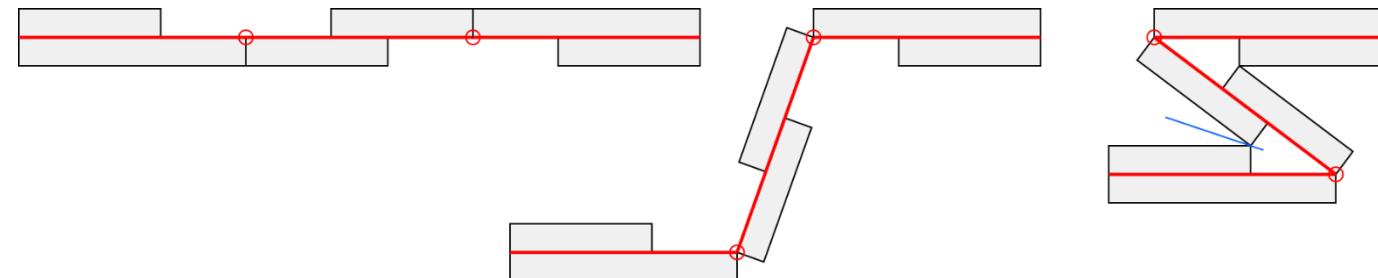
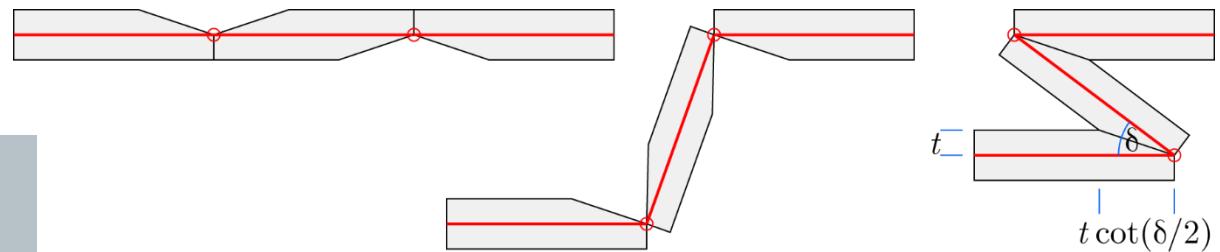
Non-concurrent edges

- Volume Trim



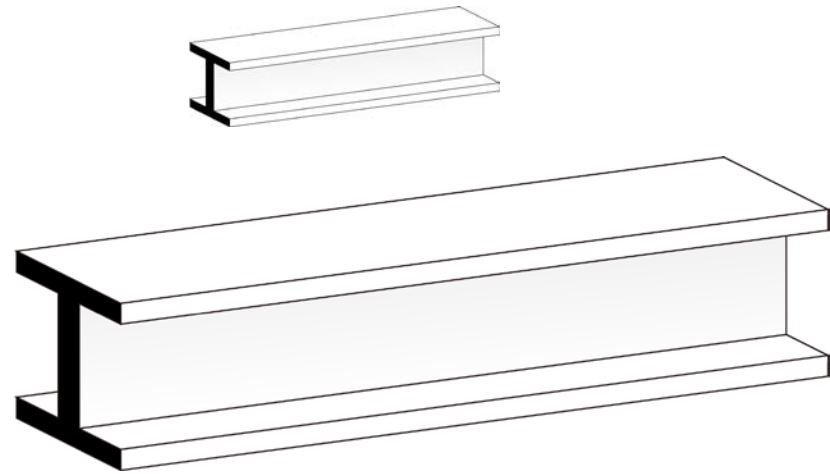
Concurrent edges

Thickness

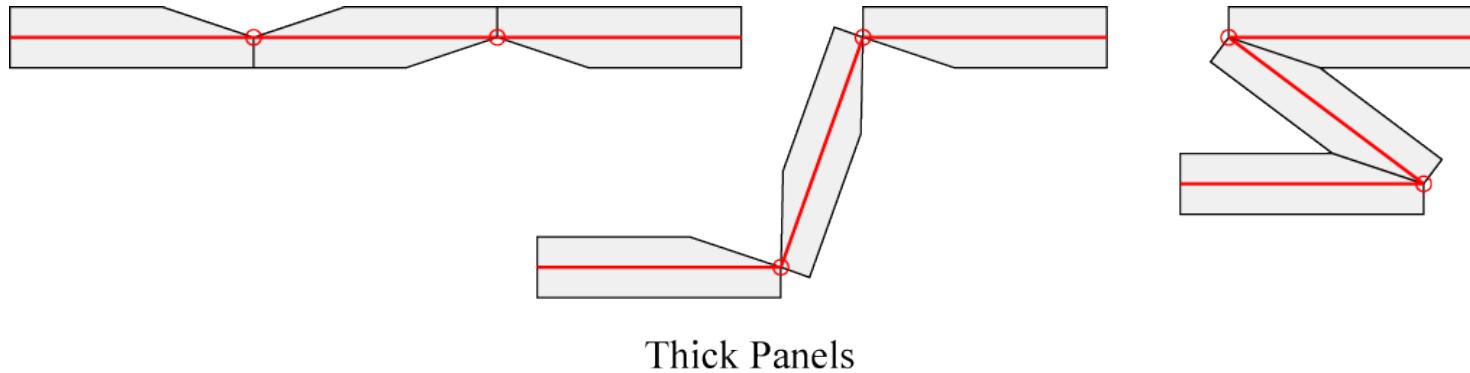


構造工学の話

- 2乗3乗則
 - 一邊を x 倍すると、
 - 重量は x^3 倍になる
 - 力を支える断面は x^2 倍にしかならない
- 大きい構造では軽量化が特に重要
- 板に厚みを持たせるのは悪手
- 薄い材=「紙」を使う。
 - 曲げは容易：剛性 $\propto t^3$
 - 伸縮は困難：剛性 $\propto t$
- 「紙」を立体的に組み合わせて、材料が伸び縮みしないと変形できないようにしむける

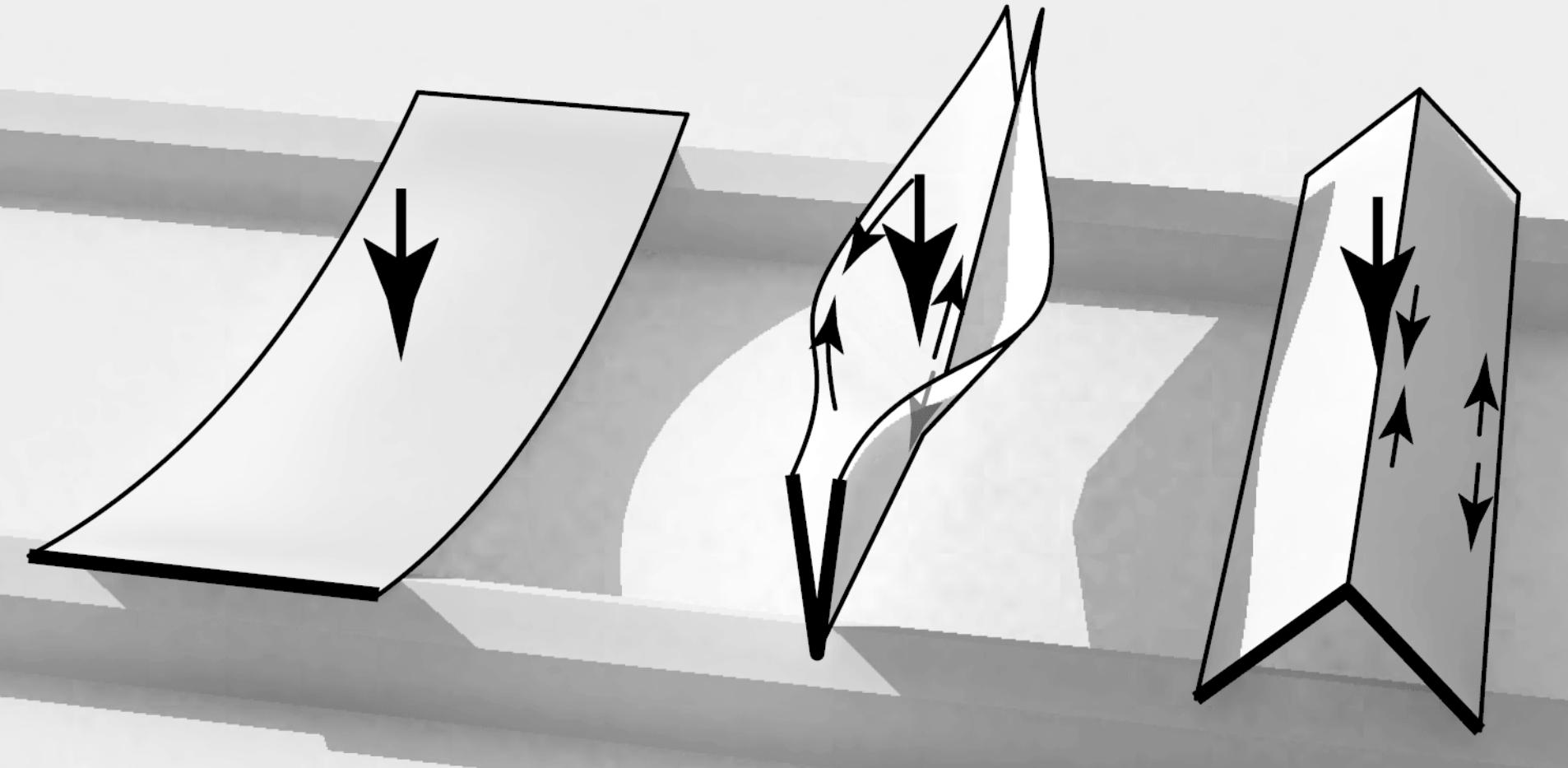


剛体折紙は「厚く」できる

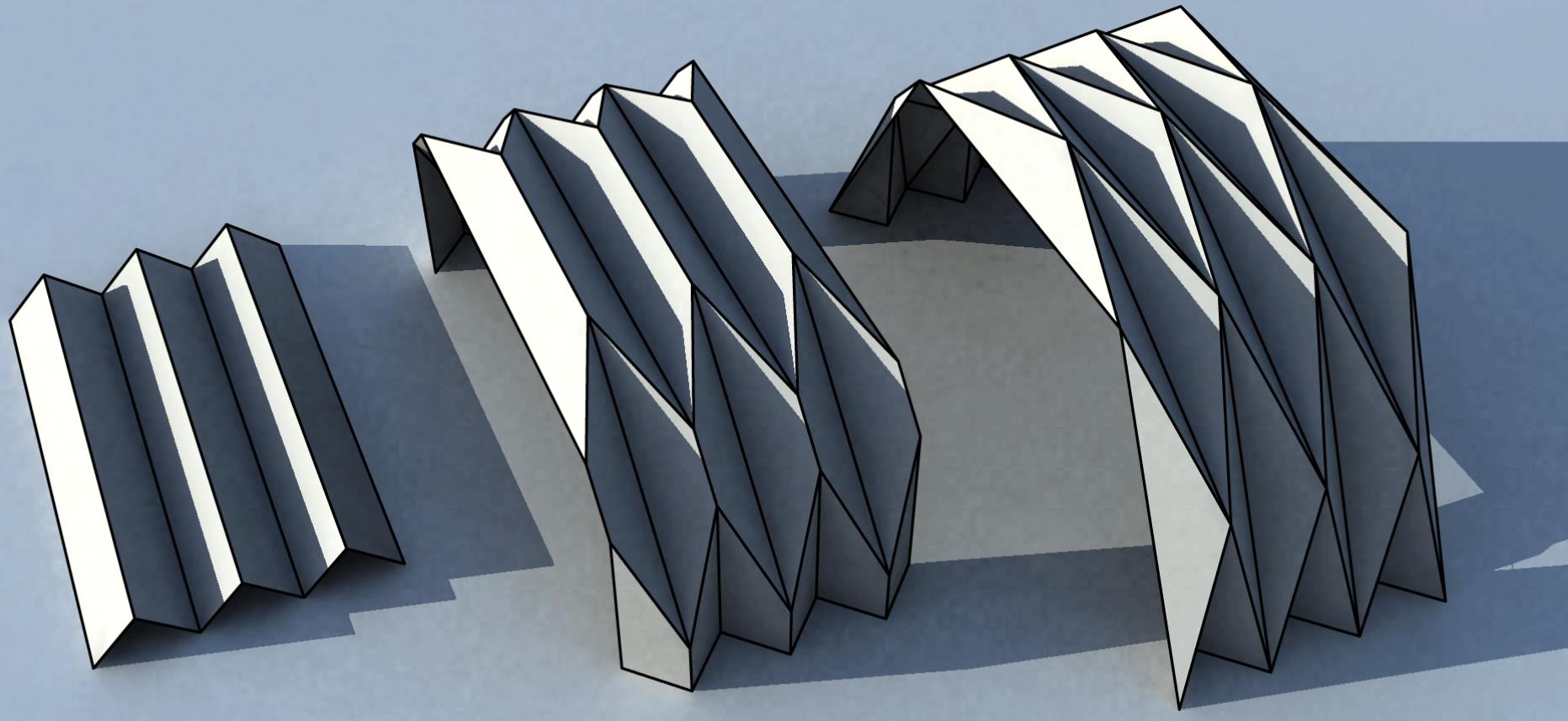


- でも厚みに頼るのは悪いデザイン
- スケールの1.5乗のオーダーの厚みが必要
- 効率が悪くなる

折紙の良さ：折ると強くなる



折り目を繰り返すとさらに強く



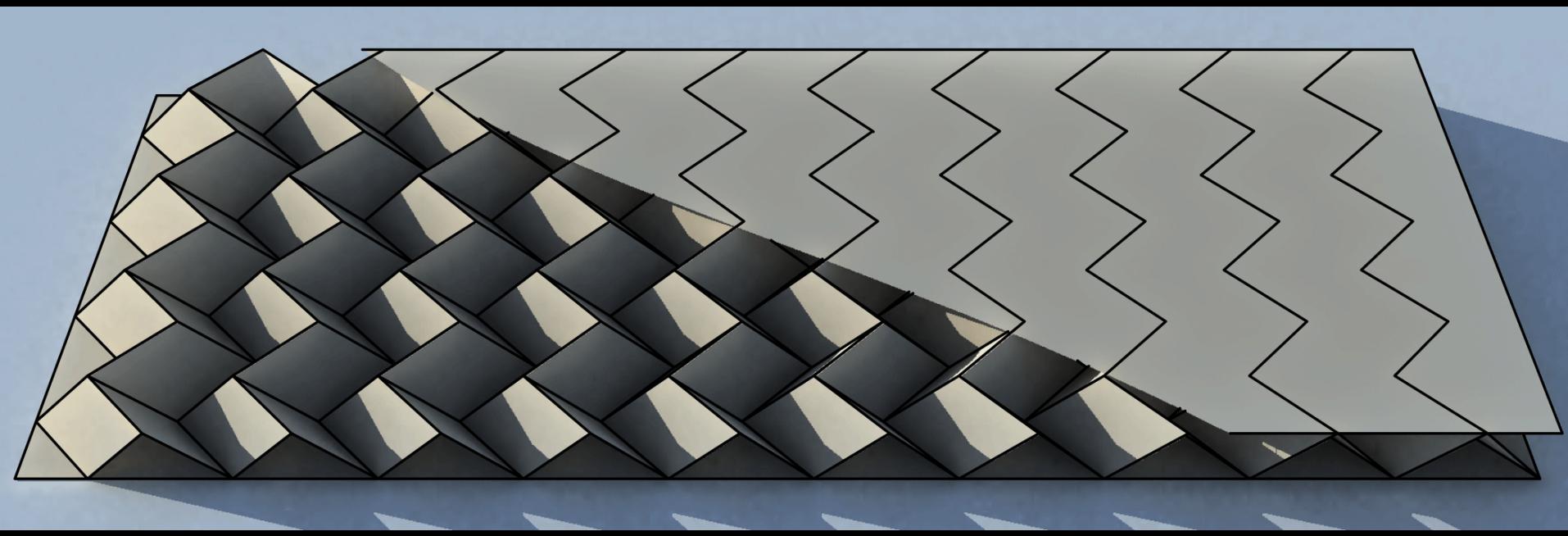


Rostislav Chudoba, Jan van der Woerd and
Josef Hegger Oricreate: Modeling
Framework for Design and Manufacturing
of Folded Plate Structures

木造折版構造のチャペル
Chapel St- Loup
[Buri & Weinand 2008]



閉じるとどの方向の力にも強くなる



サンドイッチ構造：軽くて強い けれど、変形はしない

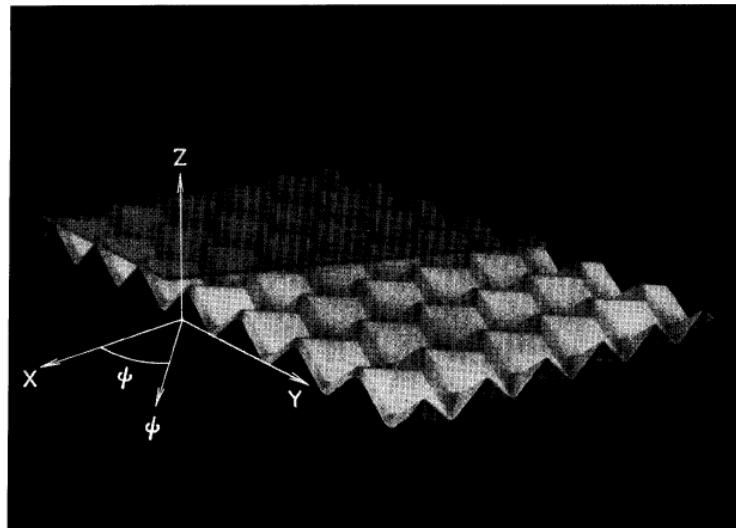


FIG. 11. A Zeta-Core Sandwich and Coordinational Axes

折紙コア・サンドイッチ板

Miura 1972, "Zeta-Core Sandwich – Its Concept and Realization", ISAS report 37(6), 137-164
p. 148 Fig. 11
http://ci.nii.ac.jp/els/110001101664.pdf?id=ART0001255576&type=pdf&lang=jp&host=ci.nii&order_no=&ppv_type=0&lang_sw=&no=1464067421&cp=

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました

飛行機部品図

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました

サンドイッチ構造写真

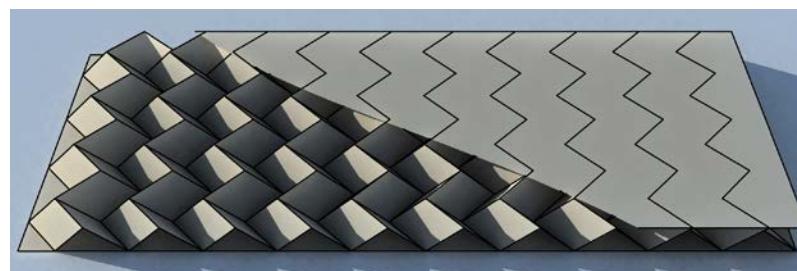
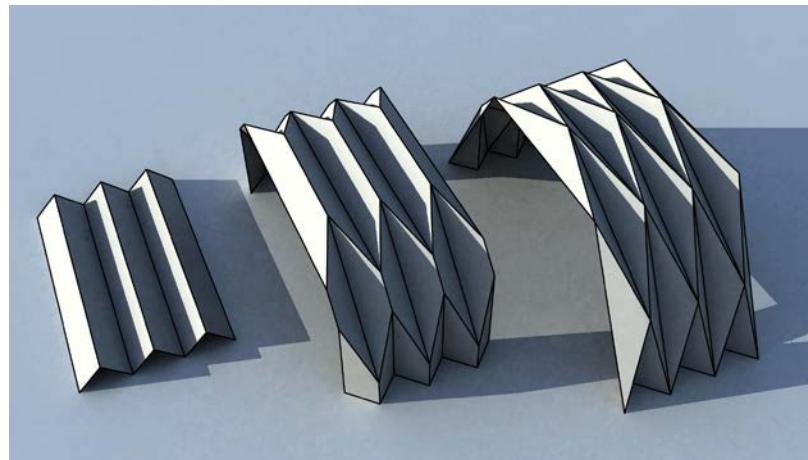
飛行機ボディの軽量化

DESIGN OF MULTIFUNCTIONAL FOLDED CORE
STRUCTURES FOR AEROSPACE SANDWICH
APPLICATIONS
Klett, Drechsler, Kolax, Wentzel, Kehrle 2007

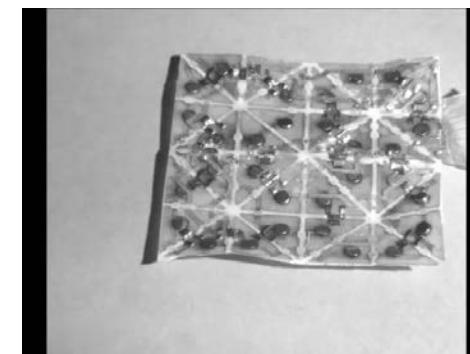
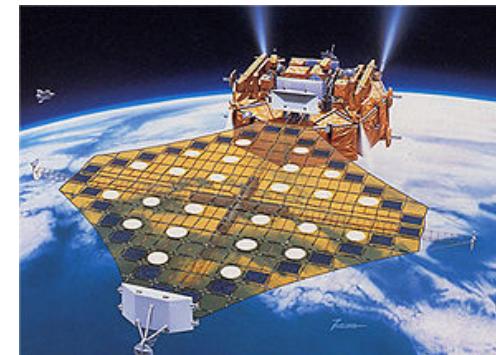
かたくてやわらかい折紙構造

いいとこどりしたい

折版構造
かたい！



展開構造物
やわらかい！



宇宙科学研究所
2D Array(2次元展開実験)
<http://www.isas.jaxa.jp/j/enterp/missions/sfu/2dsa.shtml>
2d01.jpg

SFU ISAS Miura ori

E. Hawkes, B. An, N. M. Benbernou, H. Tanaka, S. Kim, E. D. Demaine, D. Rus, R. J. Wood
Proc Natl Acad Sci U S A. 2010 July 13; 107(28): 12441-12445. Published online 2010 June 28. doi: 10.1073/pnas.0914069107
<http://vs2ga4mq9g.scholar.serialssolutions.com/?sid=google&authtitle=Programmable+matter+by+folding&id=pmid:20616049>
Supplemental Material Movie S1 (0914069107_SM01.mp4)

端部を閉じるのがポイント！

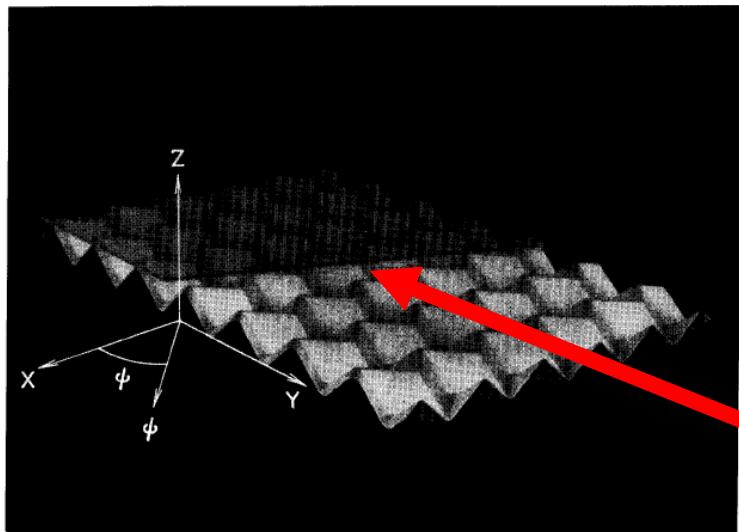


FIG. 11. A Zeta-Core Sandwich and Coordinational Axes

折紙コア・サンドイッチ板

Miura 1972, "Zeta- Core Sandwich – Its Concept and Realization", ISAS report 37(6), 137- 164
p. 148 Fig. 11

http://ci.nii.ac.jp/els/110001101664.pdf?id=ART0001255576&type=pdf&lang=jp&host=ci.nii&order_no=&ppv_type=0&lang_sw=&no=1464067421&cp=

端部を閉じる

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました

飛行機部品図

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました

サンドイッチ構造写真

飛行機ボディの軽量化

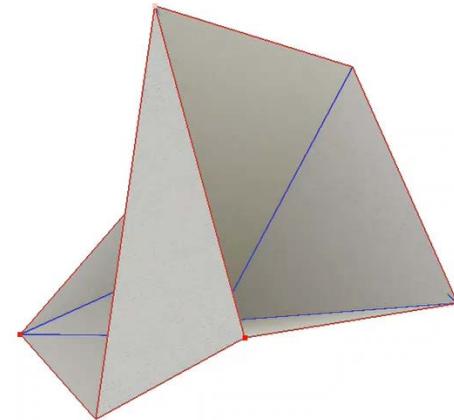
DESIGN OF MULTIFUNCTIONAL FOLDED CORE STRUCTURES FOR AEROSPACE SANDWICH APPLICATIONS
Klett, Drechsler, Kolax, Wentzel, Kehrle 2007

注意 !

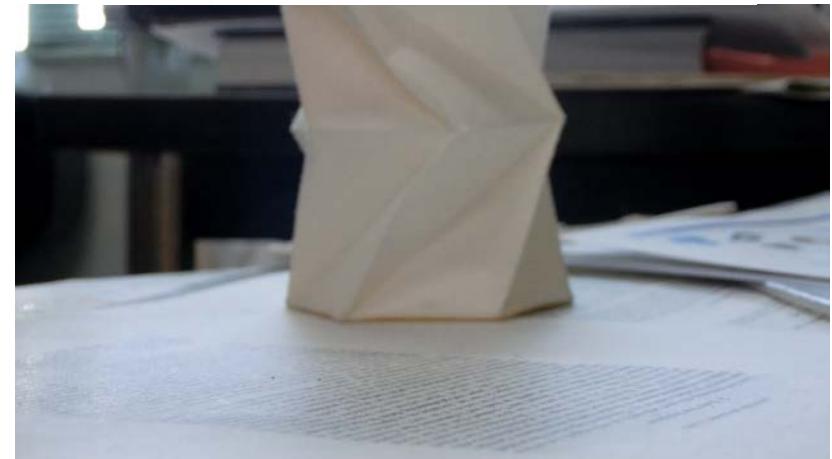
Bellows Theorem
フイゴの定理

[Connelly, Sabitov, Walz 1997]

変形可能な閉じた多面体は、体積を変えられない

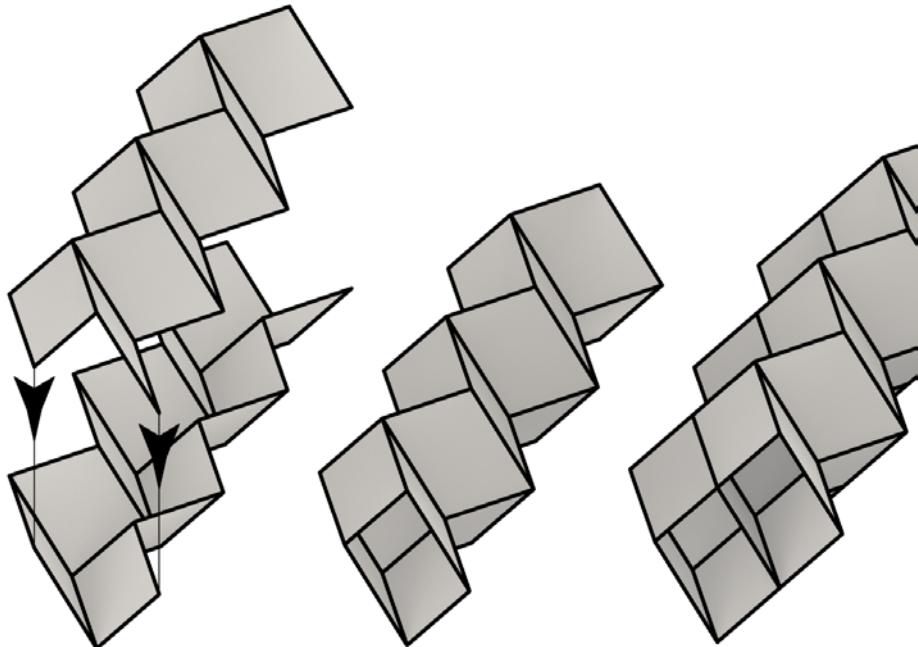


Steffen's Polyhedron (Volume maintaining)



Pseudo-Bellows (Involves Material Stretch)

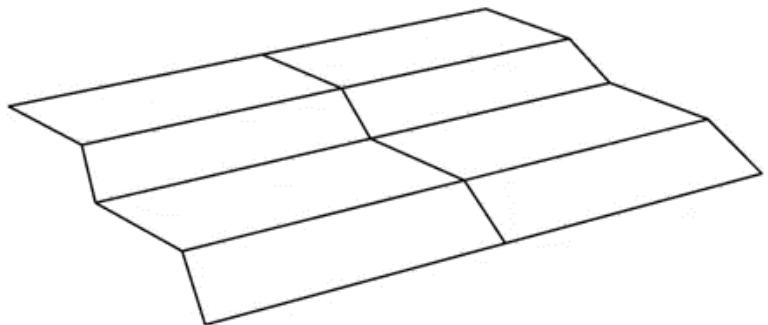
ミウラ折り×2でチューブ



ミウラ折り

折紙チューブ

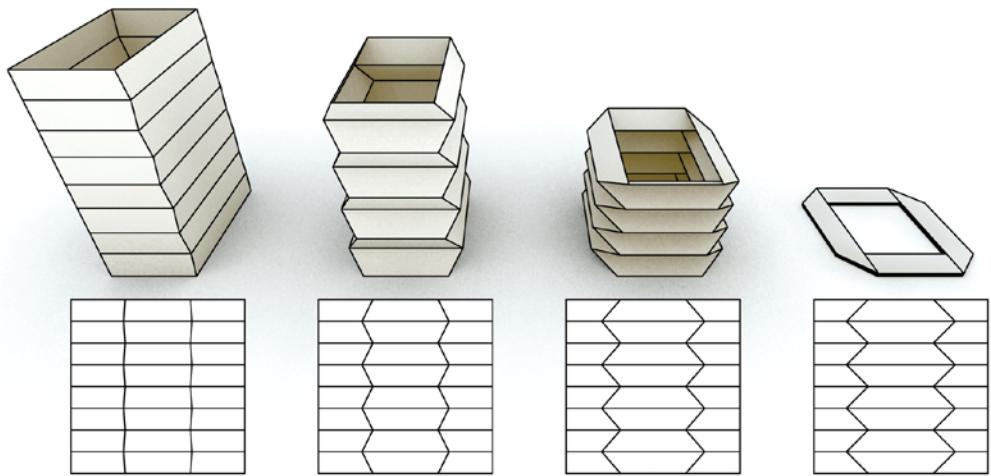
平行配置



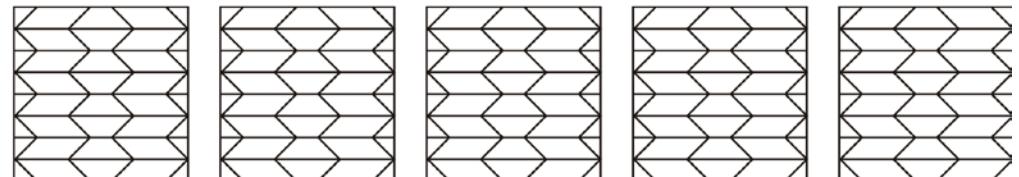
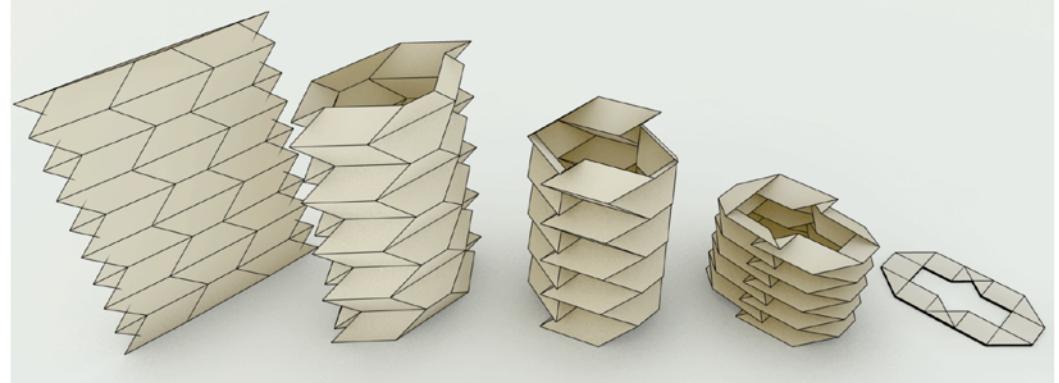
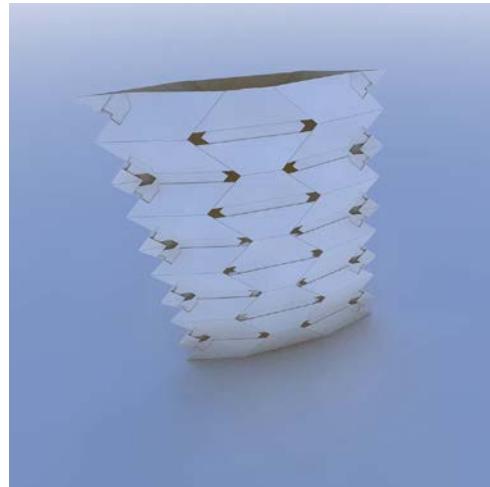
One-DOF rigid foldable
tubes, Tachi 2009

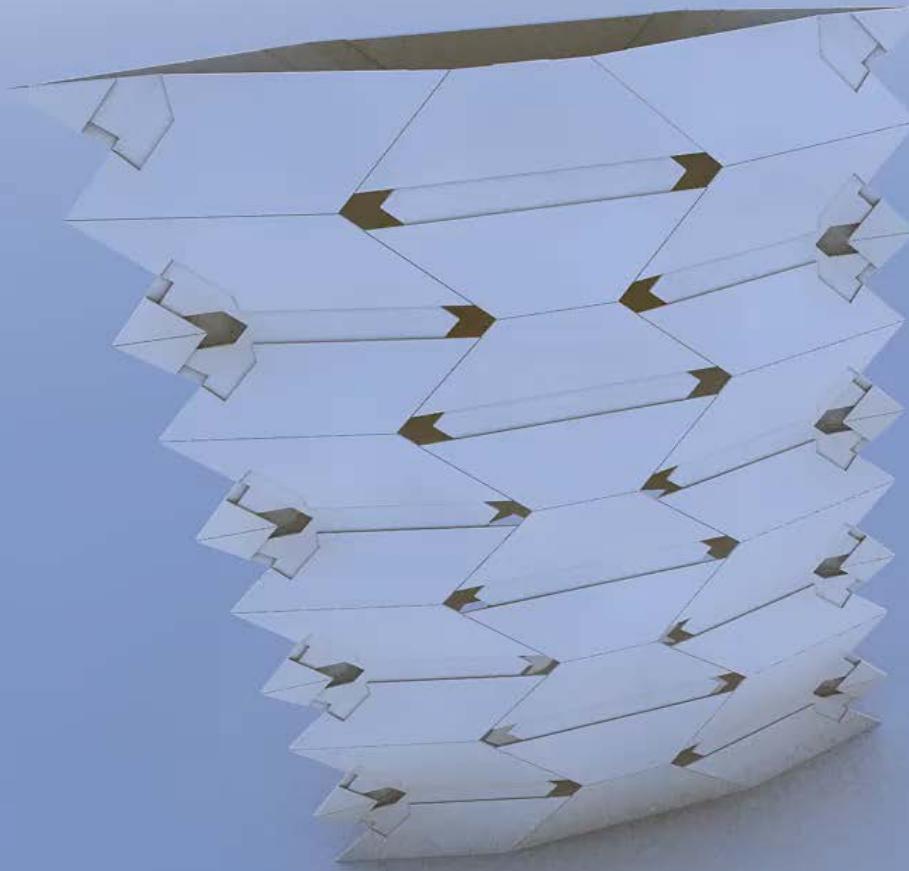
普通の折紙との比較

- 普通のジャバラ



- 剛体折り可能





[Tachi,Miura 2010]

かたくなったか？

- 剛性（ばね定数など） := 力／変位

$$f = K x$$

- 複合構造の場合は、変位も力も多次元で「剛性マトリクス」で定義される

$$\mathbf{f} = \mathbf{Kx}$$

- この性質を知るには、固有値解析(Eigen Value Analysis)が有効

- 固有値（固有振動数）が高ければ高いほどかたいはず

\mathbf{K} = Stiffness matrix

\mathbf{M} = Mass matrix

$$\mathbf{Kx}_i = \lambda_i \mathbf{Mx}_i$$

↑
Eigenvector

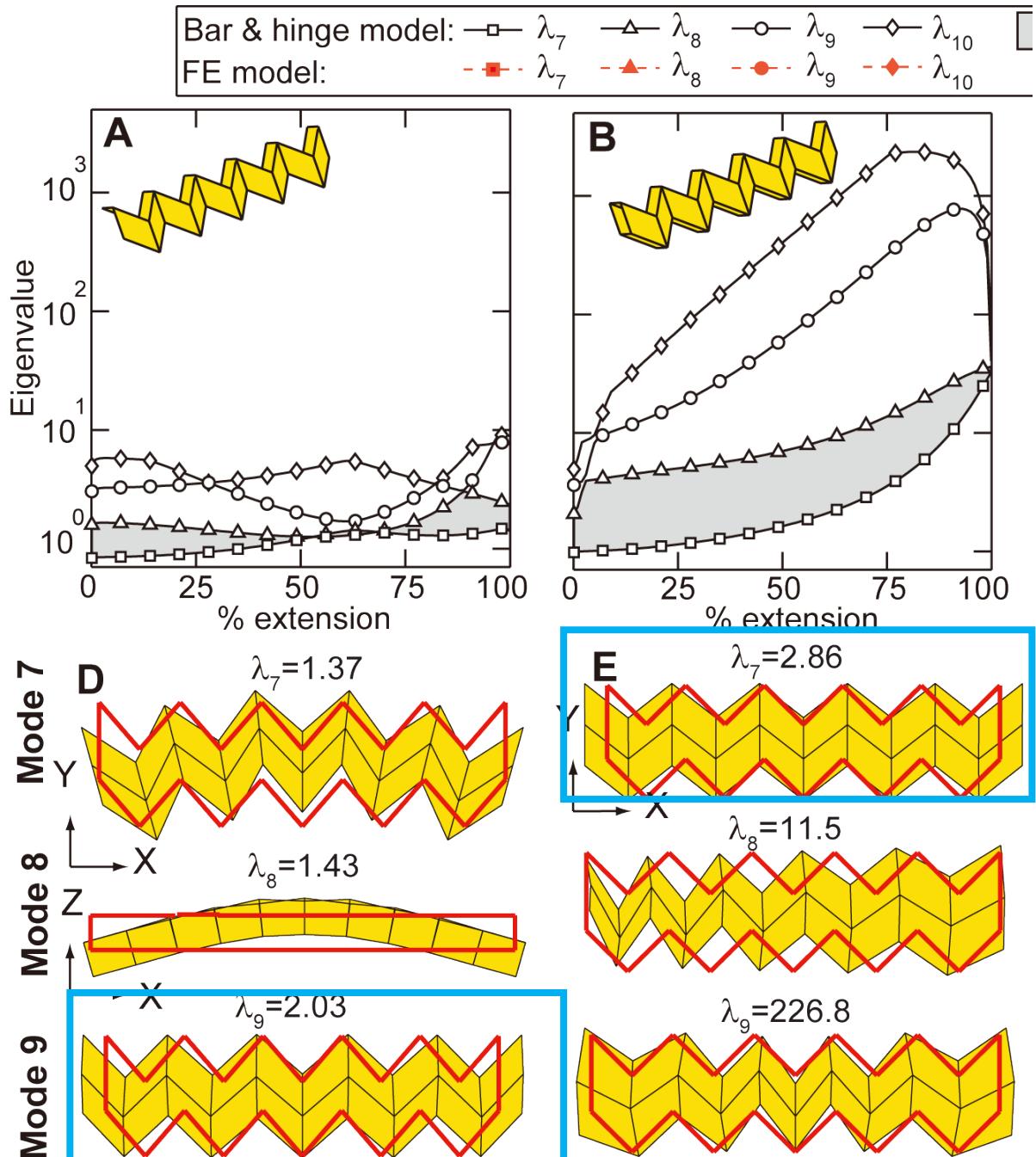
Eigenvalue

Miura-sheet vs. Tube

A: Miura-ori easier to bend than to fold

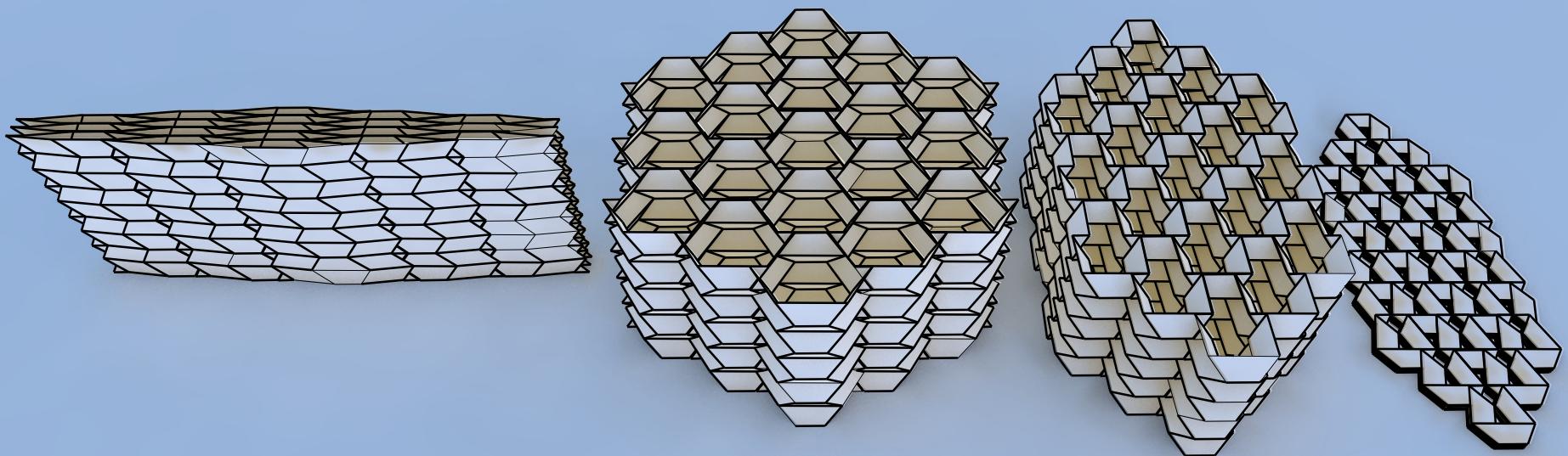
B: Miura-ori Tube easier to fold than to bend

[Filipov, Tachi and Paulino,
"Origami tubes assembled
into stiff, yet
reconfigurable structures
and metamaterials" PNAS vol.
112 no. 40 2015]
pp. 12321–12326,
<http://www.pnas.org/content/112/40/12321>
p. 12323, Fig. 3

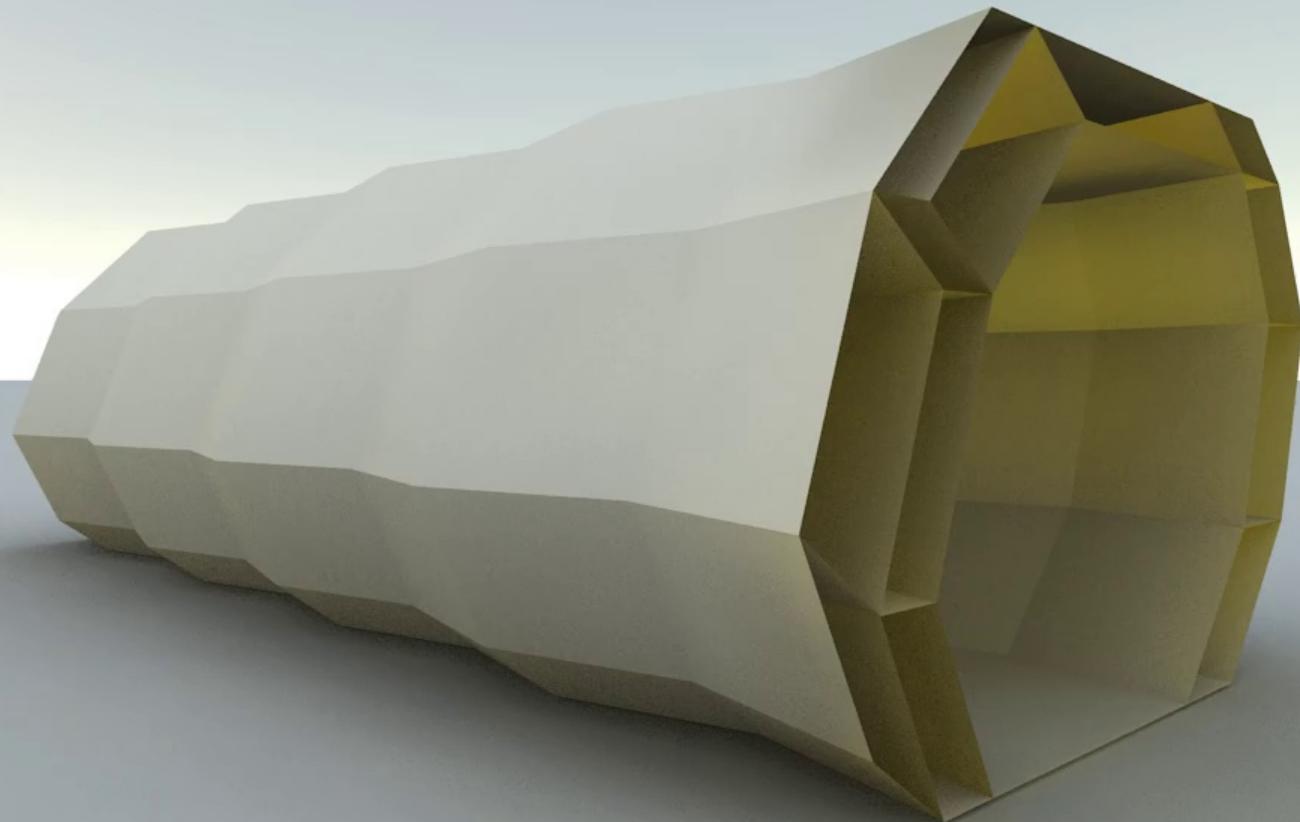


剛体折り可能なセル状構造

[Tachi, Miura 2010]

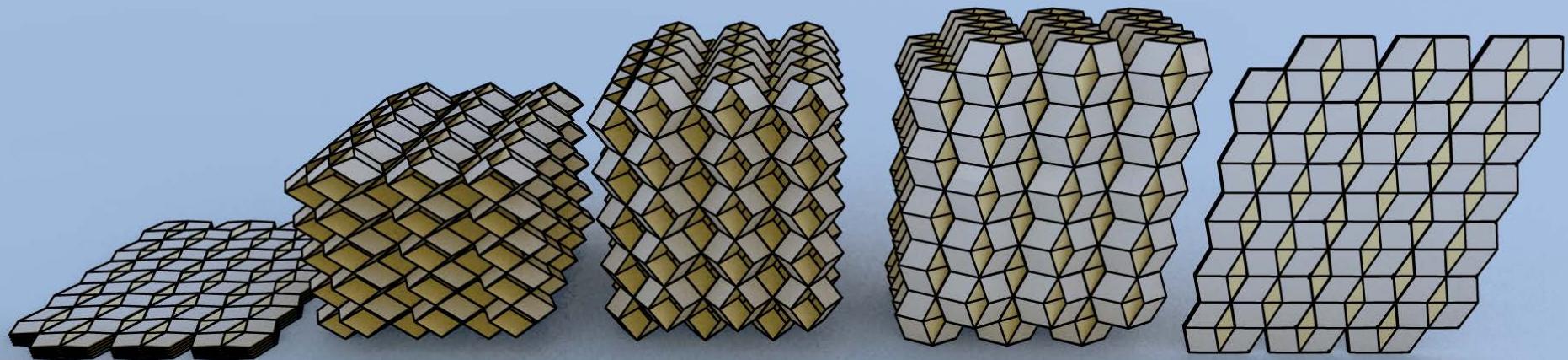


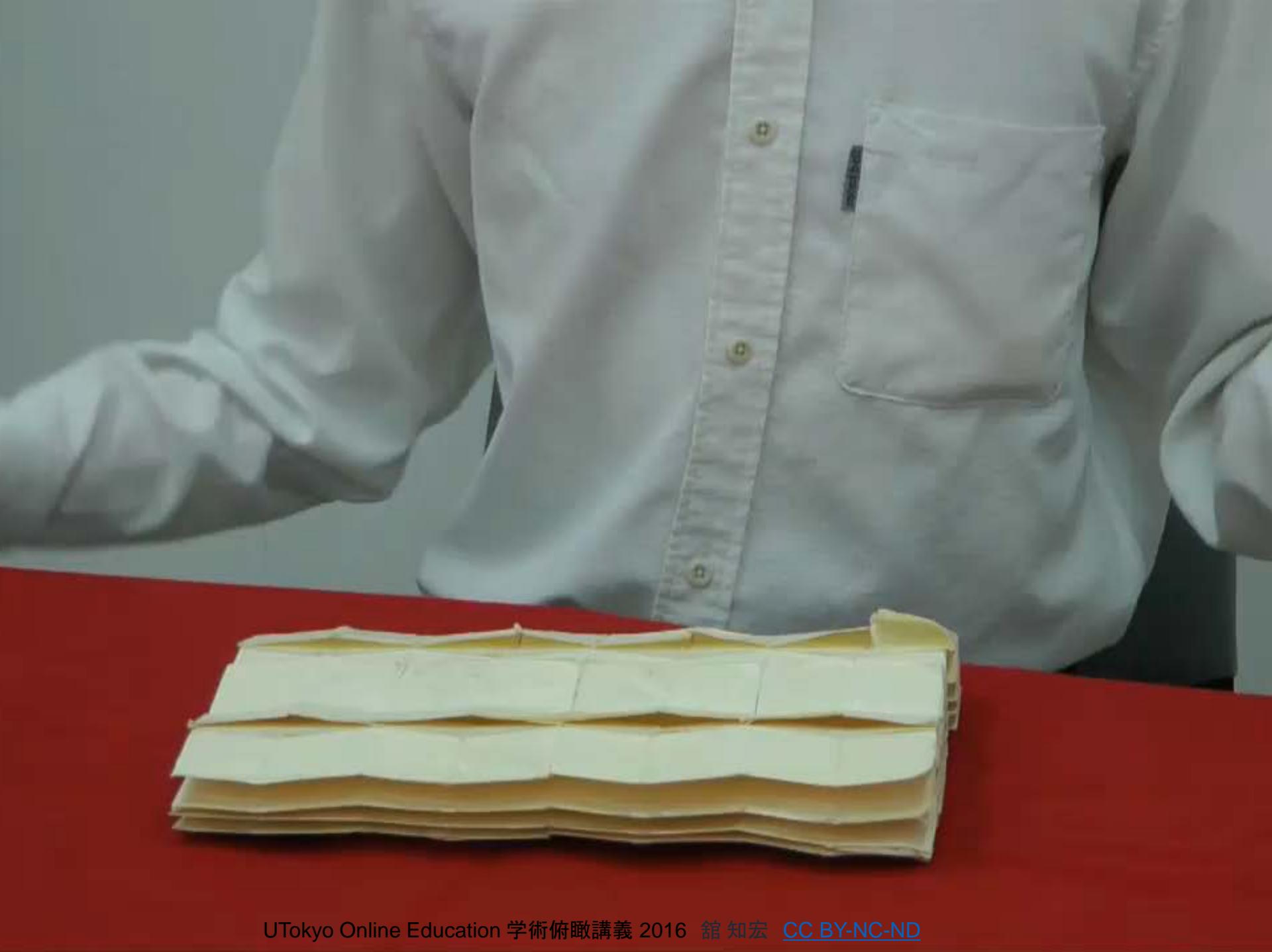
複層構造



Interleaved Tubes

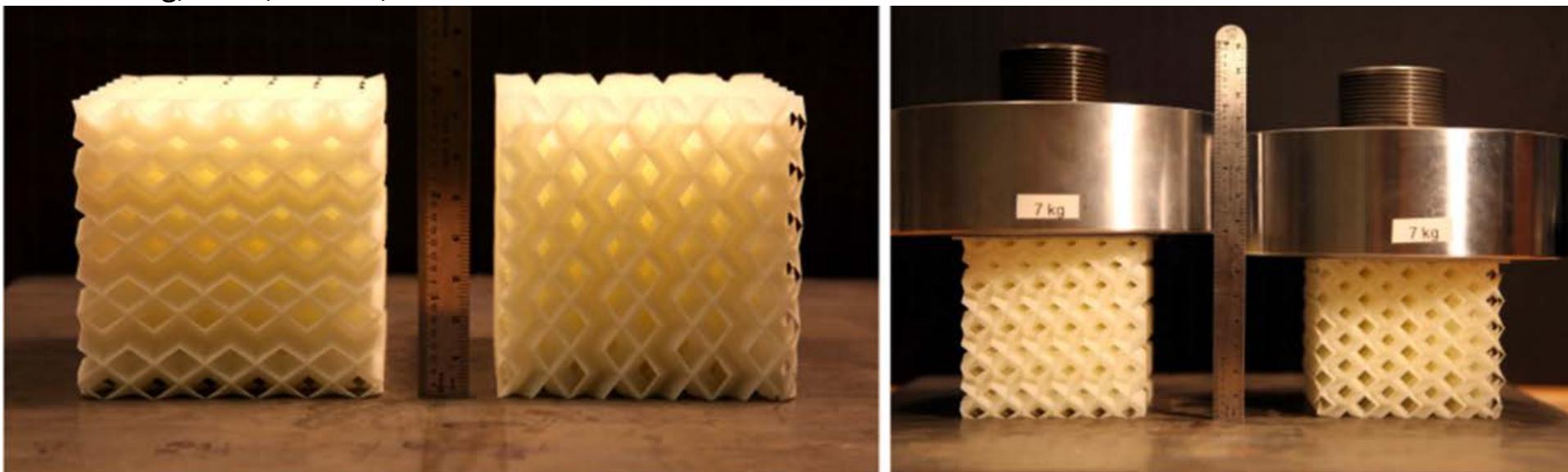
[Tachi & Miura 2012, "Rigid-Foldable Cylinders and Cells"]



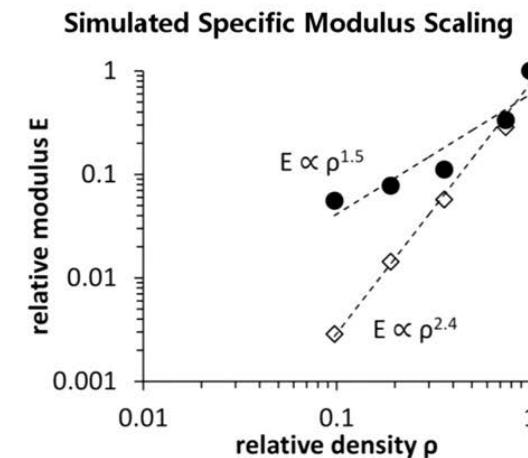
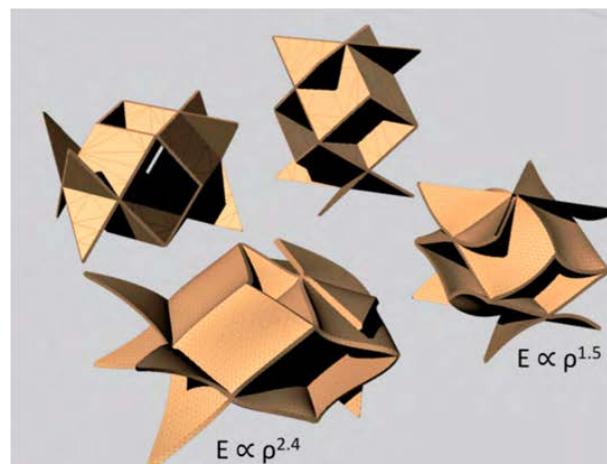


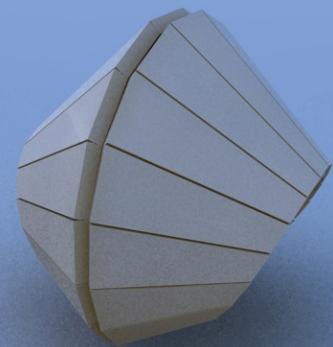
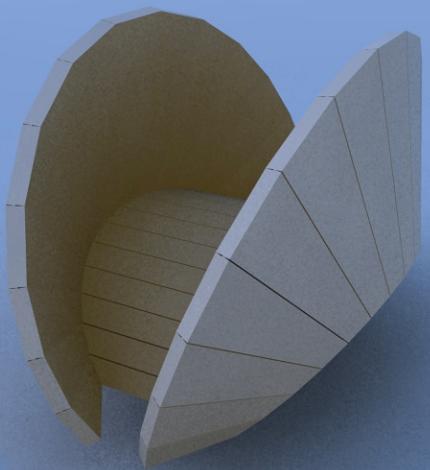
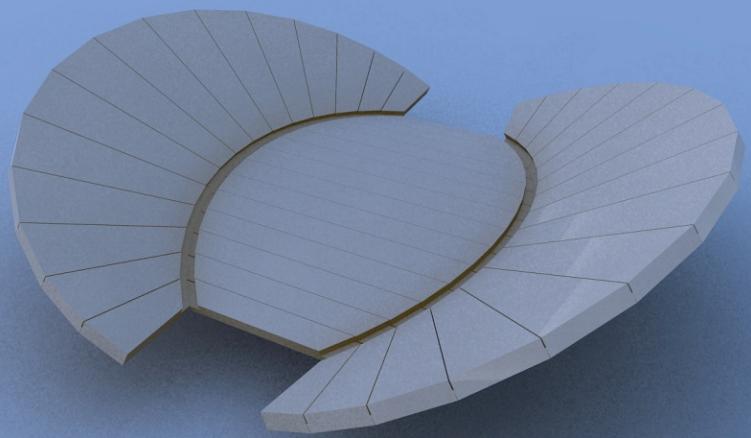
Origami interleaved tube cellular materials

Cheung, Tachi, Calisch, and Miura 2014 Smart Materials and Structures

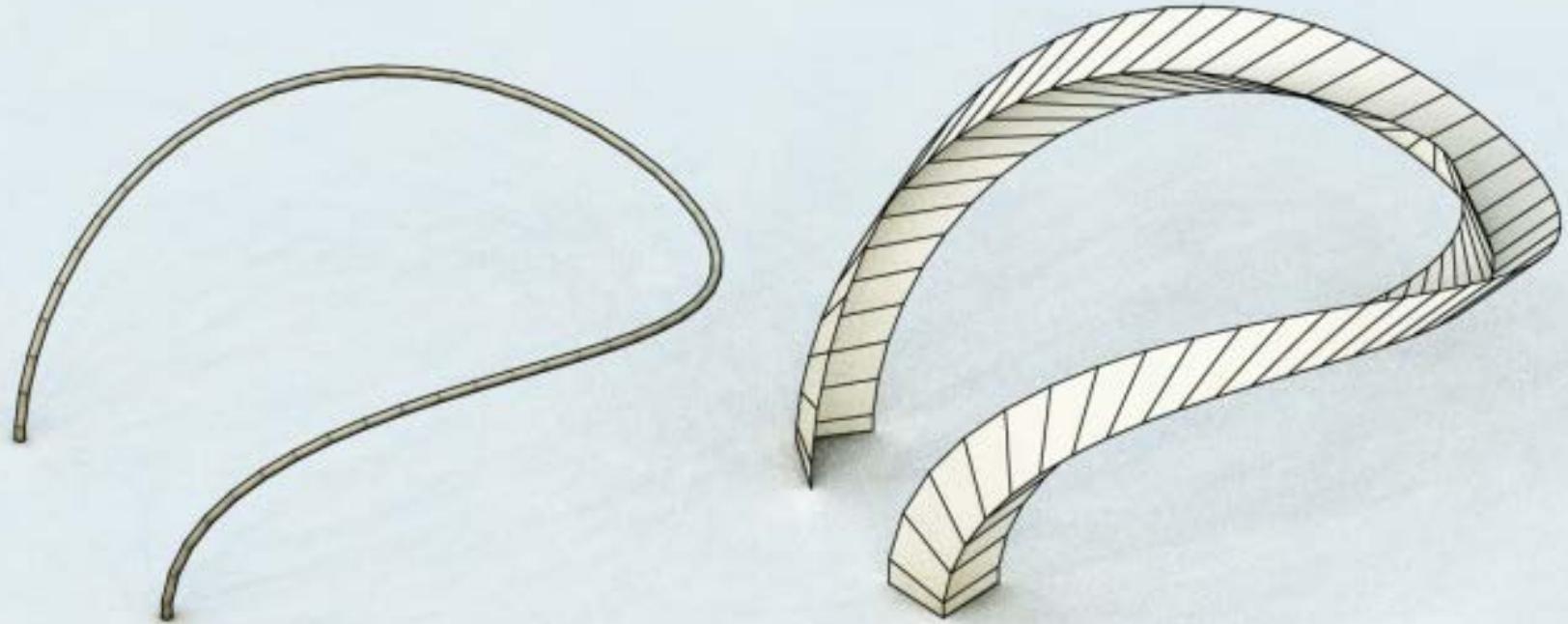


メタマテリアル
材料密度 vs. 材料
弾性係数
かたい方向
 $E \propto \rho^{1.5 \sim 1.7}$
柔らかい方向
 $E \propto \rho^{2.4 \sim 2.8}$

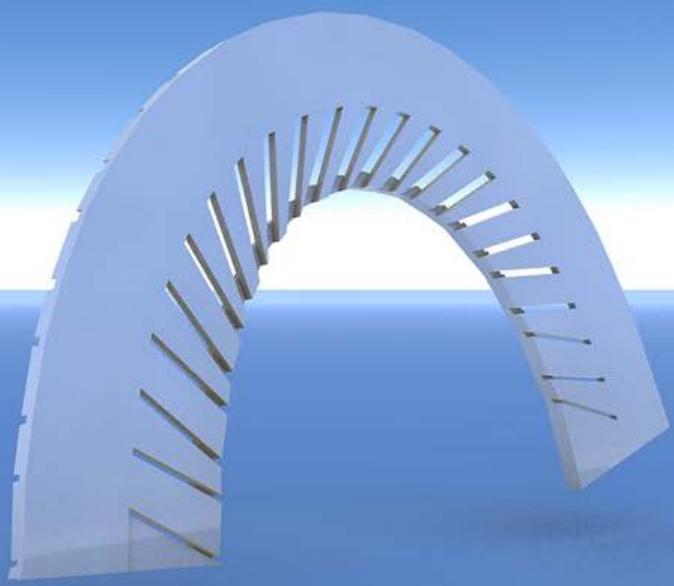




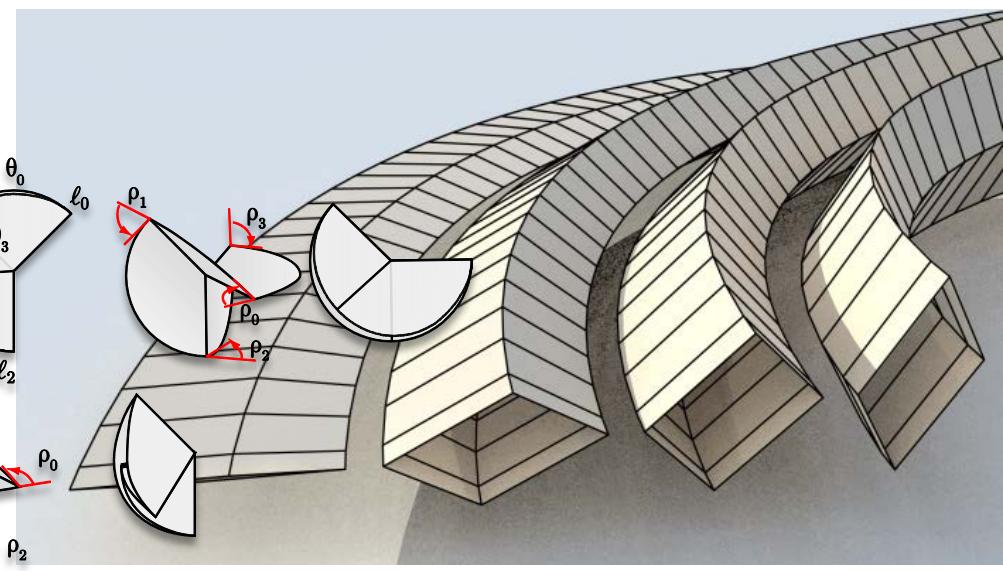
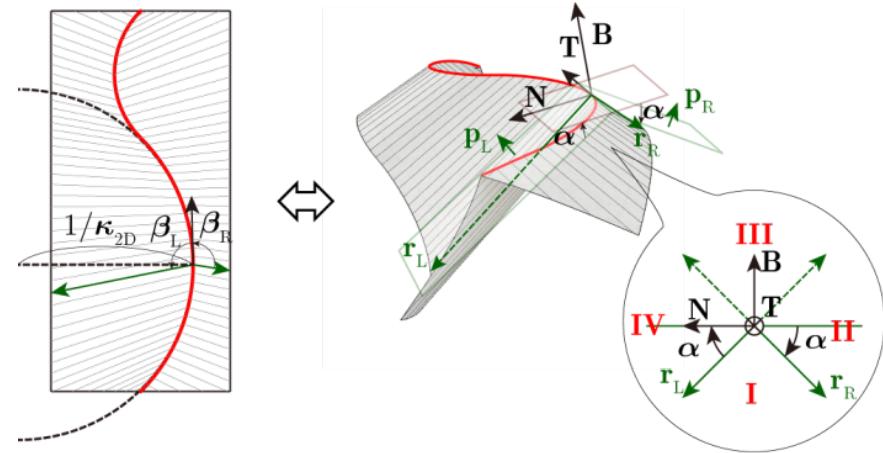
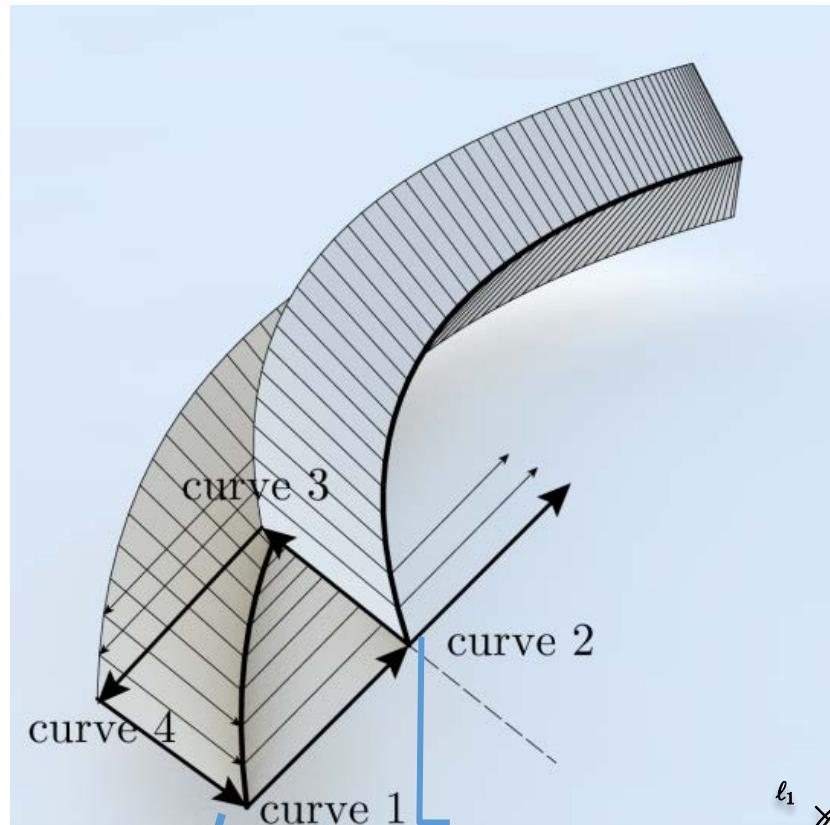
Curved Fold on Single Space Curve



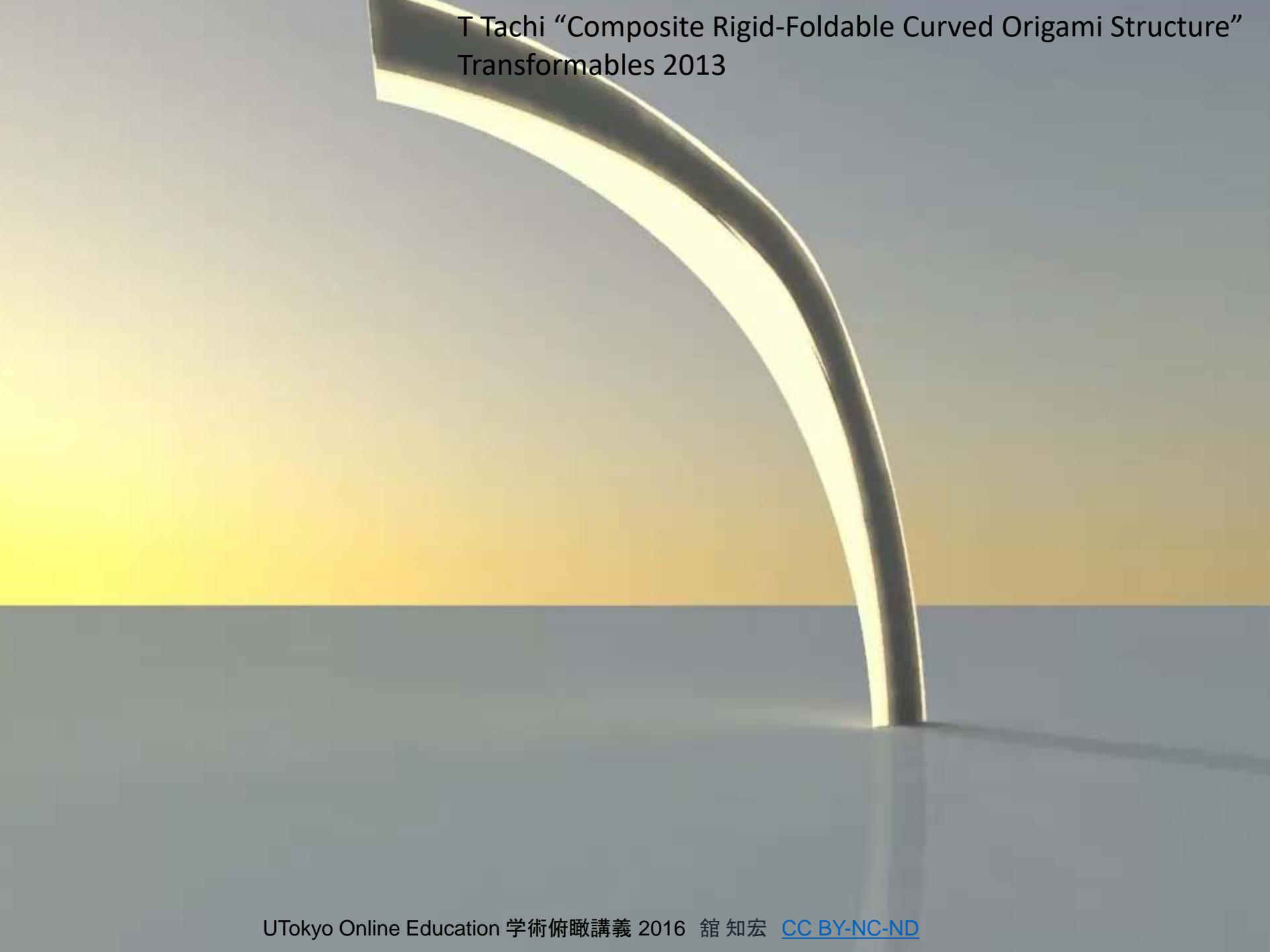
$$\begin{bmatrix} \mathbf{T}'(s) \\ \mathbf{N}'(s) \\ \mathbf{B}'(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \kappa(s) & 0 \\ -\kappa(s) & 0 & \tau(s) \\ 0 & -\tau(s) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{T}(s) \\ \mathbf{N}(s) \\ \mathbf{B}(s) \end{bmatrix}$$

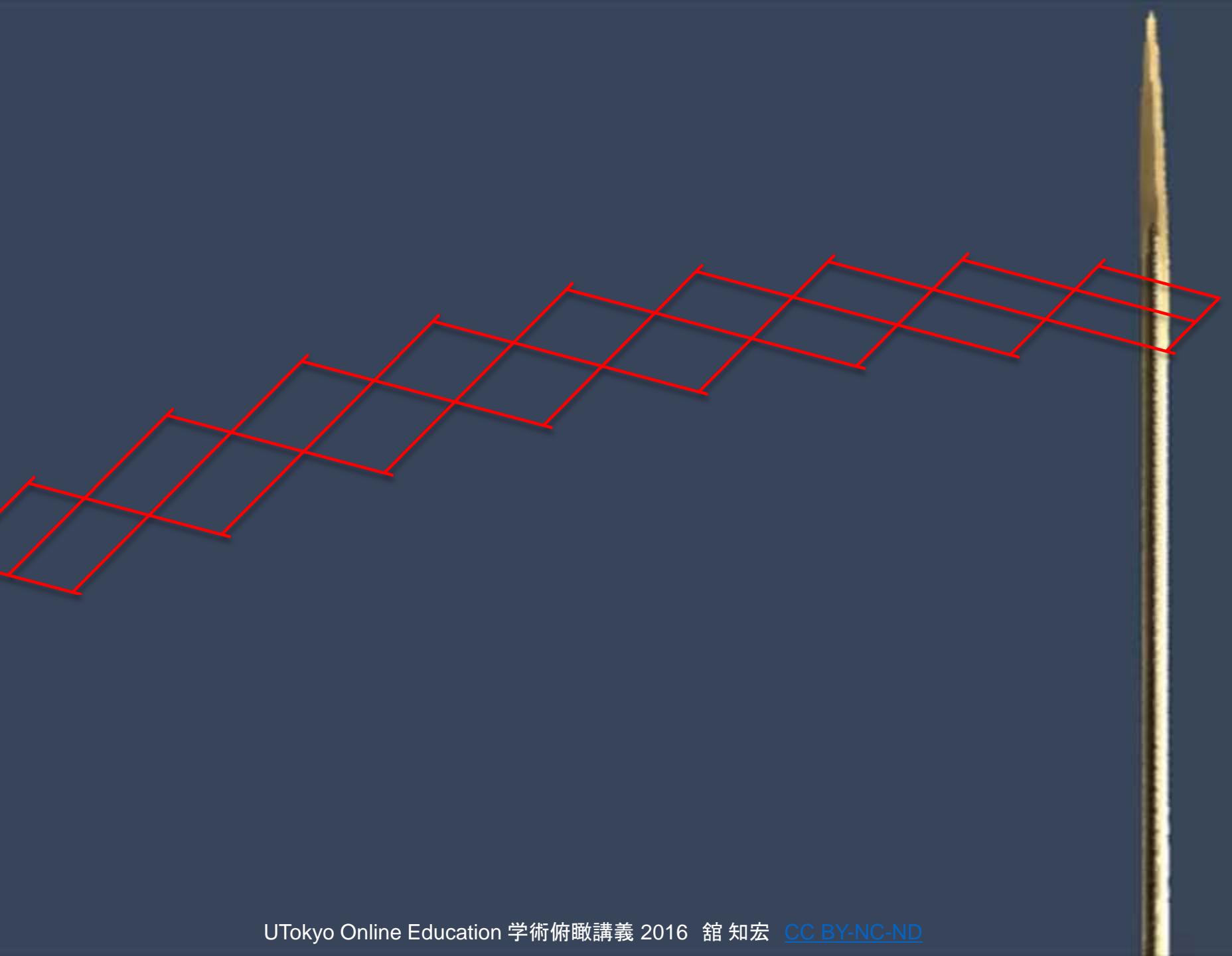


剛体折り曲線折り筒型構造



T Tachi "Composite Rigid-Foldable Curved Origami Structure"
Transformables 2013



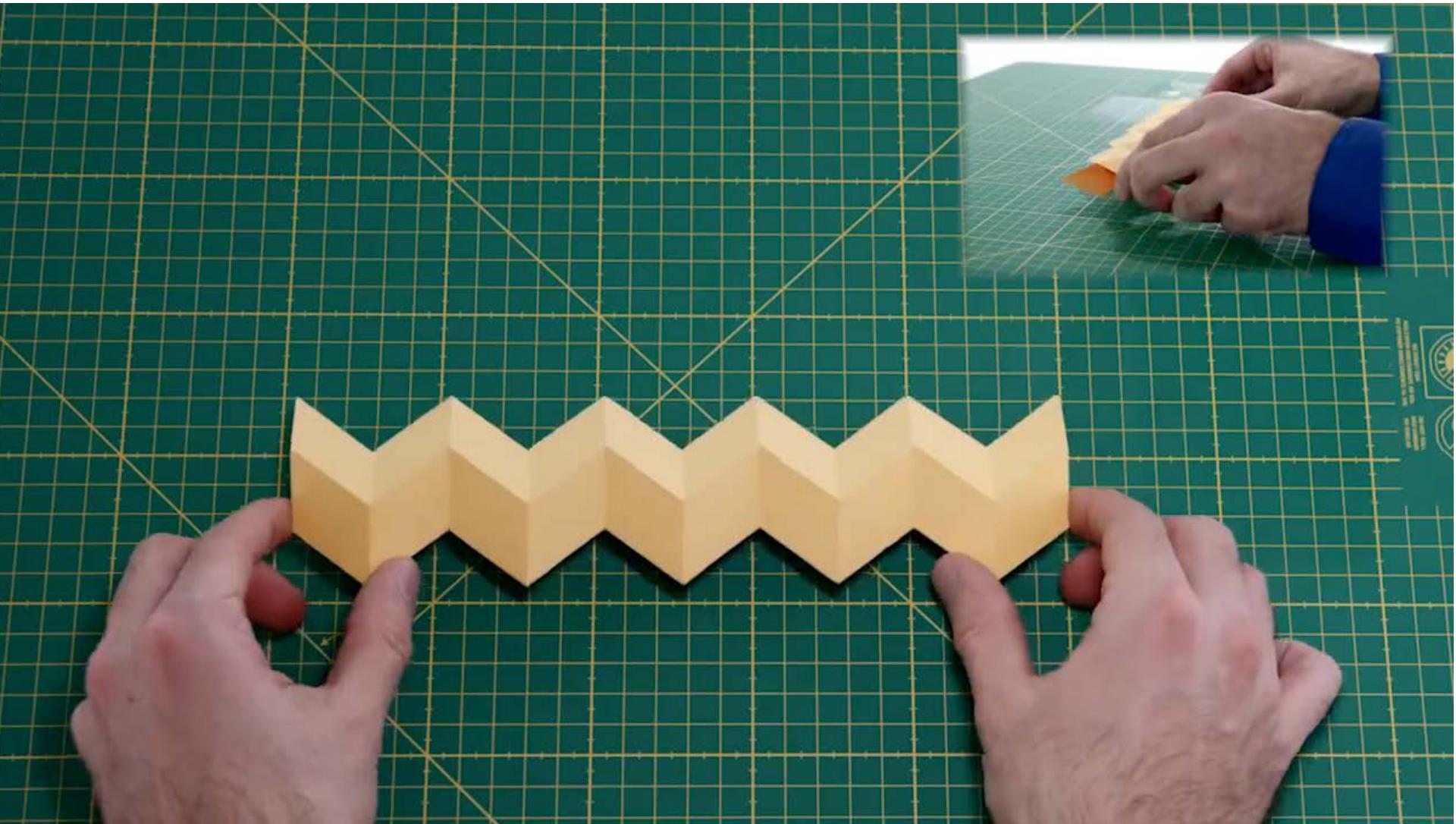






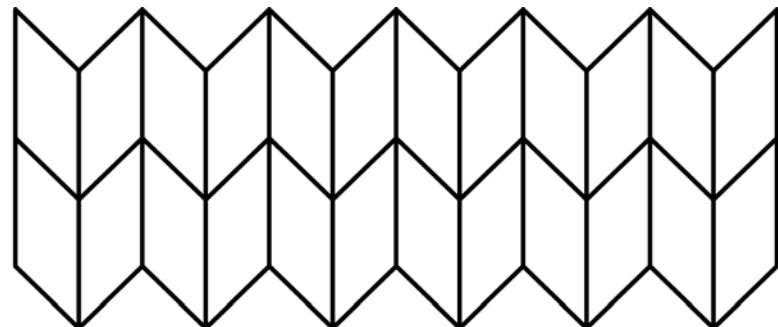
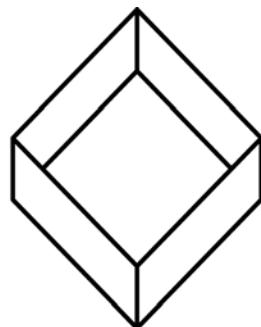
でも、まだやわらかい (□—カルな変形)

Evgueni T. Filipov, Tomohiro Tachi, and Glaucio H. Paulino,
Origami tubes assembled into stiff, yet reconfigurable structures
and metamaterials, PNAS, vol. 112 no. 40, 12321–12326,
<http://www.pnas.org/content/112/40/12321.full>
Supporting Information: Movie S1.
<http://www.pnas.org/content/suppl/2015/09/05/1509465112.DCSupplemental>

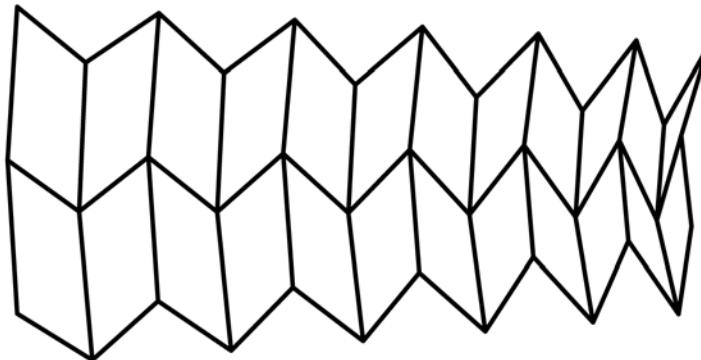


非一様な変形モード

Uniform
folding



Squeezing



Torsion of Corrugated Surface

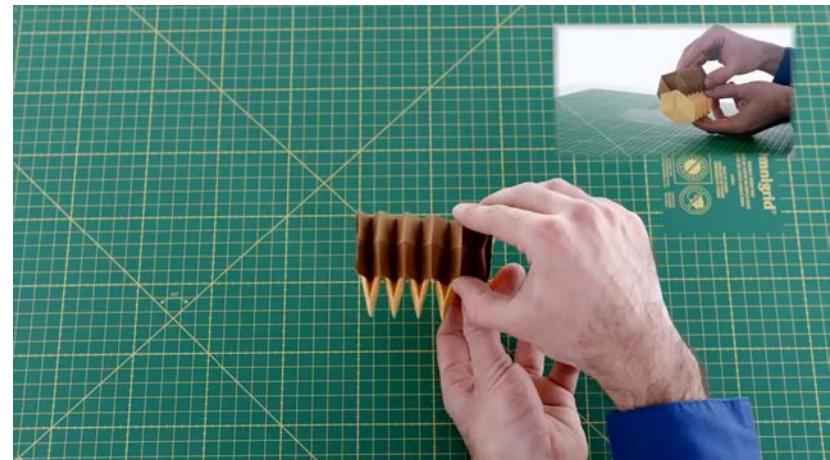
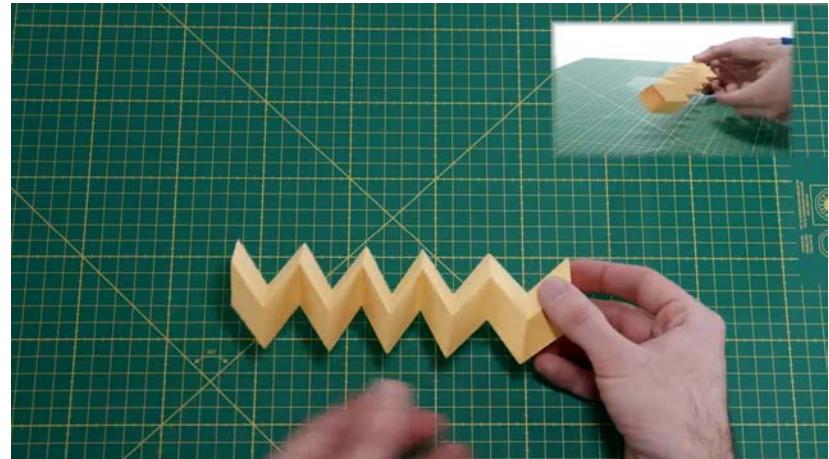
Gradient of Foldedness



「ジッパー構造」

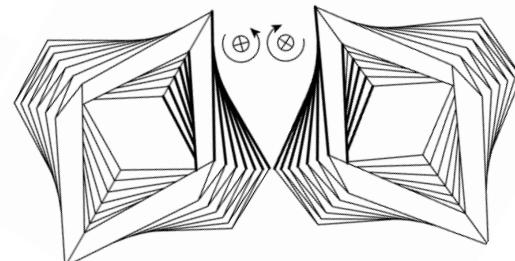
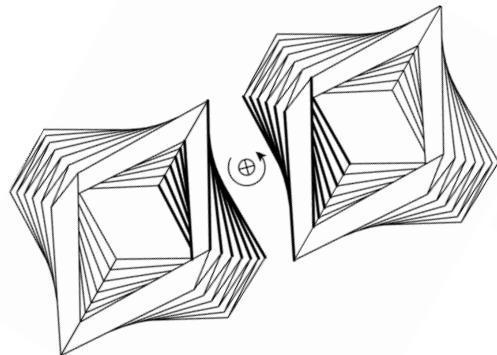
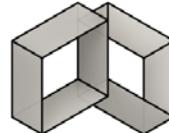
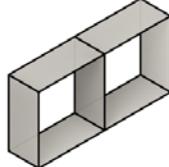
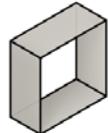
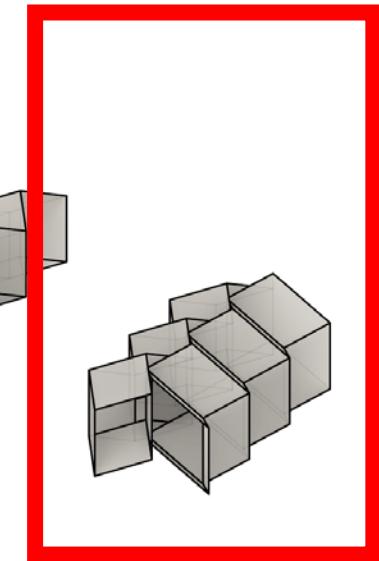
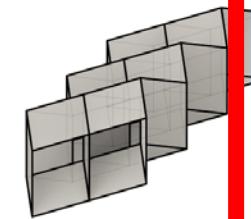
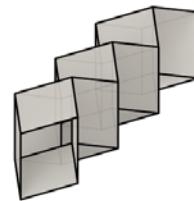
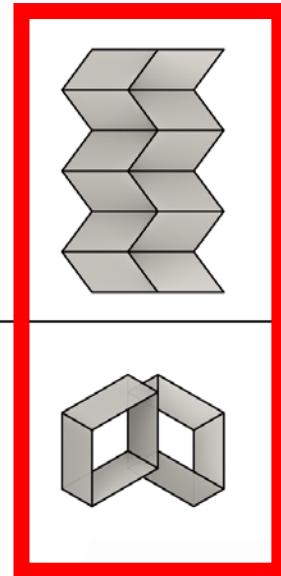
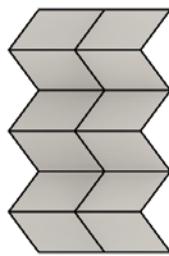
- 単体チューブ
 - 片側から反対側まで動きが伝わらない
- ジッパーチューブ:
 - 片側から全体へ動きが伝わる！

Evgueni T. Filipov, Tomohiro Tachi, and Glaucio H. Paulino,
Origami tubes assembled into stiff, yet reconfigurable structures
and metamaterials, PNAS, vol. 112 no. 40, 12321–12326,
<http://www.pnas.org/content/112/40/12321.full>
Supporting Information: Movie S1.
<http://www.pnas.org/content/suppl/2015/09/05/1509465112.DCSupplemental>



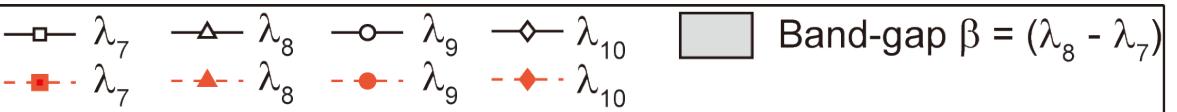
E. T. Filipov, T. Tachi, G. H. Paulino 2015
"Origami tubes assembled into stiff, yet
reconfigurable structures and
metamaterials", PNAS,

組み合わせ方で、全く違う挙動



Aligned Coupling

Zipper Coupling

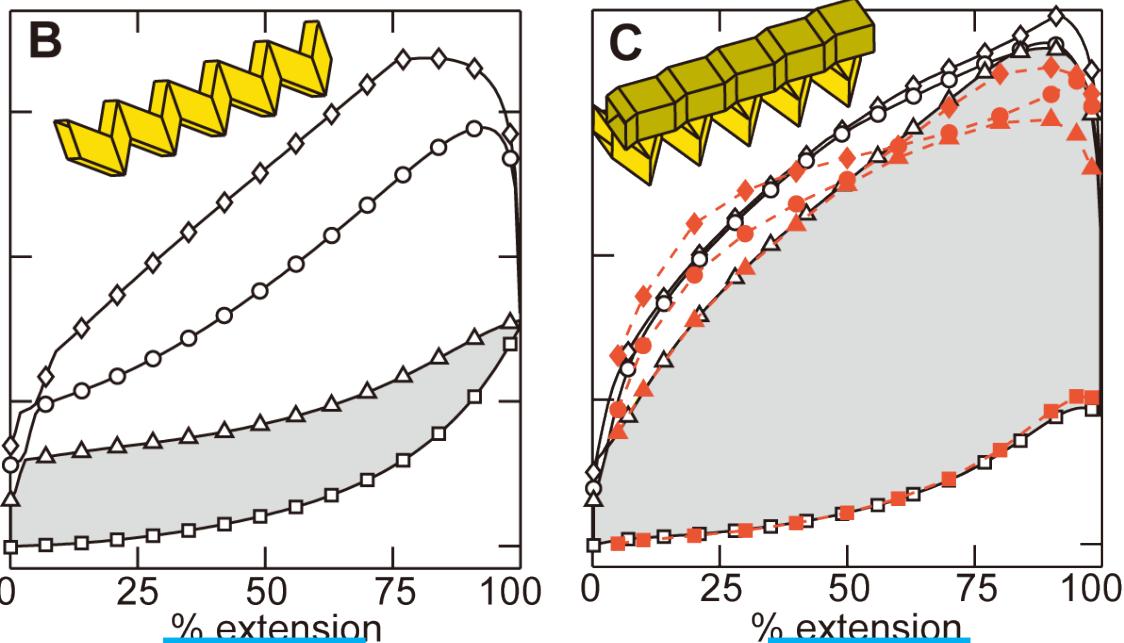


Zipper Coupling

B: Single Tube

7th mode Flexible

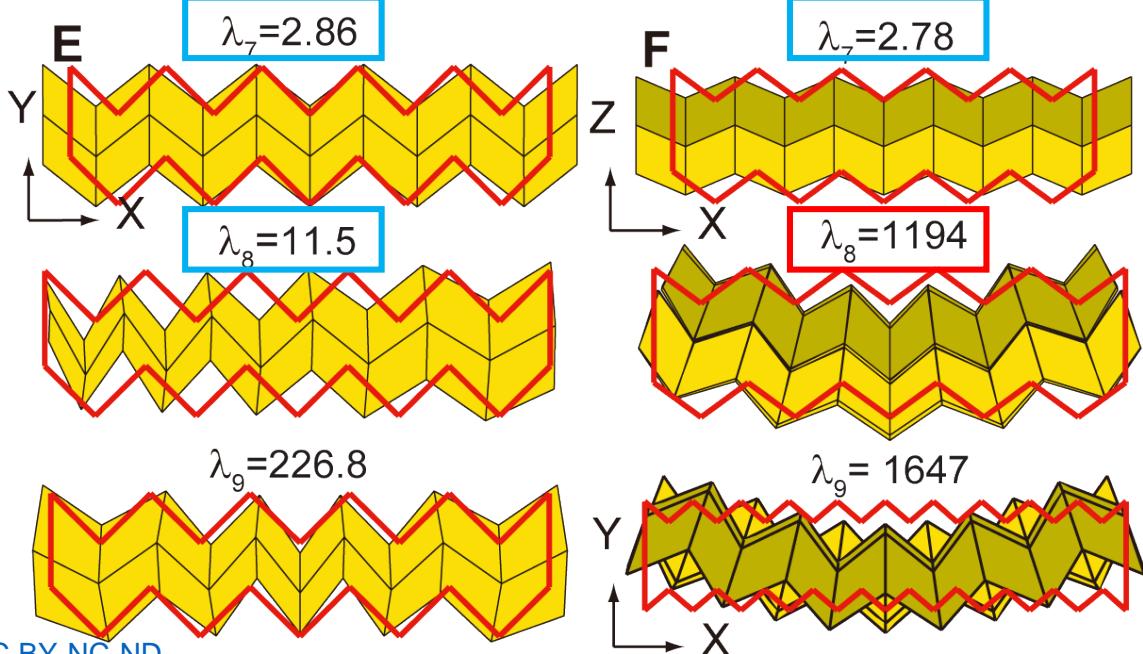
8th mode Flexible



C: Zipper Tube

7th mode Flexible

8th mode Stiff
(x100)

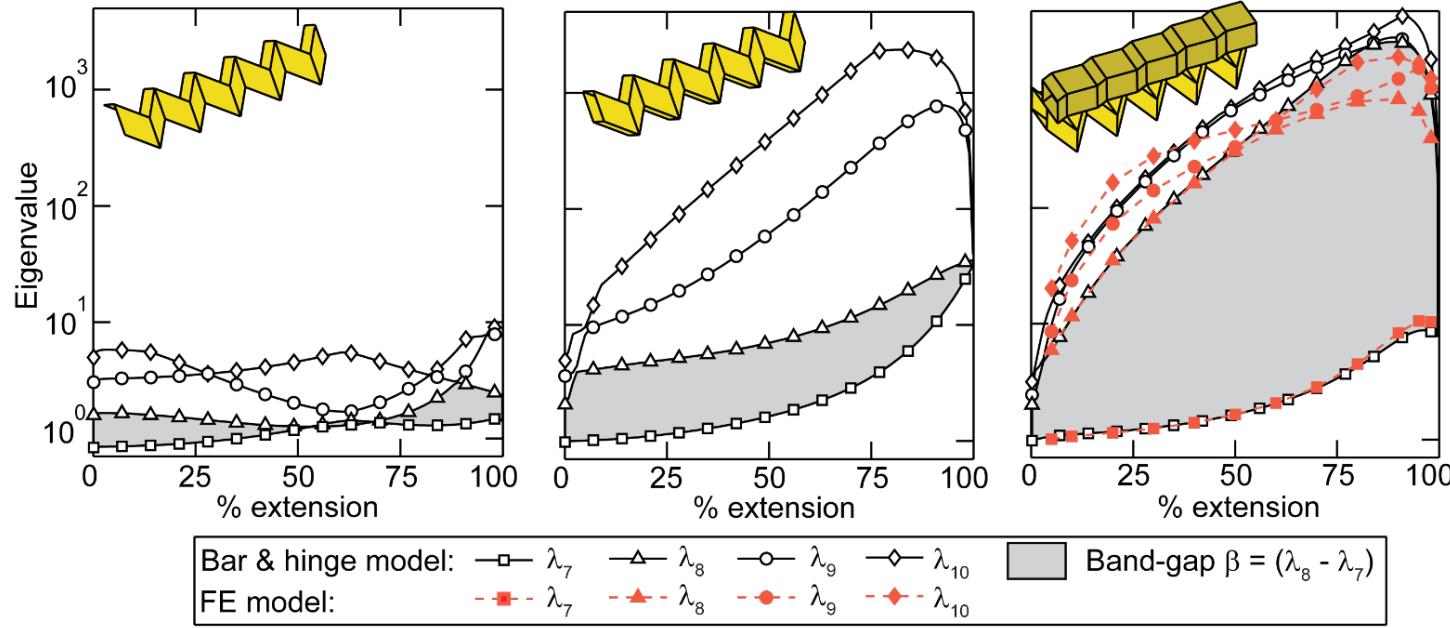


[Filipov, Tachi and Paulino, "Origami tubes assembled into stiff, yet reconfigurable structures and metamaterials" PNAS vol. 112 no. 40 2015] pp. 12321–12326, <http://www.pnas.org/content/112/40/12321> p. 12323, Fig. 3

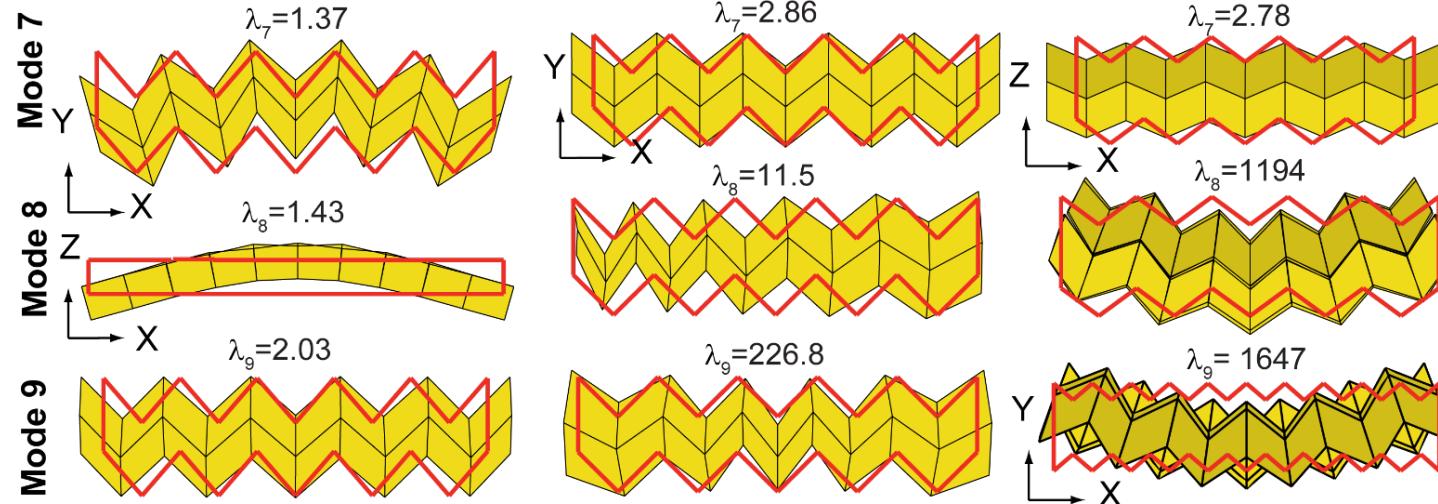
Sheet

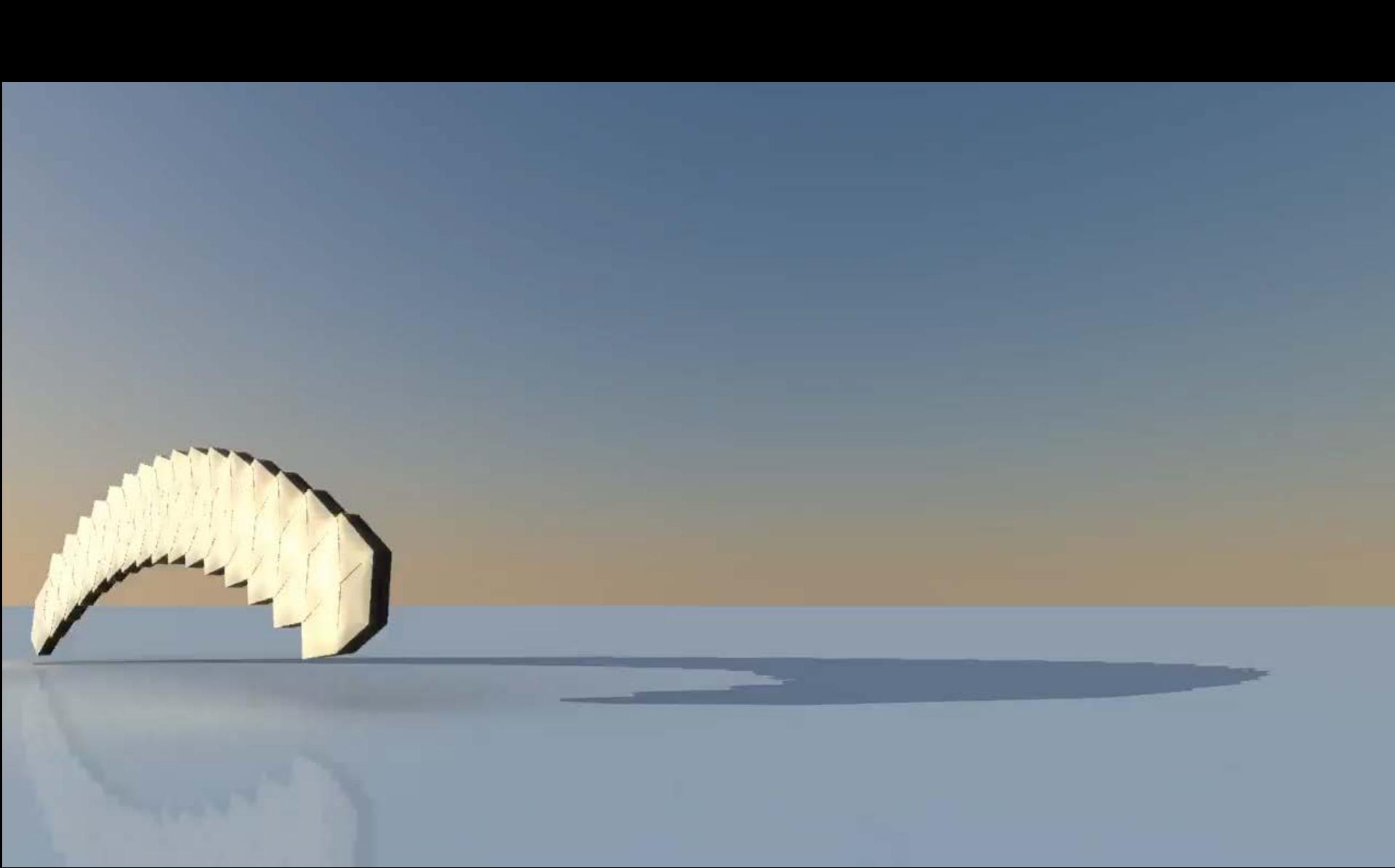
Tube

Zipper

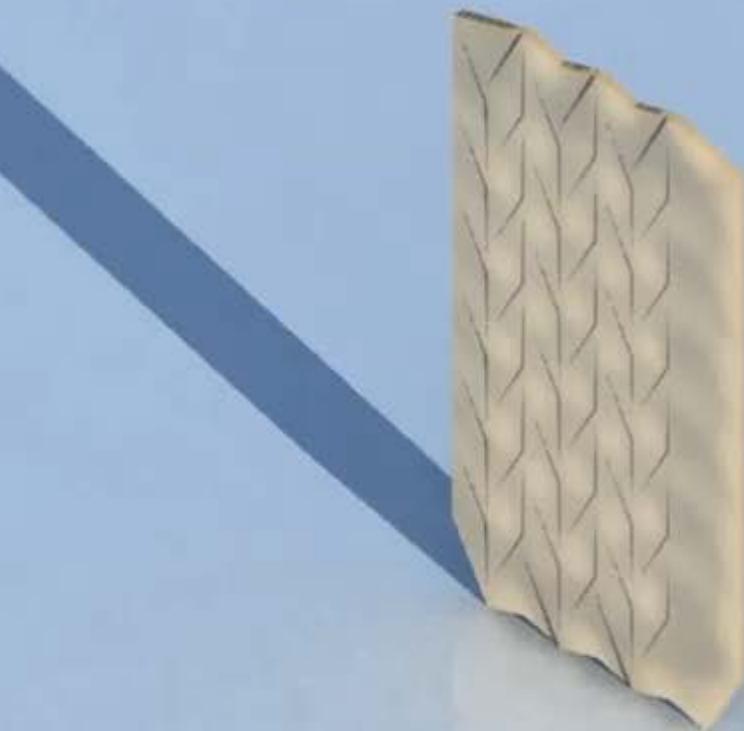


[Filipov, Tachi and Paulino, "Origami tubes assembled into stiff, yet reconfigurable structures and metamaterials" PNAS vol. 112 no. 40 2015] pp. 12321–12326, <http://www.pnas.org/content/112/40/12321> p. 12323, Fig. 3





Evgueni T. Filipov, Tomohiro Tachi, and Glauco H. Paulino, Origami tubes assembled into stiff, yet reconfigurable structures and metamaterials, PNAS, vol. 112 no. 40, 12321–12326,
<http://www.pnas.org/content/112/40/12321.full>
Supporting Information: Movie S3.
<http://www.pnas.org/content/suppl/2015/09/05/1509465112.DCSupplemental>



S字にのみ変形できるサンドイッチパ ネル

“Stiff and Flexible Material” @ Materializing III @ KCUA gallery at Kyoto 2015

[Tachi Filipov Paulino 2015]

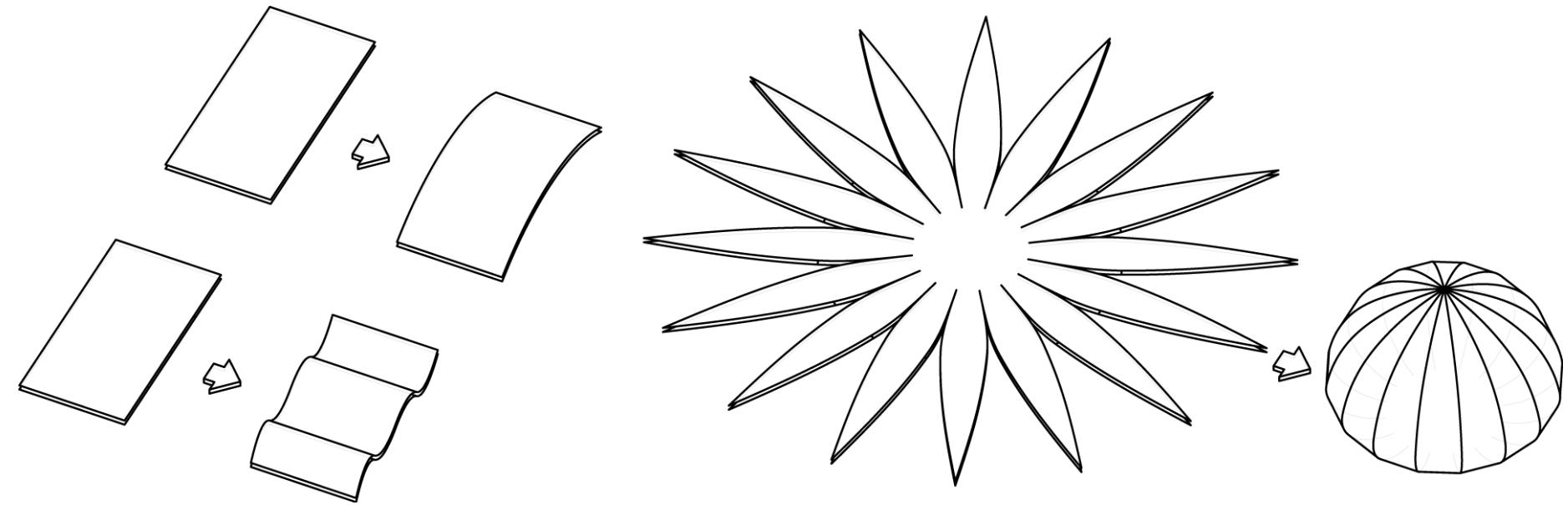


折り畳めるサンドイッチパネル

[Tachi Filipov Paulino 2015]



プログラマブルなサンドイッチシートで あらゆる構造をSelf-Fold可能にする



このようなSelf-Fold構造はこれまでミリ・マイクロスケール
でしか実現できなかった。これをメートルスケールにする。

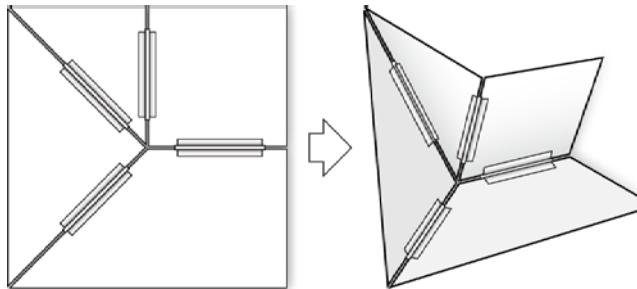
ところで、よくある工学の質問



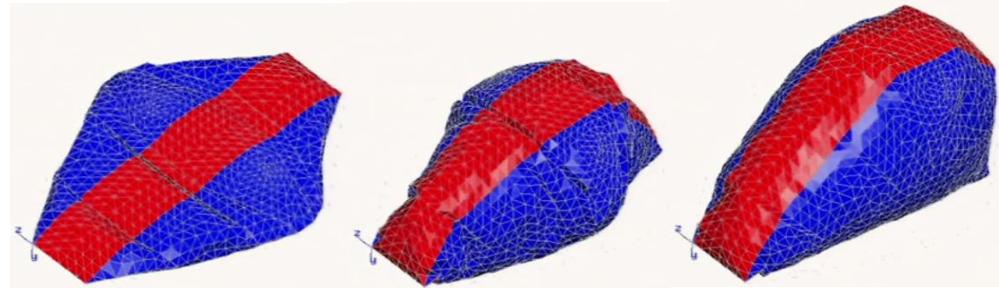
Expandable Dome
by Chuck Hoberman

Can you
Cover with
Origami?

閉じた構造を完璧なメカニズムで作りたい 変形可能な閉じた多面体



+

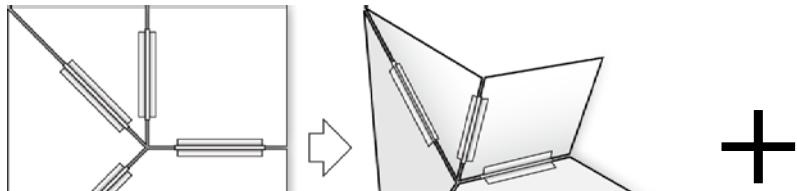


Airbag Folding

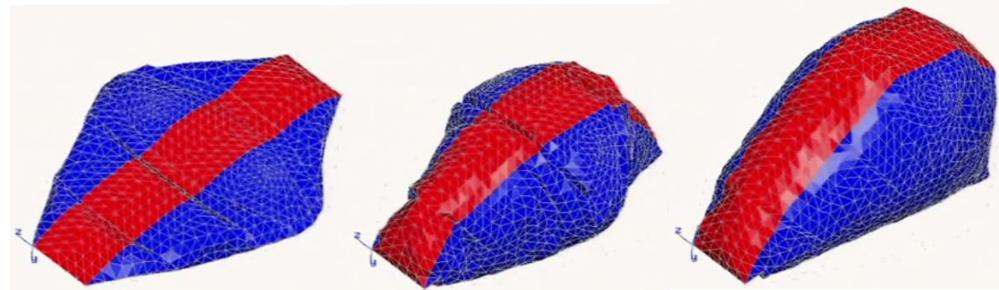
Hoffmann et al. + Robert Lang

Robert Lang Origami
Airbag Folding
<http://www.langorigami.com/article/airbag-folding>

閉じた構造を完璧なメカニズムで作りたい 変形可能な閉じた多面体



+



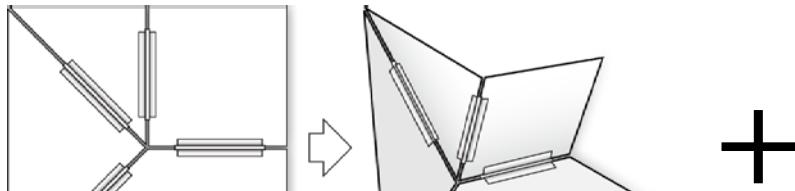
Airbag Folding

Hoffmann et al. + Robert Lang

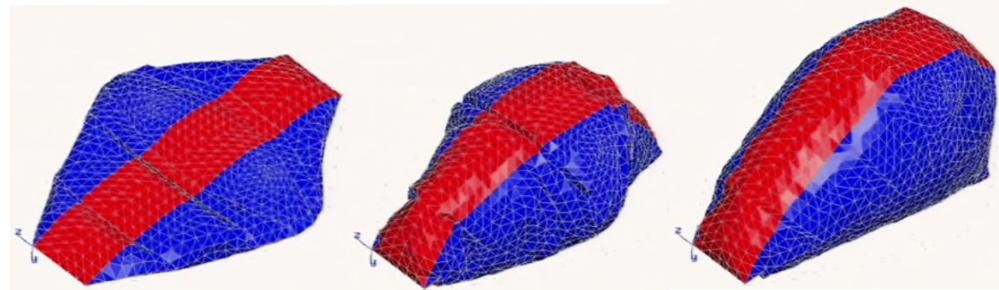
Robert Lang Origami
Airbag Folding
<http://www.langorigami.com/article/airbag-folding>

できたら、応用が広がりそう。
アクチュエータ・建築・置める容器...

閉じた構造を完璧なメカニズムで作りたい 変形可能な閉じた多面体



+



Airbag Folding

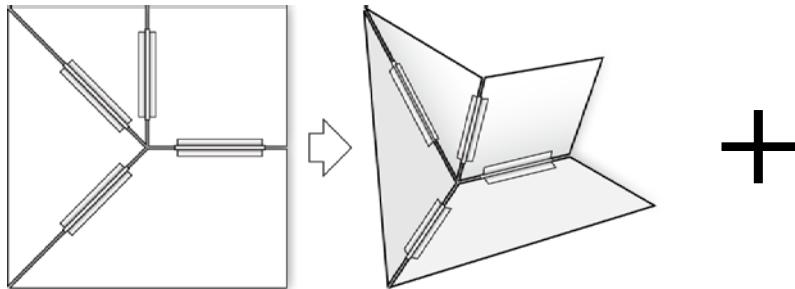
Hoffmann et al. + Robert Lang

Robert Lang Origami
Airbag Folding
<http://www.langorigami.com/article/airbag-folding>

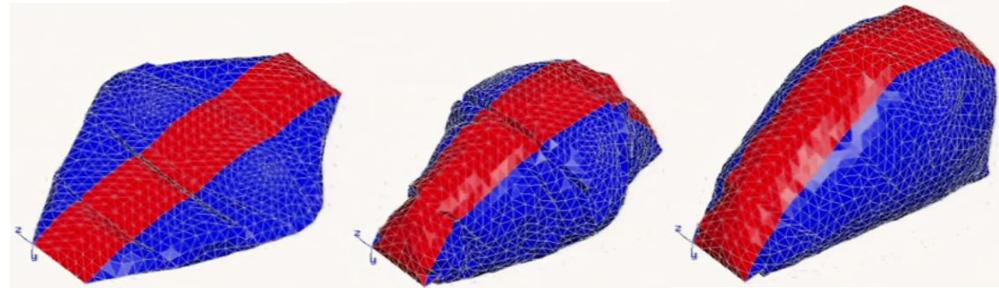
できたら、応用が広がりそう。
アクチュエータ・建築・置める容器...

できない！ Bellows Theorem by
Connelly, Sabitov, Walz
“柔軟な多面体は体積が変わらない”

閉じた構造を完璧なメカニズムで作りたい 変形可能な閉じた多面体



+



Airbag Folding

Hoffmann et al. + Robert Lang

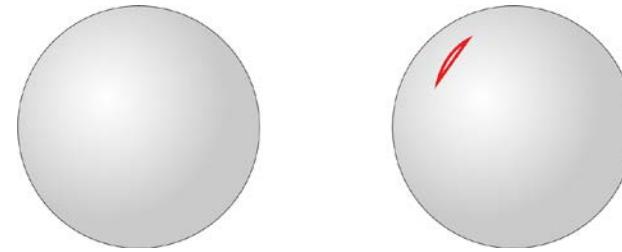
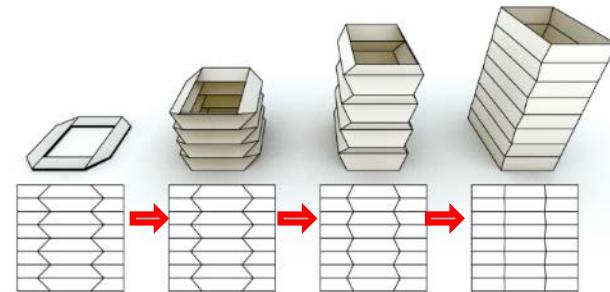
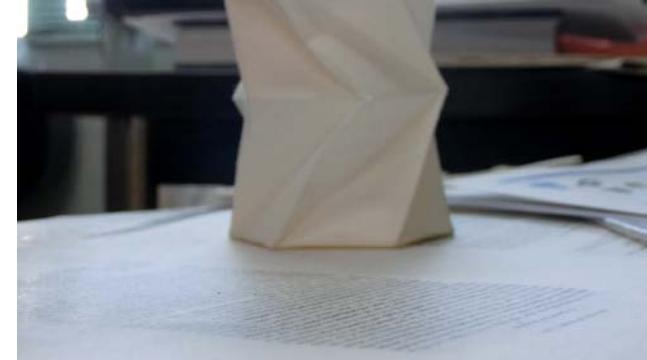
Robert Lang Origami
Airbag Folding
<http://www.langorigami.com/article/airbag-folding>

できない！ Bellows Theorem by
Connelly, Sabitov, Walz
“柔軟な多面体は体積が変わらない”

『剛体折紙のフィゴ』は折紙界の永久機関

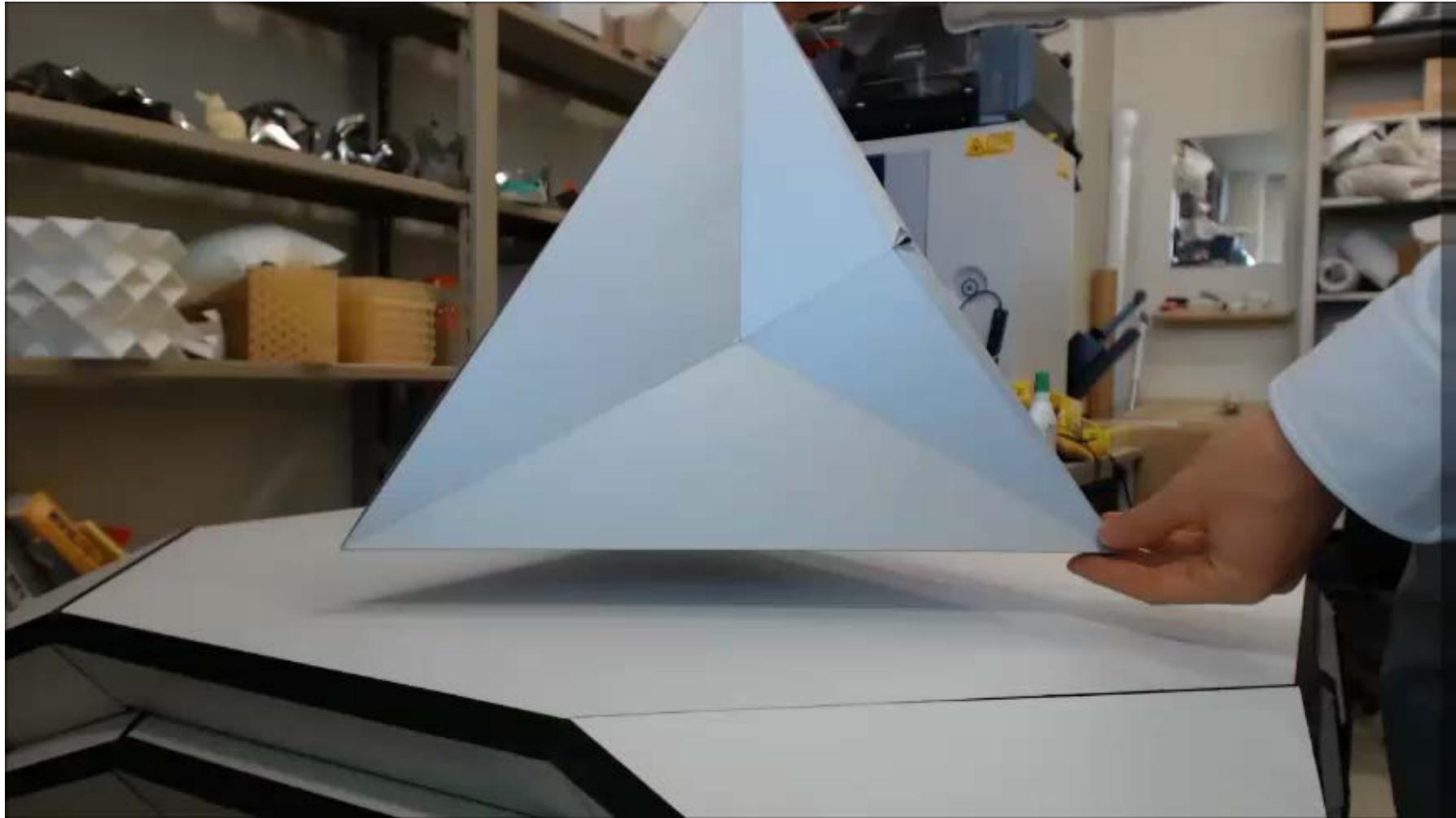
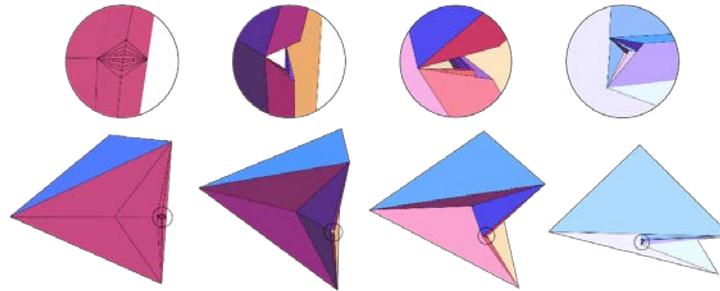
閉じた多面体を折り畳むためのチート

- 材料がすこし弾性変形する
Elastic
 - ちょっと変形しても良い
 - スナップスルーのある機構
- 折線が表面を移動する
Plastic
 - 折り線位置が微妙に変わっても良い
- スリットを作る
Rigid
 - 小さいスリットを作れば、閉じた多面体ではなく、開いた多面体となる



Psuedo-Bellows with slit

Abel, Connelly, Demaine, Demaine, Hull, Lubiw, Tachi 2014



まとめ

- 限界を突き詰めて形を作る
 - 限りなく薄い材料のとる形
 - 機構拘束が縮退状態となる形
 - Configuration Spaceが臨界状態となる形
- 特殊な性質が得られる
 - 単純に面白かったり
 - ときどき役に立ったり
 - 今まで得られなかつたような性質が得られる