

2. 7 折紙工学概要

紙の他、金属など様々な材料を折紙の対象とし実際の製品にするには、下図のように、新しい折紙の創出のほか、CAD, 計算力学、製造技術など総合的な検討が必要となる。

具体的には、下図に示すように、①バイオなどをベースとした折紙創製、②CAD&CGによる感性高揚技術、③計算力学、④製造加工、など検討内容は4つのフェーズがある。すなわち、第①フェーズで、様々な形を創出する。第②フェーズで美観の観点から第①フェーズで得られた形を具体的にCAD化し、CGで美的な観点から、形を修正また時にフェーズ①にフィードバックする。折り紙のIT化は第①フェーズの想像力を更に促進する。このようにして得られた形を③計算力学のフェーズで機能の適切化を行う。ここでは、第②フェーズのみならず第④製造加工フェーズとも密接な連携が必要となる。機能と製造加工とは両立が容易でないからである。また、産業界との密接な議論も折紙工学の推進に欠かせない。図2はバイオなどをベースに創製された折り紙である。ここで上述の4つの技術の総合で得られた、トラスコア構造と反転螺旋形円筒折紙構造の2例を説明する。

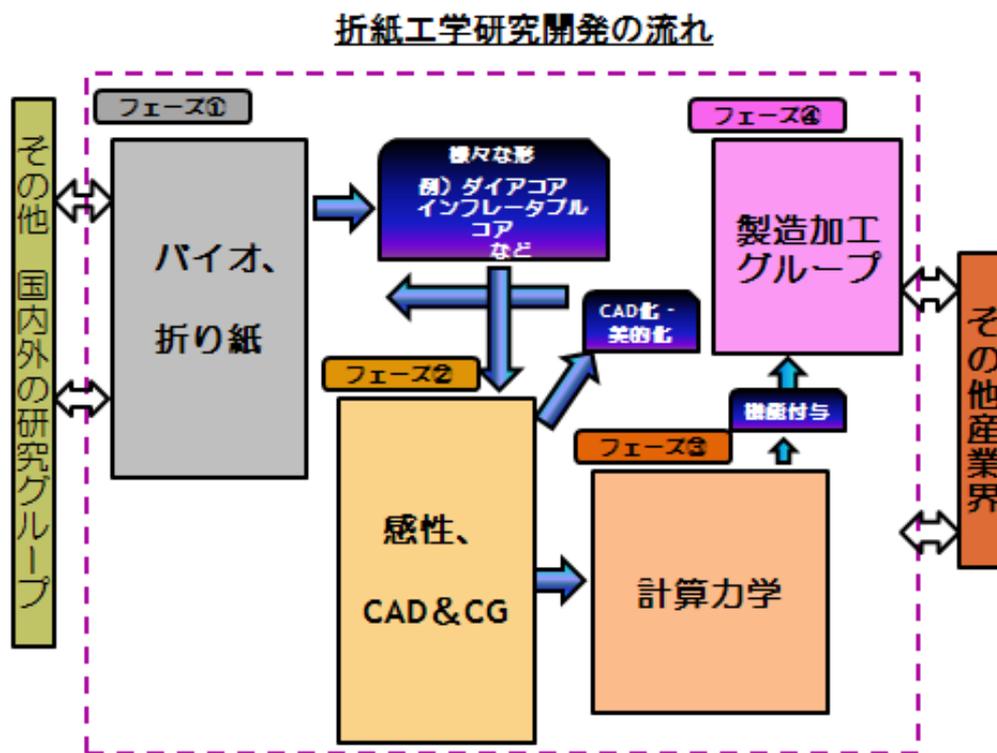


図1 研究開発とその流れ

2 トラスコアの場合

2. 1 創製・CAD・計算力学フェーズ

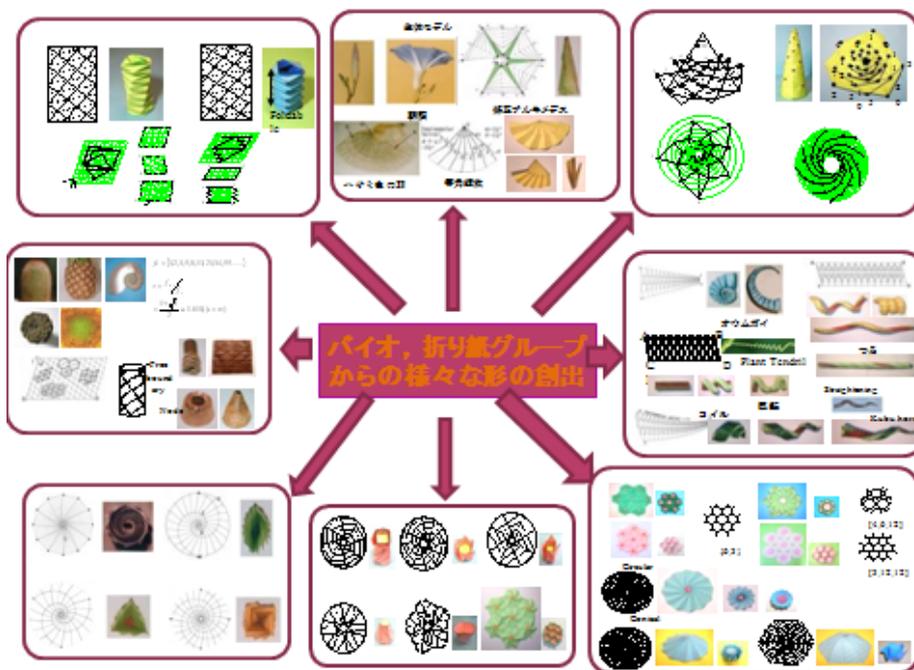


図2 バイオをベースとした折紙

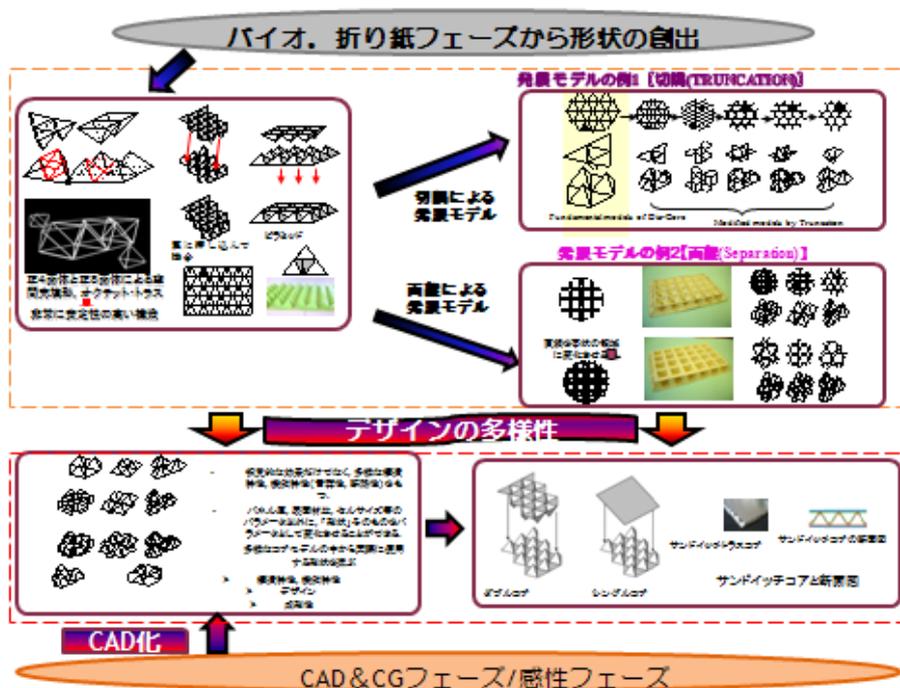


図3 ダイアコアの基本形と折紙操作によって得られるバリエーション

図3は、図4、図5の平面、空間充填理論を基に創製されたダイヤモンドコアの基本形と切り隅、面離等の折紙操作によって多くのバリエーションが得られることを示している。この場合もCADの援用は効果がある。

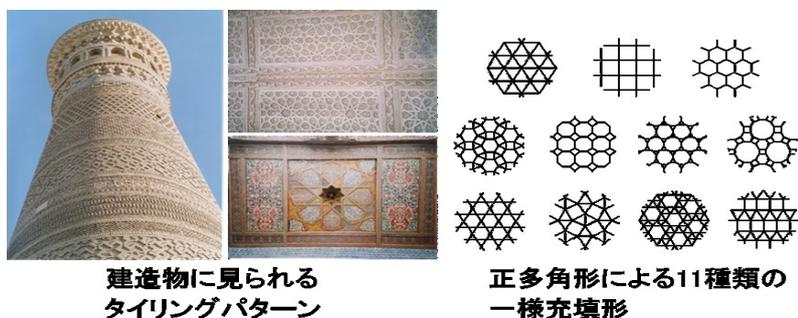


図4 平面充填形

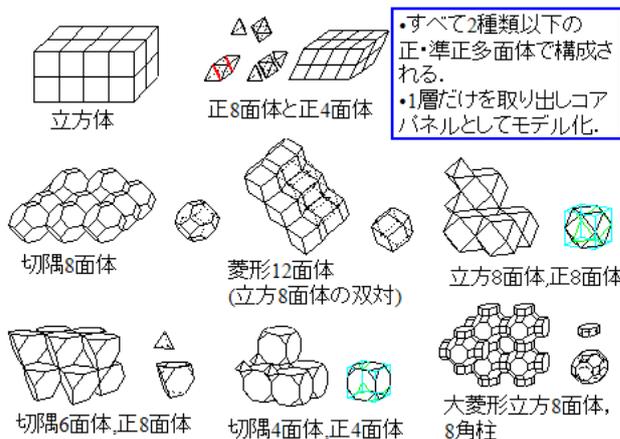


図5 空間充填形

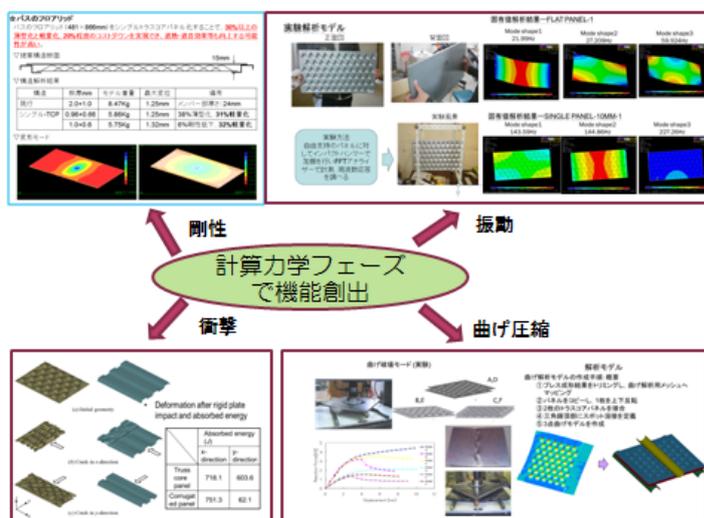


図6 計算力学フェーズで機能創出

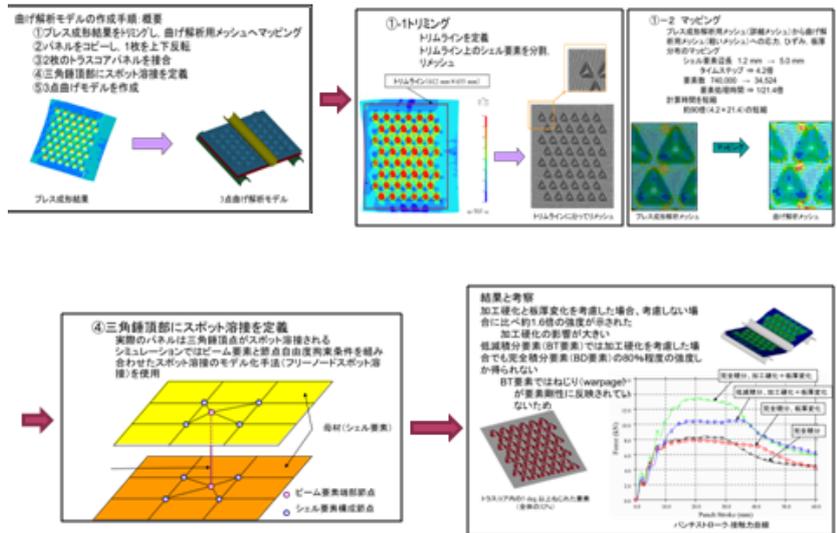


図7 解析シミュレーション上の工夫(曲げ圧縮解析の例)

図6はダイアコアの中で、特にトラスコアと称す四面体と八面体の空間充填で得られるコアの剛性、振動、衝撃、曲げ圧縮特性の最適化が行なわれる様子を示している。図7は曲げ圧縮特性の解析手順を示している。まず曲げ解析モデルの作成手順は次の通り。

- ① プレス成形結果をトリミングし、曲げ解析用メッシュへマッピングする。
- ② パネルをコピーし、1枚を上下反転する。
- ③ 2枚のトラスコアパネルを接合する。
- ④ 三角錘頂部にスポット溶接を定義する。
- ⑤ 3点曲げモデルを作成する。

上記①のトリミングは

- ・ トリムラインを定義
- ・ トリムライン上のシェル要素を分割し、リメッシュする。

からなる。また、マッピングの意味は、プレス成形解析用メッシュ（詳細メッシュ）から曲げ解析用メッシュ（粗いメッシュ）への応力、ひずみ、板厚分布のマッピングである。

上記④の三角錘頂部にスポット溶接の定義に関し、実際のパネルは三角錘頂点がスポット溶接される

- ・ シミュレーションではビーム要素と節点自由度拘束条件を組み合わせたスポット溶接のモデル化手法（フリーノードスポット溶接）を使用した。
- ここで、加工硬化と板厚変化を考慮した場合、考慮しない場合に比べ約1.6倍の強度が示されたが加工硬化の影響が板厚変化の影響より大きい
- ・ 低減積分要素（BT要素）では加工硬化を考慮した場合でも完全積分要素（BD要素）

の80%程度の強度しか得られない。BT要素ではねじり（warping）が要素剛性に反映されていないためである。

以上のように、折紙工学には高度な計算力学が欠かせない。

2.2 トラスコア構造の成形フェーズ

これまで折紙で量産化がなされたのは、図8に示すハニカムコアのコレゲート方式と展張方式だけであるが、今回トラスコアにたいし、図9に示す量産設備が得られた。これは、我々の開発した世界初の多段階成形法をもとに城山工業（株）で開発されたものである。

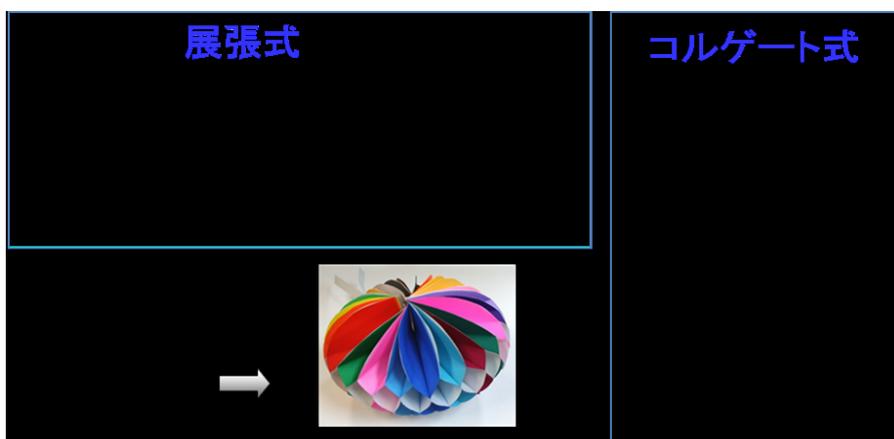


図8 七夕飾りとハニカムコアの二つの製造法

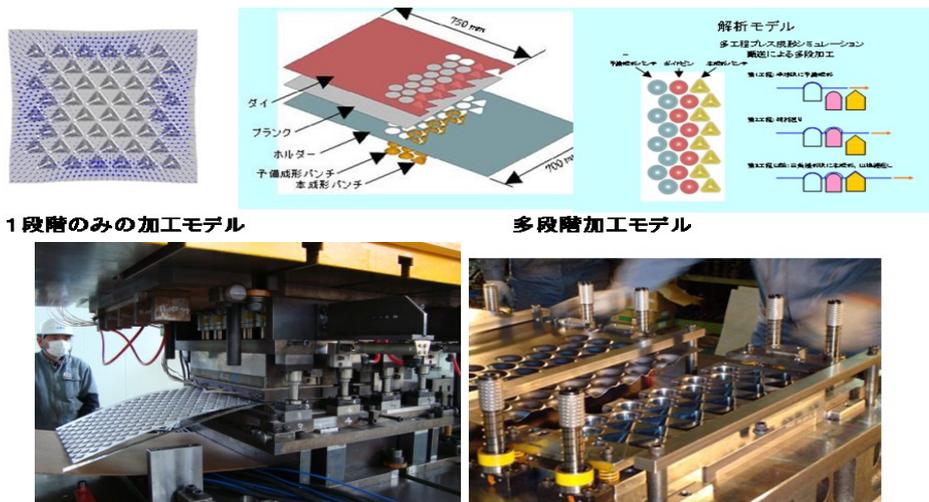


図9 多段階成形シミュレーションとそれに基づくトラスコアパネル量産設備

成形性のよい樹脂製パネルに関しては、真空成形によって比較的自由に形状を選ぶことができるが、金属製パネルに関しては深い凹部の成形は困難であり、従来技術では超塑性

成形，対向液圧成形など特殊な成形法を用いる必要があった。これらの成形法では製造コストが高いため，新しい軽量化手段としての広汎な分野への普及を図るため，より廉価な新しい成形技術の開発を目指し，計算力学の援用により更に廉価な製造を可能とする多段プレス成形法を開発したものである^{(1)~(5)}。

この設備によって開発されたシングルトラスコアの太陽電池パネルはまず相模原市庁舎に採用され⁽⁶⁾続けて米国大企業からも大量採用の計画がある。また太陽熱発電用ヘリオスタットでは、現在のガラス+スチール骨構造の骨を廃止し，トラスコアパネルを使用する構造を我が国独自のものとして三菱重工で採用される計画である。近々、トラスコア OA フロアも販売される。

3 反転螺旋形円筒折紙構造の場合

3.1 創製・CAD・計算力学フェーズ

図 10 に示すのは反転型の展開収縮可能な円筒折り紙構造体(Reversed Spiral Cylindrical Model:RSC)である。同図で α は多角形の辺数をあらわす。また、 β が同図の式(1)を満足すれば RSC は極めて低荷重で圧潰し、同式が成立しない β の場合、まさに反転しながら、かなりの反力を出し圧潰する。前者は飲み干したビール缶やペットボトルに利用できないか、後者は、自動車のエネルギー吸収材として利用できないか、の検討をした。自動車衝突時、サイドメンバーと称される中空の、ハット型パネルと平板とをスポット溶接した半割り型構造部材がいわば命綱であるが、理想的に潰れても自らの嵩張りが邪魔をし自長の 7 割程度しか圧潰しない。クラッシュゾーンでは、できるだけ長く潰したいわけである。そこでこの RSC を使用することを思いついた。同図右は、RSC を 3 段に重ねたものである。CAD 化し、3D プリンターで試作すると図 11 に示すように角部で破断が生じた。そこで、サブディビジョンをかけることにより、同図に示すように美観化とともに成形性の向上が得られた。

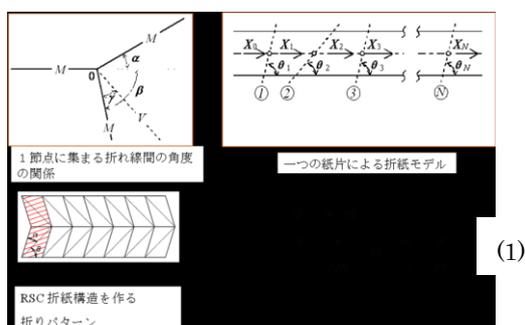


図 10 RSC 展開図と折紙理論

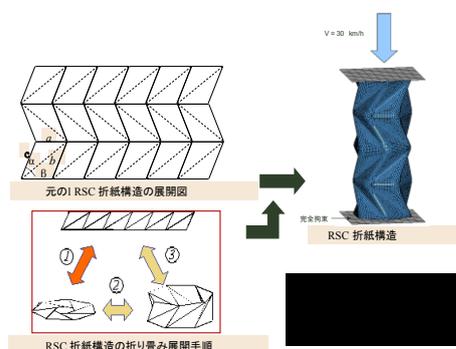


図 11 RSC 折紙構造

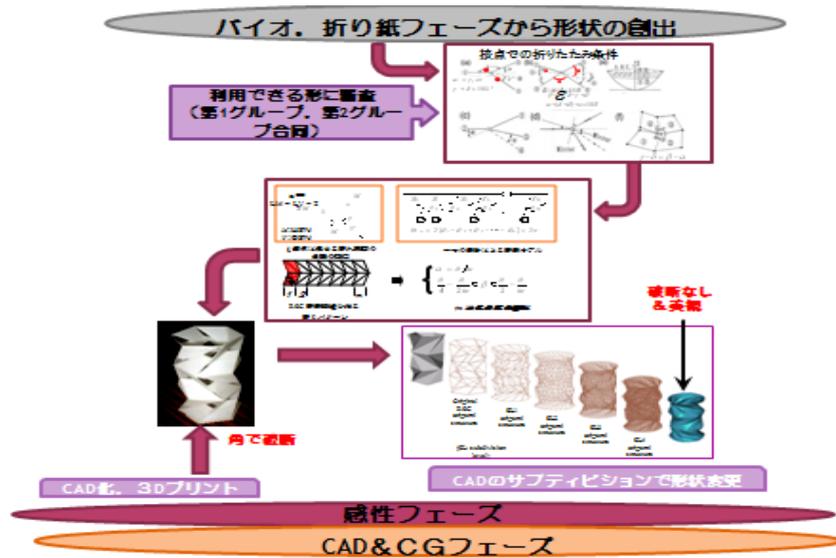


図12 サブディビジョンにより成形性向上と美観化が得られた様子

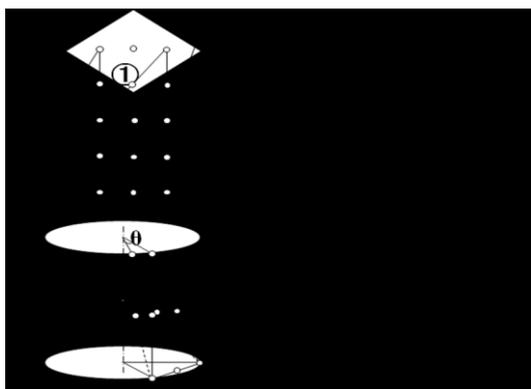


図13 円筒からRSCを表現

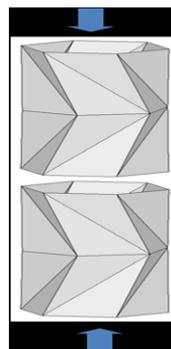


図14 RSCの長所



サイドメンバー

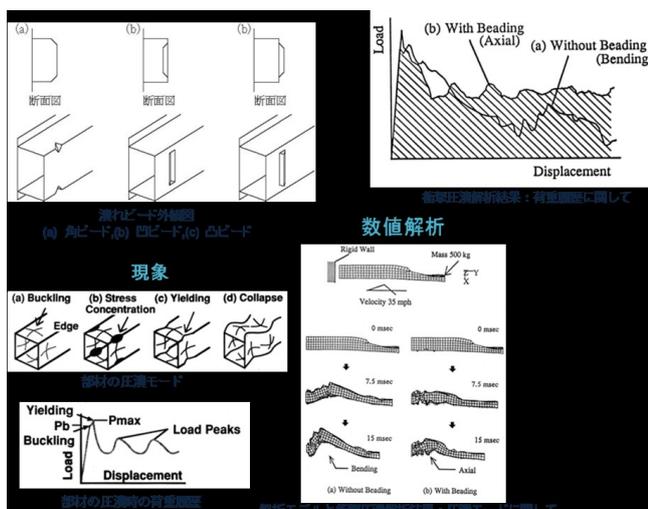


図15 サイドメンバーとビード採用による潰れコントロールの様子

果たして自長の9割は潰れる。しかし、図12の仕様では、荷重は思ったほど出ない。そこで、図13に示すように円筒形から自動的にRSCを表現する方法を考案し、最適化過程で逐次、形状が複雑に変わるRSCで多くのパラメータを使った最適化解析を可能とした。その結果、等重量で従来構造の1.8倍ものエネルギー吸収が得られる設計仕様が見つかった。この特徴は、図14に2段の例で示すように、斜め折れ線で反力が調整でき、回転しながら収縮（圧潰）するため衝突時間も長くなり乗員傷害値に有利となる。同図で“ビード不用”とあるのは、萩原らによって発明された^{(6),(7)}。ビードが現行の半割り型部材で良好な圧潰モードを得るのに欠かせないことを意味している。

3. 2 成形フェーズ

図16のようにRSCはハイドロフォーミングで製造できることを示し⁽⁸⁾、ハウスメーカーからは興味を持たれている。しかし、原価の厳しい自動車会社からは、採用を検討している段階であり、即歓迎とはならなかった。そこで、図17に示すように、従来の半割り型断面構造にRSCと同様の特性が得られれば、より安いコストで従来以上の素晴らしい特性が得られるものと期待した。

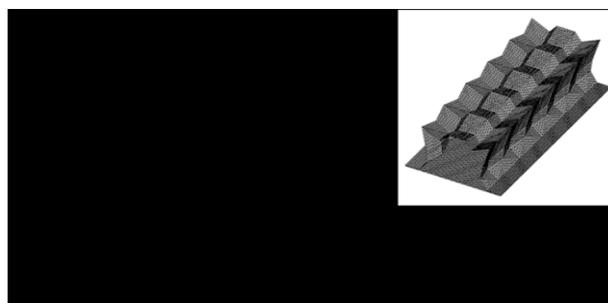
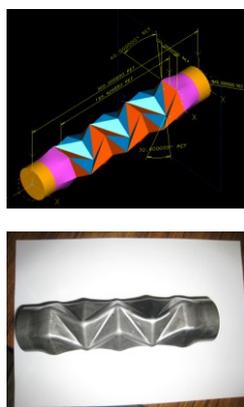


図16 試作されたRSC

図17 RSC構造から半割り

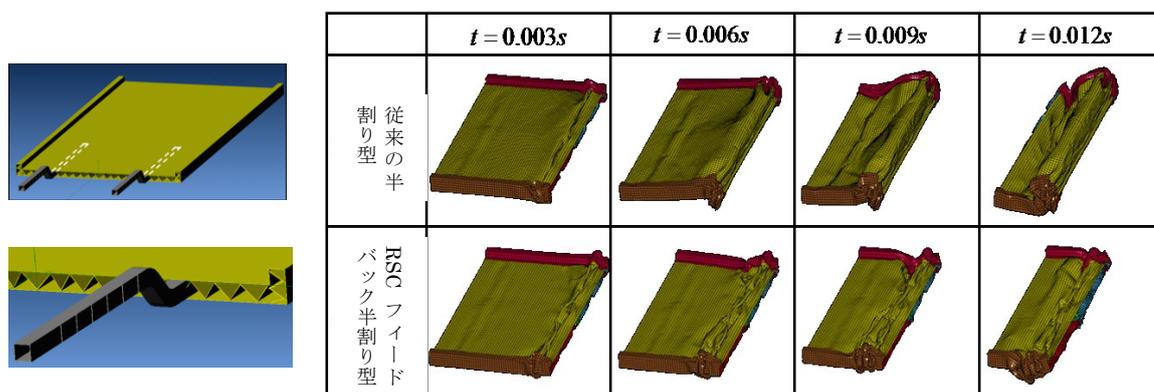
型構造へのフィードバック

半割り型部材は、1枚の折り板と1枚の平板をスポット溶接で結合された構造であるため、RSCのように回転できない。そこで、図17に示すように軸方向に沿って複数段をし、更に斜め方向に沿った折り線を入れることによって、各段の内部および各段の間にRSCと同様の变形傾向が生じることを見出した。すなわち、RSCと同様に、分段と斜め折れ線で圧潰変形モードと反力を自在にコントロールでき、適切な設計仕様によって衝突エネルギー吸収性能の向上や斜め方向荷重にも強い結果も得られた⁽⁹⁾。

これは現在、自動車会社からも強い関心を持たれている。すなわち従来の構造も折り紙構造から再考察することの重要性を示した。なおこの新しい半割り型部材は、従来の床下

に設置する場合は勿論、電気自動車にトラスコアを設置し、その間に部材を入れる場合も図 18 に示すように極めて良い圧潰モードを与え極めて有効である。

折り紙形状は時に安価な加工は困難。ならば従来の、安価に加工できる構造体に折り紙的效果を入れるべく形状を折り紙形状化することにより従来以上の性能を得ることも折紙工学の重要な側面である。この例を示したものである。



(a) トラスコア電気自動車コンセプト

(b) RSC 半折り型の優秀性

図 18 電気自動車でトラスコアを利用してスペースユーティリティを図るコンセプトと従来半折り型に比し RSC 半折り型の優秀性

参考文献

- (1) 戸倉直, 萩原一郎, トラスコアパネルの製造シミュレーション, 日本機械学会論文集 (A 編) Vol. 74 巻 746 号, 2008, pp. 1379-1385.
- (2) 戸倉直, 萩原一郎, 成形シミュレーションで得られる加工硬化を考慮したトラスコアパネルの曲げ剛性の検討, 日本機械学会論文集 A 編日本機械学会論文集 075 巻 753 号 A 編, 2009, pp. 588-594.
- (3) 斉藤一哉, 武田晃太, 戸倉直, 萩原一郎, 「新しく開発した軽量コアパネルの幾何学的パターンと成型性の関係」, 日本機械学会論文集 A 編, 75 巻 751 号, 2009, pp. 111-117.
- (4) S. Tokura, I. Hagiwara, Forming Process Simulation of Truss Core Panel, Journal of Computational Science and Technology, Vol. 4 (2010), No. 1, pp. 25-35 (Release Date: March 30, 2010)
- (5) S. Tokura, I. Hagiwara, A Study for the Influence of Work Hardening on Bending Stiffness of Truss Core Panel, J. Appl. Mech., Vol. 77/031010-1-031010-6 (2010-5).
- (6) 萩原一郎, 津田政明, 北川裕一, ビードの配置決定方法, 出願日 89 年 1 月 6 日, 取得日 91 年 4 月 18 日.

(7) I. Hagiwara, M. Tsuda, Y. Kitagawa and T. Futamata, Method of Determining Positions of Beads, United States Patent, Patent Number 5048345.)

(8) 趙希祿、胡亜波、萩原一郎、折紙工学を利用した円筒薄肉構造物の衝突圧潰特性の最適設計、日本機械学会論文集 A 編、76 巻 761 号 (2010-1), pp. 10-17.

(9) 趙希祿、胡亜波、萩原一郎、衝突方向のばらつきを考慮した半割り型自動車サイドメンバーの圧潰エネルギー吸収性能のロバスト最適化、日本機械学会論文集 A 編、76 巻 767 号 (2010-7), pp. 868-875.

付録 1 折紙工学の大規模構造への応用について

現在、検討中の課題を図 19 に示す。図 20 は米国でハニカムコアを用いて実現が試みられているものである。

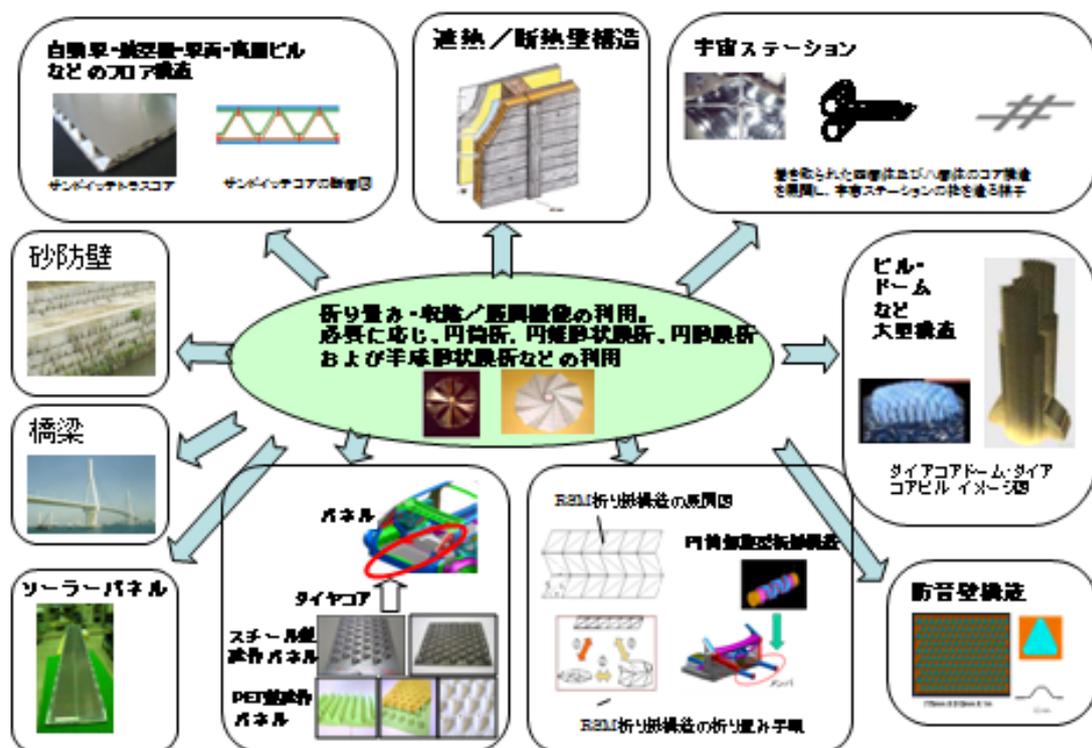
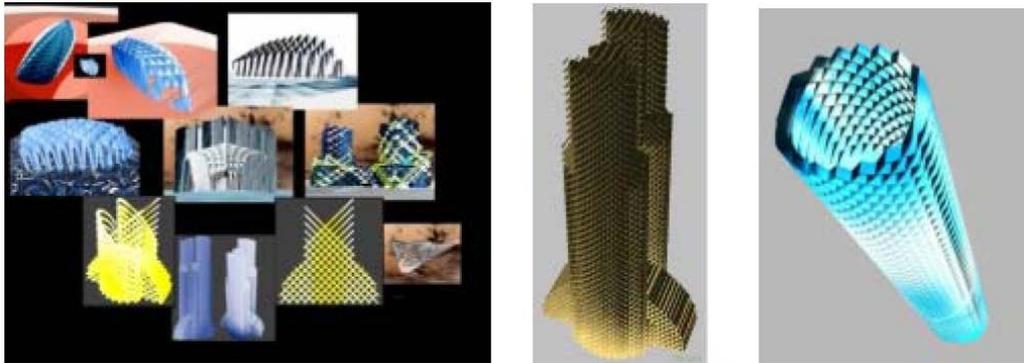


図 19 ハニカムビル、モニュメント、船、チューブ(航空機の胴体)等の

図 20 ハニカム構造のコンピュータグラフィックモデル



ハニカムコアは、曲面化が難しいのに対し、トラスコアはそれが可能である。更に我々は、トラスコア、インフレータブル型の高剛性軽量コア、展開収縮可能な円筒折りコア、円形膜折りコア、振れ多面体コアの他、立体折り、剛体折りなどラインナップが充実している。構造体を強度部とフレキシブル部に分け、フレキシブル部は展開・収縮が可能な新しい概念の折り紙スマート構造の新しい学問体系構築の足掛かりとし図19の大規模知能構造ができるだけ早急に得られるよう努力してゆきたい。その一つのポイントは、同図の宇宙ステーションの枠構造がどれだけ最適なものが得られるかによると考えられる。

付録2 折紙工学の包装機設計・製造への応用例

-----折紙工学関連の論文リスト-----

参考文献

(1) 萩原一郎、灘吉聡、折り紙工学を利用した円筒構造物の圧潰解析、自動車技術会論文集 Vol. 34, No. 4(200310), pp. 145-149.	2004
(2) 萩原一郎、山本千尋、陶金、野島武敏、反転らせん型モデルを用いた円筒形折り紙構造の圧潰変形特性の最適化検討、日本機械学会論文集A編70巻 689号(2004/1), pp. 36-42.	2004
(3) Z. Wu, I. Hagiwara and X. Tao, Optimisation of crush characteristics of the cylindrical origami structure, Int. J. Vehicle Design, Vol. 43, Nos. 1-4(2007), pp66-81.	2007
(4) 戸倉直、萩原一郎、トラスコアパネルの製造シミュレーション、日本機械学会論文集 (A編) Vol. 74巻 746号 (2008-10) , pp. 1379-1385.	2008
(5) 斉藤一哉、野島武敏、萩原一郎、新しく開発した軽量コアパネルの幾何学的パターンと機械的特性の関係、日本機械学会論文集A編 Vol. 74巻748号 (2008-12) , pp. 1580-1586.	2008
(6) 斉藤一哉、野島武敏、森村浩明、萩原一郎、新しく開発した軽量コアパネルの曲げ剛性の評価」日本機械学会論文集A編75巻750号 (2009-2) , pp. 259-265.	2008
(7) 斉藤一哉、武田晃太、戸倉直、萩原一郎、新しく開発した軽量コアパネルの幾何学的パターンと成型性の関係」、日本機械学会論文集A編75巻751号 (2009-3) , pp. 381-387.	2009
(8) 戸倉直、萩原一郎、成形シミュレーションで得られる加工硬化を考慮したトラスコアパネルの曲げ剛性の検討、日本機械学会論文集A編、 075巻753号A編 (2009-5) , pp. 588-594.	2009
	2009
	2009
	2009

- (9) Arzu Gonenc Sorguc, Ichiro Hagiwara, and Semra Arslan Selcuk, Origamics In Architecture:A Medium Of Inquiry For Design In Architecture, Middle East Technical University, Journal Of The Faculty Of Architecture, Vol.26, No.2, pp.235-247, (2009-12)
- (10) 趙希祿、胡亜波、萩原一郎、折紙工学を利用した円筒薄肉構造物の衝突圧潰特性の最適設計、日本機械学会論文集 A 編、76 巻 761 号 (2010-1), pp.10-17.
- (11) S. Tokura and I. Hagiwara Forming Process Simulation of Truss Core Panel, Journal of Computational Science and Technology ,Vol. 4 (2010) , No. 1,pp.25-35 (Release Date: March 30, 2010)
- (12) S. Tokura, I. Hagiwara, A Study for the Influence of Work Hardening on Bending Stiffness of Truss Core Panel, J. Appl. Mech., Vol.77/031010-1-031010-6(2010-5).
- (13) 戸倉 直, 萩原一郎, トラスコアパネルの衝撃エネルギー吸収性能向上のための形状最適化, 日本機械学会論文集 (A 編)、76 巻 765 号 (2010-5) pp.564-572.
- (14) 田中 聡, 斎藤 一哉, 森村浩明, 萩原 一郎, トラスコアパネルの振動特性に関する研究、日本機械学会論文集 C 編、76 巻 765 号 (2010-5) , pp.1050-1055.
- (15) 森村浩明、濃沼義典、アハメド・デソキ、萩原一郎、包装機械における成型型の設計の検証、日本機械学会論文集 C 編、76 巻 765 号 (2010-5) , pp.1316-1322.
- (16) 趙希祿、胡亜波、萩原一郎、衝突方向のばらつきを考慮した半割り型自動車サイドメンバーの圧潰エネルギー吸収性能のロバスト最適化、日本機械学会論文集 A 編、76 巻 767 号 (2010-7) , pp.868-875.
- (17) 趙希祿、胡亜波、萩原一郎、折紙工学援用による半割り型自動車サイドメンバーの圧潰エネルギー吸収性能に関する研究、日本機械学会論文集 A 編、76 巻 767 号 (2010-9) , pp.1131-1138. 2010
- (18) Ahmed Desoki, Hiroaki Morimura and Ichiro Hagiwara, General Design of the Forming Collar of the Vertical Form, Fill and Seal Packaging Machine Using the Finite Element Method, PACKAGING TECHNOLOGY AND SCIENCE Packag. Technol. Sci. (2010), pp.1-17.
- (19) Sunao Tokura and Ichiro Hagiwara, Shape Optimization to Improve Impact Energy Absorption Ability of Truss Core Panel, Journal of Computational Science and Technology, Vol.5, No.1, (2011-1), pp.1-12. 2011
- (20) Xilu Zhao, Yabo Hu and Ichiro Hagiwara, Study on Crach Characteristics of Half Cut Type Vehicle Side Member Structure of Energy Absorption Ability by Using Origami Engineering, Journal of Computational Science and Technology, Vo.5, No.1, (2011-1), pp.13-25. 2011
- (21) Xilu ZHAO, Yabo HU and Ichiro HAGIWARA, Shape Optimization to Improve Energy Absorption Ability of Cylindrical Thin-Walled Origami Structure , Journal of Computational Science and Technology, pp. 148-162, Release Date: November 30, 2011. 2011
- (22) Zhi Zhen Xia, Xi Lu Zhao and Ichiro Hagiwara. A Simulation Approach to Improve Forming Limitation of Truss Core Panel Applied Mechanics and Materials, 121-126, 2471. (2011)
- (23) 森村浩明、寺島佳希、萩原 一郎、包装機によってフィルムを成形する時に発生する応力解析、日本機械学会論文集 C 編、(掲載決定) 2011
- 折紙工学関連の著書／総説・解説----- 2011

(14) 田端正久、萩原一郎監訳：計算力学理論ハンドブック、朝倉書店(2010.6).

(1) 萩原一郎、宮崎興二、野島武敏 監訳：デザインサイエンス百科事典—かたちの秘密をさぐる—、朝倉書店(2011.5).

(2) 萩原一郎、シミュレーション辞典、機械分野主査、機械部門主査、コロナ社 (2012.1).

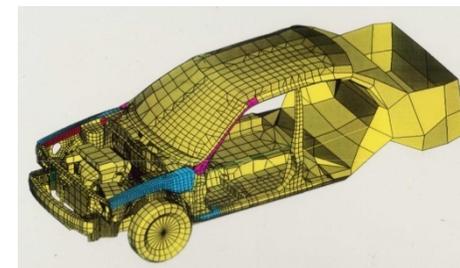
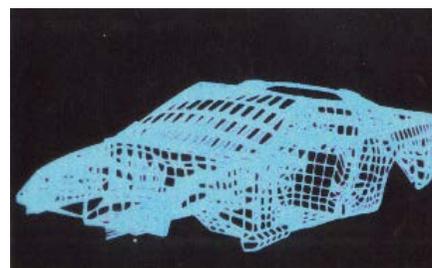
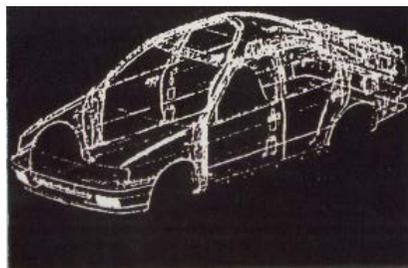
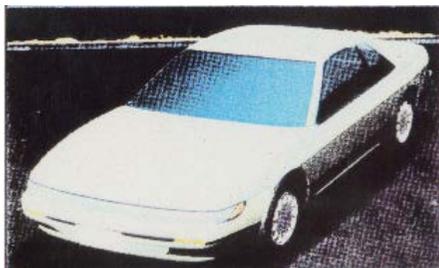
(3) Ichiro HAGIWARA and Hiroshi OKADA, Preface, Journal of Computational Science and Technology, Vol. 1 (2007) No. 1, pp.1-1

(4) 萩原一郎、世界に飛び出せ、日本の折り紙工学、トレンズ・イン・ジャパンのサイエンス&テクノロジーコーナー (2008.3) , pp.14-17.

- (5) 萩原一郎、折り紙工学の超軽量車両構造への応用、自動車技術会日中自動車技術フォーラムー自動車産業発展のための日中の技術に関する協力のあり方ー(2008-5), pp. 27-32.
- (6) 萩原一郎、CAD/CAE と折り紙工学、経営に貢献する CAE セミナー(2008-7), pp. 1-4.
- (7) Hagiwara Ichiro, From Origami to "Origamics", The Japan Journal, Vol. 5, No. 3(2008-7), pp. 22-25.
- (8) 萩原一郎、特集のねらいー折り紙工学の現状と課題、シミュレーション第 29 巻第 3 号(2010-9), pp. 80-81.
- (9) 戸倉直、萩原一郎、トラスコアパネルの製造法と強度特性、シミュレーション第 29 巻第 3 号(2010-9), pp. 90-95.
- (10) 萩原一郎、折り紙工学研究会便り、応用数理, Vol. 20, No. 4, pp. 75-76 (2010-12).
- (11) 日本機械学会イノベーションセンター研究協力事業委員会 RC235
「計算力学援用による折り紙工学の推進とその応用に関する調査研究分科会成果報告書(主査: 萩原一郎)、2010. 12/20.
- (12) 萩原一郎、ハニカムよりも安いパネル鋼板 2 枚を型押しして溶接, Automotive Technology(2011-1), pp. 96-101.
- (13) 萩原一郎、軽く安くする材料・加工技術: 同じ質量で、エネルギーを従来の 1.75 倍吸収、, Automotive Technology(2011-3), pp. 97-101.
- (14) I. HAGIWARA, Origami The State of the Art of Origami Engineering for Realizing Industrial Use of Japanese Traditional Art "Origami" International Workshop on Origami based Morphing Structures, pp. 1-47(2011 年 8 月 27 日).
- (15) 萩原一郎、折り紙工学の数理と産業への応用、サイバネットニュース No. 134(2012 Winter), pp. 8-9.

生活の3大要素「折り、畳み、広げ」の極意を 折紙工学で紐解きます

明治大学 研究知財戦略機構
先端数理科学インスティテュート
萩原一郎



明治大学駿河台キャンパス・アカデミーホールにて



共同研究者（折紙工学に関する論文共著者）

① 奈良知恵教授



② 趙希禄教授



③ 寺田耕輔教授



④ ルイス・ディアゴ・篠田淳一・マリアサブチェンコ

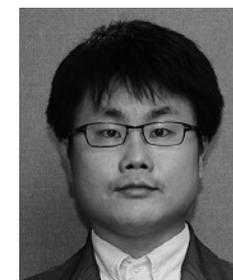
・戸倉直 博士研究員

⑤ 安達悠子・阿部綾・陳曉詩研究員

⑥ 楊陽・ロメロ・ジュリアン博士課程学生



石田祥子講師



斎藤一哉講師

⑦ 野島武敏教授

⑧ 石田祥子講師

⑨ 斎藤一哉講師

⑩ その他、研究室卒業生



折り紙の歴史（日本だけ確かに特殊である）



吉澤章の生誕101年を記念して

5世紀

800

1340

1490

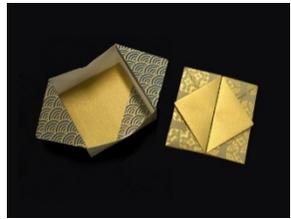
1680

1797

1954

2002

和紙



折据(おりすえ)

紙で包む



折形折り紙



『天球論』の挿し絵に荷船の折り紙

井原西鶴の句に、「おりすえ」、「雄蝶(オチヨウ)・雌蝶(メチヨウ)」と呼ばれる折り紙

伊勢貞丈の『包之記(つつみのき)』世界最古の折り紙の本

「折り紙芸術」を刊行、国際折り紙研究会を創設「origami」が国際語

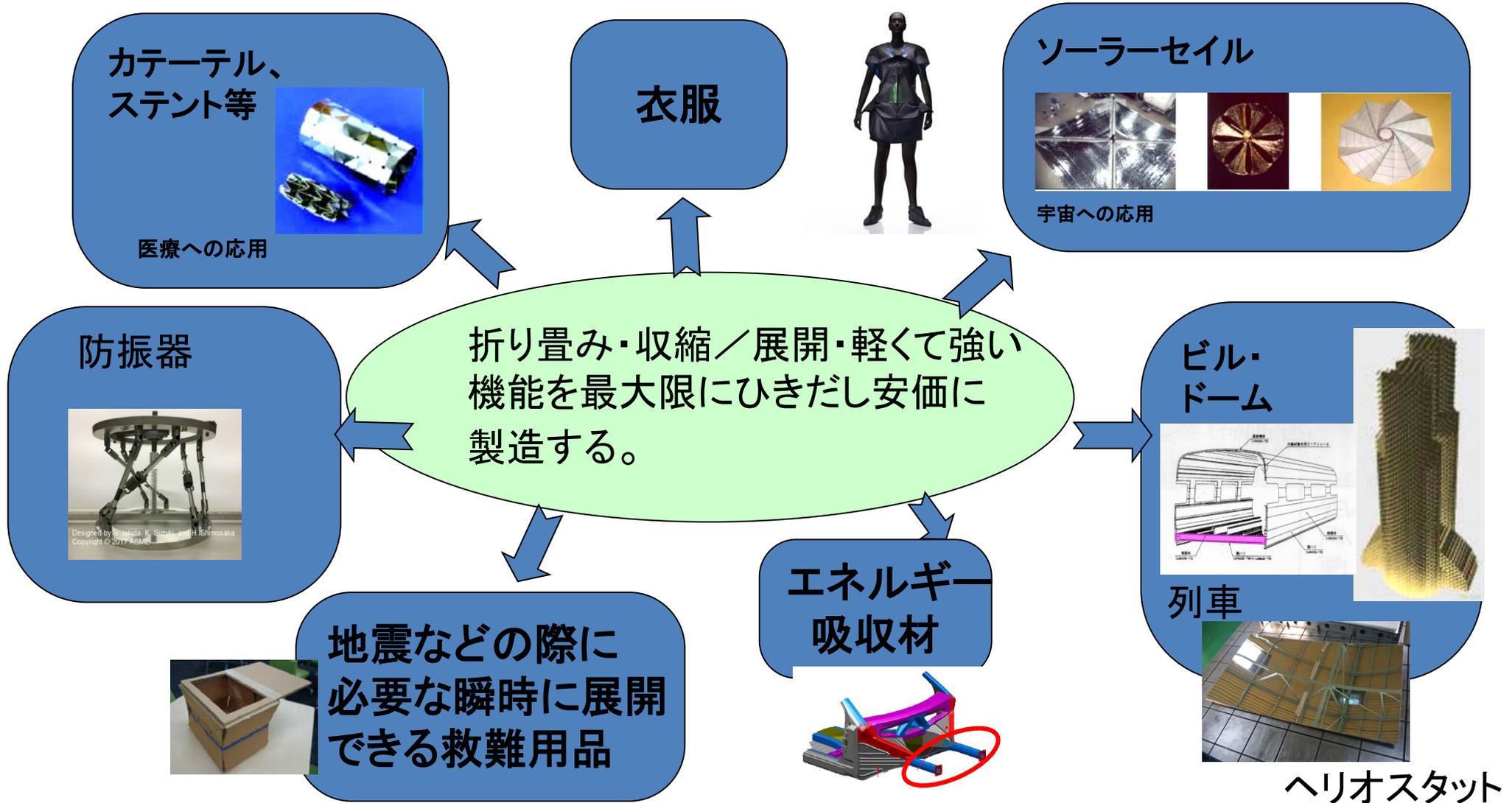
折紙工学提唱



内山光弘(花紋折)

雄蝶と雌蝶

折紙工学とは、社会ニーズに応えるべく関連する多くの科学技術を援用して、機能を最大限に安価に引き出す総合科学



実現には、計算科学、最適化、制御、製造法など多くの科学・技術の参入・援用が必要

2016年以降、にわかに注目

萩原一郎、伝統技術を先端技術へ「折り紙技術が有す無限の可能性、J-POWER/電源開発/グローバルエッジ・NO. 46(2016年7月)、pp.18-21

萩原一郎、巻頭言／折り紙の数理的・バイオメテックス的転回と産業への応用、日本機械学会誌、Vol.119, No.1175(2016-10), pp.539..

萩原 一郎、折紙工学研究部会だより、JSIAM online Magazine, 2016-12

萩原 一郎、折紙工学の現状と今後の動向—鍵を握る折紙式プリンタ&折紙工法—、日本画像学会誌、第56巻第2号:192-200(2017-4)

萩原 一郎、「折紙工学」特集のねらい、金属、第87巻第10号:873(2017-10), p.829.

萩原 一郎、折紙工学の産業化の展望と今後の方向、金属、第87巻第10号:873(2017-10), p.873-881.

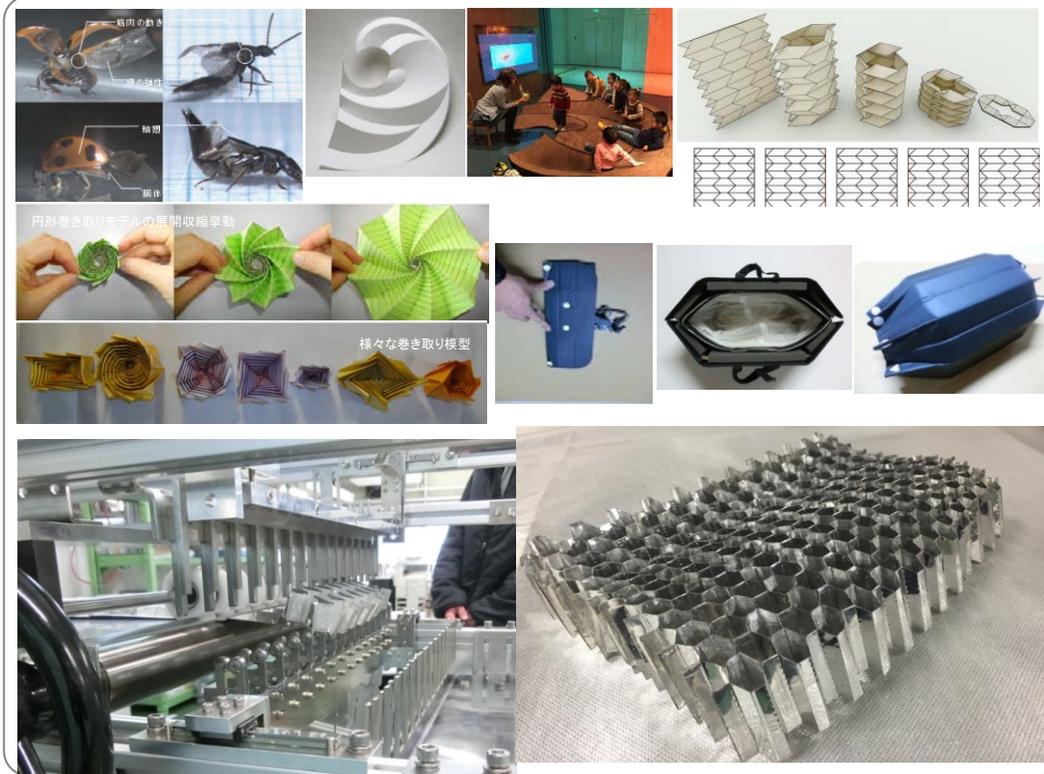
萩原 一郎、折紙工学の新展開(前編)、機械の研究70(1), 35-42, 2018-01.

萩原 一郎、折紙工学の新展開(後編)、機械の研究70(2), 115-122, 2018-02.

折紙工学のオールキャストによる

Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers
機械技術者の情報誌

<http://www.jsme.or.jp>



特集

折り紙の数理的・バイオメテックス的展開と産業への応用

日本機械学会誌

2016

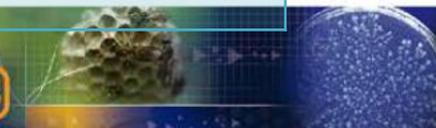
10

Vol.119

No.1175



巻頭言	1頁	萩原一郎(明治大)	巻頭言
展望	4頁	舘 知宏(東京大)	折紙コンセプトの発展
展望	4頁	三谷 純(筑波大)	折紙設計に対する情報工学からのアプローチ
展望	4頁	奈良知恵(明治大)	折り紙の数理科学からのアプローチ
解説	2頁	杉山文子(京都大)	ものづくりのための2枚貼り折り紙
解説	2頁	石田祥子(明治大)	折り紙の展開収縮構造を用いた防振機構
解説	2頁	斎藤一哉(東京大)	究極の展開構造:昆虫の翅の折り畳みに挑む
解説	2頁	趙 希禄(埼玉工業大), 楊 陽(明治大), 萩原一郎(明治大)	折紙構造のエネルギー吸収特性の自動車車体設計への応用
解説	2頁	戸倉 直(株式会社シミュレーションサーチ), 萩原一郎(明治大)	折紙工学を推進する成形シミュレーション
解説	2頁	篠田淳一(株式会社インターカス), ディアゴルイス(株式会社インターカス) サブチェンコ マリア(明治大), ロメロ ジュリアン(明治大) 萩原一郎(明治大)	折紙式三次元プリンタと折紙ロボット
解説	2頁	寺田耕輔(福島高専), 萩原一郎(明治大)	自由自在な折り紙のような工法
事例	2頁	北岡裕子(株JSOL)	折紙工学の呼吸メカニズムの応用事例
事例	2頁	繁富(栗林)香織(北海道大)	折り紙が命を救う
事例	2頁	古谷 寛(東京工業大)	折紙工学の宇宙構造物への応用
事例	2頁	小澤範雅(有秦永ダンボール), 奈良知恵(明治大) 萩原一郎(明治大)	折り畳み式安全ヘルメット
事例	2頁	森島敏之(川上産業(株))	中空剛性板の折り方
事例	2頁	五島 庸(城山産業(株)), 斎藤一哉(東京大)	折紙工学によるコアパネルの設計と製造
事例	3頁	宮本好信(愛知工業大)	折紙工学の建築への応用事例



折紙工学の呼吸メカニズムへの応用 (北岡裕子)

折紙工学の呼吸メカニズムの応用事例

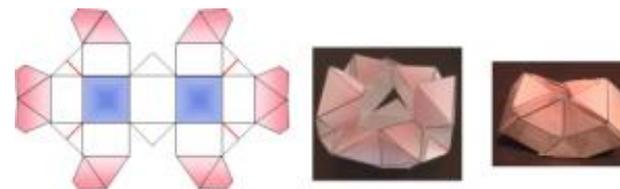
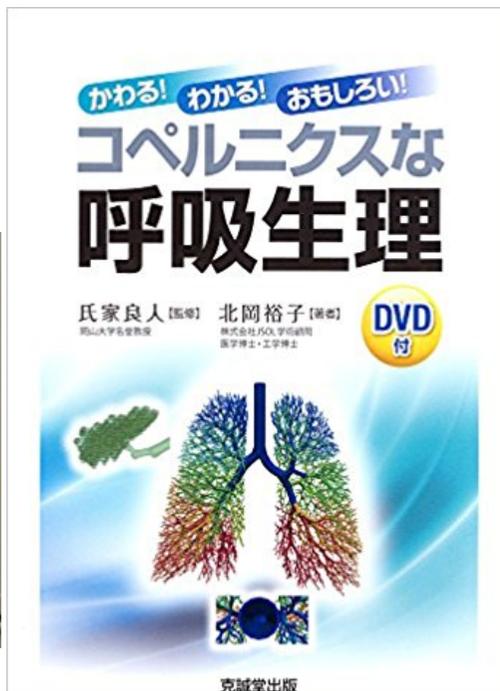
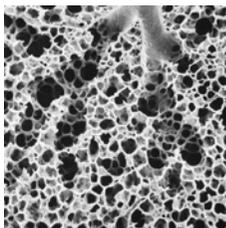
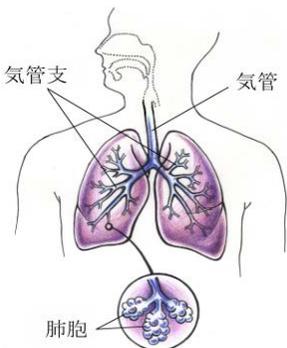
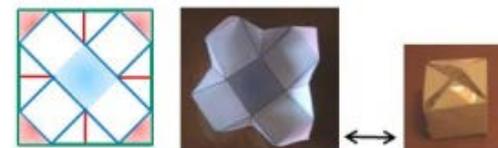


図4. 最も簡単な肺胞折り紙モデル

査電頭像



青線: 谷折り
赤線: 山折り

呼吸運動

図5. コンピュータモデルと等価の折り紙肺胞モデル

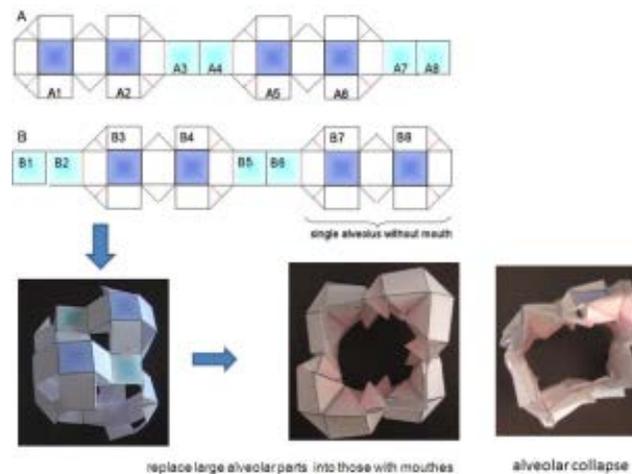


図6. 折り紙による肺胞管モデルと病変シミュレーション

後漢(AD25 – 220)時代から「百聞は一見にしかず」。現代では、視覚情報は豊富で安価。むしろ、「一見すれば理解できる」と錯覚しがち。現代に必要な教訓は、**百見は一作にしかず**。しかし、**日本民族は無意識のうちにこの重要性を把握**。

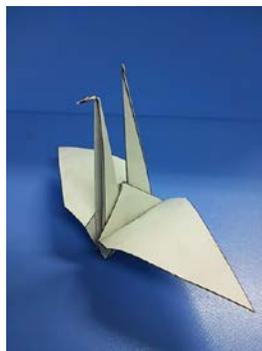
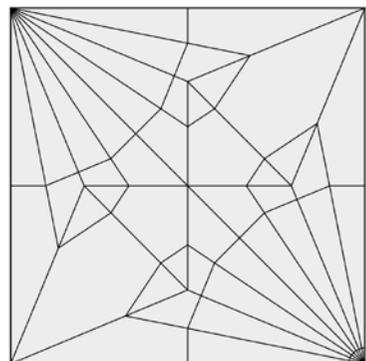
何故、日本だけ特殊なのか

- ① 世界的にもまれな生粋の農耕民族、明確な四季、美しい田園風景
日本人の研ぎ澄まされた美意識と人を敬う心から**折形礼法**が誕生。
- ② 折り紙は2Dから4D構造を創発し、再び元の状態に復元するシステム。一方、生物の形態形成は2次元シートの変形過程。2Dから周期運動をする4Dシステムが生成される。両者の類似性。
- ③ 寝具を畳み、和服を畳む文化は、折り紙を通じて生命の本質を「かたちからくり」と表現。「かたち」 = 型(かた) + 霊(ち) 「かた」 = 枠組み、空間 「ち」 = エネルギー、
「からくり」 = 絡(から) + 繰(くり) 「から」 = 方向、関係、
「くり」 = 周期的な時間
- ④ 日本の「ものづくり」は、2Dから4Dを創発し循環させる日常の習慣と、「つくることによって理解する」という科学観とによって、培われてきたように思われる。折り紙の貢献は極めて大きい。

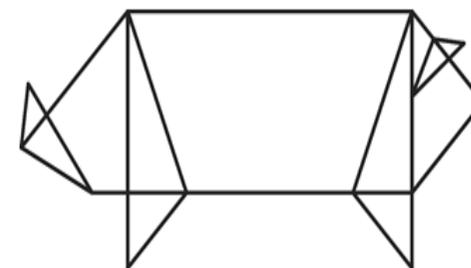
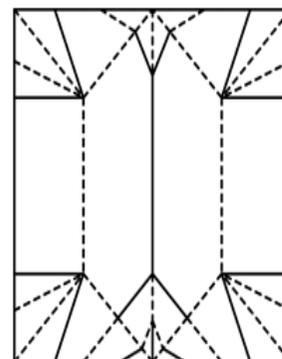


ロバート・ラング、舘知宏らにより折紙設計スタート

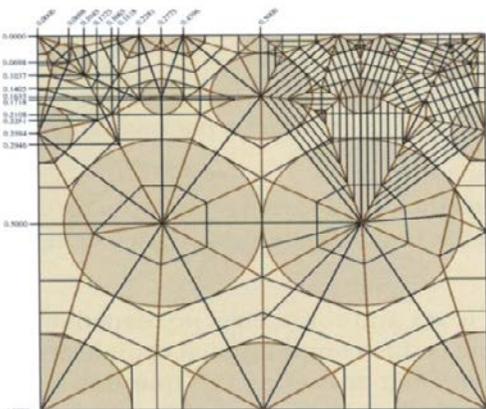
● 一限定された基本形から、更に、基本形が自在に。何故このようなことができるようになったか。



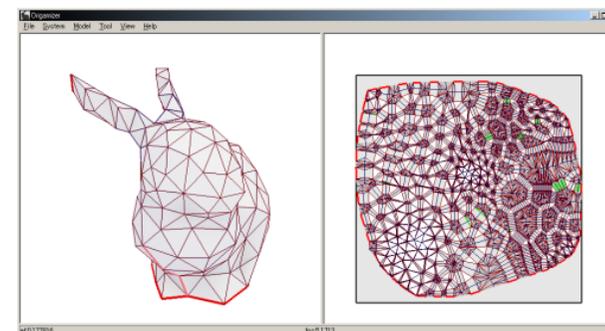
折り鶴とその展開図



豚とその展開図



ロバート・ラング TreeMaker 1998年より

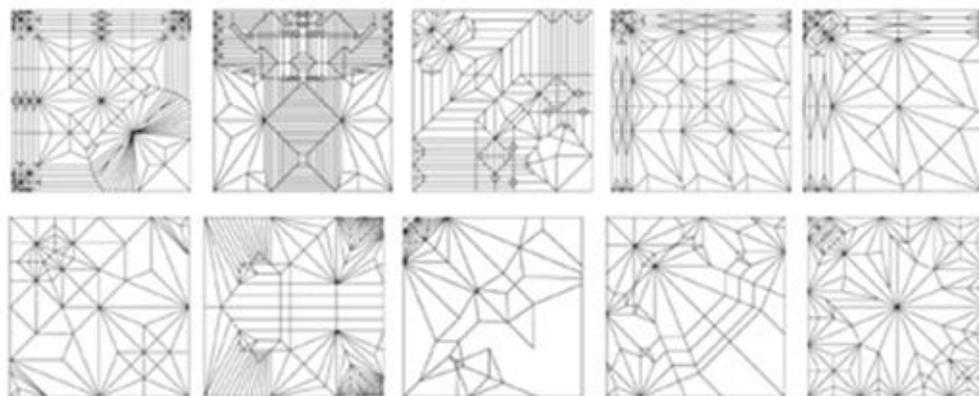


舘知宏 Origamizerr 2007年より

神谷 哲史(1981~)



龍神



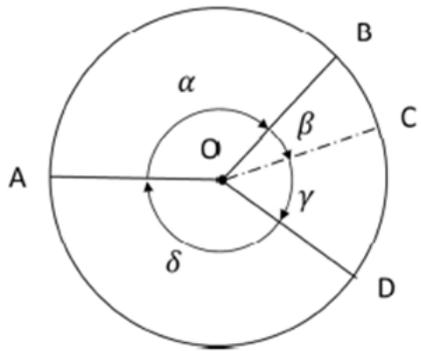
数学の力は偉大！二つの定理で折り紙の世界が一変

●—「平坦折り」理論の発見で新たな局面。

- (1) 「山折り」と「谷折り」の数の差は±2 (前川定理)
- (2) 1つおきの内角の和は 180 度 (川崎定理)

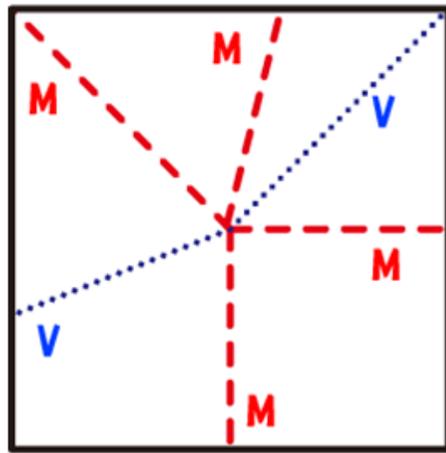
1960年代、村田三良によって、既に示されている
(1966年大分県立芸術短期大学研究紀要)

4折り線の場合



$$3(M) - 1(V) = 2$$

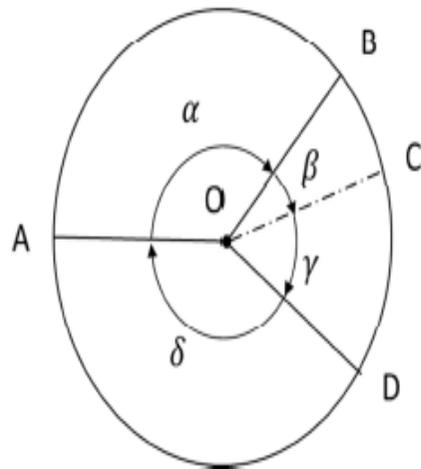
6折り線の場合



$$4(M) - 2(V) = 2$$

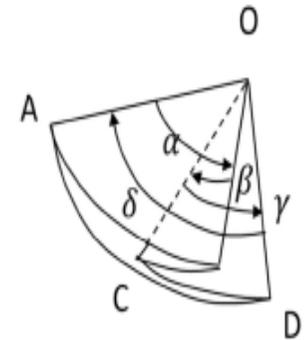
$$\alpha + \gamma = \pi, \quad \beta + \delta = \pi \quad (3)$$

紙をひろげた状態



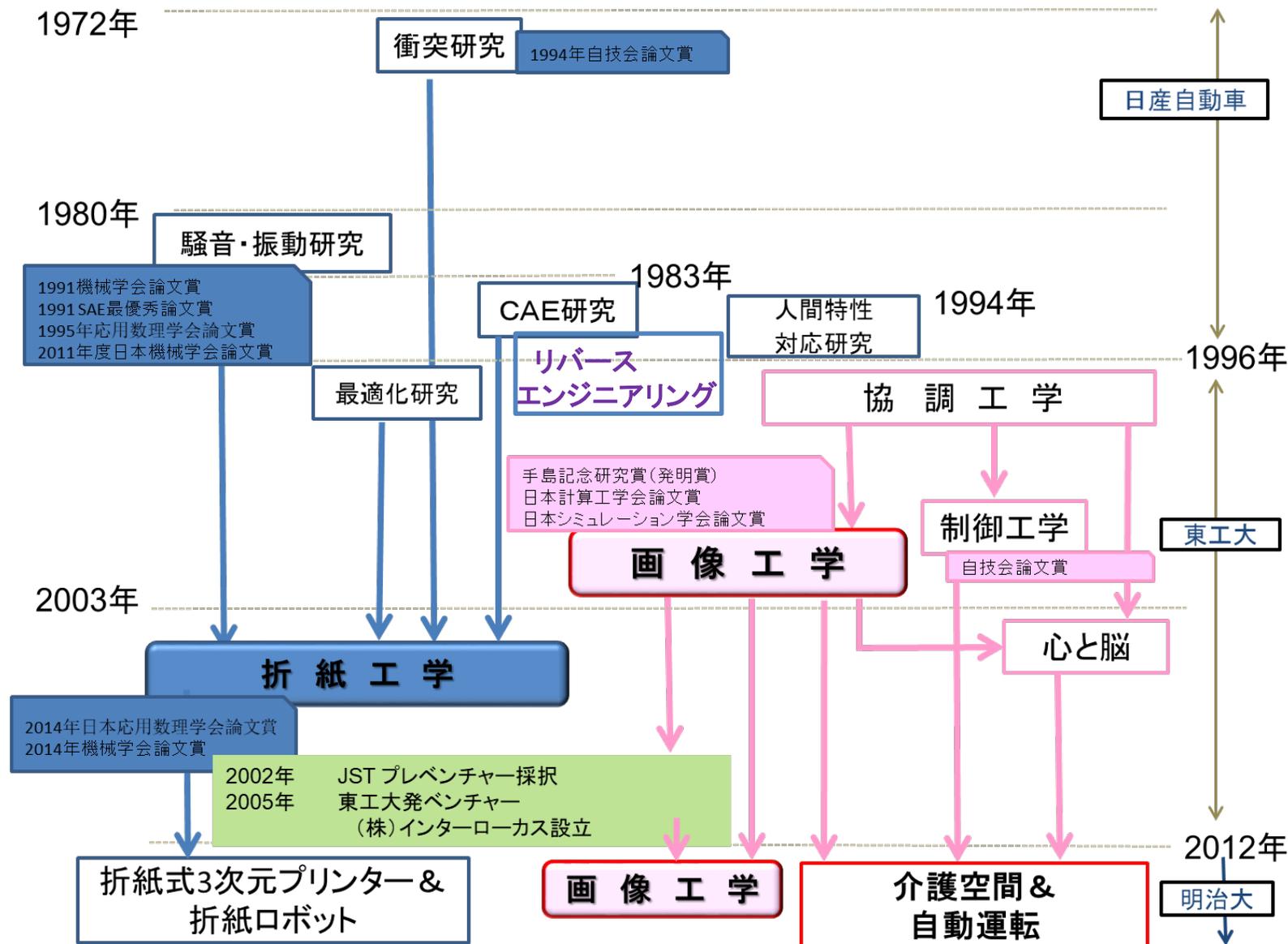
$$\alpha + \beta + \gamma + \delta = 2\pi \dots (1)$$

紙を折り畳んだ状態

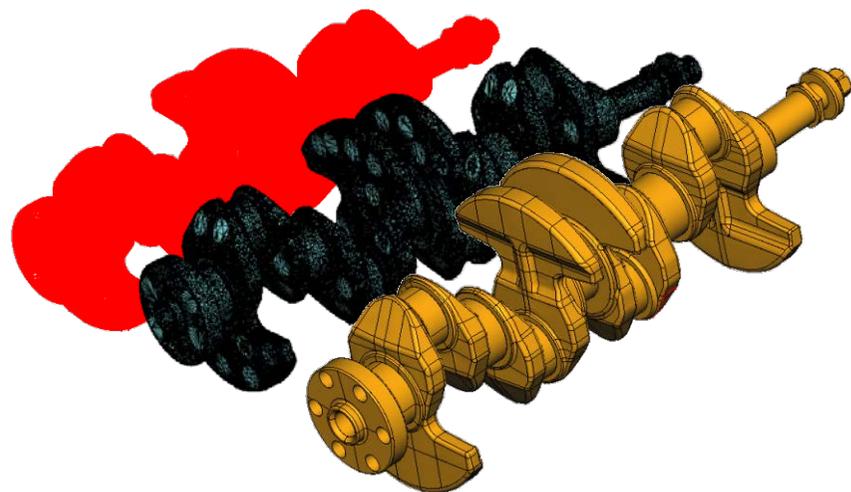


$$\alpha - \beta + \gamma - \delta = 0 \dots (2)$$

自己紹介／広範囲だが折紙工学推進には必要



ロバートラング、館知宏の成果を見て リバースエンジニアリングの応用に気づく

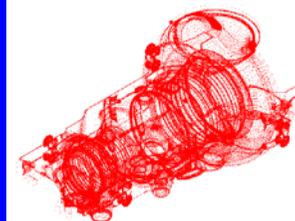


実物または、クレイモデル

三次元測定装置を用いて計測
CCD・CT・Laser Scan
研究室で計測も可能

点群データ作成

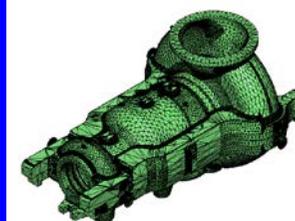
Point Cloudデータの他に、FEMデータ形式のフォーマットでも読み込み可能。また、測定精度向上の為、計測装置毎にカスタマイズも可能。



点群データ

STLデータ作成

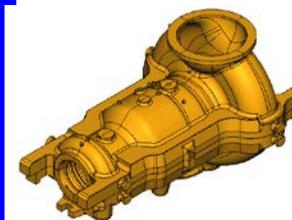
QEM (Quadric Error Metric)を採用した柔軟な粗密のコントロール機能を有し、計測データを忠実に再現。シャープエッジの再現もコントロール可能。



STLデータ

CADモデル作成

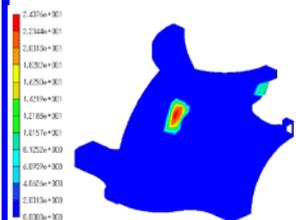
STLデータとの精度を検証を行いながらサーフェスの作成が可能。また、カーブ・サーフェス生成には、独自のFitting機能を搭載している為、高品質・短時間での作成が可能。



CADモデル

検査機能 (点群-CAD)

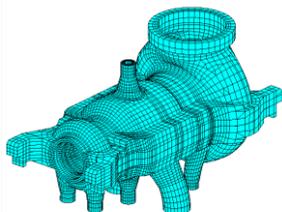
CADデータと実測値の寸法検査機能搭載。バンドコンター表示で、ビジュアル的に検査可能。



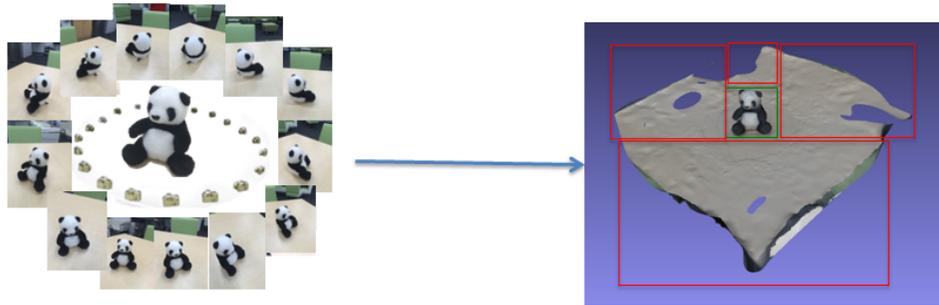
比較

FEMモデル作成

外表面の三角形に依存しない、均等で、精度の良い、メッシュ生成が可能。



リバーズエンジニアリング技術援用計算折紙幾何学システムの開発 しかも初の糊代部付のパターンを出力



3D scene restored from 25 images

Clean the background



モデル)

図4 完成品

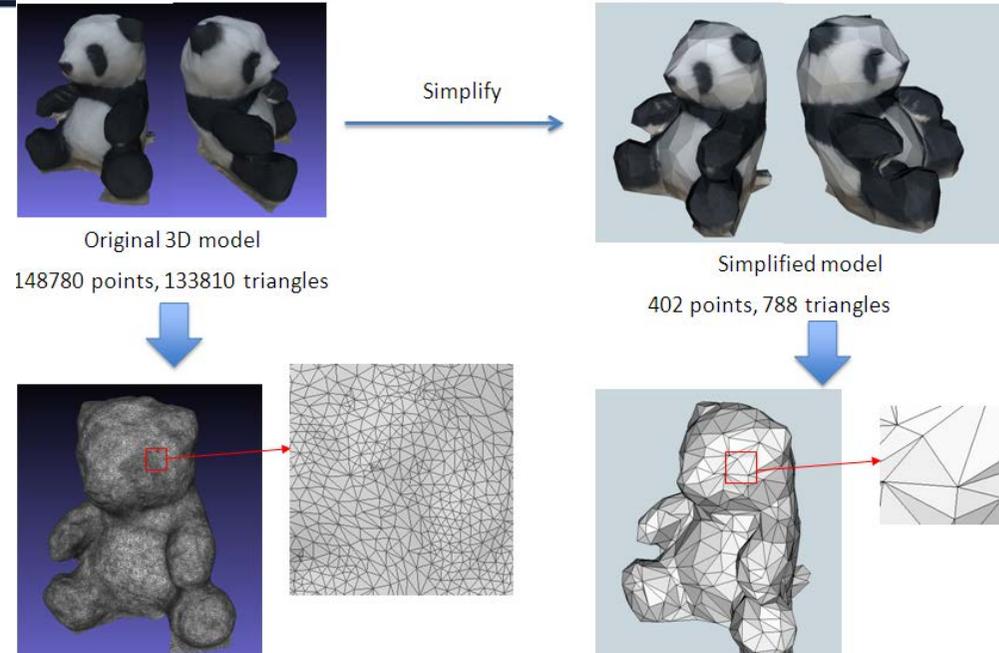
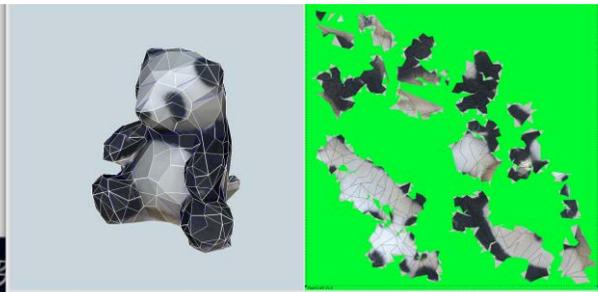
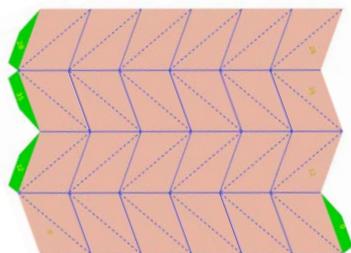


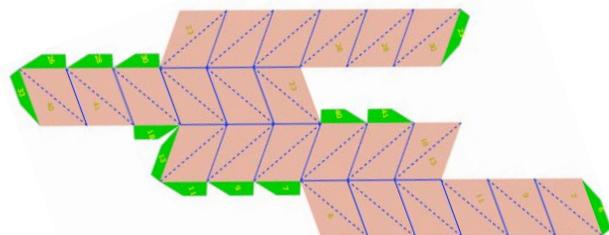
図5 折紙式プリンターで製作した完成品(左), 実物のぬいぐるみ(中央)
積層型プリンターで製作した完成品(右)

開発したシステムで多くのパターン。 ロボットでも折れるパターンがあることが分かり開発を決意。

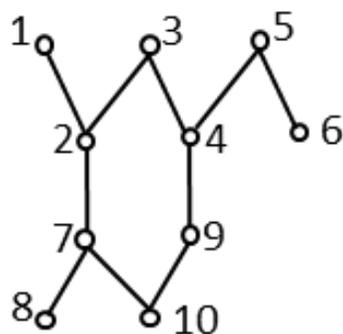
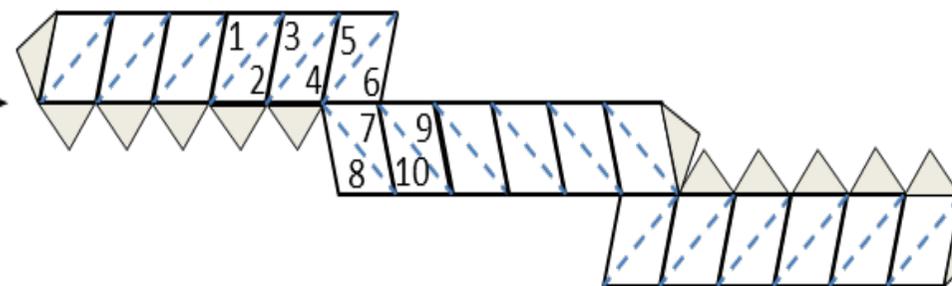
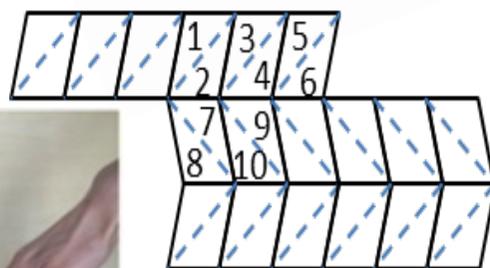
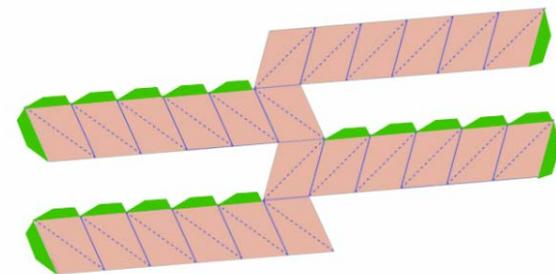
ロボットで不可



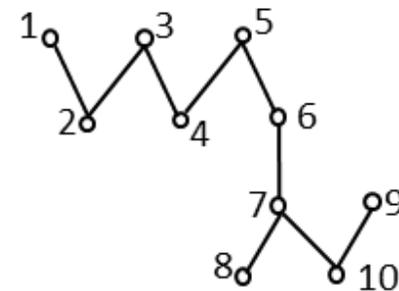
ロボットで不可



ロボットで可



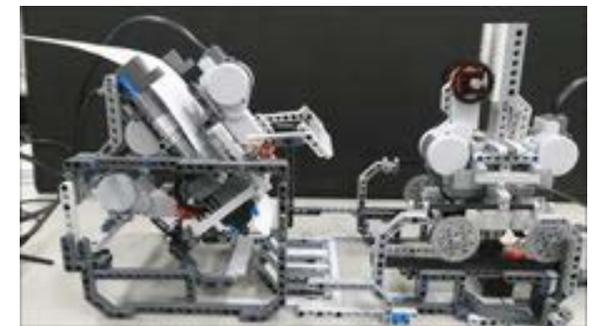
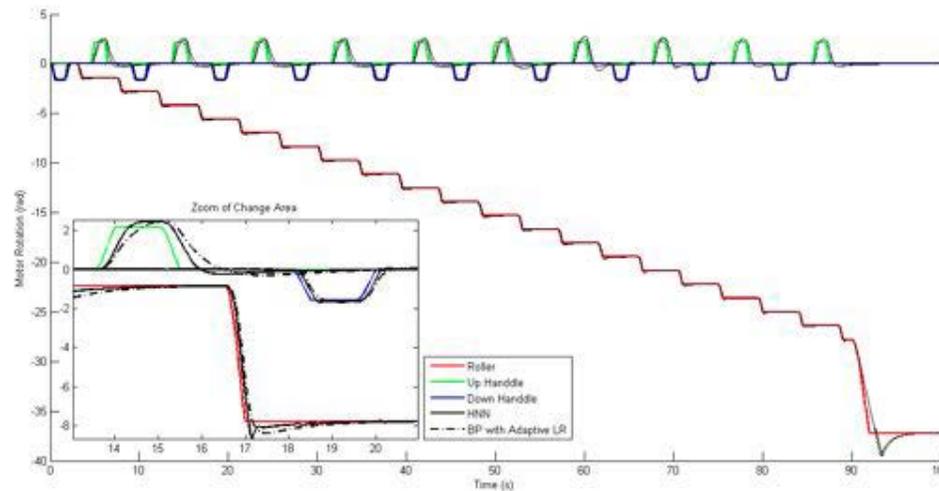
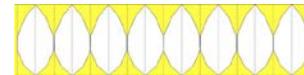
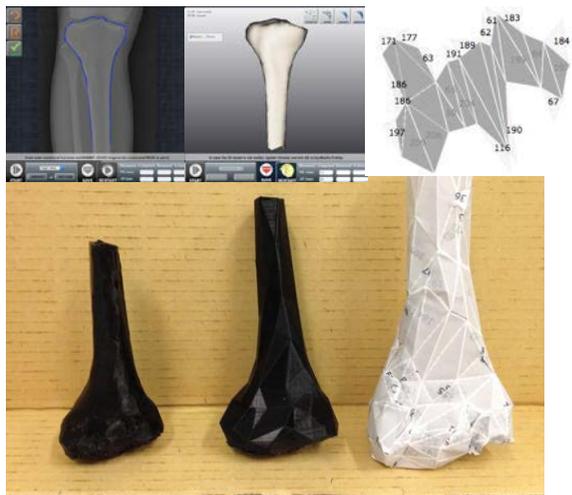
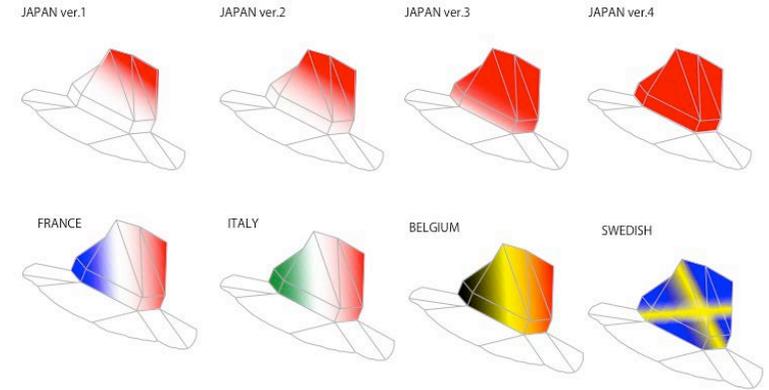
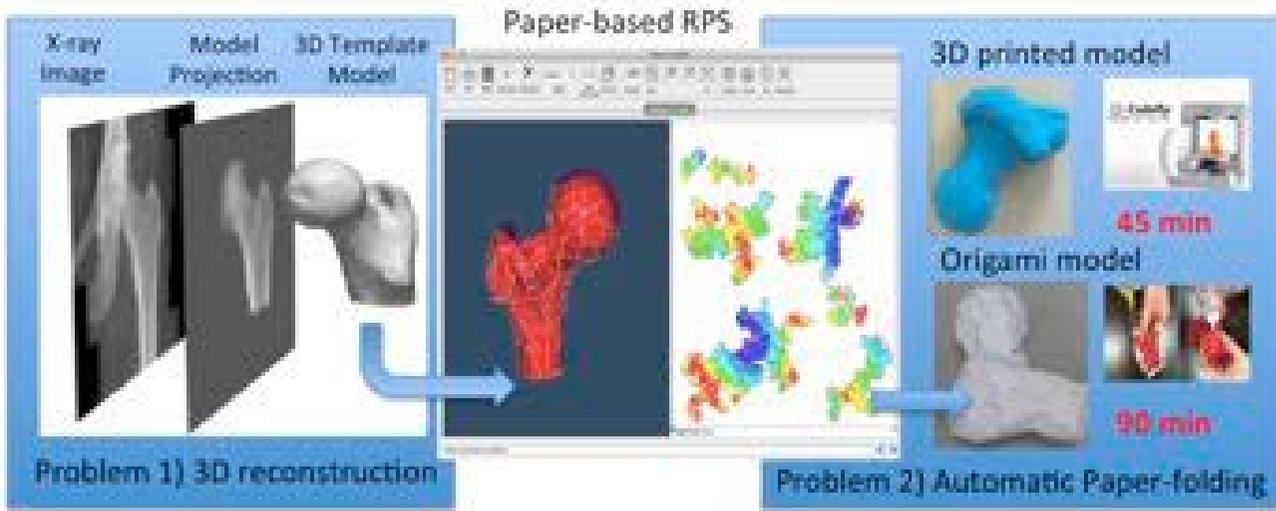
システムで得られるパターン1



システムで得られるパターン2

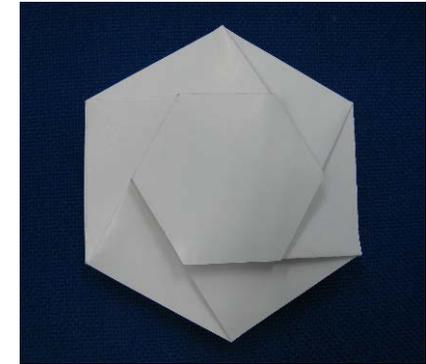
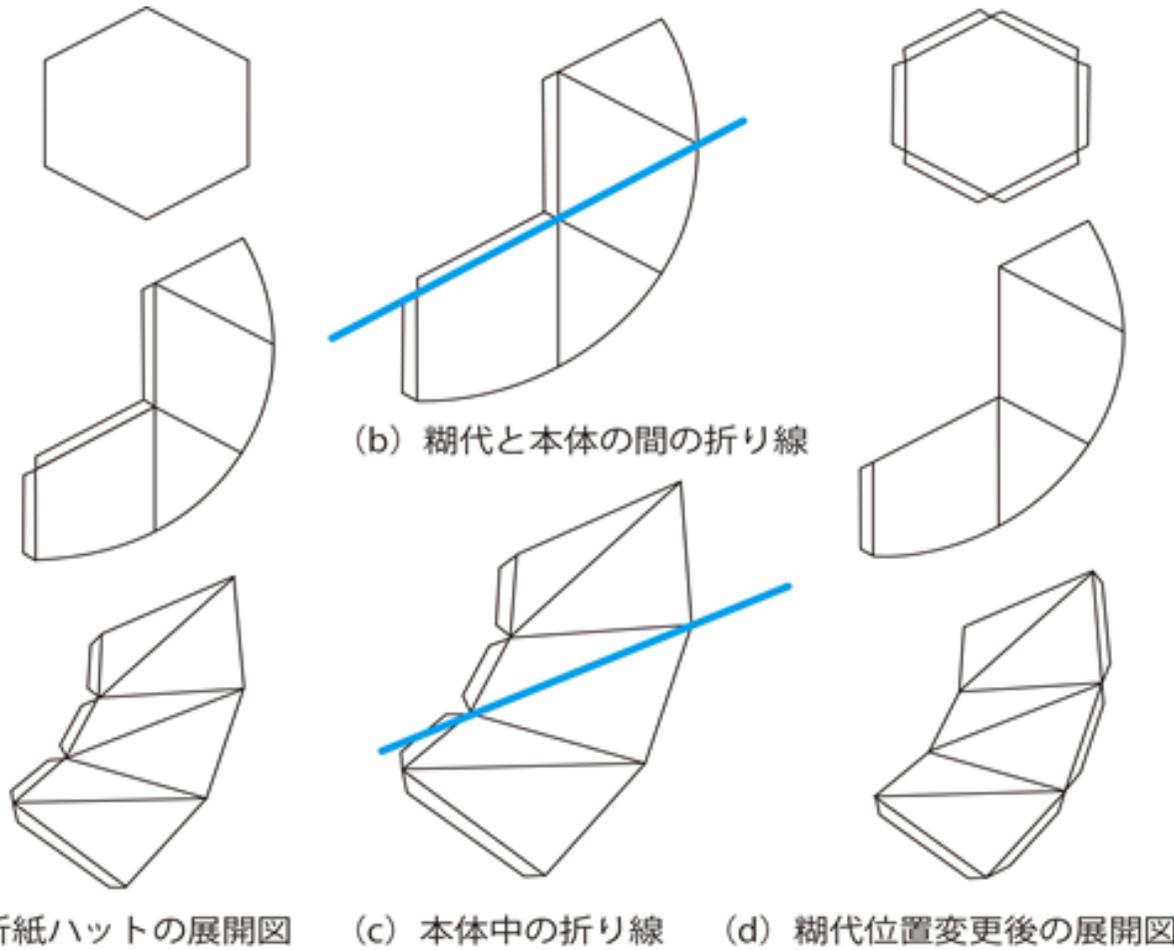


百見は1作に如かずというものの産業には折紙ロボットが必要

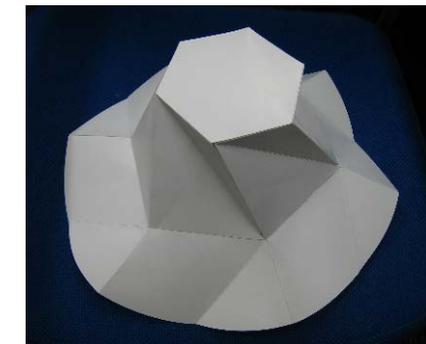


どのようなものもロボットで折り易い展開図がある。

明治大グループ



(e) 折り畳んだ状態

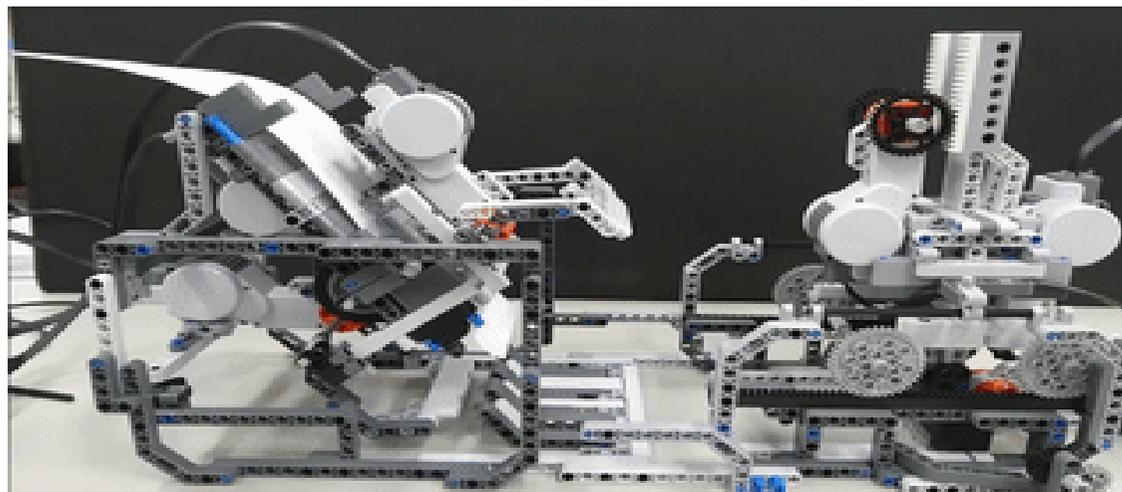


(f) 展開した状態

折紙ロボットで折り易くするための変更
—ノジマハットを例にして—



明治大グループ



Pulling Roller

Paper Tray

Rolling Handles

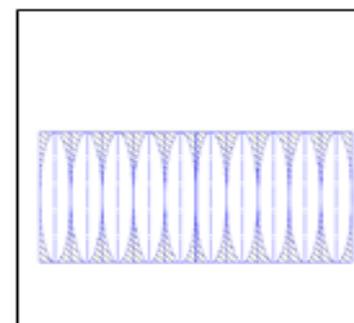
Process Computer

Press (downward)

Roller

Paper

折紙を折るロボット 1



Holding Finger

Back Wall

Glue Distribution System

Grasping Fingers

Holding Finger

Gluing Stamps

糊付けするロボット 2

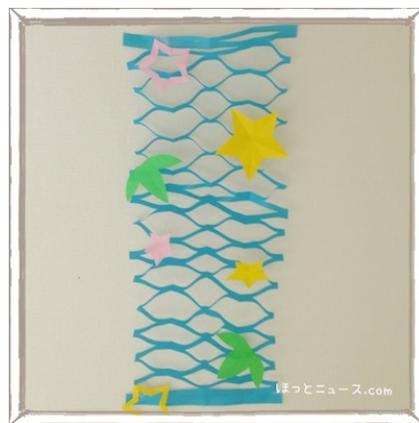
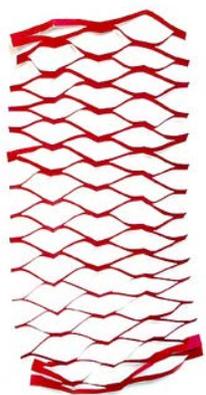
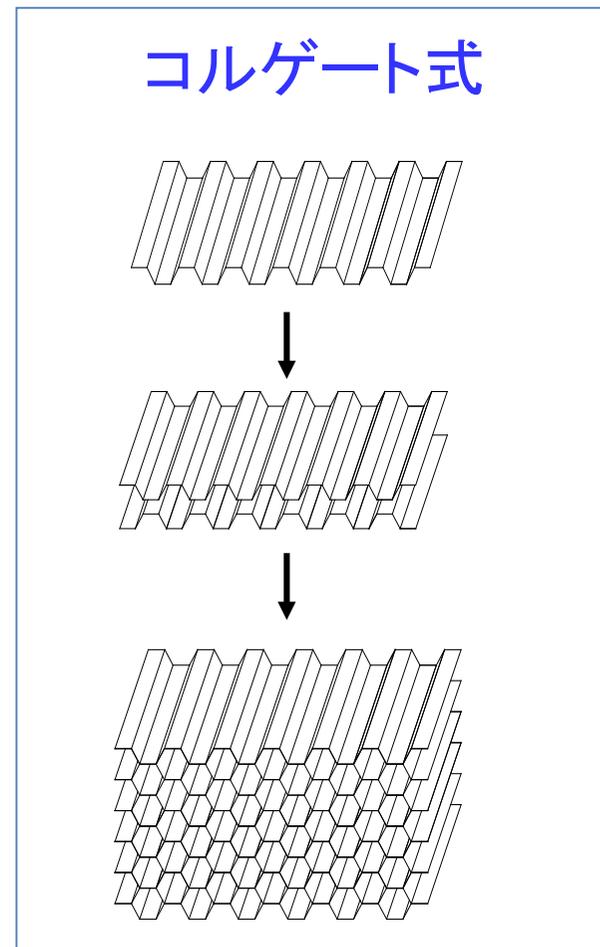
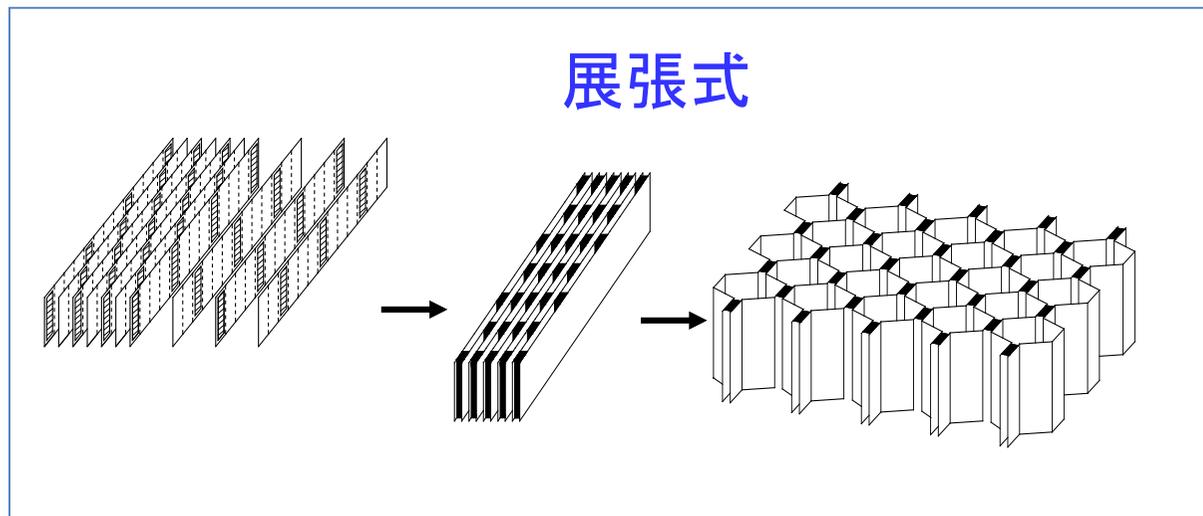


製造物の例



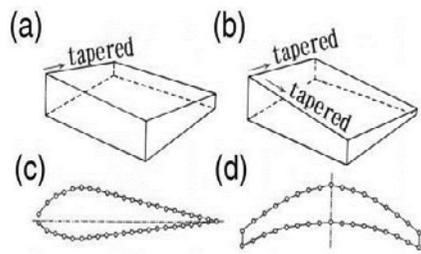
折紙工学野島先生が提唱され萩原が展開

第2次大戦後直ぐ、英国のエンジニアが、日本の七夕あみかざりをヒントに、展張式、コルゲート式によるハニカムの大量生産方式を発明☛数兆円産業に

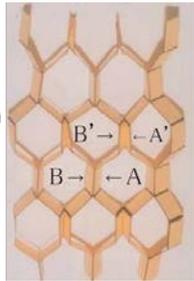
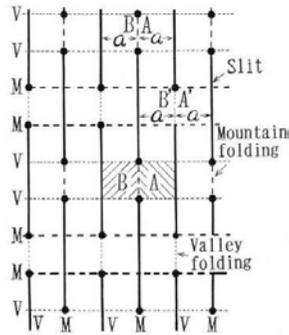


七夕あみかざり
(天の川)

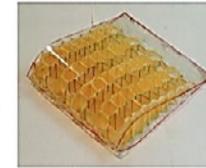
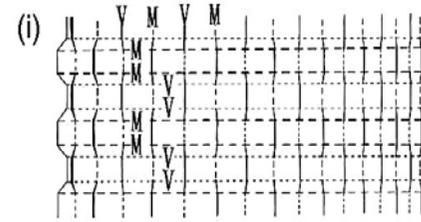
野島先生3次元折紙ハニカムコア発明 野島武敏先生 2002年
 斉藤一哉氏 製造法発明 2016年



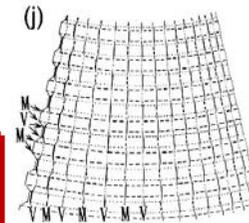
Paper modeling



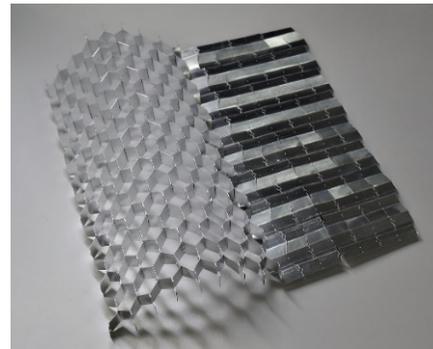
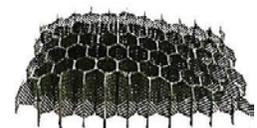
等厚ハニカム



底型ハニカム



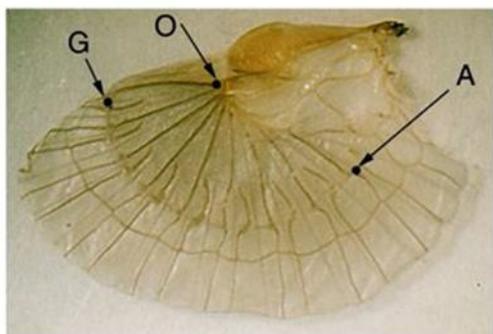
翼型ハニカム



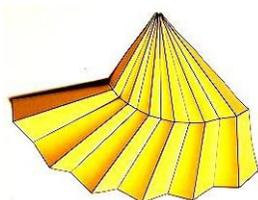
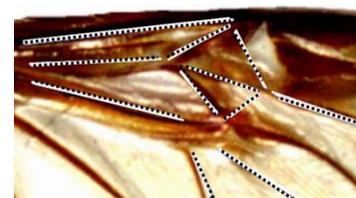
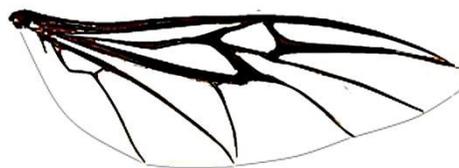
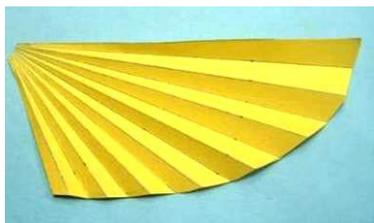
連続自動製造法

周期的なスリットを入れた1枚の平板を折り曲げることでハニカムコアを立体化する。スリット、折線のパターンを変えるだけで翼型ハニカム、底型ハニカムとなる。





Wing of earwig and its origami model



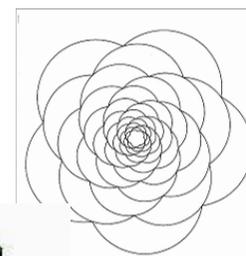
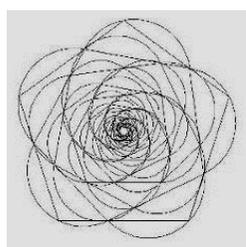
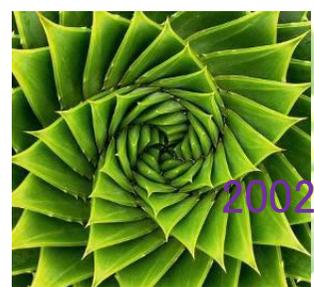
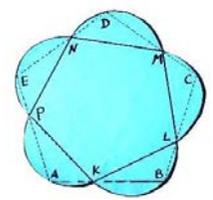
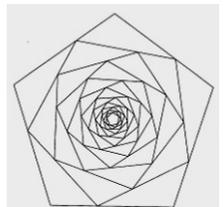
天道虫

ハネカクシ

ハイスピードカメラによる折りたたみ方法の解析



バイオミメティクス折り紙／植物に学ぶ（野島武敏）2003年

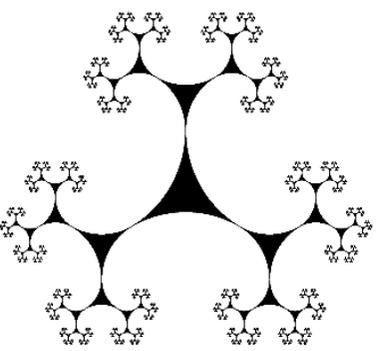


フラクタル

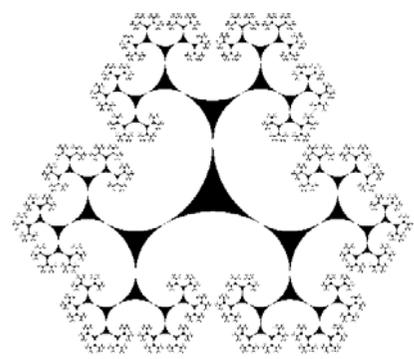
$$f_i = \{1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, \dots\}$$

フィボナッチ数列

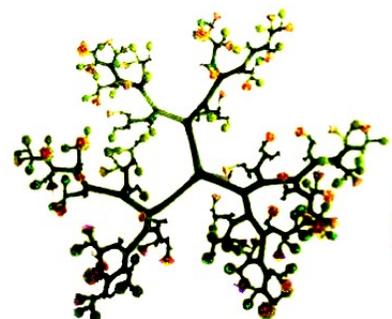
自己相似



r=0.5

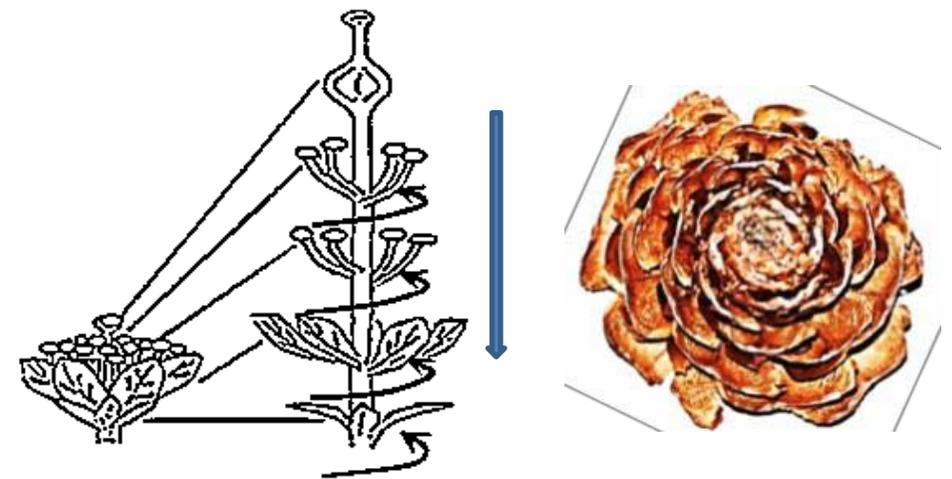
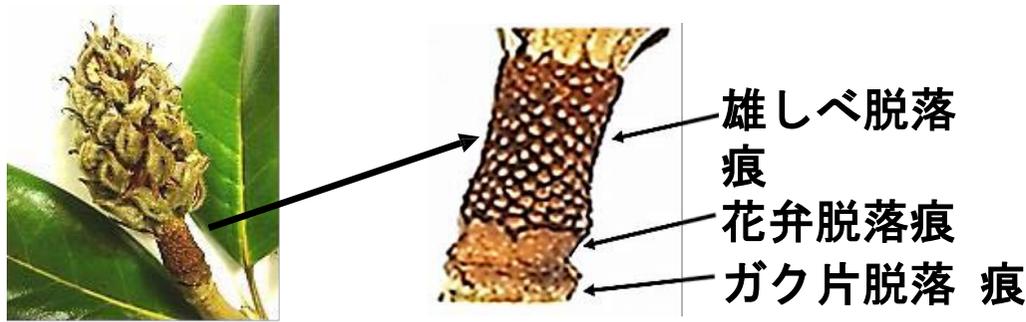
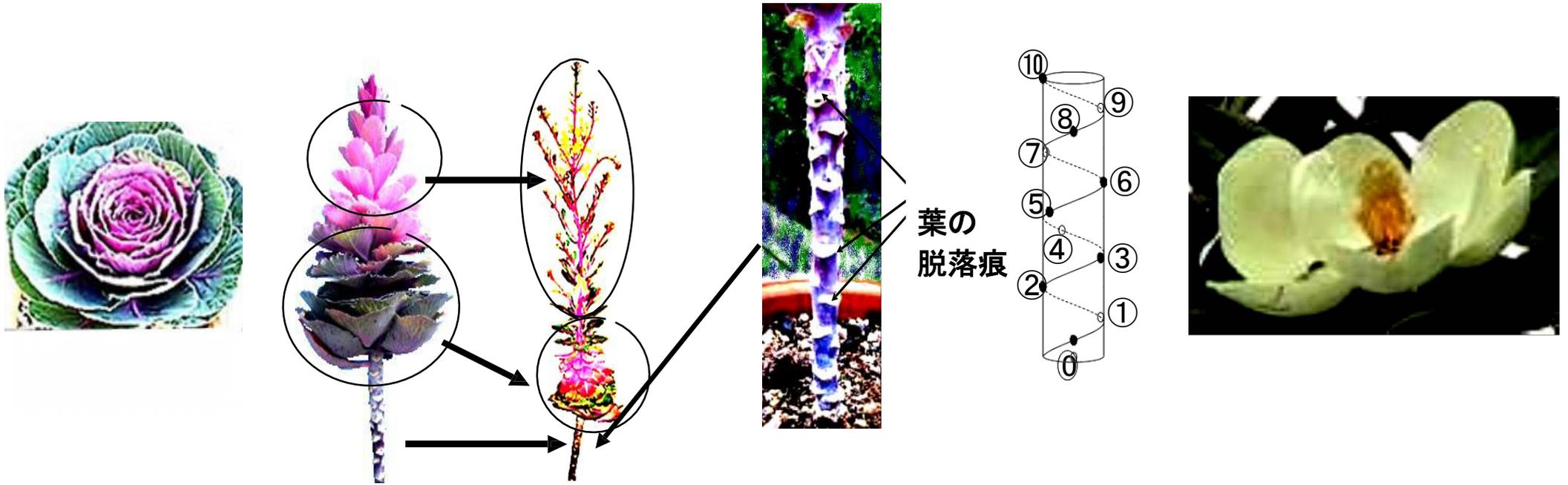


r=0.618

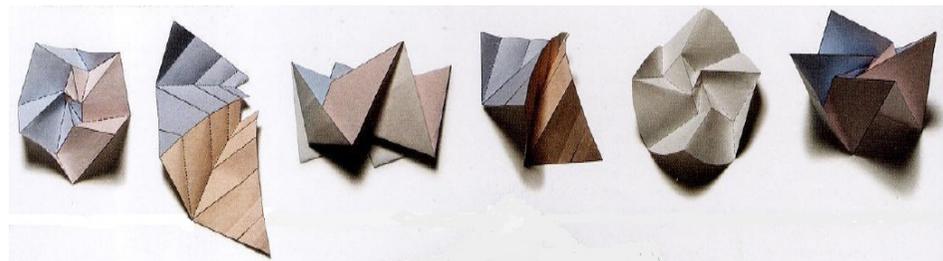


Broccolo Romanesco





折紙の数理を用いてデザインされたドレス



折紙の巻き取りモデル(新Helixシリーズの基本形)



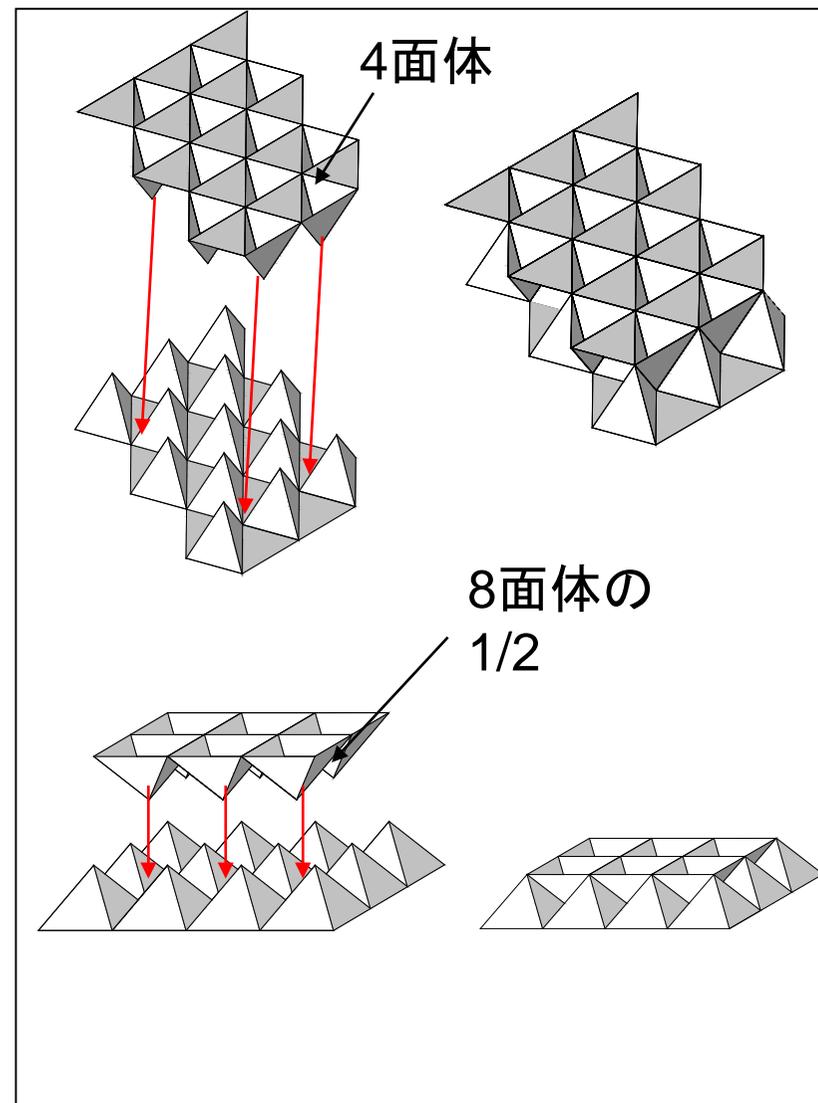
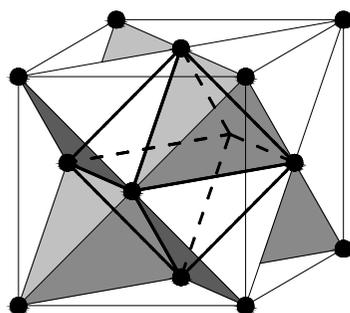
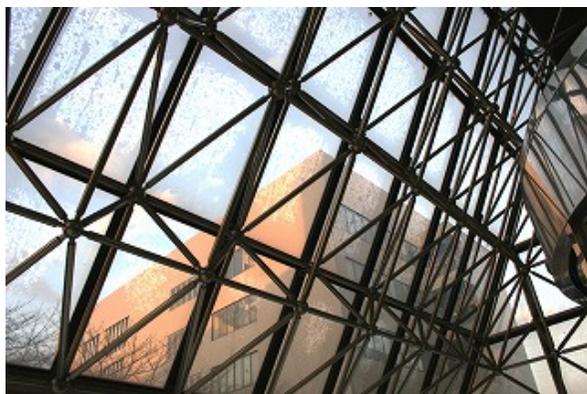
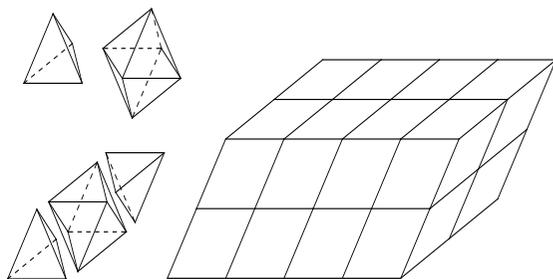
野島武敏 ◀ 三谷純 ▶ 三宅一生 2017年



MIMS 野島武敏客員研究員と三宅一生氏と新作コラボ
折紙工学を活用したドレスがイタリア誌に掲載

先端数理科学インスティテュート (MIMS) の野島武敏客員研究員と世界的ファッションデザイナーである三宅一生氏のコラボレーションによる作品が、イタリアの建築・デザイン雑誌「Domus ITA」(No.974, November 2013) に掲載された。折り紙は、1枚の紙から立体造形を創り出し、また立体を2次元平面へと折りたたむことができる。本学の特定期間研究ユニット「折紙工学研究拠点」にも参画する野島客員研究員は、こうした折紙の幾何学的特性をモデル化。三宅一生氏の手によってこの数理モデルを用いた斬新なファッションデザインが誕生した。立体的なドレスは格子状の折り線 (Helix) に沿って折り畳まれるようにデザインされている。2014年春夏コレクションでは、平坦な布を巻き取るように折りたたむデザインが新たに登場する (3月店頭販売予定)。(研究・知財戦略機構 萩原一郎特任教授)

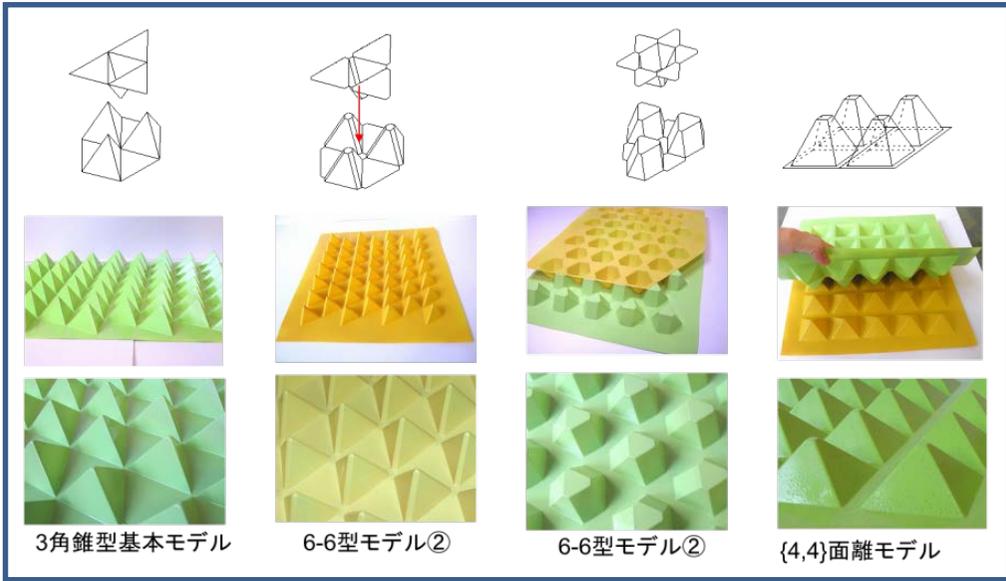
折紙ハニカムからヒント: 正4面体と正8面体の空間充填形のモデル化



正4面体と正8面体による空間充填形, オクテット・トラス **➡** 非常に安定性の高い構造

これまでの手法を発展させ, 2枚の平板からコアパネルを製作する.

萩原：計算科学シミュレーションにより多段階成形法の発明



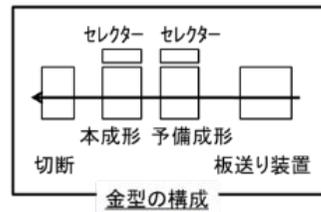
3角錐型基本モデル

6-6型モデル②

6-6型モデル②

{4,4}面離モデル

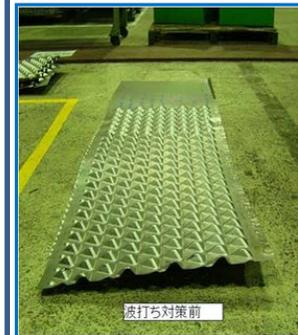
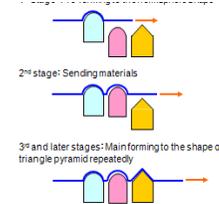
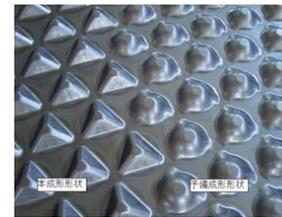
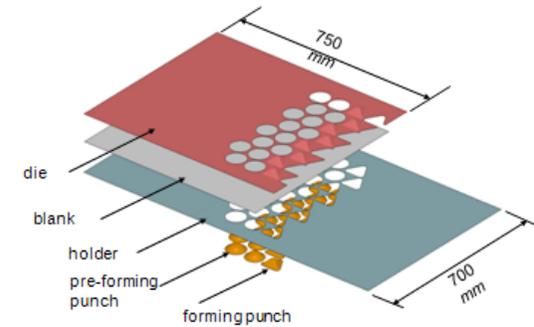
☆汎用順送成形金型



☆汎用組立装置



多段階プレス成形法



波打ち対策前



波打ち対策後

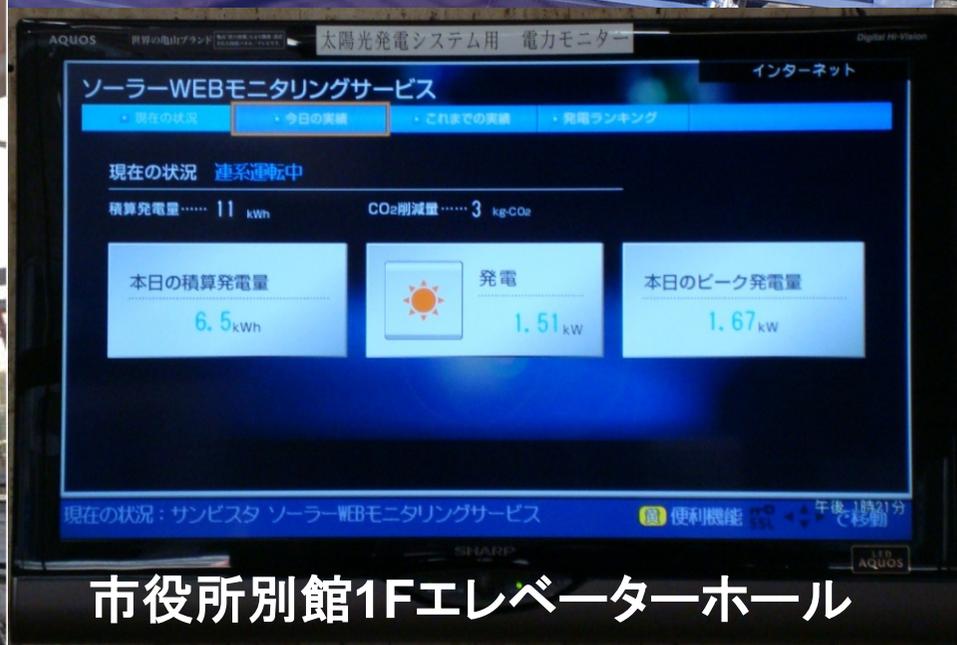
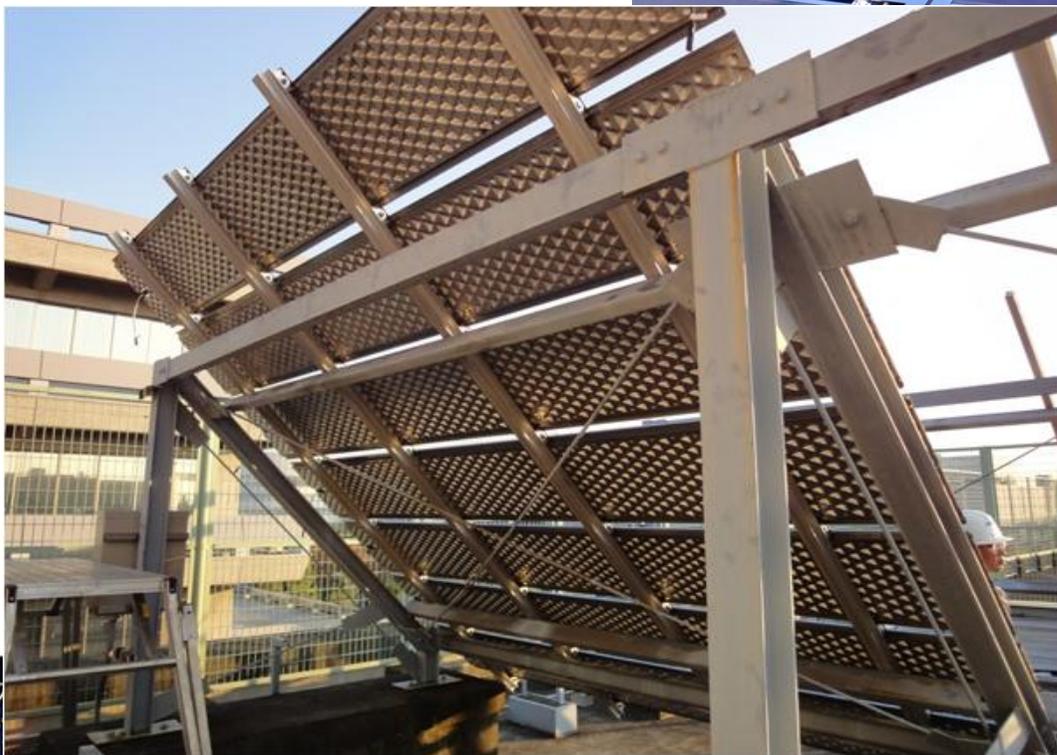
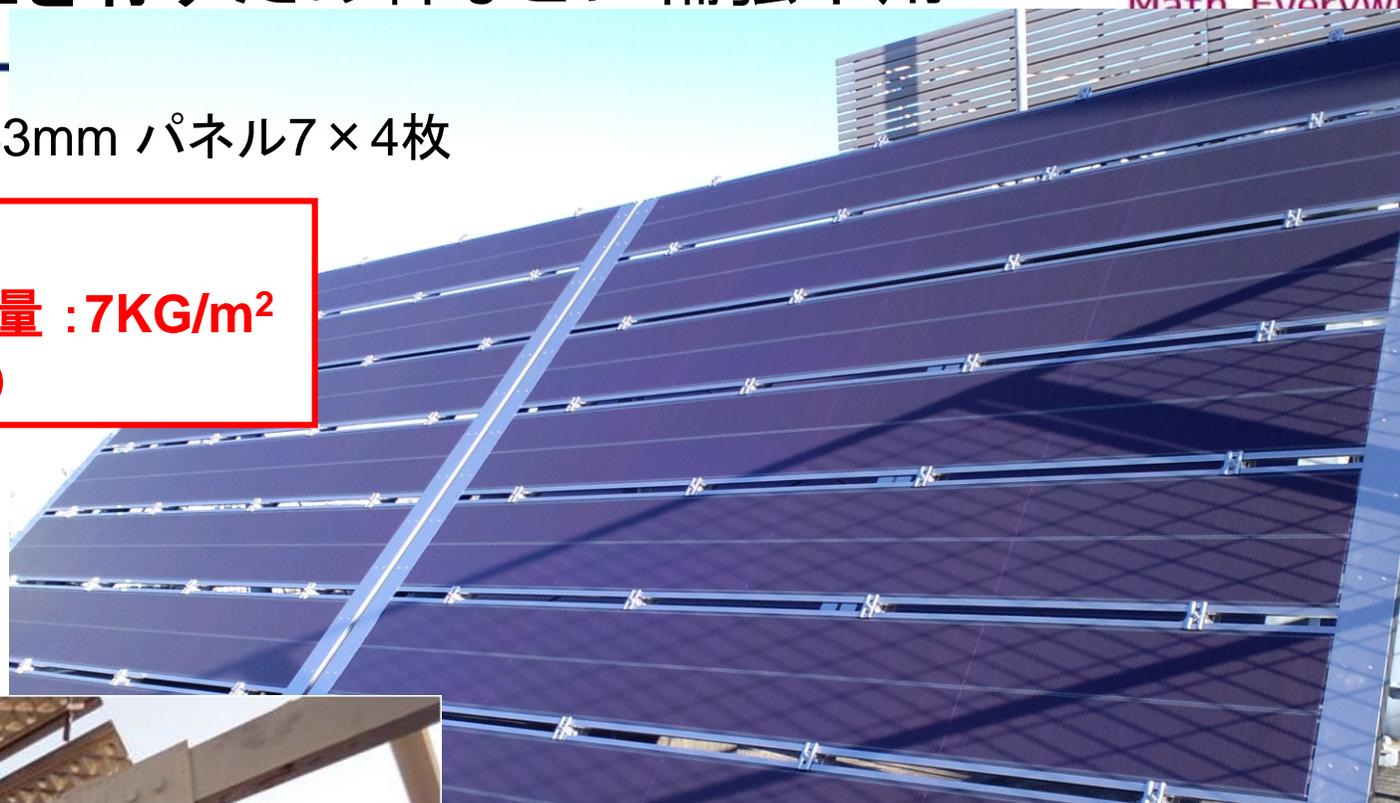
樹脂成形は容易だが、
鋼板では困難。多段階
成形法で、波打ちが
なくなる

等重量で6, 7倍の剛性を有するため軒などに補強不用

2.5KWシステム : 466mm × 3,543mm パネル7 × 4枚

パネル重量 : 6Kg/m²
ソーラーモジュール込み重量 : 7KG/m²
(ガラス基板タイプの約1/2)

市役所別館屋上
(市民庭園)



市役所別館1Fエレベーターホール

- ① 困難な原因は紙では首尾よく行っても、厚紙、樹脂、金属では、
 - 1) 収縮後の安定性維持困難、
 - 2) 展開後の安定性維持困難、
 - 3) 複雑な折畳み法では実機への適用困難、
 - 4) 一般の構造より複雑な折紙構造の、安価にしてしかも本来の機能を適切に付与した上での製造法が困難なことによる。
- ② ここにきて一挙にモデリング技術と計算科学シミュレーション技術の援用により解決されつつある。



日本車追い出すべく1967年米国陸運局が厳しい安全基準を課す



50マイル/hで剛壁に
衝撃

ハンドル付け根の
後退移動量

2.54ch以内

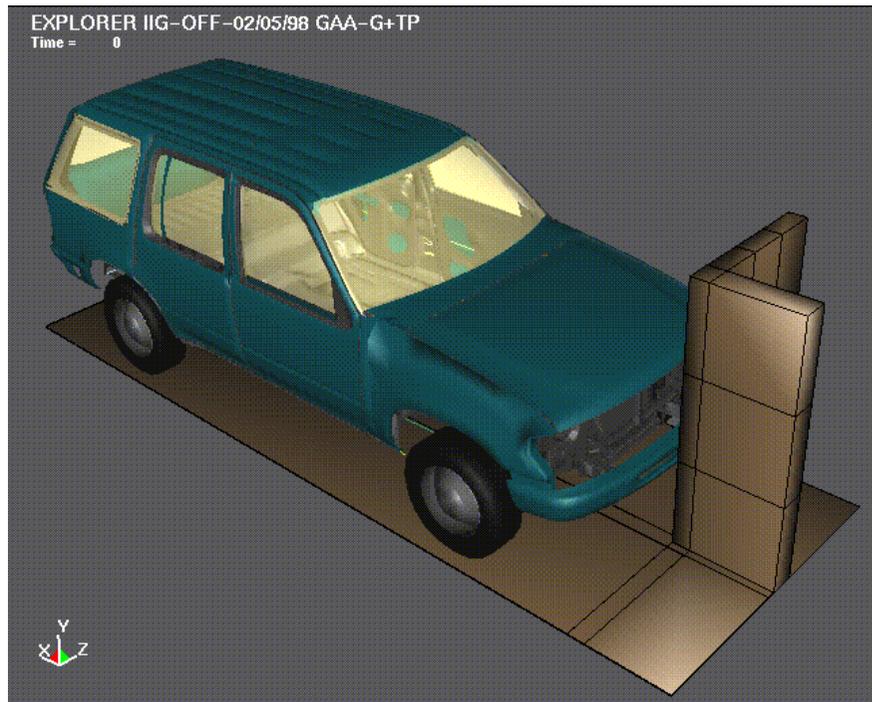
エンジンは必ず後退し、
ハンドル付け根に衝撃

エンジンの後退速度が
速いとハンドルの後退
速度も早く、ハンドルが
ドライバーに激しくぶつ
かる。



サイドメンバのエネルギー吸収特性に左右される

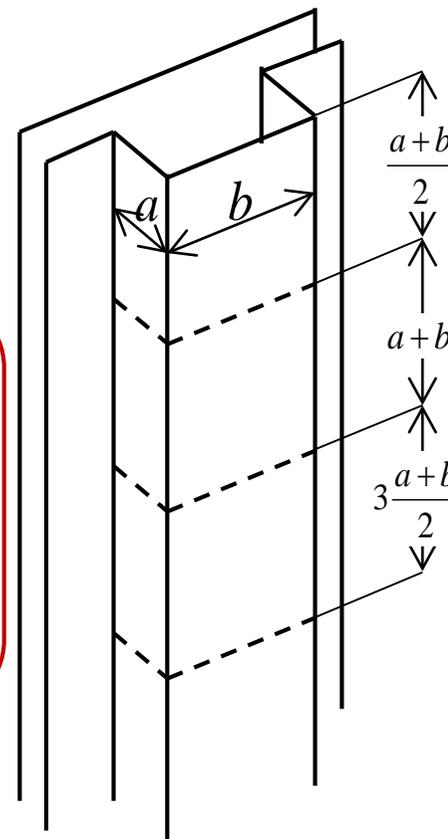
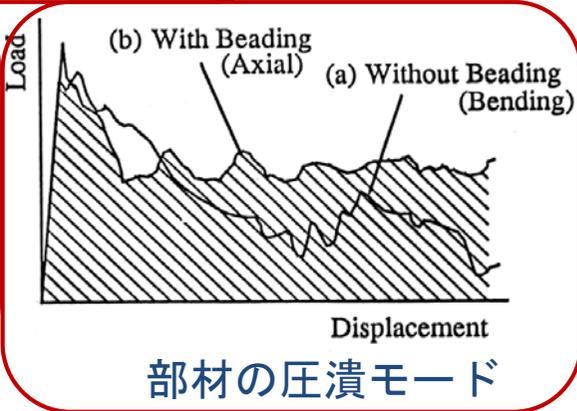
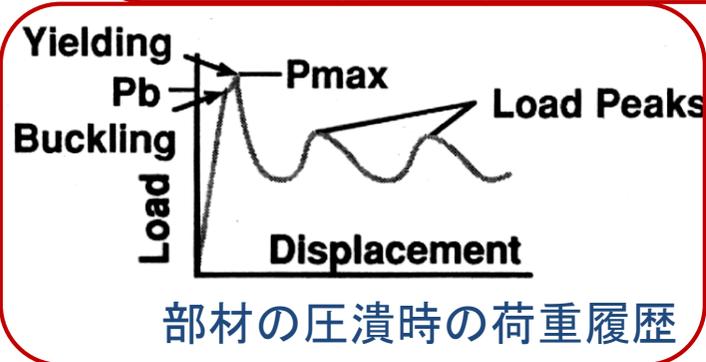
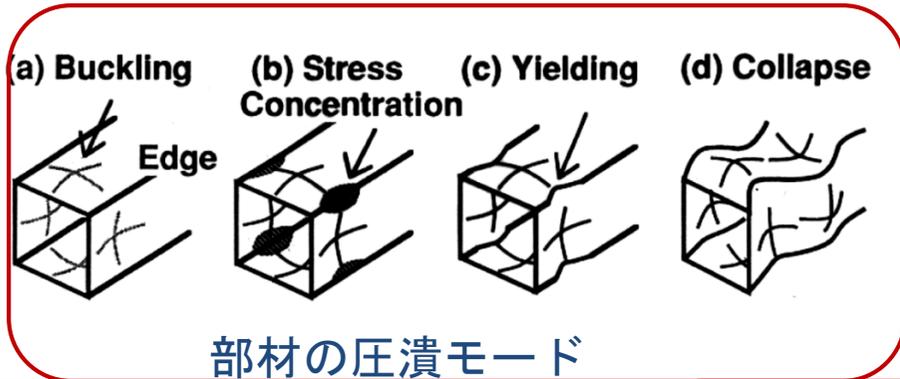
- 前面衝突、オフセット衝突は
サイドメンバのエネルギー吸収特性に左右される



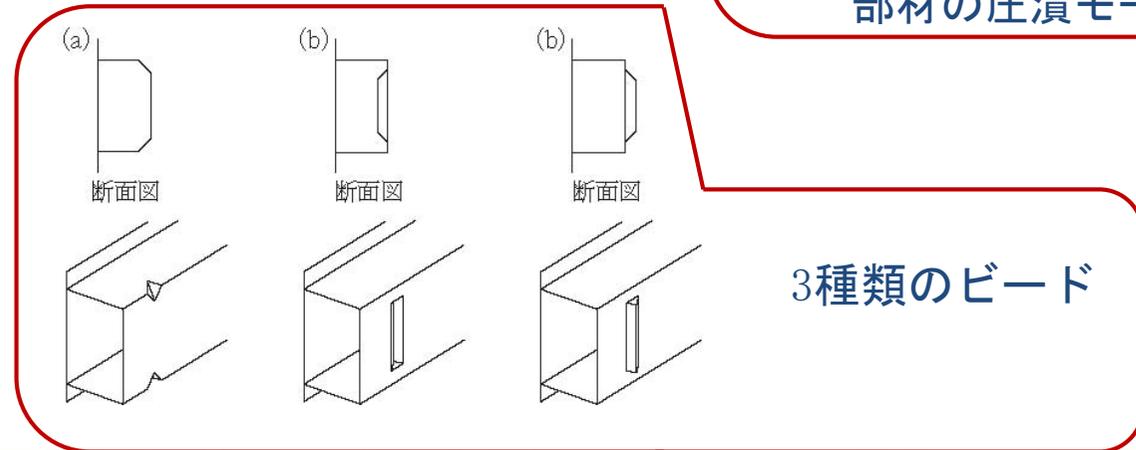
現在のサイドメンバは、トポロジ的には一枚の紙を丸めるようにして左右両端をホッチキスで留めたようなものである。



困難であった有限要素法シェルモデルによる衝突シミュレーション 技術をもとにエネルギー吸収の現象解明:基本特許



先端から
 $\frac{a+b}{2}$
のところで
座屈が生じる
以後
a+b
 $3\frac{a+b}{2}$
のところで
座屈が生じる



エネルギー吸収材の基本特許の取得
萩原一郎, 津田政明, 北川裕一,
ビードの配置決定方法, 第2727680号(1991).

- 現行自動車のエネルギー吸収材は、
ビードつきであるが、次の2点の欠点を有す

1) 理想的に潰れても自らの嵩張りが邪魔となり
自長の70%しか潰れない

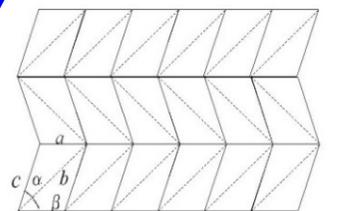
➡ 折紙構造が絶対必要

2) 初期ピーク荷重が高く、時に乗員に危害となる。

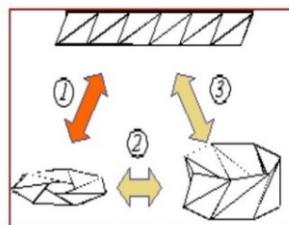


反転らせん折紙構造物で二つの欠点解消: エネルギー吸収量も1.4倍。しかし、製造法高い

反転螺旋円筒構造:RSC



Developed view of original RSC origami structure

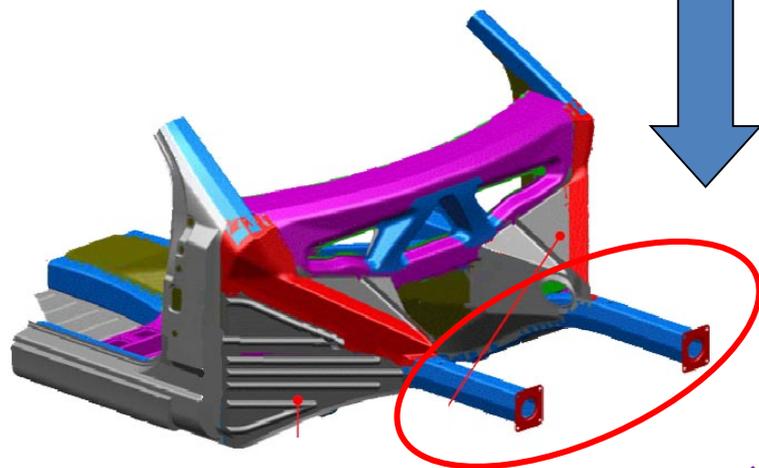
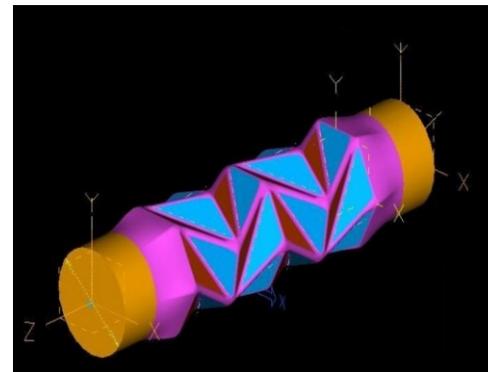


Folding procedure of original RSC origami structure

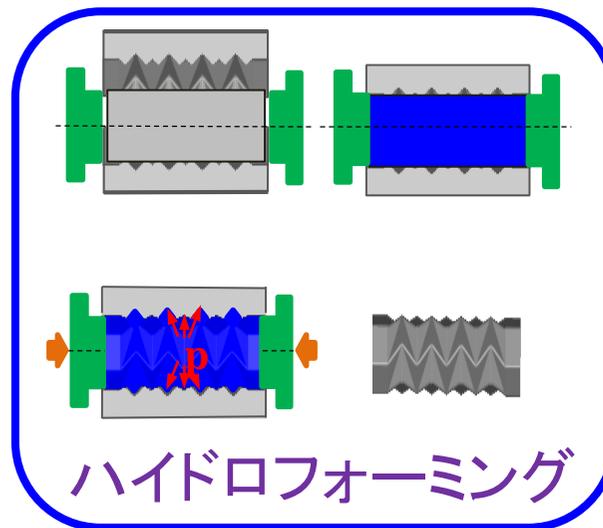


Original RSC origami structure

$m = 6$ $\alpha = 30^\circ$
 $a = 30\text{mm}$ $\beta = 38.39^\circ$
 $h = 30\text{mm}$



メンバー



ハイドロフォーミング

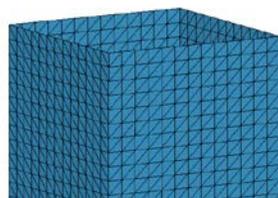
軸圧潰モード及びエネルギー吸収量比較

Time = 0



現行エネルギー吸収材
ビードなし

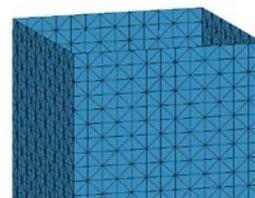
Time = 0



吸収エネルギー
4450601

現行エネルギー吸収材
ビードあり

Time = 0



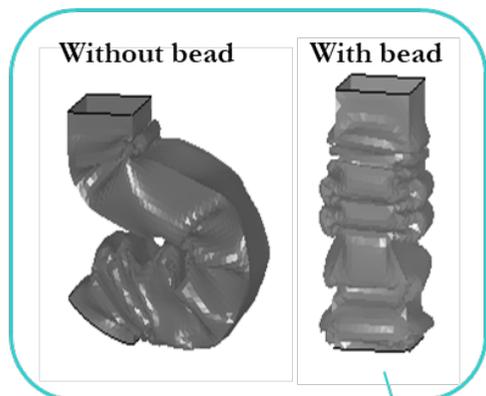
吸収エネルギー
6176092

折紙構造
最適化

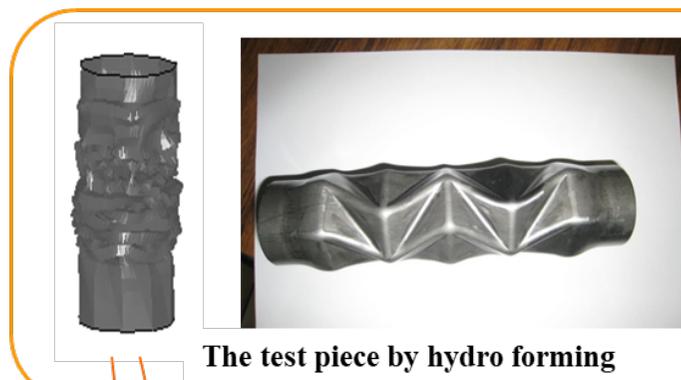


吸収エネルギー
8484763

反転らせん折紙構造の優れた特性



Present Member



The test piece by hydro forming

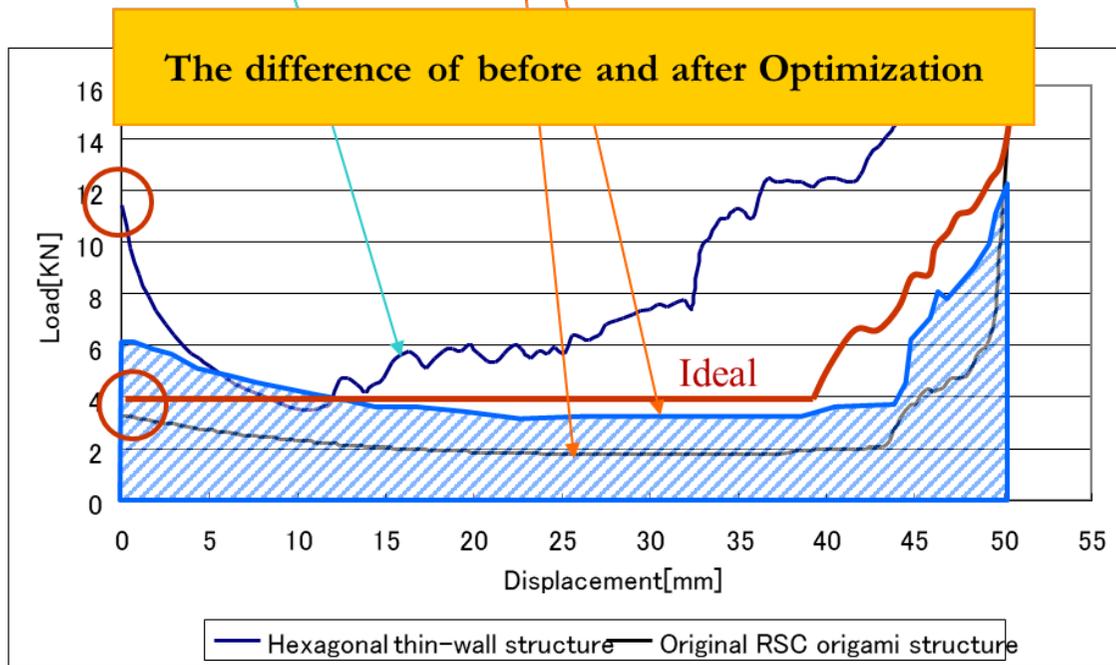
RSC



The test piece by rapid protocol



The test piece by bending processing



The reverse spiral cylindrical Origami structure which provides the ideal load displacement.

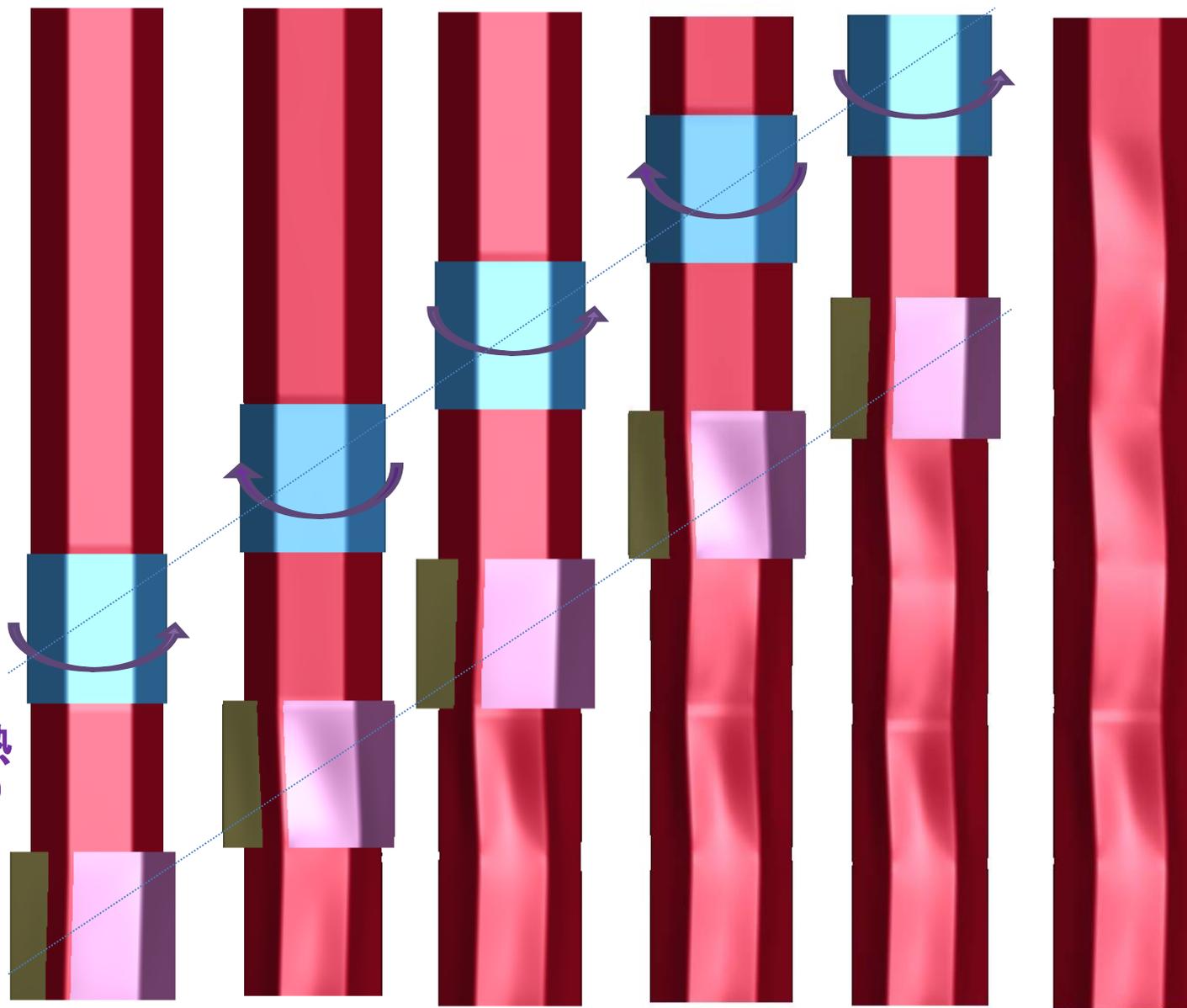


反転ねじり型薄肉構造の構成方法

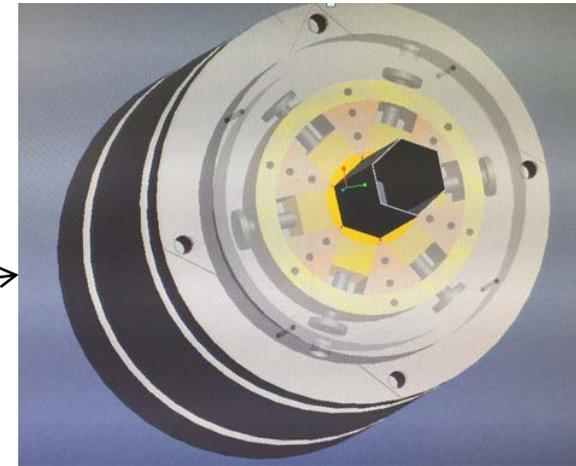
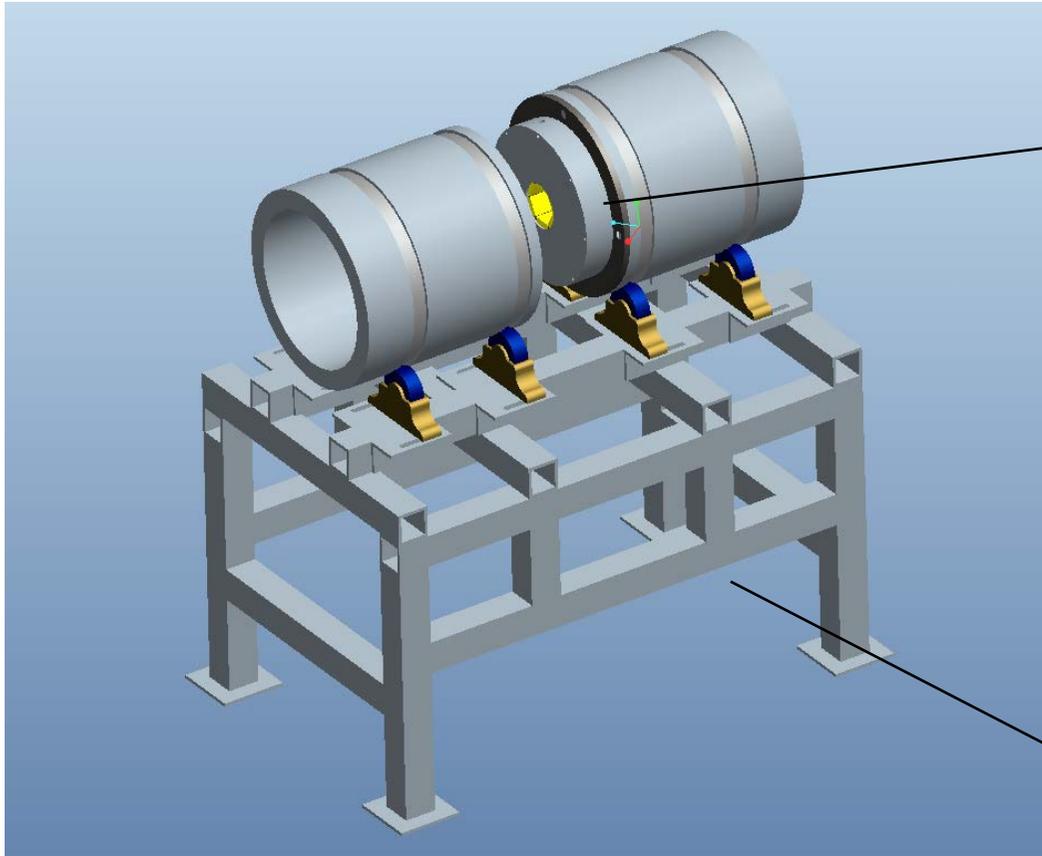
振り金型

高周波誘導加熱
(降伏応力低減)

固定金型



部分加熱回転成形の実験装置（趙希禄教授と共同開発）



ねじり成形金型



一部完成した実験装置

部分加熱回転成形の実験装置

NHKスゴ技 最強の帽子開発 「衝撃吸収素材VS驚きの折り紙工学」に出演して

安全性能

Impact force is less than 4.9kN
(MHLW helmet standards)

衝突体:

- 半球
- 半径:45mm
- 重量:5kg



保管性



300mm × 150mm × 50mm

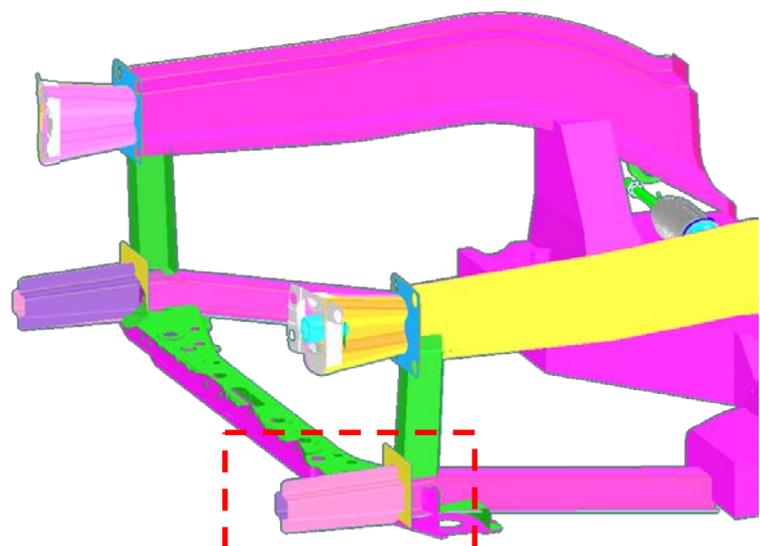


人間の頭を模擬
最大円周:560mm

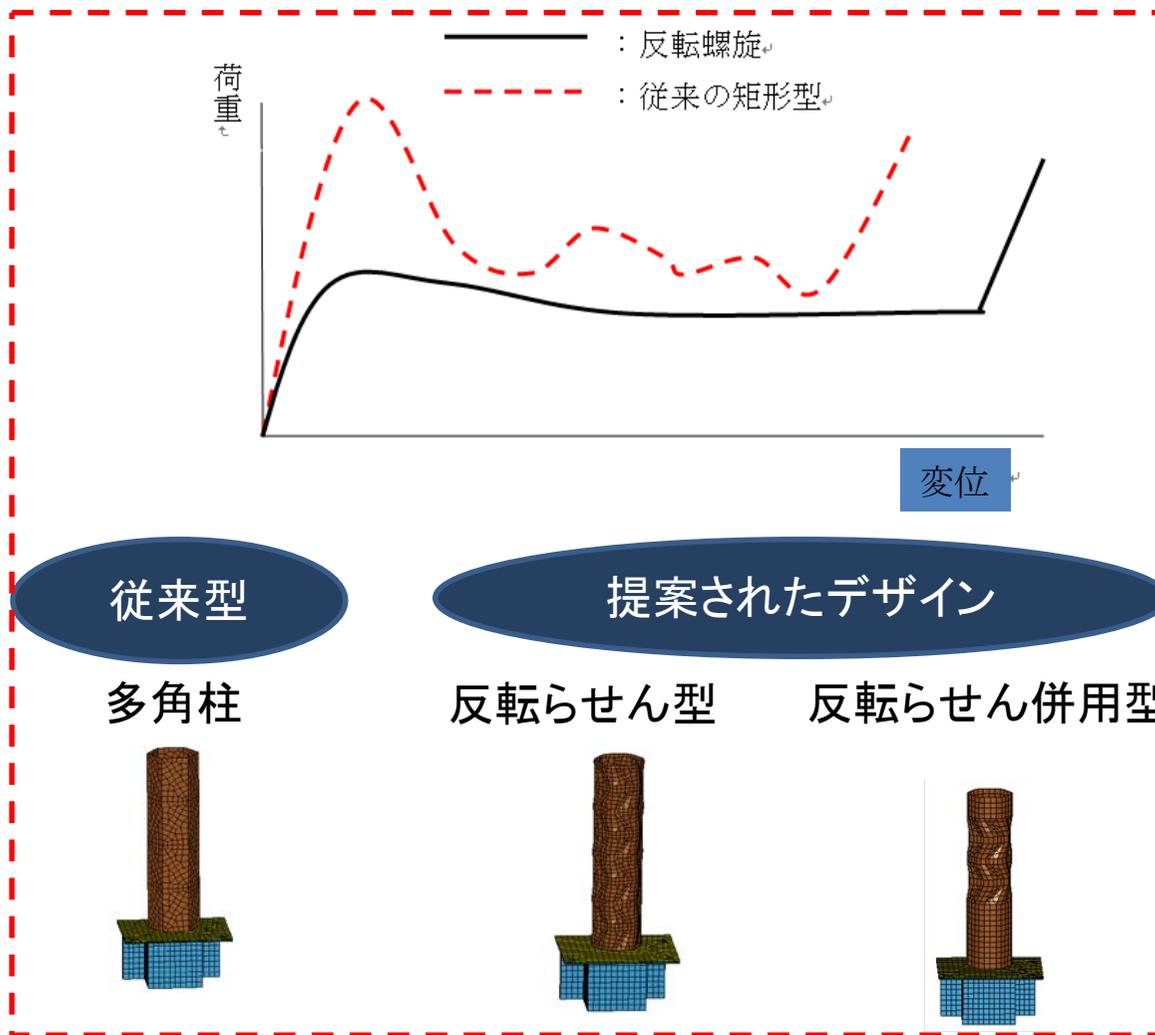
反転らせん構造物の産業応用例

自動車用衝撃吸収バンパー(クラッシュボックス)

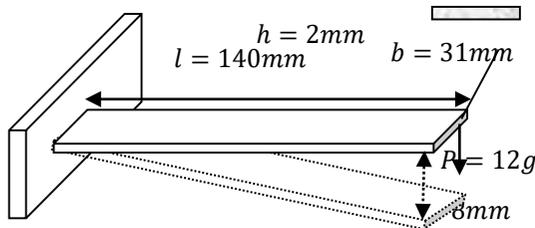
衝突の際に、**高エネルギー**を吸収し、かつ**衝撃荷重を抑える**ことが求められる。



クラッシュボックス
164mm



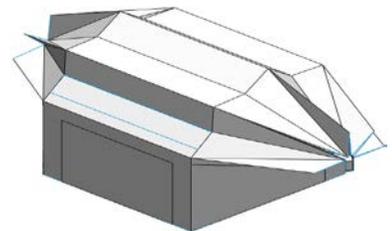
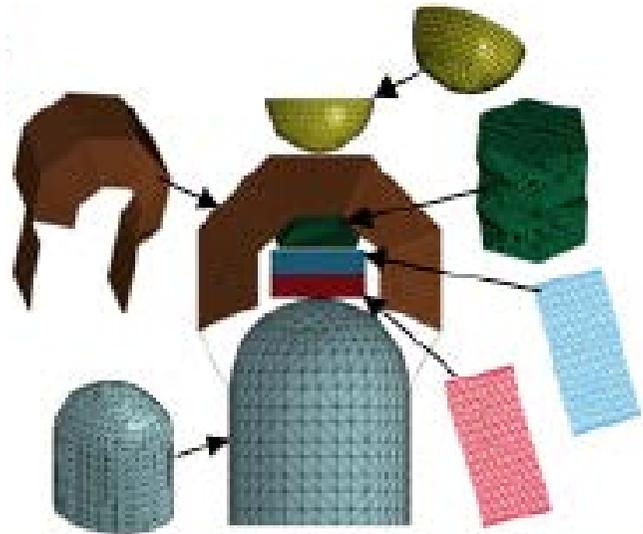
段ボール材は異方性がありシミュレーションは一般に困難だが、衝突シミュレーションの開発者としては失敗は許されない。



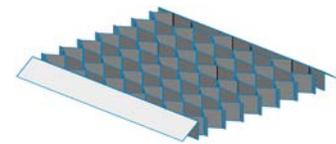
	1m	2m	3m
Origami team-experiment	2.15kN	2.55kN	3.3kN
Analysis	1.91kN	2.61kN	3.6kN



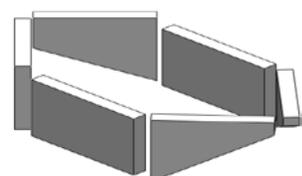
防災用帽子 (応用実例紹介)



蛇腹折りカバー



ハニカム構造

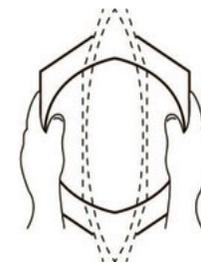


+ウレタン保護材

+反転螺旋構造



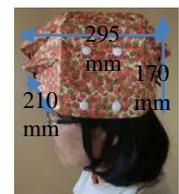
提供(有)秦永ダンボール



下方視点

折畳状態

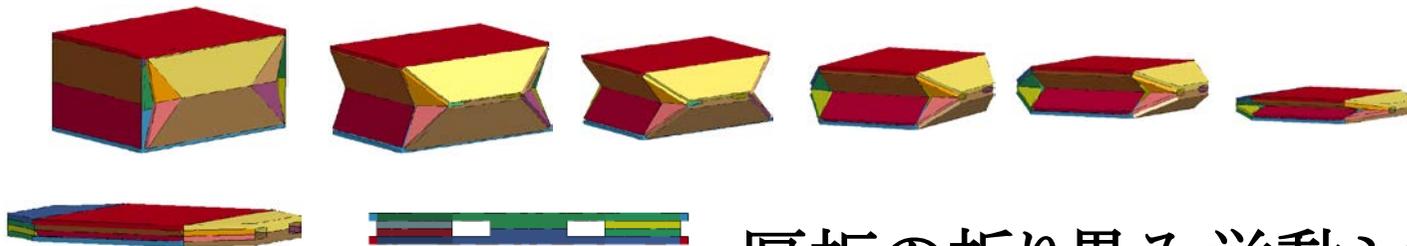
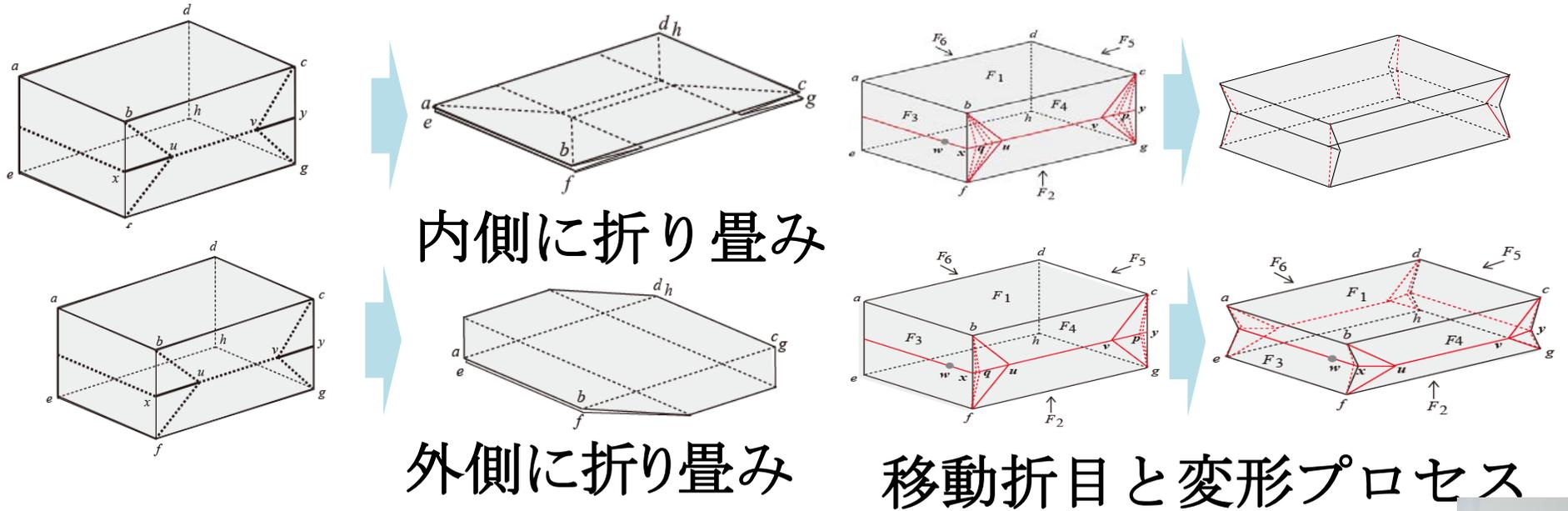
使用時状態



NHK 超絶 凄(すご)ワザ! 「最強の帽子対決」「凄ワザが挑む防災革命! SP」出演防災用帽子

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.

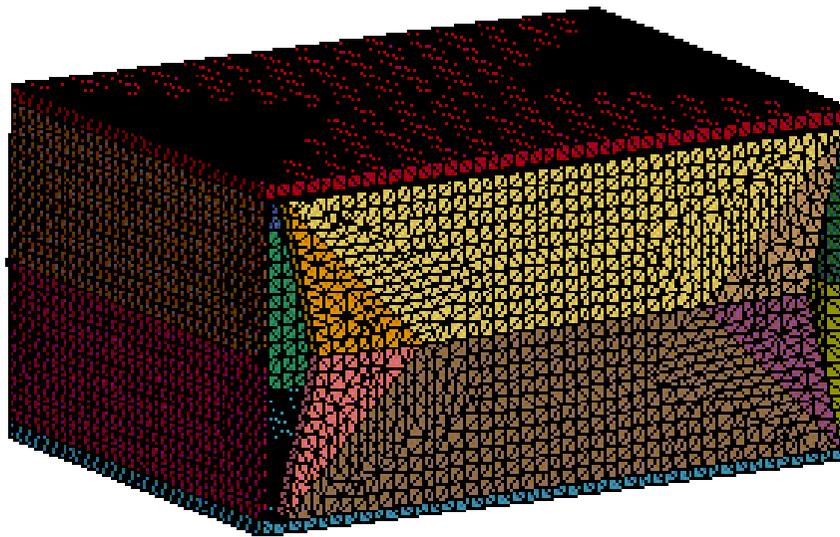
厚板折畳構造 / マルチパーパス折り畳み箱



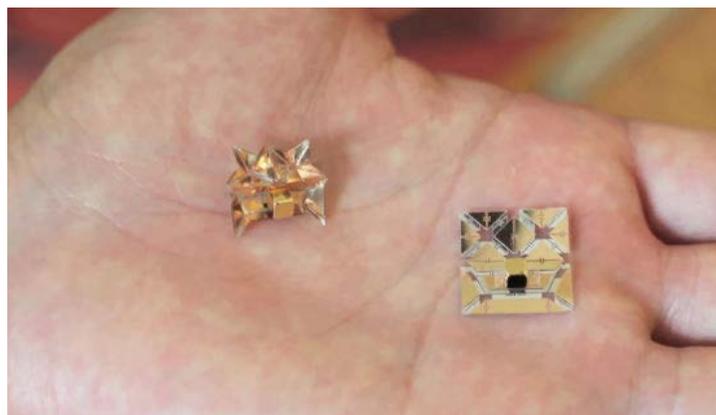
厚板の折り畳み挙動シミュレーション

参考文献 : Nara, C. "Continuous flattening of some pyramids", Element der Math., 69 (2014) 45-56.
 Demaine, E. D., Nara, C. et al. , Continuous flattening of orthogonal polyhedral, LNCS, vol. 9943, Springer (2016), 85-93.

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost



「折り紙」構造を応用した小型・軽量ロボットが改良され、誤飲したボタン電池を体内から取り除ける「折紙撤去ロボット」に進化



「MIT、シェフィールド大学、東京工業大学」の研究グループが、誤飲した異物を体内から取り除けるようにOrigami Robotを改良。豚の腸を使って作られている。乾燥状態だと左にある紙片のような感じだが、水分を含むと右のような形状に変化して、振動して推進力を得られるロボットに変形。



まとめ 1

- ① 遊戯折り紙からスタートした諸外国と異なり、唯一、我が国の折り紙の起源は、優れた和紙の折形折り紙にある。
- ② 折り紙は生命と同じ4次元であり、「かたちからくり」で表現される生命の理解は、ものづくり大国日本の礎作りに貢献した。
- ③ 折り紙を芸術の領域に高めた先人に敬意を表し、産業化は考えずにいたところ、ハニカムの成功に刺激を受け折紙工学が提唱された。
- ④ これを契機に、折形折り紙、遊戯折り紙、伝承折り紙、近代折り紙、芸術折り紙、に続き計算幾何学折り紙とともにバイオミメティクス折り紙が誕生した。
- ⑤ (特に、バイオミメティクス)折紙構造は、軽くて強い、展開収縮できる特性があり、製品開発などの工学分野への応用という面でも非常に魅力的な素材である。
- ⑥ そのためバイオミメティクス折り紙をベースに多くの産業化が試みられたが、折紙構造の大量生産方式が難しいなどその達成は困難であった。
- ⑦ 折紙工法、折紙ロボット、折紙式プリンターはこれを打開する可能性を秘めていることを示した。



まとめ2

- ⑧ 折紙構造が優れた特性を有すことをエネルギー吸収材で示した。
- ⑨ 折紙工学で進められているテーマを網羅的に紹介した。
- ⑩ 折紙工学の最終目標である「自己折り」は、設計図と形を作る仕組みを内包している構造の実現という点で、生物の形のつくりかたに倣う「自己組織化」のアプローチそのものである。
- ⑪ このアプローチは、特に製作機械が作れないようなマイクロスケールや建築のような巨大な構造などに特に有効で新しい自己組織化製造法と位置付けられる。
- ⑫ 紙、折り紙、折紙工学は日本科学・文化の縮図でもある。典型的な農耕民族は現実に感謝の意で接し、四季折々の行事を想定内の行為で対応する。しかし、一旦、どこかで想定外の発見がなされれば、たちまち追いつきそこでトップランナーとなる。
- ⑬ 中国で紙が発明されれば、それより優れた和紙が作られた。Tree makerの設計図が出れば、それを凌駕する技術が発明され、ハニカムで産業応用されれば、それを凌駕する曲面ハニカムを発明し、究極の自己組織化製造法も目指す。

