

# 折り畳み可能な構造体の変形メカニズム

## The deformation mechanism on origami based foldable structures

寺田 耕輔・門井 幸太・戸倉 直\*<sup>1</sup>・須志田 隆道\*<sup>2</sup>・萩原 一郎\*<sup>2</sup>

国立高等専門学校機構 福島工業高等専門学校 専攻科

\*<sup>1</sup>トクランシミュレーションリサーチ株式会社・\*<sup>2</sup>明治大学 先端数理科学インスティテュート

Kousuke Terada, Kota Kadoi, Sunao Tokura\*<sup>1</sup>, Takamichi Sushida\*<sup>2</sup> and Ichiro Hagiwara\*<sup>2</sup>

National Institute of Technology, Fukushima College, Advanced Course \*<sup>1</sup>Tokura Simulation Research

Corporation \*<sup>2</sup>Meiji University, Meiji Institute for Advanced Study of Mathematical Sciences

(2015年10月5日受理)

In order to produce the origami based foldable structures, designers have to determine industrial material type, geometry of structures and dimensions etc. These structures may be deformed in proportion to the load at the first step, and show the property of spring. Next step, the deformation will become non-linear behavior. However, deformation mechanism in these structures cannot be estimated yet well. So, appropriate design cannot be done easily. In this paper, by experiments and FEM analysis, we present the theory of deformation mechanism on origami based foldable structures, which are made of resin or metal, have many types of dimensions and geometry. This theory shows not only the relationship between dimensions of structures and spring constant, but also the relationship between material constant and the load to fold structures.

**Key words:** deformation mechanism, origami, foldable structure, FEM analysis, spring constant

### 1. はじめに

日本の伝統的な芸術のひとつとして折紙は、世界各国の多くの外国人にOrigamiとして知られているが、近年では折紙の折り畳める現象、即ち立体的構造から平面的構造、あるいはその反対の平面構造から立体構造へと自在に変化できる幾何学的特性に注目されている。その理由としては、最近の世界的なスマートフォンの爆発的なヒットに代表されるコンピューター関連のハードウェアおよびソフトウェアの革新的な機能向上と超低価格化、そして様々な工学分野における挑戦的な創造性に富んだアイデア発掘への強いニーズが、折紙における折り畳める現象についての数理解析学および構造学的な研究開発の推進を加速させているようである。

このような研究開発事例およびその製品は、次のように多岐の分野において非常に多い。最も大規模な事例<sup>1)</sup>~<sup>3)</sup>としては、宇宙産業におけるソーラーパネルやソーラーセイルなどの巨大な宇宙構造物を、地上で小さく折り畳んだ後、宇宙空間に到着してから、展開・構築するというものである。次に身近な自動車の部品例としては、折り畳みの理論に基づいたエアバッグ形状と、その畳み方の最適化の研究<sup>4)</sup>がある。また、衝突エネルギー吸収

の観点から塑性座屈モデルの研究事例<sup>5)</sup>なども知られている。さらに生活用品としては、折り畳み可能にすることにより潰れやすさを重視したペットボトル容器<sup>6)</sup>、テント等の大きな構造物の収納等<sup>7)</sup>が挙げられる。このように、折紙の幾何学的特性を基とした応用例に関する研究報告は多い。

しかし、このように多岐の分野での活用が期待されている反面、紙を対象にした折紙についての幾何学特性の研究は進んできたが、工業製品に応用するために必要な折り畳む過程における“紙でない工業材料”の変形メカニズムについてはまだよく解明されていない点も多い。工業材料としても樹脂材料あるいは金属材料にしても、それぞれに多くの種類がある。このため製造工法についても、一般的にはまだ確立されていない状況である。

そこで、筆者らは、折り畳み可能な樹脂/金属製構造物の変形メカニズムを解明するため、代表的な材料として樹脂材料ではポリプロピレン(PP)、金属材料では軟鋼を選定して、試作実験および解析を行いながら、その現象について考察するプロセスにより研究を進めている。

本稿では、そのなかの基礎的な検討結果をまとめた内容について報告する。

2. 樹脂製折り畳み可能な構造体の試作と実験

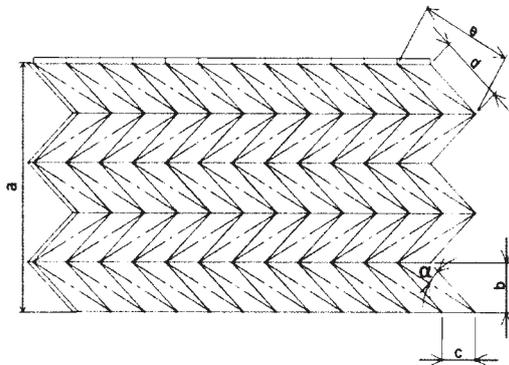
2.1 試作品の概要

(1) 幾何学的特性

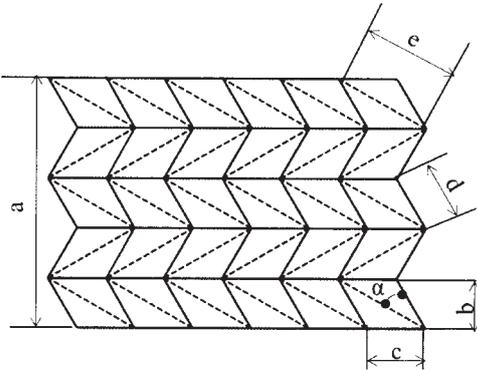
折り畳み可能な構造体のなかでも、筒型の構造物に焦点をあてると、野島ら<sup>5)-7)</sup>が円筒・円錐の折り畳み可能な設計理論を構築していることが挙げられる。

これらの報告により、基本的なベースとして、円筒の折り畳み可能な構造体では、例えば、Fig. 1(a)に示す展開図では、水平方向の要素数Nが12であり正12角形の断面をもつ筒となり、N個の要素で左右の境界を閉じて筒を形成するためには、内角 $\alpha$ は $2\alpha N=2\pi$ を満たさなければならないことにより、 $\alpha = \pi/12$ と決定されることが知られている。その他の例として、Fig. 1(b)では、水平方向の要素数Nが6で、正六角形の断面をもつ筒となり、 $2\alpha N=2\pi$ より $\alpha = \pi/6$ となる。

本稿では、これらの例のなかで、より円形に近い方の正12角形タイプを選定して、折り畳み可能な構造体の試作に着手した次第である。なお、Fig. 1の輪郭線は切断線、その他は折線を表し、そのうちの実線は山折線、破線は谷折線を表す。



(a) An example of 12 square type



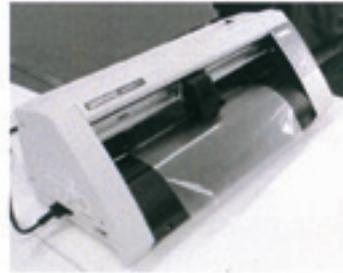
(b) An example of hexagonal type

Fig.1 Examples of crease pattern for the origami-based foldable cylindrical structure

(2) 製作方法

樹脂材料としては、汎用市販品のポリプロピレン(PP)を選定し、折り畳み易い厚さ0.2mmのシートから、Fig. 2に示すカッターマシン(メーカー:GRAPHTEC, 型番:CE5000)を用いて、切断と折線における溝掘り処理を行う。溝深さは、PPシート厚さの約半分である。

次に、切り出したPPシートを折紙のように折り畳む作業を行い、のり代に瞬間接着剤を塗布して、Fig. 3に示すような折り畳み可能な構造体を試作している。



(a) CE5000 type by GRAPHTEC



(b) Cutting of a PP sheet

Fig.2 Cutting machine for PP sheet



Fig. 3 The prototype product of foldable cylindrical structure based 12 square type with 300mm scale

試作品の製作過程では、カッターマシンにおけるシーートの滑り等により、折線加工において寸法誤差が生じるため、Table 1 に示すように試作品の各寸法は設計値から少し乖離している。 $\alpha$  では約  $1^\circ$  の誤差がある。

Table 1 Major dimensions of the prototype product

	$\alpha$	a	b	c	d	e
Design plan of 12 square	$15^\circ$	200.0	40.0	30.0	56.4	80.0
Prototype of 12 square	$16^\circ$	206.0	41.2	30.0	56.1	79.6
Design plan of hexagonal	$30^\circ$	250.1	50.2	58.0	58.0	100.5

## 2.2 荷重-変位測定実験

樹脂製折り畳み可能な構造体の試作品に対して、荷重-変位測定実験を次の要領で行い、Fig. 4に示すような結果を得ている。

- 1) 試作品の上部に分銅受け皿を置く。
- 2) 皿上に分銅を1Nずつ加えて試作品を高さ方向に圧縮変形させる。
- 3) ハイトゲージで荷重ごとの高さ方向に降下する変位量を測定する。
- 4) 荷重-変位測定実験は、同じ要領で2回行う。

荷重-変位測定実験から、今回の試作品は変位量が10mm程度まではばねのような弾性的な変形挙動を示し、ばね定数  $F$  は  $0.40 \text{ (N/mm)}$  となっていることがわかる。しかし、さらに変位が大きくなるとばね定数は次第に低下する非線形性を示している。また、このPP材の時間経過の影響として、1回目の実験よりも2回目の実験では変位量が60mm以上の領域では硬化する現象が顕著に表れている。

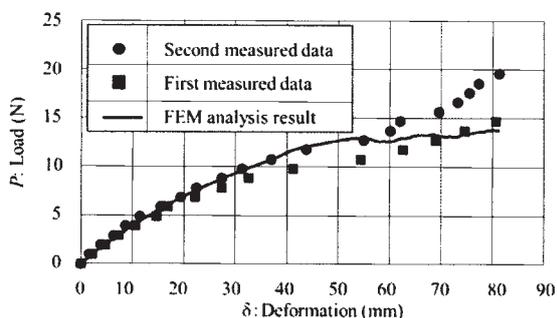


Fig.4 Comparison between measured data and FEM analysis result.

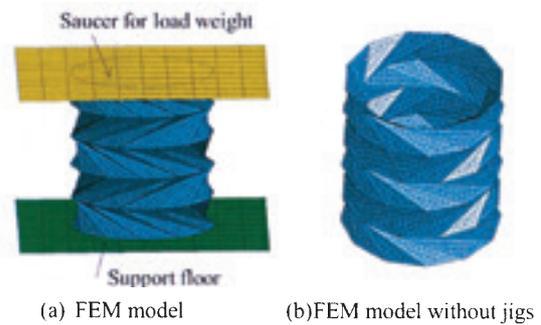
## 3. FEM解析の検証

### 3.1 FEM解析手法の概要

試作品を用いた荷重-変位測定実験だけでは、実験条

件が極めて限定されるため、ここでの実験条件についてFEM解析を用いて精度よくシミュレーションできれば、多様な折り畳み可能な構造体の変形メカニズムを実験だけによらずにFEM解析から検討することができる。そこで、次のようなFEM解析を行い、解析結果の有効性を検証する。

ここでのFEM解析モデルをFig. 5に示す。FEM解析の検証においては、試作品 (Fig. 3) の各寸法についての測定結果 (Table 1) に基づいてFEM解析モデルを作成している。



(c) Deformation simulation by FEM analysis

Fig.5 Applied FEM model to the prototype product deformation simulation

FEM解析ソルバーとしては、市販ソフトであるLS-DYNA<sup>8)</sup> を用いている。本解析では、試作品の大きな変形現象を解析するために、動的陽解法を用いている。FEMモデル化では、PPシートをシェル要素(完全積分シェル要素タイプ)で表し、材料モデルとして弾塑性体モデルを用いて、PPシートメーカーの推奨値と文献から、Table 2の材料定数(ヤング率 $E$ (GPa)、降伏応力 $\sigma_y$ (MPa)、塑性係数 $F$ (MPa)、加工硬化指数 $n$ 、ポアソン比 $\nu$ )を入力し、その他の材料定数はデフォルト値でミーゼス降伏条件<sup>9)</sup>を使用している。

その他、分銅の受け皿と下部の固定台等の治具類はすべて剛体モデルである。また、“受け皿とPPシート”、“固定台とPPシート”および“PPシート同士”等の接触を伴う全ての変形問題はペナルティ法<sup>9)</sup>で解析し、摩擦係

数および動摩擦係数等はすべて0.1としている。解析条件としては、下部の固定台モデルは完全位置固定とし、上部の荷重受け皿モデルを鉛直下方に降下させている。この降下量を $\delta$  (mm), 鉛直下方荷重を $P$  (N)と表す。

Table 2 Material constant

	$E$ (GPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$F$ (MPa)	$n$	$\nu$
PP	1.0	20.0	30.0	0.1	0.4
Mild steel	155.0	195.5	1029.2	0.276	0.3

### 3.2 検証結果

$P$ と $\delta$ を出力させたFEM解析結果(Fig. 4)により、次のような検証を行っている。

- 1)  $\delta=60$ mmとなる荷重 $P$ についてのFEM解析結果は、2回の実験結果に近い約12.5 Nであり評価精度として良い。
- 2) FEM解析結果は、実験結果と同様に、0~5 Nまでの範囲では $P$ と $\delta$ はほぼ線形の関係を示している。
- 3) 実験結果とFEM解析結果ともに、荷重 $P$ が5~15 Nの段階では、非線形現象が認められるが、このPP材の時間経過の影響として、1回目よりも2回目の実験での変位量が60mm以上の領域において硬化する現象は、今回のFEM解析の材料モデルでは表現できていない。

しかし、1回目の実験結果に対しては、 $\delta=0\sim 80$ mmの範囲でFEM解析結果は実験結果によく一致していることから、このFEM解析手法を変形メカニズムの検討に適用できると判断している。

### 4. FEM解析を用いた検討

ここでは、種々の折り畳み可能な構造体を想定し、それらをFEMモデルで表し先述の解析を実行して、解析結果をもとに変形メカニズムについて検討する。

#### 4.1 構造体形状寸法とばね定数の関係

ここでのPP製折り畳み可能な構造体は、変位量が限定された範囲においてばね特性を有している。そこで、このばね定数 $\Gamma$  (N/mm)と構造体の形状寸法との関係についてFEM解析結果をもとに検討し、次の知見を得ている。

- 1) PPシート板厚 $t$ : 他の設計変数はすべて同様にして、 $t$ だけを0.2, 0.3, 0.4mmと変更した構造体のばね定数をFEM解析結果から評価した結果をFig. 6に示している。この構造体の圧縮変形は、折線部の曲げ変形によるものであるから、 $\delta$ は次式の断面2次モーメント $I$ に依存する。

$$I = w \cdot t^3 / 12 \quad (1)$$

ここで、 $w$ : 曲げ部の長さ寸法(mm)である。

(1)式より、この範囲の板厚では $\Gamma$ は板厚の3乗にほぼ

比例すると考えられる。

- 2) 多角形の1辺長さ $c$ : 長さ $c$ を7.5, 15, 30, 45, 60mmと変更したFEM解析モデルを作成し、荷重-変位の関係をFEM解析から評価した結果を図7に示す。図7から、長さ $c$ と $\Gamma$ は反比例の関係にあることがわかる。これは、構造体のPPシート厚 $t$ を一定のまま、長さ $c$ の変更倍率を $K$ とすると(長さ $a$ は $c$ の従属変数)、構造体を構成しているPPシート体積 $V$ は $K^2$ 倍になるのに対し、PPシート上に描かれる折線長さ $L$ は $K$ 倍である。

よって、構造体の $\Gamma$ は、PPシート体積に対する折線長さの割合に比例するから(2)式で表される。

$$V = \eta_1 \cdot t \cdot (K \cdot a) \cdot (K \cdot c)$$

$$L = \eta_2 \cdot K \cdot c$$

と表すと

$$\Gamma = \eta_3 \cdot L / V$$

$$= \eta_4 / c \quad (2)$$

となる。  $\eta_i$ : 定数( $i=1, 2, 3, 4$ )

以上により、長さ $c$ と構造体の $\Gamma$ は、反比例の関係( $\Gamma \cdot c = \text{定数}$ )になると考えられる。

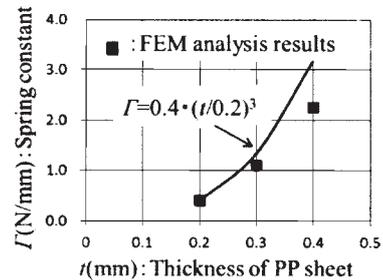


Fig.6 Relationship between  $t$  and  $\Gamma$

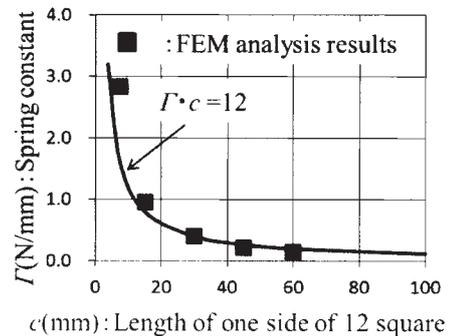


Fig.7 Relationship between  $c$  and  $\Gamma$

#### 4.2 構造体材料の影響

筆者らは、金属材料に板厚の半分の深さの溝をNCルータやマシニングセンターなどで図面どおりに溝加工し、工具を用いて折り曲げて試作した軽量高剛性構造バネ

ルについて研究報告<sup>10,11)</sup>を行っている。金属材料の場合、適切な材質や板厚について検討が必要であるが、今後は金属材料を折り曲げてこのような構造体を試作する計画を進めている。

(30=10×3)と考えられる。

4)  $\delta$ が80mmに到達しても、PP製試作品では塑性変形域に達している箇所はごくわずかであるが、スチール製では構造体全体が塑性変形域に達している。従って、PP製試、

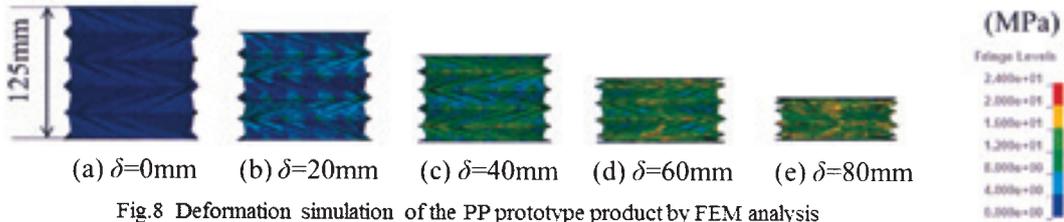


Fig.8 Deformation simulation of the PP prototype product by FEM analysis

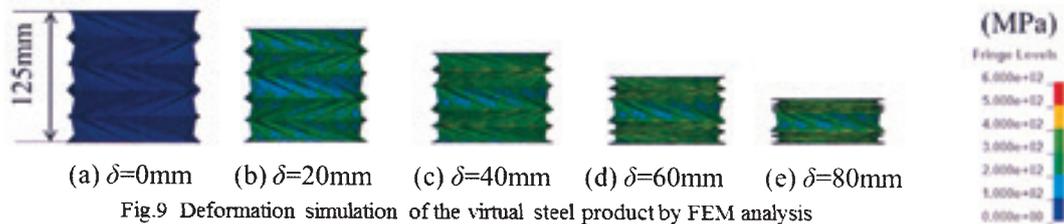


Fig.9 Deformation simulation of the virtual steel product by FEM analysis

スチール(軟鋼)製構造体試作品の設計仕様および変形挙動を検討するために、構造体の荷重-変位の関係をFEM解析から推定してみる。材料の影響を把握しやすくするために、材料定数(Table 2)のみを変更し、スチール製構造体のFEMモデルはPP製構造体の形状寸法と同様とする。

PP製試作品の場合と仮想上のスチール製試作品についてのFEM解析による変形図をFig. 8, 9に示す。図中の(a)~(e)は、 $\delta$ が0mmから80mmまでにおいて20mmごとにMises応力分布解析結果を表しており、次の知見が得られている。

1) PP製試作品では $\delta=80$ mmでも降伏応力20MPaを超えている箇所はほとんどないが、スチール製の場合は、 $\delta=10$ mmで降伏応力195.5MPaに達している領域が多い。また、スチール製は $\delta=80$ mmでも高さの中央領域の変形は少ないが、PP製では中央領域も含めて全体的に大きく変形している。スチール製の荷重-変位グラフ解析結果(Fig. 10)によると、 $P$ と $\delta$ が比例する範囲はごく初期段階だけでその後は非線形挙動を示している。

2) PP材は弾性変形の限界がひずみ0.02程度であるが、スチール材はひずみ0.002程度であるため荷重と変位が比例関係を示す範囲はスチール製ではPP製の1/10程度となる。荷重と変位がほぼ比例する $\delta$ 範囲は、この材料の弾性変形ひずみ範囲に依存することを示している。

3)  $\delta$ が80mmに到達する荷重は、スチール製の場合、PP製試作品よりも30倍ほど大きい。これは降伏応力が約10倍大きいことと加工硬化指数が約3倍大きいことが要因

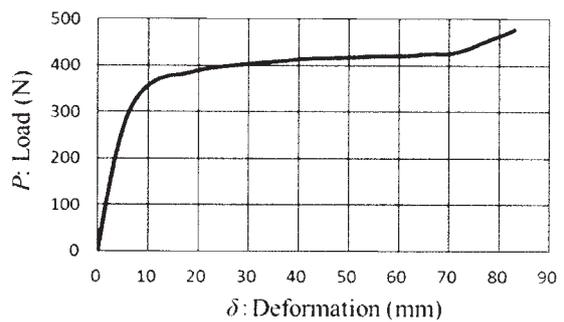


Fig.10 Relationship between  $P$  and  $\delta$  for the virtual steel product by FEM analysis result

作品は荷重を除荷するとほぼ元の形状に回復するが、スチール製では回復しないはずである。スチール製の場合は、ばねとしての活用よりも、圧縮変形することによって衝撃エネルギーを吸収するための構造体としての活用が期待される。

## 5. まとめ

本稿では、折り畳み可能な構造として、汎用樹脂材料PPのシート(厚さ0.2mm)を用いて、正12角形の円筒試作品を試作し、荷重-変位測定実験を行いFEM解析の有効性を検証し、FEM解析を用いてこのような構造体の変形メカニズムについての検討結果から、次のような知見を得ている。

1) 本構造体は、初期の圧縮変形領域では荷重と変位はほぼ比例する。このばね定数と構造体の板厚の3乗はほぼ

比例する関係がある。これは、シート材の曲げ変形によるたわみ量は、断面2次モーメントに依存することが要因と考えられる。

2) 本構造体の正多角形の1辺の長さとはね定数は、ほぼ反比例の関係にある。これは、ばね定数が構造体を構成するシート体積とシート上の折線長さの比率に依存していることによると推測される。

3) 金属製構造体の場合についてのFEM解析結果から、荷重-変位の関する力学特性を、材料定数の違いによって生じる変形メカニズムから合理的に説明することができる。

以上から、本稿では、多様な折り畳み可能な構造体の設計段階において、荷重-変位の関係をほぼ予測できることを示している。

今後の課題としては、本報告で得られた知見をもとに実際の構造部品への応用を検討することや、金属製構造体の衝撃エネルギー吸収特性を把握するための実験と解析を行うことなどが挙げられる。

#### 参考文献

- 1) Freeland, R. E., Bilyeu, G. D., Veal, G. R., Mikulas, M. M., "Inflatable Deployable Space Structures Technology Summary", 49th International Astronautical Congress, Melbourne, Australia. IAF-98-I.5.01. (1998).
- 2) Johnson, L., Young, R. M., Montgomery IV, E. E., "Recent advances in solar sail propulsion systems at NASA", *Acta Astronautica*, Vol. 61 (2007), pp. 376-382.
- 3) Tsuda, Y., Mori, O., Funase, R., Sawada, H., Yamamoto, T., Saiki, T., Endo, T., Kawaguchi, J., "Flight Status of IKAROS deep space solar demonstration", *Acta Astronautica*, Vol. 69 (2011), pp. 833-840.
- 4) Mroz, K., Pipkorn, B., "Mathematical Modelling of the Early Phase Development of a Passenger Airbag - Folding Using Origami Theory and Inflation Using LS-DYNA Particle Method", 6th European LS-DYNA Conference (2007), pp. 71-86.
- 5) 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, Vol. 70, No. 689 (2004), pp. 36-42.
- 6) 野島武敏, "平板と円筒の折りたたみ法の折紙によるモデル化", 日本機械学会論文集C編, Vol. 66, No. 643 (2000), pp. 1050-1056.
- 7) 野島武敏, "折りたたみ可能な円錐殻の創製", 日本機械学会論文集C編, Vol. 66, No. 647 (2000), pp. 2463-2469.
- 8) 例えば, LS-DYNA Version 971 User's Manual (2012), 株式会社JSOL.
- 9) 例えば, 長田修次, 柳本潤, "基礎からわかる塑性加工", P54, コロナ社.
- 10) 寺田耕輔, 戸倉直, 佐藤秀俊, 牧田哲暢, 萩原一郎, "組立式軽量高剛性構造パネルの曲げ剛性評価", 日本機械学会論文集, No. 15-00039 [DOI: 10.1299/transjsme.15-00039], Vol. 81, No. 828, 2015.
- 11) 寺田耕輔, 佐藤秀俊, 戸倉直, 萩原一郎, 高橋進, "溝付板材の曲げ加工における変形メカニズム", 日本塑性加工学会 第64回塑性加工連合講演会講演論文集, 講演No. 553 (2015).