

# 菱形タイリングに基づくオーゼティック機構(3Dプリント)

割鞆 奏太 Kanata WARISAYA

野老 朝雄 Asao TOKOLO

館 知宏 Tomohiro TACHI

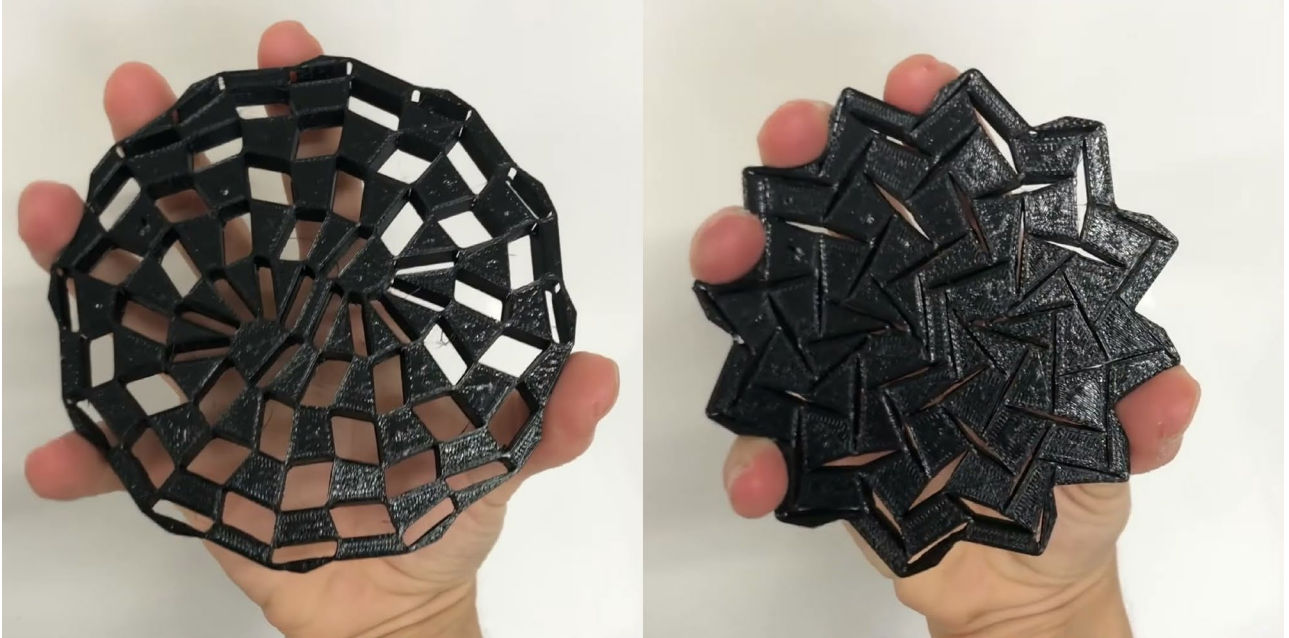


図1 「菱形タイリングに基づくオーゼティック機構(3D プリント)」, 120mm × 120mm × 10mm, TPU, 2023.

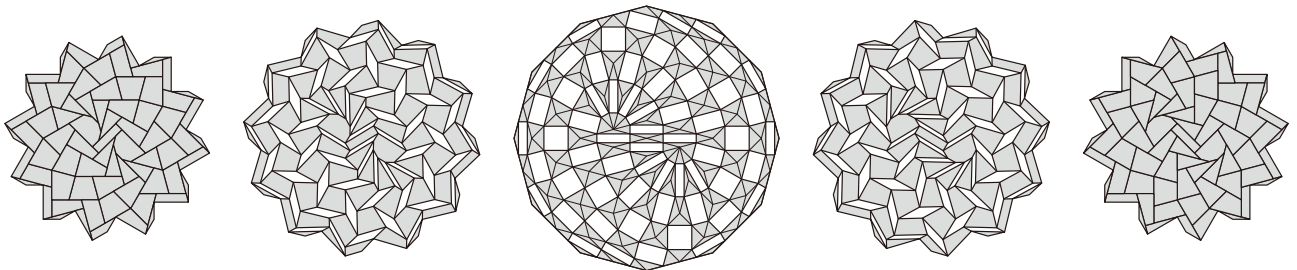


図2 機構の変形の様子. 菱形タイリングから長方形をくり抜くと(中央), 全体を収縮させながら2方向に折り畳める.

**概要:**任意の菱形タイリングから、菱形の辺の中点を結んだ長方形をくり抜くと、xy方向に同時に拡大収縮する1自由度の機構となる。本作品はTPUの3Dプリントにより、ヒンジを含めて機構を一体造形したものである。

## 1. 組市松紋とオーゼティック機構

美術家の野老氏によってデザインされた東京2020オリンピック・パラリンピックエンブレム「組市松紋」は、正12角形の領域を3種類の菱形(30°, 60°, 90°)で敷き詰め、各菱形の辺の中点を結んで長方形を描くことで構成される。菱形の非周期タイリングに基づく構成原理によ

り、組市松紋には菱形の並べ替えによる膨大な数のバリエーションが存在する<sup>[1]</sup>。

組市松紋は長方形の「図」が角でつながった紋様だが、同時に長方形に囲まれた多角形の「地」も角でつながっている。そこで図と地を反転させ、図の長方形を穴とし、地の多角形を剛体とすると、1自由度で全体が $1/\sqrt{2}$ 倍に収縮する機構になる<sup>[2]</sup>(図2)。この機構をセル材料とみなすと、x方向に圧縮するとy方向にも縮まる性質がある。通常材料はx方向に圧縮するとy方向には伸びるためこの機構は特異であり、ポアソン比が負(オーゼティック)のメタマテリアルとみなせる。

## 2. コンセプト

菱形の並べ替えによる多種多様な機構のデザインが可能(図3)な一方で、形状がバラバラの剛体や、遊びの小さいヒンジ等の製造方法が課題となる。そこで本作品では、柔らかいTPUを用いた3Dプリントにより、材料の弾性変形を活用するコンプライアントメカニズムとして機構を一体造形している(図1)。手のひらで握ると収縮し、手を開くと元の状態に戻る。全体が一様に収縮するため、手の形に合ったまま押しつぶせる。剛性の設計次第で、玩具やハンドグリップとしての応用が考えられる。

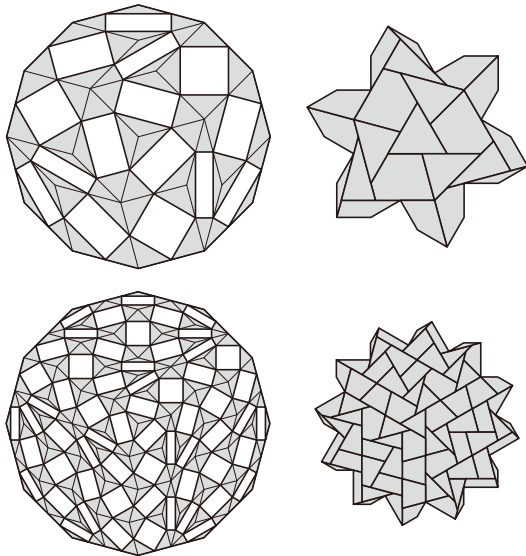


図3 デザインバリエーションの例。

## 3. ヒンジの設計と剛性の制御

機構の展開時の直径を $D$ とし、収縮量を $\delta$ とする。ヒンジの回転角 $\theta$ に対し、機構の収縮率

$$\frac{D - \delta}{D} = \cos \frac{\theta}{2} \quad (1)$$

が成り立つ<sup>[2]</sup>。直径の両端から中心方向に外力 $P$ で押しつぶすとき、仮想仕事法より $Pd\delta = jM d\theta = jk\theta d\theta$ ,

$$P = jk\theta \frac{d\theta}{d\delta}. \quad (2)$$

ここに、 $j$ はヒンジの個数、 $M = k\theta$ は曲げモーメント、 $k$ はばね剛性である。(1)式を $\theta$ で微分すると

$$\frac{d\theta}{d\delta} = \frac{2 \csc \frac{\theta}{2}}{D} \quad (3)$$

が得られ、(2)、(3)式より

$$P = \frac{2jk\theta \csc \frac{\theta}{2}}{D} \quad (4)$$

が成り立つ。したがって、外力はヒンジの個数とばね剛性に比例する。たとえば、菱形の辺の長さを半分になるとヒンジの数が増加し(図3)、比例して外力も増加する。

本作品ではヒンジのばね剛性を制御するため、厚さ各1mmの上下層(A)と、厚さ8mmの中間層(B)による3層構造を採用する(図4)。A層では、長方形の穴の角をR1mmでフィレットし、外周の正12角形を0.5mm外側にオフセットすることで、剛体間にヒンジを残す。一方、B層では剛体同士がピン角でつながった状態であり、ヒンジとして曲がる材料は存在しない。B層は、実際の出力ではノズル幅の影響により角の間に小さな隙間が生じるため、上のA層のプリントではこの隙間をブリッジさせている。A層のみで厚さ10mmとする場合と比較するとヒンジ幅が0.2倍となり、断面二次モーメント、ばね剛性が比例し0.2倍となる。式(4)より外力も0.2倍となることが予測できる。

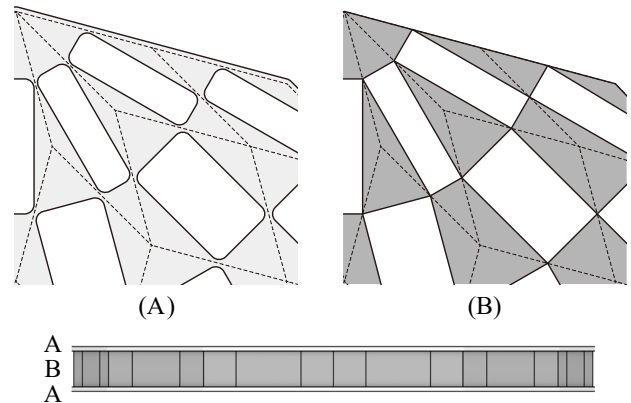


図4 モデルの3層構造。A層にのみヒンジが存在する。

## 4. 制作関係データ

モデリングソフト: Rhino/Grasshopper

出力機器: Qidi X-Pro

フィラメント: PolyFlex TPU95-HF

## 参考文献

- [1] Hamanaka, H., Horiyama, T. and Uehara, R., "On the enumeration of chequered tilings in polygons", Bridges (2017).
- [2] Warisaya, K., Hamanaka, H., Tokolo, A. and Tachi, T., "Auxetic structures based on rhombic tiling." Proc. ASME IDETC/CIE (2021).

## 著者紹介

わりさや かなた : 東京大学大学院工学系研究科

ところ あさお : TOKOLOCOM

たち ともひろ : 東京大学大学院総合文化研究科,

〒153-8902 東京都目黒区駒場3-8-1,

tachi@idea.c.u-tokyo.ac.jp