

# 任意の場所とタイミングで 自律構造形成するトリガー技術開発

芝浦工業大学 工学部  
電気工学科 准教授  
動的機能デバイス研究室 主宰  
重宗 宏毅  
2023年9月21日

# 新技術の概要

新技術説明会  
New Technology Presentation Meetings!

## 紙を自律構造形成する技術により 折紙デバイスの利活用を目指す研究開発

力学的に**双安定機構**を構成するため所望のトリガー刺激に応じて**折紙構造と平坦構造を移行**

トリガー刺激の例

- ・外力、熱、反応、湿度 など

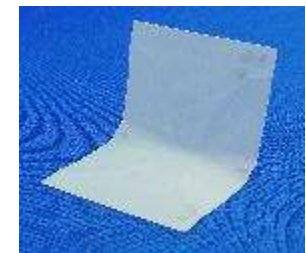


折紙スマート緩衝材



平坦形状

↔  
可逆変形

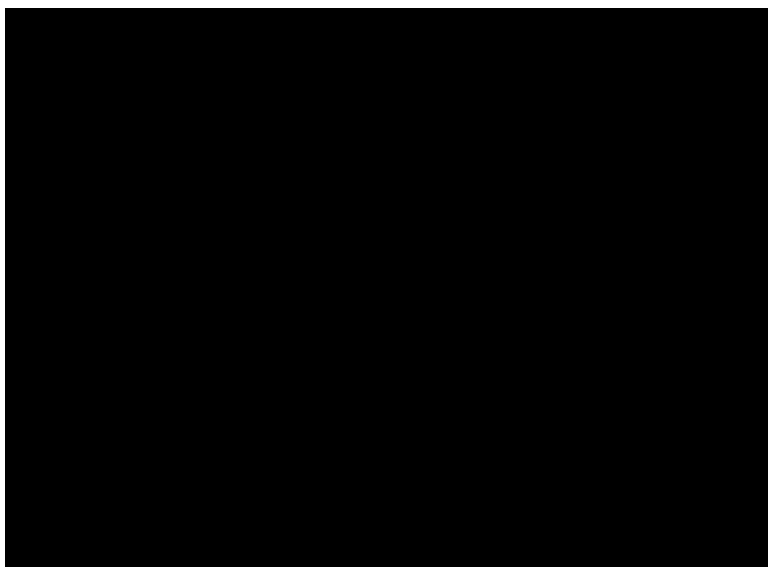


折紙形状

表裏の折目の違いによって  
**双安定機構**を形成

# 従来技術・競合技術との比較

3次元折紙構造を自律的に構成する手法は、“Self-folding”と呼ばれ様々な材料をベースに提案されている。従来は、電流を流したりオーブンに入れたりなど、折り曲がりを誘発するために外部から特定のエネルギー供給が必要になる。我々の提案する手法は双安定機構を応用することで、多様なトリガーにて折紙構造を自動形成できる。



Y. Liu et al. Soft matter, 2012.



S. Felton et al. Science, 2014.

# 新技術の特長

## ✓ 折紙構造

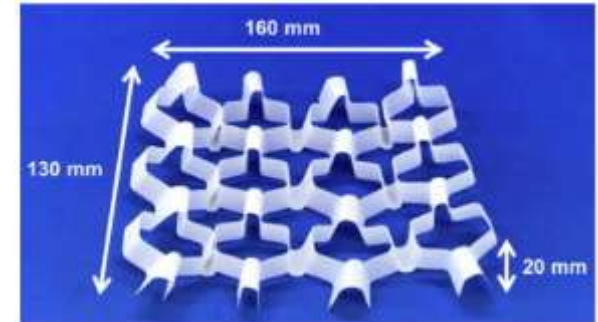
新技術説明会  
New Technology Presentation Meetings!



波型の断面二次モーメント

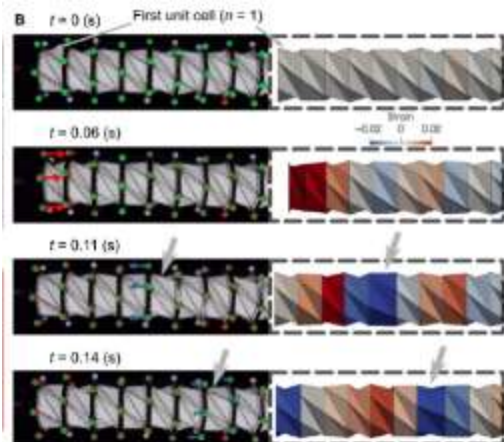
$$I = \frac{f^2 h}{2} \left[ 1 - \frac{0.81}{1 + 2.5 \left( \frac{f}{2l} \right)^2} \right]$$

S. Timoshenko, 弾性体理論, 1956.



H. Shigemune et al., Materials and Design, 2022.

## 強度向上 (波状パネル、ハニカム構造)



H. Yasuda et al., Science Advances, 2019.

## 緩衝機能

### In-plane Poisson's ratio of buckling-induced kirigami

In contrast to the Miura-ori and the misaligned Miura-ori, the in-plane Poisson's ratio of buckling-induced kirigami sheets is positive.



HARVARD  
John A. Paulson  
School of Engineering  
and Applied Sciences

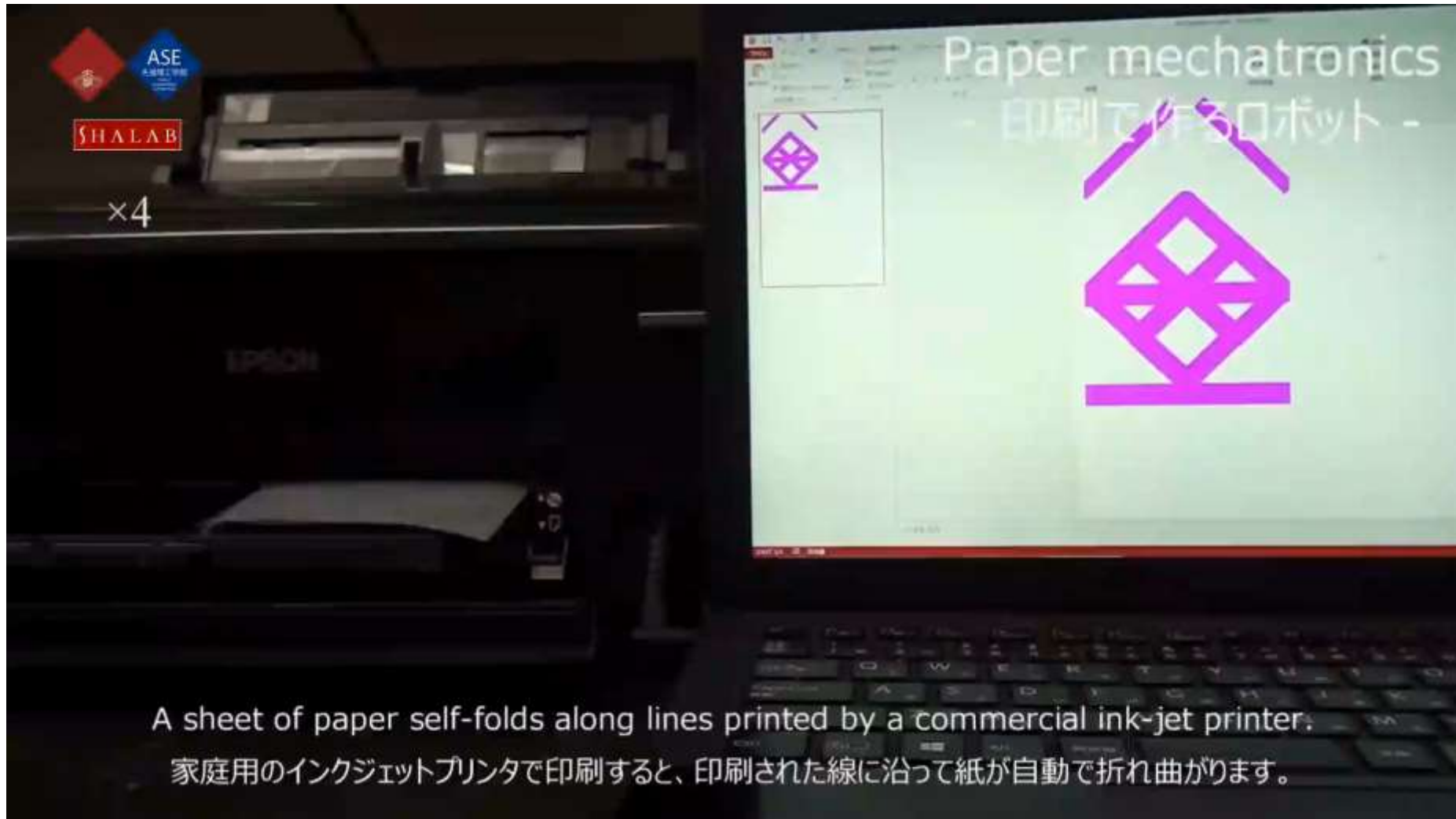
Rafsanjani, Ahmad, et al. Buckling-induced kirigami, Physical review letters

## 伸縮・展開機能

# 新技術の特長

## ✓ 紙の自律構造形成

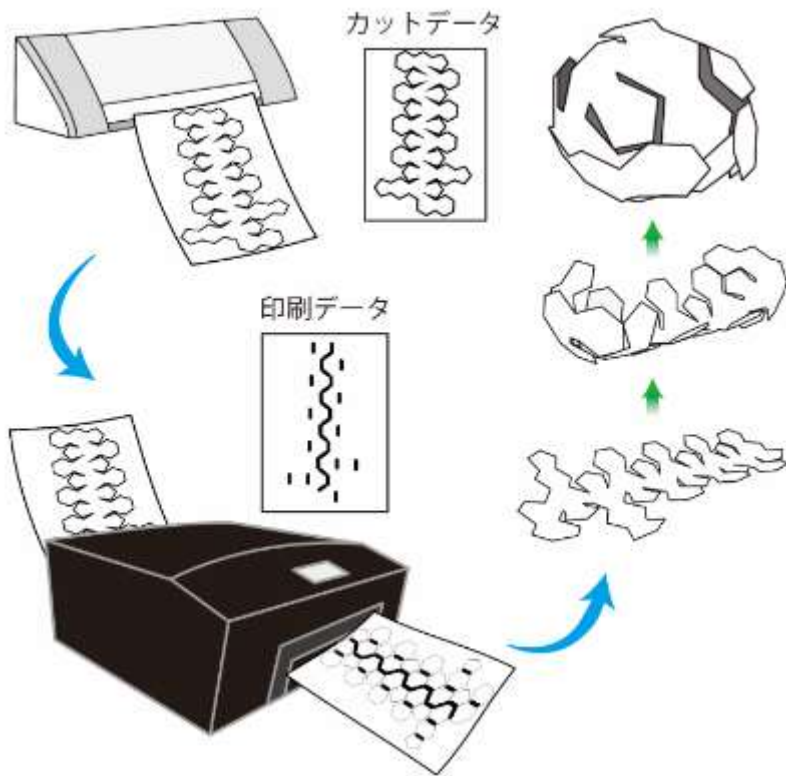
新技術説明会  
New Technology Presentation Meetings!





# 新技術の特長

## ✓ 紙の自律構造形成



## 自律構造形成の様子



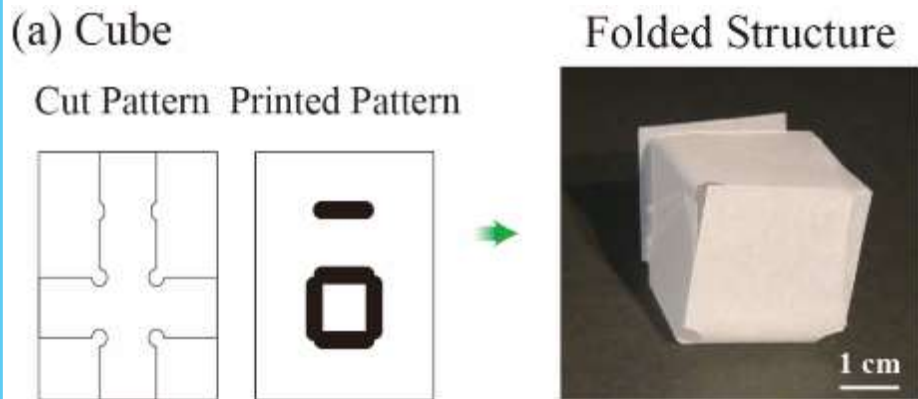
紙のサイズ：297×210 mm

- 印刷した線に沿って曲がる
- 切断した紙にも適応可能

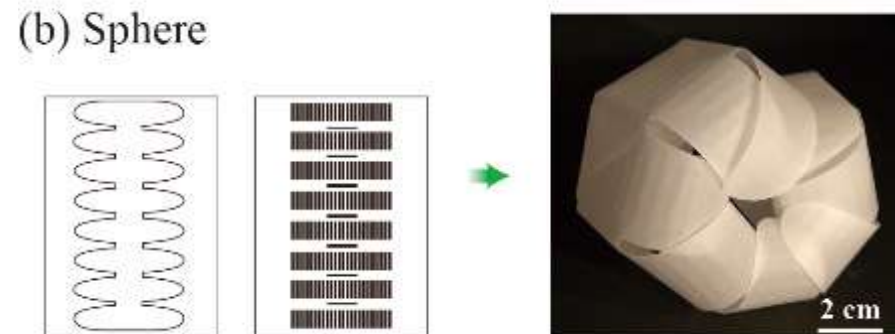
印刷直後に人の手を借りず  
自律的に構造形成

# 新技術の特長

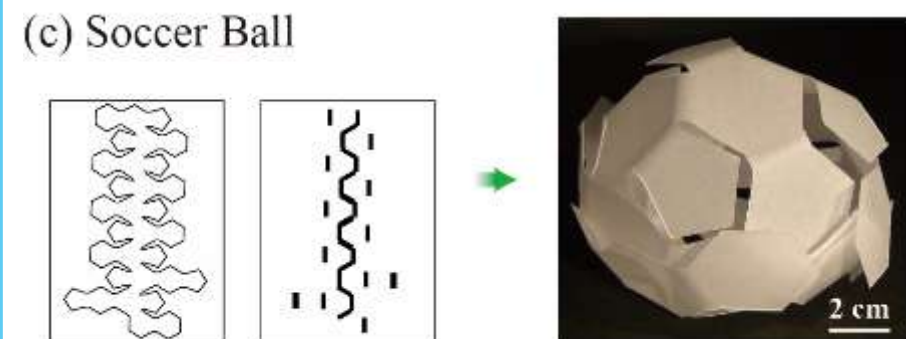
## ✓ 作製構造例



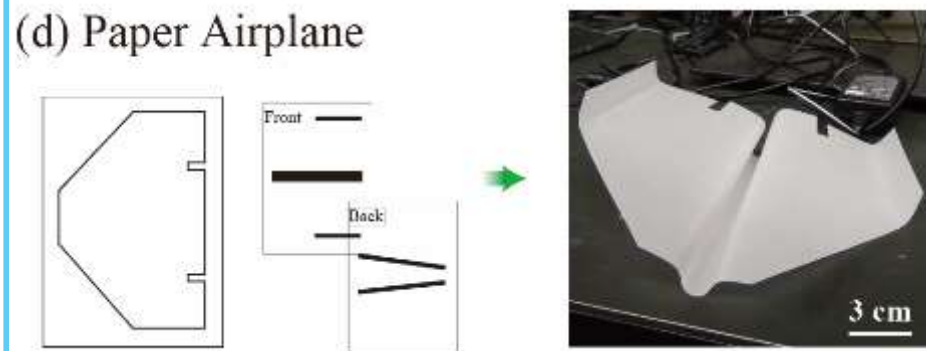
線の太さで角度を制御



曲面形状



多数の折り目



両面印刷

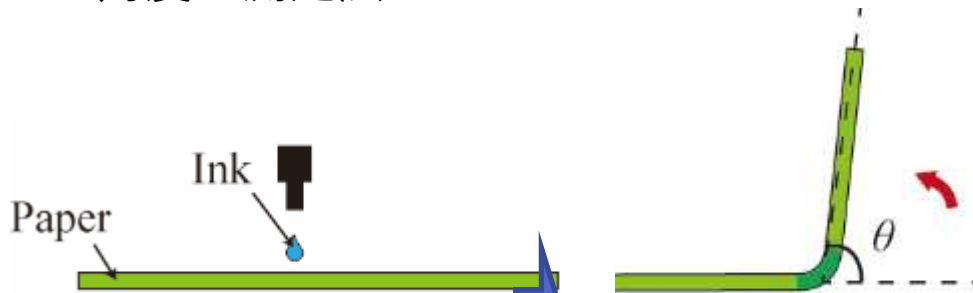
# 新技術の特長

## ✓ 線幅による折り曲がり角度の制御

### ➤ 制御パラメータ

- ✓ 印刷線幅
- ✓ 紙の厚さ
- ✓ 湿度
- ✓ 紙目
- ✓ 印刷量

### ➤ 角度の測定法

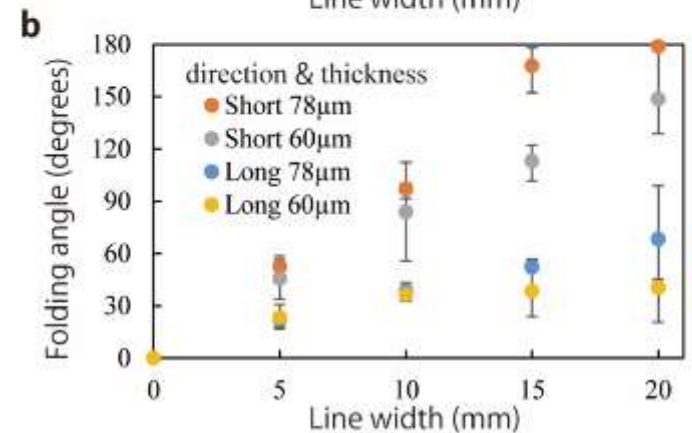
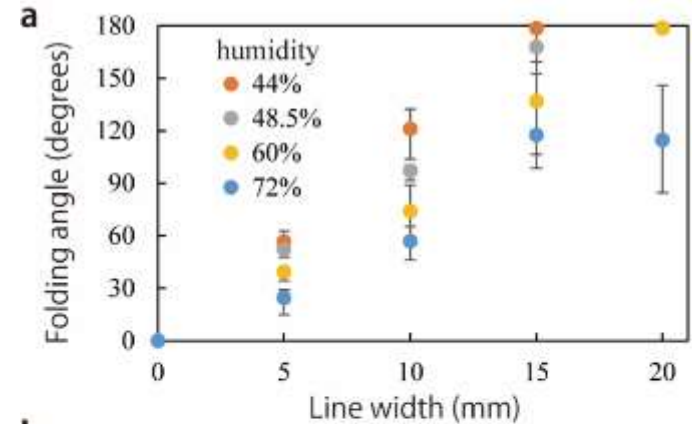


解析手法

画像解析ソフトを用いて

上図の角度を3回測定し平均

### ➤ 結果



- ⇒ 様々な厚さの紙を変形可能
- ⇒ 角度と線幅に線形の関係



# 新技術の特長

## ✓ トリガー構造メカニズム

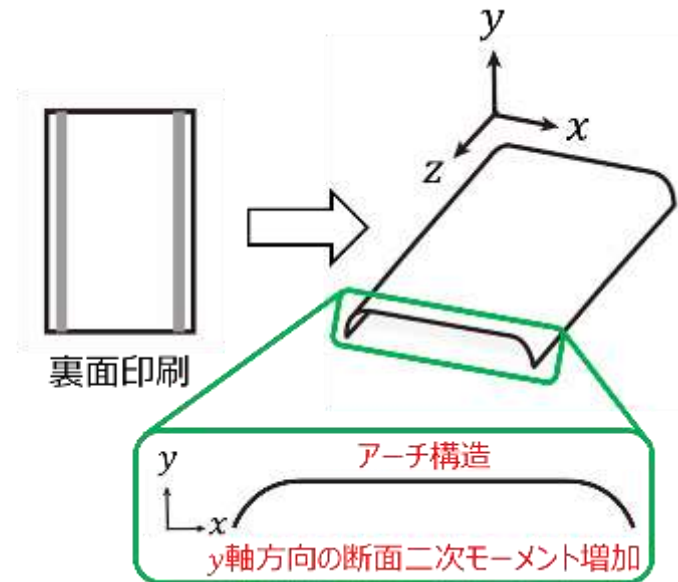
紙の自律構造形成の課題

印刷直後から  
紙の折れ曲がりが始まる



折り畳みを**阻害**する構造を  
裏面から作製

アーチ状の構造により  
折り畳み方向への  
断面二次モーメントを増加



# 新技術の特長

## ✓ トリガー解除メカニズム

新技術説明会  
New Technology Presentation Meetings!

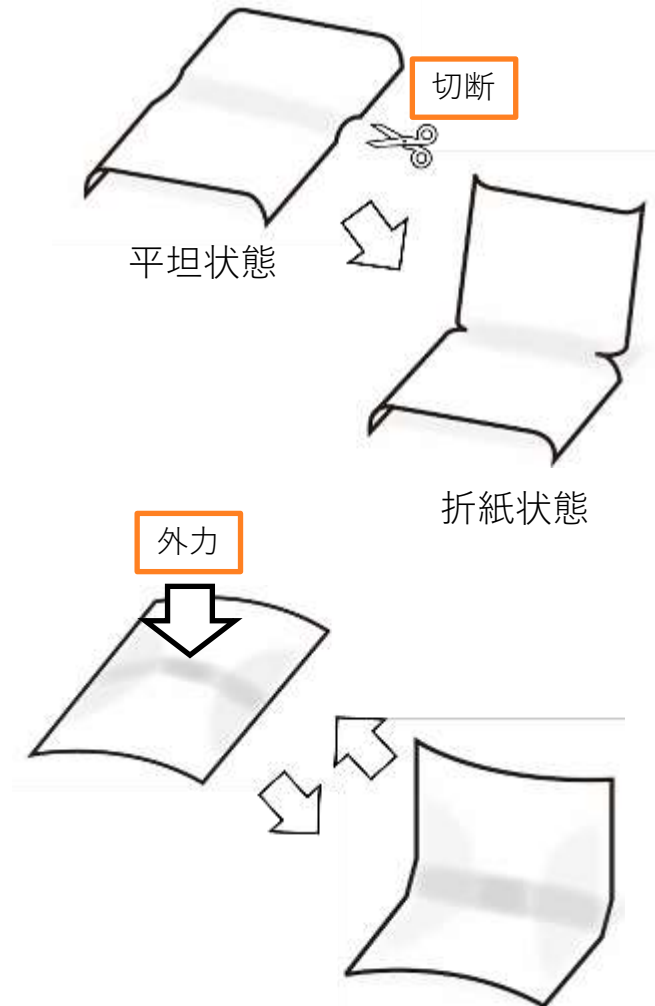
外力によりアーチ構造を**崩す**  
(切断・外力など)



アーチによる**断面二次モーメント**が低下



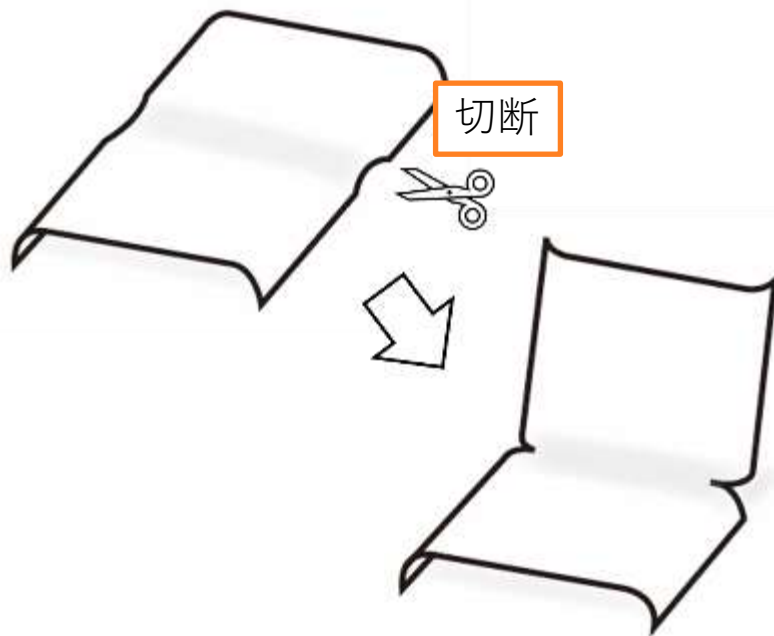
**折り曲げ**が発生



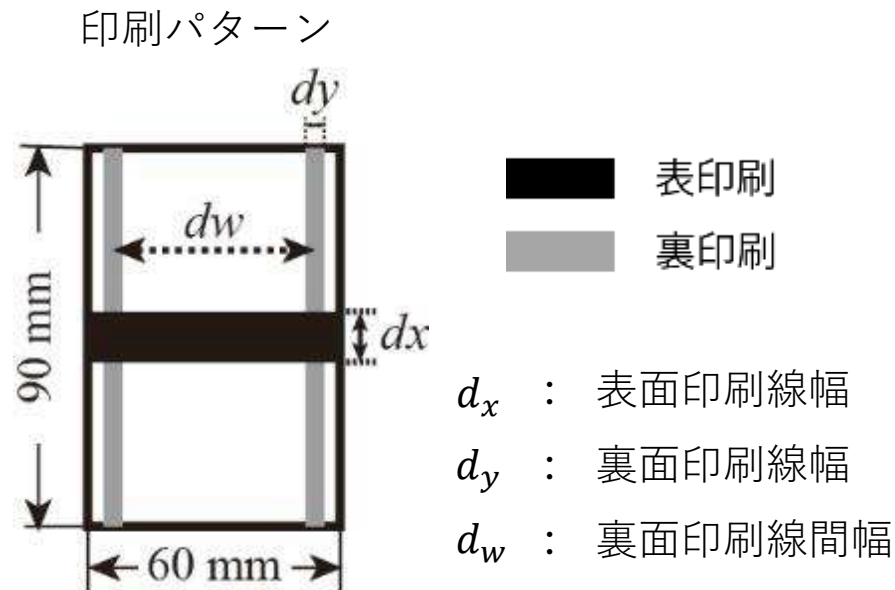
# 新技術の特長

## ✓ 不可逆的トリガー

新技術説明会  
New Technology Presentation Meetings!



折り曲げを阻害するアーチを  
**切断**することによって  
折り曲げを発生



表印刷

紙を折り曲げるための印刷線

裏印刷

折り曲げを阻害するアーチのための印刷線

線幅によって

折り曲げ角度、アーチの阻害力が変化

# 新技術の特長

## ✓ 不可逆的トリガー

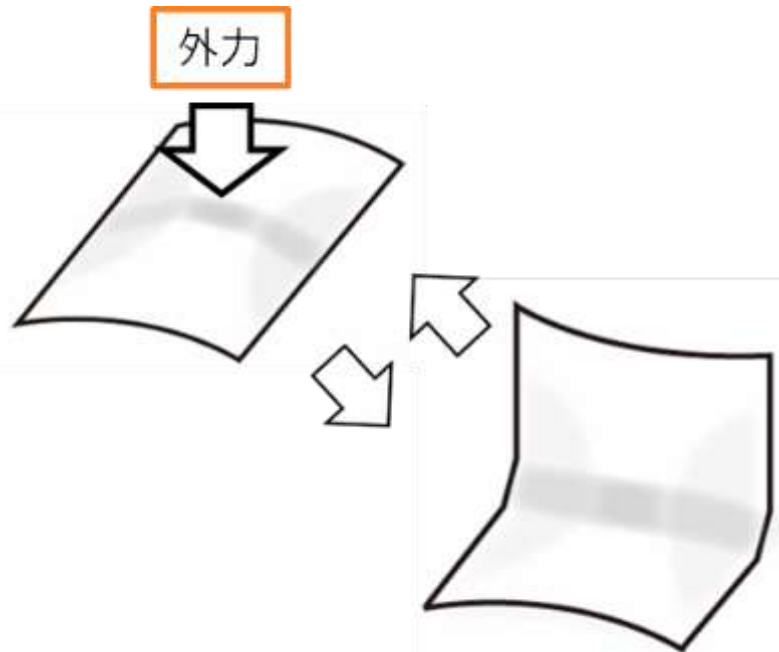
新技術説明会  
New Technology Presentation Meetings!



# 新技術の特長

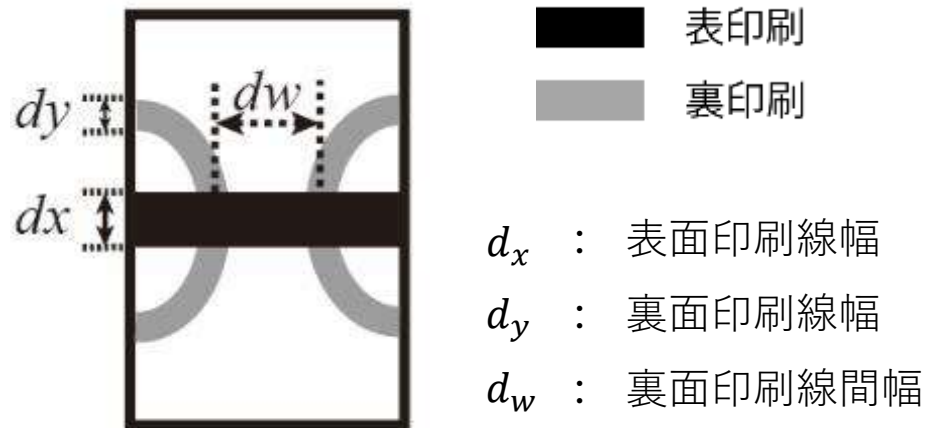
## ✓ 可逆的トリガー

新技術説明会  
New Technology Presentation Meetings!



折り曲げを阻害するアーチを  
**外力によって平坦化**することによって折り曲げを発生

印刷パターン



### 表印刷

紙を折り曲げるための印刷線

### 裏印刷

折り曲げを阻害するアーチのための印刷線

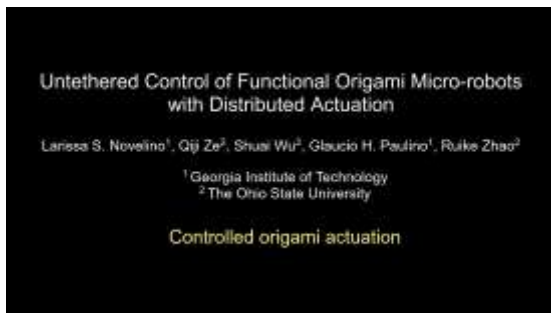
線幅によって

**折り曲げ角度、アーチの阻害力**が変化

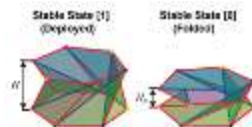


# 新技術の特長

## ✓ 双安定機構



Novelino, Larissa S, et al, PNAS, 2020



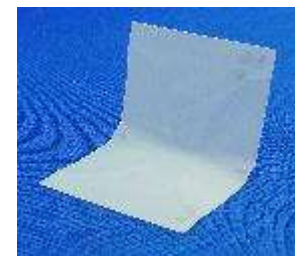
## ✓ 提案手法

新技術説明会  
New Technology Presentation Meetings!



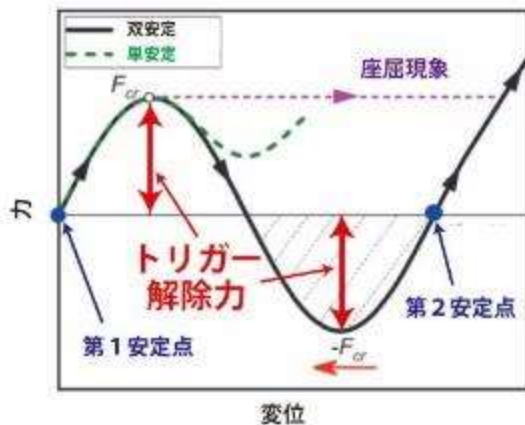
平坦形状

⇔  
可逆変形



折紙形状

表裏の折目の違いによって  
**双安定機構**を形成



二つの状態のいずれかを取り続けることができる

折目のみで設計された双安定機構

⇒ 可逆的な変形が可能

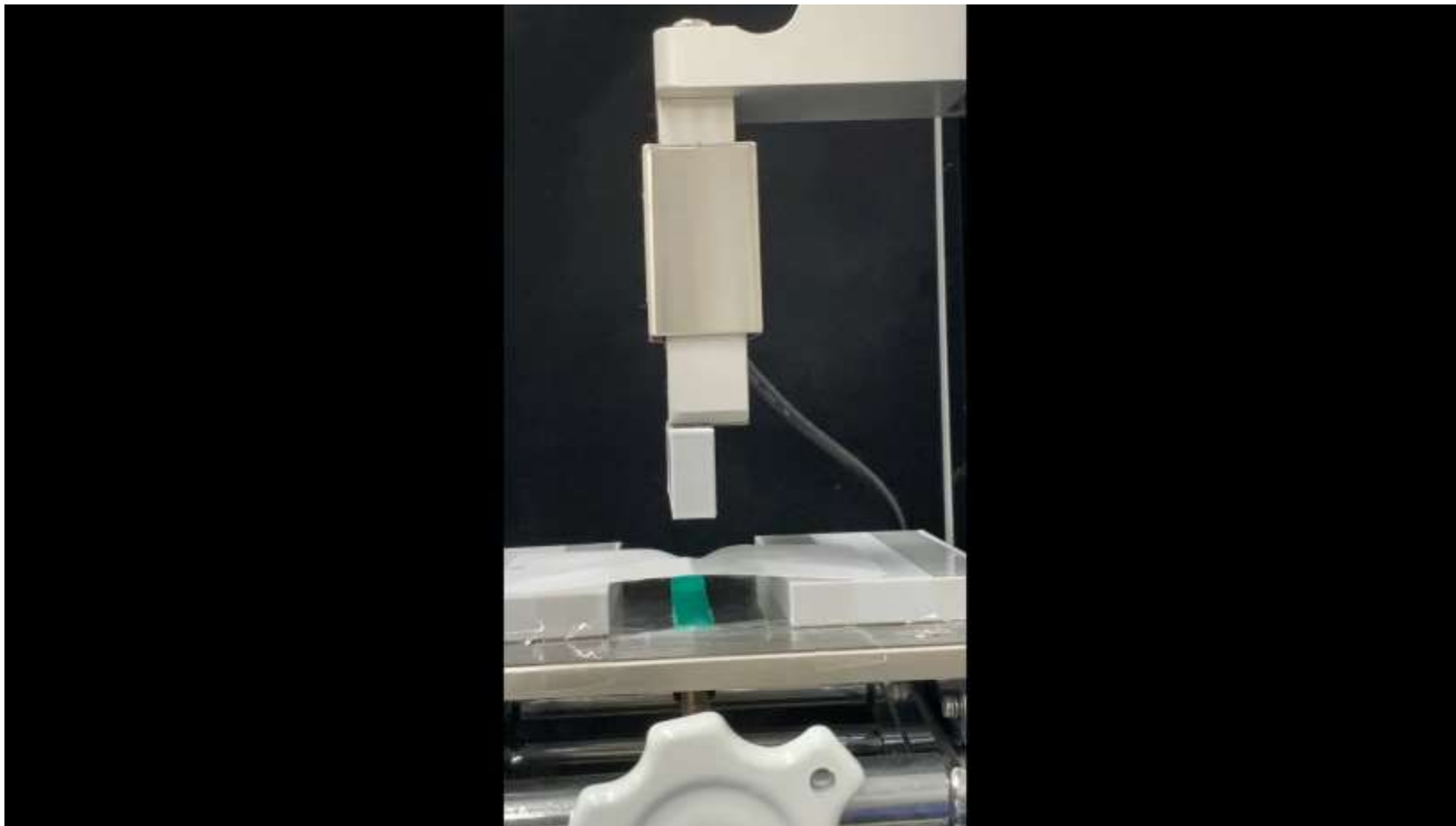
⇒ 輸送時：平坦形状  
使用時：折紙形状

**使用性向上、輸送コスト低減**

# 新技術の特長

## ✓ 可逆的トリガー

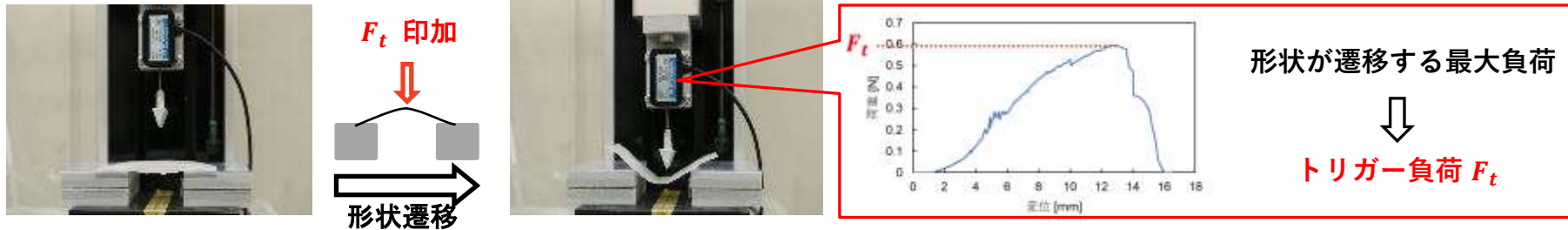
新技術説明会  
New Technology Presentation Meetings!



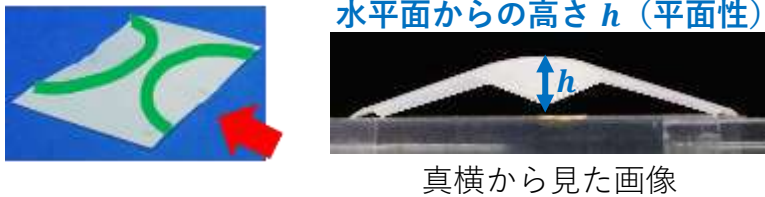
# 新技術の特長

## ✓ トリガーの力学的特性

### ➤ トリガー負荷 $F_t$



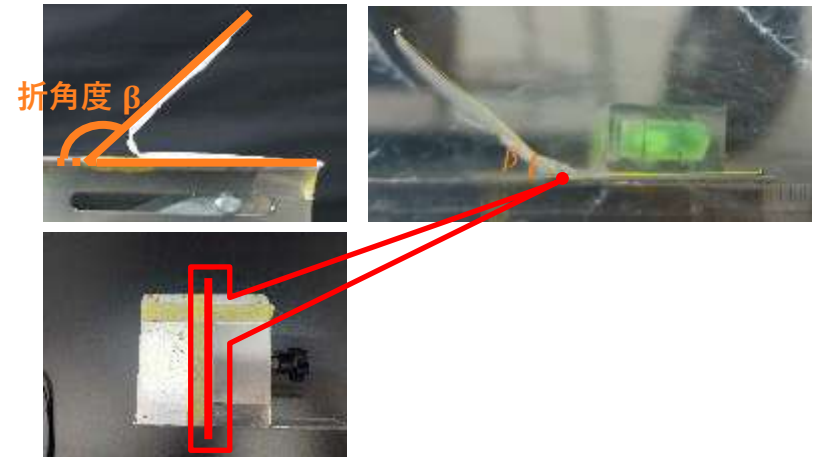
### ➤ 平面性



$h$  の測定により平面性を定量化

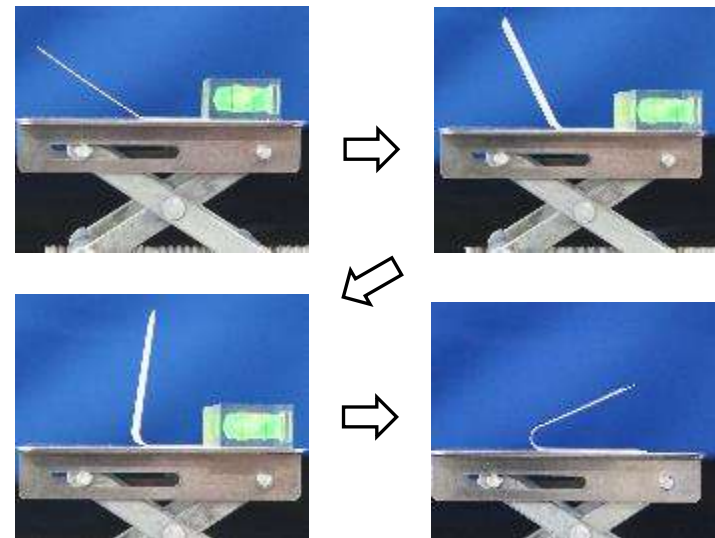
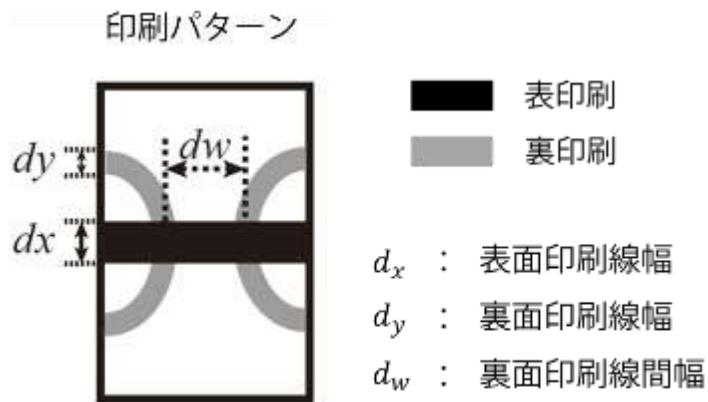
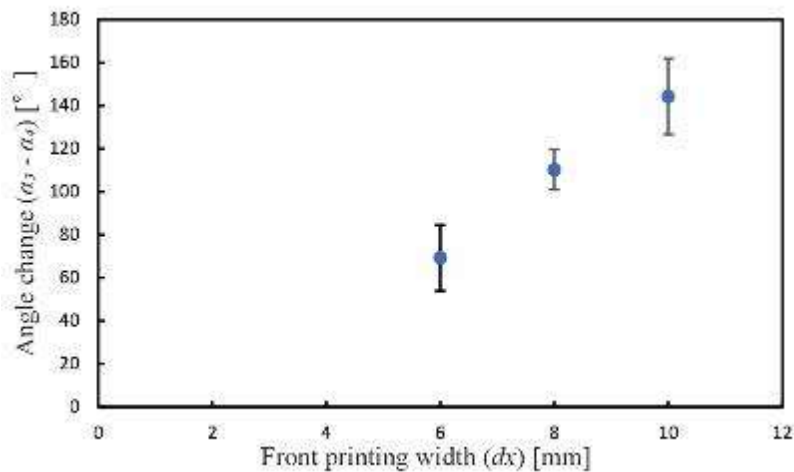
$h$ 大 : 平面性低     $h$ 小 : 平面性高

### ➤ 折角度 $\beta$ の定義



# 新技術の特長

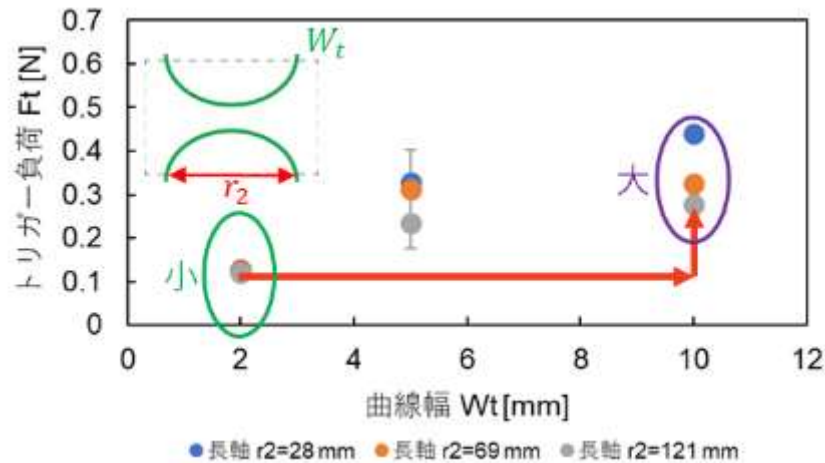
## ✓ 折角度制御



- 表面印刷線幅によって  
折角度の制御が可能
- 表面印刷線幅と折角度の間に線形関係  
⇒ 直感的な設計

# 新技術の特長

## ✓ トリガー力



### トリガー負荷小

変形しやすい

⇒ 微小な外部エネルギーによる非接触動作がしやすい  
(熱や風)

### トリガー負荷大

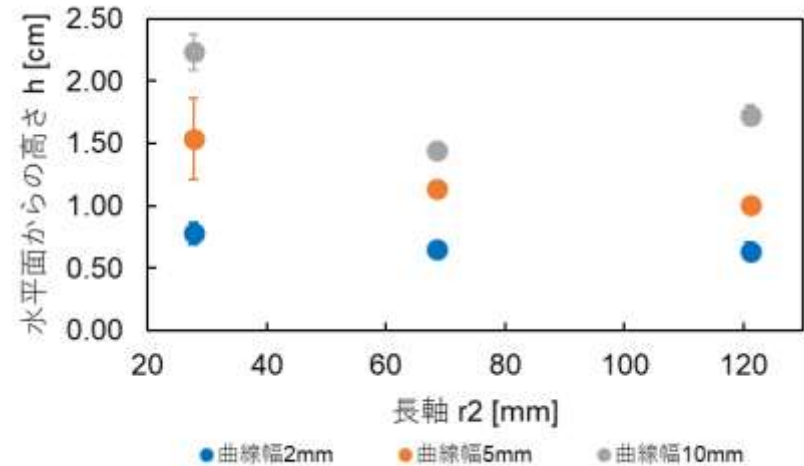
変形しにくい

⇒ 外的負荷が大きい環境でも形状を維持しやすい

用途に合わせて  $F_t$  を調整可能

## ✓ 平坦性

新技術説明会  
New Technology Presentation Meetings!



曲線幅 2 mm

曲線幅 5 mm

曲線幅 10 mm



水平面からの高さ  $h$  (平面性)



真横から見た画像

$W_t$  を小さくすることで平坦化



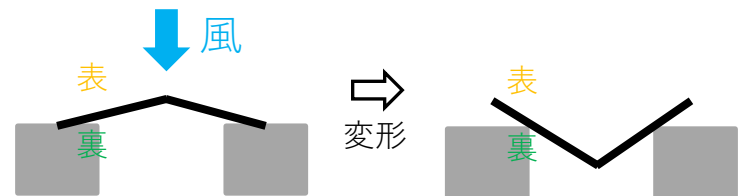
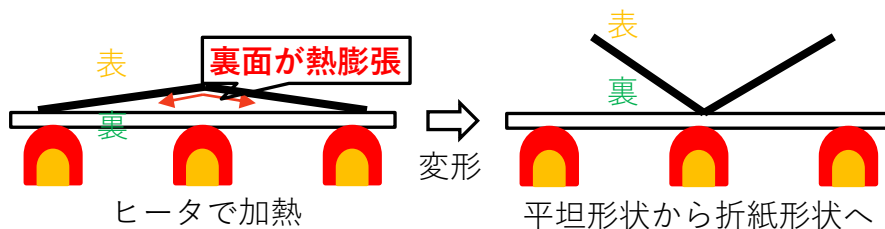
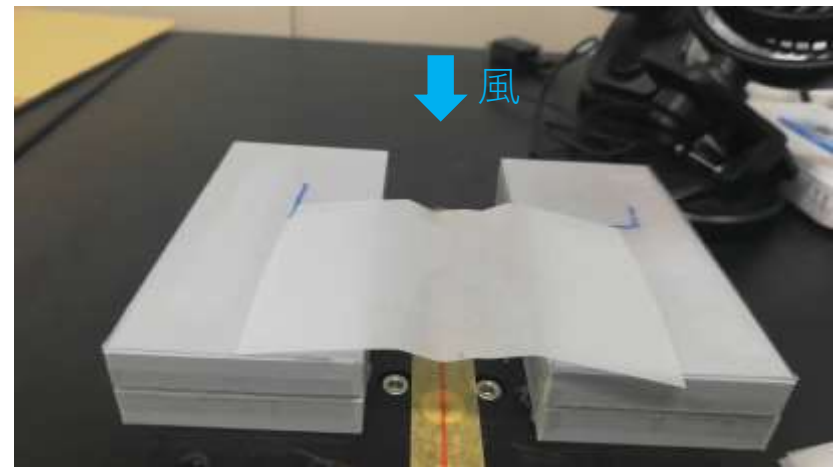
# 新技術の特長

## ✓ トリガー種

新技術説明会  
New Technology Presentation Meetings!

熱をトリガーとした  
非接触動作の実現

風をトリガーとした  
非接触動作の実現



# 新技術の特長

## ✓ トリガー応用例

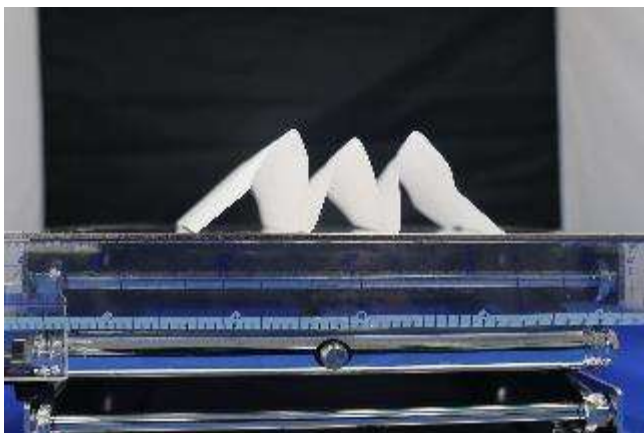
新技術説明会  
New Technology Presentation Meetings!



⇒  
平坦化



ハニカム構造



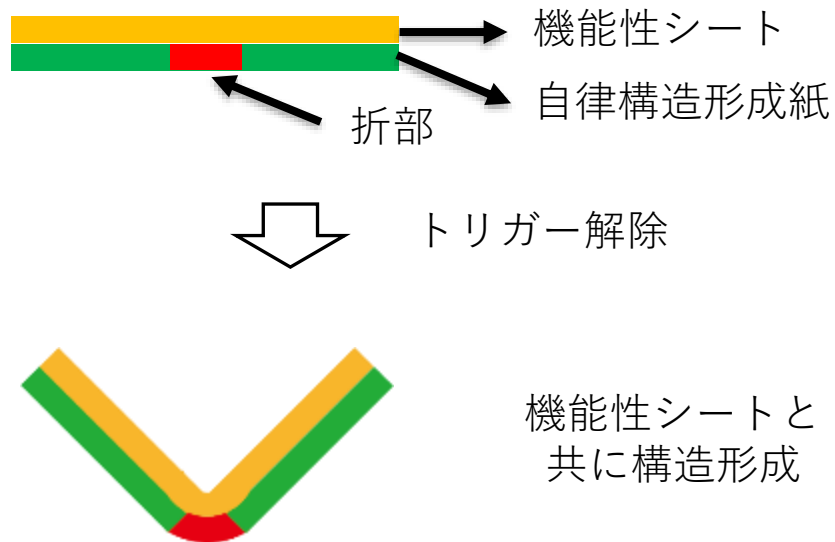
⇒  
平坦化



波状構造

# 複合層

その他機能性シートと複合層を  
構成することで**高機能化**



- 3層以上の**多層化**
- **両面実装** も可能

## ➤ 機能性シート例

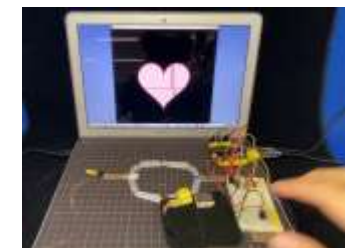
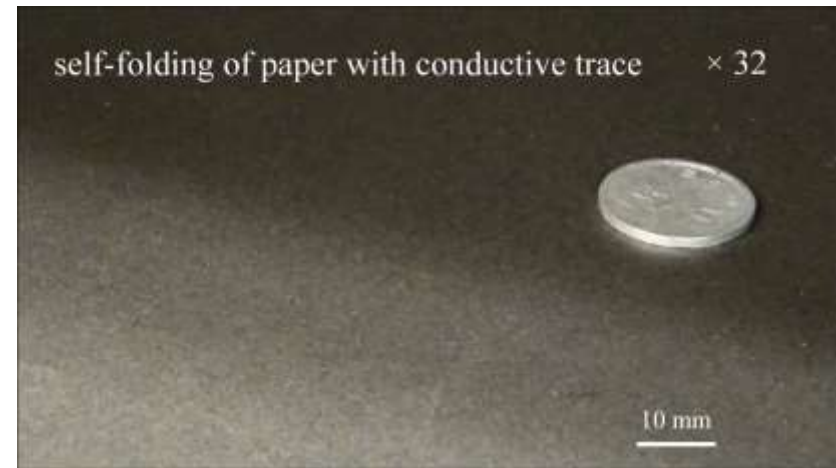
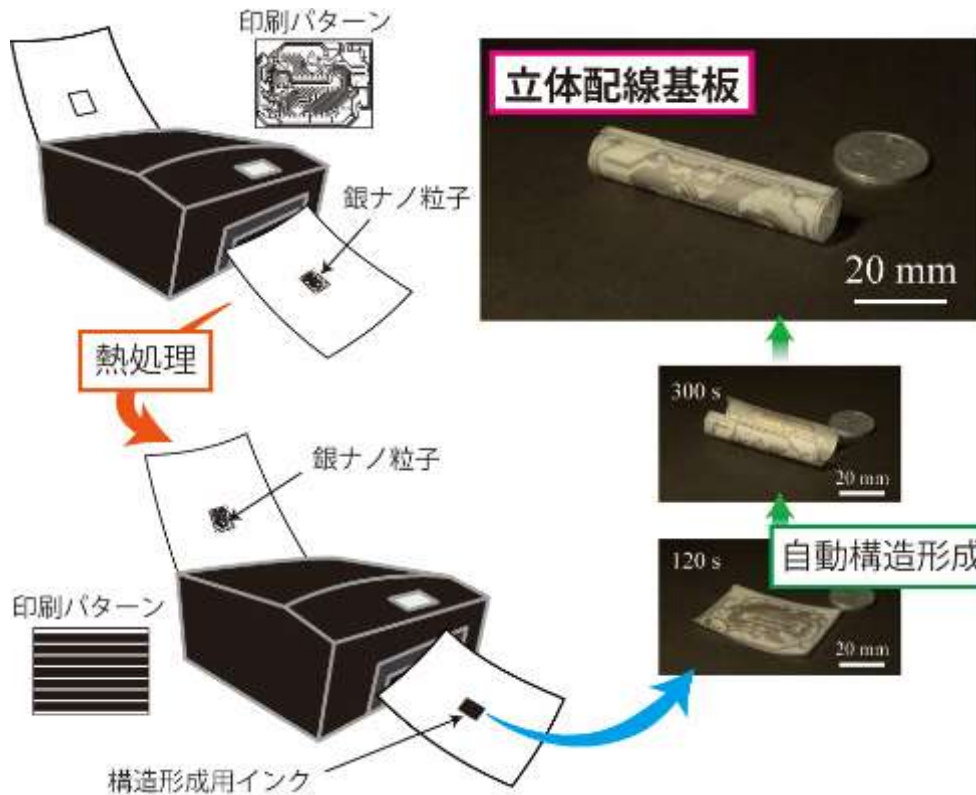
- ✓ フィルム（耐水・耐湿・保護層）
- ✓ スプレーのり（粘着層）
- ✓ 多孔質材料（断熱層）
- ✓ 導電性薄膜（回路層）
- ✓ 電子部品（部品層）

その他、用途に依る

- 構造の防水化、電子化などに寄与
- 構造形成性能は大きく変化しないことを確認済

# 新技術の特長

## ✓ 導電性薄膜・電子部品との複合層



導電性薄膜を持つ紙を自律構造形成

⇒ **センサ・デバイス・アクチュエータ**への応用

# 新技術の特長

- ✓ ばね的力学特性 ⇒ ストレッチャビリティ



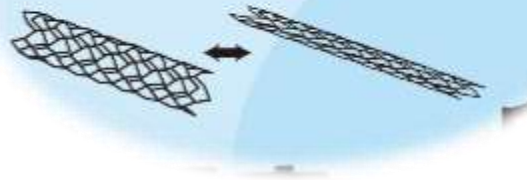


# 想定される用途

- 輸送時の落下衝撃から物品を守り、かつ  
輸送状態（温湿度・衝撃など）を収集可能なスマート緩衝材・包装材
- ストレッチャブル、低コスト、使い捨て性を活かした  
ヘルスマモニタリング向け医療・介護デバイス
- 表面凹凸の加工を必要とする用途



Point of Care (PoC)



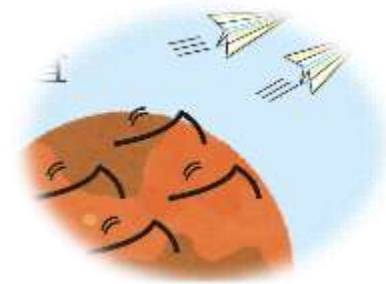
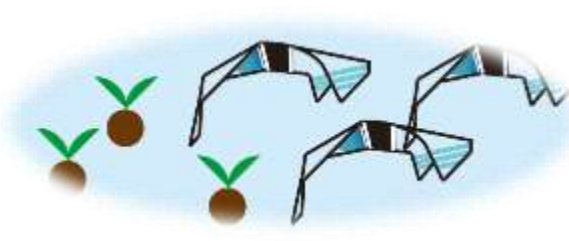
身体情報計測



# 企業への期待

新技術説明会  
New Technology Presentation Meetings!

- 農地、病院、宇宙などの実地ラインへの投入
- 製造ラインの開発などビジネス化に向けた大量生産手法の検討
  - 溶液の大量生成法
  - インクジェット以外の印刷法の導入
- プリンタヘッドのパラメータ最適化も含めた立体配線基板作製用独自プリンタの開発
- 紙の分析、自律構造形成シートの開発
- その他用途の提案、相談



# 本技術に関する知的財産権

- 発明の名称：紙含有構造体および紙含有構造体の製造方法
- 出願番号：特願2022-166403
- 出願人： 芝浦工業大学
- 発明者： 重宗 宏毅  
川岸 大己  
岡本 修汰

# お問い合わせ先

新技術説明会  
New Technology Presentation Meetings!

**芝浦工業大学 研究推進室研究企画課**

**TEL 03-5859-7180**

**FAX 03-5859-7181**

**e-mail [sangaku@ow.shibaura-it.ac.jp](mailto:sangaku@ow.shibaura-it.ac.jp)**