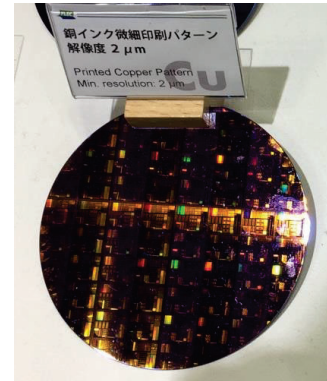


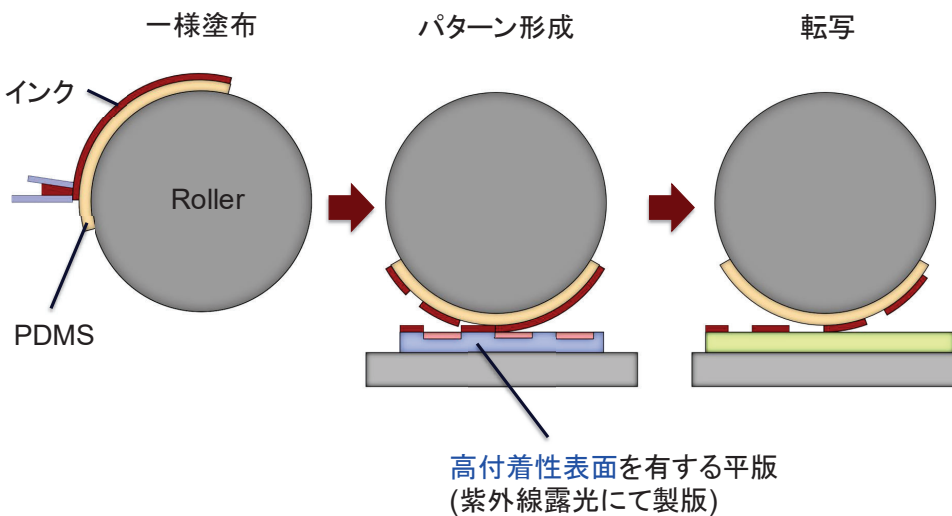
# アディティブに線幅 $2\mu\text{m}$ を実現する高精度配線印刷技術

産業技術総合研究所  
センシングシステム研究センター  
日下 靖之

y-kusaka@aist.go.jp



## 付着カコントラスト印刷

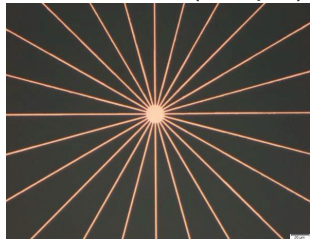


# 付着カコントラスト印刷例(Cuナノインク)

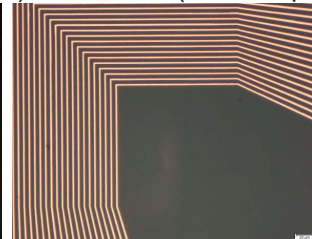
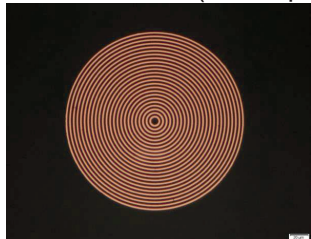
Cu印刷サンプル



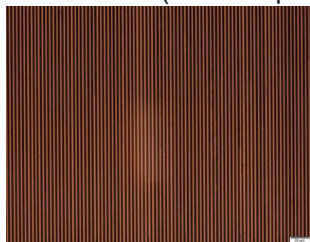
放射パターン(L=2 μm)



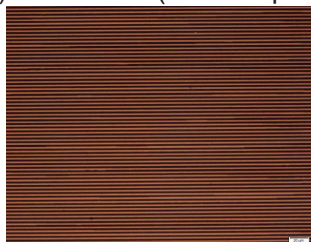
同心円パターン(L/S=2 μm) 直角パターン(L/S=2/4 μm)



MDパターン(L/S=2/2 μm)



TDパターン(L/S=2/2 μm)



TDパターン(L/S=10/2 μm)

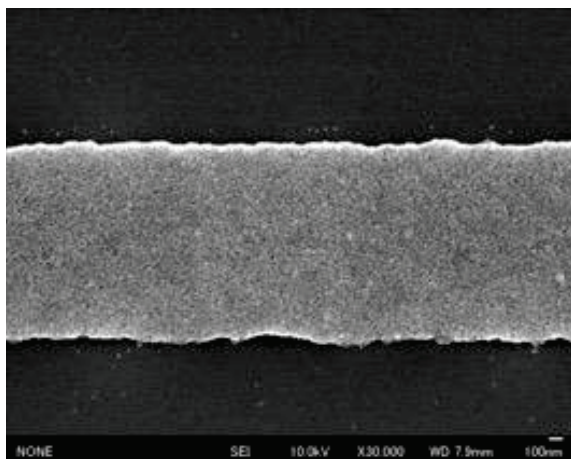


パターン形状に依存せず、線幅2μmのパターン形成が可能

# 印刷配線パターンの形状について

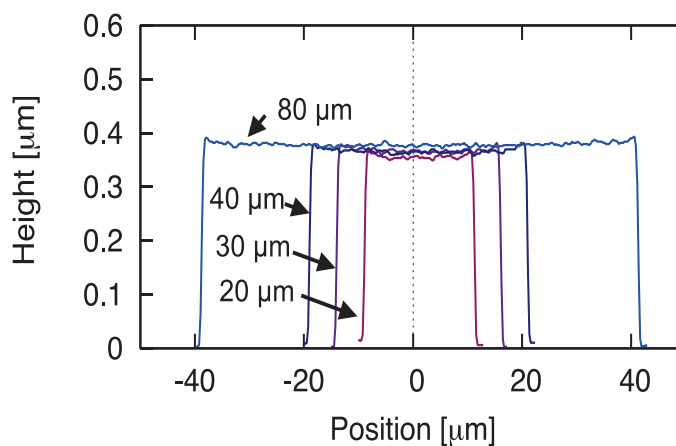
## 配線のラインエッジラフネス

他の印刷工法と比べて、シャープなエッジ



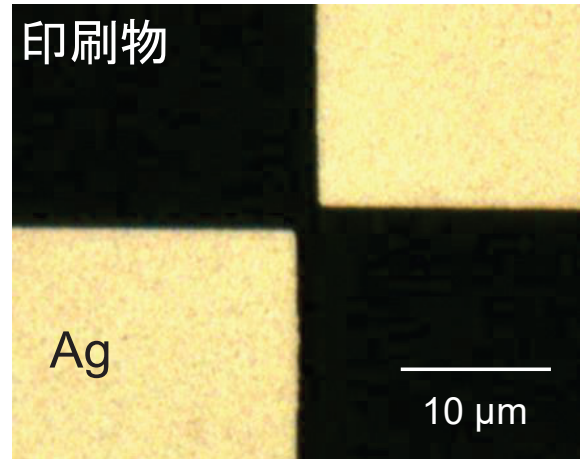
## 配線断面プロファイル

パターン形状によらず、均一厚み、矩形断面形状



# 印刷パターンの形状インテグリティ

マスターパターンを忠実に反映した構造形成が可能



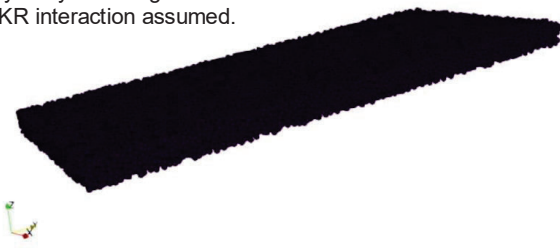
2μmギャップのマスターパターンを忠実に再現

# 離散要素法によるシミュレーション

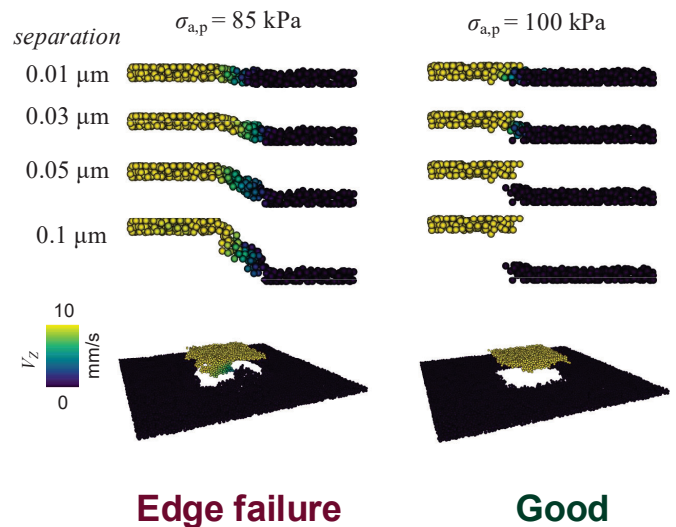
付着力コントラスト印刷を粒子薄膜の破壊を伴う転写プロセスとみなしてモデリング

## Simplified simulation:

- Brownian motion ignored.
- Hydrodynamics ignored.
- JKR interaction assumed.



インク膜物性とパターン品質の  
定性的な依存関係を解明



(2019) Y. Kusaka, A. Takei, T. Fukasawa, T. Ishigami, N. Fukuda, "Mechanisms of Adhesive Micropatterning of Functional Colloid Thin Layers", *ACS Applied Materials & Interfaces* 11 40602-40612 [10.1021/acsami.9b13467](https://doi.org/10.1021/acsami.9b13467)

# 付着カコントラスト印刷例(Cuめっき配線)

## めっきシード層印刷パターンニング

めっきシード層印刷後に、無電解Cuめっきを施すことでフルアディティブ配線形成。グリーン化・厚膜化・低抵抗化・低温プロセス化が可能。

### STEP1

無電解シード層印刷



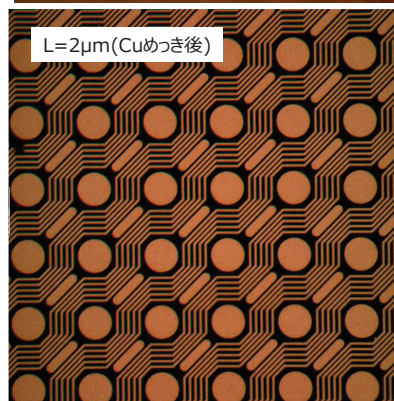
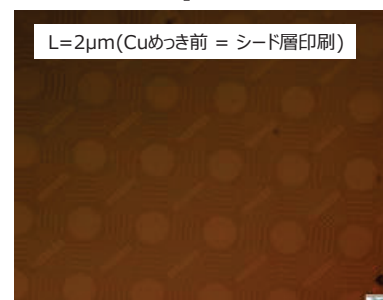
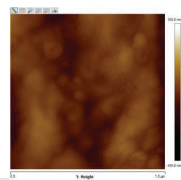
### STEP2

無電解Cuめっき



(現状、最大膜厚は500~2000nm)

表面粗さ : 8.9nm



# 付着カコントラスト印刷例(レジスト印刷)

## レジスト印刷パターンニング(SiO<sub>2</sub>エッチング)

レジストの直接印刷により、エッチングレジストのフォトリソ工程を省略。

### STEP1

SiO<sub>2</sub>成膜



### STEP2

レジスト印刷



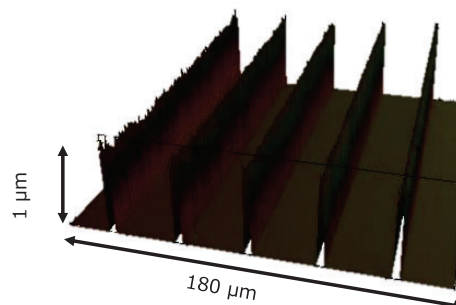
### STEP3

ドライエッチング



レジストパターンニング・SiO<sub>2</sub>エッチング後の表面構造

3μm線幅



SiO<sub>2</sub>に対してドライエッチングレート比100以上のレジスト印刷膜の開発に成功

# 付着カコントラスト印刷例(遮光膜印刷)

## 遮光膜パターンニング(フォトマスクの直接印刷)

遮光膜の直接印刷と全面一括露光による有機系絶縁膜パターンニング。

STEP1  
レジスト塗布



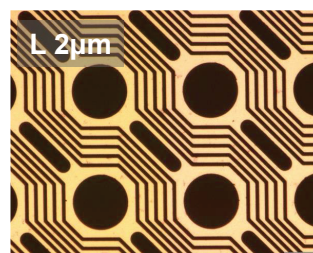
STEP2  
遮光膜印刷



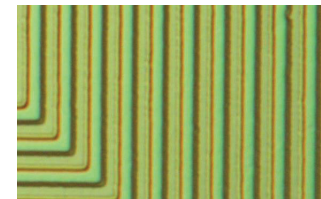
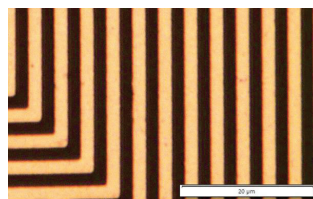
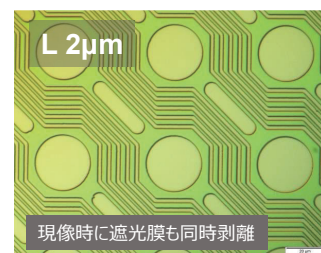
STEP3  
露光・現像



露光前(遮光膜印刷)



露光現像後

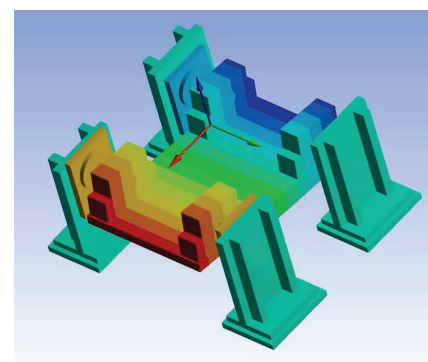
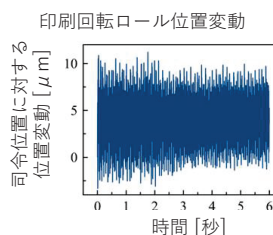


OD=2以上の印刷遮光膜によりポジ型感光性有機絶縁膜のL/S = 2/2μm形成に成功

# 高精度印刷装置の開発

## 課題

- 通常のロール転写印刷は回転速度変動に由来する長寸法位置誤差が発生。
- 高精度な位置合わせができない。



## 課題解決のアプローチ

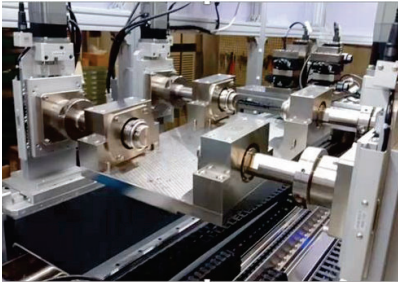
- トロコイド運動を利用した転写機構とすることで、低精度な回転運動を排除する。

## 円弧揺動型印刷装置

(2023) Y. Kusaka, A. Hirata, A. Ohgata, N. Fukuda, "Arc-to-sheet printer for high-precision patterning with positional errors below 6 ppm at 3σ level: Trochoidal trajectory mechanism for rotary motion of arc", *Precision Engineering* 83 192-203 [10.1016/j.precisioneng.2023.06.004](https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2023.06.004)

# 長寸法精度の検証

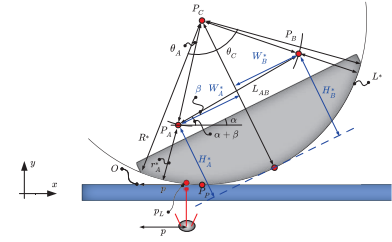
試作した円弧揺動型印刷機



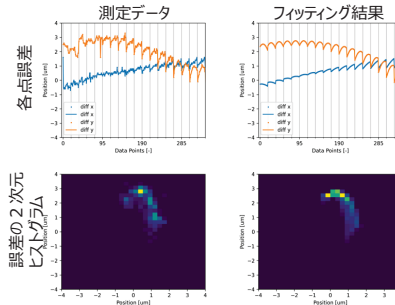
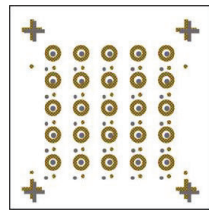
トロコイド曲線のパラメータ調整により印刷条件の最適化

## 1, トロコイド曲線による制御

$$\begin{aligned}
 y_A &= M_{yA}[p - r_A \sin(p' + \theta_A)] \\
 z_A &= M_{zA}[R - r_A \cos(p' + \theta_A)] + \Delta z_A \\
 y_B &= M_{yB}[p - r_B \sin(p' - \theta_B)] \\
 z_B &= M_{zB}[R - r_B \cos(p' - \theta_B)] + \Delta z_B
 \end{aligned}$$



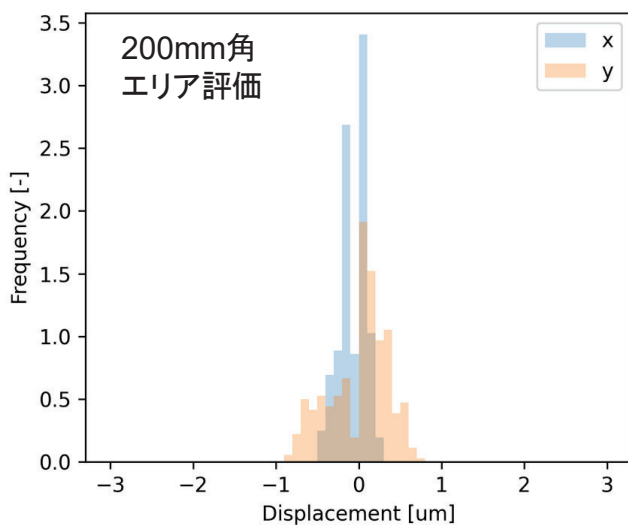
## 2, 多次元フィッティングによる格子パターンの位置精度検証



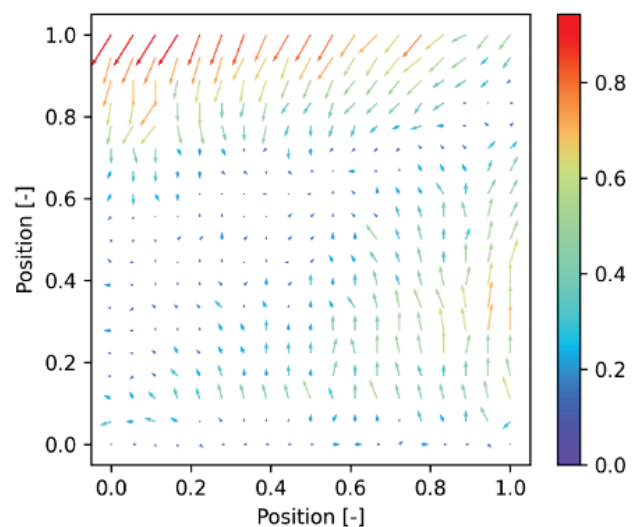
$$\begin{aligned}
 D_x(d, x, y) &= \sum_{m=0}^d \sum_{n=0}^m A_{m(m+1)/2, n, x} S_{m-n}(x) S_n(y) \\
 D_y(d, x, y) &= \sum_{m=0}^d \sum_{n=0}^m A_{m(m+1)/2, n, y} S_{m-n}(x) S_n(y) \\
 S_n(x) &= \begin{cases} x \sum_{k=0}^{n-1} \frac{n}{n-k} \binom{2n-1-k}{k} (-4x)^{n-1-k} & n=0 \\ x \sum_{k=0}^{n-1} \frac{n}{n-k} \binom{2n-1-k}{k} (-4x)^{n-1-k} & n \geq 1 \end{cases} \\
 [A_x] &= \arg \min_{[A_x]} MSE_x([A_x]) \\
 [A_y] &= \arg \min_{[A_y]} MSE_y([A_y]) \\
 MSE_x([A_x]) &= \sum_{i=1}^{i_{max}} \sum_{j=1}^{j_{max}} [\Delta x^{i,j} - D_x(d, x_d^{i,j}, y_d^{i,j})]^2 \\
 MSE_y([A_y]) &= \sum_{i=1}^{i_{max}} \sum_{j=1}^{j_{max}} [\Delta y^{i,j} - D_y(d, y_d^{i,j}, x_d^{i,j})]^2
 \end{aligned}$$

# 長寸法精度の検証

格子評価パターンの位置誤差ヒストグラム



格子評価パターンの位置誤差マップ [μm]

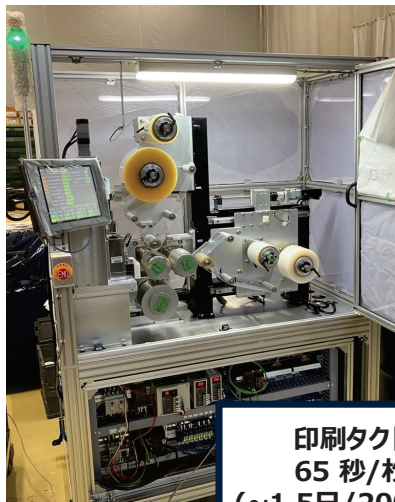


**3σ=6ppm以下の絶対座標精度、p-p=0.12μm以下の繰り返し精度を達成**

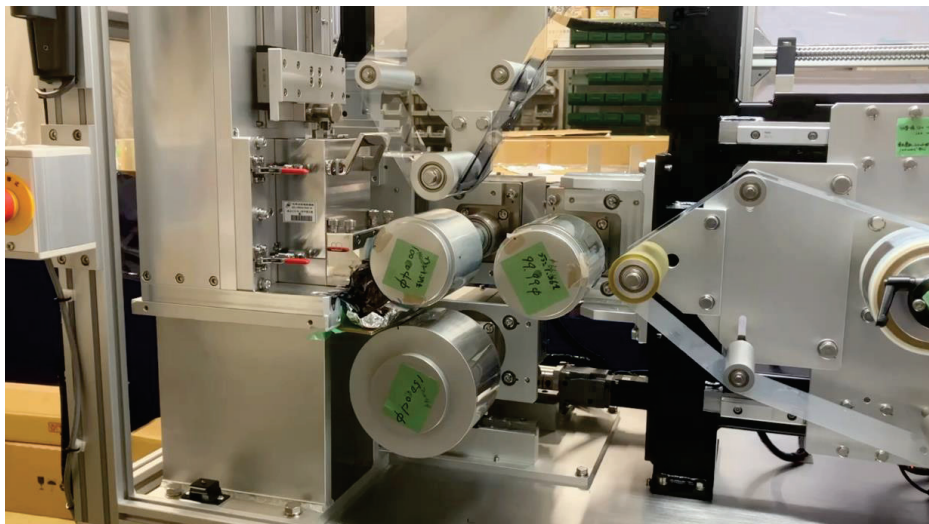
# 実用化に向けた信頼性検証について

無人で付着力コントラスト印刷の連続耐久性を評価可能な装置を開発  
刷版・ブランケット等の副資材耐久性を評価

動画



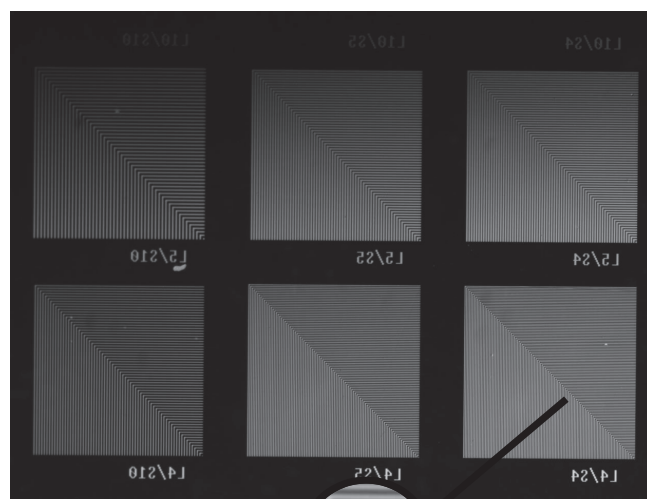
印刷タクト  
65 秒/枚  
(~1.5日/2000枚)



## 連続印刷耐久性の評価状況

連続印刷パターンの形状評価

通算1000枚目



L/S 4/4μm

現在、2000回までの耐久性評価を実施中。印刷前後の各種表面分析等と合わせてプロセス安定化を目指す

# まとめ

- 産総研独自プロセスである、付着力コントラスト印刷で線幅2 $\mu$ mレベルの高精細パターンニングを実現。連続耐久性を検証中。
- 円弧揺動機構を導入した新規印刷装置により、3 $\sigma$ <10ppm以下の高精度パターンニングを実現。
- 独自調合技術により、めっきシード層、レジスト、遮光膜等の機能性インク材料を開発。



**半導体後工程・実装応用への  
展開を目指す。**

