

## 報 文

# プリントドエレクトロニクスを志向した スクリーン印刷工法におけるコンタクト方式および版離れ機構の検討

## Study of the contact and snap-off mechanism for improvement of the screen printing method in printed electronics

岩田 史郎\*・金山 真宏\*・井上 淳\*・今若 直人\*  
仁宮 敏行\*\*・田中 晴之\*\*・玉木 健吾\*\*・曾田 大輔\*\*・石飛 浩一\*\*

プリントドエレクトロニクス分野への技術展開を志向したスクリーン印刷工法の高度化を目的とし、印刷面における位置精度やインク塗布量の均一性への悪影響が懸念されるコンタクト方式および版離れ機構について検討を行った。スクリーン版と被印刷物の間に間隙を設けないオンコンタクト方式、および印刷面内に回転軸を置いた傾斜式版離れ機構を採用することで、スクリーン印刷において均一なスキージ荷重、円滑な版離れ動作、印刷動作時に生じるスクリーン版の歪みの抑制、およびインク塗布動作と版離れ動作の分割化が可能となった。本報告で検討した方式を用いたスクリーン印刷工法は、従来のオンコンタクト方式と同等の印刷形状を保ちつつ、面内位置精度の向上と、インク塗布量の増加および均一化、さらに設計描画線幅に依存しない安定したインク塗布厚が実現できることから、大面積印刷などによる省コスト化や、機能性インクを用いた複層構造形成、また高精細かつ均一なパターン描画が要求されるプリントドエレクトロニクス分野において好適な印刷工法と考えられる。

### 1. はじめに

プリントドエレクトロニクスは、電子部品や電子回路を印刷工法により製造するための生産技術、および製造された電子部品もしくは電子回路そのものを指す技術用語として一般に知られている<sup>1)</sup>。生産技術としてのプリントドエレクトロニクスのメリットには、廃棄材料の削減、低導入コスト、低使用電力による省コスト性ととともに、大面積化、ロール to ロール工法対応による高生産性、さらに可撓性基板、伸縮性基板、非平坦面上への印刷による多機能性が挙げられる。

プリントドエレクトロニクスは、これまでにメンブレンスイッチやセラミックコンデンサの電極、太陽電池の集電線、液晶に使われるカラーフィルタのマスク、色素増感太陽電池セルなどの製造に用いられてきた<sup>1), 2)</sup>。また近年では、有機発光素子照明<sup>3), 4)</sup>、近接センサー<sup>5)</sup>、圧力センサー<sup>6)</sup>、RF タグ用アンテナ<sup>7)</sup>、生体調和センサー<sup>8)</sup>などの製造方法として研究が進められており、従来の電子部品・電子回路の製造業界あるいは印刷業種だけでなく、装置メーカー、材料メーカー、センサーデバイスメーカー、自動車部品メーカー、情報通信業、ヘルスケア業界、介護・保育・障がい者福祉業界など幅広い分野から注目を集

めている。

プリントドエレクトロニクス向けの印刷法として、スクリーン印刷、グラビアオフセット印刷、フレキシ印刷、反転転写印刷、マイクロコンタクト印刷、インクジェット印刷、3D印刷など多種多様な印刷法が検討されている。その内、スクリーン印刷法は、簡便な工程、大面積化が容易、機器導入や製版に掛かる費用が安価といった特長を持っており、さらに他の印刷法に比べて厚い塗布膜が印刷できること、重ね刷りによる高アスペクト膜の実現や機能性インクによる複層構造が可能であること、また既に電子部品等の製造工程での使用実績があることから、最も成熟した印刷法といわれている<sup>9)</sup>。

スクリーン印刷の主な構成を図1に示す。スクリーン印刷は、被印刷物が固定されるステージ、対象となる印刷形状がパターンニングされたスクリーン版、インクを摺るためのスキージバーで構成される。一般的なスクリーン印刷法の印刷原理は、スクリーン版をステージ上の被印刷物の最上面に対して間隙を設けて平行に固定し、X軸に平行に配置された樹脂製のスキージバーを-Z方向に押し込みながら+Y方向に摺動することで、スクリーン版上のインクがパターンニングされた開口部を通じて被印刷物に塗布されるというものである。

またスクリーン版は、金属製の外枠と、ステンレス材やポリエステル材などによるスクリーンメッシュ、さらに開

\*有機フレキシブルエレクトロニクス技術開発プロジェクトチーム

\*\*株式会社曾田鐵工

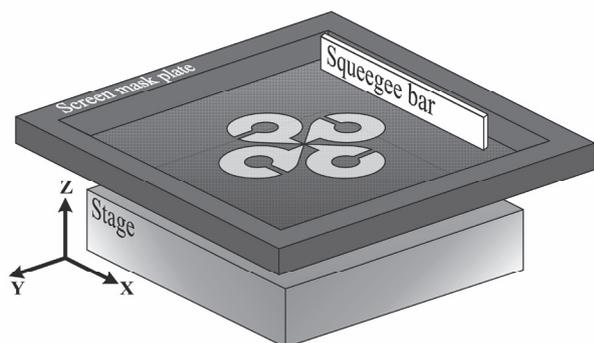


図1 スクリーン印刷法の概略図

口部を設けた感光性乳剤により構成される。外枠に紗張りされるメッシュは張力を有しているため、スキージバーの+Y方向への摺動の際、-Z方向に押し込められたメッシュはスキージの通過後に元に戻り、被印刷物とスクリーン版は自発的に乖離（版離れ）する。

スクリーン印刷の一般的な技術課題として、比較的インクの粘度が高いことから印刷された構造体の表面平坦性が劣ること、インク滲みを抑制するために被印刷物の臨界表面張力に対して比較的表面張力の低い溶剤を用いたインクを選択する必要があること、輪転印刷に比べて製造動作時間が長いこと、印刷時のインクの乾燥や溶剤の大気暴露が懸念されることなどが挙げられる<sup>1), 9), 10)</sup>。また前述したスクリーン版と被印刷物の間に間隙を設ける方式（オフコンタクト方式）においては、印刷時の版の撓みや張力が、印刷位置精度や塗布量の均一性の阻害要素となりうるため、微細パターンを描画や均一なインク塗布量が求められる際には留意を要する。

本報では、プリントエレクトロニクス分野への技術展開を志向したスクリーン印刷技術の高度化を念頭に、従来のオフコンタクト方式と、版と被印刷物の間に間隙を設けないオンコンタクト方式との比較検討を行った。またオンコンタクト方式では自発的な版離れ動作が得られないため、新たに付与する必要がある機械的な版離れ機構について検討を行った。さらにこの間隙がスキージ荷重の均一性に与える影響、コンタクト方式および版離れ機構が印刷形状、印刷位置精度、およびインク塗布量の均一性に与える影響についてそれぞれ評価し、スクリーン印刷法のプリントエレクトロニクス分野への好適性について総合的に考察を行った。

## 2. 試料および方法

### 2.1 スキージ荷重の測定

スクリーン版と被印刷物の間の間隙を変化させたときのスキージ荷重の均一性について評価するため、スキージバーとスクリーン版を用いて、スキージバー中央部と端部に掛かる単位長さあたりの荷重の測定を行った。図2に測定概要を示す。

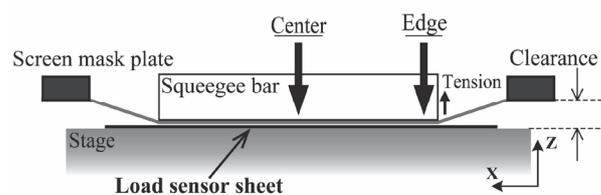


図2 スキージ荷重の均一性評価

間隙幅を過度に設けるとスクリーン版を破損させる恐れがあるため、間隙幅の最大値は3.0mmとした。また試験時の設定スキージ圧は200kPaとした。

スキージバーにはマイクロテック社製のマイクロスキージ B70 (270mm 長) を、スクリーン版には中沼アートスクリーン社製のステンレスメッシュスクリーン版 (内寸 490mm □) をそれぞれ用いた。スキージ荷重の測定には、ニューロング精密工業社製のシート型スキージバランス測定器 SB メジャー BM-01 を使用した。

### 2.2 テストパターンの形状観察

コンタクト方式および版離れ機構が印刷形状に与える影響について評価するため、テストパターンを印刷し、その形状を観察した。図3に評価に用いたコンタクト方式および版離れ機構の概略図を示す。

図3 (a) に示すオフコンタクト方式での間隙幅は3.1項で後述するスキージ荷重の測定結果から2.0mmとした。一方、図3 (b) および (c) のオンコンタクト方式では、印刷時の間隙幅を0.0mm、機械的版離れ動作後の間隙幅を同じく2.0mmとした。機械的版離れ動作は垂直式もしくは傾斜式にて試験を実施し、傾斜式版離れ動作においては、その回転動作の軸を印刷面内に配置した場合 (図3 (c-1)) と、印刷面から上方80mmに配置した場合 (図3 (c-2)) について評価を行った。垂直式版離れ動作における版離れ後の間隙幅は、スクリーン版全面において2.0mmとなるが、傾斜式版離れ動作では、スクリーン版の回転軸側で0.0mm、回転軸の反対側で2.0mmと連続的に変化することとなる。印刷試験時の設定スキージ圧は160kPa、スキージ速度は55mm/sとした。

インクはアサヒ化学研究所社製の低温硬化銀ペースト LS-460H-1、被印刷物はfolex社製ポリエステルフィルム FX-100 (297mmL × 420mmW × 100 μ mt)、機械的版離れ機構は曾田鐵工社製の機械的版離れ機構をそれぞれ用いた。またスキージバーとスクリーン版は2.1項と同じものを用いた。テストパターンの形状観察には、ニコン社製のCNC画像測定システム NEXIV VM-500N を使用した。

### 2.3 印刷位置精度の評価

オフコンタクト方式とオンコンタクト方式（傾斜式版離れ：印刷面内回転軸配置）が、印刷位置精度に与える影響について評価を行った。図4に評価に用いた印刷パターンの例を示す。

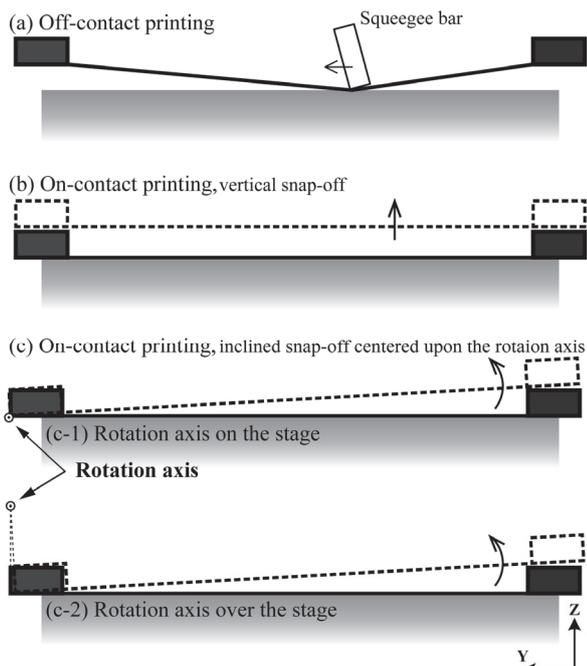


図3 コンタクト方式と版離れ機構

- (a) オフコンタクト方式
- (b) オンコンタクト方式（垂直式版離れ）
- (c-1) オンコンタクト方式（傾斜式版離れ：印刷面内回転軸配置）
- (c-2) オンコンタクト方式（傾斜式版離れ：印刷面上方回転軸配置）

内寸サイズ 370mm □ のスクリーン版に対して、印刷領域を 80mm □（版利用率 21.6%，印刷点数 81 点）から、260mm □（版利用率 70.2%，印刷点数 729 点）まで変化させ、それぞれの印刷領域（版利用率）における面内印刷誤差をパターン基準点と印刷点の距離として定義し、誤差発生頻度の評価を行った。印刷試験時の設定スキージ圧は 160kPa、スキージ速度は 55mm/s とした。

スクリーン版には中沼アートスクリーン社製のステンレスメッシュ版（370mm □）を用いた。またインク、被印刷物、スキージバーおよび機械的版離れ機構は 2.2 項と同じものを用いた。スクリーン版のパターン基準点および印刷点の位置計測には、2.2 項と同様 CNC 画像測定システムを使用した。

#### 2.4 導線パターンの電気抵抗値評価

オフコンタクト方式とオンコンタクト方式（傾斜式版離れ：印刷面内回転軸配置）が、インク塗布量に与える影響について評価するため、印刷した導線パターンでの電気抵抗値測定を行った。

導線パターンの設計線幅は、30  $\mu$ m、50  $\mu$ m、100  $\mu$ m とした。また描画線長は 10mm とした。印刷した導線パターンの電気抵抗値測定は、電流-電圧特性評価より算出した。印刷試験時の設定スキージ圧は 160kPa、スキージ速度は 55mm/s とした。

被印刷物は、帝人デュボンフィルム社製ポリエチレンナフタレートネオテックス Q51（210mmH × 297mmW × 100  $\mu$ mt、ガラス転移温度 155℃）を用いた。またスキ-

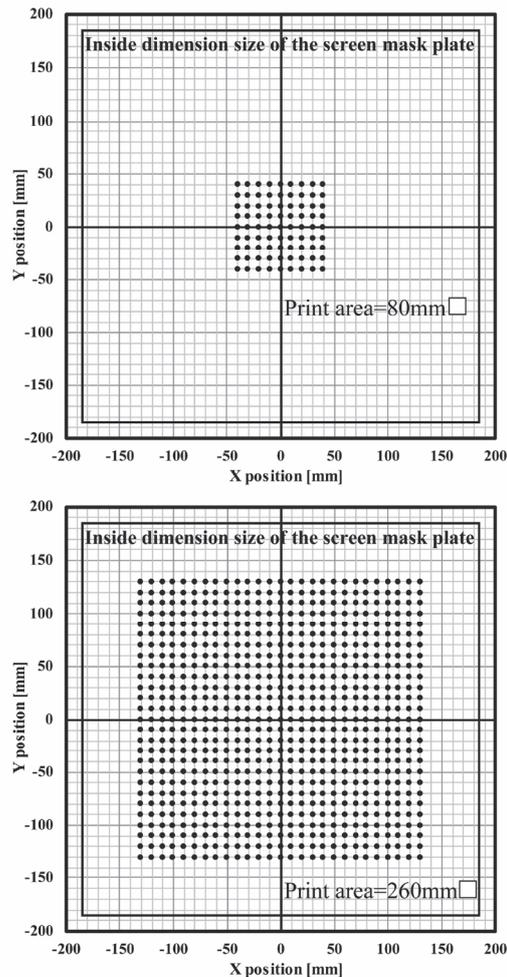


図4 印刷領域と印刷位置精度評価用の印刷パターン

ジバー、スクリーン版、インク、および機械的版離れ機構は 2.2 項と同じものを用い、印刷物の熱処理条件は 130℃、30 分間とした。電流-電圧特性評価には、Keithley 社製 Source Meter 2400 を用いた。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 スキージ荷重の測定

スクリーン版と被印刷物との間隙を 0.0mm から 3.0mm まで変化させたときのスキージ荷重の均一性について評価を行った。スキージバーの中央部および端部におけるスキージ荷重の間隙依存性を図 5 に示す。

図 5 より、間隙の増加に伴い、中央部と端部ともスキージ荷重が低下し、また二つの値が徐々に乖離していくことが分かった。この傾向はスキージバーに対して -Z 方向に掛かるスキージ荷重に対し、+Z 方向に生じるスクリーン版からの張力による影響と考えられる。

スクリーン印刷においてインクを均一に塗布するには、印刷面内で均一なスキージ荷重が求められるため、均一なスキージ荷重を得るには、間隙幅 2.0mm 程度以下が好ましいことが示唆された。

### 3.2 テストパターンの形状観察

図3に示したそれぞれのコンタクト方式および版離れ機構が印刷形状に与える影響について、テストパターンを印刷し、その形状観察により評価した。各条件で印刷したテストパターン像を図6に示す。

図6 (a) のオフコンタクト方式では、滲み無く鮮明なテストパターンが観察された。一方、図6 (b) の垂直式版離れ動作によるオンコンタクト方式では、テストパターンの周囲にインク滴の飛散が観察された。また傾斜式版離れ動作の場合では、(c-1) 印刷面内に回転軸が配置されたときには、オフコンタクト方式と同様に滲みの無い印刷形状が観察されるものの、(c-2) 印刷面から上方80mmに回転軸が配置されたときには、-Y方向にパターンが引きずられたような印刷形状が観察された。

図6 (b) の垂直式版離れ動作におけるインク飛散は、高粘度インクによって接着していたスクリーン版と被印刷物の割裂様の急激な版離れ挙動によるものと考えられる。

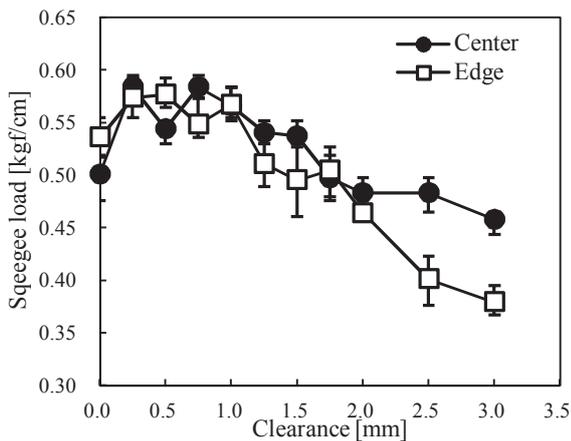


図5 スクリーン版ステージの間隙幅とスキージ荷重

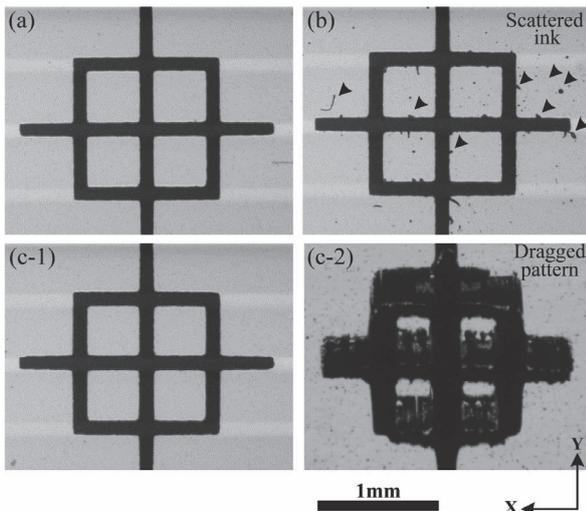


図6 版離れ機構とテスト印刷パターンの外観

- (a) オフコンタクト方式
- (b) オンコンタクト方式 (垂直式版離れ)
- (c-1) オンコンタクト方式 (傾斜式版離れ：印刷面内回転軸配置)
- (c-2) オンコンタクト方式 (傾斜式版離れ：印刷面から上方80mmに回転軸配置)

また図6 (c-2) の印刷面から上方80mmに回転軸を配置した傾斜式版離れ動作における引きずりパターン形状から、印刷面から上方回転軸配置時の版離れ動作は、単純なZ軸方向の垂直動作だけでなく、-Y方向への平行動作を含有した複合動作であることが示唆された。一方、図6 (c-1) の印刷面内に回転軸を配置した傾斜式版離れ動作では、動作の回転軸をステージ面内に配置することで、-Y方向への平行動作を抑制することができ、円滑な版離れ動作による良好な印刷形状が得られた。

### 3.3 印刷位置精度の評価

オフコンタクト方式とオンコンタクト方式 (傾斜式版離れ：印刷面内回転軸配置) が、印刷位置精度に与える影響について評価を行った。図7に各印刷領域における面内印刷誤差量の発生頻度を累計度数解析した結果を示す。

図7より、印刷領域が80mm□ (版枠利用率21.6%) のとき、面内印刷誤差量の発生頻度にコンタクト方式間の差異はみられず、ともに誤差量10μm以下に90%以上の印刷点が分布していることが分かった。しかしながら印刷領域を拡大させるにしたがい印刷位置精度は徐々に低下し、印刷領域260mm□ (版枠利用率70.2%) における誤差量10μm以下の印刷点の発生頻度は、オフコンタクト方式では約40%、オンコンタクト方式では80%弱にまで

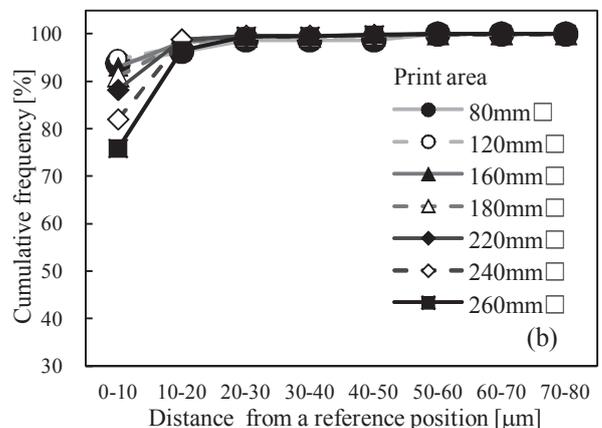
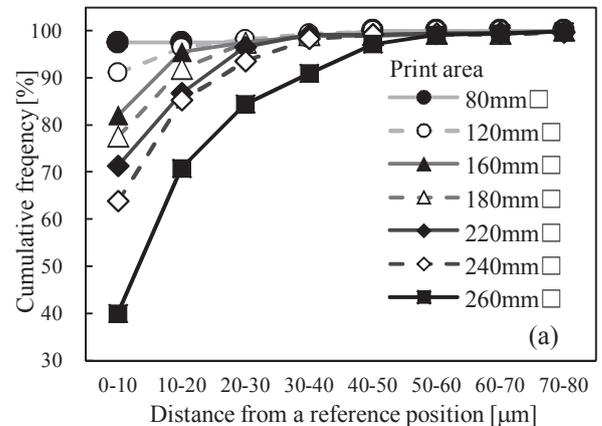


図7 印刷領域と印刷位置誤差量の発生頻度累計度数

- (a) オフコンタクト方式
- (b) オンコンタクト方式 (傾斜式版離れ：印刷面内回転軸配置)

低下した。またその時の面内印刷誤差の最大量は、オフコンタクト方式では 50 ~ 60 μm, オンコンタクト方式では 20 ~ 30 μm であった。

印刷領域の拡大に伴う印刷位置精度の低下は、オフコンタクト方式による印刷時のスクリーン版の歪みに起因するものと考えられる。印刷領域の拡大と高い印刷位置精度を両立させたスクリーン印刷には、傾斜式版離れのオンコンタクト方式が適していることが示唆された。

### 3.4 導線パターンの電気抵抗値評価

オフコンタクト方式とオンコンタクト方式（傾斜式版離れ：印刷面内回転軸配置）が、インク塗布量に与える影響について評価するため、印刷した導線パターン（図 8）の電気抵抗値測定を行った。図 8 に設計線幅の逆数に対する単位長さ当たりの電気抵抗値を示す。

図 8 より、すべての設計線幅において、オンコンタクト方式で印刷した導線の方がオフコンタクト方式に比べて、電気抵抗値が低く、かつ各測定値（測定数 n=20）のバラつきが小さいことが分かった。またオンコンタクト方式で印刷した導線の電気抵抗値の方が、設計線幅の逆数に対して、より線形的な傾向を示した。

$$R = \rho \cdot L / (W \times t) \dots \dots \dots (1)$$

導線の電気抵抗値 R は式 (1) で示される。ここで ρ は導電材料の比抵抗率、L は導線の長さ、W は導線の幅、t は導線の厚みである。図 8 において、導線の電気抵抗値が設計線幅の逆数に対し線形であるということは、すなわちインク塗布厚が設計線幅に依存せず均一であることを示している。

図 8 の結果は、二つのコンタクト方式におけるスキージ荷重の均一性の違いだけでなく、被印刷物へのインクの塗布工程の差異が起因していると考えられる。オフコンタクト方式では被印刷物へのインク塗布動作と版離れ動作がほぼ同時に行われるのに対し、オンコンタクト方式ではインク塗布動作と版離れ動作が分離して行われる。すなわち、オフコンタクト方式では、インクが被印刷物に接触す

ると、直後に被印刷物上とスクリーン版の乳剤上にインクが分離されるのに対し、オンコンタクト方式では、いったん被印刷物上にインクが定着し、暫時経過後に次工程として機械的版離れ動作によるインクの穏やかな剥離破壊が起きる。これら塗布工程におけるインク定着プロセスの違いが、設計線幅に対するインク塗布厚の均一性の違いとなって表れたと考えられる。

## 4. まとめ

プリントエレクトロニクス分野への展開を志向したスクリーン印刷法の高度化を念頭におき、印刷面における位置精度やインク塗布量の均一性への悪影響が懸念されるコンタクト方式および版離れ機構について検討を行った。

スキージバーの荷重測定より、均一なスキージ荷重を得るにはスクリーン版と被印刷物との間隙は 2.0mm 以下が好ましいことが示唆された。また回転軸を印刷面内においた傾斜式版離れ機構を採用したオフコンタクト方式のスクリーン印刷では、従来のオフコンタクト方式スクリーン印刷と同等の良好な印刷形状を保ちつつ、それより優位な点として版枠内寸に対する印刷利用率を 70% 程度にまで拡大した際にも高い面内位置精度を維持し、また導線の抵抗値評価よりインク塗布量の増加および均一化、さらに設計描画線幅に依存しない安定したインク塗布厚が実現できた。これらの結果は、円滑な版離れ動作、印刷時に生じるスクリーン版の歪みの抑制、およびインク塗布動作と版離れ動作の分割化に起因するものと考えられる。

プリントエレクトロニクスは、そのメリットである省コスト性、高生産性および多機能性の観点から、印刷領域の拡大、微細パターンの描画、重ね刷りによる高アスペクト描画、機能性インクを用いた複層構造形成、設計パターンに依存しない均一なインク塗布厚などが要求される。本報で検討したコンタクト方式および版離れ機構を採用したスクリーン印刷法は、プリントエレクトロニクス分野において好適な印刷法であると考えられる。

## 5. 文 献

- 1) Sano, Y. Screen Printing & Printed Electronics Session 1 Why Screen Printing?. Converttech & e-Print. 2012, vol.2, no.4, p.54-58.
- 2) Imawaka, N.; Kanayama, M.; Iwata, S.; Matsubayashi, K.; Furuta, H.; Shibakawa, S.; Sakamoto, R.; Kodama, Y.; Yoshino, K. Development of dye-sensitized solar cell and its element materials with high performance and excellent durability. -Design, fabrication, characterization and new fields application of colorful and designable solar cells-. Journal of the Society of Electrical Materials Engineering. 2014, vol.23, p.5-23.
- 3) Pardo, D. A.; Jabbour, G. E.; Peyghambarian, N. Application of Screen Printing in the Fabrication of Organic Light - Emitting

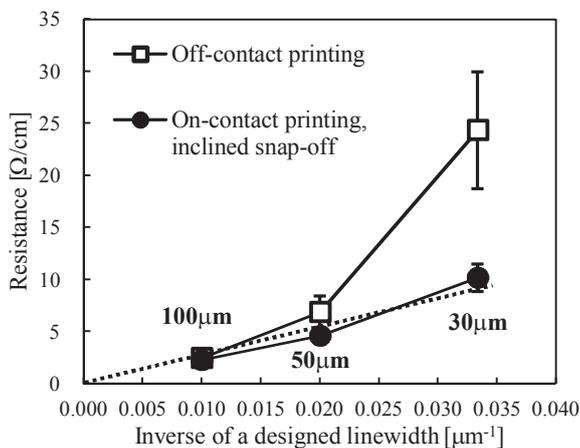


図 8 導線の設計線幅と電気抵抗値

- Devices. *Advanced Materials*. 2000, vol.12, no.17, p.1249-1252.
- 4) Ohmori, Y.; Ohtomo, T.; Hashimoto, K.; Tanaka, H.; Hiraoka, K.; Iwata, S.; Yoshino, K.; Cook, A.; Zakhidov, A. A.; Kajii, H. Printable Organic Light-Emitting Devices and Application for Optical Signal Transmission. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2016, vol.6, no.4, p.3228-3234.
- 5) Nomura, K.; Kaji, R.; Iwata, S.; Otao, S.; Imawaka, N.; Yoshino, K.; Mitsui, R.; Sato, J.; Takahashi, S.; Nakajima, S.; Ushijima, H. A flexible proximity sensor formed by duplex screen/screen-offset printing and its application to non-contact detection of human breathing. *Scientific Reports*. 2016, vol.6, p.19947-1 - 19947-12.
- 6) Watanabe, Y.; Uemura, S.; Hoshino, S. Printed pressure sensor array sheets fabricated using poly(amino acid)-based piezoelectric elements. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2014, vol.53, no.5S3, 05HB15.
- 7) Jung, M; Kim, K; Noh, J; Lim, N; Lim, C; Lee, G; Kim, J; Kang, H; Jung, K; Leonard, A. D.; Tour, J. M.; Cho G. All-Printed and Roll-to-Roll-Printable 13.56-MHz -Operated 1-bit RF Tag on Plastic Foils. *IEEE Tansactions on Electron Devices*. 2010, vol.57, no.3, p.571-580.
- 8) Someya, T.; Sekitani, T. Printed skin-like large-area flexible sensors and actuators. *Procedia Chemistry*. 2009, vol.1, no.1, p.9-12.
- 9) Khan, S.; Lorenzelli, L.; Dahiya, R. S. Technologies for Printing Sensors and Electronics Over Large Flexible Substrates: A Review. *IEEE Sensor Journal*. 2015, vol.15, no.6, p.3164-3185.
- 10) Liang, T.-X.; Sun, W. Z.; Wang, L.-D.; Wang, Y. H.; Li, H.-D. Effect of Surface Energies on Screen Printing Resolution. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology-B*. 1996, vol.19, no.2, p.423-426.