

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05134

研究課題名（和文）フラクチャブルな分子・粒子ナノ塗膜デザインに基づく印刷エレクトロニクスの新展開

研究課題名（英文）Fracturable films of semidried molecules and colloids for printed electronics

研究代表者

日下 靖之（Kusaka, Yasuyuki）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員

研究者番号：00738057

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：半乾燥化した塗膜が示すフラクチャブルな特性について、まず（1）JKR、Rumpf、Griffithの破壊理論を組み合わせたパターンニングモデルを開発することで印刷パターンの成否を説明する無次元数を導出し、離散要素法シミュレーションによるパターン成否基準の検証を行った。さらに（2）モデルインクによるレオロジー・破壊特性の評価を行い、印刷適性のあるインク膜の諸物性を明らかにした。微細印刷の学理構築を進めるとともに、その応用として（3）真空プロセスではなし得ないような液体機能材料の微細パターンニング技術を示し、マイクロスーパーキャパシタの試作を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、各種機能性材料を精密にパターンニングする印刷技術に関してその学理と材料拡充を目指したもので、フレキシブルデバイス等の人と親和性の高い電子デバイスの実現ならびに低コスト製造プロセスによるIoT社会の実現に資するものと考えている。液体から固体へと遷移する濃厚系コロイド分散体の薄膜を扱っており、薄膜転写と粘弾塑性の関係に新たな知見を与えるものである。

研究成果の概要（英文）：In this research, fracture properties of semidried ink layers used in high-resolution printing for electronic device fabrications such as reverse offset printing and adhesion contrast planography were investigated in detail. First, patterning process in adhesion contrast planography wherein the fracture and separation of the nanoparticle layers take place was simulated by discrete element methods. The simulation result was verified by a theoretical model and qualitatively agreed with experimental data. Second, the rheology, fracture and adhesion properties of semidried layers were characterized and related to an optimal volume fraction in a semidried state for printing. Lastly, a printable semisolid electrolyte ink was developed by using ionic liquid and silica nanoparticles and applied to the fabrication of micro-supercapacitors.

研究分野：印刷エレクトロニクス

キーワード：微細印刷 付着 破壊 離散要素法 レオロジー 半固体電解質 イオン液体

1. 研究開始当初の背景

インク化された機能性材料を印刷技術によってパターンニングすることにより、電子デバイスを製造する印刷エレクトロニクス技術が活発に研究されている。真空処理が必要な各種蒸着・エッチング等の従来手法と比べて、印刷は少ない工程かつ安価な設備で簡便にパターンを形成できるため、変量多品種生産に適したパターンニング技術としてエレクトロニクス分野への適用が期待されている。このようななか、濡れや撥きによってパターンが崩れてしまう従来型印刷手法ではなく、インク塗膜が固体的に振る舞う程度までシリコンゴム上で乾燥させたのちに、付着力で膜を破断させることによって選択的に転写する、量産性・集積性に優れたパターンニング技術(反転オフセット印刷や付着力コントラスト印刷など)に大きな関心が寄せられている。申請者のグループでは、溶液組成を工夫することで、低分子からなる金属錯体インクでも結晶析出せずに半乾燥固化膜を得ることに成功し、反転オフセット印刷技術を用いてサブミクロン解像度のパターンニングも実証した。このように半乾燥化を利用した印刷技術はナノ粒子のみならず低分子材料にも有効であり、微細パターン形成が可能な印刷材料バラエティを飛躍的に拡大できることを強く示唆している。

一方、パターンニング原理の転換に伴い、膜乾燥挙動、付着、接触変形、摩擦、すべりなど、これまでの印刷技術ではほとんど関係のなかった諸現象が印刷プロセスに関与するため、インク処方と印刷特性を関連づける学理を構築する必要がある。

2. 研究の目的

塗布直後のウェットな状態から乾燥状態に至るまでの遷移領域、すなわち半乾燥状態における塗膜に共通する、界面転写特性およびフラクチャブルな力学特性と、印刷パターンニング性との関連を明らかにし、反転オフセット印刷や付着力コントラスト印刷の印刷学理を構築することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 離散要素法による微粒子塗膜のパターンニングシミュレーション

半乾燥状態にある粒子塗膜に関する簡略化モデルとして、JKR相互作用と粒子間摩擦のみを考慮した粒子層のパターン形成過程を離散要素法によってシミュレーションした。またシミュレーション挙動を説明するため、JKR理論、Rumpfの粒子層強度理論、Griffithの破壊理論を組み合わせた理論モデルを構築した。シミュレーション結果の妥当性を検証するため、インク膜に対する付着力が異なるシリコンゴムを用いてITOナノ粒子インクの付着力コントラスト印刷を実施した。

(2) モデルインクを用いたレオロジー・付着・破壊特性と印刷性の評価

半乾燥状態にある粒子塗膜は薄膜のため直接レオロジー測定を行うことができない。そこで、揮発かつ無溶媒系の液状分散剤とチタン酸バリウムナノ粒子のみを混練したバルク体を調製し、これをPGMEA溶媒で希釈することによって反転オフセット用モデルインクを調製した。PGMEA溶媒はシリコンゴムに吸収されやすく沸点も比較的低温、モデルインク中のPGMEAはシリコンゴムに塗布した後消失すると考えられるため、十分乾燥待機した塗膜は、バルク体と同様の組成と近似できる。液状分散剤とナノ粒子の混合比を変えることで半乾燥時の固形分率を変化させ、レオロジー特性(バルク体)、印刷特性・破壊特性・付着特性(インク)を評価した。レオロジーについては濃厚コロイド分散系のレオロジー理論と比較した。また、印刷パターンニング過程の直接観察装置を用いて、パターン不良の発生メカニズムの解析を行った。

(3) イオン液体を用いたフラクチャブルな半固体電解質インクの開発

微細印刷可能なフラクチャブルな半固体電解質インクの開発を行った。従来の微細印刷用インクはもっぱら機能性を有する固形分を用いて金属インク等を作成していたが、②で得られた知見から、逆に乾燥制御用の液状物質に機能を持たせることで新たな機能性インクが開発できることを着想した。具体的には沸点が高くシリコンゴムに吸収されないイオン液体を乾燥制御成分としてシリカナノ粒子分散液に添加してインク調整を行った。イオン液体(BMP-BTI)とシリカナノ粒子の混合比を変えることによって乾燥状態の異なる電解質インクを調製し、その印刷特性およびインピーダンス特性を評価した。ここで得られた半固体電解質の応用としてスーパーキャパシタの試作を行った。

4. 研究成果

(1) 離散要素法による微粒子塗膜のパターニングシミュレーション

離散要素法によって、ランダム充填させた厚み h の粒子層に対して幅 l_0 の平版を上から接触させ、これを引き離すシミュレーションを行った。図1はその解析例とスナップショットであり、平版を引き離すと、まず平版直下の粒子層の上部が平版と同速度で移動し、内部に歪みが生じることがわかる

(A)。その後、平版全体が同一速度で動き始め、シリコンゴムを模した下面から剥離した (B~C)。その後、パターン縁部がスカート状に変形したのち破壊に至り (D~E)、パターンが形成された (F)。ここで平版にかかる応力 σ_z を評価すると、スナップショット V で最大値を示し、その後徐々に低下する挙動であった。

図2は粒子-ブランケット間付着力 $\sigma_{a,p}$ を変化させて生成されるパターン形状を評価したもので、 $\sigma_{a,p} = 85 \text{ kPa}$ の場合、粒子層が剥離しやすいため、スカートが成長し、エッジが乱れる結果となった。一方、 $\sigma_{a,p}$ が大きい場合 ($\sigma_{a,p} = 115 \text{ kPa}$) は粒子が下面に取り残されて、残渣が発生した。その中間条件 ($\sigma_{a,p} = 100 \text{ kPa}$) では良好なパターンが得られた。図2右には各条件における剥離仕事をプロットしたもので、良好なパターンが得られた $\sigma_{a,p} = 100 \text{ kPa}$ 条件において最も剥離仕事小さくなった。 $\sigma_{a,p} = 85 \text{ kPa}$ の場合、平版直下の剥離に要する仕事は当然低いと考えられるが、スカートを変形させるための仕事が必要になるため、 $\sigma_{a,p} = 100 \text{ kPa}$ 条件よりも剥離仕事が大きくなったと考えられる。理論モデルから凝集破壊およびスカート変形の発生を支配する無次元数を求め、これを離散要素法の結果と比較したところ、図3に示すようにパターン品質と無次元数に良好な一致が見られた。シミュレーション結果の妥当性を検討するために、付着力コントラスト印刷用に調製した I T O

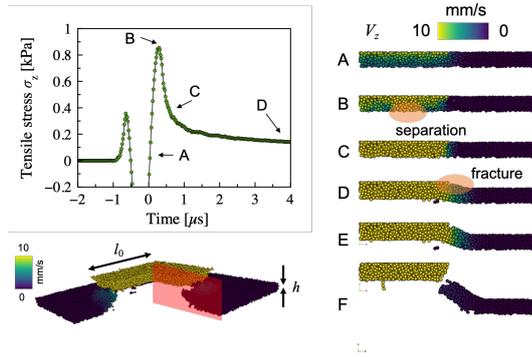


図1 離散要素法によるパターン形成モデル

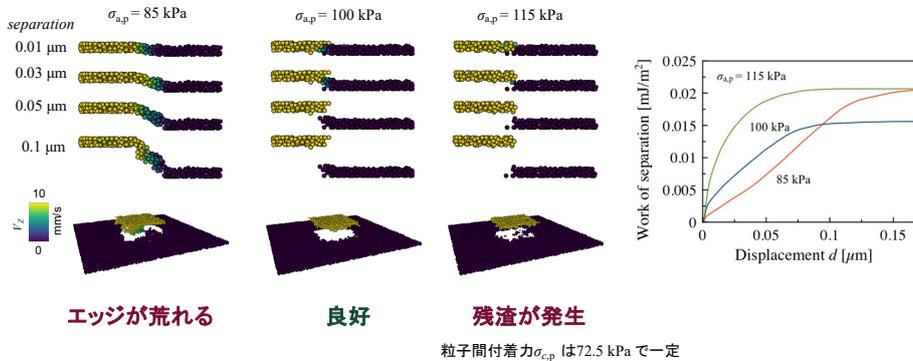


図2 パターン形状と粒子-ブランケット間付着力の関係

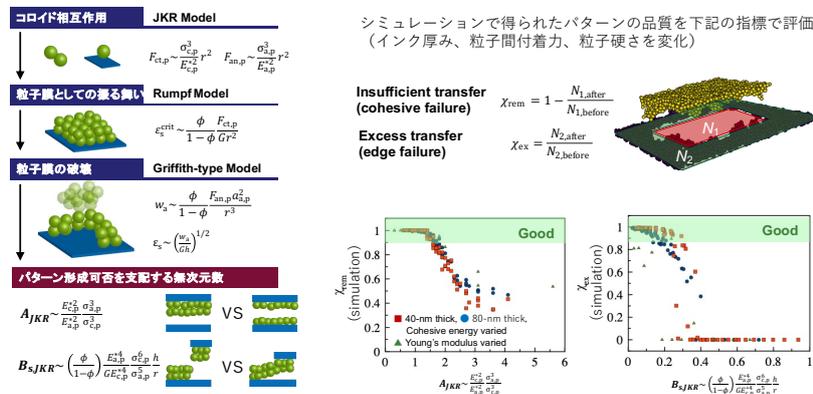


図3 パターン成否を支配する無次元数と離散要素法のパターン品質

ナノ粒子インクを用いて、組成の異なるシリコーンゴムブランケットに塗布・半乾燥させたものを剥離試験測定することでブランケット-インク間付着力 F_c を評価した。刷版の露光部と非露光部とインク膜間付着力についても剥離試験で評価し（それぞれ F_r と F_r, UV で表す）、印刷性との関係性を評価したところ、 $F_r < F_c < F_r, UV$ の関係が成り立ち、かつ各値の差が同程度のコントラストであった場合に最も良好なパターンが得られた（図4）。この傾向はインクの膜厚を変えても同様であった。シミュレーションの $\sigma_{a,p}$ は F_c に関するパラメータであると考えられるので、図4のA（エッジが荒れたケース）と図2の $\sigma_{a,p} = 85 \text{ kPa}$ 条件は定性的に一致し、また図4のBに示す通り、 F_c の増加とともにパターン品質が向上する点も図2の $\sigma_{a,p} = 100 \text{ kPa}$ 条件で良好なパターン形状が得られた結果と定性的に一致した。インク設計の観点からは、溶媒を考慮し、流体力学的相互作用および分散剤に由来する粒子間相互作用を仮定したより精緻なモデル構築が求められる。なお、低分子系インクについては、低分子系インクの半乾燥時の内部構造をXRDで分析し、分子動力学法によってシミュレーションすることを検討したが、シミュレーションの妥当性を検証可能なXRDデータを得ることができなかつたため中断した。

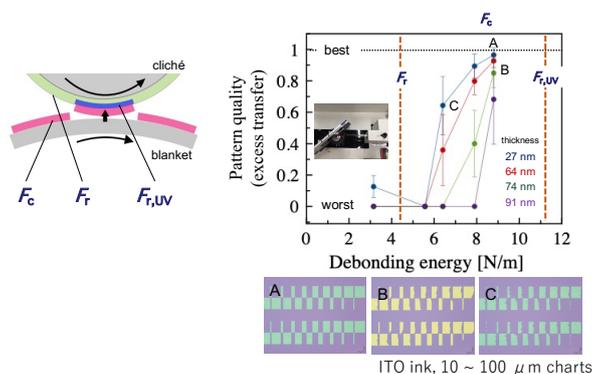


図4 ITO ナノ粒子インクを用いた付着力コントラスト印刷試験(ブランケット付着力および膜厚依存)

(2) モデルインクを用いたレオロジー・付着・破壊特性と印刷性の評価

図5にバルク体の外観と反転オフセット印刷結果およびその断面プロファイルを示す。図より、固形分率が約45 v/v%の条件で最も良いパターン品質が得られることがわかった。固形分率がより高くなると転写欠陥が生じて過乾燥になること(ブランケットに対する付着力も増大す

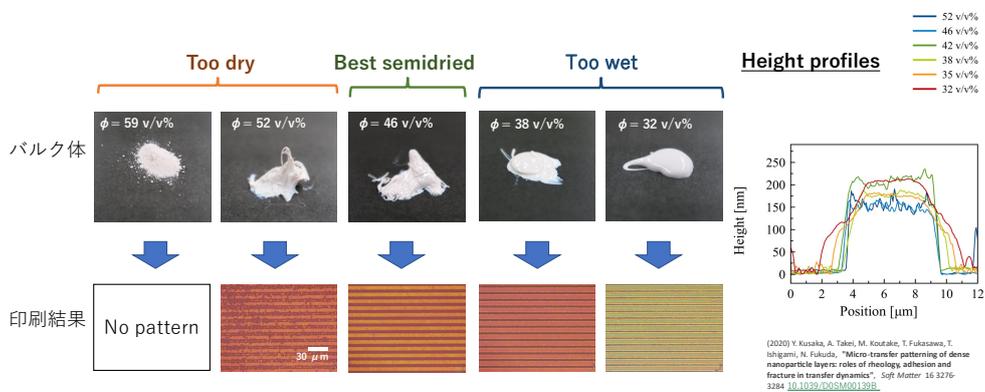


図5 モデルインクの固形分率と反転オフセット印刷適性の関係

ること)、低固形分率では矩形断面が得られないことがわかった。レオロジー測定結果は単純液体の統計力学をベースとした濃厚系のコロイド分散理論と定性的に一致した。クリープ試験を行ったところ、バルク体はBurgersモデルで良好に説明することができることがわかり、良好なパターンが得られる条件では短時間スケールの弾性成分が発現した。このことから、印刷におけるパターン形成の時間スケールでは、粒子層は弾性的に振る舞い、したがってパターンの形状を保持しつつ付着転写による印刷が可能になっていると考察された。また固形分率42%と46%で薄膜の引っ張り試験を行ったところ、図6に示す通り、高濃度条件では弾塑性的な亀裂進展が見られ、低濃度条

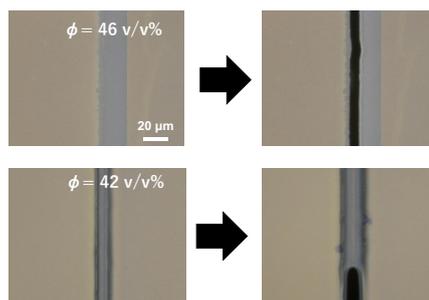


図6 モデルインクの破壊特性

件では液体的なメニスカスを有する破壊が確認された。この点も印刷特性と一致する。その他、低濃度条件では低速転写でシワ状の転写不良が確認され、これは長時間スケールでは流動変形が支配したために生じたと考察した。

(3) イオン液体を用いたフラクチャブルな半固体電解質インクの開発

イオン液体 (BMP-BTI) とシリカナノ粒子の混合比を変えた半固体電解質インクを作製した反転オフセット印刷試験を行った。半乾燥時の固形分率として最大約50%まで印刷できることがわかり、イオン液体を乾燥遅延材として用いたとしてもフラクチャブルな薄膜を得ることができることが明らかになった (図7 a)。図7 bに示す通り、イオン液体を含む薄膜ではイオン液体由来のピークがあり、SEM観察より粒子間隙をイオン液体が充填していることが確認できた (図7 cはイオン液体なし、図7 dはイオン液体あり)。銀ナノ粒子インクを印刷して形成したくし場電極上に半固体電解質インクを印刷し、電気インピーダンスを測定したところ、図8に示す通り、イオン液体成分の増加とともに抵抗成分は減少し、不飽和多孔質の電気伝導率に関するArchieの法則に従うことが確認された。またナイキストプロットは一般的な半円を示した。一般的にイオン液体は吸湿性を有するため環境雰囲気によってその絶対値は大きく変動することも確認された。今回は応用例として平面型のマイクロスーパーキャパシタを試作した。具体的には銀とカーボン電極からなるくし型電極を反転オフセット印刷し、その上に半固体電解質インクを印刷した。その結果、容量 $19 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ が得られた。この値は、既存のマイクロスーパーキャパシタと比較して1~2桁程度低い。半固体電解質インクの代わりにドロップキャストしたBMP-BTIでキャパシタ特性を評価した場合でも同程度の容量が得られたことから、半固体電解質ではなく今回使用したカーボン電極の比表面積が低いことで特性が制限されたと考えられる。このため、カーボン材料の最適化を進めることでさらに高容量のマイクロスーパーキャパシタを実現できる可能性がある。イオン液体のような液体材料は真空プロセスとフォトリソによる成膜パターンニングが難しいため、ここで示した半固体電解質の微細印刷パターンニングは、フォトリソの印刷代替にとどまらないユニークな製造手法を提供していると考えている。集積度の高いイオンゲルトランジスタや印刷フレキシブルガスセンサーを開発できる可能性もある。

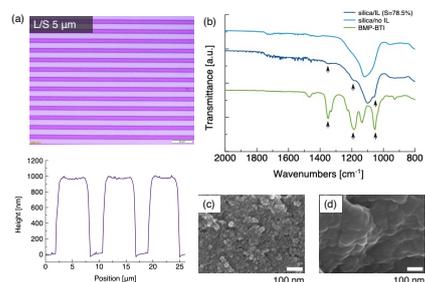


図7 電解質インクのパターニング

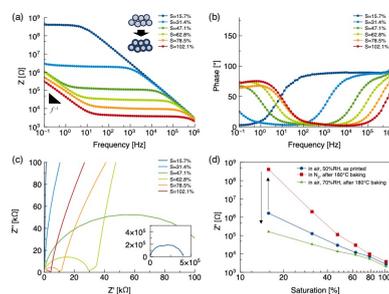


図8 半固体電解質薄膜のインピーダンス特性

以上の通り、半乾燥化した塗膜が示すフラクチャブルな特性について (1) 理論およびシミュレーションによるパターン成否基準の検証と (2) モデルインクによるレオロジー・破壊特性の評価を行うことで微細印刷の学理構築を進めるとともに、その応用として (3) 真空プロセスではなし得ないような液体機能材料の微細パターンニング技術を示し、印刷材料バラエティを拡大することができた。本成果は、フレキシブルデバイス等の人と親和性の高い電子デバイスの実現ならびに低コスト製造プロセスを通じたIoT社会の実現に資するものと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kusaka Yasuyuki, Kawamura Tadaharu, Nakagawa Masatoshi, Okamoto Kazuki, Tanaka Keizo, Fukuda Nobuko	4. 巻 32
2. 論文標題 Fabrication of extremely conductive high-aspect silver traces buried in hot-embossed polycarbonate films via the direct gravure doctoring method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Powder Technology	6. 最初と最後の頁 764 ~ 770
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.appt.2021.01.027	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kikkawa Taichi, Kumaki Daisuke, Tokito Shizuo, Fukuda Nobuko, Kusaka Yasuyuki	4. 巻 7
2. 論文標題 Nickel oxide-based flexible thin-film NTC thermistors by using reverse offset printing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Flexible and Printed Electronics	6. 最初と最後の頁 015003 ~ 015003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2058-8585/ac489f	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kusaka Yasuyuki, Fukuda Nobuko	4. 巻 30
2. 論文標題 Decomposition of pattern distortions by the Spread polynomial model in roll-to-sheet reverse offset printing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Micromechanics and Microengineering	6. 最初と最後の頁 095007 ~ 095007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6439/ab999c	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kusaka Yasuyuki, Kawamura Tadaharu, Nakagawa Masatoshi, Okamoto Kazuki, Tanaka Keizo, Fukuda Nobuko	4. 巻 32
2. 論文標題 Fabrication of extremely conductive high-aspect silver traces buried in hot-embossed polycarbonate films via the direct gravure doctoring method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Powder Technology	6. 最初と最後の頁 764 ~ 770
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.appt.2021.01.027	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 日下靖之	4. 巻 55
2. 論文標題 微細印刷エレクトロニクス	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本設計工学会誌	6. 最初と最後の頁 552-558
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 日下靖之	4. 巻 30
2. 論文標題 電子デバイスのための印刷プロセスサイエンス	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 クリーンテクノロジー	6. 最初と最後の頁 24-28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kusaka Yasuyuki, Takei Atsushi, Fukasawa Tomonori, Ishigami Toru, Fukuda Nobuko	4. 巻 11
2. 論文標題 Mechanisms of Adhesive Micropatterning of Functional Colloid Thin Layers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 40602 ~ 40612
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.9b13467	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kusaka Yasuyuki, Fukuda Nobuko, Ushijima Hirobumi	4. 巻 59
2. 論文標題 Recent advances in reverse offset printing: an emerging process for high-resolution printed electronics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SG0802
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab6462	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kusaka Yasuyuki、Takei Atsushi、Koutake Masayoshi、Fukasawa Tomonori、Ishigami Toru、Fukuda Nobuko	4. 巻 16
2. 論文標題 Micro-transfer patterning of dense nanoparticle layers: roles of rheology, adhesion and fracture in transfer dynamics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 3276 ~ 3284
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0SM00139B	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 15件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Yasuyuki Kusaka, Khiev Kimnannara, Masayoshi Koutake, Shinya Kanoh, Hiromitsu Furukawa, Nobuko Fukuda
2. 発表標題 Reverse Offset Printed Micro-supercapacitors
3. 学会等名 ICFPE 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuyuki Kusaka, Nobuko Fukuda
2. 発表標題 High-resolution printing of semi-solidified inks: process mechanisms and device applications
3. 学会等名 NNT 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 日下 靖之
2. 発表標題 エレクトロニクス応用のための微細印刷パターンニング技術
3. 学会等名 第22回マイクロ・ナノ加工研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 日下 靖之
2. 発表標題 高精細配線が要求される印刷デバイスとプロセス開発動向
3. 学会等名 エレクトロニクス実装学会 電子部品・実装技術委員会 プリントブルデバイス研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasuyuki Kusaka
2. 発表標題 Adhesive micropatterning of highly-concentrated colloidal thin layers
3. 学会等名 第72回コロイドおよび界面化学討論会国際シンポジウム（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuyuki Kusaka, Nobuko Fukuda
2. 発表標題 Fundamentals of semidried ink patterning for high-resolution printed electronics
3. 学会等名 IMID 2021（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuyuki Kusaka, Nobuko Fukuda
2. 発表標題 High-resolution printing techniques for solution-processed TFTs
3. 学会等名 IMID 2020（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 日下靖之
2. 発表標題 濃厚コロイド薄膜の破壊による微細印刷エレクトロニクス
3. 学会等名 第71回コロイドおよび界面化学討論会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yasuyuki Kusaka
2. 発表標題 Micropatterning of colloidal thin films for high-resolution printed electronics
3. 学会等名 TGSW 2020（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 日下靖之
2. 発表標題 高品質微細印刷のためのパターンニングモデルと寸法インテグリティ
3. 学会等名 IIP 2021（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯村兼一、片桐美沙、日下靖之
2. 発表標題 展開単分子膜表面構造を利用したウエットエッチングとオフセットプリンティング
3. 学会等名 第71回コロイドおよび界面化学討論会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 日下 靖之
2. 発表標題 一桁マイクロン微細印刷の技術
3. 学会等名 第16回色材IT講座（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 日下 靖之、武居 淳、深澤 智典、石神 徹、福田 伸子
2. 発表標題 Adhesion-based patterning of semidried nano-colloid thin films
3. 学会等名 Okinawa Colloids 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 日下 靖之、深澤 智典、石神 徹、福田 伸子
2. 発表標題 High-resolution printing of semidried nanoparticle thin films
3. 学会等名 APCChE2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 日下 靖之
2. 発表標題 Processing rules and materials in high-resolution printing for electronic devices
3. 学会等名 SSDM2019（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 日下 靖之
2. 発表標題 微細積層印刷の技術
3. 学会等名 2019年第2回ナノインプリント技術研究会公開講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 日下 靖之
2. 発表標題 微細印刷のパターニング原理と応用プロセス
3. 学会等名 最近の化学工学講習会68（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 日下 靖之
2. 発表標題 電子デバイスのための印刷プロセスサイエンス
3. 学会等名 第1回 粉体操作に伴う諸現象に関する勉強会（招待講演）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 日下靖之	4. 発行年 2020年
2. 出版社 三恵社	5. 総ページ数 256
3. 書名 塗布・乾燥技術の基礎とものづくり 新素材の利用と次世代デバイスへの展開 （最近の化学工学68）	

1. 著者名 日下靖之	4. 発行年 2019年
2. 出版社 オーム社	5. 総ページ数 781
3. 書名 ナノインプリント技術ハンドブック	

1. 著者名 日下靖之	4. 発行年 2020年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 1570
3. 書名 薄膜作製応用ハンドブック	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 電解質膜及びその製造方法	発明者 日下靖之、福田伸子	権利者 国立研究開発法人産業技術総合研究所
産業財産権の種類、番号 特許、2020-179003	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

https://staff.aist.go.jp/y-kusaka/

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	石神 徹 (Ishigami Toru) (70595850)	広島大学・先進理工系科学研究科(工)・准教授 (15401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------