

**最先端・次世代研究開発支援プログラム
事後評価書**

研究課題名	プリント技術によるバイオナノファイバーを用いた低環境負荷・低温エレクトロニクス製造技術の開発
研究機関・部局・職名	大阪大学・産業科学研究所・准教授
氏名	能木 雅也

【研究目的】

現在、太陽電池や電子ブックなどの次世代エレクトロニクスの開発最前線では、「脱ガラス」と「低環境負荷プロセス技術」をキーワードに研究開発が進んでいる。研究代表者は、地球上最も豊富なバイオマスであるセルロースナノファイバーから透明な紙（透明ナノペーパー）の開発に成功しており、低環境負荷プロセスが実現可能な“印刷技術によるデバイス作製技術：プリントド・エレクトロニクス技術”においても世界最先端の技術を有している。そこで、両者の技術を融合させ次世代デバイス製造技術におけるグリーン・イノベーションを起こすことを本申請課題の最終ゴールとした（右図）。

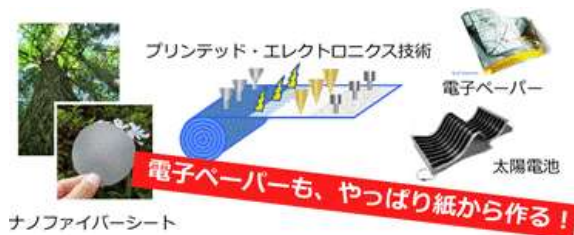


図 本研究課題の目的：ナノファイバーシートへ連続的にデバイス印刷しデバイスを製造。

その目的を実現するため目標として、4つの「期間内に達成すべき課題」と3つの「取り組むことが望ましい発展的な課題」を挙げた（表1）。

【1. 達成すべき課題】

- ① ナノペーパーの高性能化（製造プロセスの簡略化と透明性の向上）
- ② 基板表面処理・印刷・低温焼成など新たな印刷技術の開発。
- ③ 銀ナノ粒子や銀塩インクに代わる新たな金属ナノインクの開発。
- ④ それらの技術を融合し、紙基板へ高導電性な印刷配線の作製。

【2 取り組むことが好ましい発展的な課題】

- ⑤ 高温・高湿耐久性試験による電子部品への適用可能性を評価
- ⑥ 従来のプラスチック基板では実現不可能な“ナノペーパー”ならではの新奇デバイス特性の発見
- ⑦ 簡単なペーパーデバイスの試作

表1.申請時の「必須課題」と「発展的な課題」

<p>（1）期間内に達成すべき目標</p> <ol style="list-style-type: none"> ① ナノペーパーの高性能化 ② 新たな印刷技術の開発 ③ 新たな金属インクの開発 ④ ナノペーパーのうえに高導電性配線を作製 <p>（2）取り組むことが好ましい発展的な課題</p> <ol style="list-style-type: none"> ⑤ デバイス用途における温度・湿度の耐久性評価 ⑥ ナノペーパーエレクトロニクスならではの新奇特性の発見 ⑦ ナノペーパーデバイスの試作
--

【総合評価】	
○	特に優れた成果が得られている
	優れた成果が得られている
	一定の成果が得られている
	十分な成果が得られていない

【所見】
① 総合所見
<p>循環型社会の構築に不可欠なバイオマス由来のセルロースをナノ化することで得られるセルロースナノファイバーシートを基盤とし、先端電子材料として展開するために不可欠な新規プリンタブルエレクトロニクス技術を融合させる、最も困難だが素材と応用展開の谷を埋めるブレークスルーとなる研究成果が期待される課題である。その目的達成のために「必要な課題」と、「取り組みが好ましい課題」を明確に設定して研究を遂行し、いずれの課題もその目標を達成したばかりでなく、11件の特許出願からも明らかのように、当該研究領域におけるブレークスルーと呼ばれるにふさわしい優れた成果を上げている。本研究課題で得られた成果は、学術的な面ばかりでなく、循環型社会、真の低炭素化社会の実現に向けたキーテクノロジーとなりうるもので、社会的・経済的な観点からも非常に広範囲な波及効果を期待できる。また、本研究課題担当者らは、当該分野における人材育成という面にも配慮しながら研究を進めている。優れた成果を上げていること、人材育成にも貢献していることなどから、広い意味で将来の発展を期待させる。</p> <p>今後の緊喫の課題は、実用化に必要な生産技術の確立であり、性能試験と品質安定性についての知見を集積し、実用化のための技術に目処を付けることである。また、将来の実装展開の幅を拡げる技術の開発を期待したい。</p>

② 目的の達成状況
<p>・所期の目的が <input checked="" type="checkbox"/> 全て達成された ・ <input type="checkbox"/> 一部達成された ・ <input type="checkbox"/> 達成されなかった)</p> <p>本研究課題においては、下記に示すように、期間内に達成すべき目標として4つの課題を、さらに達成することが好ましい発展的な3つの課題を設定して取り組んだ。研究成果の欄に詳述するように、達成すべき4課題、発展的な3課題のいずれの課題についてもその目標を達成し、本研究の目的を果たした。したがって、本研究課題において残された課題はない。</p> <p>【1. 達成すべき課題】</p> <p>① ナノペーパーの高性能化（製造プロセスの簡略化と透明性の向上） ② 基板表面処理・印刷・低温焼成など新たな印刷技術の開発。 ③ 銀ナノ粒子や銀塩インクに代わる新たな金属ナノインクの開発。 ④ それらの技術を融合し、紙基板へ高導電性な印刷配線の作製。</p> <p>【2 取り組むことが好ましい発展的な課題】</p> <p>⑤ 高温・高湿耐久性試験による電子部品への適用可能性を評価 ⑥ 従来のプラスチック基板では実現不可能な“ナノペーパー”ならではの新奇デバ</p>

イス特性の発見

⑦ 簡単なペーパーデバイスの試作

達成された具体的内容は以下に示すとおりである。

- ①製造プロセスを簡略化しつつナノペーパーの透明性と耐熱性を向上させた。
- ②焼結技術として、銀ナノ粒子インクの流動メカニズム・キセノンフラッシュランプを用いた光焼結技術の検討を行うとともに、微細配線印刷技術として、基板受理層を開発した。
- ③各種金属ナノマテリアルの合成法とインク組成の検討を行い、印刷・低温焼結可能な金属ナノインクを開発した。
- ④ $4.0\mu\Omega\text{cm}$ という銀バルク並みの高導電性配線をナノペーパーへ世界で初めて印刷した。
- ⑤電子デバイス実装分野で採用されている耐久性テストを用い、導電性紙配線が優れた耐久性を有することを明らかにした。
- ⑥これまで不可能であった「折り畳める導電性配線」の作製に成功した。
- ⑦太陽光発電する紙・ペーパートランジスタアレイ・折り畳める高感度紙アンテナを世界で初めて開発した。この発表に続き、幾つかのペーパー太陽電池が世界中で発表されているが、我々のペーパー太陽電池は世界最高の変換効率を誇っている。

③ 研究の成果

・これまでの研究成果により判明した事実や開発した技術等に先進性・優位性が
(ある ・ ない)

・ブレークスルーと呼べるような特筆すべき研究成果が
(創出された ・ 創出されなかった)

・当初の目的の他に得られた成果が (ある ・ ない)

本研究課題における研究成果を、それぞれ以下に簡潔に記した。

(1) 達成すべき課題

- ①ナノペーパーの高性能化 (図 2a, 2h) : 木材細胞壁やナノペーパーにおけるナノファイバー微細化構造に着目し、製造プロセスを簡略化しつつナノペーパーの透明性と耐熱性を向上した。
- ②印刷技術の開発 (図 2b) : 焼結技術として、銀ナノ粒子インクの流動メカニズム・キセノンフラッシュランプを用いた光焼結技術の検討を行った。また、微細配線印刷技術として、基板受理層の開発も行った。
- ③金属ナノインクの開発 (図 2c) : 銀ナノワイヤをはじめ、各種金属ナノマテリアルの合成法とインク組成の検討を行い、印刷・低温焼結可能な金属ナノインクを開発した。
- ④高導電性印刷配線 (図 2d) : 課題①～③の知見を統合し、 $4.0\mu\Omega\text{cm}$ という銀バルク並みの高導電性配線をナノペーパーへ世界で初めて印刷した。

(2) 取り組むことが好ましい発展的な課題

- ⑤耐久性評価 (図 2e) : 電子デバイス実装分野で採用されている耐久性テストを用い、導電性紙配線が優れた耐久性を有することを明らかにした。
- ⑥新奇特性開発 (図 2f) : 従来のプラスチック基板では実現不可能な「ナノペーパー」

ならではの新奇特性の探究を行った。その結果、これまで不可能であった「折り畳める導電性配線」の作製に成功した。

⑦ペーパーデバイスの試作 (図 2g, 2i) : 以上の知見を融合し、折り畳める高感度アンテナ・太陽光発電する紙・ペーパートランジスタなど多種多様なペーパーデバイスを世界で初めて作製した。

以上のように、「4つの達成すべき研究課題」と「3つの取り組むことが好ましい発展的な課題」を、本研究期間内において全て達成した。

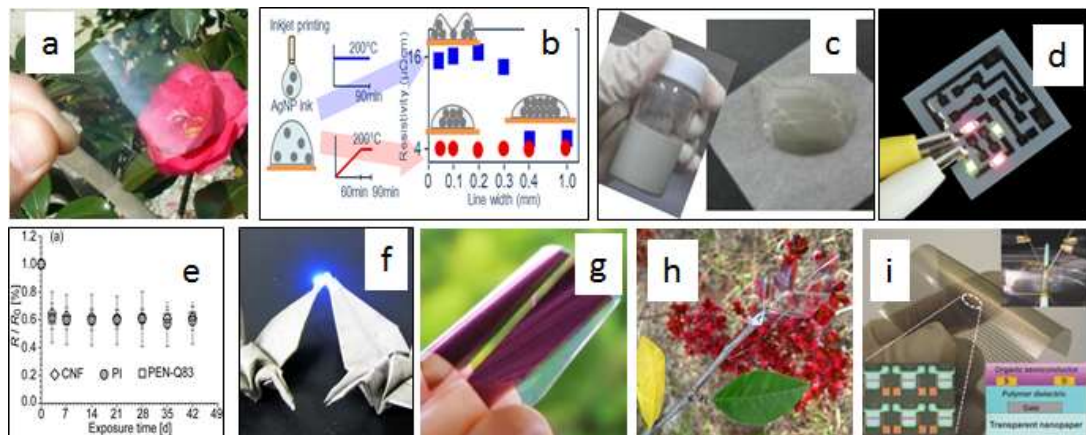


図2 (a)製造プロセスを改良した透明ナノペーパー、(b)印刷配線の焼成メカニズム検討、(c)銀ナノワイヤインク、(d)インクジェット印刷配線、(e)高温・高温高湿条件下での耐久性評価、(f)折り畳める導電性ペーパー、(g)ペーパー太陽電池、(h)、高耐熱性透明ナノペーパー、(i)ペーパートランジスタ。

1) 研究成果の先進性や優位性

上記 7 つの主たる研究成果に関して、各々の先進性・優位及び特記事項を記載する。

① : ナノペーパーの高性能化

これまで透明な紙は、他の透明材料に比べて若干透明性が劣ると考えられてきた。本課題担当者らは、理論値に匹敵する光透過率を有する透明ナノペーパーを開発し、その疑念を払拭した。この成果は学術的に高い評価を受け、Applied Physics Letters に掲載され、国際学会においてポスター賞 (2 件) を受賞した。さらに、産経新聞・TBS・よみうりテレビ・関西テレビなど各種マスメディアで紹介された (図 3)。

② : 新たな印刷技術の開発

微細かつ高導電性の印刷配線を作製するために、焼成条件や基板受理層 (多孔質タイプ・膨潤タイプ) に関する学術的な考察を行った。これらは、紙基板に拘らずプリントド・エレクトロニクス全般において重要な成果であり、3 報の学術論文 (RSC Advance, ASC Appl. Mater. & Inter. など) と



図3 本研究課題のテレビ・新聞・雑誌などでの紹介、ならびに各種学会の賞状

特許出願（1件）、国際学会ポスター賞受賞（2件）など、その先進性と優位性が高く評価されている。

③：新たな金属インクの開発

本課題担当者らが開発した「銀ナノワイヤインク」と「銅塩インク」の新規金属ナノインクは、いずれも低温焼成・各種印刷方法への適用が可能であり、プリンテッド・エレクトロニクスへの多大な貢献が期待される。そのため、銀ナノワイヤインクを用いた透明導電膜の開発において「貴金属に関わる研究助成MMS賞」、銅塩インクの開発において「エレクトロニクス実装学会 研究奨励賞」を受賞した。

④：ナノペーパーへ高導電性配線を作製

これまで紙の上に導電性配線を作製するには、ポリマー系材料などの受理層が必須であったが、受理層のない紙の上に金属バルク並み（体積抵抗率 $4.0 \mu \Omega \text{cm}$ ）の高導電性配線の作製に成功し、LED ライトを点灯させた。配線の作製は、金属ナノ粒子や金属塩インクの印刷、スパッタ処理など多岐にわたる。この成果は、Nanoscale に掲載、Hot Articles へ選出された。さらに、デバイス作製に向けて極めて重要な知見であるため、日刊工業新聞において3度にわたって特集された（図3）。

⑤：温度・湿度に対する耐久性評価

いかなる材料も、電子デバイス部材として使用するには非常に厳しい耐久性・信頼性テストをクリアする必要がある。本課題担当者らは高湿度・高温環境下における信頼性テストを行い、ナノペーパー配線が車載用デバイス部品としての信頼性を満たすことを明らかにし、J. Mater. Chem. Cにて発表した。この結果は、ナノペーパーデバイスの可能性を実証した極めて重要な結果である。

⑥：ナノペーパーエレクトロニクスの新奇性

セルロースナノペーパーと銀ナノワイヤインクを用い、プラスチック基板やガラス基板では不可能であった折り畳める導電性配線を世界で初めて開発した。この材料は“折り紙エレクトロニクス”という新しい概念を切り拓き、ウェアラブルなコンピュータや医療センサーなどを実現すると期待される。この成果は、英国国立科学協会の発行する学術雑誌 Nanoscale に掲載され、さらに特筆すべき研究成果の一つに選ばれ weekly RSC Publishing press pack として世界中の科学ジャーナリストへ配信された。日本においては、読売・朝日・日刊工業新聞・化学・化学と工業など各種メディアで紹介された（図3）。

⑦：ナノペーパーデバイスの試作

ナノペーパーデバイスとして、太陽光発電する紙・ペーパートランジスタアレイ・折り畳める高感度紙アンテナを世界で初めて開発した。この発表に続き、幾つかのペーパー太陽電池が世界中で発表されているが、本課題担当者らが開発したペーパー太陽電池は世界最高の変換効率を誇っている。この成果は、朝日・産経・毎日・日経新聞・化学工業日報・日経ビジネスオンライン・Tech On!・TBS テレビなど幅広いメディアで紹介された（図3）。

2) 先進性・優位性、ブレイクスルーとなる研究成果

上記の研究成果のうち、特に先進性・優位性がありブレイクスルーとなった研究成果は、“ナノペーパーの高性能化”と“銀ナノワイヤインク”の開発である。

“ナノペーパーの高性能化”は、本課題における研究成果の起爆剤となっただけでなく、各種企業が透明ナノペーパーの本格的な研究開発スタートや、それら企業から

のサンプル提供または販売開始の契機となった成果である。

ナノペーパーと非常に高い親和性を有する“銀ナノワイヤインク”の開発に成功し、透明配線や透明導電膜といった新規電子デバイス部材を開発した。その結果、高感度アンテナやペーパー太陽電池などナノペーパーデバイスの試作に成功し、ナノペーパーを用いた「折り紙エレクトロニクス」という新たな概念を電子デバイス分野に提案できた。

3) 特記すべき成果

上述したように、各々の研究成果は学術的・社会的に広く評価されている。そして「セルロースナノファイバー技術とプリンテッド・エレクトロニクス技術の融合」という課題設定も、次世代グリーン・イノベーション技術のひとつとして注目を集めており、研究代表者は“平成 23 年度 大阪大学功績賞（研究部門）”、“平成 24 年度 大阪スマートエネルギービジネスシーズコンペ <基礎技術部門> 優秀賞”、“大阪大学総長顕彰”を受賞している。さらに、近畿経済産業局が選出した“関西発 選りすぐり大学技術集”の一つにも選出された

④ 研究成果の効果

・研究成果は、関連する研究分野への波及効果が

(見込まれる ・ 見込まれない)

・社会的・経済的な課題の解決への波及効果が

(見込まれる ・ 見込まれない)

本研究課題において、ナノペーパーと印刷技術を用いて世界で初めて高感度アンテナや太陽電池を作製し、ナノペーパーが電子デバイス用印刷配線基板として利用可能であることを明らかにした。

これらの成果が、関連研究分野に与えるインパクトは大きい。これまでセルロースナノファイバー材料は「プラスチック複合強化材料」と「ガスバリア膜」という2つの用途に限られていたが、この成果によって第3のアプリケーション「電子デバイス」が加わった。この成果は、木質材料ならびにセルロース研究分野のますますの発展を促すと期待されている。そして、プリンテッド・エレクトロニクス研究分野においては、ナノペーパーという高耐熱性・折り畳み可能なフィルムの登場が「脱ガラス・軽量・フレキシブルデバイス」の実現をより一層加速すると注目されている。セルロースナノファイバーは、地球最大のバイオマス：植物細胞壁の基本骨格であるため、人類が使用可能な材料のうち唯一の持続的発展可能な材料である。また、プリンテッド・エレクトロニクス技術は、高温焼成が不要であり、必要最低限の材料を使用して金属配線などを形成するため、極めて環境負荷の小さな技術である。本研究における成果はこれらの技術に立脚した技術であるため、今後、世界に先駆けたグリーン・イノベーションの推進に貢献すると期待される。

このように、原料からプロセスに至るまで低環境負荷技術を取り揃えたこれらの研究成果は、真の低炭素化社会の実現に向けたキーテクノロジーとなりうる。循環型社会基盤の構築と、低炭素社会の構築という世界が抱える課題解決につながる研究である。また、森林産業の不活性化が問題となっているが、森林が持つセルロース素材を高付加価値材料に変換できれば、川下側から川上の森林産業の活性化も期待できる。

これらの成果は学術的な面のみならず、社会的・経済的な観点から非常に広範囲な

波及効果が期待される。

⑤ 研究実施マネジメントの状況

・適切なマネジメントが（行われた ・ 行われなかった）

本研究課題では、多くのすぐれた成果が得られており、研究目標達成に向けての研究計画が適切であったばかりでなく、マネジメントにおいても優れされていたと判断できる。関連分野の研究室との協働体制、専門家との協議等により課題設定が的確になるよう、極めて円滑に情報交換していると判断できる。採択時、中間評価時の指摘事項に対しても、適切に対応し優れた成果に導いている。研究代表者の信念、努力と優れたマネジメントによりプリンタブルエレクトロニクスの新機能を見出していると言える。

助成金の活用については、研究費の多くは人件費に使用されており、当該研究領域の拡大と人材育成に配慮した体制となっている。人材も研究成果に対応してフレキシブルに配置しており、適切に管理している。購入した大型備品は使用頻度が高く、有効に利用されている。

インパクトの大きい学術誌への発表をはじめ、成果の公表、知的財産権の出願、国民との科学技術対話等においても、下記の通り積極的に取り組んできたと評価できる。

雑誌論文：合計 40 件（全て掲載済み、査読有 40 件）

プロシーディング・紀要：合計 58 件（掲載済み・査読無）

総説：23 件（掲載済み・査読有 9 件、査読無 14 件）

会議発表：合計 79 件（国内学会 27 件、国際学会 6 件）

専門家向け招待講演：合計 33 件（うち国内学会 27 件、国際学会 6 件）

一般向け招待講演：合計 23 件

書籍：合計 15 件

テレビ・新聞・一般雑誌への掲載：合計 51 件（うち国内 45 件、海外 5 件）

知的財産権：11 件（すべて出願中）

国民との科学・技術対話：東京・大阪・京都など日本全国で 18 件のアウトリーチ活動を行った。

さらに、本研究課題を紹介するホームページを作成し、毎週、その掲載情報を更新してきた。所属機関と連携した発信も積極的に行っている。