

紙のエレクトロニクス研究開発動向

江前 敏晴

紙のエレクトロニクス応用研究会 代表幹事, 筑波大学生命環境系 教授

Resent Trend of Research and Development in Paper Electronics

Toshiharu Enomae

Chairman, Paper Electronics Research Association

Professor, Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

ABSTRACT

“Paper electronics” has become popular in industry since approximately 2010. This new stream had been more demanded from the side of electronics industry that implemented flexible printed electronics. Around that time, paper production and demand started to decrease and thus the paper industry has been exploiting a new market of paper products. The two industries together have quested for paper-made electronics. Under such situation, coordinators, creators, and researchers cooperatively established the paper electronics research association (PERA). PERA held technology and research meetings seven times thus far. Some of the topics presented there were (1)“nano-cellulose—an attractive material for paper electronics” referring to transparency, reinforcing properties and carbon neutrality as advantages, (2)“recent folding paper research” referring to the development of folding paper design application, and self-folding and hydro-fold techniques, (3)“electrostatic motor” to drive Decotra and create movable posters and so on. Upon these successful activities, PERA initiated three new sectional committees to develop practical paper electronics products. New paper electronics products are expected to be created resulting from the cooperative work.

1. 紙のエレクトロニクスとは何か

「紙のエレクトロニクス」が産業分野において提言され研究の対象となったのは、2010年ごろからと思われる。従来のエレクトロニクス基板は、セラミックスやガラスのような堅牢な平板材料であった。これは電極・半導体膜・絶縁膜などを形成するエレクトロニクス製造工程において加熱や真空に耐えられることや、断線やひび割れを防ぎ確実な連続体をつくるための平滑性や熱安定性といった特性が不可欠だったからである。しかし、さまざまな曲面や人体に触れるようなフレキシブルなエレクトロニクスが必要になってくると、基板は曲げることができる特性が求められるようになりプラスチック基板が普及した。このような材

料の変化とともに、材料の無駄が多い蒸着による薄膜形成から、必要な量の材料を基板に載せることができ、量産が可能な印刷方式による製造法が導入された。

印刷によって製造されるエレクトロニクスは「プリントドエレクトロニクス」と呼ばれる。蒸着法に比べると細線を描く精度は低いものの、アンテナやセンサーのような、ある程度の面積を必要とするエレクトロニクス製品やパーツには印刷法がきわめて有効である。またプリントドエレクトロニクスが普及すれば、基板としてプラスチック類以外に紙の活用も十分に考えられる。紙は元来印刷基材としての特性を備えており、印刷適性を向上させる技術がそのまま電子回路の印刷技術に応用できる。ペーパーエレクトロニクスの創製はこのようにして

研究者や技術者が、エレクトロニクス製造におけるこのような流れのなかで、取り組み始めた。

一方、アーティストやクリエイターと呼ばれるデザイナーの人たちは、包装材料やPOPなどの広告媒体として日常的に紙を使用しているが、そこにエレクトロニクスの要素を組み込むことによって、より宣伝効果を高めようとする動きが出てきた。そのようななか、山下潤一郎氏（ライター・レイター代表）が中心となり、その他大学の研究者7名、製作および利用に関わるメーカーから3名、アーティストおよびクリエイター4名が発起人となって「紙のエレクトロニクス応用研究会」（以下、紙エレ研）が2014年7月に発足した。

その後、発起人は幹事となり、筆者は

代表幹事となった。この研究会のユニークな点は、大学・研究機関などの研究者・技術者、製造メーカー等、アーティストやクリエイターという3つのセクターがアイデアを出し合いながら、ビジネスとして受け入れられるようなペーパーエレクトロニクスを生み出そうというセクター間連携にある。とくにアーティストやクリエイターのなかでコーディネーターの役割を担う人が中心となって連携を図る点がユニークである（図1）。



図1 紙のエレクトロニクス応用研究会のセクター間連携

2. 紙エレ研で紹介された製品・技術の開発事例・研究事例

紙エレ研では2016年6月までに計7回の技術研究発表会（以下、発表会）を開催し、各セクターから毎回1名ずつ計3名が紙のエレクトロニクスに関する話題を提供している（表1）。会場は、IGAS2015会期中に東京ビッグサイトで開催した第3回を除き、いずれもco-lab 西麻布のクレイサロン（東京都港区

西麻布2-24-2 KREIビル）である。ここでは上記技術研究発表会において報告されたなかから、新しい技術や研究の事例をいくつか紹介する。

(1) ナノセルロース～ペーパーエレクトロニクスの注目材料

能木雅也准教授（大阪産業技術研究所）は第7回（2016年6月）の発表会において、「ナノセルロース～ペーパーエレクトロニクスの注目材料」について紹介し、セルロースナノファイバー（CNF）が、透明性を維持したプラスチックの補強材や連続透明シートの製造に活用できる材

料であることをまず説明した。

CNFを用いたプリントドエレクトロニクス技術の開発に関しては、アンテナのような印刷配線の作製のほか、電気の流れる透明な紙が作製できること、不揮発性メモリー、トランジスタ、太陽電池の基板に適しており、これらが試作されていることが紹介された（図2）。このようなナノ・ペーパーデバイスの基板としての適性は、CO₂の排出削減につながる（木材から製造されるため）、熱に強いこと、材料に還るリサイクル性があること、自然に還るカーボンニュー

表1 紙のエレクトロニクス応用研究会の技術研究発表会の発表者と題目

開催日	発表者（所属）	発表題目
第1回 (2014年11月11日)	江前敏晴（筑波大学生命環境系 教授）	各種学会での紙のエレクトロニクス応用研究会の広報と反応
	杉本雅明（AgIC(株) 取締役）	簡易回路制作ツールが開くペーパーエレクトロニクス業界の未来
	小杉博俊（株システムクリエイツ 代表）	IT時代のものづくりに挑戦
第2回 (2015年3月19日)	中山裕一朗（中山商事(株) 取締役社長）	創業88年紙加工メーカーの技術と開発商品紹介および新商品開発提案
	古賀大尚（大阪大学産業科学研究所 助教）	紙内部の空隙構造を活用するペーパーエレクトロニクス
	松山真也（アーティスト）	テクノロジー・アーティスト松山真也の作品紹介
第3回 (2015年6月25日)	前田秀一（東海大学工学部 教授）	機能性材料を内包した中空繊維
	志野成樹（三菱製紙(株)）	三菱製紙の銀ナノ粒子関連技術の紹介
	林俊美（株東急エージェンシー）	グラフィック表現に質感を与える広告事例の紹介
第4回 (2015年9月14日、 IGAS会期中)	小杉博俊（株システムクリエイツ 代表）	「DECOTRA PAPER CRAFT」説明
	岩下敦（株川口電機製作所）	フィルモ（静電モータ）の製品化
	江前敏晴（筑波大学生命環境系 教授）	紙基板のセンサーとエレクトロニクスの開発
	佐藤利文（東京工芸大学工学部 教授）	紙の上で光るEL素子
第5回 (2015年11月30日)	小杉博俊（株システムクリエイツ 代表）	展示ブース「デコトラ」について
	鳴海紘也（東京大学）	銀ナノインクによるアドホックな回路作成のための支援ツール
	河原大助（株東急エージェンシー）	リアルな“モノ”としての紙のコミュニケーションの可能性
	辻智和（株ショウエイ）	当社の印刷技術の概要
第6回 (2016年3月14日)	小杉博俊（株システムクリエイツ 代表）	IGAS2015「デコトラ」展示のその後
	三谷純（筑波大学システム情報系 教授）	近年の折紙研究の動向
	関戸将光（株協同制作 執行役員）	POP事例とデジタル印刷への取組みについての紹介
	山下潤一郎（ライター・ライター 代表）	紙エレ研で新市場開拓に成功するポイントとは ～「残念な製品」を開発しないために～
第7回 (2016年6月9日)	小杉博俊（株システムクリエイツ 代表）	分科会活動の現状と来年度へ向けての展望について
	能木雅也（大阪大学 准教授）	ナノセルロース～ペーパーエレクトロニクスの注目材料～
	堀江利彦・掛晃幸（株ワコム）	協創で拓くデジタル文房具の世界
	山田歩（株A 代表取締役社長）	共創オープンイノベーションの最新動向

注）発表者名は敬称略

進化する紙：ペーパーデバイスに向けて

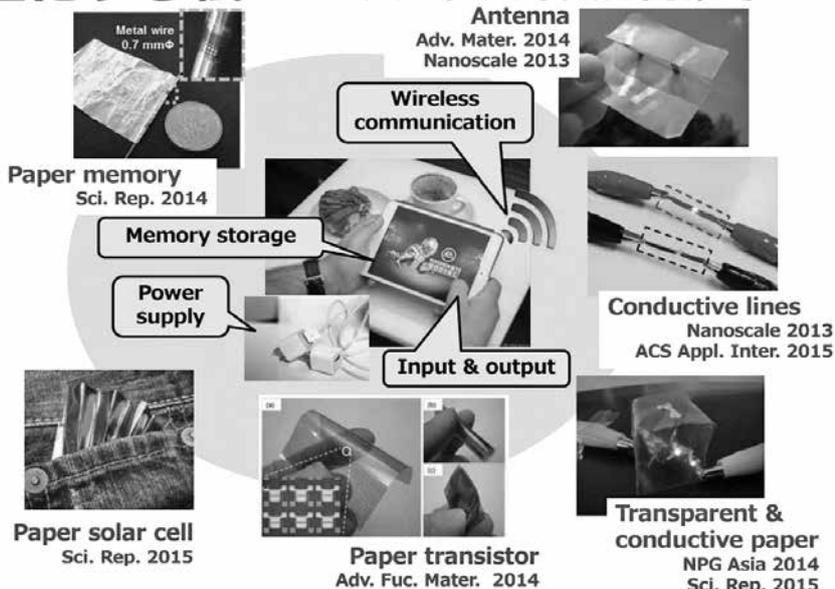


図2 能木雅也氏のセルロースナノファイバを用いたペーパーデバイス (同氏の発表より)

のことである。

エレクトロニクス製品への応用の可能性を示す折り紙として、Self-folding (自折れ)がある。米国MIT(マサチューセッツ工科大学) Media Labの“Electronic origami” (図4)は、赤と白の2枚の紙にそれぞれ回路が描かれ、赤 (Input)の紙を折り曲げると、白 (Output)の紙がその折り方に倣って同じように自動的に折れる、というシステムを紹介した。赤の紙の折れ方をセンサー回路が認識して白い紙の回路に電気信号を送る一種のスイッチングシステムである。

また、Hydro-fold (水折り)は、特殊なインクで線を印刷するとその線の部分が山折りとなってゆっくりと自動的に折れながら何らかの形状をつくっていくシステムである (図5)。紙を大きく膨張させるような特殊なインクが使われているようである。伸縮する金属のアクチュエーター素子を多数格子状に組み込んだシートにプログラム通りに各アクチュエーターをフラットか山折りにすることにより、自由な形状をつくり出すスマートシートもMITにより開発されている。シュリンクフィルムや形状記憶ポリマーを応用して加熱により折り曲げさせる方式も紹介された。これらの技術は

トラリティがあることである、と述べた。

(2) 近年の折紙研究の動向

三谷純教授(筑波大学システム情報系)は、第6回(2016年3月)発表会において「近年の折紙研究の動向」をペーパーエレクトロニクスの観点から紹介した。

折り紙は古くから身近な遊びの1つとして親しまれる一方で、幾何学に基づく折り紙の数理に関する研究も盛んに行われてきた。近年では、これらの蓄積から得られた知見と、計算機を用いた設計

およびシミュレーション技術の発展により、ロボットや微小な構造体の制作などの分野においても、折り紙が研究対象とされるようになってきているという。

三谷教授ご自身は、ORI-REVO, ORI-REF, ORI-CAD (図3)など折り紙設計アプリケーションを開発され、任意の形状をもつ回転体の折り方を自動設計する技術を提供している。この技術は実際にベビーバギーの幌の蛇腹折りや回転体型帽子の設計に応用されていると

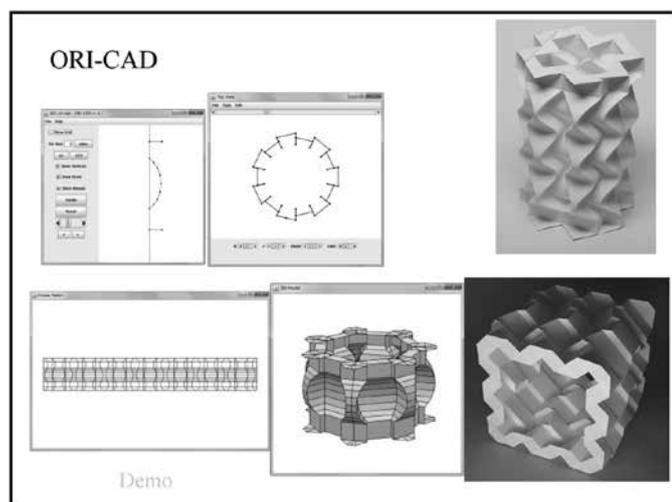


図3 三谷純氏のアプリケーション ORI-CAD (同氏の発表より)

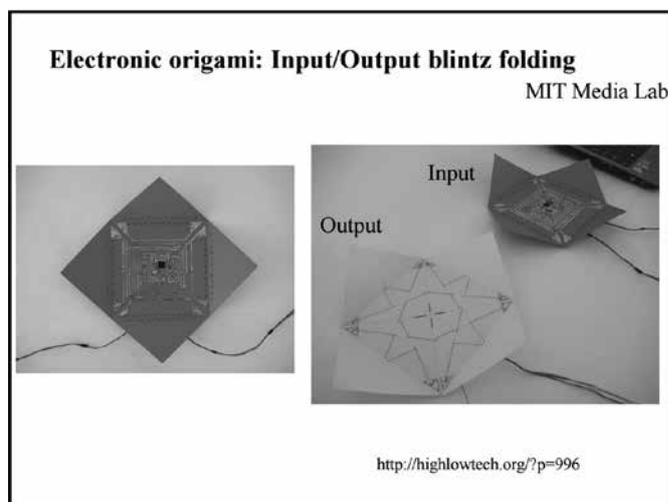


図4 Electronic origamiでは赤の紙を折った通りに白い紙が自動で折れる (三谷純氏発表より)

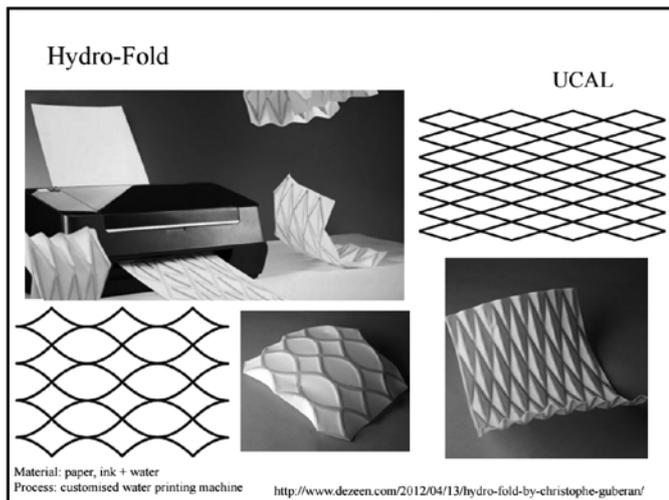


図5 Hydro-fold ではインクジェット印刷した線が山折りとなるよう自動で折れる (三谷純氏発表より)

ロボット製作にも応用されているという。

(3) 銀ナノインクによるアドホックな回路作成のための支援ツール

鳴海紘也氏 (東京大学) は、第5回発表会 (2015年11月) で「銀ナノインクによるアドホックな回路作成のための支援ツール」について発表した。導電性を発現させるために百数十度の熱処理が必要であった従来の銀ナノインクと違い、紙の上に手描きするだけで回路を作成できるよう銀ナノインクが登場したが、正しく回路を作成することは案外難しく、電気回路作成の知識をもたないユーザでも思い思いに回路をつくることのできるためのツールについて紹介した。

インクジェット印刷できる銀ナノインクシステム、貼り付けられるステッカー型の部品回路、手作業で導線ができる銅テープと導電性粘着などのツールに比べても格段に作業性の高い導電性インクペンを紹介したが、「描き直しができない」と「回路の誤りを知る方法がない」という2つの問題があることを指摘した。描き直しには、溶剤の比較の結果エタノールを浸み込ませたスポンジで拭き取るのがよいことを見出し、「Circuit Eraser」として製品化した。また回路の誤りに関しては、回路を撮影して線幅な

どの解析から原因を指摘するアプリケーション「ConductAR」を開発し、計算時間5秒以内で、誤判断率7%以下を達成したということであった (図6)。

3. 紙エレ研の活動

ペーパーエレクトロニクスに 응용できそうな技術発表に触発されて、紙エレ研としても何か具体的な技術を生み出していけないだろうかという機運が高まった。ちょうど2015年9月に東京ビッグサイトで開催された国際総合印刷機材展 (IGAS2015) で業界団体としての招待を受け、ブース展示をさせていただく機会を得たのに合わせ、紙エレ研幹事を務める (株) システムクリエイティブ代表・デザイナーの小杉博俊氏主導で紙エレ研の個人会員、賛助会員企業と連携してデコトラ展示を行うことを決めた。

製作に当たっては、(株) 東急エージェンシーの河原大助氏、林俊美氏らと「Team DECOTRA」を結成し、賛助会員となっている (株) 川口電機製作所がデコトラ制作・回路設計を担当、その他、(株) ショウエイ (データ制作・4Cプリント)、AgIC (株) (配布用ミニトラプリント)、(株) 東急エージェンシーおよび (株) バードランド (ロゴ & デコトラデザイン)、(有) ラディカル (ウェブサイト制作) の協力を

問題	描き直しができない	誤りを知る方法が無い
解決策		

図6 回路を描き直すペンと線幅解析により回路の誤りを指摘するアプリケーション (鳴海紘也氏の発表より)



写真1 IGAS2015での紙のエレクトロニクス応用研究会ブース

得て、デコトラの制作にあたった。

IGASでの展示期間は静電モータを印刷した大面積のフィルム上でLEDの電飾を施した模型のデコトラを走らせ、大勢の見学者で賑わった (写真1)。なお、このデコトラに関するウェブサイト (<http://decotra.jp/>) が公開されている。

この静電モータは、大日本印刷(株)が開発したPOP広告用の動くポスター「フィルム」を応用したもので、裏面に配線を施したポスターに小さなプラスチックフィルム (紙でもよい) を載せると静電気を帯びてスルスルとポスター上を動く。IGAS期間中に開催した第4回発表会では岩下敦氏 (株) 川口電機製作所が「静電モータの製品化」について発表し、原理を次のように説明した。

高電圧をかけた正極と負極を並べたシートの上に一片の絶縁体フィルムを置く。正極と負極をわずかにずらすと静電気により正極はフィルムの負電荷部分を、負極は正電荷部分を

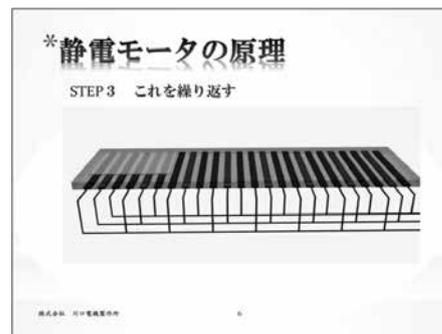
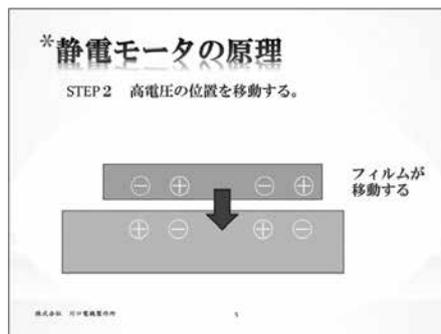
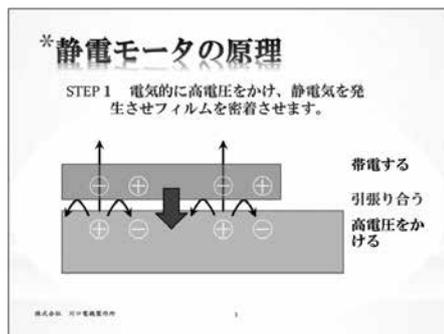


図7 静電モータの原理（岩下敦氏の発表より）

引っ張ろうとしてフィルムが移動する。これを繰り返すことでゆっくりとフィルムが動いていく（図7）。実際には電極を3本つくり、3相交流を流す。これはリニアモーターカーと同じ原理である。

デコトラ製作を契機に具体的なペーパーエレクトロニクスを開発する3つの分科会が2016年3月に発足した。

- ① 紙モーター商品開発分科会（参加者8名）
- ② ポスターが動くPR媒体づくり分科会（参加者9名）

③ 動く表具づくり分科会（参加者11名）
であるが、秘密保持のため活動の内容は非公開となっており、途中入会も現時点では認めていない。

4. 紙のエレクトロニクス分野の現状と今後の展望

紙基板のエレクトロニクスは、紙に転移ただけで導電性が発現する銀ナノインクを活用し、手書きやインクジェットプリンタを利用して簡単に電子回路を

描くことで製作することができるようになった。作業性や生産性が向上したことに加え、紙という安価な材料が活用できるため、教材や試作品製作において有効に活用されつつある。

ただし、汎用のエレクトロニクス製品とするには回路の安定性などをさらに改善していく必要がある。また用途開発という点からもまだ発展途上にあり、今後各セクターのアイデアを結集することにより、大きな市場を獲得していく期待が高まっている。

紙のエレクトロニクス応用研究会

11月28日に「第9回技術研究発表 & 交流会」

紙のエレクトロニクス応用研究会（以下、紙エレ研、代表幹事：江前敏晴氏＝筑波大学教授）は11月28日午後3時より、3331Arts Chiyoda（東京都千代田区外神田6-11-14、東京メトロ銀座線・末広町駅4番出口徒歩3分）において「第9回技術研究発表 & 交流会」を開催する。

紙エレ研では2014年7月の発足以来8回の技術研究発表会を開催。毎回、①大学・研究機関などの研究者・技術者、②製造メーカーなど、③アーティスト、クリエイター——の3セクターから先進的な研究開発や活動に取り組む人々を招聘しており、今回は以下3件の話題が提供される予定。

(1) ペーパーメカトロニクス：紙に印刷して作るロボットの紹介（早稲田大学総合機械学専攻・菅野研究室／重宗宏毅氏）；演者は

シート状材料に各要素を印刷することによるロボットの作製、すなわちペーパーメカトロニクスともいべき新しいモノづくりに取り組んでいる。本講演では、ペーパーエレクトロニクスの技術を用いて作製された基板が自動で構造形成し、電流を流すことで駆動する過程について述べる。

(2) セルロースナノファイバーの特徴と今後の展開（中越パルプ工業・開発本部開発部長／田中裕之氏）；鋼鉄の5～8倍の強度、石英ガラス並みの低熱膨張性、軽量、再生可能資源であるなど優れた特性から注目されているセルロースナノファイバー（CNF）について、製造法、特徴、用途例を紹介。

(3) 切手と印刷（日本郵便・主任切手デザイナー／玉木明氏）；使用者の趣向多様化にともない、さまざまなデザインが求められる



前回（第8回）技術研究発表のようす

一方、準有価証券としての側面を有することから安定した水準の印刷が求められる切手に関し、各種印刷技術を解説する。

なお、参加費は資料代1,000円、終了後の交流会会費500円（いずれも会員は無料）で、定員40名（法人会員は人数制限なし）。

問合せ先

紙のエレクトロニクス応用研究会・事務局
e-mail Jimukyoku@paperelectronics.org
URL <http://www.paperelectronics.org/>
facebook 公開ページ URL <https://www.facebook.com/PrintedElectronics>