



< 第 4 回 >

プリントドエレクトロニクス時代実現に向けた材料・プロセス 基盤技術の開拓

NEDO プロジェクト プロジェクトリーダー 東京大学教授 染谷 隆夫氏に聞く

20 世紀の後半に、シリコンの集積回路は、微細化技術の追求により高集積化、高性能化を継続的に実現し、エレクトロニクスの著しい進歩をもたらした。しかし、情報化時代の形成の立役者となった。しかし、その進化も飽和に近付いている。一方、社会ニーズも 21 世紀に入って地球環境問題、エネルギー問題、人間のライフに関連する課題への対応にシフトしてきた。この時代に即した技術として印刷技術とエレクトロニクスを融合するプリントドエレクトロニクスが注目されている。国内外で研究開発が行われているが、実用化へのハードルは高い。

こうした状況にブレークスルーを求めて NEDO プロジェクト「次世代プリントドエレクトロニクス材料・プロセス基盤技術開発」が進められている。このプロジェクトは、2013 年 1 月 30 日～2 月 1 日に東京国際展示場で開催された nano tech 2013 国際ナノテクノロジー総合展の最終日に行われたナノテク大賞表彰式において、プロジェクト部門賞を受賞した [1]。表彰理由は「産学官を結集して印刷法で電子素子を作る技術を実用化させる研究開発体制を整備し、曲げられる電子ペーパーや圧力センサの開発など、新市場創出に貢献する技術を生み出そうとしている活動を賞す。」とのことである。

今回、この部門賞受賞のプロジェクトのリーダーである東京大学 大学院工学系研究科 電気系工学専攻 教授 染谷 隆夫（そめや たかお）氏を本郷の研究室に訪ね、お話を伺った。

東京大学 工学系研究科 電気系工学専攻
教授 染谷 隆夫氏

.....



1. プロジェクトの背景と狙い

染谷氏は、この NEDO プロジェクト [2] はスタートしてから現在 2 年であり、大きな成果への期待が膨らみつつあるというこの時点で nano tech 2013 の賞を受けたことについて、今後の励みになるとの前置きのあと、次のようにプロジェクトを立ち上げた背景と狙いを述べられた。

「本 NEDO プロジェクトの狙いを一言で申し上げると、

柔らかい電子回路を印刷技術によって連続生産することが出来るようにすることである。」

これまでのエレクトロニクスの進化の方向は、半導体素子を高速にしたり、集積密度を高めることや、コンピュータの演算速度を高速にしたり、記憶容量を大きくすることであり、そのための開発競争が行われてきた。しかし、最近はその競争は飽和してきており、もう少し別の視点で研究開発するように全体のトレンドがシフトしてきている。具体的には iPhone, iPad など次世代情報端末が現れて、タッチパネルにより操作性が改善され、

情報ネットの使い勝手が変わってきている。これは機械を高性能化することから機械を人間にとって使い易くするという視点、即ち、ユーザーインタフェースが重要になってきたことを示している。日本では物造りの事業だけでは高い収益性を維持するのは難しいと云われてきたが、iPhone、iPadなどの新しい端末の誕生によりこれを利用する新しいコンテンツが載って大きな市場が開けて行くことになる。そのきっかけはハードウェアであり、そのハードウェアの差別化ポイントは人にとって使い易いと言うユーザーインタフェースにある。

こうした背景のなかで、柔らかい電子回路、人間にとって親和性の高いユーザーインタフェースに対する期待が高まっている。例えば、フレキシブルな電子ペーパーとか、ディスプレイでも単に表示するだけでなく入力機能を持たせ入出力が一体化した装置などである。こういう人にとって使い易い新しいユーザーインタフェースを作るに当たって、人間と親和性の高い柔らかい素材を使ったエレクトロニクスに対する期待が高まっており、フレキシブルな電子ペーパーとか、フレキシブルなディスプレイなど既に数年前から各所でプロトタイプ製作が行われ、展示会で発表されたりして期待も高まっている。

染谷氏ご自身も2003年に有機エレクトロニクスの研究に移られ、始めに手掛けられたのはロボットに人間の5感の一つである皮膚感覚を持たせるロボットスキンであった。2005年に圧力だけでなく温度も同時にはかることができ、伸縮して3次元的に表面に貼り付けることができるという研究発表[3]を行い、アメリカ「TIME」誌にその年の優秀発明として特集されて表紙の一部にもなったとのことである。

このようにフレキシブルエレクトロニクスは新しい時代をもたらすものとして期待されるが、まだ実用化されたものはないのが現状である。これまで発表されている多くは、一品ものの「工芸品」であって連続的に生産できる「工業製品」ではなかったと染谷氏は語る。

これを受けて、今回、NEDOの支援の下で行うプロジェクトの狙いは、工芸品を試作する技術ではなく、「工業製品を連続して生産できる技術」を確立することである。生産にあたっては、コスト高であってはならないし、特にCO₂の排出が少なく環境に優しいことが要求される。プロジェクトとしては印刷技術を活用することで、この条件を満たすことを考えた。印刷技術によるデバイス・回路の製作は国内外の企業で試みられ、発表もされているが、依然として一品ものであり、最初の1頁目はよくても、2頁目、3頁目ではかすれるなどの劣化が起こり連続生産の技術ではない。今回のプロジェクトは、参加企業、研究機関が力を合わせて、連続して柔らかい電子回路を生産する技術を確立し、プリントエレクトロニクスの各種アプリケーション展開を進展させることを狙っている。



2. プリントエレクトロニクス実用化の課題

工芸品のように出来ているフレキシブルな電子回路を連続生産できる技術にするためには、解決すべき3つの大きな課題があると染谷氏は語る。

課題1: 柔らかい基板の上に精度の要求されるパターンを重ね合わせて行くこと。

(問題点) プラスチックのように熱を加えると伸びるような材料の上に、例えばトランジスターであればゲート金属層、絶縁膜層、半導体層、金属層、更に表面表示体と接続するためには層間絶縁膜、画素電極等、合計7~8層を重ねる。これを柔らかい素材の上に精密に重ね合わせて行くことは非常に難しい。たまたま重ね合わせが上手くできることがあっても、広い面積に亘って、再現性良く合わせることは容易でない。

(解決スキーム) これを解決するためにプロジェクトで先ず行っているのは低温プロセスが可能な材料の開発である。例えば絶縁膜の場合、低温で形成し焼成や硬化が不十分であると材料中に未反応な生成物があったりして絶縁耐圧が不十分となる。これを如何に低温化するか。低温化すれば基板が伸びたりすることがなく重ね合わせが楽になる。プロジェクトには多くのこの分野のリーダー格の企業が参加しており、この低温化のインクの開発に取り組んでいる。

課題2: 1枚目は印刷できても2枚目はかすれてしまうという問題の解決。

(問題点) 判子の技術が良くない、あるいは装置の安定性が悪い。

(解決スキーム) 印刷装置あるいは印刷部材に検討を加えて連続印刷してもかすれることが無いような製造手法を確立する。

課題3: 大面積化。例えば太陽電池にしても小さい面積では実現できても、工業化にはある一定の値以上の面積であり、低コスト化できる必要がある。ディスプレイの世界でも第8世代、第9世代と大型化して低コスト化が進んできていて、類似の印刷技術でも大面積かつ低コストでなければいけない。

(問題点) しかし大きな面積をかすれずに一様につくることは容易ではない。特に、電子回路の場合には一つの印刷手法ではなくあらゆる印刷手法を組み合わせる。具体的には、インクジェット、グラビア、フレキソ、スクリーンなどの印刷法を適材適所に使い分けて組み合わせている。例えばスクリーン印刷は厚膜の形成が得意で電極へのバス配線のような抵抗を下げたいところに適用する。また薄い膜を作りたい場合もある。絶縁膜は薄くて平坦

性を必要とする。インクジェットは流動性があるためこうした用途に適しており、また高純度の層を作るのに適している。一般に印刷し易さと電気特性とは矛盾する関係にある。というのは、印刷性を高めるには樹脂を加えて粘度を調整するが、樹脂を混ぜることは電気特性を損なうことになる。インクジェットの場合は樹脂を混ぜる必要がないから高純度が保てる。このようにいろいろな印刷法を使い分けるので、全ての印刷法を改善していく必要がある。例えば、インクジェットであればシリアルに付けて行くので、大面積の場合付けた先から乾いていき不均一が発生する。

(解決スキーム) こうした不均一性を改善するために、課題2の場合と同様に印刷部材や印刷装置を検討し改善することになる。



3. プロジェクトの実施体制

3.1 プロジェクトの構成と特徴

本 NEDO プロジェクトは、委託事業と助成事業から成り立っている。委託事業は平成 22 年度の補正予算でスタートして、次世代プリンテッドエレクトロニクス技術研究組合 (JAPER A : Japan Advanced Printed Electronics Technology Research Association) [4] が受託し、集中研究方式でつくばの施設で研究開発を推進している。実施期間は平成 22 年度～ 27 年度である。また JAPER A から再委託を受けた大学／機関が評価技術等について研究開発の一部を担当している。助成事業は平成 23 年度に開始し、(株)リコー、凸版印刷(株)および大日本印刷(株)の3社がテーマを決めて自社製品の平成 27 年度までの実用化に挑戦している。

委託事業では、
 ①印刷技術による高度フレキシブル電子基板の連続製造技術開発
 ②高度 TFT (薄膜トランジスター) アレイ印刷製造のための材料・プロセス技術開発
 が大きな研究開発項目であり、両項目の開発の成果が一体となることで前述のプリンテッドエレクトロニクスの各課題が解決される。

本プロジェクトの特徴は、27社(2013年4月1日現在) + 産業技術総合研究所という大変多くの、それぞれに強みを持ち、最初からすでに高いレベルにある企業・機関の集まりであることであり、印刷技術による電子回路を生産技術に持ちあげると云う明確な共通のモチベーションを持った集まりであることである。なおかつ、インク材料、印刷プロセス、印刷装置、アプリケーションという異なる分野の専門家の集まりでもあり、垂直連携的プロジェクトを形成している。個々の企業では叶わなかった実用化を達成する条件が揃っているといえる。しかし、「企業集団で共同研究をする時に起こり勝ちな、自社の良いところを隠したがる傾向に対しては、良いものを持ち寄ることで価値ある物ができ、それが自分にも得になることを理解してもらうコミュニケーションが重要である」と、マネージングの在り方について染谷氏は語る。

JAPER A の組織は図 1 に示すように、研究開発と同時に、国内外の技術調査や周辺動向調査に基づく戦略的開発や成果普及を図る体制、国際標準化や知的財産確保を戦略的に進める体制をつくっている。

3.2 国際環境での本プロジェクトの位置付け

プリンテッドエレクトロニクスに関する国際動向を見ると、特にヨーロッパでは関心が強く、EU の「有機材料と大面積エレクトロニクス、表示およびディスプレイシ

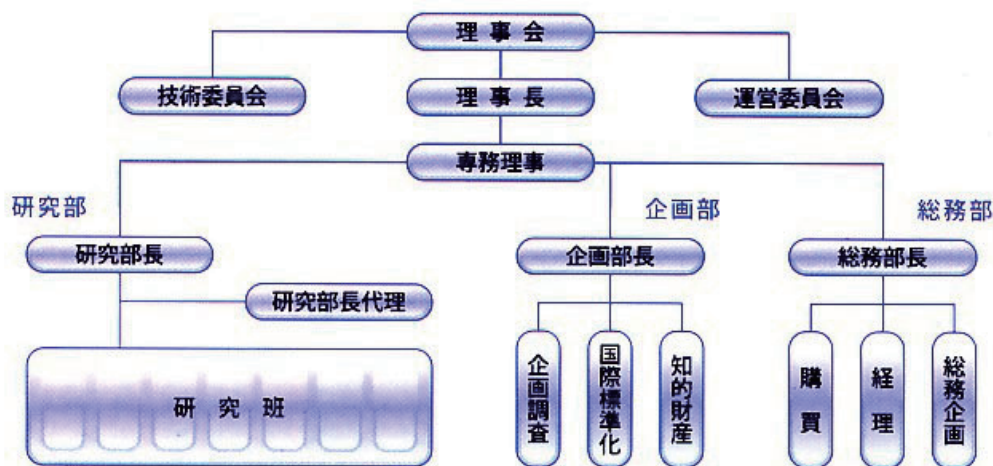


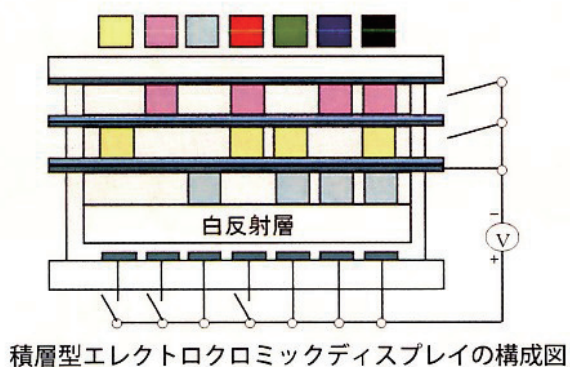
図 1 JAPER A の組織図 (出典：JAPER A のホームページ)

ステム (Organic and large area electronics, visualization and display systems)」(2007～2013, 総額 100 億円)などが進められた。また、最近では台湾や韓国でも組織的開発がはじまっているとのことである。しかし「EU のグループはフレキシブルな電子回路の実現が狙いでありフォトリソグラフィも真空も使っている。NEDO プロジェクトのように印刷技術に特化し連続生産できることを狙ったものは世界でも日本だけであり、これが実現できるのも、日本だけであろう。日本には優れた総合印刷企業があり、材料にも強く、装置も得意であり、条件が揃っている」と染谷氏は語る。さらに、「シリコン半導体は材料が決まっており、製造装置も決まっています、パラメータを振れば最適化ができ製品が出来るので、製造技術は容易に他国へ拡散する。しかし、印刷プロセスの場合はインクが同じ材料であっても粘度の制御や安定化技術などで違う特性を示し、更に、装置も違い、その組み合わせも違い、層の付け方もちがう。このように、材料、装置、プロセスパラメーターの三位一体となった最適化はそう簡単には真似が出来ない。従って、このプロジェクトで柔らかい電子回路の連続生産技術が確立すれば、それは世界初であり、その技術は簡単に海外へ流出するものではない。」と語った。



4. 製品化に向けたプロジェクトの計画と進捗

プリンテッドエレクトロニクスの生産技術を率先してアプリケーションに結び付ける助成事業の「高反射型カラー電子ペーパーの開発」、「大面積軽量単色電子ペーパーの開発」および「大面積圧力センサの開発」の活動状況が、nano tech 2013 に展示された。プロジェクト部門賞の受賞理由にこれらのテーマ名が挙げられている。以下に各課題毎にプロジェクトリーダー染谷氏の紹介および担当各企業から提供された資料により概要を説明する。



4.1 高反射型カラー電子ペーパーの開発

株式会社リコーは、プロジェクトの助成事業で高反射型カラー電子ペーパーの開発を課題として取り組み、カラー印刷誌と同じようにシアン・マゼンタ・イエローの3原色を重ねることで色を再現し、表に示すように色再現範囲、反射率、コントラストが秀でた技術を開発した。低温製膜技術、積層コーティング技術を開発しており、PET (ポリエチレンテレフタレート) などのフィルム基板を採用可能で軽量化と低コストが実現できる。

表 プロジェクト試作品のカラー表示性能 (提供: (株) リコー)

	反射率(%) 555nm(*1)	コントラスト	色再現範囲 (%)(*2)
アート紙(Japanカラー)	80	>40:1	100
プロジェクト試作品	50-70	>40:1	35
新聞(Japanカラー)	58	7:1	31
カラー電子ペーパー市販品(A) コレステリック液晶(積層)方式	34	4:1	15
カラー電子ペーパー市販品(B) MEMS方式	26	11:1	6
カラー電子ペーパー市販品(C) カラーフィルター方式	25	4:1	1

(*1) 555nmは人間の目が最も強く感じる光波長。

(*2) 色再現範囲はCIE a*b*プロットのCMYRGB面積での評価。(30度入射測定) アート紙(Japanカラー)を100%として評価。

これまでカラー電子ペーパーの試みはあったが、カラーフィルターを用いる方式、3色のサブピクセルを並置する方式(MEMS方式)、3種類の単色ディスプレイを重ねる方式(コレステリック液晶方式)のいずれも表に示すとおり表示性能が不十分であった。このプロジェクトでの試作品は、図2右に示すように、電圧印加により透明な消色状態から鮮やかな3原色を発色し電源を切っても発色状態が一定時間保持される新規開発のエレクトロクロミック(EC)化合物を発色層とし、図2左に示すよう

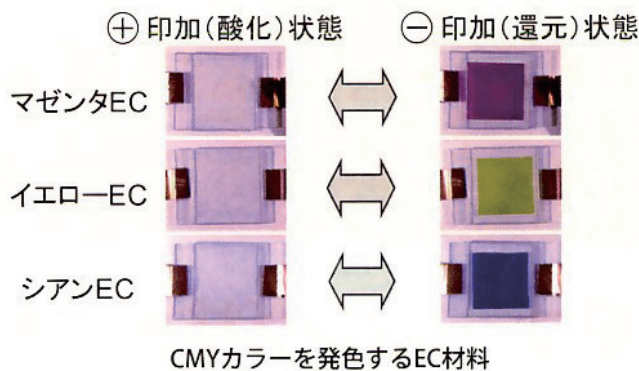


図2 試作した高反射型カラー電子ペーパーの動作メカニズムを示す構成図 (提供: (株) リコー)

に透明電極層と3原色に対応する発色層を積み重ね、TFTのスイッチにより任意の層の任意の画素を発色させるように構成したものである [5].

3種類のディスプレイを重ねる方式と比較して基板の数が3分の1、電極の数が2分の1になり部品コストの低減、薄型軽量化、明るさの向上を実現している。また、新規開発エレクトロクロミック化合物は光利用効率が高く視野角にも依存しないため、表に示した優れた色再現性を示し、3色の各表示層間隔が狭く、素子の厚みが非常に薄いことが、理想的な混色表示を可能とすると共に微細画素パターンを忠実に表示することに寄与している。図3は試作品パネルの表示画像例である。

今後の方針は、プロジェクト計画の平成27年度末までの達成目標である反射率50%以上で、対角10インチのカラー(512色)のパネルを印刷法によりフィルム基板上に作製し、工業的に製造が可能であることを実証する。

また、将来技術として低コストで大面積対応が可能な



図3 3.5インチパネル(113ppi)の表示画像
フェルメール「真珠の耳飾りの少女」(提供:(株)リコー)

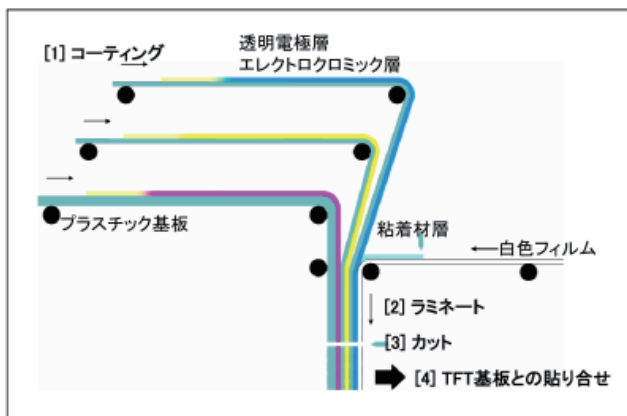


図4 表示部の全印刷 Roll to roll プロセス図
(提供:(株)リコー)

Roll to Rollのプリントエレクトロニクス技術(図4)の確立を目指すとしている。

4.2 大面積軽量単色電子ペーパーの開発

凸版印刷株式会社はプロジェクトの助成事業で大面積軽量単色電子ペーパーの課題に取り組んでいる。低解像度から中解像度のフレキシブルTFT基板を完全印刷技術で安定かつ連続的に製造する技術の開発を進めている。平成27年度末の目標は、A4サイズのフィルム基板上に120ppi以上の解像度を持つTFTアレイ基板を1枚当たり3分以内の製造タクト時間で作製し、このTFTアレイと表示部を組み合わせたパネルを作製することで、軽量単色電子ペーパーが工業的に製造可能であることを実証することである。パネルの重量は40g以下を達成する。

nano tech 2013の展示では図5に示す様に、各レイヤ毎に印刷プロセスを使い分け、TFTの構成要素全てをプラスチック基板上に印刷形成し、電子ペーパーの駆動に成功したことを報告している。例えば、他のレイヤより高い解像度が求められるソース・ドレイン電極の印刷には転写印刷法を適用している。図6は解像度を変えて作成した電子ペーパーの写真である。

この印刷法によるプロセス工程では、一つのパターン形成が「印刷/焼成」の2ステップで済み、従来のフォトリソグラフィ法の「成膜/レジスト塗布/露光/現像/エッチング/剥離」の6ステップに比べて大幅な工数削減によりスループットが向上する。さらに、例えば配線工程であれば配線に無関係な部分への膜の形成やレジスト材料が不要となることから、材料利用効率が向上し、廃棄資源が削減される。また高価な露光機などの設備投資も不要となる。

今後の計画としては、印刷技術によるフレキシブルTFTアレイ作製を研究開発ステージから量産プロセスステージへ移行して、プロセスの再現性向上、タクトタイムの短縮、製品の信頼性向上を目指すとのことである。

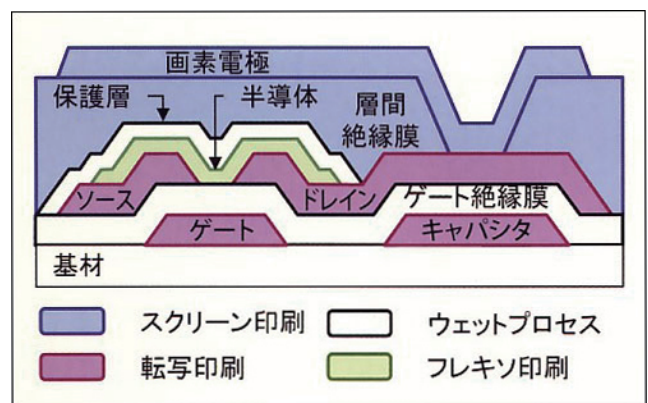


図5 TFTを構成する各レイヤに応じた印刷方法を開発
(提供:凸版印刷(株))

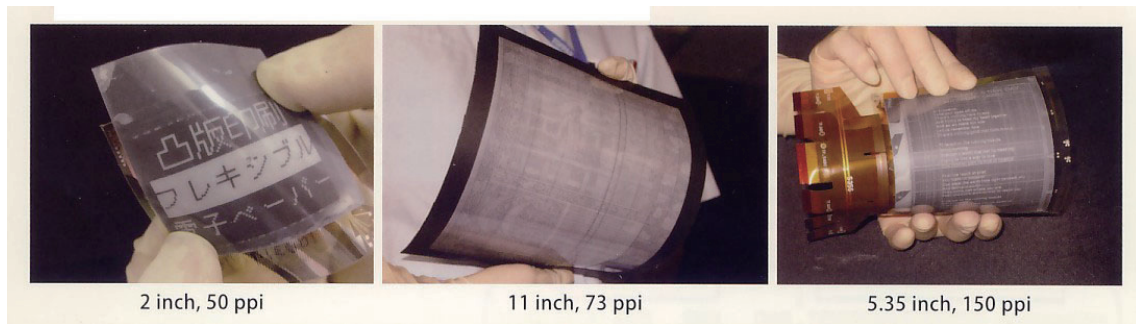


図6 解像度を変えた TFT アレイによる電子ペーパー (提供: 凸版印刷 (株))

4.3 大面積圧力センサの開発

大日本印刷株式会社はプロジェクトの助成事業で大面積圧力センサの開発の課題に取り組んでいる。印刷技術による高度フレキシブル TFT アレイ製造技術により、情報入出力をリアルタイムで処理可能な大面積 TFT シートの製造技術を確立し、製作された大面積 TFT アレイ上に圧力素子を実装することで、大面積圧力センサを開発する。プロジェクト計画における平成 27 年度末の目標は、1mm 角あたり 1 素子の密度で形成した TFT アレイの特性 (移動度および閾値電圧) のばらつき $\sigma < 5\%$ で、10Hz 相当以上で連続駆動が可能なメートル級の大面積 TFT シートを試作すること。さらに、これを背面基板に用いた圧力センサーシートを試作し、実用の可能性を実証することである。

ここで圧力センサの構成と動作原理を電子ペーパーと比較して図 7 に示す。圧力センサの場合、フィルム基板

上に形成した有機 TFT アレイ上に感圧ゴムを積層した構造である。ゲート電圧を入力した TFT のドレインに電圧を印加するとゴムの抵抗に対応するドレイン電流が流れるが、ゴムに圧力が加わるとその抵抗が下がるので、ドレイン電流の増加が検出される。シート上の TFT を掃引してゲート電圧を加えドレイン電流を測定することにより、シート表面の圧力分布を観測することが出来る。従来のパッシブ型の圧力センサと異なり、この TFT を用いたアクティブ型の圧力センサには、圧力検出の高速化、低消費電力化、および検出したい圧力範囲に設定変更が容易になると云うメリットがある。

今後の予定は、前述のプロジェクトの目標達成に向けて開発を進め、例えば足跡観測デバイスとか図 8 に示すようなヘルスケアセンサデバイスなど人々の生活やヘルスケア分野で活躍する大面積圧力センサの実現の可能性を実証することである。

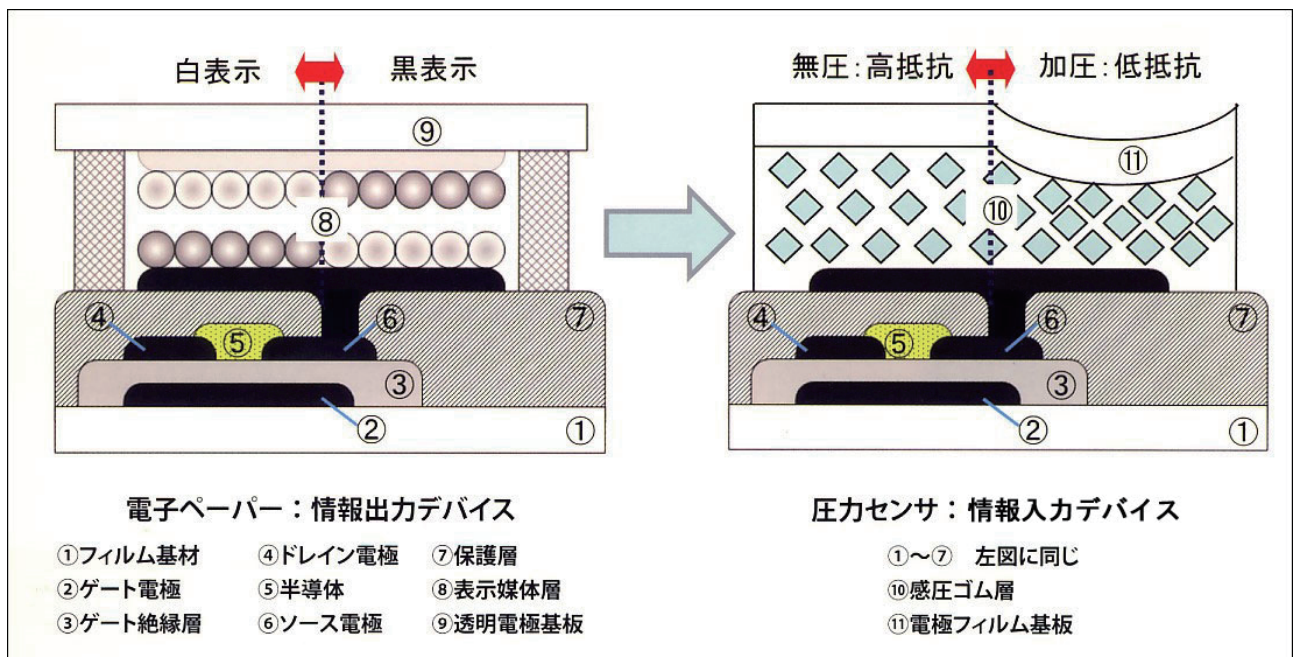


図7 電子ペーパーの情報出力デバイス、圧力センサの情報入力デバイスとしての動作原理 (提供: 大日本印刷 (株))

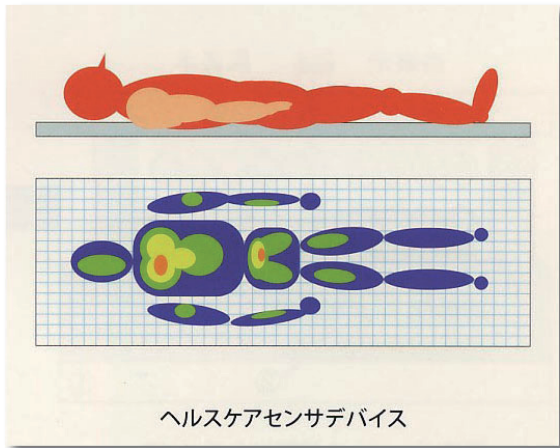


図8 大面積圧力センサの適用分野の例 (提供:大日本印刷(株))

おわりに

プリントエレクトロニクスという言葉はしばしば耳にする。これに関わる有機半導体によるデバイスの研究開発もグローバルに盛んである。これが製品になり、その軽量でフレキシブル、低電力で低価格な電子回路がもたらす新しい市場の開花が期待されてきた。しかし、今まではそれが夢でしかなかった。

今回プロジェクトリーダー染谷氏の取材を通して、「次世代プリントエレクトロニクス材料・プロセス基盤技術開発」プロジェクトが、夢を現実の世界にするための、即ち、これまでの一点ものの「工芸品」を量産可能な「工業製品」にするための壮大な挑戦であることを知ることができた。

印刷に関わる材料、プロセス、製造装置の各分野の多くの一流の企業が集結し産総研、大学も加わって目標に向かって力を出し合う、日本だから出来る産学官連携プロジェクトである。課題にたいして足が地に着いた活動が期待される。

(向井 久和)

製品イメージが具体化されると共にアプリケーションも具体的形で展開される。染谷氏ご自身も各種応用展開を研究されてきたが、今後はフレキシブルディスプレイのみならず、医療やヘルスケア分野やロジスティクス分野など多方面への展開を進めたいとのことである。

プリントエレクトロニクスにより、日本産業の発展、地球環境への貢献、人々の生活がより豊かな社会の到来に期待したい。

参考資料

- [1] nano tech 2013 第12回国際ナノテクノロジー総合展・技術会議 ダイジェスト <http://www.youtube.com/user/nanotechICS>
- [2] 次世代プリントエレクトロニクス材料・プロセス基盤技術開発 http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100030.html
- [3] Takao Someya, Yusaku Kato, Tsuyoshi Sekitani, Shingo Iba, Yoshiaki Noguchi, Yousuke Murase, Hiroshi Kawaguchi, and Takayasu Sakurai, "Conformable, flexible, large-area networks of pressure and thermal sensors with organic transistor active matrixes", Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Volume 102, Issue 35, pp.12321-12325 (August 30, 2005).
- [4] 次世代プリントエレクトロニクス技術研究組合 <http://japera.or.jp/>
- [5] 平野 成伸, 内城 禎久, 岡田 吉智, 辻 和明, 金 碩燦, 匂坂 俊也, 高橋 裕幸, 藤村 浩, 八代 徹, "新規フルカラー電子ペーパー表示技術の開発", Ricoh Technical Report No.38, pp. 22-29 (2012.12). <http://www.ricoh.co.jp/about/company/technology/techreport/38/pdf/RTR38a02.pdf>