

有機トランジスタの新しい応用を拓くフレキシブル大面積センサー

電子人工皮膚への応用

染谷隆夫<sup>\*</sup> , 桜井貴康<sup>\*\*</sup> , 川口博<sup>\*\*</sup> , 関谷毅<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> 東京大学 工学系研究科 量子相エレクトロニクス  
研究センター

〒 113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

e-mail: [someya@ap.t.u-tokyo.ac.jp](mailto:someya@ap.t.u-tokyo.ac.jp)

<sup>\*\*</sup> 東京大学 国際・産学共同研究センター

〒 153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1

分類 9 . 3

Large-area, flexible sensors for electronic artificial skins

----- A new class of applications of organic transistors -----

<sup>\*</sup>Takao Someya, <sup>\*\*</sup>Takayasu Sakurai, <sup>\*\*</sup>Hiroshi Kawaguchi, and  
<sup>\*</sup>Tsuyoshi Sekitani

<sup>\*</sup>Quantum-Phase Electronics Center (QPEC), School of Engineering,  
the University of Tokyo

7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

e-mail: [someya@ap.t.u-tokyo.ac.jp](mailto:someya@ap.t.u-tokyo.ac.jp)

<sup>\*\*</sup>Center for Collaborative Research (CCR), the University of Tokyo  
4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505, Japan

## 日本文要旨

有機トランジスタは大面積の集積回路が低コストで作製できるため、大面積エレクトロニクスにおいてその持ち味が発揮されると考えられる。最近、有機トランジスタを利用することによって、くしゃくしゃと曲げることのできる大面積圧力センサーが実現された。本稿では、このロボット用の電子人工皮膚の話題を中心に、有機トランジスタの最近の研究状況を報告する。

## 英文要旨

Large-area, flexible sensors for electronic artificial skins

----- A new class of applications to organic transistors -----

\*Takao Someya, \*\*Takayasu Sakurai, \*\* Hiroshi Kawaguchi, and  
\*Tsuyoshi Sekitani

Organic field-effect transistors are expected to manufacture large-area integrated circuits with low costs and therefore suitable to realize large-area electronics. In this article, we report on organic transistor-based large-area pressure sensors, which we developed recently for artificial skin applications.

**Keywords:**

organic transistors,  
large-area electronics,  
large-area sensors,  
organic integrated circuits,  
artificial skins

## 1. まえがき

有機トランジスタは，シリコンを中心とした既存の電子デバイスにはない優れた特徴を有する．すなわち，機械的フレキシビリティ（可とう性）があり，印刷やリール・ツー・リール（Reel-to-reel）プロセスを利用して，大面積の集積回路が低コストで作製できる．

最近では，ペンタセンをチャンネル層に用いた電界効果トランジスタ（FET）の移動度が  $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  を上回り，オン状態とオフ状態の電流比も  $10^7$  を超えるなど，アモルファス・シリコンの性能を凌駕する特性が複数の研究グループから相次いで報告された [1-5]．

ペンタセンを含む低分子系有機半導体の多くは真空プロセスで成膜されるが，一方で，高分子材料を印刷で塗布してプラスチック・トランジスタを作製しようという研究も活発である [5,6]．インクジェット [5,6] やマイクロ・コンタクト・インプリンティング [7] などの印刷技術で作製された有機トランジスタが報告されている．

性能の向上やプロセス技術の開発が進むにつれて，有機トランジスタの優れた特性を活用した応用が色々と考案され，一部は現実のものとなりつつある．特に，無線タグ [8,9] とディスプレイ [7,10] は，これまで有機トランジスタの応用として本命視され，活発に研究がなされてきた．しかしながら，シリコンと比較して，有機トランジスタの移動度は依然として 2 ~ 3 桁小さく，回路の動作はそれだけ遅い．このため周波数の高い無線回路やビデオレートのディスプレイに有機トランジスタを応用することは容易ではない．

一方，我々は，有機トランジスタに最適な新しい応用として，大面積エレクトロニクスを提案している [11,12]．特に，最近，ロボット用の電子人工皮膚として，有機トランジスタを利用した大面積圧力センサーの作製に成功した [11,12]．この用途では，動画や無線応用ほどの動作速度が要求されない．さらに，有機トランジスタの特徴である，大面積性，可とう性，低コスト性を十分に活用できる．本稿では，この電子人工皮膚に関する我々の取り組みを中心に有機トランジスタの現状を報告する．さらに，有機トランジスタを活用した大面積エレクトロニクスの将来を展望し，今後の課題を述べる．

## 2. 大面積圧力センサー

今回作製された大面積圧力センサーは、可とう性を有し、図1に示したようにロボットの表面など複雑な形状をした局面を自由に覆うことができる。ロボットにおける触覚認識の研究・開発が、視覚や聴覚と比べて遅れているのは、可とう性のある大面積圧力センサーを実現する手法が確立していないためである。高分子やゴムを利用した可とう性のあるセンサーは古くから存在していた。しかし、大面積センサーを作製した場合、配線の問題が顕著となり、数や密度をある程度以上に増やすことが困難である。

我々は、各セルから圧力データを読み出すため、有機トランジスタで可とう性のあるアクティブ・マトリックスを構成して、従来の問題を解決した。その結果、1000点以上の痛点を有する大面積圧力センサーの作製に成功した。

図2の構造断面図を示されているように、デバイスは、4枚の機能性フィルムを張り合わせることで作製される。これらは、有機トランジスタを形成した高分子フィルム、スルーホールを有する高分子フィルム、感圧導電ゴムシート、電極を保持した高分子フィルムである。有機トランジスタと圧力センサーを1個ずつ集積化して1セルを構成し、16 x 16もしくは32 x 32のマトリックスを作製した。セルの間隔は2.54 mmで、これは10ドット/インチ (dpi) に相当する。

まず、有機トランジスタの作製法について述べる。ポリエチレンナフタレート (PEN) フィルムもしくはポリイミドフィルムを基板として、この上に、膜厚5 nmのクロムと膜厚100 nmの金で構成されるゲート電極層を蒸着する。

このフィルム上に、ポリイミドの前駆体をスピンコートで塗布し、メーカーの推奨に従って180℃にてクリーンオープンで硬化させる。ポリイミドの硬化温度は通常300℃程度であるが、この温度が180℃まで下げられているため、PENフィルムなど低価格でガスバリア性に優れた高分子フィルムが利用できることに注目されたい。

さらに、メタルマスクを通して膜厚50 nmのペンタセンを蒸着法で形成した。最後に、メタルマスクを通して膜厚30 nmの金を蒸着することによって、ソース・ドレイン電極層を形成し、トランジスタを完成さ

せる．

トランジスタのチャンネル長  $L$  と幅  $W$  はそれぞれ， $100\ \mu\text{m}$  と  $1.9\ \text{mm}$  である．単体としての有機トランジスタ性能は，移動度  $0.5\ \text{cm}^2/\text{Vs}$  で，オン / オフ比は  $10^6$  と非常に良好な値を得た．

次に，スルーホールを有する高分子フィルム の作製法について述べる．これは，通常フレキシブル配線板と同じ手法で作製される．まず両面に銅箔を貼り付けたポリイミドフィルムに，レーザーもしくはNCドリルで穴あけ加工を施す．しかる後に，めっきによって両面の導通を取り，最後にそれぞれの面に銅電極のパターニングを施す．電気的な接触を良くするため，表面に金めっきを施した．

感圧導電ゴムシート は，グラファイトの粉末を導電物質として混ぜ込んだシリコンゴム（ポリジメチルシロキサン，PDMS）である．厚みは  $0.5\ \text{mm}$  である．図2の矢印のように，ゴムシートに垂直に圧力を加えると，グラファイト粉末同士の間隔や接触の具合が変化し，絶縁状態から数百までの抵抗の変化を示す．

表面側の電極を保持した高分子フィルム は，ポリイミドに銅を貼り付けたシートである．パターニングを施さず，等電位になっている．

図2に示したように，圧力センサー部は感圧導電ゴムシート を金属電極で挟み込んだ構成となっており，高分子フィルム に作製されたスルーホールを介して，トランジスタと接続されている．バイアス電圧 ( $V_{DD}$ ) を加えると，外部からの圧力を感じた部分のみドレイン電極へ導通し，圧力を感知できる．

### 3．有機トランジスタ集積回路

センサー・マトリックスから圧力データを読み出すためには，セレクタやデコーダなど周辺の駆動回路が必要である．我々は，これらの駆動回路も有機トランジスタを用いて構成し，システムとしての動作を確認している．

図3に電子人工皮膚システムの回路図を示す．集積回路にはペンタセンをチャンネル層にしたP型MOSを使用しており，センサー・マトリックス，行デコーダ，列セレクタの3つから構成されている．センサー・マトリックスの作製法は既に述べた通りであるが，行デコーダや列セレクタなどの駆動回路も基本的には同様のプロセスで作製される．

ただし、駆動回路では、ゲート電極の階層とソース・ドレイン電極の階層を結線して集積化する必要がある。我々は、ゲート絶縁膜としてポリイミドの薄膜をスピコートで一様に塗布しているが、CO<sub>2</sub>レーザードリル加工機を用いて、このポリイミド薄膜に直径90 μm 穴をあけ、ビア・ホールを作製した。レーザードリル加工は、フレキシブル配線板の業界などで信頼性と量産性が広く認められているプロセス技術であるが、有機回路のビア・ホールに利用したのは、筆者らの知る限り、今回が初めてである。レーザードリル加工は、フォトリソグラフィなど従来のパターンニング手法と異なり、ゲート絶縁膜の表面がいつもドライな状態に保たれるため、加工による表面の損傷や不純物の付着がない。その結果、ビア・ホールを有しないトランジスタと全く同等性能のトランジスタを回路上に実現できた。

センサー・マトリックス、行デコーダ、列セレクト各部分は、まず別々に製造される。次に、PEN フィルムに配線用の金を0.1 インチ間隔で蒸着した「配線テープ」と導電性接着剤を用いて接続する。このように、回路は「切り貼り」によって作製される。センサー・マトリックスは16 x 16の感圧セルを持ち、配線テープで接続可能なように0.1 x 0.1 インチ間隔で配置されている。図3では16 x 16の感圧セルによる構成を示しているが、例えば4 x 4の感圧セルが必要な場合は、破線の矩形領域を切り取り、そのままセンサー・マトリックスとして利用することもできる。アドレス拡張性を持った行デコーダと列セレクトを採用することによって、ただ切り取るだけで、任意の4m x 4n (m と n は4以下の任意の整数)の感圧セルを駆動できるようにできた。センサー・マトリックスは矩形だけでなく、凸型である限り、任意の形状にすることも可能である。センサーの配列数や形状に応じて新しくマスクをつくる必要がないので、回路設計に要する時間を節約でき、コストの削減が可能となる。

図4は人工皮膚システムの動作波形である。センサー・マトリックスに圧力が加わると、その部分の導電性ゴムが導通し、感圧セルがビット線を電源電圧まで引き上げる様子を示している。電源電圧が40 Vの場合、行デコーダ活性化信号φR-bar からビット出力までの遅延は23 msである。このシステムでは、並列4ビット読み出しを採用しているため、16 x 16のセンサー

全てをスキャンするには1秒程度を要する。読み出し遅延は電源電圧に依存するが、電源電圧を100 Vにすれば、この遅延は半分になる。有機トランジスタの短チャンネル化やワード線、ビット線などの配線層の細線化で容量を減少させる余地は多く、将来はさらに一桁以上の遅延の減少と低電圧化が可能であると予測する。

電子人工皮膚の最終的な形態を考えてみると、有機集積回路から読み出された圧力データは、ある階層からシリコンのチップで受ける構成になる可能性が高い。このため、行デコーダや列セレクトを有機トランジスタで作製するべきか否かについては議論のあるところであろう。しかしながら、今後本格的に圧力センサーの大面積化と高密度化を進めていくと、配線の問題やチップの埋め込みに掛かる実装コストが大きくなると予想される。このため、行デコーダや列セレクトはもちろん、簡単なメモリー機能や演算機能も有機トランジスタで実現していくことが重要であると考えられる。

#### 4. 大面積エレクトロニクスの将来展望

今後エレクトロニクスの進むべきひとつの方向性として、「ワイヤレスセンサネットワーク」や「アンビエントインテリジェンス」の重要性はいまさらここで述べるまでもない。このようにエレクトロニクスが環境に入っていく際に、有機トランジスタの大面積性が必要になると我々は考えている。

例えば、大面積圧力センサーをロボットの手や体に貼り付けるだけでなく、床に敷き詰めてみたり、家具などにも貼ってみる。すると、床の上に侵入した泥棒を識別できる新しいセキュリティーシステムが実現できたり、健康状態などが即座にわかる椅子やベッドができるかもしれない。ユビキタスエレクトロニクスの世界において、シリコンは小さく見えなくなってしまう一方で、このような等身大のエレクトロニクスが、その重要性を増していくと考えられる。

μチップの例を一つとっても分かるように、機能当たりのコストをシリコンと競い合うのは容易ではない。しかし、シリコンは大面積化するとコストが著しく増大する。面積当たりのコストが重要な局面では、有機トランジスタの持ち味が生かされることになるであろう。

さらに有機トランジスタは、新しい情報処理の領域を切り拓くと期待する。実際に、ロボットの手などに付けられたセンサーから大量の2次元の圧力データが得られたとき、その結果から、どういうものを握っているのか、すべすべなのかざらざらなのかなどが、情報処理で認識できると期待される。このように、有機トランジスタを用いたハードウェアとともに、新しいソフトウェアの領域が広がっていくであろう。

大面積をキーワードにして、有機トランジスタを軸にしたエレクトロニクスのパラダイムシフトが加速すると期待できる。

## 5. 今後の課題

有機トランジスタを活用した大面積センサーの実用化に向けて、今後の課題を整理する。

まず、有機トランジスタの安定性と信頼性の向上が、成功への鍵を握っていると言える。今回試作されたデバイスは封止されておらず、チャンネル層であるペンタセンが大気に露出している状態で計測された。数日経てもトランジスタとして動作はするものの、飽和電流値は半分以下に減少し、閾値電圧はドリフトする。このような有機トランジスタにおける経時変化は、有機EL素子などと同様に酸素や水成分によって引き起こされると考えられ、有効な封止技術を確立することによって大幅に低減できると期待される。この際、電子人工皮膚など可とう性が要求される用途では、やはりガスバリア材としても可とう性のあるものを利用しなければならない。通常の高分子フィルムではガスバリア性が十分でないことが予想されるので、材料開発も含めて今後の封止技術の確立が急務である。有機トランジスタの実用化は、信頼性の確保なくして有り得ない。現時点における研究開発のあり方としては、移動度を向上させること以上に、信頼性の向上が重要であることを強調したい。

次の課題は、駆動電圧の低減である。今回のデバイスは40 Vで動作させたが、電子人工皮膚用途には、10 V以下にすることが望ましい。駆動電圧の低減には、素子寸法の微細化が有効である。有機トランジスタの素子寸法を現在のチャンネル長100  $\mu\text{m}$ から10  $\mu\text{m}$ 程度まで微細化することはさして困難ではないと考える。実際に、3Mの研究グループは、加工したポリイミドフィルムを蒸着用のマスクに用い、20  $\mu\text{m}$ 寸法の有機トラ

ンジスタを集積回路に応用している [8] .さらなる駆動電圧の低減には,ゲート絶縁膜を薄膜化する必要がある.ポリイミドを用いたゲート絶縁膜の厚みは,現在 900 nm であるが,今後は 100 nm 程度にまで薄膜化を進めるか,あるいは誘電率の高い材料を用いる必要がある.

## 6. むすび

本稿では,有機トランジスタの有望な応用として,大面積センサーを紹介した.特に,有機トランジスタと圧力センサーを集積化することによって,従来は作製が困難であった可とう性のある大面積圧力センサー・マトリックスが実現できることを示した.このデバイスの応用範囲は,ロボット用の電子人工皮膚にとどまらず,再生医療,新しい防犯センサーシステム,交通安全システムなどにも波及すると期待される.

さらに,有機トランジスタは,環境エレクトロニクスの実現には不可欠なデバイスであると考えられ,シリコンと相補的に利用することにより,大きな相乗効果が見込まれる.

今回の研究では,フレキシブル配線板業界の知見を生かして,可とう性のある有機トランジスタや大面積センサーを作製してきた.レーザー加工,めっき,張り合わせなどは,既に産業界でもその信頼性と量産性が認められており,有機トランジスタを実用化する際に,低コスト・プロセスとして活用すべきであると考ええる.

今後は,素子の安定性,駆動電圧,動作速度,消費電力などの課題を解決し,有機トランジスタがますます大きな分野へと成長していくことを期待したい.

## 謝辞

有益な議論を賜った荒川泰彦教授,榊裕之教授,五神真教授(東京大学),小林正氏に感謝する.また,本研究を熱心に進めた研究室のメンバーに感謝する.本研究の一部は,NEDO「産業技術研究助成事業」,総務省「戦略的情報通信研究開発推進制度」,文科省ITプロジェクト,特別推進研究の助成を受けて進められた.

## 参考文献

1. H. Klauk, D. J. Gundlach, and T. N. Jackson, *IEEE Electron Device Lett.* **20**, 289 (1999).
2. P. M. G. Kane, J. Campi, M. S. Hammond, F. P. Cuomo, B. Greening, C. D. Sheraw, J. A. Nichols, D. J. Gundlach, J. R. Huang, C. C. Kuo, L. Jia, H. Klauk, and T. N. Jackson, *IEEE Electron Device Lett.* **21**, 534 (2000).
3. H. Klauk, M. Halik, U. Zschieschang, G. Schmid, W. Radlik, and W. Weber, *J. Appl. Phys.* **92**, 5259 (2002).
4. C. D. Dimitrakopoulos and P. R. L. Malenfant, *Adv. Mater.* **14**, 99 (2002).
5. H. Sirringhaus, T. Kawase, R. H. Friend, T. Shimoda, M. Inbasekaran, W. Wu, and E. P. Woo, *Science* **290**, 2123 (2000).
6. T. Kawase, H. Sirringhaus, R. H. Friend, and T. Shimoda, *Proceedings of SPIE, Organic Field Effect Transistors*, D Fichou, Z Bao, Editors, **4466**, 80 (2001).
7. J. A. Rogers, Y.-L. Loo, T. Someya, K. W. Baldwin, Z. Bao, P. Ho, A. Dodabalapur, and H. E. Katz, *Proceedings of National Academy of Science, USA*, **99**, 10252 (2002).
8. F. Baude, D. A. Ender, M. A. Haase, T. W. Kelley, D. V. Muyres, and S. D. Theiss, *Appl. Phys. Lett.* **82**, 3964 (2003).
9. C. J. Drury, C. M. J. Mutsaers, C. M. Hart, M. Matters, and D. M. de Leeuw, *Appl. Phys. Lett.* **73**, 108 (1998).
10. H. Klauk, D. J. Gundlach, J. A. Nichols, and T. N. Jackson, *IEEE Trans. Electron Devices* **46**, 1258 (1999).
11. T. Someya and T. Sakurai, *Technical Digest of 2003 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*, Washington D.C., December 8 -10, 2003, No. 8.4, 203
12. T. Someya, H. Kawaguchi, and T. Sakurai, *Technical Digest of 2004 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC 2004)*, San Francisco Marriott, San Francisco, CA, February 14- 19, 2004.

## 図説明

図 1 (a) 高分子フィルム上に形成された有機トランジスタを利用して、可とう性のある大面積圧力センサーを実現した。(b) ロボットの表面に貼った電子人工皮膚のイメージ。有機トランジスタを形成した高分子フィルム，感圧導電ゴムシート，電極を保持した高分子フィルム。本文で紹介したスルーホールを有する高分子フィルムは， に覆い隠されている。

図 2 (a) デバイス構造の断面模式図と (b) 1 セルの回路図。デバイスは 4 枚の機能性フィルムを貼り合わせて作製される。感圧導電ゴムシートを 2 つの電極で挟みこんで作製される圧力センサーが，ビアホールを介してトランジスタと接続されている。

図 3 電子人工皮膚システムの回路図。16 x 16 のセンサー・マトリックス，行デコーダ，列セレクトから構成されている。ペントセンをチャンネル層にした p 型のトランジスタが用いられている。

図 4 電子人工皮膚における電圧出力の時間応答。センサー・マトリックスに圧力を加えると，感圧導電ゴムが導通し，ビット線が電源電圧まで引き上げられる。