

立石賞功績賞の受賞記念講演概要

人間と機械を調和する伸縮性エレクトロニクス

東京大学工学系研究科電気系工学専攻 染 谷 隆 夫

20 世紀における半導体エレクトロニクスの飛躍的發展は、我々の生活を一変させ、人類社会の発展に大きく貢献した。21 世紀になって、エレクトロニクスは、Internet of Things (IoT)、人工知能 (AI)、ロボットなど高度に発展する情報社会の基盤を支えることが期待されており、単に演算速度や記憶容量を向上するだけでなく、地球環境やそこで暮らす人類との調和を同時に実現することが求められている。その背景の中、従来の無機半導体と相補的な有機材料の軽量性・柔軟さ・大面積性を活かした新たな応用分野への期待が高まっている。

これまで筆者らの研究グループでは、有機半導体分子など分子性ナノ材料に着目し、光・電子デバイスの機械的柔軟性を向上する研究を進めてきた。例えば、有機トランジスタと呼ばれる柔軟い電子スイッチは、シリコンなど従来の無機材料素子とは違い、低温プロセスで高分子フィルム上に形成できるため、軽量かつ曲げられる電子機器を作ることができる。また、印刷技術で製造することができるため、シリコンに比べて格段に安い製造コストで大面積シート上に作ることが可能である。このような有機デバイスの優れた特徴——すなわち、大面積・低コスト・軽量性・柔軟性——を活用して、筆者らは大面積センサや大面積アクチュエータに応用する研究に取り組んできた [1-5]。

まず、2003 年に、「大面積化の容易さ」と「曲げやすさ」という有機半導体の二大特徴を巧みに捕らえ、世界で初めて「アクティブマトリックス方式（格子状に並べられた薄膜トランジスタ）による大面積なフレキシブルセンサ」の開発に成功した。高性能な有機トランジスタ

を駆使して実現されたこのセンサは、皮膚のように伸縮自在で、自由曲面上で温度分布と圧力分布をリアルタイムで同時に計測でき、次世代ロボット用の電子人工皮膚 (E-skin) として有望視される (図 1 左)。



E-skin を実現するために、ディスプレイの駆動方式にヒントを得て、フレキシブルな有機トランジスタのアクティブマトリックスを使って、膨大な数のセンサからデータを読み出す方式を考案した。人間の皮膚は 2 m^2 の表面に 200 万個以上の痛点がある。この規模のセンサは、個別に実装してそれぞれに配線を施すという従来法では実現できない。また、シリコンのような既存素子は固くて曲面に貼り付け難いため大きな課題となっていた。本手法によって、各センサに個別の配線を施すことなく、数十本にまで配線数を減らすことができるようになり、解決に明確な道筋が示された。

その後も E-skin の研究を皮切りに、シート型スキャナー (2004 年)、超薄型点字ディスプレイ (2005 年)、ワイヤレス電力伝送シート (2006 年)、通信シート (2007 年)、超音波シート (2008 年)、フラッシュメモリ (2009 年) を実現するなど、有機デバイスの様々な新用途を提案し、フレキシブル大面積エレクトロニクスに応用する可能性を示してきた。

フレキシブルデバイス分野では、2000 年頃から世界中で活発に研究開発がなされてきたが、そのすべてが電子ペーパーのようなフレキシブ

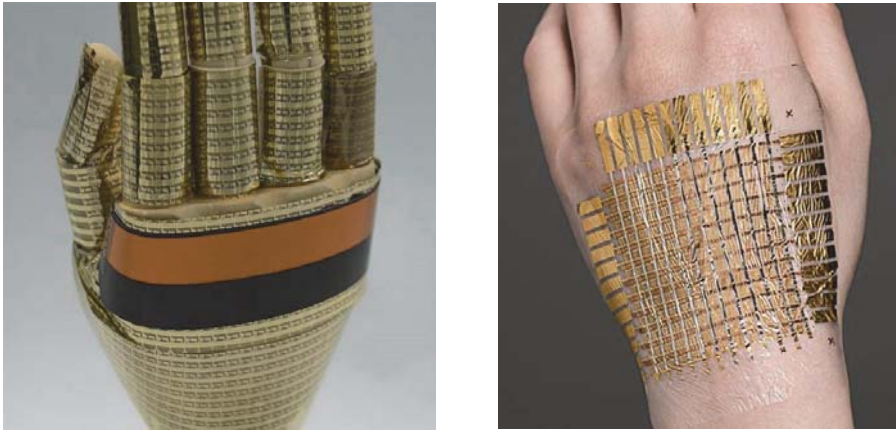


図1 (左) ロボットの手に貼り付けられた電子人工皮膚 (E-skin) のイメージ写真。(右) 厚さ1マイクロメートルの高分子基材の上に作製された超薄型有機トランジスタ集積回路が人の手に貼り付けられている。

ルディスプレイもしくは無線タグ (RFID) の実現を目指した研究, または単体デバイスの基礎研究であった。一方, 筆者らは, 世界で初めてアクティブマトリックスを「フレキシブルセンサ」に応用し, フレキシブルエレクトロニクスが大きく発展するきっかけとなった。これらの研究を通じて, 「人間と機械の調和を実現するためには, “人間と親和性の高い柔軟なエレクトロニクス” が本質的に必要である」という認識を確立し, 伸縮性エレクトロニクスの実現に向けた開発を進めてきた。

さらに, 筆者らは, E-skin の高機能化と高性能化を進めるため, 多様なフレキシブルセンサ, 伸縮性導体, 極薄デバイスなど世界初となる電子素材や電子部品を開発した。最近では, 厚さ1ミクロン (キッチンラップの厚さの1/10) という極薄の高分子フィルム上に高性能な有機集積回路, 有機太陽電池, 有機発光デバイスを含む世界最薄の有機デバイスを実現した (図1右)。候補者が開発した大面積なフレキシブルセンサは, ヒトの表面に貼り付けて装着感なく生体情報を計測するシート型システムへと発展している。これらは, ウェアラブルエレクトロニクスやヘルスケア・医療への応用が期待されるなど, 人間と機械を調和する新しいエレクトロニクス分野を拓いている。

有機デバイスは, 柔軟性に優れており生体と

の親和性が高いと期待される。人間がその存在を感じるできないくらい薄くて軽量のエレクトロニクス (Imperceptible electronics) が実現されたことによって, ヘルスケア, 医療, 福祉への応用が促進されると期待される。

まず, 皮膚の上から生体情報を取り出す「ウェアラブルエレクトロニクス」への応用が進むと考えられる。例えば, センサーシステムの薄型化や軽量化が進み, 身に着けても装着感を感じさせないセンサによって, 通常の生活をしながら, 24時間ストレスなく生体情報の計測ができるようになるであろう。また, 耐衝撃性に優れるセンサとして応用することにより, 運動中を含む日常のどのような場面でも生体からの情報 (例えば, 体温や心拍数) を計測できるようになる。薄型筋電計測シートは, 車椅子や介護ベッドなど福祉機器の入力インタフェースとして有用であろう。

次に, fMRI, 超音波診断装置, 内視鏡など医用画像機器 (モダリティ装置), カテーテル, スtentなど医療機器への応用も重要である。例えば, この高耐熱性の超薄型有機センサを細径のカテーテルの側面に適応することで, 腫瘍や炎症, 初期のがんを検出できる新しい薄膜センサの開発が可能となり, 医療用デバイスとした新たな用途が拡大するものと考えられる。このような医療デバイスへの応用には, 柔らかさ

に加えて、大面積でかつ電気的特性にも優れている必要があり、今後の医療用デバイスの開発に向けて有機デバイスの重要性が増すと考えられる。

さらに、体の中に埋め込むことにより直接的に生体情報を取り出す「インプラントブルエレクトロニクス」への応用が期待される。体内にデバイスを埋め込むことで侵襲度が高くなるが、一方で体内埋め込みでなければ計測できない化学的情報や、より微弱な信号の時間発展を高空間分解能で計測できる。

このように「ウェアラブルエレクトロニクス」「医療機器」「インプラントブルエレクトロニクス」へと段階を経て有機デバイスの用途が広がると考えられる。これに伴い、デバイスの複合化や高集積化も進むであろう。今回の研究開発によって、様々な有機デバイスを、厚さ1 μm 級の高分子フィルムに作製できるようになった。このような薄型化・軽量化技術により、有機LEDを新しい光源としたユニークな薄型センサへの応用が期待される。実際に、最近では、薄型の有機LEDと有機光検出器を集積化して、脈波や血中酸素濃度など生体情報の計測に成功している。生体情報を計測するための装置が、今後、急速に軽量化・薄型化されるであろう。その結果、装着してもストレスなく計測できる“装着感のないヘルスケア・デバイス”など伸縮性エレクトロニクスの大きく発展していくものと期待される。

謝辞

立石科学技術振興財団より平成15年度に「情報活用社会に整合するプラスチック高集積回路の試作研究」で助成を頂いた。多くの方のご支援のお蔭で、その研究

が飛躍的に発展し、今回第4回立石賞の功績賞を頂くことになった。立石科学技術振興財団関係者をはじめとして本研究にご理解とご支援を頂いた方々、ならびに本研究に携わった共同研究者全員に厚くお礼を申し上げる。

参考文献

- [1] Takao Someya, Tsuyoshi Sekitani, Shingo Iba, Yusaku Kato, Hiroshi Kawaguchi, and Takayasu Sakurai, “A large-area, flexible pressure sensor matrix with organic field-effect transistors for artificial skin applications”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Volume 101, 9966–9970 (2004).
- [2] 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, 12321–12325 (2005).
- [3] Martin Kaltenbrunner, Tsuyoshi Sekitani, Jonathan Reeder, Tomoyuki Yokota, Kazunori Kuribara, Takeyoshi Tokuhara, Michael Drack, Reinhard Schwodiauer, Ingrid Graz, Simona Bauer-Gogonea, Siegfried Bauer, and Takao Someya, “An ultra-lightweight design for imperceptible plastic electronics”, *Nature*, 499, 458–463 (2013).
- [4] Tsuyoshi Sekitani, Hiroyoshi Nakajima, Hiroki Maeda, Takanori Fukushima, Takuzo Aida, Kenji Hata, Takao Someya, “Stretchable active matrix organic light-emitting diode display using printable elastic conductors”, *Nature Materials*, Volume 8, 494–499 (2009).
- [5] Tsuyoshi Sekitani, Yoshiaki Noguchi, Kenji Hata, Takanori Fukushima, Takuzo Aida, Takao Someya, “A Rubberlike Stretchable Active Matrix Using Elastic Conductors”, *Science*, Volume 321, 1468–1472 (2008).