

関谷 毅

大阪大学 産業科学研究所 教授



超薄・超柔軟性 有機エレクトロニクス素子の 開発と集積化

柔らかいエレクトロニクスの可能性を求めて

我々のグループでは、有機材料の「優れた電氣的・機械的特性(フレキシビリティ)」、「自己組織化現象」、「低エネルギー加工性」を応用したフレキシブルエレクトロニクスの基礎材料・物性研究および応用研究を行ってきた。特に、有機ナノ分子積層技術、有機半導体/絶縁体界面制御技術、有機分子材料物性制御技術、評価技術、有機回路設計技術といった有機材料特有の技術開発を広範な領域において行うことで、有機材料を主材料としたフレキシブルトランジスタの高度集積化を実現してきた。このフレキシブル集積回路を用いることで柔らかいセンサを開発し、医療などさまざまな分野への展開が可能であることを実証してきた。

背景と動機

少子高齢化社会、災害、エネルギー、食料など社会における課題を最適な答えにより解決へと導くことを目的とした電子デバイス「ソーシャルデバイス」が注目を集めている。あらゆるものをインターネットにつなぎ、クラウドコンピューティングにより最適解を導くことから「Internet of Things (IoT)」技術という名前でも知られている。次世代の社会基盤を支える重要な技術と位置づけられており、盛んな研究が行われている。インターネット技術の普及に伴い、容易に情報を得ることができるようになっただけでなく、シリコンテクノロジーの発展により膨大な情報をクラウドコンピューティング(サ

イバー空間)へデータ転送できるようになったことを背景として、ハードウェアとソフトウェアの両面からこれらの研究開発が進められている。

日々の生活が多様化している中、人々の生活の中で活躍しているエレクトロニクスも多様化している。現代社会を支えるシリコンテクノロジーはフォトソングラフィー技術による微細化に伴って「高度集積化、超低消費電力化、高速動作化」を実現し、猛烈な進化を遂げてきた。その一方で、生活スタイルが多様化した近年では、これらの高性能化とは異なる性能指標、すなわち「軽い、丈夫、人々に使いやすい」、など新たな要求性能が生まれ、人々の生活に浸透し始めている。このようにシリコンテクノロジーが苦手とする大面積性、機械的な柔軟性(フレキシビリティ)という性能を補完する新しい技術が「プリンテッドエレクトロニクス技術」、「フレキシブルエレクトロニクス技術」である。我々の研究グループでは、室温近くの低温で成膜可能なトランジスタ「有機トランジスタ」に着目し、これを用いて大規模なフレキシブル集積回路、特にフレキシブルセンサの開発を行ってきた。

研究の成果

私は2003年に東京大学 染谷隆夫准教授(当時)の元に助手として着任し、有機トランジスタの研究を開始した。有機トランジスタの研究に着手した当初、有機トランジスタはシリコンウエハーやガラスなど硬い基材

と、ゲート絶縁膜には二酸化ケイ素(SiO₂)が用いられており、チャネル(伝導)層のみ有機半導体を用いられて作製されていた。そのため、有機トランジスタの機械的特性(フレキシビリティ)は定量的には調べられていなかった。研究グループでは、世界に先駆けて、基材にポリイミド高分子フィルム、ゲート絶縁膜にもポリイミドを用いることで、真に折り曲げられる有機トランジスタの作製に成功し、注目を集めた[1]。特に限界の折り曲げ半径は1mmより小さく、有機トランジスタが真にフレキシブルトランジスタであることを実証した。この当時、有機トランジスタの実用化において最大の課題は、その高い駆動電圧であった。実際に、フレキシブル高分子絶縁膜の信頼性を確保するため、500nmの厚みでゲート絶縁膜を作製しており、結果的に40~100Vの高電圧を印可し有機トランジスタを駆動していた。この高い駆動電圧が、実用化の大きな障害となっていた。

2007年に、私はドイツへ短期出張の機会をもらい、共同研究者であるマックスプランク固体物理研究所のHagen Klauk博士の元、2nmの厚みで高い絶縁性を持つリン酸系自己組織化単分子膜の成膜技術を学んだ。帰国後に、この技術を大面積の範囲で利用できるようにするためのプロセス開発を行い、2009年にはこの自己組織化単分子膜を用いたゲート絶縁膜で、2V駆動で動作する大規模有機集積回路[2]や、世界初となるフレキシブル有機フローティングゲート型不揮発性メモリトランジスタの開発[3]に成功した。

2010年には、3V駆動において限界折り曲げ半径100 μ mを実現し、これを用いた新しい医療電子デバイス「インテリジェント医療用カテーテル」を開発した[4]。我々は、フレキシブル技術のみならず、電子デバイスをゴムのように自由自在に伸縮させることのできるストレッチャブルエレクトロニクス技術に関しても世界に先駆けて実践し、その有用性を実証してきた[5, 6]。

さらに、共役系高分子型の有機電界発光デバイス(OLED)[7]、バルクヘテロ型の有機光電変換デバイス(太陽電池、フォト

図1 柔軟性の高いエレクトロニクス素子の開発履歴

ウルトラフレキシブルTFTの研究開発

	2005年[1]	SAM技術	2010年[4]	配向技術	2013年[9]
厚み	200 μ m	1/10	25 μ m	1/10	2 μ m
駆動電圧	40 V	1/10	3 V		3 V
移動度	0.3 cm ² /Vs		0.5 cm ² /Vs	$\times 9$	4.5 cm ² /Vs
限界曲げ半径	5000 μ m	1/50	100 μ m	1/20	5 μ m

電氣的特性と機械的特性(機械的柔軟性)を同時に改善

図2 さまざまな機能を有する

ウルトラフレキシブルエレクトロニクス群



図3 ゴムのように伸縮自在なエレクトロニクスの開発とその要素技術

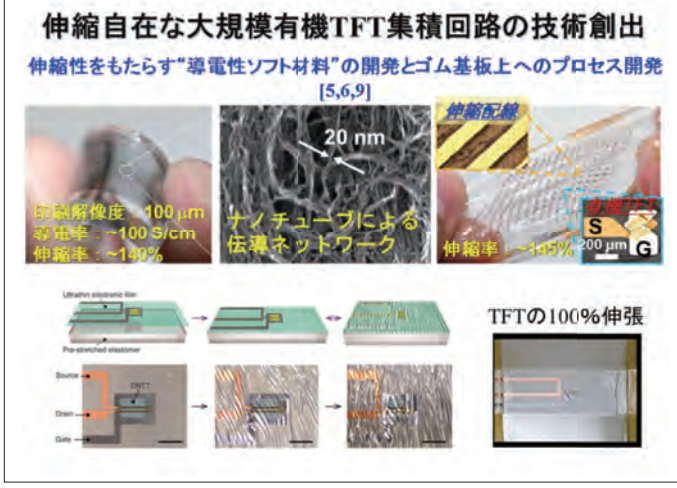
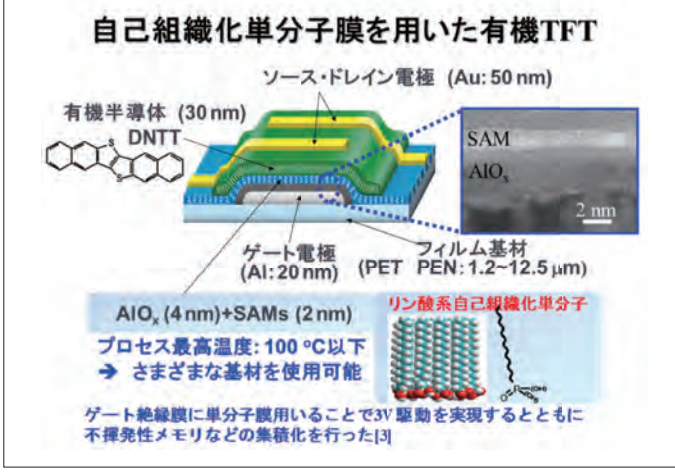


図4 フレキシブルかつ低電圧駆動を可能にした自己組織化単分子膜を用いた有機トランジスタの断面模式図と断面TEM写真



ディテクタ(OPD) [8]、トランジスタ集積回路 [9]、生体親和性の高いゲルを搭載した歪みセンサ [10]、磁気センサ [11] を1ミクロン厚みのプラスチックフィルム上に作製することで、感知することができない新しいエレクトロニクスの概念「Imperceptible Electronics」を創出し、新しいエレクトロニクスの姿を示した。このような装着感のない薄いセンサは次世代ヒューマンインターフェースとして期待されている。実際に、このような世界最薄膜、最軽量、最柔軟性を持つセンサフィルムを用いて、次世代の装着感のないウェアラブルエレクトロニクスなど、次世代医療・福祉・ヘルスケアへの応用研究を医師とともに進めている。ソフト材料である有機物を用いた電子デバイス、光デバイス、機能性材料が、情報通信技術から医療福祉分野まで広範な領域において新しい科学を創出するとともに、新しい応用展開が可能であることを実証し、社会に示してきた。

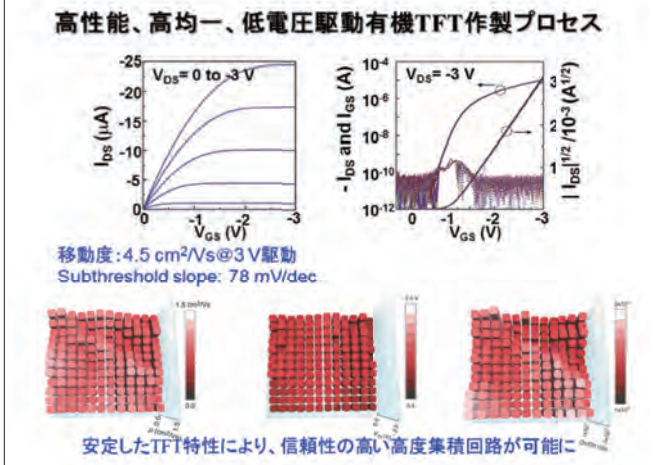
の応用が期待されている。例えば、装着感のないウェアラブルセンサがその一例である。実際、最近のウェアラブルエレクトロニクスの活発な開発動向からも見て取れるように、生体情報を違和感なく計測することを目的とした生体計測用センサへの期待は極めて高いものになっている。ところが既存のシリコンテクノロジーを基盤とした生体センサは、硬く、折り曲がらないため、生体との親和性が低いことが大きな課題になっている。このような状態で正確な生体情報を得るためには、センサを体に強く押し当てるか、吸着させなければならないため、違和感や装着感が生じ、実用化や多くの国民への普及の妨げになっている。我々の研究グループでは、医師との緊密な共同研究により、大面積かつ薄膜な筋電計測シート、心電計測シートなどを開発し、しなやかに生体に密着するシート型のセンサの有用性を検証している。

また、最近では、IoT技術に注目が集まり、実世界のさまざまな情報を的確に計測するためのセンサ技術が求められている。本研究で取り組んできた有機エレクトロニクスは、将来的には印刷で作製できる可能性を有しており、シリコンテクノロジーでは実現が困難であった「大面積センサシステム」を実現できる。実世界の情報を的確に捉え、さまざまなデバイスが連携する中で新しい機能を発現する“ソリューション型エレクトロニクス”において、シリコンテクノロジーを補完する技術として期待されており、今後ますます研究を推し進めていきたい。

将来の展望

このように柔らかい薄膜センサは、さまざまな分野へ

図5 自己組織化単分子ゲート絶縁膜を用いた厚み1ミクロンの有機トランジスタの基本特性



References (参考文献)

- [1] Tsuyoshi Sekitani, Shingo Iba, Yusaku Kato, Yoshiaki Noguchi, Takao Someya and Takayasu Sakurai, Applied Physics Letters 87 (2005) 173502.
- [2] Tsuyoshi Sekitani, Makoto Takamiya, Yoshiaki Noguchi, Shintaro Nakano, Yusaku Kato, Takayasu Sakurai, and Takao Someya, Nature Materials 6 (2007) 413-417.
- [3] Tsuyoshi Sekitani, Tomoyuki Yokota, Ute Zschieschang, Hagen Klauk, Siegfried Bauer, Ken Takeuchi, Makoto Takamiya, Takayasu Sakurai, and Takao Someya, Science 326 (2009) 1516-1519.
- [4] Tsuyoshi Sekitani, Ute Zschieschang, Hagen Klauk, and Takao Someya, Nature Materials 9 (2010) 1015-1022.
- [5] Tsuyoshi Sekitani, Hiroyoshi Nakajima, Hiroki Maeda, Takanori Fukushima, Takuzo Aida, Kenji Hata, and Takao Someya, Nature Materials 8 (2009) 494-499.
- [6] Tsuyoshi Sekitani, Yoshiaki Noguchi, Kenji Hata, Takanori Fukushima, Takuzo Aida, and Takao Someya, Science 321 (2008) 1468-1472.
- [7] Martin Kaltenbrunner, Matthew S. White, Eric D. Glowacki, Tsuyoshi Sekitani, Takao Someya, Niyazi Serdar Sariciftci, and Siegfried Bauer, Nature Communications 3 (2012) 770 doi:10.1038/ncomms1772.
- [8] Matthew S. White, Martin Kaltenbrunner, Eric D. Glowacki, Kateryna Gutnichenko, Gerald Kettlgruber, Ingrid Graz, Safae Aazou, Christoph Ulbricht, Daniel A. M. Egbe, Matei C. Miron, Zoltan Major, Markus C. Scharber, Tsuyoshi Sekitani, Takao Someya, Siegfried Bauer, and Niyazi Serdar Sariciftci, Nature Photonics 7 (2013) 811-816.
- [9] Martin Kaltenbrunner, Tsuyoshi Sekitani, Jonathan Reeder, Tomoyuki Yokota, Kazunori Kuribara, Takeyoshi Tokuhara, Michael Drack, Reinhard Schwödlaue, Ingrid Graz, Simona Bauer-Gogonea, Siegfried Bauer, and Takao Someya, Nature 499 (2013) 458-463.
- [10] Sungwon Lee, Yusuke Inoue, Dongmin Kim, Amir Reuveny, Kazunori Kuribara, Tomoyuki Yokota, Jonathan Reeder, Masaki Sekino, Tsuyoshi Sekitani, Yusuke Abe, and Takao Someya, Nature Communications 5 (2014) 5898 doi:10.1038/ncomms6898.
- [11] Michael Melzer, Martin Kaltenbrunner, Denys Makarov, Dmitriy Karnaushenko, Daniil Karnaushenko, Tsuyoshi Sekitani, Takao Someya & Oliver G. Schmidt, Nature Communications 6 (2015) 6080 doi:10.1038/ncomms7080.