

The journey of conducting polymers from discovery to application

2022 年 11 月 16 日

はじめに

若干古くなるが 2020 年の Nature Materials に Facchetti と Guo による “The journey of conducting polymers from discovery to application” というタイトルのコメントが掲載された。この雑誌にこのような内容のコメントが掲載されるのは珍しいのではないかと。著者の一人である Facchetti はノースウェスタン大学の教授であるが、有機 FET の開発を行うベンチャー企業 Flexterra の創設者でもあり、導電性ポリマー(CP)に関する多くの文献も発表している。CP の実用化の最先端で開発に従事している著者らの市場に関するコメントは同じ CP の開発に従事している技術者にも大いに有益であると思ひ、コメントの要約を作成した。

1. CP の市場 (Table1)

(1) 帯電防止及び電磁遮蔽用途: 同分野での CP の市場は急拡大し、2018 年には US \$ 900 million になっている。

(*) 筆者が作製した CP の帯電防止剤を他の種類の帯電防止剤と比較したものを付表に示した。

(2) 有機薄膜太陽電池(OSC) : PEDOT:PSS を筆頭に CP は OSC デバイスの構成材料として有望視されている。OSC モジュールの市場規模は 2022 年には US \$ 150 million に達すると予想されている。Armor/Opvius, Epishine, Kolon Korea, Moresco Japan and Sunew Brazil などの企業が実用化に注力している。なお、既存の太陽電池の市場規模は 2020 年に US \$ 200 billion であった。

(3) 有機 TFT(OTFT): CP の移動度は a-Si ($\sim 0.5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)と比較して遜色ないが、コスト面では a-Si より大幅に高価になるため、液晶ディスプレイのバックプレーンとしては勝負にならない。また、有機 EL(OLED)用途には poli-Si(移動度 $> 10 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)との競争となり、現時点では移動度の面から CP の採用は難しい。

しかし、OTFT はフレキシブルエレクトロニクス分野で多くの可能性を有しており、プラスチック基板上に載せた OTFT は折り曲げ可能なエレクトロクロミック表示デバイス及び電気泳動型表示デバイスとして 2025 年には US \$ 50 billion に成長すると予測される。CP を用いた OTFT の他の用途として比較的簡易な圧力、ガス、温度のセンサや RFI タグを作動させる印刷法による相補的回路などが考えられている。既存の市場規模は 2019 年で 2 千億 US \$ 200 billion と大きい。OTFT の実用化を目指している企業は E Ink, AUO, Flexenable, Plastic Logic, pi-Crystal 及び Flexterra などである。

(3) 二次電池 : 従来は、CP を電極に用いたポリマー電池の実化は難しいと考えられていたが、最近では既存の Li イオン二次電池の性能や安定性を凌ぐものも開発されるようになってきている。最大の課題はコスト面でのブレークスルーである。

Table1 Applications of Conducting Polymers & Markets			
Applications of Conducting Polymers & Markets			Remarks
antistatic/electromagnetic shielding		(CP) \$ 900 million (2018)	
OSC		(module) \$ 150 million (2022)	SC: \$ 200 billion (2020)
OTFT on plastic	electrochromic/electro-phoretic display	(module) \$ 50 billion (2025)	
	inprinting complementary circuitries (simple pressure/gas/temperature sensors and radiofrequency identification tags)		\$ 200 billion (2019) a-Si (mobility $\sim 0.5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)
OLED	smartphone & TV	(module) \$ 300 billion (2025)	p-Si (mobility $> 10 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)
Batteries			
Bioelectronic applications	skin-attachable or skin-implantable devices		
Organic electrochemical transistor			

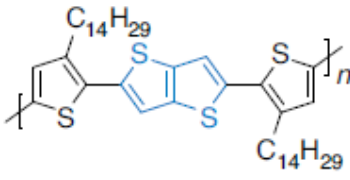
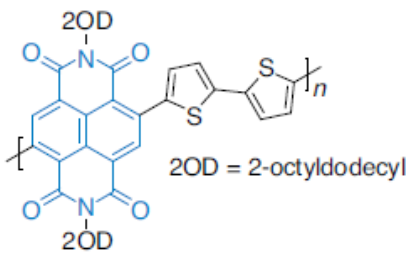
2. CP の生産コストの推定 (Table2)

Table2 に示すように、PEDOT:PSS は実用化が最も成功した CP であり、年間 100t 以上の生産規模で、Kg 当たり US\$300 -600 で市場より入手できる。それ以外の CP の生産規模はいずれも本格的なものではなく、Table2 に示した数字は研究室での製造方法をベースにコストを予測したものである。P3HT は立体規則性の高いものと低いものそれぞれのコスト試算がされている。無機半導体と真に競争できる CP の価格は Kg 当たり US\$ 50 以下であり、製造方法で大幅なブレークスルーが必要となる。

3. CP のこれから

(1) p-型 CP の電気伝導度、移動度及び安定性といった性能に比肩する n-型 CP の開発は遅れていたが、最近では移動度及び安定性に関しては大幅な向上が図られてきている。例えば、N2200 は高移動度で長期安定性が優れた n-型 CP である。構造式から分かるようにドナー成分(ナフタレンジイミド)とアクセプター成分(チオフェン)の交互共重合体であり、N2200 が見出されてから多くのドナー成分とアクセプター成分からなる CP(p-型及び n-型)が開発され、性能アップが図られてきた。

(2) 今まででは CP の応用分野としてその電気的特性に注目したものが多かったが、最近では CP が電子伝導とイオン伝導の両者の伝導機構を有していることに注目が集まっている。CP の持つ柔軟性や延伸性と共に無機系の半導体と比較した場合の優位性が明らかになってきた。CP は生体親和性が高く、皮膚に貼付したり体内に埋め込むことができ、神経回路の電気物理的なシグナルを検知したりドラッグデリバリー用途への研究が進んでいる。

Table2 Estimated Production Cost of Conducting Polymers		
	Production Scale	Selling Price (SP) & Estimated Production Cost (EPC)
PEDOT:PSS	> 100 T/y	\$ 300~600/Kg (SP)
PPy		\$ 5,000/Kg (EPC)
PAn		\$ 500/Kg (EPC)
P3HT		\$ 1,000 ~2,000/Kg (rejoirregular) (EPC) \$ 10,000/Kg (rejoiregular, >97%) (EPC)
PBTTT P(NDI2OD-T2)		\$ 60,000~80,000/Kg (EPC)
 PBTTT  P(NDI2OD-T2) or N2200		

4. おわりに

CP の開発及び実用化の最前線で活躍している研究者による市場予測だけに、余り楽観的にならない確かな市場予測記事であると思う。本コメントでは二次電池と並んで興味を持たれているスーパーキャパシタへの言及はないが、EV のマーケットの拡大と共にさらに注目されてくるのではないか。また、CP がイオン伝導と電子伝導の両者の伝導機構を有している点は、著者が触れているようにバイオ分野への展開が期待でき、既に多くの研究成果が発表されている。CP の応用の主流となる可能性を秘めている。

< 文献 >

X. Guo & A. Facchetti, *Nature Materials* 2020, 19, 922

<付表>

付表 各種帯電防止剤の性能比較

	有機材料			無機材料	
	導電性 高分子	高分子型 帯電防止剤	低分子型 帯電防止剤	カーボンブ ラック	金属
導電機構	電子伝導	イオン伝導	イオン伝導	電子伝導	電子伝導
電気特性	○	△	△	○	◎
透明性	◎	◎	◎	×	△
材料純度	○	○	○	×	○
アウトガス	◎	△	△	×	○
汚染性	○	△	×	△	○
耐久性	○	△	×	◎	○
湿度依存性	◎	×	×	○	◎
価格	△	○	○	◎	◎

以上

(HP のトップ:<http://www5d.biglobe.ne.jp/~hightech/>)