

究極の電荷輸送を指向した革新的有機半導体パラダイムの創出

研究代表者

安田 琢磨 九州大学稲盛フロンティア研究センター 教授



1. 研究の背景と達成目標

有機物中を電荷キャリアはどれだけ速く動けるのか？ これは、有機エレクトロニクスの根幹的課題である。有機半導体の電荷移動度を $10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 以上まで向上できれば、高速スイッチングを可能にする高性能有機トランジスタが作製できる。さらに、有機半導体の移動度が多結晶シリコンに匹敵すれば、現行の技術では実現し得ない新しい応用展開の可能性を開拓できる。本研究の目的は、有機物の究極の電荷輸送機能を探索し、その特性や機能をトランジスタ素子において実証することである。新たに開発した種々の有機半導体材料系において、分子集積構造と電子物性の関係を系統的に解明することにより、究極の電荷輸送機能の創出を目指した。これまでの有機半導体の常識を覆して、アモルファスシリコンを凌駕し、さらには多結晶シリコンに匹敵する高速電荷輸送機能を実現することで、新しい有機半導体パラダイムの創出に向けて研究に取り組んだ。

2. 主な研究成果と社会、学術へのインパクト

- 高速電荷輸送が可能な新規有機半導体材料の創出に成功し、有機単結晶トランジスタにおいて、約 $35 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ の最高水準のキャリア移動度を観測することに成功した。また、分子集積構造と電荷輸送特性の関係を実験と理論の両面から明らかにすることで、通常の有機物では実現困難な高速電荷輸送機能の発現に必要な材料設計指針を得ることができた。有機エレクトロニクスの飛躍的な発展に寄与することが期待される。
- 単純な溶液プロセスを用いて大面積に結晶性薄膜を形成可能な有機半導体材料を開発し(図1)、有機薄膜トランジスタにおいて $7.4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ の極めて高いキャリア移動度が得られることを実証した(図2)。これにより、将来的にはフレキシブルな有機トランジスタアレイ等の作製が可能となり、様々な用途への応用展開が期待できる。
- 高度縮環 π 共役骨格中に硫黄・セレン・テルルの周期の異なるカルコゲン元素を導入した有機半導体の新規合成手法を開拓した。これにより、カルコゲン元素が分子集積構造や電荷輸送機能に与える効果を系統的に検証することができ、今後の電子機能材料の開発への有用な手法となり得る。
- U字型の特異な分子トポロジーを有する有機半導体分子においても二分子膜様の集積構造を形成することで、優れた電荷輸送特性が発現することを見出した。従来材料の設計とは一線を画す新たな設計指針を提示することができた。

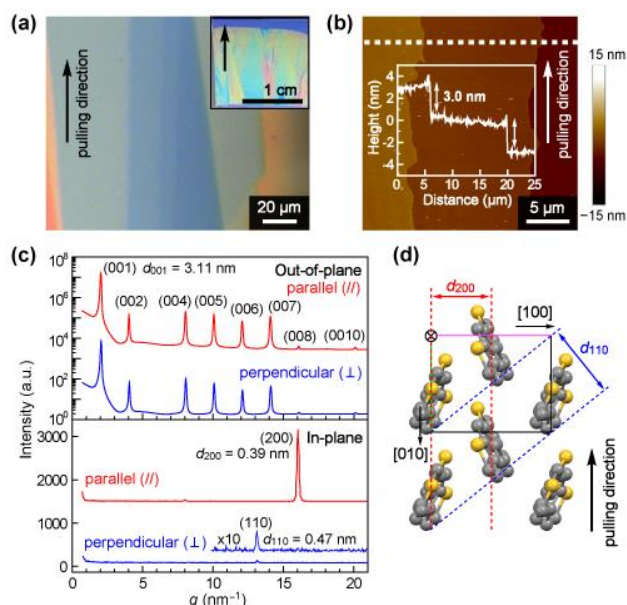


図1 ディップコート法を用いた分子配向性結晶超薄膜の作製：(a) 光学顕微鏡像、(b) AFM 像、(c) XRD パターン、(d) 分子集積構造

3. 研究成果

本研究で新たに開発した種々の有機半導体が、自己組織的にマイクロリボン構造体を形成し、これが効率的な電荷輸送パスとして機能することを実験および理論の両面から明らかにした。特に、高度縮環 π 共役骨格を有するヘテロアセン化合物に関しては、単結晶有機トランジスタにおいて約 $35 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ の極めて高いキャリア移動度を示すことを見出した。続いて、これらの材料を用いて簡便なディップコート法による結晶超薄膜の作製と、これを活性層に用いた薄膜トランジスタの作製・評価を試みた。微小入射角 X 線回折 (GIXD) 等の解析により、薄膜中における分子配向性について評価し、分子長軸が基板に対して完全に垂直な状態で自己組織的に配列していること、さらに基板引揚方向に対して結晶 b 軸が水平となった異方的ヘリボンパッキング構造を形成していることを明らかにした (図 1)。その結果、薄膜トランジスタにおいて、引揚水平方向のホール移動度は、 $7.4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ に達し、引揚垂直方向と比較して約 10 倍の顕著な電荷輸送の異方性を観測

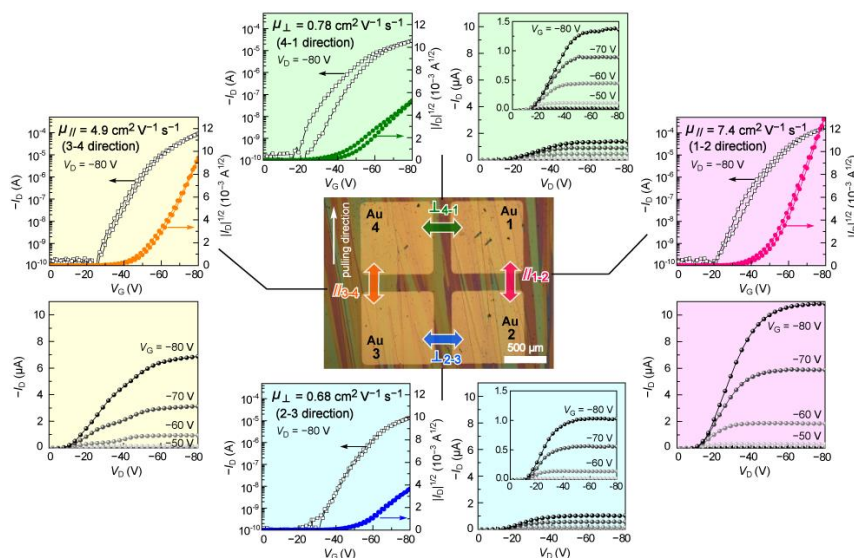


図 2 配向性結晶超薄膜を用いた有機トランジスタの電荷輸送特性

した (図 2)。結晶性マイクロリボン構造体のみならず、比較的大面積な薄膜状態においても精緻な分子配向・集積構造を構築でき、これにより高速電荷輸送を実現することができた。

4. 今後の展開

これまでの研究で得られた知見に基づき、電荷輸送に最適な分子集積構造をデザインして材料設計へフィードバックできれば、さらなる電子機能の向上が見込まれる。超高速電荷輸送能を有する有機半導体材料は、今後の有機エレクトロニクス分野の飛躍的發展に必要な不可欠なキーエレメントであり、本研究の成果は、新しい有機半導体パラダイムの創出に寄与するものと期待している。

5. 発表実績

- [1] T. Oyama, T. Mori, T. Hashimoto, M. Kamiya, T. Ichikawa, H. Komiyama, Y. S. Yang, and T. Yasuda,* *Adv. Electron. Mater.* **2018**, *4*, 1700390.
- [2] H. Komiyama,* T. To, S. Furukawa, Y. Hidaka, W. Shin, T. Ichikawa, R. Arai, and T. Yasuda,* *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2018**, *10*, 11083–11093.
- [3] T. Mori, T. Oyama, H. Komiyama, and T. Yasuda,* *J. Mater. Chem. C* **2017**, *5*, 5872–5876.
- [4] T. Oyama, Y. S. Yang, K. Matsuo, and T. Yasuda,* *Chem. Commun.* **2017**, *53*, 3814–3817.
- [5] J. Lee, N. Aizawa, and T. Yasuda,* *Chem. Mater.* **2017**, *29*, 8012–8020.
- [6] H. Tachibana, N. Aizawa, Y. Hidaka, and T. Yasuda,* *ACS Photonics* **2017**, *4*, 223–227.
- [7] S. Furukawa, H. Komiyama, and T. Yasuda,* *J. Phys. Chem. C* **2016**, *120*, 21235–21241.