

研究紹介（堀家担当）

「次世代のエレクトロニクスは、物質物理化学から生まれる」

～AI、IoT、環境発電を支える新しいマテリアル・サイエンス～

半導体と聞くと、電気電子工学や情報工学の分野だと思いませんか？ 実は、これからの半導体業界の鍵を握っているのは「化学」です。

AI（人工知能）、自動運転、スマート家電など、私たちの生活を変える技術は、高性能なハードウェアなしには成立しません。そして、そのハードウェアの限界を突破するのは「新しい材料の創出」です。半導体業界は今後も着実に成長を続ける分野であり、そこでは原子・分子レベルで物質を制御できる化学者の視点が強く求められています。

当グループでは、物理化学、有機・無機化学、デバイス工学、エネルギー関連化学の概念を融合し、未来のエネルギーとエレクトロニクスを支える「物質物理化学」を探求しています。

研究内容 ～有機エレクトロニクス応用に向けた物質物理化学の理論と実験～

結晶成長の化学
分子薄膜の高度秩序化
高分子・CNTの配向制御

電荷移動・エネルギー移動の化学
熱電発電
CNT、 π 共役分子の電荷ドーピング
光・熱・電子物性、量子化学計算

基礎物理化学
有機・ハイブリッド材料の
構造・物性・
デバイス機能の理論・実験

分子エレクトロニクス
イオントロニクス

気液相転移の化学
真空技術と
液体の融合
電界効果
環境発電

エッジAI
IoT

蒸発係数(Langmuir式)の定量理論と計測法
難揮発性液体(イオン液体)の蒸気圧の定量法

電解液における熱電効果の
理論と基盤技術
熱化学電池 電気化学ドーピング

1. 結晶成長の化学

～分子を自在に並べ、極限の性能を引き出す～

材料の性能は、その構成要素である分子や原子が「どう並んでいるか」で劇的に変わります。私たちは、有機分子や高分子、カーボンナノチューブ（CNT）などのナノ材料を、原子・分子レベルで高度に配向・秩序化させる技術を研究しています(Chemistry Letters 2016 など)。

理論と実験の両面から「分子薄膜の高度秩序化」や「構造・物性制御」に挑み、既存のプロセスでは作れない、理想的な結晶構造・配向を持つデバイス材料の創製を目指しています。

2. 電荷移動・エネルギー移動の化学

～電気と熱を操る、新しいエネルギー変換～

電子や熱の動き（移動）を化学的に制御することで、新しい機能を生み出します。特に注力しているのが、カーボンナノチューブ（CNT）を用いた熱電変換材料です。私たちは、独自の「二環式グアニジン超塩基」や「有機超塩基イオン液体」を用いたドーピング技術により、これまで困難とされてきた空気中で安定な「n 型 CNT」の創製に成功しました（Nature Communications 2022; Carbon 2024; Journal of Materials Chemistry C 2025; Advanced Sustainable Systems 2025 など）。計算化学や合成技術を駆使し、高い発電性能と安定性を兼ね備えた材料とデバイスの開発を行っています。捨てられている「熱」を「電気」に変える熱電発電や、光・電子物性の解明を通じ、環境発電やセンシングの基盤技術確立を目指しています。

3. 気液相転移の化学

～真空と液体を融合し、界面の物理を解き明かす～

「液体」と「気体」の境界で何が起きているのか。私たちは、蒸発係数（Langmuir 式）の定量理論の構築や計測法の開発を行っています。特に、真空中でも蒸発しにくい不思議な液体「イオン液体」の蒸気圧を定量するなど、真空技術と液体化学を融合させたユニークなアプローチを展開しています（Bulletin of the Chemical Society of Japan 2025 など）。この基礎物理化学的な知見は、高真空下での成膜プロセスや真空グリースの開発に直結する重要な基盤技術となります。

4. 電気二重層の化学

～イオンと電子のトランスデューサー：イオントロニクス～

固体（電極）と液体（電解液）の界面に形成される「電気二重層」や「酸化還元反応」を利用したデバイス機能の開拓を行っています（ACS Applied Materials & Interfaces 2020; Journal of Materials Chemistry C 2022; Advanced Materials Technologies 2024; Chemical Engineering Journal 2025 など）。電子だけでなく「イオン」の動きを信号やエネルギーとして利用する「熱電キャパシタ」や、電解液中での酸化還元反応を利用した「熱化学電池」、気温変化だけで発電可能な「マルチレドックスシステム」にまつわる理論構築、材料探索、物性解明、デバイス開発を進めています。安全性が高く出力に優れた次世代の環境発電デバイスへの応用を目指しています。

【学生の皆さんへ：化学の力でデバイスを変えよう】

私たちの研究室には、物理化学（量子化学、熱力学）、有機・無機化学の知識はもちろん、物性科学、半導体、デバイス、ナノテクノロジー、計測技術に興味のある学生が活躍できるフィールドが広がっています。「化学の知識を使って、最先端のデバイスを作りたい」「物理と化学のフロンティア領域で、新しい現象を見つけたい」。そんな意欲ある皆さんと、次世代のサイエンスとエンジニアリングを切り拓くことを楽しみにしています。

「IoTが実現する未来社会」
家庭や産業のあらゆる場面で、エネルギー利用の最適化、利便性向上



IoTの「電源問題」
“数兆個”のIoTセンサに対し定期的な電池交換？
→環境発電による「電力の地産地消」ソリューション



●熱電発電（温度差発電）：
身の回りの排熱を電力へ
●一次エネルギーの約50%は
中低温排熱（ $\leq 150^\circ\text{C}$ ）としてロス

有機材料ならではの利点を活かした素子

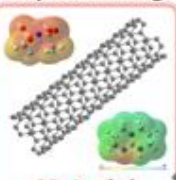
①製造にかかるエネルギーコスト(低)
・・・発電によるエネルギー・ペイバック

②小型・軽量・・・適用範囲(広)

③レアメタルフリー
・・・量産、可燃ごみとしての廃棄が可能


Key Technologies

Material



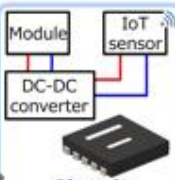
カーボンナノチューブの安定なドーピング（p/n作り分け）による長期安定性
高導電性・高/ローファクタのCNTフィルム製造
> 1000 S/cm, 100 $\mu\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$

Device



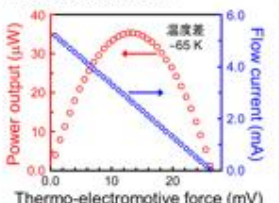
カーボンナノチューブウェハーの製造技術
フィルム積層による全有機物の熱電モジュール
< 3 x 3 x 1 mm³
~80 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ @ $\Delta T = 65^\circ\text{C}$

Circuit




熱電モジュールと昇圧回路のインピーダンスマッチング
10mVオーダーの電圧入力を3.3Vに昇圧出力
Beacon, LED駆動

Demonstration



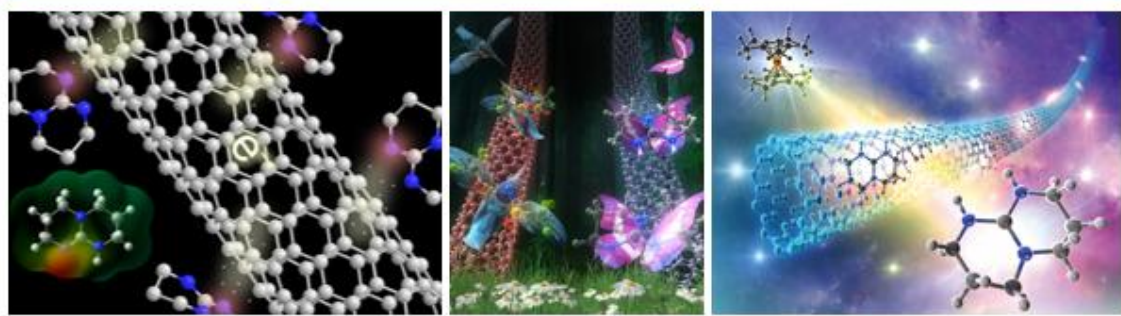
カーボンナノチューブと絶縁性高分子のフィルムを交互にスタックした全有機物の熱電素子ながら、35 μW の高出力
・DC-DCコンバータを介した3.3Vへの昇圧とIoTセンサの駆動を実証

温度差→電気変換



昇圧
無線情報送信

“分子間相互作用の物理化学”がKey Technology
～空気中・高温・高湿でも安定に扱えるp型およびn型のカーボンナノチューブを作る～



二環式グアニジン超塩基ドーピングによるCNTのn型化
Nature Communications (2022)

有機超塩基イオン液体を利用したCNTの電気化学ドーピング
Carbon (2024)

有機超塩基イオン液体を利用したカチオン交換によるn型CNTの安定化
Journal of Materials Chemistry C (2025)

Molecular Systems Design & Engineering (2017); *Communications Materials* (2024); *Energy Material Advances* (2024); *The Journal of Physical Chemistry C* (2025); 応用物理(2024)