

大学の研究・動向

環境調和型エレクトロニクスの現状と展開 —分子系エレクトロニクスおよび電気自動車研究—

工学研究科 電子工学専攻 電子物性工学講座 電子材料物性工学分野

教授 松 重 和 美
准教授 山 田 啓 文
助教 野 田 啓
助教 小 林 圭
(産官学連携本部)

1. はじめに

21世紀に入り、環境・エネルギー問題が顕在化し、その克服が緊急の課題となっている。その解決に科学技術、特に電気電子関連技術の果たす役割は、以前にも増して大きいものとなっている。革新的科学技術の推進には、さまざまな基盤的要素技術を開発するとともにその集積・融合が必要不可欠であり、基盤的観点だけでなく、統合的観点からも時代を先導する技術を開発し、推進して行くことが必須となる。

このような視点から、当研究室では環境親和性の高い有機分子材料を対象とする以下の2つの研究課題「①ナノ機能構造の構築・制御、分子スケールでの電子物性・構造評価、さらには分子操作をも可能とする新規手法の確立(分子ナノテクノロジー)」、「②従来のSiを中心とする無機系材料を用いたデバイスから、有機系材料を利用した半導体・太陽電池を含む有機系エレクトロニクスおよび分子デバイスに関する研究開発」に取り組むとともに、技術統合的観点から「③最近急激に関心を集め、環境に優しい電気自動車に関して、バッテリーとキャパシターのハイブリッドエネルギーシステムや竹などの自然素材の採用、伝統文化との融合を図った京都風電気自動車の提案」を行なっている。

これまで精力的に進めてきた個別的な基盤的研究に加えて、統合的視点からも研究を推進することで、広範な技術分野において新規エレクトロニクスを進化させ、グリーン社会に向けての新たな電子デバイスの創成や、(自動車)産業構造の変革を誘導する一助となることを期待している。

2. 分子ナノテクノロジー

(1) カーボンナノチューブエレクトロニクス

有機分子やナノカーボン材料を構成する炭素骨格は、多様な結合様式(sp, sp², sp³軌道)に由来して、特異な電子構造を有するが、特に近年、単層カーボンナノチューブ(SWNT)やグラフェンなどのいわゆるナノカーボン材料(図1(a)(b)参照)は、バリスティック伝導やディラック粒子性など、その低次元構造に起因する特異な電子物性を示すことから、基礎・応用の両面から精力的に研究が進められている。グラフェンの革新的研究により、英マンチェスター大学のAndre Geim、Konstantin Novoselov両氏が2010年のノーベル物理学賞を受賞したニュースも、大変記憶に新しい。ここでは、次世代のナノスケールのデバイスとして期待されている、SWNTをゲートチャンネルに用いたカーボンナノチューブ電界効果トランジスタ(CN-FET)のチャンネル電子状態評価の最近の研究について紹介する。

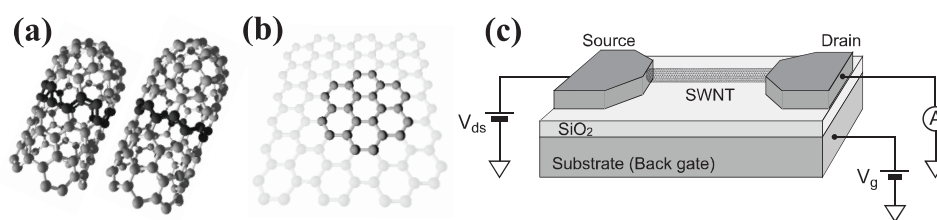


図1 注目される低次元ナノカーボン材料.

(a) カーボンナノチューブ. 左: armchair 構造, 右: zigzag 構造. (b) グラフェンシート. (c) CN-FET の模式図.

CN-FET の特性は SWNT と金属電極との界面およびチャネルの電子状態によって支配されるため、接合界面および SWNT の電子状態を解析することは本質的に重要となる。われわれは、ナノメートルスケールの空間分解能で表面電位計測が可能な、周波数検出型のケルビンプローブ原子間力顕微鏡 (FM-KFM) および各点 AFM ポテンシオメトリー (P-AFMP: Point-by-point AFM Potentiometry) を新たに開発し、動作状態の CN-FET のチャネル電子状態を直接計測することに成功した。図 2 に、P-AFMP による SWNT チャネル電位の測定例を示す。用いた試料は、チャネル長 300 nm の p 型の CN-FET 試料である (図 2(a))。図 2(b) は、ソースドレイン間に 1V (V_{ds})、ゲート電圧 V_g に -5V (左図) あるいは 5V (右図) を加えた状態での、チャネル領域の電位マップ (P-AFMP 像) である。図 2(c) のチャネルに沿っての電位プロファイルでも分かるように、ゲート電圧を 5V に増加すると、チャネル電位は上昇し、ソース側からのショットキー障壁を通してのホール注入が抑圧される (ドレイン電流の減少)。

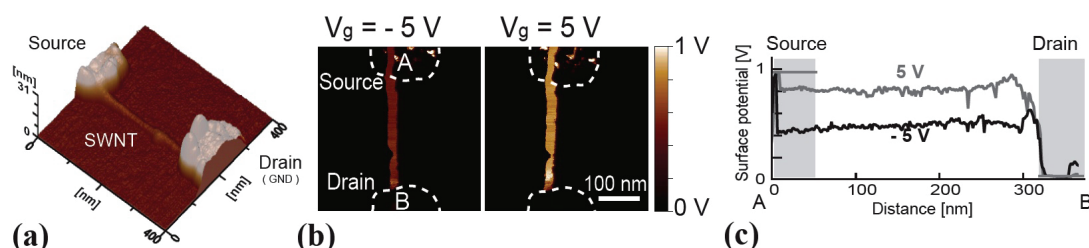


図 2 (a) CN-FET の AFM 像. (b) $V_{ds} = 1$ V, $V_g = 5$ V および -5 V のときの電位像 (P-AFMP 像). (c) (b) から得られた SWNT チャネル上の電位プロファイル.

(2) バイオナノ機能デバイスのための基盤研究

生体分子は、DNA や種々のたんぱく質などにも見られるように、一つ一つの分子が固有の機械、電気、化学機能を担っており、かつ機能構造単位として独立しているという際立った特徴をもっている。また、生体分子は自己組織的に形成され、一般にエネルギー効率性が高く、環境調和性にも優れているということも大きな特徴となっている。われわれは、こうした単一の分子自身が内在的にもっている種々の機能を活用する、分子スケールの電気・機械素子「分子ナノ機能デバイス」の構築を目指している。一方、分子スケールデバイスの実現には分子を直接制御し、分析することが必要不可欠となることから、単一分子の直接制御・操作・観測・分析を可能にするナノプローブテクノロジーに関する研究にも注力している。特に、周波数検出型の原子間力顕微鏡 (FM-AFM) は、図 3 に示されるように、真空中 (図 3(a)) だけでなく、生理環境である緩衝溶液などにおいても原子・分子スケールの観察が可能になったことから (図 3(c))、生体分子機能の直接評価やバイオナノ機能デバイス構築に向け大きな期待が寄せられている。

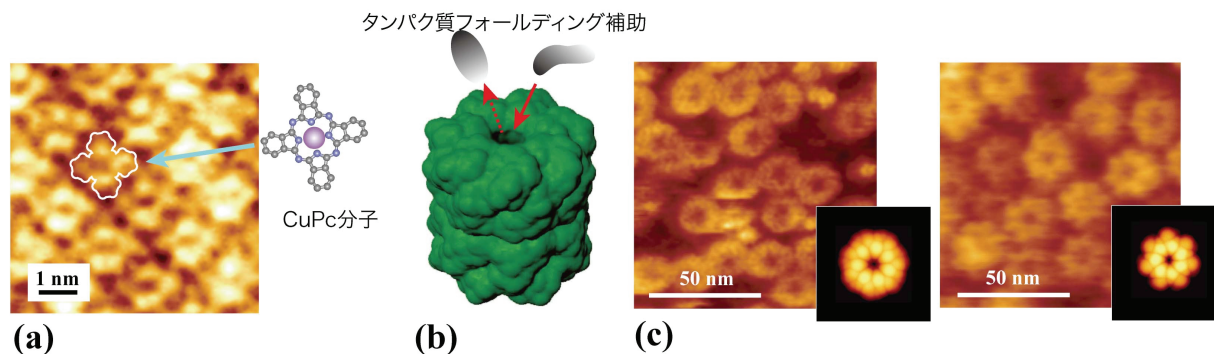


図3 (a) 金表面上の銅フタロシアニン分子の高分解能 FM-AFM 像 (超高真空中). (b) タンパク質分子の自己組織的な構造形成 (フォールディング) を促進する機能をもつ, 環状の分子シャペロン (GroEL) のモデル図. (c) 生理環境溶液中における個々の GroEL 分子の FM-AFM 像. 左図は分子下部のハーフユニット面 (赤道面) の AFM 像. 右図は GroEL 上部の AFM 像に相当する. それぞれの図の右下の正方形は、対応する分子モデル図を表す.

3. 有機系エレクトロニクス

有機電界発光 (EL: Electroluminescence) ディスプレイや照明の商品化に代表されるように、有機半導体におけるキャリア (ホールや電子) 伝導を利用した有機系エレクトロニクス素子の研究開発は著しく進展している。現在、有機材料特有の可塑性・柔軟性を活かしたデバイス (例えば、巻き取り可能な「ローラブル」素子や折り曲げ可能「フォルダブル」素子) への研究開発が進む中で、われわれは、インクジェット法やロール・ツー・ロール (R2R) 等のプリンタブル技術による低価格、低エネルギー負荷で製造可能な太陽電池、プロセッサ、ディスプレイを集積化した「有機光電子デバイス統合システム (OFIS: Organic Function Integration System)」を提案している。これは、図4に示すように紙や繊維などの任意表面上に、電源ケーブルから解放された真のユビキタスシステムを実現するものである。

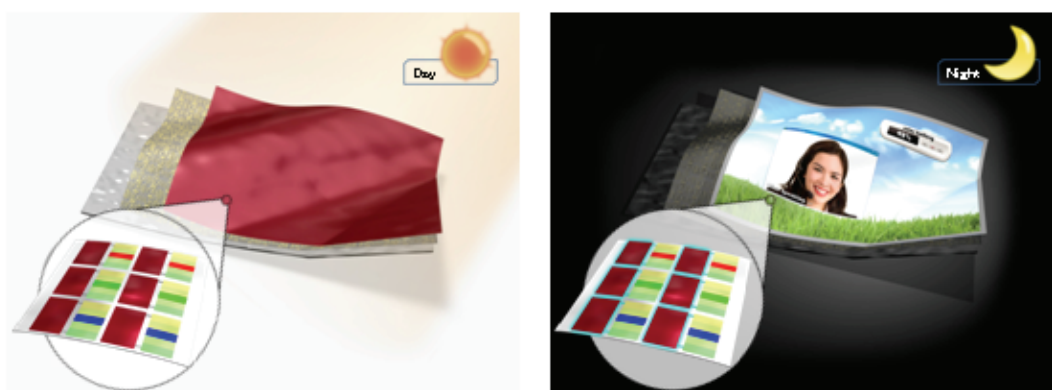


図4 有機光電子デバイス統合システムの一例. (左図) 日中に個々の画素に付属の太陽電池により充電される様子、(右図) 夜間、日中に充電された電力により画素が駆動され、ディスプレイとして機能する様子を示す.

しかし、これら有機系薄膜デバイスの駆動回路を担うと期待される有機薄膜トランジスタ (OTFT: Organic Thin-Film Transistors) については、未だその特性及び再現性において、実用レベルに到達していない。その原因の一つに、伝導キャリアの生成に関する問題がある。元々、無機系材料と比較して有機半導体におけるキャリア濃度が小さい上に、大気中の酸素や水による有機半導体分子の酸化、ゲート絶縁膜と有機半導体界面におけるキャリアトラップなど、キャリア生成を阻害する要因が数多く存在

する。特に、電子を主たる伝導キャリアとする n チャンネル型については、ホールを伝導キャリアとする p チャンネル型よりも性能が劣っているため、実用に耐えうる n チャンネル OTFT へ向けた材料開発・素子構造提案への取り組みが急務となっている。

本研究室では、OTFT におけるキャリア生成の問題を解決するための知見を得るべく、ゲート絶縁膜/有機半導体界面における電荷移動に着目し、図 5 に示すように膜厚数 nm レベルの極薄絶縁ポリメタクリル酸メチル (PMMA) 膜を SiO₂ 絶縁膜/半導体界面に挿入した OTFT 素子の作製とその評価を行うことで、OTFT のチャンネル部における電子伝導及び電子トラップ挙動を追跡している。

まず、大気下で p 型半導体として振る舞う代表的な有機材料であるペンタセンの OTFT において、その電気特性に与える極薄 PMMA 層 (膜厚 8 nm) の効果を図 6 に示す。通常、ペンタセン OTFT は、図 6(a) に示す p チャンネル動作 ($V_G < 0$ V かつ $V_D < 0$ V) しか示さないが、図 5(a) の素子構造では、真空中ではあるが、n チャンネル動作条件下 ($V_G > 0$ V かつ $V_D > 0$ V) で、図 6(b) に示すようにドレイン電流の飽和が生じ、n チャンネル動作が出現する。また、大気下では PMMA 層の有無に関わらず、n チャンネル動作は生じなかった。この真空中でのペンタセン OTFT の両極性動作は、PMMA 層の存在に起因するものであり、SiO₂ 絶縁膜を PMMA 層で被覆することで、絶縁膜/半導体の界面における電子トラップ (主に水酸基 (OH)) が減少し、チャンネル部の電子伝導が促進されたためと考えられる。

更に、大気中では FET 動作が困難である不安定な n 型有機半導体材料 (ペリレンテトラカルボキシジイミド誘導体、PTCDI-C13) の OTFT に対して、PMMA 層を導入することで大気下での n チャンネル動作の安定性が大幅に改善されると共に (図 7)、しきい値電圧の低減、伝達特性におけるヒステリシス現象の抑制の効果も得られ、極薄高分子絶縁層が様々な OTFT に対して、界面電子トラップ抑制、及び電子輸送性の向上にきわめて有用であることを示している。

このように、われわれは主にキャリア濃度制御という観点から OTFT の特性向上を試みているが、この取り組みは太陽電池、イメージセンサなど、他の有機光電子素子開発の進展にもつながるため、本研究の今後の発展が、OFIS の実現に向けて、大きな波及効果をもたらすものと期待される。

4. 電気自動車に関する取組み：Kyoto-Car プロジェクトの進展

CO₂ を排出せず、環境に優しい電気自動車が最近注目を集めている。当研究室では、数年前よりベンチャー・ビジネス・ラボラトリー (VBL) や桂地区に存在する京都市立芸術大学、国際日本文化研究セ

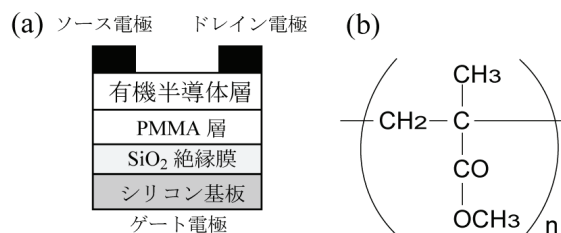


図 5 (a) ポリメタクリル酸メチル (PMMA) 層付き OTFT 素子. (b) PMMA の分子構造図.

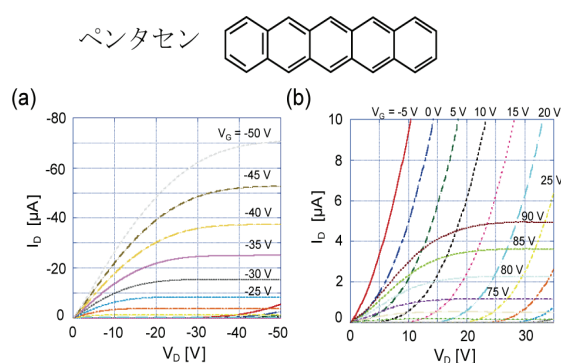


図 6 PMMA 層付きペンタセン OTFT の真空中での出力特性 (a) p チャンネル 及び (b) n チャンネル動作.

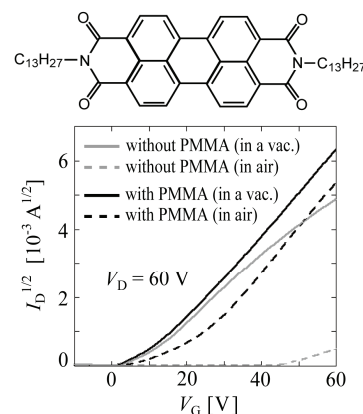


図 7 PTCDI-C13 の分子図と、PTCDI-C13 OTFT の大気下での伝達特性 (膜厚 2nm の PMMA 層の有無で比較をしている).

ンターと協同して、先端技術と伝統文化・芸術が融合した電気自動車“Kyoto-Car”を提案してきた。これまで、実車の1/10サイズのコンセプトカー（インホイールモーター、京友禅の外装）の製作、市販のコムス（トヨタ車体製）改造車へのバッテリーと電気二重層キャパシターを組み合わせたハイブリッドエネルギーシステムの搭載とその有効性の実証実験、更に車体に自然素材（木や竹）を活用した京都風木型、竹籠（愛称 Bamgoo）電気自動車の製作などを試み、プレス発表してきた。更に、最近スポーツタイプの電気自動車の試作車を発表した京大発学生ベンチャーのグリーンロードモータース（GLM）や京都府とも連携し、京都企業の高性能電気電子部材等を集積した最高性能の電気自動車の製造にも取り組んでいる。



京都の伝統技術・文化と最先端技術を融合させたKyoto-Car



竹のEV: Bamgoo

桂での実証実験

GLMのトミーカイラZZ-EV

図8 Kyoto-Car プロジェクトに関連した電気自動車。（上段）コンセプトカーの写真（下段）実際に製作、実証実験などを行った電気自動車。

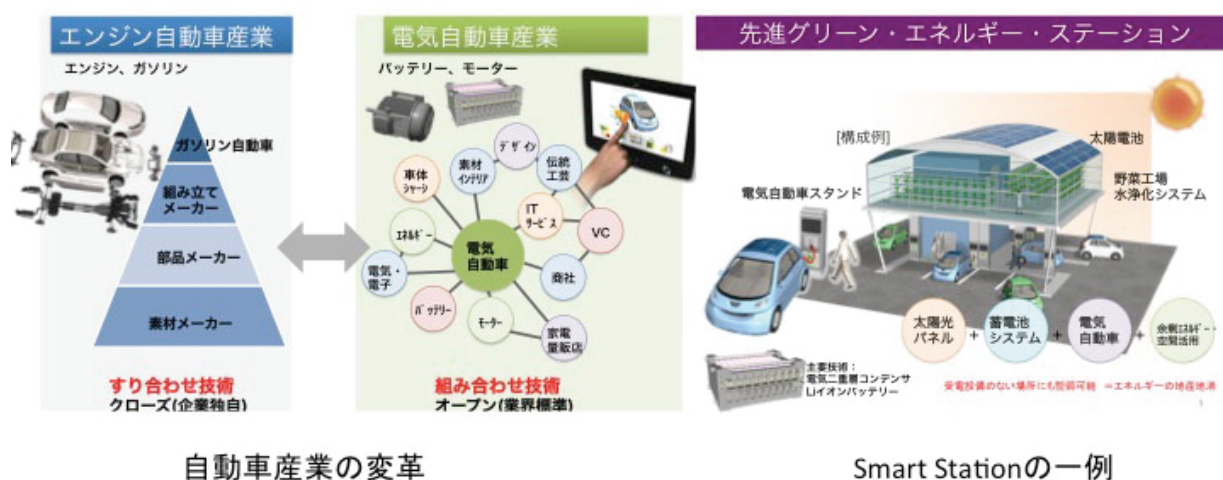


図9 (左図) 今後予想される自動車産業の変革。(右図) 将来のエネルギー・スマート・ステーションの概念図。

一方、自動車産業そのものを考えた場合、電気自動車はこれまでのエンジンを中核としたピラミッド型・すりあわせ技術集積型の産業構造から、世界の高性能・低価格のバッテリーやモーターなどの部品を集めた水平統合型・組み合わせ型産業（丁度、iPhone や iPad 製品の様な）への変革を誘導するものとも考えられる。そうした意味からも、世界中で中小企業やテスラ・モーターズなどのベンチャー企業の台頭が目覚ましい。こうした電気自動車は、最近世界中で取組みが活発化しているスマート・グリッド、コミュニティーの重要な構成要素となっており、太陽電池等と組み合わせたエネルギーステーション等の提案も行っている。こうした事例は、今後の電気電子分野の進展には、種々の要素技術と統合化、融合化によるイノベーションも必要であることを示唆している。

5. おわりに

科学技術の進展は早く、しかもその内容、社会的位置付けは時代とともに変化する。ナノレベルでの基盤技術の研究開発、時代を変革する電子材料・デバイス開発、そして21世紀のグリーン社会を先導する統合的研究・提案への取組みは、学術的・産業的貢献のみならず、学生・院生に対する教育としても価値あるものと期待されている。

研究内容の詳細は松重研究室のホームページ：<http://piezo.kuee.kyoto-u.ac.jp/> を参照下さい。