

News Letter

CREST・さきがけ ナノエレクトロニクス研究領域

Vol.3

Mar. 2016

Contents

-
- P.2 研究領域の紹介
-
- P.3 平成27年度採択研究概要
-
- P.4 平成25年度および平成26年度採択者
-
- P.5 極小エネルギー・多機能センサプラットフォームの創製
慶應義塾大学 内田 建
-
- P.6 「アメーバ型」解探索コンピュータをナノエレクトロニクスにより実現する
アーキテクチャを設計
東京工業大学地球生命研究所 青野 真士
-
- P.8 3原子厚の半導体ヘテロ接合の作製と電子物性の評価
首都大学東京 宮田 耕充
-
- P.9 スピンを利用したニューロモルフィックシステムの理論設計
産業技術総合研究所 荒井 礼子
-
- P.10 微細印刷技術を用いたナノメートルオーダーの印刷有機トランジスタの開発
に成功
理化学研究所 染谷薄膜素子研究室 福田 憲二郎
-
- P.11 担当アドバイザー
-

CREST・さきがけ複合領域 「素材・デバイス・システム融合による革新的 ナノエレクトロニクスの創成」



研究総括 (CREST 担当)
桜井貴康
(東京大学 生産技術研究所 教授)



副研究総括 (さきがけ担当)
横山直樹
(富士通研究所 フェロー)

本研究領域は、材料・電子デバイス・システムの研究を連携・融合することにより情報処理エネルギー効率の劇的な向上や新機能の実現を可能とする研究開発を進め、真に実用化し、イノベーションにつなげる道筋を示していくことを目標としています。

ナノ材料、ナノデバイス、設計・回路、アーキテクチャ、システムなどの技術レイヤーの連携・融合を促進し、情報処理エネルギー効率の劇的な向上や今後のスマート社会の実現、スマートハウス、交通、ヘルスケア、医療、モビリティ、ロボット、セキュリティーやヒューマン・インターフェイスなどエレクトロニクスがより広範に人々の生活に貢献できるよう革新的基盤技術の創成を目指します。

CREST では、①技術シーズとなるナノテクノロジーが新規で明確か、②技術レイヤー間の連携・融合が有機的につながりシナジー効果が生まれるか、③アプリケーションが明確で研究の最終フェーズでデモンストレーションが可能か、を評価軸として、技術シーズとなり得る、応用展開が可能な 10 件の研究課題を採択・推進しています。

1 期生は、トンネルトランジスタ、微細チャンネル MOS センサ、新素材による磁気センサの 3 件の研究提案を採択しました。2 期生は、極微小加速度センサ、テラヘルツ帯利用イメージセンサ、新規メモリ素子利用情報処理システムという 3 件の研究提案を採択しました。3 期生は、低電力表示デバイス、テラヘルツ無線通信システム、超長期データ不揮発メモリ、手触りセンサに関する 4 件の研究提案を採択しました。

さきがけでは、①次代のエレクトロニクスを担う独創的・先進的な提案であるか、②さきがけ内で分野間・技術レイヤー間の連携・融合が促進されシナジー効果が生まれるか、③ CREST の技術シーズになり得る提案か、を評価軸として、チャレンジングで将来性のある 34 件の研究提案を採択・推進しています。

最後の採択年度となる 27 年度 (3 期生) は Steep Slope デバイスやヘルスケア分野の課題を新たに採択でき、領域発足当初のポートフォリオである 2 次元原子系、スピントロニクス、酸化物、量子、CMOS、およびヘルス関係の研究課題を広く採択しました。

上記の通り、本研究領域の研究提案募集は今年度で最後となり、研究領域としては 44 件の研究課題を推進しています。今後は、中間評価、事後評価のフェーズに移行することとなり、研究領域の運営を通じて、戦略目標達成に向け、ナノエレクトロニクスの革新的基盤技術の創成に取り組みます。

平成27年度採択研究概要

CREST 1
繊細な触覚を定量的に検知する「ナノ触覚神経網」の開発と各種の手触り感計測技術への応用

高尾英邦 香川大学 工学部 教授
 本研究では、「指先」が持つ繊細な触覚を集積化触覚センサー群で定量的に検知する「ナノ触覚神経網」を開発し、指先が感じる様々な触覚を取得する各種の「手触り感計測技術」へと展開してゆきます。肌や髪の毛の状態診断、素材の質感計測、触覚を備えた先端医療機器等への応用にむけて、人間の指先がもつ高精度な機能を実現するナノ触覚ネットワークを、高信頼性かつ超低消費電力の先進ナノエレクトロニクスで実現します。



CREST 2
デジタルデータの長期保管を実現する高信頼メモリスステム

竹内 健 中央大学 理工学部電気電子情報通信工学科 教授
 デジタルデータを100年以上の長期にわたって保管する高信頼メモリスシステムを開発します。メモリアイスとして動作原理の異なる3種類のメモリ（フラッシュメモリ、ReRAM、ナノブリッジメモリ）を取り上げます。メモリの信頼性を限界まで高める信号処理技術にも取り組み、メモリアイスとの統合システムを開発します。更に配線に関しては原子レベルで金属（Cu等）の拡散を防止する不浸透性を実現し、配線の長期の高信頼性を確保します。



CREST 3
超高速・超低電力・超大面積エレクトロクロミズム

樋口昌芳 物質・材料研究機構 先端の共通技術部門 グループリーダー
 エレクトロクロミズムとは、電気化学的酸化還元により色が変化する現象です。研究者独自のエレクトロクロミック材料（有機/金属ハイブリッドポリマー）の優れた色彩とメモリ特性（電源を切っても表示が持続特性）を生かしたデバイス・システムを構築することで、超高速応答・超低消費電力・超大面積のエレクトロクロミック表示を実現します。



CREST 4
共鳴トンネルダイオードとフォトリソニック結晶の融合によるテラヘルツ集積基盤技術の創成

富士田誠之 大阪大学 大学院基礎工学研究科 准教授
 本研究は、単体の電子デバイスとして最も高い周波数の電磁波を発生可能な共鳴トンネルダイオードに着目し、通信速度の限界を追求します。その物理限界を超えるため、共鳴トンネルダイオードと極低損失な集積プラットフォームであるフォトリソニック結晶を融合させることで、電波と光波の間の未開拓の周波数を有するテラヘルツ電磁波を利活用した超高速かつ低消費電力な無線通信デバイスシステムの集積基盤技術を創成します。



さきがけ 1
ポリマー配線を用いたニューラルネットワーク型情報回路の創成

赤井 恵 大阪大学 大学院工学研究科 助教
 我々の脳内神経細胞は有機体です。本研究はまるで神経細胞のように樹状成長し、空間を自由に配線する有機ポリマー材料を使い、神経細胞の情報伝達様式を模したニューラルネットワーク機械学習アルゴリズムを用いることで、新規情報回路を創成します。回路は自ら学習しながら成長し、物理的にも柔軟く、あいまいな情報の処理を得意とするといった脳機能の一部を再現出来る素子になることが期待出来ます。



さきがけ 2
二次元窒化物半導体を用いたエピタキシャル積層構造の創出と光電子機能デバイス応用

太田実雄 東京大学 生産技術研究所 助教
 ワイドギャップ二次元半導体である六方晶窒化ホロン(hBN)薄膜を用いたエピタキシャル積層構造を作製し、hBNの光学的・電氣的・構造的性質を利用した新構造のナノエレクトロニクス材料を創出します。この目的を実現するためにhBN薄膜を低温で結晶成長する技術の開発を行うとともに、ウェハースケールで異種機能性材料と積層融合し、高効率発光素子や低損失デバイスといった次世代低消費電力デバイスへと展開します。



さきがけ 3
極薄磁性酸化物中におけるスピントラジスタを用いた多入出力演算素子の開発

後藤太一 豊橋技術科学大学 大学院工学研究科 助教
 極薄の磁性酸化物（絶縁体）中を伝搬するスピントラジスタは、波長がナノメートルオーダーにまで短縮可能です。これは光の波長よりも短く、電子のドローイング波長よりも長い絶妙な大きさで、電子回路形成の基盤技術を用いて、光回路のように波の性質を利用した、これまでのデザインルールに縛られないデバイスが実現可能です。本研究では、これら利点を、多入出力スピントラジスタを形成することで実証し、スピントラジスタの礎を築きます。



さきがけ 4
超低消費電力動作に向けたゲート絶縁膜の負性容量による急峻スロップトランジスタ技術の開発とナノワイヤ構造への応用

小林正治 東京大学 生産技術研究所 准教授
 本研究では超低電圧動作トランジスタとして強誘電性HfO₂薄膜を用いた負性容量トランジスタ（NCFET）のデバイス設計・材料開発と、世界初の動作実証を目的とします。デバイス設計では物理ベースのシミュレータを構築します。材料開発では、強誘電性HfO₂薄膜のプロセス技術を開発します。デバイス試作では強誘電性HfO₂薄膜をCMOSプロセス技術へ導入し、さらにナノワイヤチャネルへの展開を図ります。



さきがけ 5
光干渉型分子間力センサによる高感度マルチバイオマーカー検出システム

高橋一浩 豊橋技術科学大学 大学院工学研究科 デュアトラック講師
 本研究ではCMOSイメージセンサ上に集積化したMEMS光干渉計を利用して、タンパク質の反応力を計測し、病気由来のバイオマーカー検出を目的としています。センサ機能面の薄膜化、信号変換効率の向上によりマーカー基準値1ng/mLを1分以内に検出するセンサを実現します。また、1000~1万ピクセルの並列処理を行うセンサシステムを開発し、自宅で簡単・迅速・安価に病気診断を行う検査チップを目指します。



さきがけ 6
高移動度二次元酸化物構造による非散逸電流デバイスの創成

高橋 圭 理学研究所 創発物性科学研究センター 上級研究員
 強磁性二次元電子の自発磁化による量子化異常ホール効果は、エネルギー消費のない非散逸電流デバイス応用が期待できます。本研究は、デルタドープ構造 SrTiO₃で初めて実現した量子ホール効果に磁性層を組みあわせ、電子相関の強いd電子の二次元電子による量子化異常ホール効果の実現を目指します。ホールデバイス構造の磁区と量子化抵抗の検証や強磁性層特性制御研究で、超低電力消費エレクトロニクス応用の道筋をつけます。



さきがけ 7
極限的エネルギー効率を有する超伝導逆計算機の開発

竹内尚輝 横浜国立大学 先端科学高等研究院 特任教員（准教授）
 可逆計算機はエントロピー変化を伴わないため、無限小の消費エネルギーで論理演算が可能です。本研究では、消費エネルギーを最小にする可逆計算アーキテクチャの検討、及びエネルギー効率を最大にする超伝導可逆セルラブラリの構築を行い、量子力学的極限付近で動作可能な8bit超伝導可逆加算器を実現します。最終的に、消費エネルギーが半導体集積回路に比べて6桁以上小さいことを実証します。



さきがけ 8
遷移金属酸化物のナノ空間3次元制御による省エネルギー駆動機能選択的相変化デバイス創製

服部 梓 大阪大学 産学科学研究所 助教
 本研究では、独自に開発した3次元ナノ構造作製技術で10-100nmサイズの金属酸化物ナノ構造体を創製し、ナノ電子相変化由来の巨大かつ急峻な抵抗変化を実現します。3次元ナノ空間に閉じ込めたナノ電子相変化を電界効果によって操作する「ナノ電子相変化制御電子技術」を確立し、極低電圧で動作する steep slope デバイスを創製し、低電力化の実現に取り組みます。



さきがけ 9
移植用培養生体組織に搭載可能なナノエレクトロニクスの創成

藤枝俊宣 早稲田大学 理工学術院 助教
 本研究では、プリンテッドエレクトロニクスと高分子ナノ薄膜の製造技術を組み合わせることで、臓器・組織移植用の無線型RFIDタグを開発します。生体外からの情報管理が実現できれば、電子カルテとしてだけでなく、災害時のトリアージタグや埋込型医療デバイスへの応用も見込まれます。来るべき再生医療社会に備え、移植手術、在宅療養、社会復帰後まで一貫して健康情報を管理する埋込型エレクトロニクスの創成を目指します。



さきがけ 10
ナノカーボン光・電子量子デバイス開発と量子暗号通信応用

牧 英之 慶應義塾大学 理工学部 准教授
 通信波長帯での単一光子は、絶対的に安全とされる量子暗号通信などの研究分野において近年非常に注目されていますが、従来の半導体材料では室温動作の単一光子源は実現が困難となっています。本研究では、ナノカーボンを用いた室温・光通信波長帯の単一光子光源を提案するとともに、電流注入光源、集積光技術との融合、単一光子検出器開発を行い、超小型・超高速・低コストの量子暗号通信技術を開発することを目指します。



さきがけ 11
電界書き込み型の超低消費電力磁気メモリの開発

吉村 哲 秋田大学 大学院工学資源学研究所 准教授
 本研究は、超大容量・超低消費電力・低エラーレート記録再生・超高速記録再生・耐衝撃性、等を可能にする、「電界書き込み型の革新的な情報不揮発性磁気メモリ」を開発することを最終的な目的とし、それらの特性を実現し得る記録媒体および記録再生素子用材料として、規則原子配列構造を有する高機能な酸化物薄膜や合金薄膜からなる多機能複合積層膜を新規に提案・創製します。



平成25年度および平成26年度採択者 (詳細はニュースレターVol. 1 および Vol. 2 をご参照ください。)

H25年度 CREST 採択者

内田 建	慶應義塾大学	極細電荷チャネルとナノ熱管理工学による極小エネルギー・多機能センサプラットフォームの創製
高木 信一	東京大学	極低消費電力集積回路のためのトンネル MOSFET テクノロジーの構築
波多野 睦子	東京工業大学	炭素系ナノエレクトロニクスに基づく革新的な生体磁気計測システムの創出

H26年度 CREST 採択者

浅野 種正	九州大学	異種機能コデザインによるテラヘルツ帯ビデオイメージングデバイスの開発
橋本 昌宜	大阪大学	ピアシッチの実現によるアルゴリズム・処理機構融合型コンピューティングの創出
益 一哉	東京工業大学	ナノ慣性計測デバイス・システム技術とその応用展開

H25年度さきがけ採択者

青野 真士	東京工業大学	アメーバ計算パラダイム：時空間ダイナミクスによる超高効率解探索
吾郷 浩樹	九州大学	二次元原子薄膜の積層システムの創製とナノエレクトロニクスへの展開
安藤 和也	慶應義塾大学	スピンホールエンジニアリングによる省エネルギーナノ電子デバイスの創出
井上 振一郎	情報通信研究機構	有機・シリコン融合集積フォトンクスによる超高速電気光学デバイス
大野 武雄	東北大学	極薄ナノ金属酸化膜をもつ抵抗変化型メモリ
岡田 直也	産業技術総合研究所	遷移金属内包シリコンクラスターを用いた低消費電力トランジスタ材料・プロセスの創出
戸川 欣彦	大阪府立大学	カイラル磁気秩序を用いたスピン位相エレクトロニクスの創成
原 祐子	東京工業大学	階層融合型機能的冗長化による次世代低電力デバイス向け高信頼化設計
宮田 耕充	首都大学東京	単原子膜ヘテロ接合における機能性一次元界面の創出とエレクトロニクス応用
望月 維人	青山学院大学	高いデバイス機能を有するナノスケルトポロジカル磁気テクスチャの理論設計
安武 裕輔	東京大学	水素終端4族単原子層を用いた室温動作新機能素子の創成
山田 浩之	産業技術総合研究所	強誘電体と機能性酸化物の融合による不揮発ナノエレクトロニクス
山本 倫久	東京大学	単一電子量子回路の集積化へ向けた基盤技術の開発

H26年度さきがけ採択者

荒井 礼子	産業技術総合研究所	スピンを利用したニューロモルフィックシステムの理論設計
河野 崇	東京大学	定性的モデリングに基づいたシリコン神経ネットワークプラットフォーム
関 剛斎	東北大学	磁性規則合金を用いた新機能性スピントルク発振素子の創製
高橋 陽太郎	東京大学	電気磁気創発現象による電磁波制御デバイスの創生
友利 ひかり	筑波大学	ひずみ誘起ゲージ場を用いた単原子層膜の伝導制御とエレクトロニクス応用
長汐 晃輔	東京大学	2層グラフェンのギャップ内準位解析と複層化界面制御による準位低減
長田 貴弘	物質・材料研究機構	フッ化物ユニバーサル高誘電体極薄膜材料の創出
廣理 英基	京都大学	超高強度テラヘルツ光のナノ空間制御と物性制御技術への応用
福田 憲二郎	理化学研究所	ナノ膜厚ポリマー絶縁膜を利用した全印刷型基板レス有機集積回路の創成
山崎 歴舟	東京大学	マイクロ波・光領域における量子オプトメカニカルシステムの構築

極小エネルギー・多機能センサプラットフォームの創製



CREST 研究代表者 (平成25年度採択)

内田 建

慶應義塾大学

研究の目的、社会的意義

LSI と融合し、人々の生活に溶け込みながら、生体からの出力や環境負荷分子など多種類の物質を電気的に認識するセンサ技術を創出します。また、その共通基盤となるセンサシステムのプラットフォームを高機能・低エネルギー・小サイズで実現することを目指します。このような低エネルギーのセンサシステムが実現できれば、スマートフォンに搭載し、呼吸から病気の早期発見や精神的ストレスの度合い調べることができるようになり、ユーザーの健康状態の維持・管理に役立つなどの応用が期待されます。

研究チームの体制、各研究テーマ

研究チームは (1) 半導体グループ、(2) 酸化物グループ、(3) 有機修飾グループ、(4) 回路グループ、(5) システムグループの5つのグループから構成されます。

半導体グループは、半導体チャネルや原子層薄膜チャネルを用いたセンサの実現を目指します。有機修飾グループと協力し、チャネル表面に標的物質 (ゲスト分子) を認識可能なホスト分子を修飾することで、分子を認識する能力を向上させます。酸化物グループは、単結晶酸化物ナノワイヤを用いた高感度なセンサの実現を目指します。特に半導体チャネルで認識が得意な無極性分子の認識を行うことで、センサシステムを構成する上で相補的な役割を果たします。有機修飾グループは、様々なホスト分子に多様なアンカー部位を付加し、半導体チャネルや酸化物チャネルへの有機修飾を実現します。さらに、ゲスト分子がホスト分子から脱離するための条件を明らかにすることで、再利用可能な高感度センサの実現を目指します。回路グループは、センサとその信号をピックアップする回路に関して、ナノセンサで問題となることが予測される「ばらつき」の影響を統一的に補正する手法を開発することを目指します。また、ナノスケールのセンサが発生する微弱信号のピックアップ用回路、ナノセンサを駆動するドライバ回路などの開発を行います。システムグループは、センサチップを汎用チップと組み合わせることで多様なセンサシステムを経済的に実現できるようにプラットフォームを構築することを目指します。また、センサシステムの応用を念頭に置き、標的物質の選定、センサシステムが開拓する応用とサービスを学際的に探究することを目指します。

このように、研究チームは、応用を想定した標的物質の選定、標的物質に応じたホスト分子の選定・設計とチャネル材料への修飾、各種材料から最適チャネル材料の選定と最適デバイス構造の開発、回路を用いたセンサデバイス信号の高感度検出とデジタル化、複数の多様なセンサからの大量のデータを基に応用上有意な意味づけを行うデータ処理技術と基礎から応用までセンサの幅広い研究開発に取り組みます。これらの技術を低エネルギー・極小サイズで実現することを常に念頭に置き、センサシステムを人々の生活に溶け込むよう構築し、安全・安心・健康社会の実現に貢献することを目指します。

顕著な成果

センサの開発では、実際にセンサが利用される場で、何を検出することが最も効果的であるか (標的物質は何か) を見いだすことが重要です。疾病とある呼吸成分の間に相関があることが分かれば、その成分を認識するセンサを開発すると、非常に有用であると期待できます。しかし、疾病と相関のある呼吸成分を見つけることは容易ではありません。今回、研究チームでは、呼吸と成分が近いといわれている尿のガスクロマトグラフ質量分析 (GC-MS) データから、肺がん患者を識別するのに有効と思われる物質を、深層学習 (Deep Learning) とよばれる手法を用いて抽出することに成功しました^{1,2}。

Deep Learning は従来のニューラルネットワークを多層構造にすることで高い表現力を獲得する機械学習の手法です。これまでニューラルネットワークの多層化には膨大な計算量が発

生し、現実的な計算時間で学習を終えることができませんでした。しかし近年、GPU などのコンピュータ能力の発展によって、この問題が解決しました。その結果、高い表現力を獲得した Deep Learning は、画像認識、音声認識などの分野において従来手法を大幅に上回る高い精度を上げています。ところが、画像認識や音声認識以外への応用はまだ少なく、どの分野で Deep Learning が有効かは未知数です。Deep Learning の適用が少ない例として人間のバイタルデータがあげられます。今回は、前述の通り、中でもヒトの尿に注目しました。がん患者の尿には特定の化学物質が多く含まれることが知られています。はじめに、GC-MS を用いてヒトの尿に含まれる成分をデータ化し、そのデータを用いて Deep Learning による肺がんの検出を目指しました (図 1)。健康者 28 人・肺がん患者 39 人について、保持時間と質量からなる 394 特徴点の強度を母データとしました。健康者 24 人、肺がん患者 34 人のデータを学習データとして、学習を実施しました。その後、健康者 5 人・肺がん患者 5 人のデータをテストデータとして、学習用とテスト用のデータを組み替えて何度も評価した結果、感度 (肺がん患者の判定精度) 94.9%、特異度 (健康者の判定精度) 100%、精度 (全被験者の判定精度) 97.0% の高い検出率を達成しました。また、高検出率が達成できたあと、学習済みニューラルネットワークの重みを利用して、標的物質の抽出を行うことに成功しました。これらの標的物質は、化学的・医学的な知見を全く持たずに抽出されたにもかかわらず、化学的な知見に基づいて判明している標的物質との良い一致が確認されました。

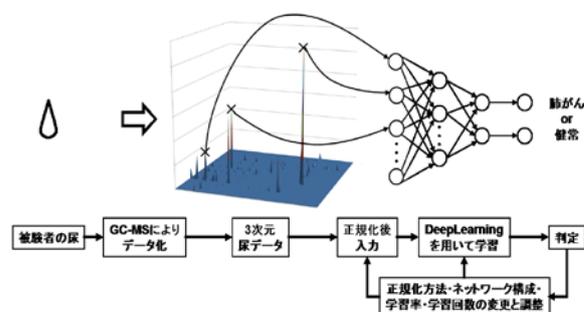


図1 深層学習を利用した肺がん判定実験の手順

将来の展開イメージ

本研究課題で開発する [LSI と融合し、人々の生活に溶け込みながら、生体からの出力 (代謝物、グルコース、発汗、ナトリウム、カリウムなど) や環境情報 (環境ホルモン、CO、NOx など) など多種類の標的物質を高感度で収集するセンサの共通基盤となるセンサプラットフォーム] を実現することができれば、① 長期にわたる生体情報の非侵襲なモニタリングにより、疾患・疾病の早期発見、各個人の特徴に基づいたテーラーメイド医療の実現、② 環境情報のモニタリングによる環境改善施策の提案など、健康・QOL (Quality of Life) の向上、安全・安心社会の実現に多大な寄与ができるものと期待されます。

参考となる論文情報

1. 門出康孝、山岸裕樹、花井陽介、清水徹、黒田忠広、"ヒトの尿データへの Deep Learning 適用による肺がん判定の試行と標的物質の探索、" 第106回 知識ベースシステム研究会 (SIG-KBS)、Nov. 2015.
2. 門出康孝、清水徹、黒田忠広、"ヒトの尿データへの Deep Learning 適用による肺がん判定の試行と考察、" 2015年度人工知能学会全国大会 (第29回)、Jun. 2015.

チーム関係者の研究室 URL

内田 建 (慶應義塾大学) <http://www.ssn.elec.keio.ac.jp>
 柳田 剛 (九州大学) <http://yanagida-lab.weebly.com/>
 寺尾 潤 (京都大学) <http://twwww.ehcc.kyoto-u.ac.jp/>
 石黒仁揮 (慶應義塾大学) <http://www.iskr.elec.keio.ac.jp/>
 黒田忠広 (慶應義塾大学) <http://www.kuroda.elec.keio.ac.jp/>

「アメーバ型」解探索コンピュータをナノエレクトロニクスにより実現するアーキテクチャを設計



さきがけ研究代表者（平成25年度採択）
青野 真士
東京工業大学地球生命研究所

研究の目的、社会的意義

半導体デバイスの微細化が進み、ナノスケールの物理的揺らぎが無視できない攪乱要因になる時代が到来しつつあります。しかし、自然界の「粘菌アメーバ」(図 1a) は、こうした揺らぎをむしろ積極的に活用することで、効率的に環境に適応しています。そのユニークな計算原理に学んだ「アメーバモデル」は、従来の「ノイマン型」コンピュータが苦手とする組合せ最適化問題の解を、高速に探索できるアルゴリズムです。アメーバモデルを、確率的に動作するナノデバイス「電子ブラウンラチェット」により実装(図 1b)することで、膨大なデータの中から望ましいソリューションを高速に発見する人工知能処理を、低消費電力で実現できる可能性を示しました。

顕著な成果

粘菌アメーバは、複数の末端部を伸び縮みさせることにより試行錯誤を行い、環境刺激に対し安定できる自らの形状を探索します。このプロセスを抽象化し、「充足可能性問題 (Satisfiability Problem; 略称 SAT)」の解探索アルゴリズム「アメーバモデル」を定式化しました。SAT は、論理変数(真と偽の二値をとり得る)が N 個あったとき、それらを含む論理式の形で与えられる複数の制約条件を全て満足できる真偽値の割当て(解)が存在するか否かを判定する問題です。SAT は抽象度が高いため多くの組合せ最適化問題と関連しており、高速な SAT ソルバーが開発されると、人工知能、情報通信技術、バイオインフォマティクスなど、様々な応用にブレイクスルーがもたらされると期待されます。しかし、SAT は「NP 完全」に分類される極めて難しい問題です。解候補の数は問題サイズ N に対し指数関数 (2^N) 的に成長し、組合せ爆発を引き起こします。今のところ解を多項式時間内に得るアルゴリズムは知られていないため、どんな SAT ソルバー(アメーバモデルも含む)を使っても、解探索には指数関数時間を要することとなります。これは、多大なエネルギー消費を意味します。

アメーバモデルは、粘菌アメーバの複数の末端部の伸び/縮みを表現する状態が確率的に遷移し、それに伴い、この状態遷移を制御するための刺激の ON/OFF 状態が、論理式から決定されるルール(制約が満足されない状態の選択を禁じる)に従って更新されるという手続きを反復するダイナミクスです。こうした状態遷移の反復による試行錯誤を経て、安定な状態への到達が実現したとき、SAT 解が得られます。アメーバモデルは、従来型コンピュータ上でソフトウェアとして実行することもでき、他のアルゴリズムより高速に解を探索できることが分かっています。さらに、アメーバの末端部の確率的動作を実現できるナノデバイスを用いてハードウェア化することにより、より一層の解探索速度の

向上と消費エネルギーの低減を期待できます。本研究では、北海道大学の葛西誠也教授らが開発した「電子ブラウンラチェット」(図 2a,b) と呼ばれる半導体デバイスを用いることにより、アメーバモデルをナノスケールで実装するアーキテクチャを設計しました(図 1b)。その解探索性能を数値シミュレーションにより評価したところ、従来の確率的局所探索手法より高速に解を発見できること、さらに、その性能は揺らぎの統計的性質を変えることでさらに向上することが分かりました(図 2c)。

今後の展開

従来の SAT アルゴリズムは、毎回の反復処理で一つの変数の真偽値を更新する「逐次処理」を行います。これは、従来型コンピュータによる実装に適しています。現在のデジタルコンピュータが同様の動作を反復する計算原理に基づくからです。これに対し、アメーバモデルは、運動法則に基づき複数の末端部を相互作用させながら、毎回の反復処理で複数の状態を同時に更新する「並行処理」を行います。この高い並行性が高い解探索性能もたらすと考えられますが、その詳細を明らかにすることは今後の課題です。アメーバ型の運動法則は、そのまま電子回路化して表現できるため、半導体集積化技術を活かして超大規模サイズの問題を解くことができるという特長があります。その際、量子コヒーレンスを利用する計算に必要となるような大掛かりな低温実験装置は不要です。むしろ、室温で発生する熱雑音を排除するのではなく、電流を流すエネルギー源として、さらに、確率的動作のための揺らぎ源として活用するという発想の転換により、消費エネルギーの大幅な低減が見込めます。こうした利点を生かし、将来、小型・低消費電力のアメーバ型計算チップを携帯端末などに組込んだり、機械学習手法と組合せたりすることにより、現在は予想もつかない新たな応用や、それがもたらす新たな産業が拓かれることを期待しています。

論文情報

M. Aono, S. Kasai, S.-J. Kim, M. Wakabayashi, H. Miwa, M. Naruse, "Amoeba-inspired nanoarchitectonic computing implemented using electrical Brownian ratchets," *Nanotechnology* 26, 234001 (2015) .

研究室 URL

<https://members.elsi.jp/~masashi.aono/>

Phys.org (英国オンライン科学ニュースサイト) 特集記事 URL

<http://phys.org/news/2015-06-amoeba-inspired-outperforms-conventional-optimization-methods.html>

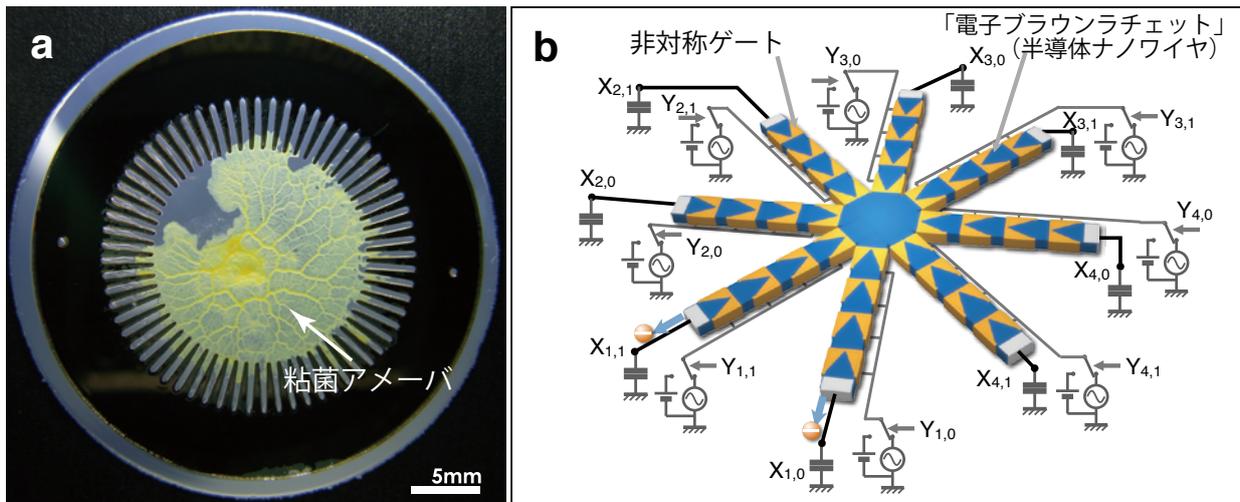


図 1 (a) アメーバ状単細胞生物・真性粘菌 (*Physarum*) は、環境刺激に応じ適切に自らの形状を変化させつつ、栄養物質の吸収量を最大化するなど、高度な情報処理能力を有する。細胞全体の情報を集中的に処理できる中枢神経系がなくても、複数の末端部が互いに相関を持ちつつ伸び縮みし、制御刺激に対する応答を揺らさせる (確率的に動作する) ことで、効率よく「自律分散型計算」を実現する。入力となる制御刺激の与え方 (光照射条件) を工夫すると、粘菌アメーバが試行錯誤を経て安定な形状に到達したとき、「巡回セールスマン問題」のような組合せ最適化問題の解が出力として得られる。(b) 電子ブラウンラチェット (図 2a) を粘菌アメーバの末端部に見立て、アメーバモデルを実装するアーキテクチャを設計した。制御刺激が OFF 状態の時は電子ブラウンラチェットにフラッシング電圧を印加し、電流を流す。ただし、熱雑音の影響により、流れるべき電流が一定の (低い) 確率で流れない事態が発生する (図 2b)。実は、こうした「揺らぎ動作」が、局所最適解を避けるために必須である。一方、制御刺激が ON 状態の時は電圧を印加せず、電流を流さない。電子ブラウンラチェットの先には、キャパシタンスが接続され、流れてくる電流が充電される。充電により電圧が上がり、ある閾値を超えた時はアメーバの末端部が伸びた状態、超えない時は縮んだ状態と見なす。これらの状態を読み取り、問題の論理式から生成されるルールに従い制御刺激の ON/OFF 状態を更新する。状態更新の反復を経て、安定状態に達したとき SAT 解が得られる。

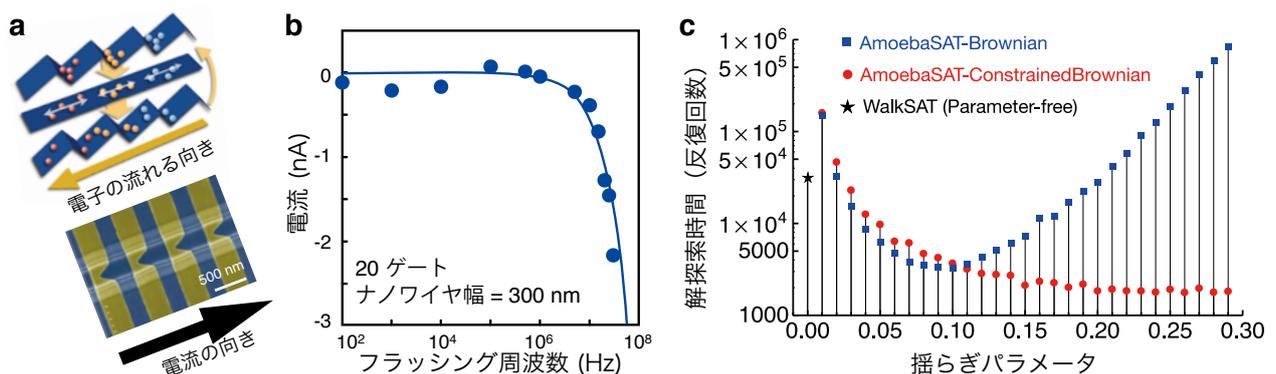


図 2 (a) 電子は熱雑音によりランダムに動く。電子ブラウンラチェットは揺らいでいる電子から使えるエネルギーをとりだす。半導体ナノワイヤに非対称形状電極を多数設けることで、電圧印加時に (前後方向に) 非対称な形状のポテンシャルが作り出されるようにしておく。電圧を周期的にフラッシングする (オン/オフを切り替える) と、ふらつく電子を一方方向に導くラチェット機能が実現する。(b) フラッシング周波数を高くすると、流れる電流が大きくなる。周波数を適切に選択すると、確率的に電流が流れない「揺らぎ動作」が発生し、その確率はワイヤ幅により調節可能である。このデバイスは室温で動作するため、様々な電子機器に組み込むことができる。(c) アメーバモデル (AmoebaSAT-Brownian; 青) の解探索性能 ($N=50$ の 3-SAT インスタンスの解を得るのに要した平均反復回数) を揺らぎパラメータを変えて検証し、従来の確率的局所探索アルゴリズム (WalkSAT; 黒) より桁違いに高速に解を発見できることを確認した。揺らぎの統計的性質を変え、「揺らぎ動作」が二回連続して発生しないように制約すると (AmoebaSAT-ConstrainedBrownian; 赤)、その性能はさらに向上した。

3原子厚の半導体ヘテロ接合の 作製と電子物性の評価



さきがけ研究者（平成25年度採択）
宮田 耕充
首都大学東京

研究の目的、社会的意義

近年、電子素子の微細化の限界の打破、高効率エネルギー変換、もしくは軽くて柔軟な電子機器の実現などの様々な目的を達成するために、新たな高性能材料の必要性が高まっています。このような要求を満たす材料として、二硫化モリブデン (MoS_2 , 図1) に代表される遷移金属原子と硫黄等のカルコゲン原子からなる遷移金属ダイカルコゲナイド (TMDC) という層状物質が大きな注目を集めています。本研究では、異なるバンドギャップを持つ TMDC 同士が原子レベルで繋がった半導体ヘテロ接合と呼ばれる構造を作製し、その接合界面における電子物性の解明を目的としています。

顕著な成果

本研究では、TMDCの半導体ヘテロ接合を作製するために化学気相成長 (CVD) 法に着目してきました。従来は化学気相輸送法が TMDC のバルク結晶の作製に用いられてきましたが、近年、CVD 法は3原子分の厚さに対応する単層の TMDC 直接合成可能な手法として注目を集めています。具体的には、原料として硫黄とモリブデン (Mo) もしくはタングステン (W) の酸化物等の粉末を加熱して気化し、成長基板に供給することで単層 TMDC の結晶を成長させています。我々は、Mo と W 原料を同時に利用した場合に、Mo と W が様々な比率で混在した単層 $\text{Mo}_{1-x}\text{W}_x\text{S}_2$ 合金が成長し、比率によりバンドギャップが連続的に変化することを確認してきました。特に興味深い点として、本手法により、組成の大きく異なる $\text{Mo}_{1-x}\text{W}_x\text{S}_2$ 合金の半導体ヘテロ接合が形成可能であることが挙げられます。これは、Mo と W 原料の基板への供給速度の差より、最初に Mo 比率が高い合金が成長し、ある時点で急激に W 比率の高い合金の成長していることを意味します。一方、成長基板として層状物質であるグラファイトを用いることで、非常に均一な光学的・電気的性質、そして原子レベルで直線的な端を持つ TMDC 原子層が成長できることを見出してきました。これは、結晶面内の格子歪みや表面不純物等が抑制されていることを示しています。

このような成長基板や原料供給に関する基礎的知見を活かし、高品質な $\text{Mo}_{1-x}\text{W}_x\text{S}_2$ 合金のヘテロ接合を実現することに成功しました。この試料について、STM (走査トンネル顕微鏡) を用いることで、ヘテロ接合界面において個々の原子がどのように配列しているかを観察し、原子的に急峻な界面が実現されていることを明らかにしました (図2)。

さらに、走査型トンネル分光という手法を用いることで、ヘテロ接合近傍の電子状態がどのように変化するかを可視化することに成功しました。特に、このヘテロ接合系では、一般にタイプ2と呼ばれる、光センサーや太陽電池等に有利な電子状態を界面で実現できることを実験的に確認しました。また、界面近傍の10nm程度の領域で電場が発生し、最大で約 $80 \times 10^6 \text{V/m}$ に達することなども定量的に評価することができました。さらに、例えば二硫化タングステンと呼ばれる材料に Mo 原子を1つ W 原子と置換した場合に、電子状態がどのように変化するかも初めて解明しました。これらの成果は、半導体材料において重要な、元素置換によるバンドギャップ制御や、異種半導体接合における電気的性質を微視的な観点から初めて解明した例になります。

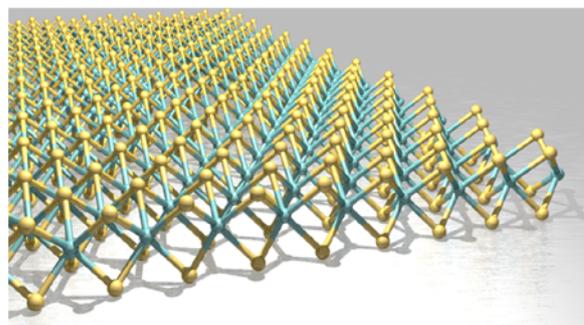


図1 3原子厚 (原子3個分の厚さ) の半導体材料である単層の遷移金属ダイカルコゲナイドの模式図。青色がモリブデン (Mo) やタングステン (W) 等の遷移金属原子、黄色が硫黄 (S) 等のカルコゲン原子に対応する。

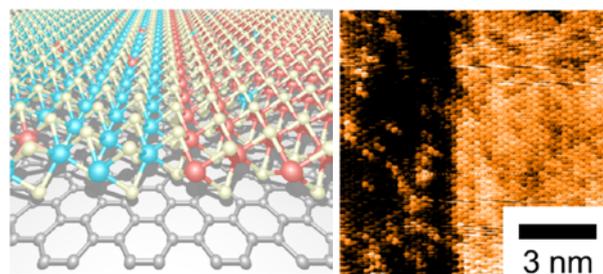


図2 (左) 作製した半導体ヘテロ接合の模式図。青色が W 原子、赤色が Mo 原子、黄色が硫黄原子に対応し、試料成長に用いた基板としてのグラファイト (灰色) を示してある。(右) 測定した半導体ヘテロ接合界面の STM 像。コントラストの明るい箇所が Mo 原子、黒い箇所が W 原子に対応する。像の左側が若干の Mo 原子を含む二硫化タングステン (WS_2)、右側が若干の W 原子を含む二硫化モリブデン (MoS_2) に相当する。

将来の展開イメージ

今回の研究対象である半導体ヘテロ接合は、半導体素子において利用される最も重要な構造の1つであり、光センサー、半導体レーザー、そして太陽電池などの応用で広く利用されています。本成果は、薄い、軽い、透明などの特徴を持つ新しい材料系である原子層物質においても、従来の固体材料と同様な特性を持つ半導体ヘテロ接合が実現できることを示してきました。試料作製に加え、接合部に生じる電場や電子状態の評価技術の確立により、様々な原子層ヘテロ接合の基礎・応用研究の加速に繋がると期待されます。今後は、より大面積かつ良質な試料作製や素子特性の検証を進め、高いポテンシャルを有する原子層物質の可能性を追求したいと考えています。

参考となる論文情報

"Growth and optical properties of high-quality monolayer WS_2 on graphite", Y. Kobayashi, S. Sasaki, S. Mori, H. Hibino, Z. Liu, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Suenaga, Y. Maniwa, Y. Miyata, ACS Nano, 9 (2015) 4056-4063.

"Bandgap-tunable lateral and vertical heterostructures based on monolayer $\text{Mo}_{1-x}\text{W}_x\text{S}_2$ alloys", Y. Kobayashi, S. Mori, Y. Maniwa, Y. Miyata, Nano Res., 8 (2015) 3261-3271.

"Microscopic basis for the band engineering of $\text{Mo}_{1-x}\text{W}_x\text{S}_2$ -based heterojunction", S. Yoshida, Y. Kobayashi, R. Sakurada, S. Mori, Y. Miyata, H. Mogi, T. Koyama, O. Takeuchi, H. Shigekawa, Sci. Rep., 5 (2015) 14808-1-6.

研究室の URL

<http://www.comp.tmu.ac.jp/miyata/index.html>

その他

半導体ヘテロ接合の STM 像は、筑波大学の吉田博士、重川教授らとの共同研究によって取得することができました。また、北海道大学の保田准教授とのアドバイ스가きっかけとなって、このような共同研究に繋げることができました。この場を借りてお礼申し上げます。

スピンを利用したニューロ モルフィックシステムの理論設計



さきがけ研究者（平成26年度採択）
荒井 礼子
産業技術総合研究所

研究の目的、社会的意義

膨大な情報が時々刻々と蓄積・更新される現代社会において、情報を高速に、かつ低消費電力で処理するための新しい技術が強く求められるようになりました。近年ひとつの候補として、人工知能、あるいは脳や神経細胞の活動を基にしたシステム（ニューロモルフィックシステム）が活発に研究されています。本研究では、ナノメートルサイズのデバイスであるスピントルク発振器（STO）と磁壁型メモリを利用し、実デバイスによるニューロモルフィックシステムの理論設計やそれを基にした動作実証を行うことを目標に、ナノ構造磁性体におけるスピン状態・非線形スピンドYNAMIKSの解析と制御理論の構築を行っています。

顕著な成果

ニューロンが電気信号をやり取りしていることは古くから知られており、電気信号が周期的に変化（発火）する現象は一種の振動子としてモデル化されてきました。またニューロンはシナプスを介して結合しており、結合の強さが変わることも知られています（図1 (a)）。これらの動きは実デバイスでは「発振器」と「多値メモリ」でモデル化できますが（図1 (b)）、これまでは素子サイズが大きく、特に集積化の点で問題がありました。多数の素子を結合させた際に全体のサイズを小さく、かつ低消費電力化するために、ナノメートルサイズのデバイスであるSTOと磁壁型メモリは有力な候補となります。

【STO】非磁性薄膜を2つの強磁性薄膜で挟んだ磁気抵抗素子（図2 (a)）に電流を流すと、自由層と呼ばれる強磁性薄膜中の磁化の歳差運動が励起され、マイクロ波帯の高周波電圧を取り出すことができます。他の発振器との大きな違いは、共振器のような外部装置がいらぬ点です。このためナノメートルサイズの小型化が可能となります。ニューロンのモデル振動子としてSTOを利用するには、沢山のSTOが結合した状態で動くことが重要です。そのような“結合振動子系”では、外部磁界がなくても発振するSTOが望まれます。本研究では、高次の結晶磁気異方性を用いた無磁界で発振するSTOの理論提案を行いました。結晶磁気異方性は磁性薄膜中の磁化の向きを決定する性質ですが、高次（二次）の結晶磁気異方性は一次の異方性より小さいため、その効果は通常無視されてきました。しかしながら、小さいながらもある大きさ以上の二次の異方性をもつ磁性薄膜を自由層に用いることで、円形の素子でも無磁界で発振できることを理論的に明らかにしました。現在、実験的な実証を目指して実験グループとの共同研究を行っています。

【磁壁型メモリ】磁化の方向が揃った領域を磁区とよびます。磁壁（DW）は異なる磁区の境界に生じる、磁化のねじれた部分を指します（図3 (a)）。磁気抵抗素子中に閉じ込めた磁壁の位置を多段階で変えることができれば、磁気抵抗の大きさを多値化できます。また磁壁位置は電力なしで保持できるので、低消費電力な多値メモリとしての動作を期待できます。そこで本研究では、磁壁を多段階で制御する新しい方法として、交換結合（A）や磁気異方性（K）の空間変調の利用について理論提案しました。図3 (b)に、AとKの空間変調に対する磁壁幅の変化を示します。灰色の領域に相当する条件では磁壁をとどめることができませんが、他の領域では磁壁をとどめることができ、磁壁幅の制御も可能であることが分かりました。

将来の展開イメージ

本研究ではSTOや磁壁型メモリを用いたニューロモルフィックシステムの理論設計を行い、それを基にした実デバイスでの実験的なデモンストレーションを目標としています。特にさきがけの研究においては、一般の振動子による画像分離（意味のある領域ごとに画像を分割する処理）の理論研究を参考に、STOのネットワークによる画像分離の理論設計と動作実証を目指しています。将来的にはSTOや磁壁型メモリなどスピントロニクス（関連）

技術を応用したデバイスを用いることにより低消費電力なニューロモルフィックシステムを提案し、膨大な情報を効率よく処理できる情報処理システムの基盤技術の創出を目指していきます。

参考となる論文情報

- Hiroko Arai and Hiroshi Imamura, "Control of domain wall thickness by spatial modulation of uniaxial anisotropy and exchange stiffness parameters", Japanese Journal of Applied Physics 54, 030307 (2015)
- H. Arai, R. Matsumoto, S. Yuasa, and H. Imamura, "Spin-torque-induced oscillation at zero bias field in a magnetoresistive nanopillar with a free layer with first- and second-order uniaxial anisotropy", Applied Physics Express 8, 083005 (2015), "Critical damping constant of a spin torque oscillator with a perpendicularly magnetized free layer and an in-plane magnetized reference layer", Physical Review B 92, 220403 (R) (2015)

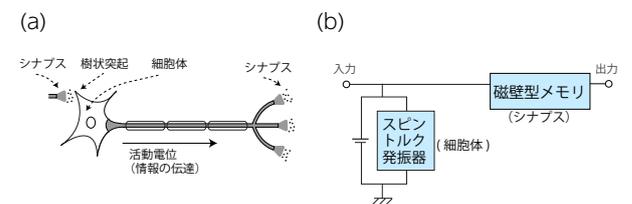


図1 (a) ニューロンの模式図。周期的な電位の変化（発火）が、シナプスを介して次のニューロンに情報を伝える役割を果たす。(b) “人工ニューロン”回路の模式図。周期的な発火をスピントルク発振器で、シナプスは磁壁型メモリでモデル化する。

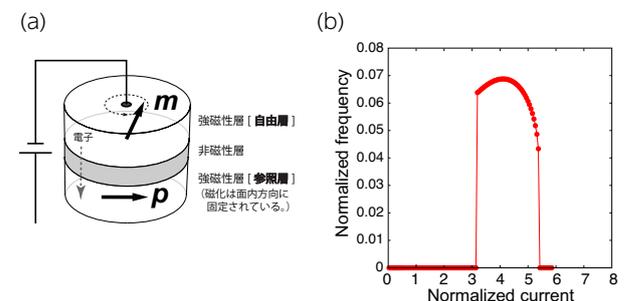


図2 (a) スピントルク発振器の模式図。非磁性薄膜（灰色）を2つの強磁性薄膜で挟んだ磁気抵抗素子に電流を流すと、自由層磁化の歳差運動が誘起され、磁気抵抗効果を通じて高周波電圧が取り出せる。(b) 発振周波数の印加電流依存性。周波数と電流は無次元量に規格化している。

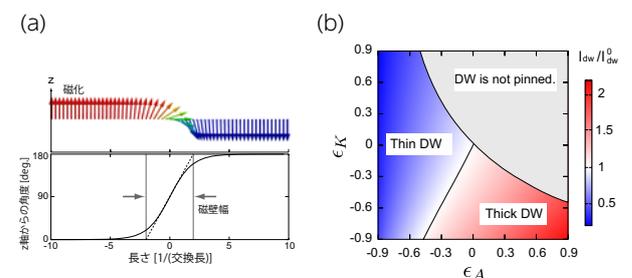


図3 (a) 磁壁（DW）の模式図（上図）と磁壁幅の定義（下図）。上図の矢印は磁化方向を表す。下図はz軸からの磁化角度から定義される磁壁幅を示す。長さはスティフネス定数Aと磁気異方性定数Kで定義される交換長（ $l_{ex}^0 = \pi A/K$ ）で規格化した無次元量である。(b) AとKの空間変調度（ ϵ_A, ϵ_K ）に対する磁壁幅 l_{ex} の変化。灰色の領域以外の条件で磁壁は固定でき、磁壁幅の制御が可能である。

微細印刷技術を用いたナノメートルオーダーの印刷有機トランジスタの開発に成功



さきがけ研究者（平成26年度採択）
 福田 憲二郎
 理化学研究所 染谷薄膜素子研究室

研究の目的、社会的意義

電子デバイスのウェアラブル化を目指すうえで、デバイスの「薄さ」「軽さ」「柔らかさ」「大きさ」は重要な要素技術となります。超柔軟・超軽量かつ大面積のエレクトロニクスを実現することは、これまでのシリコンテクノロジーでは実現困難であったエレクトロニクスの新領域を開拓するための重要なキーテクノロジーです。本研究では、大面積化・高速生産が可能な新しい印刷技術を利用して、高精細な有機トランジスタを世界で始めて実現しました。

研究成果の内容

今回、「凸版反転印刷」と呼ばれる近年新たに開発された印刷技術を利用して、電極間隔がナノメートルオーダーの銀電極を形成することに成功し、それを用いた有機トランジスタを作製しました。凸版反転印刷の印刷原理は①シリコンゴム製のブランケットへの銀インクの塗布、②凹凸のあるガラス版へブランケットを押し付けることで不要部分を取り除く「受理」、③ブランケットに残ったインクパターンを基板へと印刷する「転写」の3つの工程からなります（図1）。

この凸版反転印刷装置を利用して100 mm角のガラス基板の上に、線間隔600 nmの微細な電極パターンを形成しました（図2）。1枚の基板の上に印刷する所要時間は30秒〜3分程度であり、高速かつ高精細な電極パターンを印刷形成することが可能となりました。最大サイズは装置に依存した値であり、原理的には更なる大面積化も十分に可能です。また、電極の厚みが100 nm程度であり、テーパ状ではない急峻な端部が形成されていること、さらに電極表面は非常に平坦であることが断面観察の結果から明らかとなりました。これらは従来の印刷技術では実現困難とされていた要素技術であり、本印刷技術の優位性を端的に示しています。

凸版反転印刷によって形成された微細電極をソース・ドレイン電極として利用した、有機トランジスタを作製しました。有機半導体材料として可溶性p型低分子材料である2,8-difluoro-5,11-bis(triethylsilyl)ethynyl anthradithiophene (diF-TES-ADT) を、インクジェット印刷により形成しました。実際に作製したトランジスタ素子のチャンネル長（ソース・ドレイン電極間距離）は600 nmであり、これは印刷技術を用いて作製した中では世界最高水準の高精細度です。このトランジスタは明確なオン・オフ制御を示し、トランジスタとして正常に駆動していることを確認しました（図3）。平坦な電極を形成できていることからリーク電流もほとんど観測されず、良好な絶縁性を確保していることも確認できました。これらの研究結果はサブミクロンスケールの印刷型トランジスタを形成する世界初の技術であり、プリント・エレクトロニクスによって形成される回路の高速動作、高集積度を加速させる重要な成果です。

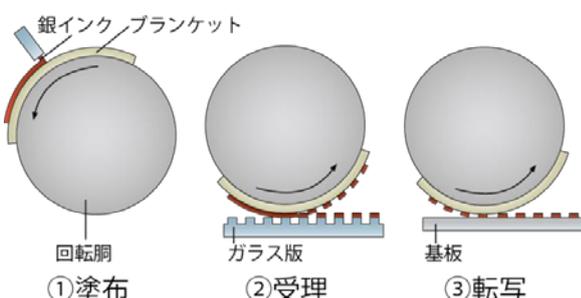


図1 凸版反転印刷の工程説明図。塗布、受理、転写の3工程を経ることで微細な銀の電極パターンが作製される。

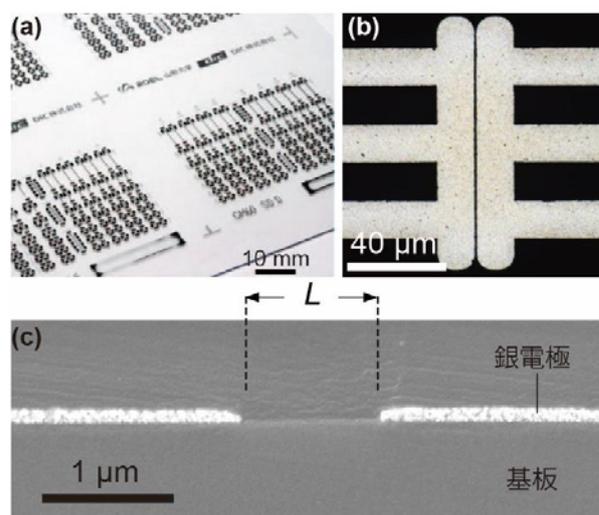


図2 (a) 作製した印刷パターン。100 mm角の基板上全体に微細な印刷パターンを形成できる。(b) 電極の拡大図。線幅15 μm、線間隔700 nmのパターン形成を実現した。(c) 印刷電極の断面図。急峻かつ平坦な電極パターンが形成されている様子が観察された。

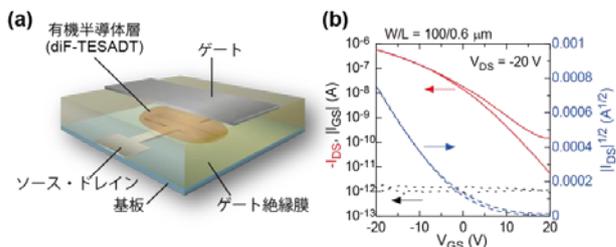


図3 微細印刷電極をソース・ドレインに利用した有機トランジスタ。(a) 断面構造模式図。凸版反転印刷によって形成した銀電極をソース・ドレインとして利用し、印刷手法を用いて有機トランジスタを作製した。(b) 印刷サブミクロンチャンネル有機トランジスタの伝達特性。赤線はゲート電圧に対するソース・ドレイン電流の変化（ログ表示）、青線はソース・ドレイン電流の1/2乗をプロットしたもの（線形表示）。黒の点線はゲートリーク電流を示す。明確なオン・オフ制御を確認し、トランジスタとして正常に駆動していることを確認した。

今後の展開

本研究では微細かつ平坦な電極を印刷形成する技術を確認することができました。いわゆる「ハンコ」の技術を用いることで、さまざまな基材の上にも印刷形成することが可能であると考えられます。この技術を活用させることで、非常に薄い基板フィルムの上に、印刷手法によってエレクトロニクスを形成することが可能になると考えられます。今後は本研究で示された印刷技術を用いた有機トランジスタ形成技術に、「超柔軟性」「超軽量」といった残るキーテクノロジーを付与することで、人体の表面を柔らかく覆う「ウェアラブル・センサ」など、新たなエレクトロニクスへの応用を目指します。

参考となる論文情報

Kenjiro Fukuda, Yudai Yoshimura, Tomoko Okamoto, Yasunori Takeda, Daisuke Kumaki, Yoshinori Katayama and Shizuo Tokito, "Reverse-Offset Printing Optimized for Scalable Organic Thin-Film Transistors with Submicrometer Channel Lengths", *Advanced Electronic Materials*, 1, 1500145 (2015), doi: 10.1002/aelm.201500145

研究室の URL

http://www.riken.jp/research/labs/chief/thin_film_device/

当研究領域では、研究代表者（CREST）およびさきがけ研究者（さきがけ）に担当アドバイザーを決めて、きめ細かい助言や相談および成果評価を行う体制をとっています。

CREST 課題の担当アドバイザー

採択年度	研究代表者	主担当アドバイザー	副担当アドバイザー
H25年度採択	内田 健	知京 アドバイザー	久本 アドバイザー
	高木 信一	久本 アドバイザー	西村 アドバイザー
	波多野 睦子	石内 アドバイザー	知京 アドバイザー
H26年度採択	浅野 種正	中込 アドバイザー	石内 アドバイザー
	橋本 昌宜	清水 アドバイザー	津田 アドバイザー
	益 一哉	井上 アドバイザー	中込 アドバイザー
H27年度採択	高尾 英邦	西村 アドバイザー	高柳 アドバイザー
	竹内 健	河村 アドバイザー	清水 アドバイザー
	樋口 昌芳	高柳 アドバイザー	西村 アドバイザー
	富士田 誠之	田原 アドバイザー	井上 アドバイザー

さきがけ課題の担当アドバイザー

H25年度採択者		H26年度採択者		H27年度採択者	
さきがけ研究者	担当アドバイザー	さきがけ研究者	担当アドバイザー	さきがけ研究者	担当アドバイザー
青野 真士	武藤アドバイザー	荒井 礼子	秋永アドバイザー	赤井 恵	森村アドバイザー
吾郷 浩樹	水谷アドバイザー	河野 崇	森村アドバイザー	太田 実雄	上田アドバイザー
安藤 和也	笹川アドバイザー	関 剛斎	笹川アドバイザー	後藤 太一	平山アドバイザー
井上 振一郎	上田アドバイザー	高橋 陽太郎	上田アドバイザー	小林 正治	福島アドバイザー
大野 武雄	秋永アドバイザー	友利 ひかり	楠アドバイザー	高橋 一浩	高井アドバイザー
岡田 直也	福島アドバイザー	長汐 晃輔	水谷アドバイザー	高橋 圭	笹川アドバイザー
戸川 欣彦	平山アドバイザー	長田 貴弘	福島アドバイザー	竹内 尚輝	森村アドバイザー
原 祐子	森村アドバイザー	廣理 英基	武藤アドバイザー	服部 梓	秋永アドバイザー
宮田 耕充	楠アドバイザー	福田 憲二郎	高井アドバイザー	藤枝 俊宣	高井アドバイザー
望月 維人	笹川アドバイザー	山崎 歴舟	平山アドバイザー	牧 英之	楠アドバイザー
安武 裕輔	平山アドバイザー			吉村 哲	水谷アドバイザー
山田 浩之	福島アドバイザー				
山本 倫久	武藤アドバイザー				

〔連絡先〕

戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ
〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町
TEL:03-3512-3531 FAX:03-3222-2066