

News Letter

CREST・さがけ ナノエレクトロニクス研究領域

Vol.4

Jan. 2018

Contents

-
- P.2 平成25年度・26年度・27年度採択者
-
- P.4 CREST プロジェクト、透明な組織・真摯な議論・成功へのアドバイス
国際技術ジャーナリスト 津田 建二
-
- P.5 ナノ慣性計測デバイス・システム技術とその応用創出
東京工業大学 益 一哉
-
- P.8 超高速・超低電力・超大面積エレクトロクロミズム
物質・材料研究機構 樋口 昌芳
-
- P.10 高強度テラヘルツによる光ドレスト状態の生成とサブサイクル光学応答
京都大学 化学研究所 廣理 英基
-
- P.12 遷移金属酸化物の人工量子井戸構造で量子ホール効果を実現
理化学研究所 高橋 圭
-
- P.13 高分子ナノ薄膜による生体電子化技術の開発
早稲田大学高等研究所 藤枝 俊宣
-
- P.15 ナノカーボンを用いた光・電子デバイス開発と量子技術応用
慶応義塾大学 牧 英之
-



国立研究開発法人
科学技術振興機構
Japan Science and Technology Agency

戦略目標：「情報デバイスの超低消費電力化や多機能化の実現に向けた、素材技術・デバイス技術・ナノシステム最適化技術等の融合による革新的基盤技術の創成」
 研究領域：「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

桜井 貴 康

(東京大学 生産技術研究所 教授)



副研究総括

横山 直 樹

((株)富士通研究所 名誉フェロー)

H25年度 CREST 採択者

研究代表者	所 属 機 関	課 題 名
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	超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

研究代表者	所 属 機 関	課 題 名
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	ピアスイ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

H27年度 CREST 採択者

研究代表者	所 属 機 関	課 題 名
高尾 英邦	香川大学	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
竹内 健	中央大学	デジタルデータの長期保管を実現する高信頼メモリシステム
樋口 昌芳	物質・材料研究機構	超高速・超低電力・超大面積エレクトロクロミズム
富士田 誠之	大阪大学	共鳴トンネルダイオードとフォトリック結晶の融合によるテラヘルツ集積基盤技術の創成

H25年度さきがけ採択者

研究代表者	所 属 機 関	課 題 名
青野 真士	慶應義塾大学	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ニ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	早稲田大学	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

研究代表者	所属機関	課題名
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	科学技術振興機構	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	科学技術振興機構	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

H27年度さきがけ採択者

研究代表者	所属機関	課題名
赤井 恵	大阪大学	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
太田 実雄	東京大学（終了時）	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
後藤 太一	豊橋技術科学大学	極薄磁性酸化物中におけるスピン波位相干渉を用いた多入出力演算素子の開発
小林 正治	東京大学	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ープトランジスタ技術の開発とナノワイヤ構造への応用
高橋 一浩	豊橋技術科学大学	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 圭	理化学研究所	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
竹内 尚輝	横浜国立大学	極限的エネルギー効率を有する超伝導可逆計算機の開発
服部 梓	大阪大学	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
藤枝 俊宣	早稲田大学	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
牧 英之	慶應義塾大学	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
吉村 哲	秋田大学	電界書き込み型の超低消費電力磁気メモリの開発

CREST プロジェクト、 透明な組織・真摯な議論・成功へのアドバイス



津田 建二
国際技術ジャーナリスト

私は技術ジャーナリストとして、さまざまな技術雑誌やインターネットメディアで記事を書き、原稿を編集してきました。自分では研究していませんが、エレクトロニクス技術と産業を中心にカバーしてきました。専門の研究は持っていませんので、その分、中立性な立場に居やすいというメリットはあるかもしれません。4年前に CREST プロジェクトの話を伺い、これは日本の半導体産業の復活に少しでも役に立てそうだと思う、自分の力量も顧みず、CREST の桜井プロジェクトに領域アドバイザーとして参加させていただきました。研究の評価を行う研究者が多い中で唯一のジャーナリストですが、この立場を利用して私でなければできないような視点でこれまで気が付いた点について述べたいと思います。

ジャーナリストは、今、何が起きているのか、偏見なくありのままの姿を伝えることが仕事です。できる限り真実に近づくことがそのコアとなりますが、そのように思っただけで行動していても、それ以上踏み込めないことがよくあります。しかし、10年、20年以上経って「今だから話せる」、「今なら心許せる」ということで、事件当時にはわからなかったことが最近わかるようになったことがあります。そのような時期が来ると、たいいていのジャーナリストは定年退職してしまい歴史の舞台から去っていきます。もし、いつまでも現役で歴史を見続けていると、それまでモヤモヤしていた気持ちがすっきりする事実を知ることができるようになります。これはジャーナリズム冥利です。

これまでの半導体産業を見ると、昔わからなかったことでも今わかってきたことのひとつとして、電機・半導体の経営陣の姿が異なります。エレクトロニクス産業の経営トップ、つまり社長は「エライ人」という漠然としたイメージを持っていました。しかし、経営判断できず、日本のライバル企業の動きを見て動くという自主性のないことがわかったのです。半導体への投資や、先行商品の成功を見て同じものを作るという2番手戦略でした。タイムズマーケットの速さが問題にならなかった当時はそれでもやっていけましたが、今では経営判断の遅さは通用しません。競争する相手が世界だからです。

今は経営判断ミスも明らかになってきました。シャープや東芝などの経営が示しています。日本の半導体産業が没落したことも同じです。経営判断力を持っていなかっただけではなく、経営力をつける勉強をしてこなかったのです。特に日本の大手電機メーカーでは、経営力がなかったのにもかかわらず、権力だけ握ってしまったのです。ここが現在の最大の問題だと思います。霞が関も同様で、「まさか日本が外国製半導体のシェア 20% の要求を呑むとは思わなかった」という声を最近、米国で聞きました。日米半導体交渉での米国の理不尽さを米国政府関係者が語っていました。「ダメで元々」は交渉の基本ですが、要求するだけまづは要求してみようとしたら、日本はそのまま飲んでくれたのです。

このような目でこれからの新しい現実、事件に遭遇できるチャンスの一つが、CREST の桜井プロジェクトで拝命された領域アドバイザーです。日本の産業を強くするためという目的を持って将来性のある研究を支援するためのアドバイスを提供するという仕事です。一つの研究テーマで5年間にわたり、CREST を管轄する JST (科学技術振興機構) が3～5億円の資金を援助しますので、応募する側も審査する側も真剣です。この CREST では、研究者同士のレイヤー間の連携が不可欠、というルールがあります。研究を実用化するために必要な要因だからです。CREST ではレイヤー間連携がマストです。商品化までに様々なレイヤーの方々のお世話になります。

応募してくる研究は企業よりも大学関係者が多いのですが、レイヤー間の連携という仕組みは良い意味での産学共同を推進します。テーマは、半導体を中心にセンサ、コンピューティング、ネットワーク、HMI、AI などエレクトロニクス全てです。余談ですが、最近世の中ではエレクトロニクスとは言わず、デジタル技術、デジタルトランスフォーメーション、デジタル化 (デジタルイノベーション) などという呼び名が増えてきています。

応募されると、その研究テーマについて、領域アドバイザーが喧々囂々の議論をします。テーマの内容だけではなく、研究者同士のレイヤー間連携についても検討します。その際、領域アドバイザーの多くが研究者も兼ねているため、応募者との間に少しでも利害関係があれば、退席し評価できません。公平を期すためです。だから、忖度 (そんたく) もありません。極めて透明です。

ここでの議論は、テーマとしてふさわしいか、起こりうる問題を指摘する、実用化するために必要な課題、ライバル状況のチェック、研究の位置づけ、研究期間終了までの数値目標、その妥当性なども検討します。もちろんレイヤー間連携がなければ受け付けません。研究のための研究にならないようにするため、実用化は常に念頭に置きます。企業との連携も進めます。シリコンバレーが成功した要因の一つに産学連携があります。やはり、社会の役に立つという視点を失わないように注意を促します。

さらに、プロジェクトが始まったら、サイトビジットと称して、2名のアドバイザーと CREST プロジェクトの JST から1名が研究施設を訪問し、進捗状況を確認、適切なアドバイスをします。かつて、文部科学省が大学発ベンチャーを促進するため、大学の研究を事業化するのに1～2億円を供与したことがありましたが、あるビジネス雑誌で、実用化研究をせず高級外車を取り回している、という記事が掲載されました。ベンチャー設立を促進してもその資金を管理していなかったのです。こういった反省からか、研究状況のチェックは不正を防止するだけではなく、研究開発した成果を実用化するための後押しにもなります。

かつて、シリコンバレーのベンチャーキャピタルを取材したとき、取締役として起業したての会社に関与しアドバイスしながら成功へ導く、という話を聞きました。つまり金を出す以上、口も出します。ただし口を出すと言っても、文句をつけるのではなく、成功させるための適切なアドバイスをします。同様の話は英国でベンチャーを手助けする官庁の組織でも聞きました。産業界で30～40年の経験者に3つ程度のベンチャーを見てもらい、取締役としてアドバイスをします。CREST のサイトビジットは、これに似ています。

日本の大学は、先生同士がトイレで出くわしても話もしないと言われるくらい、タコつぼみです。研究者同士のコミュニケーションが良くないようです。この CREST システムのレイヤー間連携は、こういった体質を改めるためにも役立つ試みです。

さらに CREST 中のチームのコミュニケーションの促進にも役立ちます。このプロジェクトでは、支援期間の後半に中間評価を行います。この中間評価は、領域アドバイザー全員の元で、研究プロジェクト関係者から進捗状況をヒアリングします。さらに研究プロジェクト間のコミュニケーションも図っています。これも重要で、独りよがりの研究にしないようにするためであり、また「お友達」研究者だけの集まりにしない、という JST の配慮が感じられます。

CREST の領域アドバイザーという仕事を通じて、さまざまな大学、研究所、企業の方々と知り合い、私自身の人脈もまた広がりました。この人脈は、かつて私が所属していた半導体メーカー、国内出版社、外資系出版社を経て国内外の取材先など、現在の仕事に関係する人たちを含め、私の財産となっています。今では、国内外から仕事の注文が来るようになりました。これもまた新たな人脈の広がりにつながり、一生仕事を続けられる源となっています。これまで出会った全ての人に感謝です。

ナノ慣性計測デバイス・システム技術とその応用創出



CREST 研究代表者（平成26年度採択）

益 一哉

東京工業大学

グラント番号：JPMJCR1433

研究の目的、社会的意義

本提案では「ナノ G* 計測」が産み出す新機能実現を目的とします。目標性能として mG (10^{-3} G) から μ G (10^{-6} G) オーダーの加速度を測定可能な新たな慣性計測デバイス・システム技術を開発し、その応用分野を創出します。

具体的な応用例として、本研究で開発するナノ G 計測慣性センサ・システムを用いて身体運動の計測・意味理解を行い、パーキンソン病、レビー小体型認知症の早期診断、発見へ展開します。将来的には、人とモノの動きの高精度検出とそのデータ活用による運動制御は、インフラや交通でのエネルギー消費低減など、運動に伴うエネルギー消費の低減に繋がります。

G*: 地上重力加速度, $1\text{ G} \doteq 9.8\text{ m/s}^2$

研究チームの体制、各研究テーマ

本研究では、代表者がこれまでに開発してきたプロセス、機械系・電気系 統合解析・設計環境技術による慣性センサの超高感度化と小型化研究を核として、図 1 に示すように、材料レイヤと応用レイヤの研究者と連携して、ナノ G 計測の実現と応用展開を目指します。

- 慣性センサグループ：東京工業大学 益チーム；
デバイス・回路・モジュールレベルでは、CMOS-MEMS 異種機能集積プロセスとその統合解析・設計技術により、超小型慣性センサのナノ G レベルの超高感度計測を行います。
- 材料グループ：東京工業大学 曽根チーム；
材料レベルでは、慣性センサに利用する Au 合金錘のナノ結晶構造制御による機械的性質（降伏強度やヤング率）制御を行います。
- 診断グループ：東京工業大学 三宅チーム；
応用レイヤでは、身体運動計測によるパーキンソン病を主とする神経性難病の早期発見・診断システムを臨床医師らと協力して開発します。

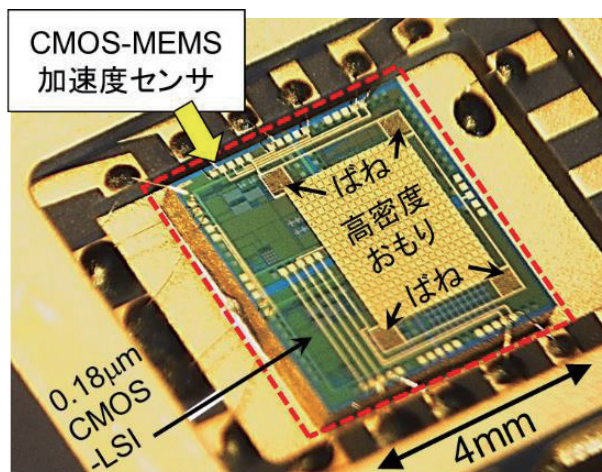


図 2 超高分解能 MEMS センサと 0.18 μ m CMOS-LSI をワンチップ化した CMOS-MEMS 加速度センサ。

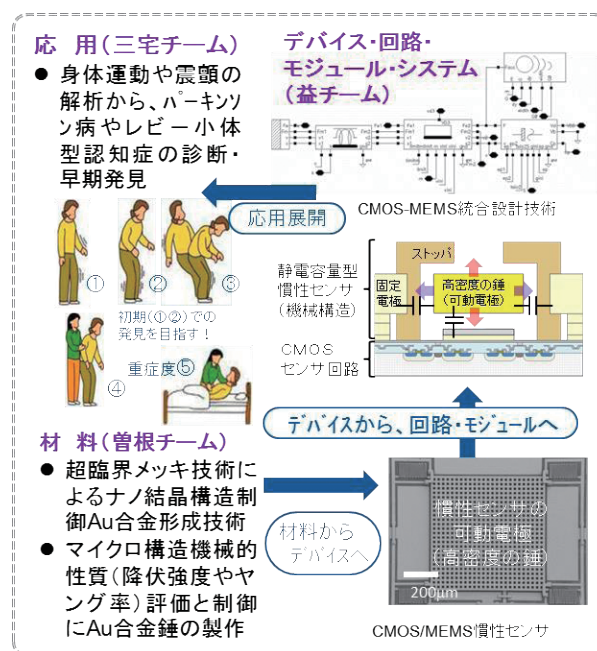


図 1 研究体制

顕著な成果

【慣性センサ G】

加速度センサの検出性能は錘の質量に比例するため、錘サイズ小型化と検出分解能向上にトレードオフが生じます。従来の MEMS 加速度センサは、高い検出分解能を得るために錘サイズが増大し、小型化が困難でした。そこで本研究では、高密度 Au 錘を用いて錘質量に反比例するブラウニアン・ノイズを低減した MEMS デバイス構造を新たに提案し、試作・評価しました¹⁾。実験的に評価したノイズは $10\mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下であり、従来加速度センサと比較して 1 桁以上の低ノイズ化に成功しました。

また、静電容量型加速度センサを用いて微小加速度を検出する場合、寄生容量を大幅に低減する必要があります。しかしながら、従来の MEMS 技術では錘サイズが大きく、センサ回路と集積する際には寄生容量が増大する課題がありました。そこで本研究では、高密度の金を錘材料に用いた小型・高分解能の MEMS デバイスを CMOS-LSI 上にワンチップ集積化²⁾しました（図 2, 3）。今回の研究では、MEMS と CMOS-LSI の集積化に半導体微細加工技術と電解めっきを用いており、超小型・超高分解能加速度センサの汎用化技術として期待できます。

【材料グループ】

本研究グループは、様々な電解めっき手法により金及び金合金を作成し、その機械的材料評価を行うことで、MEMS 応用に足る

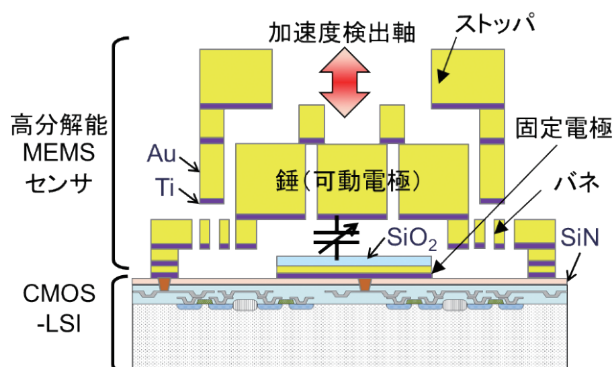


図 3 CMOS-MEMS 加速度センサの断面構造。

信頼性と機械的強度を有する金めっき材料の開発を行っています。

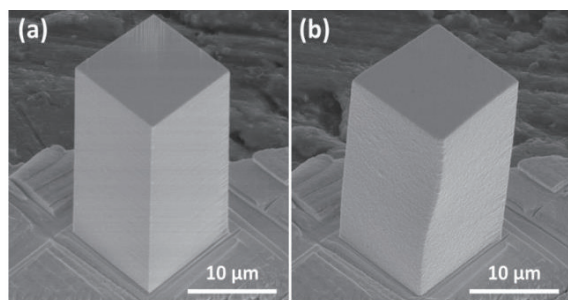


図4 FIBにより作成した金パルスめっき微小圧縮試験片の変形挙動：試験前 (a) 及び試験後 (b)。

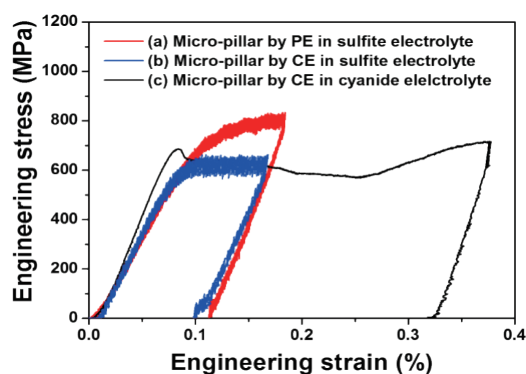


図5 FIBにより作成した金めっき微小圧縮試験結果：パルスめっきの応力-歪曲線 (a)、ノンシアンめっきの応力-歪曲線 (b)、シアンめっきの応力-歪曲線 (c)。

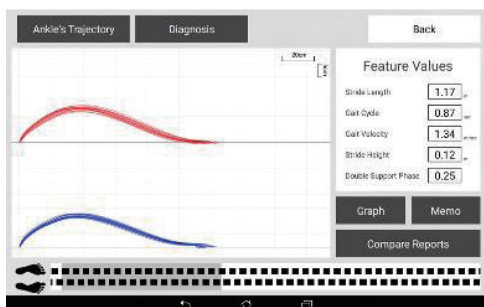


図6

まず、シアン浴、非シアン浴の純金のめっきを行い、その後非シアン浴でのパルスめっきを試み、欠陥の少ない平滑な金めっき皮膜を得ました。その後、我々のグループで近年開発しためっき金属の微小材料試験法により機械的特性評価を行いました。この微小材料試験法とは、(1) 得られた電解金めっきを集束イオンビーム加工機を用いてマイクロメートルオーダーの圧縮試験片・引張試験片・曲げ試験片を作成し、(2) 本グループで開発された微小材料試験機により、それらの試験片を圧縮・引張・曲げ試験を行い、(3) その変形挙動を走査型電子顕微鏡や三次元光学顕微鏡により解析するといったものです。

本報告では特に微小圧縮試験の結果の一例を図4に示します。図4は非シアン浴によるパルス金めっき皮膜から $10 \times 10 \times 20$ マイクロメートルの角柱試験片が変形していることが分かります。この変形は一般的な金の変形と異なり、ナノ結晶金属に見られるものです。このパルスめっきの結果と共に、シアン浴と非シアン浴による通常の金めっき皮膜の微小圧縮試験より得られた公称応力-公称歪み曲線を図5に示します。この結果から、通常のめっき法で得られる金の降伏強度は600 MPa、パルスめっきでは800 MPaと非常に高い値を取る事を明らかにしました。この値は純金の結果の4倍以上であり、金めっきがMEMSに利用可能であることを示している。また、めっき浴によりその変形挙動が大きく異なることも明らかになりました³⁾。

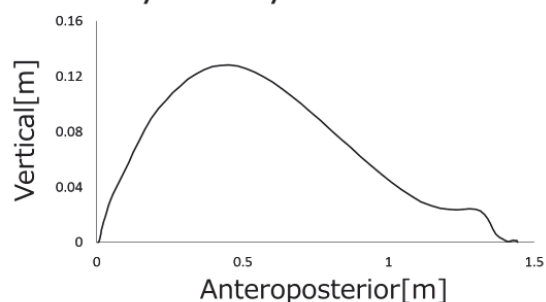
またリソグラフィーにより金/チタンマイクロカンチレバーを作成し、構造安定性に関して三次元立体顕微鏡で研究すると同時に、有限要素法シミュレータも用いて議論しました。その結果、幅 $10 \mu\text{m}$ で厚さ $12 \mu\text{m}$ では、長さを $100 \sim 1000 \mu\text{m}$ と変えても高さが変化しないことがわかります。従いまして、金/チタン構造体は極めて高い構造安定性を有することが明らかになりました⁴⁾。

【診断グループ】

本研究グループは、高感度慣性センサの応用創出の一例として、パーキンソン病 (PD) の重症度ステージ分類を取り上げ、それを実現するウェアラブル診断支援システムの構築に取り組んでいます。従来は医師が目視によって行っていましたが、それをセンサ

Gait trajectory

• Healthy Elderly



• Early PD

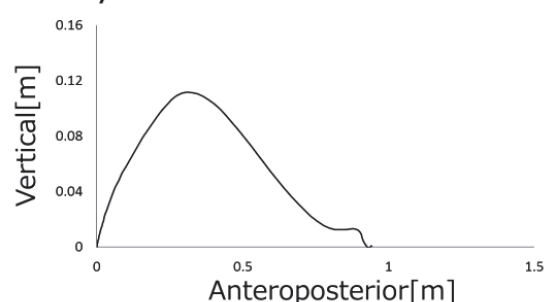


図7 PD患者と健康高齢者の比較。PD患者は健康高齢者に比して、歩幅および足首の持ち上げ幅が小さい。

を用いて定量的かつ簡便に実施することは臨床的にも大きい意義が存在するからです。具体的には、PD 患者の運動障害に注目し、それを可視化するための運動計測システムと運動分析システムを構成し、それに基づいて重症度ステージの自動分類を可能にする意味理解システムの開発を進めました。

最初の運動計測では、慣性センサ等を患者の身体に装着し加速度信号などを計測するシステムを開発することになります。2 番目の運動分析システムでは、計測された加速度信号などから運動障害固有の特徴を抽出します。たとえば歩行障害であれば歩行中の足首の運動軌道の 3D 軌道推定、姿勢障害であれば体軸の傾き角や揺らぎの推定等がなされます。最後は意味理解システムであり、ここでは上記の特徴量から特徴量ベクトルを定義し、特徴空間の中を重症度ステージと対応付けながら統計的に分類します。ここには機械学習の代表的なアルゴリズムである SVM などが用いられることになります。

PD の運動障害には歩行障害、姿勢障害、震戦の 3 種類がありますが、現状で最も開発が進んでいるのは歩行障害の場合です。運動計測システムとしては患者の両足首に慣性センサを固定するウェアラブル装具や通信方法の開発 (図 6 上) が完了し、運動分析システムとしては加速度データに加え実験室座標におけるセンサの傾き (オイラー角) を考慮した 3D の足首運動軌道推定アルゴリズムが完成しています (図 6 下)。意味理解システムとしては、歩行中の足首運動軌道の主成分分析に基づいて歩幅と足首持ち上げ量の 2 つの特徴量に注目するパターン分類が可能になっています。

これらの結果、PD の重症度ステージ分類の分類精度として、健康高齢者と軽度 PD 患者 (HY1 ~ 2) のあいだで 90% を越える極めて高い分類精度を達成できました (図 7)^{5), 6)}。これは歩行障害に注目した分類としては世界最高の精度であり、臨床的にも実用化可能な水準にあります。今後、慣性センサの高感度化とともに姿勢障害や震戦などの運動障害への展開が可能となり、更なる分類精度の向上が期待されています。

将来の展開イメージ

高感度慣性センサによる高精度の運動計測によって早期診断支援システムへの道が開かれることは、臨床技術としての側面からも、社会的・経済的側面からも非常にインパクトの強い成果です。

まず臨床的な側面からインパクトとしては、不可逆的な神経変性を伴う疾患の早期診断に道が開かれることです。特に、小型の高感度慣性センサから構成されるウェアラブルなシステムとして構築することで、高齢者の日常生活の中での日々の計測が可能になり、発症直後の極めて軽微な運動障害のステージでの検出が容易に実現できます。これは本システムによって世界で初めて実現されました。

次に社会的・経済的側面からのインパクトとしては、上記の早期診断支援システムの展開によって医療費が大幅に抑制される効果です。例えば PD 患者は 60 歳以上で 100 人に約 1 人発症し、国内に HY3 以上の重症の患者が約 14 万人存在し年々増加しているなかで、その発症を軽減できることは経済的にも非常に大きい意義があります。

さらに、エレクトロニクスの新たな研究を創出するためにも CREST チーム間連携が有効であり、CREST ナノエレクトロニクス分野ではそのような連携が取りやすい仕組みとなっております。そこで現在、益チームと内田チーム (研究代表者: 慶應義塾大学 内田健教授) が協力し、簡便かつ一般家庭でも計測可能なウェアラブル測定器実現に向けたチーム間連携を検討中です。

本プロジェクトは、超高感度慣性センサという性能の追求という観点が出発点であった。代表者や共同研究者の考える範囲で、上述のような異分野融合により新しい展開を議論しているが、更に一歩踏み込んで、今まで測定できなかったことが可能となることによって、誰も予想しなかったような新たな展開につながる事を常に念頭に置きつつ本プロジェクトをより推進したいと思っています。

参考となる論文情報

- 1) D. Yamane, T. Konishi, H. Toshiyoshi, K. Masu, and K. Machida, "A Sub-1G MEMS Sensor," ECS Transactions, vol. 66, issue 5, 2015, pp.131-138.
- 2) D. Yamane, T. Konishi, M. Takayasu, H. Ito, S. Dosho, N. Ishihara, H. Toshiyoshi, K. Masu, and K. Machida, "A Sub-1G CMOS-MEMS Accelerometer," in Proc. IEEE Sensors 2015, BEXCO, Busan, South Korea, Nov. 1-4, 2015, pp. 513-516.
- 3) C.-Y. Chen, M. Yoshida, T. Nagoshi, T.-F. M. Chang, D. Yamane, K. Machida, K. Masu, and M. Sone, "Pulse Electroplating of Ultra-Fine Grained Au Films with High Compressive Strength," Electrochemistry Communication, vol. 67, 2016, pp. 51-54.
- 4) M. Teranishi, T.-F. M. Chang, C.-Y. Chen, T. Konishi, K. Machida, H. Toshiyoshi, D. Yamane, K. Masu, and M. Sone, "Structure Stability of High Aspect Ratio Ti/Au Two-Layer Cantilevers for Applications in MEMS Accelerometers," Microelectronics Engineering, vol. 159, 2016, pp. 90-93.
- 5) K. Hori, Y. Hirobe, S. Orimo, H. Sawada, A. Inaba, and Y. Miyake, "Early Detection of Parkinson's Disease based on Gait Trajectory Analysis using Wearable Sensors," in Proc. of XXIII World Congress of Neurology (WCN2017), Kyoto, Japan, pp.137 (2017).
- 6) K. Hori, Y. Hirobe, S. Orimo, H. Sawada, A. Inaba, and Y. Miyake, "Diagnosis support system of Parkinson's disease based on gait trajectory," in Proc. of the 16th International Conference on Biomedical Engineering (ICBME2016), Singapore, Singapore, pp.146 (2016).

チーム関係者の研究室 URL

益 一哉 (東京工業大学)

<http://masu-www.pi.titech.ac.jp/index.html>

曾根正人 (東京工業大学)

<http://www.ames.pi.titech.ac.jp/>

三宅美博 (東京工業大学)

<http://www.myk.dis.titech.ac.jp/2007hp/index.html>

超高速・超低電力・ 超大面積エレクトロクロミズム



CREST 研究代表者（平成27年度採択）

樋口 昌芳

物質・材料研究機構

グラント番号：JPMJCR1533

研究の目的、社会的意義

電気化学的酸化還元で色が変わる物質（エレクトロクロミック物質）を用いたデバイスは、紙と同じく反射型の表示素子である。我々は、金属イオンと有機配位子の錯形成で得られる有機／金属ハイブリッドポリマーが、優れたエレクトロクロミック特性を有することを見出している。本研究は、ポリマーの色彩とメモリ特性（電源を切っても表示が続く特性）を生かした超高速応答・超低消費電力・超大面積のエレクトロクロミック表示デバイスの実現を目指す。

研究チームの体制、各研究テーマ

研究チームは、樋口昌芳（物質・材料研究機構）と大橋啓之（早稲田大学）の2グループからなる。①素材開発と②デバイス開発を樋口グループが担当し、③駆動制御システムの開発を大橋グループが担当している。

①素材開発

エレクトロクロミック（EC）表示デバイスの性能は、使用する素材に大きく影響される。従って、デバイスの実用化と普及のためには、より優れた特性を有する素材の開発が必要とされる。有機／金属ハイブリッドポリマーは、金属から有機配位子への電荷移動吸収に基づき色を有するが、含まれる金属によって色が大きく変わる（鉄イオンを含むポリマー：青色系、ルテニウムイオンを含むポリマー：赤色系、銅イオンを含むポリマー：緑色系）。このポリマーをITOなどの透明電極基板上に製膜し、酸化電位を印加すると、ポリマー中に含まれる金属イオンが酸化されて、ポリマーの色が消えることを見出した。色の消えたポリマー膜に還元電位を印加すると、再び元の色に変わる（図1）^{1), 2)}。

本研究では、新たに有機配位子を設計・合成することで、着色時の消色時の透過率差、着色及び消色にかかる時間と消費電力、メモリ性、色の純度などの点において、酸化タングステンなどの従来のエレクトロクロミック材料をはるかに凌駕する高い性能を有する革新的素材の開発を行っている。

②デバイス開発

EC デバイスは、近年、ボーイング787の窓に採用されたように、調光ガラスとしての実用化が本格化している。我々は、「色の着替えを楽しむ新しいライフスタイル」を提案し、「色が変わるプラスチック」として、窓や、壁、天井などの生活空間や、メガネや傘など身につけるものへの広い利用を目指している。本研究は、基材、電極、対極物質、電解質などデバイス構造全体を最適化することで、実用使用で要求される繰り返し耐久性、耐熱性、耐光性等を有する EC デバイスの開発を行っている。

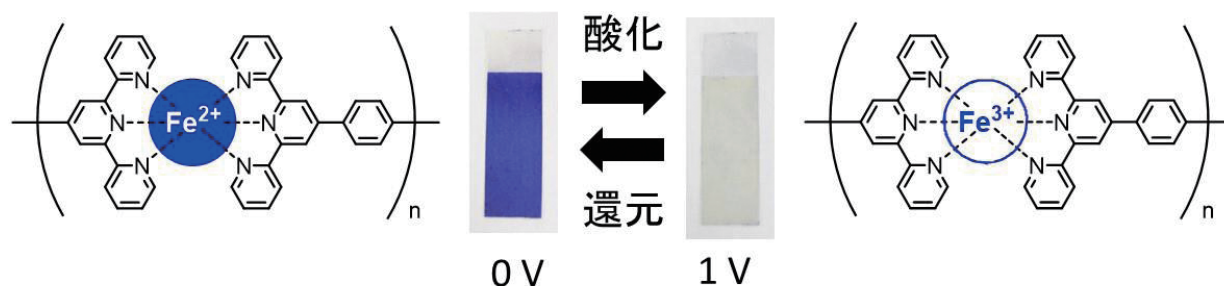


図1 有機／金属ハイブリッドポリマーにおけるエレクトロクロミズム

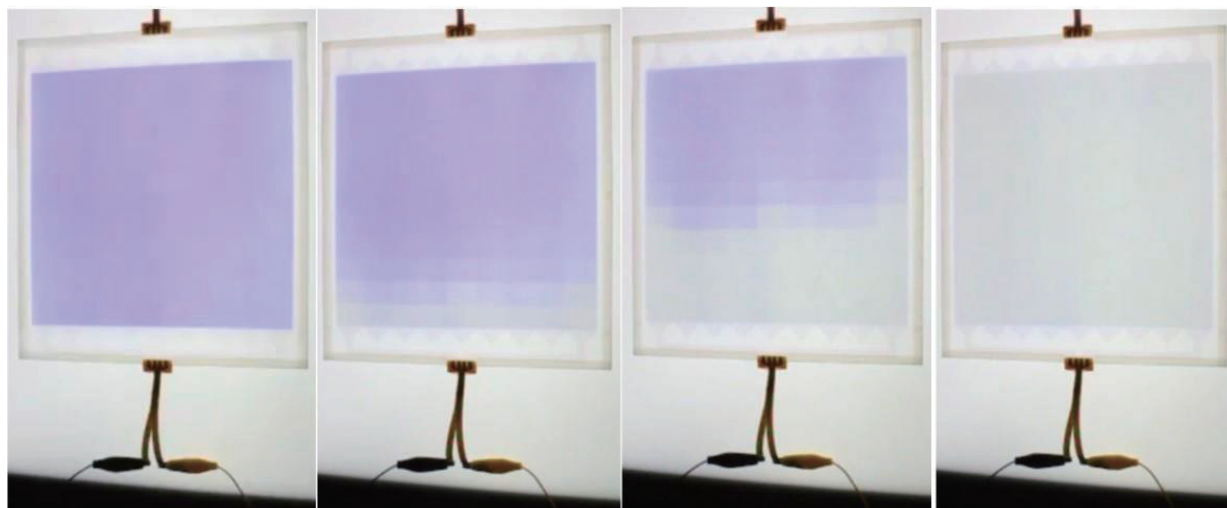


図2 グラデーション変化する調光ガラス（サイズ：20 ≒ 20 cm）

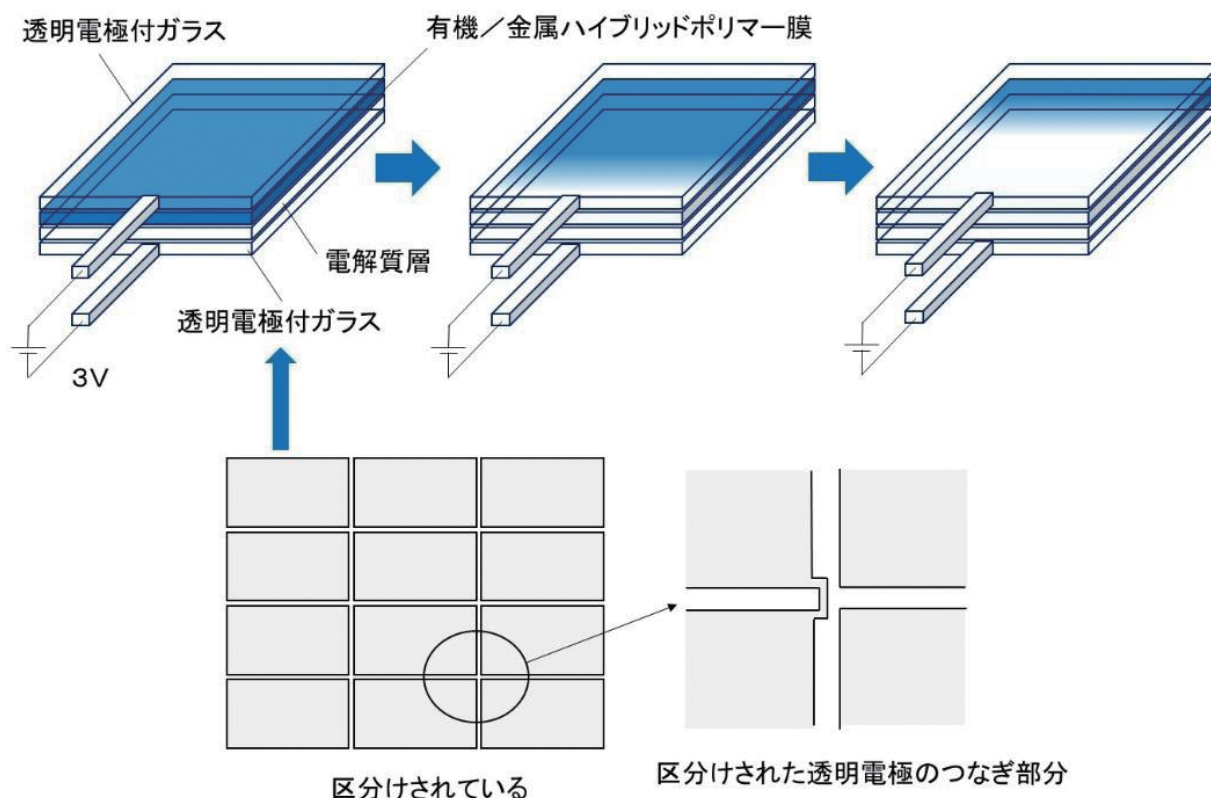


図3 透明電極の構造（区分けされた透明電極同士を細い透明電極でつないでいる）

③駆動制御システム開発

今までになかった新しい価値を有する製品としての将来の実用化を目指し、美術大学などとも連携しながら、プロダクトデザインとその駆動制御システムの開発を行っている。また、企業と共同で、非接触で色を変えるシステムの開発を目指している。

顕著な成果

グラデーション変化する遮光ガラス

太陽光の効率的な遮断は、人々の居住空間や移動空間における空調の省エネルギー化に有効と考えられる。古来、日本ではひさしのある家に住み、高度の高い夏の太陽光を遮断し、高度の低い冬の太陽光は室内に取り入れる工夫をしている。一方、電気などを使って透過する光の量を調整できる調光ガラスは、その時の日差しの強さに合わせて窓の遮光度を調整することができるため、ひさしの設置できない窓（例えば、ビルや飛行機）への使用が期待される。調光ガラスの従来の問題点の一つは、家のひさしと異なり、窓一面が遮光されるので、遮光された窓から外の景色は見えない。もし、遮光される部分やその面積を自由に変わることのできる調光ガラスであれば、家のひさしのように、遮光と眺望を両立することができると思われる。

我々は、有機/金属ハイブリッドポリマーを用いることで、3Vの電圧印加により、透明部分と遮光部分がグラデーション変化する調光ガラスの作製に成功した（図2）。グラデーション変化の途中で電力供給を止めると、そのグラデーションの状態が保持できる。電池を接続した側面から色変化するので、様々な遮光状態を作ることができる。

有機/金属ハイブリッドポリマー膜は、遮光化に要する時間が0.31秒、透明化にかかる時間が0.58秒と非常に速いのが特徴である（電圧1.2V、膜面積1.0×1.5cmの場合）。また、透明化と遮光化の繰り返し耐久性も10万回を超える。デバイスは、本EC材料と固体電解質を2枚の透明電極付ガラスで挟んだ構造である（図3）。我々は、本ポリマーの速い応答性を生かした電極設計を行った。細かく区分けされた透明電極をガラス上に作製し、区分け部分を極めて細い透明電極で接続した。この極めて細い電

極部分（接続部分）は非常に大きな配線抵抗となるので、一方向から電気を流すと、流す方向に沿って、電極の抵抗値が階段状に増える。配線抵抗の増加は、各区分けされた透明電極部分にかかる実効電圧を低下させるので、EC材料の色変化の速度が遅くなる。従って、電池をつないだ側から遠い場所ほど実行電圧が低下することで色変化が遅くなり、グラデーション変化が生じる。試行錯誤の結果、3Vを電極間にかけるだけで、ガラス全体が遮光状態から透明状態までグラデーション変化し（変化時間：約80秒）、電池のプラスとマイナスを入れ替えると、今度は透明状態から遮光状態までグラデーション変化する（変化時間：約40秒）調光ガラス（サイズ：20×20cm）（図2）の作製に成功した（2017年10月17日プレスリリース）。

将来の展開イメージ

有機/金属ハイブリッドポリマーは、高い繰り返し安定性と豊富なカラーバリエーションを兼ね備えた新しいEC材料である。今回、本ポリマーの速い応答性を利用して、遮光と眺望を両立できる窓の開発に成功した。また、製膜が容易で、水や酸素等にも安定であるため、フレキシブルデバイスへの応用も行いやすく、昨年は、本ポリマーを用いた「ハサミで好きな形に切れるディスプレイシート」に関するプレスリリースを行った。今後も、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デバイスの実現と、従来にない用途開拓により、生活に彩りを与える「色の着替えを楽しむ新しいライフスタイル」を提案していく。

参考となる論文情報

- 1) F. Han, M. Higuchi, D. G. Kurth, J. Am. Chem. Soc., 130, 2073-2081 (2008).
- 2) M. Higuchi, J. Mater. Chem. C, 2, 9331-9341 (2014) (Feature article).

チーム関係者の研究室 URL

<http://www.nims.go.jp/fmg/index.html>

高強度テラヘルツによる光ドレスト状態の生成とサブサイクル光学応答



さきがけ研究代表者（平成26年度採択）
廣理 英基
京都大学 化学研究所
グラント番号：JPMJPR1427

研究の目的、社会的意義

原子気体にレーザー光を印加すると、光と原子の内部電子準位が強く結合して光ドレスト状態（或いはフロック状態）と呼ばれる新たな量子状態が形成されることが知られている。光ドレスト状態は印加する光の電場振幅や周波数によってそのエネルギー状態を制御可能であり、電子構造が単純な原子気体ではラビ分裂や電磁誘導透明化など様々な量子現象が実現されている。固体においてもエネルギーバンドを構成する電子準位や励起子準位と光電場の結合による新たな電子状態の出現が期待できる。固体におけるドレスト状態の研究は、近年盛んに研究されている高次高調波発生や高次サイドバンド放射といった新たな非線形光学現象の理解にも重要であり、新たな光電子デバイス開発にもつながる可能性がある。

顕著な成果

本研究では、高強度 THz 光を半導体ガリウム砒素量子井戸（GaAs 量子井戸）に照射すると、励起子と THz 光が強く結合して「テラヘルツ版」のドレスト状態が生成可能であることが、超高速時間分解分光実験によって実証した¹⁾。励起子とは、光励起などによって半導体内に生成される電子と正孔がクーロン引力によって束縛された状態のことである。これは水素原子において原子核が電子を束縛して生じる電子状態と類似しており、励起子は水素原子と同様の離散的エネルギー準位構造を持つ。

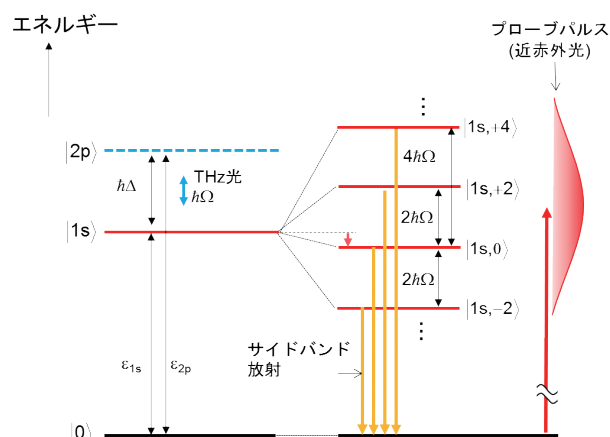


図1 THz 光と励起子内部準位との相互作用によって形成されるドレスト状態。

図1は、励起子の最低励起状態である1s状態（ $|1s\rangle$ ）と2p状態（ $|2p\rangle$ ）のエネルギー差（約8meV）よりも少し小さいフォトンエネルギーを持つTHz光（ $h\Omega=2.5\text{meV}$, h : プランク定数を 2π で割った値、 Ω : THz光の周波数）を試料に入力すると、励起子準位とTHz光が結合して新たにドレスト状態が生成される様子を示している。ドレスト状態は、印加したTHzフォトンエネルギー分だけ等間隔に離れた位置に複数のエネルギー準位を持ち、各準位は量子的な重ね合わせ状態にある。

図2(a)は、実際に高強度THz光を試料に照射してドレスト状態を生成し観測する実験配置を示している。時間幅がTHz電場周期（ $2\pi/\Omega=1\text{ps}=10^{-12}\text{秒}$ ）の1/10であるプローブ光パル

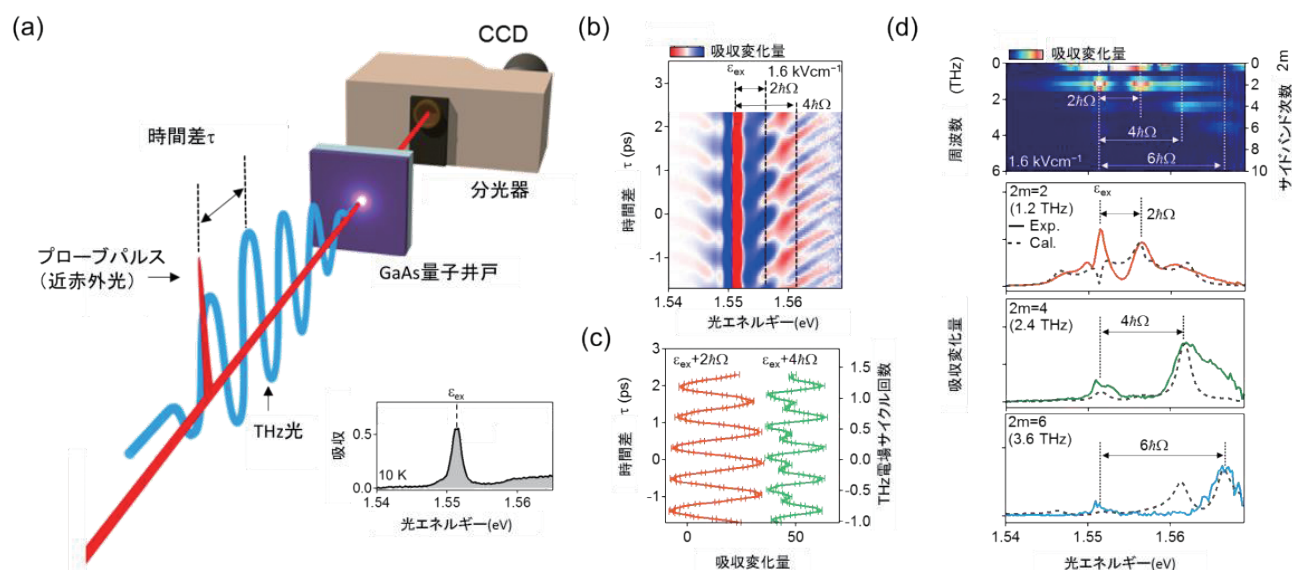


図2 (a) 高強度THz光照射によって生じる吸収変化測定用の実験配置図。右下挿入図は、試料（GaAs量子井戸）の吸収スペクトル（THz照射なし）。(b) THz照射によって変化する吸収変化量。狭帯域化されたTHz光の最大電場強度は 1.6 kVcm^{-1} 。(c) 図(b)中の破線で示すエネルギー位置での吸収変化の時間波形。(d) 時間応答スペクトル（図2(b)）のフーリエ変換スペクトル。

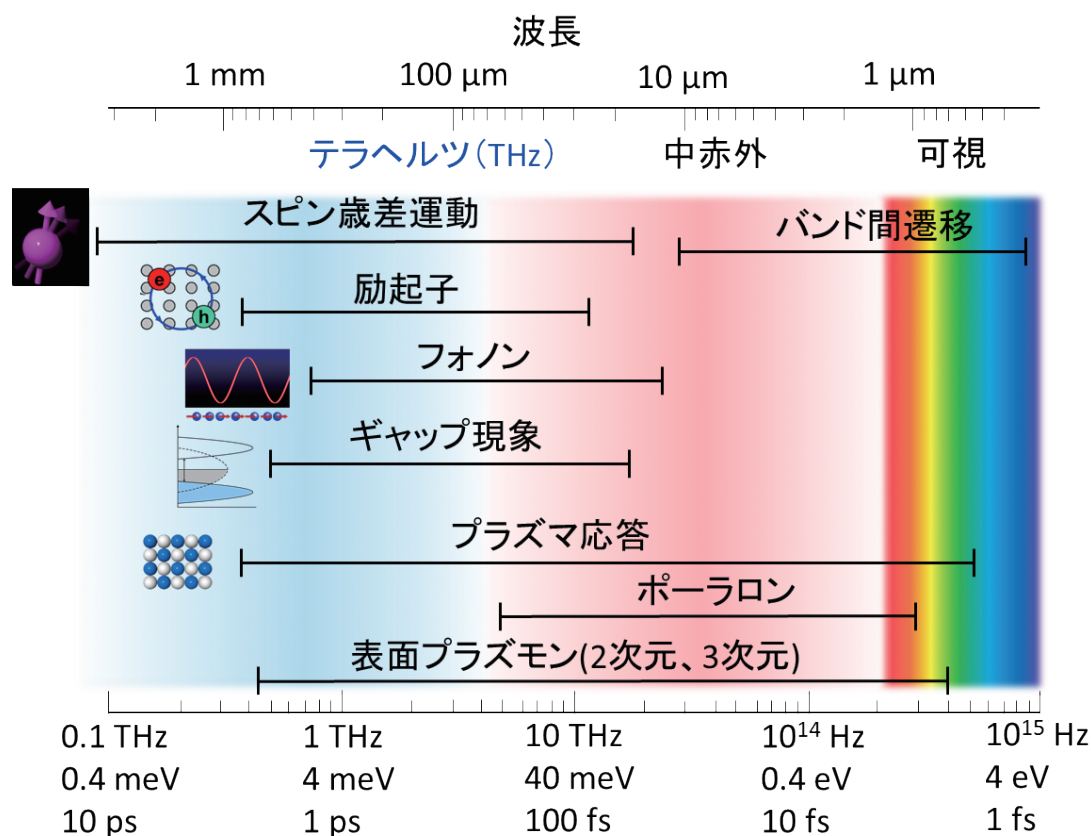


図3 THz 周波数帯における様々な振動モードや素励起。

スとの相対的時間差を変化させながら、THz 電場に応じて変化する試料の吸収変化を測定することができる。この実験によって、励起光として入力した THz 光の電場周期より高い周波数（2Ω、4Ω）で、試料の吸収量が時間とともに変化することが観測された（図2（b）、（c））。

図2（d）は、時間応答スペクトル（図2（b））に含まれる周波数成分を明瞭に示すために、フーリエ変換によって周波数スペクトルに焼き直したものである。吸収の周期的変化には THz 周波数の偶数倍のサイドバンド成分（ $2m\Omega=2\Omega, 4\Omega, 6\Omega, m$: 整数）が含まれることがわかる。また、異なる次数を持つ各サイドバンド成分の強度スペクトルにはそれぞれ、THz 光のフォトンエネルギーの偶数倍分だけ離れたエネルギー位置（ $2\hbar\Omega, 4\hbar\Omega, 6\hbar\Omega$ ）にピーク構造を持つことがわかる。これらのピーク構造は、図1（b）に示したドレスト状態からのサイドバンド放射に対応すると考えられ、励起子の内部準位（ $|1s\rangle$ と $|2p\rangle$ ）と THz 光との相互作用を摂動論的に取り扱った近似的な理論解析の結果ともよい一致が得られている。

ドレスト状態における各状態は、量子力学的重ね合わせ状態にある。このため、光吸収変化を観測するためのプローブ光によってドレスト状態が励起されると、各準位からサイドバンド光が放射され、これらの位相はドレスト状態を発生させた THz 光に対して固定されている。ドレスト状態から発生するサイドバンド放射光はプローブ光と干渉し、結果として観測される光吸収変化がサイドバンド光によって周期的に変調されることを明瞭に示している。

今後の展望

本実験により、光電場の位相をドレスト状態の波動関数の位相に直接転写し出ることがわかり、固体におけるドレスト状態の光学応答の理解が深化した。この結果は、ドレスト状態を利用した位相制御可能な新たな光変調技術の開発につながる事が期待される。THz から中赤外にわたる周波数帯は、様々な素励起や振動モードが存在し、物性研究の観点から大変魅力的な周波数帯である（図3）。本研究を端緒として、今後様々な物質群と高強度なレーザー光と物質の相互作用についての理解が深まり、デバイス応用に資する新しい物理現象の発見につながる可能性がある。

参考文献

- 1) *H. Hirori (10 番目他 7 名), "Subcycle optical response caused by a terahertz dressed state with phase-locked wave functions," Physical Review Letters 誌 117 巻, 論文番号 277402, 2016 年

研究室の URL

<http://www.scl.kyoto-u.ac.jp/~opt-nano/index.html>

遷移金属酸化物の人工量子井戸構造で量子ホール効果を実現



さがけ研究代表者（平成27年度採択）

高橋 圭

理化学研究所

グラント番号：JPMJPR1527

研究の目的、社会的意義

半導体の微細加工によるデバイス容量・処理速度の増加と社会生活における IT 機器の爆発的増加を考慮すると、エレクトロニクスの電力消費を画期的に抑制したデバイスの開発が不可欠です。

量子ホール効果の端電流がエネルギーを消費しない非散逸流であることに注目し、その非散逸電流を用いエネルギーを使用せずに情報を記憶・伝達できるような新しいデバイスの実現に向けて研究を進めています。

顕著な成果

量子ホール効果を実現するには、移動度が十分に高い希薄な二次元電子ガスを形成することが必要です。しかし、これまでは電子相関の弱い s 軌道や p 軌道の電子を伝導電子に持つ、高純度のシリコンや砒化（ひか）ガリウム（GaAs）系半導体、グラフェンなどの限られた物質でしか観察例がありませんでした。今回、電子相関が強く、その結果として超伝導や強磁性など多彩な物性を示すことが知られている遷移金属酸化物の量子井戸構造で量子ホール効果を実現しました。この電子相関の強い d 電子で量子ホール効果が実現すれば、新しい二次元電子量子物性の開拓につながると考えられます。チタン酸ストロンチウム SrTiO_3 の二次元電子は、 d 電子でありながら例外的に移動度が高いため、これまで量子ホール効果の実現を狙った試みが多数あります。しかし、量子ホール効果の発現条件である“低電子密度かつ高移動度”を同時に満たすことはできませんでした。

純度の高い原料を用いて結晶性の高い遷移金属酸化物薄膜の作製を可能にする「ガスソース分子線エピタキシー（MBE）装置」を開発し、また、半導体レーザーを用いた基板加熱による高温成長を組み合わせることで、結晶性のさらなる向上に取り組みました。高品質な量子井戸構造を作製するため、井戸部分にだけ電子を放出するドナー（La）を添加したデルタドープ SrTiO_3 構造

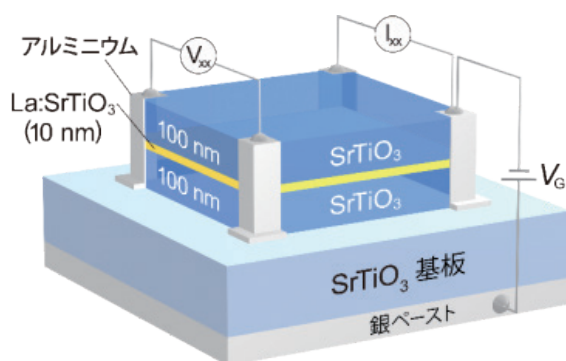


図1 デルタドープ SrTiO_3 構造における電気特性測定の様式図

(100 nm SrTiO_3 /10 nm La ドープ SrTiO_3 /100 nm SrTiO_3) を設計し、ガスソース MBE により作製しました。

図1に示すトランジスタ構造において、電子濃度を制御して、極低温・磁場下で電気特性を測定したところ、整数量子ホール効果の観測に成功しました。図2のグラフは、試料の縦抵抗値（シート抵抗値）とホール抵抗値の磁場依存性を示しています。すなわち、ホール抵抗値が量子抵抗 (h/e^2) の4分の1と6分の1で量子化しており、それらの磁場でシート抵抗値が極小値を示しています。第一原理理論計算でこの二次元構造の電子状態計算を行った結果、 SrTiO_3 のチタンの2つの異なる $3d$ 電子バンドを二次元電子が占有していることが分かりました。この2バンドモデルにより、量子抵抗の偶数分の1でのみ量子化し、電界効果で電子濃度を変化させた際に安定な占有状態が変化するという、デルタドープ SrTiO_3 構造独特の振る舞いが説明できました。

将来の展開イメージ

電子相関が強い d 電子系の量子ホール効果の実現は、二次元電子と強磁性や超伝導とが融合した新しい物性の開拓につながる成果です。さがけ研究では、この二次元電子を強磁性化して量子化に強磁場を必要としない異常量子ホール効果などを念頭にし、エネルギーを使用しない論理回路やメモリ応用へと発展させることを目標にしています。

また、ガスソース MBE をチタン酸ストロンチウムだけでなく、他の遷移金属酸化物の薄膜作製に応用することにより、半導体を上回る高品質ヘテロ接合の研究領域を d 電子系に拡張することで、新たな量子効果の開拓や酸化物エレクトロニクス分野の発展にも貢献すると考えます。

参考となる論文情報

Y. Matsubara, K. S. Takahashi, M. S. Bahramy, Y. Kozuka, D. Maryenko, J. Falson, A. Tsukazaki, Y. Tokura, and M. Kawasaki, "Observation of the quantum Hall effect in δ -doped SrTiO_3 ", *Nature Communications* 7, 11631 (2016).

K. S. Takahashi, Y. Matsubara, M. S. Bahramy, N. Ogawa, D. Hashizume, Y. Tokura, and M. Kawasaki, "Polar metal phase stabilized in strained La-doped BaTiO_3 films" *Scientific Reports* 7, 4631 (2017).

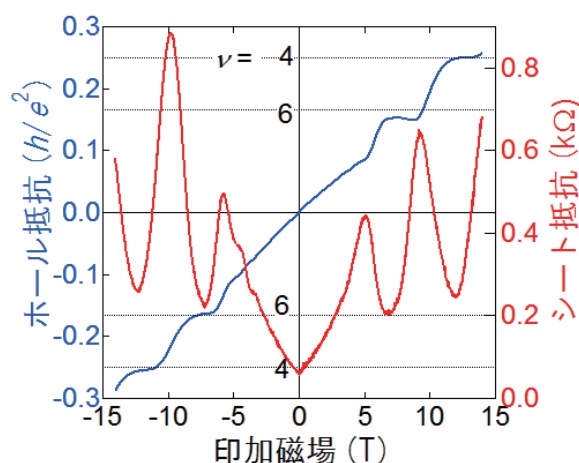


図2 デルタドープ SrTiO_3 構造で観察された整数（偶数）量子ホール効果

高分子ナノ薄膜による 生体電子化技術の開発



さきがけ研究代表者（平成27年度採択）
藤枝 俊宣
早稲田大学高等研究所
グラント番号：JPMJPR152A

研究の目的、社会的意義

再生医療のような先進医療や医学研究の高度化に向けて、患者や実験動物に対して低侵襲に使用可能な医療機器を開発することは、QOL（Quality of Life）の向上のため、また、QOL向上を支えるための高精度な生体情報収集を実現するうえで重要な課題です。本研究では高分子ナノ薄膜の製造技術にプリントエレクトロニクスを融合させることで、柔軟な生体組織や培養組織に取り付け可能なインプラントデバイス（例：認証タグ・生体センサ・無線通信技術）を開発し、生体機能の計測や制御に取り組んでいます。

顕著な成果

【生体組織に貼付可能な高分子ナノ薄膜】

私達の生体組織は、器官・組織・細胞と階層的に構成され、各階層間は細胞外マトリックス（ECM）と呼ばれる結合組織が繋いでいます。ECMは生体分子からなる巨大な二次元分子集合体であり、物質拡散や力学特性を変化させることで、隣接する細胞集団の動的な情報（接着・移動・増殖・分化）を伝達する役割を果たします。これに対して、高分子の自己組織化や微細加工技術を駆使すれば、人工系においてECMレベルの超薄性（膜厚：数十～数百ナノメートル）を有する高分子ナノ薄膜を様々な高分子を用いて作製することが可能になります¹⁾。このナノ薄膜は、膜厚の減少に伴い柔軟性と追従性が增大するため、接着剤を用いずに皮膚に貼付できるという特徴があります（図1）。また、広範な表面積を有するナノ薄膜を極薄の回路基材と見做せば、各種印刷技術を用いることで生体組織に貼付あるいは注入して作動可能なバイオデバイスを作製することもできます。

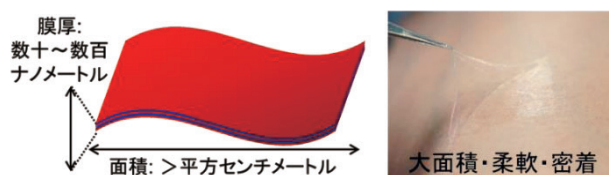


図1 高分子ナノ薄膜の特徴と皮膚に貼付したナノ薄膜。

【シリコンからなるナノ薄膜の開発と生体内へのデバイス固定】

生体内の臓器組織はムコ多糖と呼ばれる粘膜によって覆われているため、縫合無しで電子素子をそのまま取り付けることは困難です。そこで、電子素子を貼付するための基材として、生体適合性を有するシリコン系エラストマー（ポリジメチルシロキサン（PDMS））を用いて膜厚1μm以下のナノ薄膜を調製しました（図2a）。グラビアコート法で調製したPDMSナノ薄膜は、従来のポリ乳酸ナノ薄膜（ヤング率約2 GPa）と比較して、約2500倍柔らかいことが分かりました（ヤング率約760 kPa）。

さらに、PDMSナノ薄膜の表面を、イガイ（別名：ムール貝）が分泌する接着タンパク質を模倣したポリドーパミン（PDA）で修飾することで、生体組織に対する接着力の向上を目指しました（図2b）。その結果、PDA修飾したPDMSナノ薄膜は生体組織（例：筋肉）に貼付後も高い伸縮性を有しており（図2c）、その接着力は、未修飾体と比べて約5倍であり、1 mm厚のPDMS膜と比較すると約25倍増大しました。このPDA修飾したナノ薄膜にて電子素子（例：ICチップ、無線LEDチップ）を挟み込むと、縫合不要で電子素子を生体内にも貼り付けられるようになりました（図2d）。特に、ICチップの場合には、ラット腹腔内の同一箇所約1ヶ月以上に亘り固定でき、予めICに登録した情報を生体外から読み出せました。また、異なる色のLEDを生体内で点灯させることも実現しました（図2e）。生体内に発光源を設置できる本技術は、無線給電技術と組み合わせれば生体深部に対しても低侵襲に光を届けられるため、新しい治療方法や診断技術に応用されると期待されます。

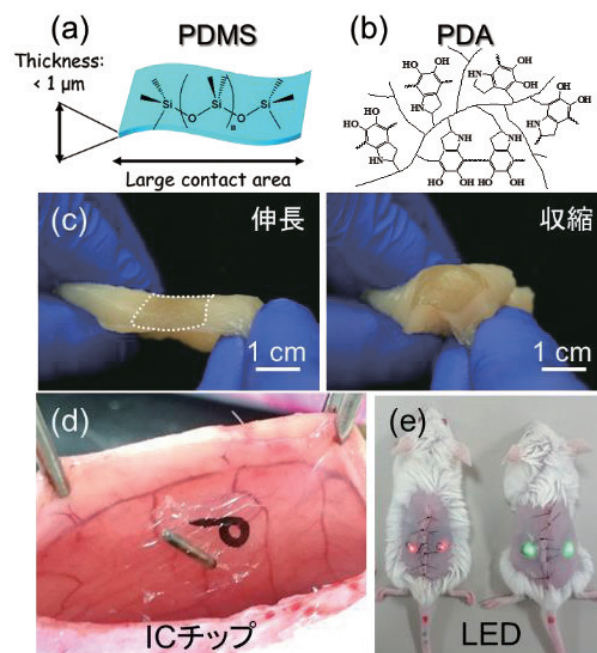


図2 PDA修飾したPDMSナノ薄膜と各種電子素子の生体内への固定。本研究に用いた(a)PDMSナノ薄膜のイメージ図と(b)組織接着性の向上のために用いたPDAの構造式。(c)ポリドーパミンを修飾したPDMSナノ薄膜を鶏肉の筋層に貼付した様子。伸縮性を有する。(d)ナノ薄膜にて固定したICチップ（見易くするためPDAを修飾していない）。(e)ナノ薄膜を用いて無線LEDチップを埋め込んだラット。赤色と緑色のLEDを無線給電にてそれぞれ点灯させることに成功した。

【脳組織に注入可能なナノ薄膜からなる神経電極】

脳科学研究の進展に伴い、柔らかく脆い脳組織の構造を破壊せずに生体信号を計測可能な神経プローブの開発が求められています。これまで神経組織の細胞外電位を計測する神経電極の開発では、微細加工技術の利用が一般的でした。しかしながら、金属などの硬質な素材からなる従来の神経電極では、脳内に留置した際の炎症惹起や標的とする神経細胞から電極が脱落してしまうことが課題でした。そこで本研究では、柔軟性と追従性に優れたポリ乳酸製ナノ薄膜（膜厚370 nm）の表面に金ナノインクからなる微細配線（線幅50 μm）をインクジェット印刷し（図3a）、単

一神経細胞の大きさに近接する神経電極を作製しました（図3b）。先端部を針状に丸めて尖らせた神経電極をマウスの脳に注入したところ、大脳皮質から海馬にかけてらせん状の配線構造が認められ（図3c）、神経活動に起因するシングルユニット電位を計測することに成功しました（図3d）。今後は、ナノ薄膜を用いて作製した針状神経電極を用いて、脳深部や各部位ごとの神経活動を長期的に計測することを目指します。

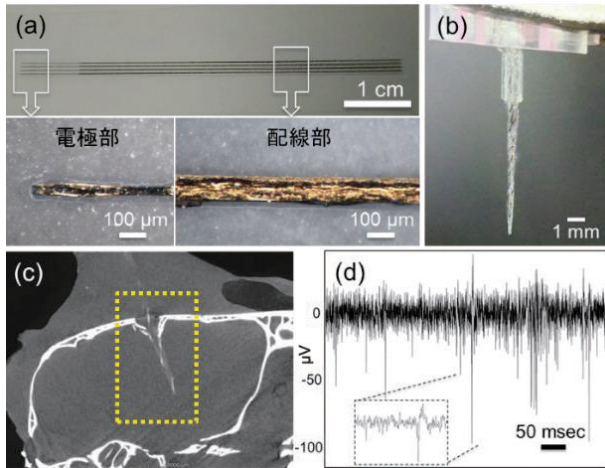


図3 ナノ薄膜からなる神経電極。(a) インクジェット印刷にて導電配線をナノ薄膜表面に描画した後に、(b) 先端部を丸めることで針状の電極に加工した。(c) マウス脳深部に注入した針状神経電極のX線透視像。(d) 単一神経細胞の活動に由来するシングルユニット電位を計測することに成功した。

将来の展開イメージ

IC や LED に代表されるエレクトロニクス産業は成熟の途を極めており、小型かつ高性能な素子を容易に入手できる時代になりました。その一方で、これらの先端デバイスを生体内で使用するためには生体－材料の界面物性を化学的・物理的・機械的に調整する必要があります。この点において、本研究で紹介した高分子ナノ薄膜は、硬いエレクトロニクスと柔らかい生体を繋ぐための「インターフェース」として活用されるでしょう。また、ナノ薄膜の利用によりデバイス形態の更なる軟化・薄化が実現すれば、生体内に光のような物理的なエネルギー源を設置できるため、新しい治療・診断システムが拓かれると期待されます。これらの研究を通じて、生体内で安心安全に使用可能なインプラントブルデバイスの創成を目指してゆきます。

参考となる論文情報

- 1) Fujie, T. Development of free-standing polymer nanosheets for advanced medical and health-care applications. *Polym. J.*, 48, 773-780 (2016).

研究室の URL

<https://www.waseda.jp/inst/wias/other/2016/04/01/1861/>

その他

本欄における動物実験は、防衛医科大学校 守本祐司准教授および太田宏之助教と連携して実施しました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

ナノカーボンを用いた光・電子デバイス開発と量子技術応用



さきがけ研究代表者（平成27年度採択）
牧 英之
慶応義塾大学

グラント番号：JPMJPR152B

研究の目的、社会的意義

カーボンナノチューブやグラフェンなどのナノカーボン材料は、その究極の低次元性に起因して、従来のデバイス材料では実現できない特異な電子物性・光物性が発現することが知られており、新たな電子デバイスや光・電子デバイス開発が期待されています。本研究では、ナノカーボンを用いることで、シリコンチップ上で集積可能な独自のデバイスを提案し、超小型・低コスト・超高速の量子技術応用を目指して研究を進めています。

顕著な成果

ナノカーボン光・電子デバイスは、光源技術、受光技術、シリコン上集積化技術といった様々なデバイス技術において、量子技術への応用が可能であり、世界中で様々なアプローチによる研究が進められています。当研究室では、光源技術としてこれまでに、カーボンナノチューブを用いた世界初の室温・通信波長帯単一光子生成技術の開発、シリコンチップ上での高速な電流注入型ナノカーボン発光素子開発などで、量子光源技術やシリコン上での集積技術に関する成果を上げてきました。受光技術に関しては、本さきがけ研究において、独自の超伝導ナノワイヤー作製技術の構築を進めており、最終的には量子ビットや量子暗号などの量子技術への応用を目指して研究しています。

超伝導材料は、大きなサイズでも量子現象が発現することから、量子コンピュータなどの次世代量子デバイスの主役となっており、微細化してナノメートルオーダーにした場合、さらに新しい超伝導の量子現象が発現することが期待されています。しかし、超伝導材料は、加熱下での結晶成長が必要、多元系で組成に敏感、エッチング加工が難しいといった理由で、半導体と比べて微細化が難しく、低次元ナノワイヤーを用いた超伝導デバイス開発を妨げる原因となっています。本研究では、太さ 1nm の一次元材料であるカーボンナノチューブに注目し、架橋したカーボンナノチューブを「テンプレート」として用いて超伝導材料の窒化ニオブ（NbN）を成長する技術を構築しました。

作製した超伝導ナノワイヤーの電子顕微鏡像を図 1 に示しますが、最小で約 10nm 幅の超伝導ナノワイヤーを成長することに成功しました。また、作製した超伝導ナノワイヤーは、長さ数 μm に渡って断線することがなく、極めて高品質なナノワイヤーが得られることが明らかとなりました。この超伝導ナノワイヤーは、

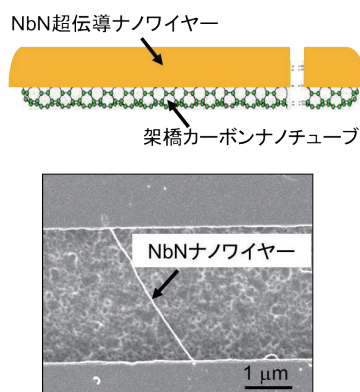


図 1 カーボンナノチューブテンプレートによる超伝導ナノワイヤー成長。上図：架橋カーボンナノチューブ上の超伝導ナノワイヤー成長の模式図。下図：成長した NbN 超伝導ナノワイヤーの走査型電子顕微鏡像。上下にある電極間に長さ数 μm のナノワイヤーが形成されている。極細にもかかわらず、途切れることなく均一に NbN が成長している。

【位相スリップ】
熱的あるいは量子的なゆらぎによって
磁束量子がナノワイヤーを横切る（トンネル）

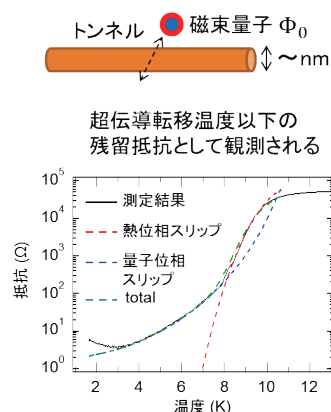


図 2 超伝導ナノワイヤーデバイスで観測される位相スリップ。上図：位相スリップの模式図。下図：幅 17 nm の超伝導ナノワイヤーでの抵抗の温度依存性（実線）。点線は理論計算。熱位相スリップと量子位相スリップのクロスオーバーが観測されている。また、3 K 以下の抵抗上昇は、超伝導-絶縁体転移を示している。

シリコン上に集積化可能であり、電極構造を有して電子デバイス化されていることから、このナノワイヤーの電気特性を評価しました。その結果、一次元の超伝導ナノワイヤーにおいて、磁束がナノワイヤーを横切る位相スリップと呼ばれる現象が明瞭に観測されるとともに、熱揺らぎによるもの（熱位相スリップ）と量子的なもの（量子位相スリップ）が、電極の伝導性（常伝導か、超伝導か）によって制御可能であることを示しました（図 2）。今回得られた量子位相スリップは、超伝導リングと組み合わせることで、磁束量子のトンネルと重ね合わせを使った新しい原理の量子ビットへの応用が期待されます。また、非常に細い超伝導ナノワイヤーでは、低温になるほど超伝導状態が壊れて抵抗が上昇する超伝導-絶縁体転移も観測されました。これらの現象は、低次元の超伝導体に特有の量子現象ですが、本研究は、このような量子超伝導デバイスをシリコン上に直接形成して作製できることを示しており、本研究のナノワイヤー作製法は、単一光子検出や量子ビットなどの低次元超伝導デバイスに応用可能であることを明らかにしました。

将来の展開イメージ

本研究で開発した、カーボンナノチューブによるナノワイヤー成長法は、従来の超伝導材料で課題となっていたリソグラフィーに代わる新しい高品質ナノワイヤー作製法となります。本技術は、原理上、あらゆる材料系に適用でき、ナノワイヤーの作製が難しい多元系材料でのナノワイヤー作製も可能とします。さらに、本技術は、シリコンチップ上でのデバイス作製も可能であることから、低次元超伝導の量子物性探索に加えて、超伝導による量子デバイス開発も可能にします。特に最近、超伝導を用いた様々な原理の量子ビットが提案されたり、量子暗号に向けた超高度の単一光子検出器が実現されたりするなど、超伝導デバイスは、量子技術における実用的なデバイスとして発展し続けています。そのため、本研究の超伝導ナノワイヤー作製技術は、今後、超伝導量子デバイス開発の新たな手法のひとつとして発展することも期待されます。

参考となる論文情報

"Thermal and Quantum Phase Slips in Niobium-Nitride Nanowires Based on Suspended Carbon Nanotubes" K. Masuda, S. Moriyama, Y. Morita, K. Komatsu, T. Takagi, T. Hashimoto, N. Miki, T. Tanabe, and H. Maki, Applied Physics Letters, 108, 222601 (2016).

研究室の URL

<http://www.az.appi.keio.ac.jp/maki/>

プレスリリース URL

https://www.keio.ac.jp/ja/press_release/2016/osa3qr000001r2pm.html

〔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