

# 研究領域「情報担体を活用した集積デバイス・システム」中間評価（課題評価）結果

## 1. 研究領域の概要

本研究領域は、デバイス内で情報の鍵を握る「情報担体」の特性を活用した高性能・高機能デバイスを創出し、さらにこれらを集積化・システム化することにより社会実装可能な情報システム基盤技術を創成します。超スマート社会やさらにその先の次世代情報化社会を実現するには、情報処理を担うデバイスやシステムのさらなる高度化が不可欠です。一方で、CMOSの微細化に代表される従来のエレクトロニクスでは情報処理能力向上に限界が見え始めており、限界を突破するための新しい材料・デバイス技術やそれらをシステム化するための革新的な基盤技術が求められています。

そこで本研究領域では、デバイス内での情報処理の鍵となる情報担体に着目します。ここで情報担体とは、状態変数として定義される情報を表す物理量や物理系のネットワーク構造・分子構造等、広く情報を担い得る自由度を包含した概念とします。本研究領域では、多くの既存デバイスで情報担体の役割を果たしている電荷に限らず、スピン状態や分子構造、物質相変化、量子、構造ネットワークといった情報を担いうるあらゆる情報担体を対象とします。情報の取得、変換、記憶、演算、伝達、出力等のデバイス機能の根幹をなす多様な情報担体を深く掘り下げ、かつ高度に利用することによって革新的なデバイスを創出します。さらに社会実装可能なシステム構築へと導くため、単体デバイスによる機能発現にとどまらず、集積化・システム化を行うことにより、回路・アーキテクチャ・システム・アプリケーションレイヤーとの協働を進め、革新的な情報システム基盤のイノベーションを目指します。

## 2. 中間評価の概要

### 2-1. 評価の目的、方法、評価項目及び基準

戦略的創造研究推進事業・CRESTにおける中間評価の目的、方法、評価項目及び基準に沿って実施した。

### 2-2. 評価対象研究代表者及び研究課題

#### 2020年度採択研究課題

- (1) 齊藤 英治（東京大学大学院工学系研究科 教授）  
非古典スピン集積システム
- (2) 高尾 英邦（香川大学創造工学部 教授）  
触覚の価値を創造する深化型マルチフィジックスセンシングシステム
- (3) 高木 信一（東京大学大学院工学系研究科 教授）  
強誘電体分極と電荷の相互作用を利用した新デバイス・システム
- (4) 竹内 昌治（東京大学大学院情報理工学系研究科 教授）  
嗅覚受容体を活用したバイオハイブリッド匂いセンサ
- (5) 田中 雅光（名古屋大学大学院工学研究科 准教授）  
人工スピんで作る柔らかさ可変の担体による高エネルギー効率情報処理
- (6) 千葉 大地（大阪大学産業科学研究所 教授）  
集積スピンサイバーフィジカルシステムの構築

### 2-3. 中間評価会の実施時期

2023年11月29日（水曜日）

## 2-4. 評価者

### 研究総括

平本 俊郎 東京大学生産技術研究所 教授

### 領域アドバイザー

浅井 哲也 北海道大学大学院情報科学研究院 教授

川中 繁 キオクシア（株）メモリ技術研究所 所長

瀬山 倫子 NTTライフサイエンス（株）プレシジョンサービス部 担当部長

多田 宗弘 ナノブリッジ・セミコンダクター（株）開発製造部 取締役

知京 豊裕 物質・材料研究機構外部連携部門 部門長

角村 貴昭 東京エレクトロン（株）技術マーケティング部 エキスパート

西村 佳壽子 パナソニック ホールディングス（株）テクノロジー本部 課長

廣井 聡幸 ソニーグループ（株）Exploratory Deployment Group 技監

湯浅 新治 産業技術総合研究所新原理コンピューティング研究センター 研究センター長

若林 整 東京工業大学科学技術創成研究院 教授

### 外部評価者

該当なし

## 研究課題別中間評価結果

1. 研究課題名： 非古典スピン集積システム
2. 研究代表者： 齊藤 英治（東京大学大学院工学系研究科 教授）
3. 中間評価結果

本研究は、非古典相関を有する情報担体の学術とその形成技術を研究開発し、コヒーレンスを利用した集積化デバイスを構成して量子情報機能の一部を室温で実行できるコプロセッサの実現を目指す。磁性体中の磁化ダイナミクスの位相情報を磁気ダンピングの時間スケールよりも長い時間にわたって引き出す方法を発見し、その物理原理を明らかにした。この機構は古典量には現れない非古典な相関に起因するものであり、多量子ビットによる量子計算の基礎となるとともに、磁性物理研究のマイルストーンの一つになり得る成果である。

また、当初想定していなかった成果として、非古典スピンの特徴を活かして物理系と自由エネルギー原理を直接的に結びつける熱平衡機械学習を提唱し、本研究にて開発した磁性体パラメトロンを利用して同じ目的関数を持つ物理系のダイナミクスからのサンプリングでニューラルネットワークによる重み算出が実行できることを実証した。古典・非古典相関機能を探求しており、新たな計算機の開拓に向けて各要素技術の研究が進んでいることも高く評価できる。

今後は強い特許の確保、本研究の価値をより深く理解してもらうための見せ方の検討とともに、社会実装への道筋を立てることを期待する。

## 研究課題別中間評価結果

1. 研究課題名： 触覚の価値を創造する深化型マルチフィジックスセンシングシステム
2. 研究代表者： 高尾 英邦（香川大学創造工学部 教授）
3. 中間評価結果

本研究は、対象とその価値を認識できる人間の触認識能力を司る情報担体を明らかにし、その知見を新しい概念に基づく深化型センシングシステムの形で実現することを目指す。従来の「凸凹感」「摩擦感」「硬軟感」に加えて、温もりを表す「冷温感」を高い空間分解能で可視化し、さらに「乾湿感」のセンシングにも成功し、五大触覚因子のデバイス集積化を実現した。

ナノ触覚センサと人工知能の協働による触覚識別能力の研究においては指先を超える高い触覚識別能力を実現するナノ触覚センシングシステムを実証した。これまで数値化できておらず感覚で行っていた分野に対して、高感度センサによるセンシングとデータ駆動型手法を組み合わせることにより新しい領域を開拓している。

デバイス構造について戦略的に特許化されていることも評価できる。研究開発のロードマップ、シーズ技術の深化と社会要求に呼応する実装が明確に示されており、PoCの完成度も高いと認められる。複数の企業との連携を進めながら様々なユースケースの検討が進められており、社会実装のフェーズに移行されつつある。企業からの社会的ニーズも高い技術であり、実現されれば触覚価値をベースとした市場を生み出す可能性がある。今後の実用化展開、さらなる応用の広がりを期待する。

## 研究課題別中間評価結果

1. 研究課題名： 強誘電体分極と電荷の相互作用を利用した新デバイス・システム

2. 研究代表者： 高木 信一（東京大学大学院工学系研究科 教授）

3. 中間評価結果

本研究は、情報担体として強誘電体分極・ドメインを積極的に活用し、シリコンプラットフォームに適合したハフニウム系強誘電体薄膜を用いたデバイスとこれを用いた回路システムの実証、高性能化を実現することを目指す。強誘電体メモリ（FeRAM）及び強誘電体ゲート電界効果トランジスタ（FeFET）における HfZrO<sub>2</sub> の膜厚スケージングにより低電圧かつ高信頼性動作を実現することに成功した。また、エッジでの時系列人工知能（AI）処理に適したリザーバー計算を、FeFET を活用することで実現でき、音声認識応用において 98% を超える認識率が得られること等を実証した。

一方、これらのデバイス性能や信頼性を決める基礎となる Hf 系強誘電体薄膜の物性評価法として、正圧電応答顕微鏡法及び電圧印加第二次高調波検出法の開発を進め、HfZrO<sub>2</sub> 薄膜のドメイン観察や分極状態の評価に成功した。これらの成果は、戦略目標にある情報担体の特性と機能に関する学理の構築に合致するものであり、モデル構築までレベルを高めてデバイス技術にフィードバックをすることで、さらなるデバイス特性の改善が期待される。

今後は当該分野における特許出願の優先度、及び評価の重みを積極的に増やすことを検討いただきたい。集積化可能なハフニウム系強誘電体膜の研究開発は世界的にも競争の激しい開発分野であるが、将来の日本半導体の強みとなる可能性のある極めて重要な技術と考えられ、今後のさらなる研究の推進を期待する。

## 研究課題別中間評価結果

1. 研究課題名： 嗅覚受容体を活用したバイオハイブリッド匂いセンサ
2. 研究代表者： 竹内 昌治（東京大学大学院情報理工学系研究科 教授）
3. 中間評価結果

本研究は、蚊の全嗅覚受容体 80 種類を個々に発現した細胞をアレイ化したセンサを構築し、その複雑性により今まで記述することが困難であった匂いの情報を、細胞センサチップ上の応答パターンとして記述可能な計測システムを開発することを目指す。ユニークな独自技術によるバイオハイブリッドセンサが開発されており、その市場予測も含めて、科学技術イノベーションに寄与する成果が見込まれる研究である。

標的物質検出に不可欠な複数の遺伝子をゲノム DNA に組み込み安定発現細胞を作製する技術を確認し、またセンサ細胞に適する宿主細胞の選定を行っている。センサとして応用評価を実現するうえで必須となる評価装置の開発も進んでいる。異種の安定化細胞を基盤上に大量に均一に作製する技術も進んでおり、分野を牽引する成果といえる。

容量性電流計測を用いた嗅覚受容体センサベクシルの基盤技術を構築し、センサベクシル存在下で標的物質に対する容量性電流応答が観測されることを明らかにした。本成果はセンサシステムへの展開だけではなく、嗅覚受容体を含むさまざまなイオンチャネル型受容体の基礎的な機能性研究への活用も期待される。デバイスへの適用技術とその簡易計測装置を構成可能な検出技術、装置系の開発が進捗していることも認められ、実サンプルを用いたフイージビリティテストへ適したデバイス開発の道筋も確立されている。

実証実験の環境整備や特許出願、ベンチマーク等も整理されており、細胞、チップ、計測器を統合したシステムの開発についても実証が開始されている。社会実装に向けて着実に取り組みが進んでいると判断できる。本研究の発展により、嗅覚の応用として幅広い分野への展開を期待する。

## 研究課題別中間評価結果

1. 研究課題名： 人工スピンで作る柔らかさ可変の担体による高エネルギー効率情報処理

2. 研究代表者： 田中 雅光（名古屋大学大学院工学研究科 准教授）

3. 中間評価結果

本研究は、電子移動のためのエネルギー障壁を自由に制御できる単一磁性量子に関するコンピューティングを目指す。情報に「柔らかさ」を与えることで低消費電力と高速演算を同時に実現することを目指す点に新規性がある。

極低温での量子計算環境に適した磁性ジョセフソン接合を用いて構成する人工スピン回路により、磁束量子の  $1/2$  を情報担体とする新たな論理回路が実際に構成可能であること、小さな駆動力でスイッチする素子として用いることで消費エネルギーを削減できることが実験的に示した。また、人工スピン回路の磁性ジョセフソン接合が誘起する自発的な周回電流の効果や巨大なインダクタンス効果を明らかにしたことも評価できる。さらに、人工スピン回路のパラメータを調整することで 1桁程度に及ぶ消費エネルギーの柔軟な調整が可能であることを具体的なレイアウト設計に基づく数値計算で明らかにした。

人工スピン回路の使い方や応用ターゲットが、従来の単一磁性量子回路による論理回路の枠を越えて確率的コンピューティングに展開され、具体的キラーアプリケーション等が見つかり、さらなる研究の発展が期待される。人工スピン回路を応用したメモリ等の技術開発や量子計算機への集積回路開発、社会実装への取り組みを期待する。

## 研究課題別中間評価結果

1. 研究課題名： 集積スピンスイバーフィジカルシステムの構築

2. 研究代表者： 千葉 大地（大阪大学産業科学研究所 教授）

3. 中間評価結果

本研究は、スピン素子と有機回路をフレキシブル基材上に集積化し、多次元ベクトル情報担体＝集積スピン・スピンネットワークを用いて生体モーション等を高度に推定・予測することを目指す。集積スピンドバイスを力学センサとして機能させると同時に無電源で演算させる機能との融合は挑戦的であり、それぞれの要素技術に進展が見られる。

低電圧駆動、高感度、省電力、集積化容易等の特徴を持つひずみゲージを用い、差動増幅によりひずみを含む力覚をセンシングする基礎的な結果が得られている。また、スピンドバイスの集積化によるウェアラブルセンサの開発が進んでおり、新しい力学センシングとしての応用が見えている。

集積スピンを利用したゼロエナジ・メカニカルスマートレジスタは、実際に原理確認まで完了している。また、世界最高感度のひずみゲージの動作実証は高く評価できる。従来とは異なる分野への社会実装も検討されており、多方面の応用に展開することを期待する。

各グループの連携は有効に機能しており、研究代表者のリーダーシップが発揮されていることも評価できる。加えて、%オーダのひずみによる物性の巨大制御は、スピントロニクスに限らず、超伝導や半導体など様々な場面で基礎物性の理解へと繋がる可能性があるとして評価できる。今後の研究開発の加速、社会実装について検討を期待する。