



**研究課題名** パルスパワーによる植物・水産物の革新的機能性制御とその学理深化

岩手大学・理工学部・教授 **たかき こういち**  
**高木 浩一**

研究課題番号：19H05611 研究者番号：00216615

キーワード：パルスパワー、プラズマ、植物、食品、機能性

**【研究の背景・目的】**

高電圧・静電気は静電散布や電気穿孔など、以前より農業・食品プロセスへ利用されてきた。近年、特にパルス電界やプラズマを発芽・生長促進、鮮度維持、病原菌不活性化など、新たな形態で利用されつつあり、多くの興味深い報告がなされている。

本研究目的は、世界的に広がってきたプラズマ農業・食品分野への応用研究に対して、プラズマ化学反応にパルス電場を組み込んだ、パルス電界・プラズマ複合反応場による植物・水産物の革新的機能制御の実現と作用機序を礎とした学術深化、またこれらを通じた農水食工融合学術領域の開拓になる。電場・プラズマ作用場創出では、①パルスパワー技術を基礎とした高精度の時空間制御を実現する。その反応場を活用して、②植物の活性制御やその機序解明、③鮮度保持・食品機能性制御およびその機序解明を進め、本分野での学術深化・世界先導を目指す。

**【研究の方法】**

電界・プラズマ作用場の創出およびその時空間制御は本研究の肝となる。これまで一般に用いられた細胞膜の充電に必要なマイクロ秒のパルスから、たんぱく質や水の緩和時間に相当するナノ秒までカバーできる電源を設計する (図1)。時間的に変化するインピーダンスを意識して方式を選択、パルスパワー電源を作り出す。特に、近年開発が進むSiCパワー半導体素子(13kV耐圧)などを有効に活用する。植物の活性制御では、植物発芽・生長促進、防病機構の活性化、光合成活性化などについて、種子や植物体のレドックス変移、遺伝子発現の解析などを通して機序を明らかにする。植物の環境に対する反応として、地上系と地下系に分けて、前者は光合成活性や病気耐性機構の活性化、後者では窒素同化活性を中心に機序解明を進める。農水産物の鮮度保持・食品機能性制御では、液状食品の殺菌・静菌効果の

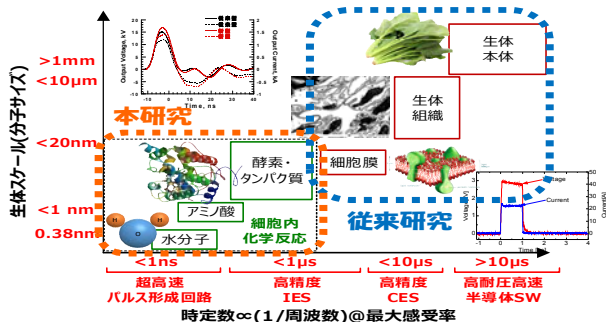


図1 生体スケールと感受に必要なパルス幅

検証、食品保管庫内の空中浮遊菌に対する静菌・殺菌効果、エチレンなど植物ホルモン作用物質の発生抑制と分解を中心に、農産物(青果物)鮮度保持効果の把握と機構解明を進める。水産物に対しては、酵素、膜タンパクなどの立体体構造の変化や、それに伴う機能性変化を中心に、鮮度保持機構や食品機能性への効果・機構解明を進める。タンパク質の構造変化は紫外線吸光スペクトルなどを利用して調べる。酵素の機能性は、酵素の機能に合わせて評価する。食品工程の発酵微生物は発酵速度で評価する。

**【期待される成果と意義】**

本研究では、高電界・プラズマ場が生体に与える影響を、水分子から生体サイズまで網羅的に取り扱うことに加え、生体のライフサイクルに伴う生体活性も考慮する(図2)。本課題は、世界に先駆けたアグリエレクトロニクス(農業植物バイオ電気理工学)や水産・食品電気理工学の融合科学の深化など、科学的及び応用的探究に基づく包括的な研究になる。



図2 生体活性を考慮した反応場の創生

**【当該研究課題と関連の深い論文・著書】**

- ・ K. Takaki et al, "Topical Review; High-voltage technologies for agriculture and food processing", J. Phys. D: Appl. Phys. (accepted) (42pp).
- ・ 高木浩一、高橋徹、濱田英介(編著):「工業技術者のための農学概論」、理工図書、2018.4.18.
- ・ 高木浩一、金澤誠司(編著)、高橋克幸他(執筆):「高電圧パルスパワー工学」、理工図書、2018.3.10.

**【研究期間と研究経費】**

令和元年度～令和5年度  
153,100千円

**【ホームページ等】**

<http://www.se.iwate-u.ac.jp/teacher/takaki-koichi>  
[takaki@iwate-u.ac.jp](mailto:takaki@iwate-u.ac.jp)



**研究課題名** 軽元素を利用した新しい物質合成法の確立と希土類フリー磁石材料への展開

東北大学・大学院工学研究科・教授 **さくま あきまさ**  
**佐久間 昭正**

研究課題番号：19H05612 研究者番号：30361124

キーワード：磁石、レアアースフリー、磁性材料、希土類、軽元素

【研究の背景・目的】

世界の x-EV(電気自動車)の販売台数は 2035 年には自動車全体の 50 %を超え 1 億台にのぼると予測されている。またロボット、風力発電等の急速な普及も進み、それらを構成するモーターに必要な永久磁石の巨大な需要拡大が見込まれている。現在、永久磁石材料としては高性能・高価格である NdFeB、低性能・低価格であるフェライトの 2 種類しかなく、磁気特性およびコストパフォーマンスが両者の中間に位置する材料が切望されている。また NdFeB 合金に用いられている Nd 等の希土類元素は、中国等に偏在しているため供給不安を払拭できず、希土類を用いない(レアアースフリー)磁石材料の開発が必要となっている。図 1 に示したように、近年中国が NdFeB 磁石の製造技術を高め、すでに生産量では世界の 3

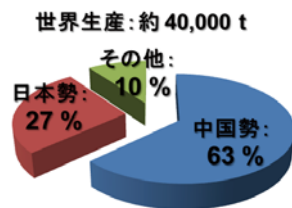


図 1 NdFeB 磁石生産量

分の 2 を占めるに至っている。したがって「中国の技術的追い上げ、および将来の x-EV、風力発電、ロボット等の普及による磁石の巨大な需要に我が国がどう対応していくか?」が喫緊の課題である。このような世界情勢に対して本研究は図 2 に示したように、NdFeB 磁石とフェライト磁石の中間の磁気特性を有する希土類フリー磁石材料を創製し、我が国がこの分野で引き続き世界のリーダーなることを目指すものである。

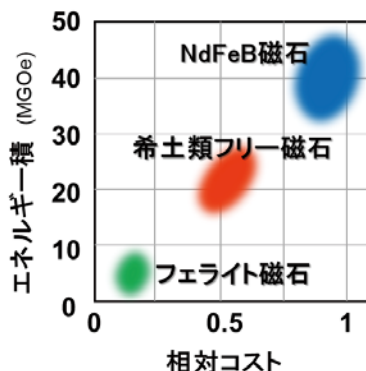


図 2 磁石の性能とコスト

【研究の方法】

NdFeB 磁石とフェライト磁石の中間の磁気特性を有する希土類フリー磁石材料の候補として、軽元素(H,C,O,N)を含む Fe 合金を取り上げた。理論グループでは、これらの元素が含まれた Fe 合金の磁性を第一原理計算によって予測する。実験グループでは Fe に H、C、O、N を導入するプロセスの研究を行う。すなわち理論計算から導かれる物性と新しい物質合成プロセスを組み合わせることにより軽元素を含む希土類フリー磁石の材料創出を目指す。

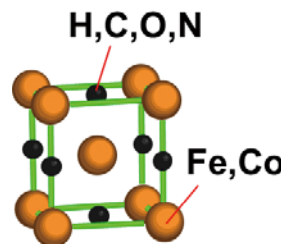


図 3 FeCo 合金の結晶構造

【期待される成果と意義】

NdFeB とフェライトの中間の特性を有する希土類フリー磁石の開発によって新しいカテゴリーを作り、我が国の優れたモーター設計技術を駆使して他国が追従できない技術的優位性を獲得することが国際競争上重要な戦略である。コストパフォーマンスに優れた希土類フリー磁石を創出できれば NdFeB までの高性能を必要としないが、フェライトよりも高い磁気特性が求められる用途において置き替えが進み磁石市場が大きく変わると期待される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Y. Kota, A. Sakuma, Degree of Order Dependence on Magnetocrystalline Anisotropy in Body-Centered Tetragonal FeCo Alloys, Appl. Phys. Express, 5, 113002 (2012)
- M. Tobise, S. Saito, M. Doi, Challenge to the synthesis of  $\alpha''$ -(Fe,Co)<sub>16</sub>N<sub>2</sub> nanoparticles obtained by hydrogen reduction and subsequent nitrogenation starting from  $\alpha$ -(Fe,Co)OOH, AIP Advances JMI2019, 035233 (2019)

【研究期間と研究経費】

令和元年度～令和 5 年度  
146,400 千円

【ホームページ等】

<http://sakuma.apph.tohoku.ac.jp/web/>



**研究課題名** 自由界面を含む混相流の革新的数値流体シミュレーション

東京工業大学・学術国際情報センター・教授 **あおき たかゆき**  
**青木 尊之**

研究課題番号：19H05613 研究者番号：00184036

キーワード：混相流、自由界面流れ、非ニュートン性流体、液膜、AMR

**【研究の背景・目的】**

流体の特徴はダイナミクスと多様性である。流体力学は成熟した学問分野であり、数値流体シミュレーションも発展しているが、混相流は数値シミュレーションが非常に難しい流れである。特に気液界面（本研究では自由界面の中にも含む）を伴う流れは、界面での大きな密度勾配と激しい界面変形を伴うために、流体力学的な難しさ、数学的な難しさ、計算技術の難しさが重なり、数値シミュレーションの発展が長く停滞している。



図1 気液二相流の弱圧縮性流体計算

自由界面を含む非圧縮性の混相流に対し、高効率な弱圧縮性流体計算手法、AMR (Adaptive Mesh Refinement) 法、動的負荷分散などの高性能計算分野の技術を導入する革新的な数値シミュレータを開発する。100nm~1km に渡る3つの実問題 ①大量の瓦礫や流木を含んだ流れの自然災害、②液膜ダイナミクスおよび泡沫の生成・崩壊、③粒子間の液架橋を直接計算する固気液分散系の低水分スラリーの挙動に適用する。詳細モデルで解きながらスパコンで大規模計算を行うことによりマクロな性質を導き出し、流体力学における混相流の新しい知見を得る。

**【研究の方法】**

自由界面を含む非圧縮性（低マッハ数）の混相流に対して、圧縮性流体方程式を完全陽解法で解く。Riemann ソルバーではなく、音波伝播を高精度で解くことのできる高次有限差分法と有限体積法を組み合わせた新しい流体解析手法を導入する。音波が最も速い波動伝播となるため、計算の時間刻み ( $\Delta t$ ) が

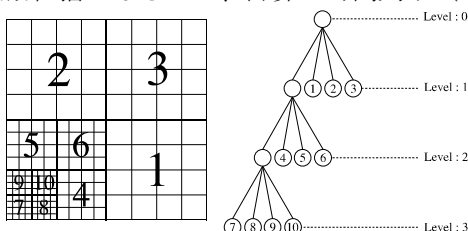


図2 木構造アルゴリズムに基づいた再帰的格子細分化

音速で制限されるが、液体や気体に対して音速を流速の10~30倍程度まで人工的に下げ（マッハ数 0.1~0.03）、 $\Delta t$  を可能な限り大きくとる。

自由界面および物体近傍に細分化格子を適合させる AMR 法を導入し、計算効率を飛躍的に向上させる。さらに、AMR 法の複雑な計算格子に対し動的領域分割を導入する。

**【期待される成果と意義】**

①豪雨災害、斜面災害において、単なる土砂だけでなく、大量の瓦礫や流木などの浮遊物を詳細に考慮した混相流シミュレーションを行うことにより、浮遊物の捕捉、構造物への衝撃、被害の範囲、堆積物の影響を精度よく予測することができ、防災への貢献も期待できる。

②液膜の近傍に細分化格子を動的に割り当て、高解像シミュレーションを行うことにより、表面張力、粘性、非ニュートン性に応じた液膜の安定性と泡沫の生成・崩壊を含んだマクロな流動のダイナミクスを解明する。また、泡沫による熱伝達・物質輸送も解明する。

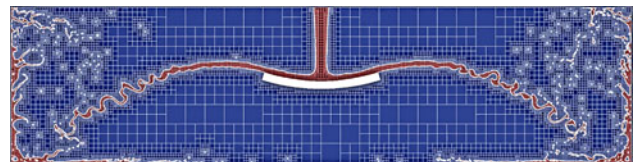


図3 スプーンで水の液膜が生成する過程の計算

③低水分スラリーに対し、粒子間の液架橋を固気液混相流として直接計算する数値シミュレーションにより、攪拌などによりどのような固気液分散系になるのか、マクロな流動特性および非ニュートン性の粘弾性モデルを構築する。

**【当該研究課題と関連の深い論文・著書】**

- ・ S. Matsushita, T. Aoki: A weakly compressible scheme with a diffuse-interface method for low Mach number two-phase flows, J. Comput. Phys., 376, pp.838-862, 2019
- ・ Y. Sitompul, T. Aoki: A filtered cumulant lattice Boltzmann method for violent two-phase flows, J. Comput. Phys., 390, pp.93-120, 2019

**【研究期間と研究経費】**

令和元年度—令和5年度  
149,700 千円

**【ホームページ等】**

<http://www.sim.gsic.titech.ac.jp/>



**研究課題名** 可逆量子磁束回路を用いた熱力学的限界を超える  
超低エネルギー集積回路技術の創成

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

よしかわ のぶゆき  
吉川 信行

研究課題番号：19H05614 研究者番号：70202398

キーワード：電子デバイス・集積回路

【研究の背景・目的】

今日の情報機器の爆発的な消費電力の増大を抑えるためには、デバイスの動作原理の見直しによる根本的な低電力化が必要不可欠である。一方、入力から出力、あるいは出力から入力への双方向の演算が可能な可逆計算機では、無限小のエネルギーで計算が行えることが予想されている。

本研究は、低エネルギー動作を特徴とする断熱的量子磁束回路(AQFP)を用いた可逆演算回路の学理を明らかにし、論理回路の熱力学的極限を超える究極の低消費エネルギー集積回路を実現する。これにより回路の消費エネルギーを半導体回路に対して6桁以上低減し、冷却電力を考慮しても十分な優位性を生み出す。本研究は可逆AQFPを中核技術とし、新規プロセッサアーキテクチャ、磁性体を用いた位相シフトAQFP、3次元高密度集積回路技術を研究し、超省エネ集積回路の基盤技術を確認する。プロジェクトの最終目標として低電力動作が可能な可逆AQFPプロセッサの実現を目指す。

【研究の方法】

半導体CMOS回路など通常の演算回路は、図1(a)に示す様に非可逆な演算を行うため、演算の結果、情報のエントロピー（情報の複雑さ）が減少する。Landauerらの検討によればその際に熱力学的エネルギーが消費され、それが演算における消費エネルギー

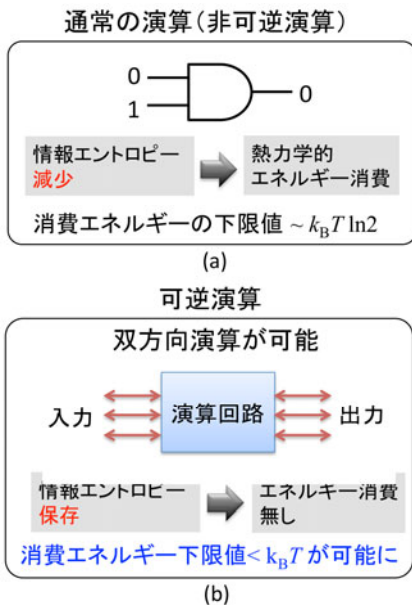


図1 (a) 非可逆演算回路と(b)可逆演算回路

一の下限を制限すると考えられている。一方、図1(b)に示す可逆演算回路では、入力から出力、あるいは出力から入力への双方向の演算が可能であり、情報のエントロピーが保存される。そのため、演算におけるエネルギーを無限小にできる可能性がある。

本研究では、断熱的量子磁束パラメトロン(AQFP)と呼ばれる超伝導論理ゲートを用いて図2に示す可逆論理ゲートを構成し、これを用いて超低消費エネルギーの演算回路を実現する。研究では、可逆演算回路における消費エネルギーの下限値を解明すると共に、可逆演算回路を用いた集積回路技術を確認する。

【期待される成果と意義】

本研究により、今の半導体に比べて6桁以上の低消費エネルギーで動作する集積回路技術の確認を目指す。これらは、データセンターやスーパーコンピュータなどの高性能情報機器の大幅な低消費電力化をもたらす。また、極低温で動作する量子コンピュータの制御回路への応用も可能である。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- N. Takeuchi, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, “Reversible logic gate using adiabatic superconducting devices,” Scientific Reports, 4, 6354 (2014).
- T. Yamae, N. Takeuchi, N. Yoshikawa, “A reversible full adder using adiabatic superconductor logic,” Supercond. Sci., Technol., 32, 035005 (2019).

【研究期間と研究経費】

令和元年度～令和5年度  
153,500千円

【ホームページ等】

<http://www.yoshilab.dnj.ynu.ac.jp/jpn/>  
nyoshi@ynu.ac.jp

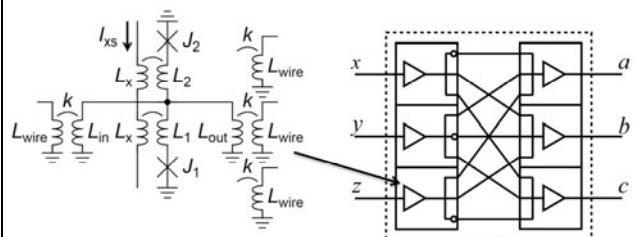


図2 断熱的量子磁束回路(AQFP)を用いた可逆演算回路

## 【基盤研究(S)】

### 大区分C



## 研究課題名 量子超越性を実証する超伝導スピントロニクス大規模量子計算回路の創出

名古屋大学・大学院工学研究科・准教授

やました たらう  
山下 太郎

研究課題番号：19H05615 研究者番号：60567254

キーワード：超伝導デバイス、スピントロニクス、量子計算

#### 【研究の背景・目的】

近年、超伝導体を用いた量子計算機の実現を目指し全世界的な競争が加熱している。その成否の鍵を握るのが、量子計算機の構成単位である量子ビットの性能を損なうことなく、多数の量子ビットを備えた大規模量子回路を実現できるかどうかという点である。量子ビットにおける重要な性能指標のひとつに、量子状態の寿命を表すコヒーレンス時間があるが、量子ビット数の増加に伴う外因的・内因的雑音の増大や制御困難性によりコヒーレンス時間が低下するため、現状では古典計算に対する優位性を表す「量子超越性」の実証には至っていない。本研究では、超伝導スピントロニクス技術を量子回路及び量子制御回路へ導入することにより、コヒーレンス時間の低下を抑制した大規模な量子計算回路を実現し、量子超越性の実証を目指す。

#### 【研究の方法】

従来の超伝導磁束型量子ビットでは、量子動作のために外部磁場の印加が必要であり、さらに最適動作点と呼ばれるコヒーレンス時間が最長となる動作点を実現するためには磁場の精密な制御が不可欠であった。そこで本研究では、超伝導スピントロニクス素子のひとつである磁性ジョセフソン接合 ( $\pi$  接合) を量子ビットへ導入した、外部磁場フリー動作が可能な独自の  $\pi$  量子ビットを用いる。これにより、大規模化における制御困難性を解消することが可能となり、磁場印加配線に起因する雑音増大の抑制も期待される。また良好なコヒーレンス時間を得るためには材料選択も重要だが、我々が開発した雑音源となる酸化物を排除した窒化物接合 (図 1(a)) を採用することで、コヒーレンス性に優れた量子回路を実現する。図 1(b) に試作した  $\pi$  量子回路の写真を示す。

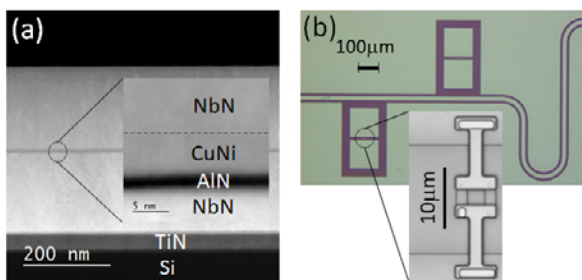


図 1 (a) 窒化物磁性接合の透過型電子顕微鏡写真。  
(b)  $\pi$  量子ビットで構成される  $\pi$  量子回路の写真。

また、量子回路の大規模化に伴い室温からの量子制御用配線が増加するため、外界からの雑音増大も懸念される。本研究では量子制御回路として極低温動作する超伝導論理回路を用いることで、雑音源の究極的な排除を目指す。量子回路と同じミリケルビンレベルの極低温下での動作を可能とするため、 $\pi$  接合の導入により従来の超伝導論理回路を更に低電力化した、独自の半磁束量子回路を実現し量子回路との融合を目指す。

#### 【期待される成果と意義】

本研究により、コヒーレンス時間を律速する物理的本質の解明に加え、図 2 に示すような量子回路と量子制御回路が一体化した大規模量子計算回路の実現、そして量子超越性の評価を通じた量子計算機の優位性・有効性の実証が期待される。

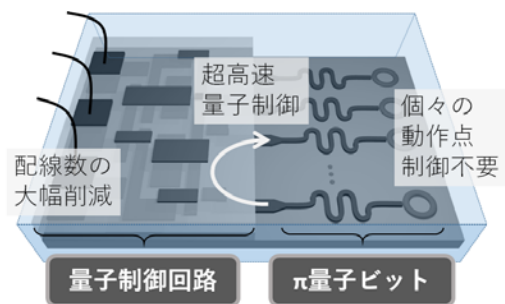


図 2 本研究で目指す大規模量子計算回路の概念図。

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- T. Yamashita, K. Tanikawa, S. Takahashi, and S. Maekawa, “Superconducting  $\pi$  Qubit with a Ferromagnetic Josephson Junction,” *Physical Review Letters*, vol. 95, pp. 097001-1-4 (2005).
- T. Yamashita, A. Kawakami, and H. Terai, “NbN-Based Ferromagnetic 0 and  $\pi$  Josephson Junctions,” *Physical Review Applied*, vol. 8, no. 5, pp. 054028-1-5 (2017).

#### 【研究期間と研究経費】

令和元年度～令和 5 年度  
156,600 千円

#### 【ホームページ等】

<http://www.super.nuee.nagoya-u.ac.jp/yamashita@nuee.nagoya-u.ac.jp>



研究課題名 ゲルマニウムスピン MOSFET の実証

大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授 はまや こうへい  
 濱屋 宏平

研究課題番号： 19H05616 研究者番号：90401281

キーワード： 半導体スピントロニクス、ゲルマニウム

【研究の背景・目的】

近年注目を浴びている IoT 技術や AI 技術の殆どが半導体技術によって支えられているが、その電力消費量は年々増すばかりであり、低消費電力化技術の開発は喫緊の課題と言える。2004 年に菅原・田中によって提案されたスピン MOSFET (Spin Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor) は、シリコン(Si)のような IV 族半導体からなる伝導チャネルを有する MOSFET 構造のソース・ドレイン電極に高スピン偏極率の強磁性体を用い、スピン注入・輸送・検出現象を MOSFET 素子中で抵抗値(電流値)の変化として観測することで、記憶機能(不揮発メモリ動作)と演算機能(トランジスタ動作)を 1 つのデバイスで実現できる夢の低消費電力電子デバイスとして注目されてきた。しかし、その提案から 10 年以上経過した現在でも、実用化には未だ課題が山積している。

研究代表者らはこれまで、Si に変わる次世代の半導体材料として注目されるゲルマニウム(Ge)(または SiGe 混晶)に的を絞り、強磁性ホイスラー合金と呼ばれる高スピン偏極率材料を用いて、絶縁体トンネル障壁層を用いない低抵抗スピン注入技術を独自開発してきた(図 1 左)。本研究では、この技術を更に高度化し、スピン MOSFET 専用に開発される独自の半導体技術と融合することで、トランジスタの本来の機能である低電圧動作するスイッチ(電流の ON/OFF)としての役割を十分に担保したスピン MOSFET(図 1 右)を実証する。

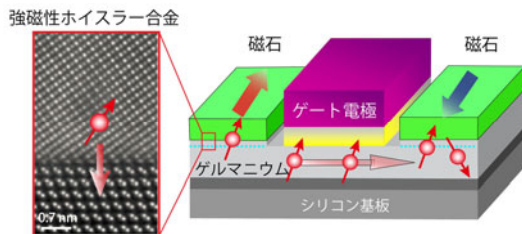


図 1. スピン MOSFET の模式図(右)と作製に成功している磁石/半導体接合の電子顕微鏡写真(左)。

【研究の方法】

研究目的を達成するために、以下の 4 つの課題解決に注力する。(1) 強磁性ホイスラー合金/Ge ヘテロ界面の高品質化、(2) Ge 中のスピン緩和抑制技術の検討とチャネル構造の最適化、(3) Ge スピン MOSFET 専用ゲートスタック構造の開発、(4) Ge スピン MOSFET 微細加工技術の開発と動作実証。

(1) に関しては、強磁性ホイスラー合金の組成ズレの影響からくる特性劣化が原因であるため、界面形成技術を高度化し、高効率スピン注入技術へと発展させる。(2) では、近年明らかになった「バレー間スピン散乱」の影響を極限まで抑制するために、チャネルに歪みを印加した新チャネル構造を検討し、最適化する。(3) では、ゲートラストプロセスを考慮し、強磁性ホイスラー合金/Ge 界面を劣化させない低温(300°C 以下) ECR プラズマ酸化法や元素添加手法などを融合した作製プロセスを開発する。(4) は、(1) ~ (3) の技術を同一素子で融合する手法の開発となる。

【期待される成果と意義】

Ge 素子における室温磁気抵抗効果が飛躍的に向上しながらトランジスタの本来の機能である「低電圧動作するスイッチ(電流の ON/OFF)」としての役割を十分に担保した素子動作が実証される。まさに、記憶機能と高速演算機能を両方兼ね備えた夢のデバイスであり、IoT 技術・AI 技術開発が益々進展する中、電子機器の低消費電力化への貢献が期待される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- M. Yamada, M. Tsukahara, Y. Fujita, T. Naito, S. Yamada, K. Sawano, and K. Hamaya, “Room-temperature spin transport in *n*-Ge probed by four-terminal nonlocal measurements”, Appl. Phys. Express **10**, 093001 (2017).
- K. Hamaya, Y. Fujita, M. Yamada, M. Kawano, S. Yamada, and K. Sawano, “Spin transport and relaxation in germanium (Topical Review)”, J. Phys. D: Appl. Phys. **51**, 393001 (2018).

【研究期間と研究経費】

令和元年度ー令和 5 年度  
 155,500 千円

【ホームページ等】

<http://www.semi.ee.es.osaka-u.ac.jp/hamayalab/>  
[hamaya@ee.es.osaka-u.ac.jp](mailto:hamaya@ee.es.osaka-u.ac.jp)



## 研究課題名 高温超伝導線材・導体・コイル巻線の評価技術の 体系化と高信頼性マグネットへの展開

九州大学・大学院システム情報科学研究院・教授

きす たかのぶ  
木須 隆暢

研究課題番号：19H05617 研究者番号：00221911

キーワード：高温超伝導線材、導体、コイル、マグネット、電気電子材料工学

### 【研究の背景・目的】

高温超伝導体は、従来材料にくらべ飛躍的に高い臨界温度と臨界磁界を有しており、超高磁界マグネットや簡便な冷却システムによる超伝導応用を拓くものとして期待されている。しかしながら、長尺線材の局所不均一性やマグネット巻線時の不安定性が顕在化しており、超伝導機器の可設計性の確立と、安定性・信頼性の向上が喫緊の課題となっている。

超伝導線材開発の難しさは、線材そのものは実用材料として km 級の長尺性を有しながら、その電磁気的性能は、ナノサイズの微細欠陥の制御（人工ピン止め点の導入）によってメゾスコピックスケールにおける量子化磁束挙動を如何にコントロールできるかに強く依存しており、本質的にマルチスケールの組織制御が求められる点にある。

本研究は、申請者等が開発した超伝導線材、導体、コイルの欠陥検出や電流輸送特性評価手法を体系化すると共に、これまで独立に進められてきた線材、導体、コイルの開発を融合し、ロバスト性の飛躍的向上と低コスト化、さらに高信頼性マグネットを実現するための線材性能の向上と導体化・コイル化技術の確立を目的とする。

### 【研究の方法】

(1) 高速磁気顕微観察と AI の融合による超伝導線材・導体・コイル評価技術の革新：申請者らが開発した図 1 に示すリール式高速磁気顕微鏡をはじめとする先進的評価技術を AI の導入によって更に高度化すると共に、得られた結果を線材製造プロセス、巻線技術へフィードバックし、線材均一性の向上と巻線技術の確立へと導く。また、線材の空間的な臨界電流分布を考慮した電流輸送特性の高精度なモデリングによって、導体、マグネット設計のための基盤を確立する。

(2) 新しい導体構造の提案によるロバスト性の向上：ロバスト性の向上と低コスト化を実現するための導体構造を確立する。並行して、導体化のための具体的な製造プロセスを検討し、試作によって、提案する導体構造の有効性を検証する

(3) 新規導体を用いたコイル化のための要素技術の確立：前項に述べた導体を用いてコイル化した際の電磁特性について解析を行うと共に、コイル巻線時の健全性について、(1)で開発する高度診断技術を用いて評価を行い、巻線技術にフィードバックすることによってコイル化技術を確立する。

(4) 小型マグネットの試作評価：前項までの結果をもとに小型マグネットを試作し、高温超伝導マグネ



図 1. リール式高速磁気顕微鏡

ットの信頼性・安定性・低損失性の向上を実証する。

### 【期待される成果と意義】

高温超伝導線材のポテンシャルを最大限に発揮したマグネットの実現により、従来技術では困難な、高磁界かつ高速変動磁界の利用が可能となり、加速器用高磁場マグネット、非接触給電（大電力を扱える高  $Q$  値コイルへの応用）、超伝導回転機（コンパクト・軽量で大出力）など電気エネルギー応用や電磁システムに関する革新的機器の開発と学術分野の進展に貢献できる。

### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・木須隆暢、「発見から 30 年を迎えた銅酸化物高温超伝導体—線材開発とパワー応用の進展—（総合報告）」、応用物理、Vol. 85, No. 5, pp. 377-388, 2016.05.
- ・K. Higashikawa, D. Uetsuhara, M. Inoue, S. Fujita, Y. Iijima, T. Kiss, “Characterization of Local Critical Current Distribution in Multifilamentary Coated Conductor Based on Reel-to-Reel Scanning Hall-Probe Microscopy”, *IEEE Tran. Appl. Supercond.*, Vol. 27, No. 4, 6603004, 2017.06.

### 【研究期間と研究経費】

令和元年度—令和 5 年度  
153,800 千円

### 【ホームページ等】

<http://super.ees.kyushu-u.ac.jp/>  
[kiss@sc.kyushu-u.ac.jp](mailto:kiss@sc.kyushu-u.ac.jp)



**研究課題名** 強誘電体の素励起コヒーレント状態を用いた物性評価方法の確立とデバイスへの展開

大阪府立大学・大学院工学研究科・教授

ふじむら のりふみ  
藤村 紀文

研究課題番号：19H05618 研究者番号：50199361

キーワード：強誘電体、素励起、急峻スイッチトランジスタ、固体熱ダイオード

【研究の背景・目的】

強誘電体は、大きな誘電率を利用した超小型キャパシタや圧電性を利用したアクチュエータなど私たちの身の回りにおいて様々な形で利用されています。最近では、IoT 社会の中で利用されるセンサーやメモリ素子として、さらにエネルギーハーベスタとしての利用も検討されています。これらのデバイスは、その基礎理論として強誘電体相転移の現象論に支えられて発展してきました。一方で、強誘電体の電気分極が波動関数の幾何学的な位相に起因していることが明らかになって、理論的理解はこの25年で飛躍的に進展しました。理論の進展に呼応するように実験的にも新しい物性が見いだされており、デバイス応用が期待されています。本研究では、「超低電力で動作する急峻スイッチトランジスタ(FET)」と「電子部品を高効率に冷却する熱マネジメント素子」の2つの革新的デバイス的高速動作機構を解明し、そのデバイスデザインの指導原理を構築するために「素励起コヒーレント状態」を利用した評価方法を確立し、強誘電体の量子力学的位相界面科学の学理の構築を目指します。

【研究の方法】

本研究では、強誘電体の素励起コヒーレント状態を用いた新規デバイスの動作原理とデバイスデザインを可能にする学理の構築を最終目的として、下記に示した図の様な体制で研究を推進します。

超低消費電力 IoT システムに貢献できる革新的デバイスであるにもかかわらず、その動作に関する物理描像が明らかになっていない、「負性容量効果を用いた急峻スイッチ FET」と「電気熱量効果を用いた熱マネジメントデバイス」の二つの目的を絞り、nsec オーダーの時間発展を基軸とするデバイス動作を「素励起コヒーレント」を用いた評価を可能にするための学理の構築を目指します。5年の研究期間を考えて、フォノンとマグノンそして熱ソリトン(熱波動)にフォーカスして研究を推進します。急峻スイッチ FET においては、強誘電体に電界を印加することによって生じる nsec 以下の速度で進行する分極反転とそれに伴うフォノン変調や半導体表面ポテンシャル変化を「素励起コヒーレント状態」を



利用して評価する方法を確立します。熱マネジメントデバイスに関しては、強誘電体内部において電気熱量効果によって生じる熱の運搬・吸熱・発熱に関するデータを素励起を用いた分極エントロピーのリアルタイム測定やシミュレーションを通して収集し、固体ヒートポンプのデバイスデザインの指導原理を構築します。

【期待される成果と意義】

電氣的に測定されるデバイス物性には様々な効果が重畳しているため、その動作モデルの物理描像を明確化することが困難となり、電界強度、時定数や温度などを変化させて有効なモデルを推測します。素励起はその起源となる物理現象が明確であり、またデバイス動作の動的挙動の時間領域に素励起コヒーレント状態が存在するため、モデル検証の手法としては有効な手段です。また、これらの結果をもとに強誘電体の量子力学的位相界面科学の学理を構築できれば、デバイス物性を素励起を用いて評価・デザインする手法が明確になるだけでなく、その他のデバイスの物理現象や生命現象、社会現象などに現れる非線形力学的なふるまい、例えばリズムやカオス、またそれらの同期、多数の要素・素子の協同現象や自発的構造形成などを構築する数理モデルに明確な物理モデルを提供することが可能になり、社会への波及効果は極めて大きいと考えられます。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Time-resolved simulation of the negative capacitance stage emerging at the ferroelectric/semiconductor hetero-junction, AIP Advance, 9 (2019) 025037
- Ferroelectric Thin Films-Basic Properties and Device Physics for Memory Applications, Topics in Applied Physics vol.98, (2005) Springer
- Second Sound in SrTiO<sub>3</sub>, Phys. Rev. Lett., 99 (2007) 265502
- Light Scattering in a Phonon Gas, Phys. Rev. B, 80 (2009) 165104
- Writing and reading of an arbitrary optical polarization state in an antiferromagnet, Nature Photonics, 9(2015) 25
- Directional control of spin wave emission by spatially shaped light, Nature Photonics, 6 (2012) 662

【研究期間と研究経費】

令和元年度～令和5年度  
156,200 千円

【ホームページ等】

<http://www.pe.osakafu-u.ac.jp/device7/>