

【基盤研究(S)】
大区分C



研究課題名 無欠陥ナノ周期構造によるフォノン場制御を用いた高移動度半導体素子

東北大学・流体科学研究所・教授
さむかわ せいじ
寒川 誠二

研究課題番号： 20H05649 研究者番号：30323108

キーワード： 中性粒子ビーム、無欠陥ナノ周期構造、フォノン場制御、フォノン散乱抑制、発熱緩和

【研究の背景・目的】

携帯端末やセンサーなどの情報通信デバイスの高性能化が進み、データ量・通信量の飛躍的な増大が起こっている。この情報爆発に対応するためには、今後も情報処理やデータストレージの大幅な高性能化・省電力化に向けた技術革新が不可欠である。特に半導体集積回路の微細化が進行する中で発熱・放熱の問題が顕著となり、低発熱・低消費エネルギーとなる新構造半導体素子が求められている。電子デバイスのさらなる高速化と発熱の抑制が可能になれば、このような要望に応えることができ、MOS トランジスタのチャネル部におけるキャリアのフォノン散乱を抑制することができれば、本質的に発熱による移動度劣化を起こさないため、2つの要望を同時に満たすことができる。

本提案では、周期的で無欠陥な半導体ナノピラーをマトリックス材料で埋め込んだ複合構造をトランジスタチャネル構造として導入することを提案する。これにより材料やナノピラーサイズ、間隔によってトランジスタチャネル領域でのキャリアのフォノン散乱を抑制し、移動度の劇的な向上と発熱の少ないトランジスタチャネル層が実現可能となる。

【研究の方法】

無欠陥ナノ構造作製技術を用いて、界面ラフネスや欠陥のない超微細サブ 10 nm 周期フォノン結晶ナノピラーを作製して良質なマトリックス材料を埋め込んだ複合材料を作製する技術を確認する。同時に、この複合材料におけるフォノン生成・輸送特性をナノメートルオーダーで検出する技術、エレクトロンおよびフォノンバンドの解析技術の確立を行う。それらを基に、フォノン場やキャリア輸送を自在に制御できる複合材料をチャネル層に採用したトラン

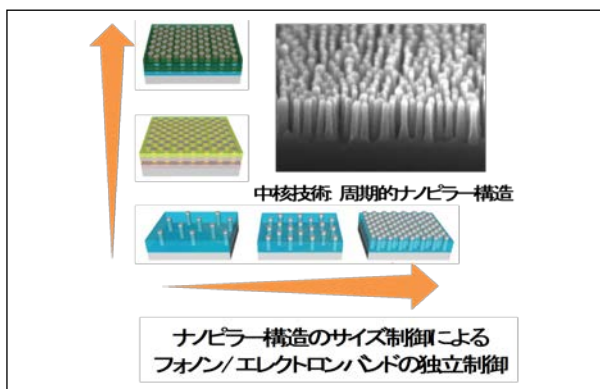


図1 中性粒子ビームによる無欠陥ナノ構造作製技術

ジスタを開発する。

【期待される成果と意義】

これまでにフォノン場制御系における電子輸送を実験的に検討した研究はないため、実験・理論からフォノンバンド・エレクトロンバンド同時制御による電子輸送制御の可能性を探求することは、学術的にも大きな意義があるとともに、新発想の電子デバイスへの可能性を探求する挑戦である。

応用では、高移動度かつ低発熱半導体素子の実現により、計算の高速化が可能になるだけでなく、あらゆる電子機器の省エネルギー化を達成できる。これらにより、エレクトロニクスの飛躍的発展だけでなく、エネルギー・環境問題解決にもつながり、大きな波及効果をもった研究成果が期待される。

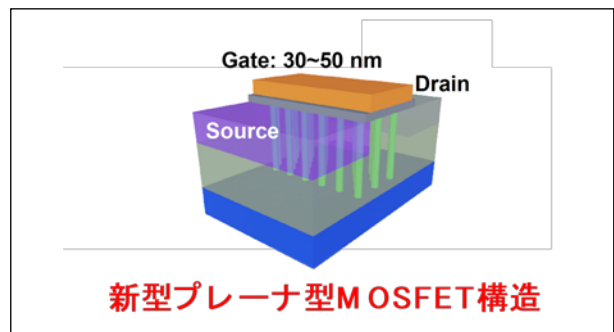


図2 目標とするナノピラー構造含有 MOSFET デバイス

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ K. Endo, S. Samukawa et. al., IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 53,1826 (2006).
- ・ A. Kikuchi, A. Yao, I. Mori, T. Ono and S. Samukawa, J. Appl. Phys. **122** (16), 165302 (2017).
- ・ X. Huang, D. Ohori, R. Yanagisawa, R. Anufriev, S. Samukawa and M. Nomura, ACS Applied Materials & Interfaces **12** (22), 25478(2020).
- ・ T. Harada, T. Aki, D. Ohori, S. Samukawa, T. Ikari and A. Fukuyama, Japanese Journal of Applied Physics 59 (SK), SKKA08 (2020).

【研究期間と研究経費】

令和2年度～6年度 150,000千円

【ホームページ等】

<http://www.ifs.tohoku.ac.jp/samukawa/japanese/index.html>



研究課題名 強磁性半導体ルネサンスによる新しいスピン機能材料とデバイスの創出

東京大学・大学院工学系研究科・教授

たなか まさあき
田中 雅明

研究課題番号: 20H05650 研究者番号: 30192636

キーワード: 強磁性半導体、スピン、ヘテロ構造、バンド構造、デバイス

【研究の背景・目的】

半導体と磁性体の異なる特長と機能を融合することができれば、磁性体の不揮発性機能を合わせ持つ高速・低消費電力の半導体デバイスを作製することができ、革新的な情報システムの実現が期待される。磁性体と半導体の特長を融合できる新物質として強磁性半導体 (Ferromagnetic Semiconductor; FMS) は最も有望な材料系である。本研究者が実績を挙げってきた(Ga,Mn)As などの Mn 系強磁性半導体のみならず、材料系を大幅に拡張し、Fe を添加した閃亜鉛鉱型 Fe 添加狭ギャップ強磁性半導体の薄膜、量子井戸・ヘテロ構造、ナノ構造を作製し、物性機能を解明・制御して、スピン機能デバイスへ応用展開する。これによってこれまでの強磁性半導体の主な問題点をすべて解決する: 1) p 型と n 型の強磁性半導体の両方を実現、2) キュリー温度を室温より上げ、室温強磁性半導体の物性と機能を制御、3) 強磁性発現機構に関する統一的理解を得る。さらに、4) 不揮発性と柔軟な情報処理機能を持つスピントランジスタ、スピン依存バンド構造を用いた量子効果デバイス、トポロジカル状態を用いた機能デバイスなど、低消費電力で動作しかつ革新的な機能デバイスの実現を目指す。

【研究の方法】

- (1) 分子線エピタキシー (MBE) 法による鉄(Fe)系および Mn 系強磁性半導体薄膜の作製
- (2) 強磁性半導体(FMS)超薄膜とヘテロ構造における物性探索と制御、量子効果の検出と制御
- (3) Fe 系および Mn 系 FMS 量子ヘテロ構造の量子化、

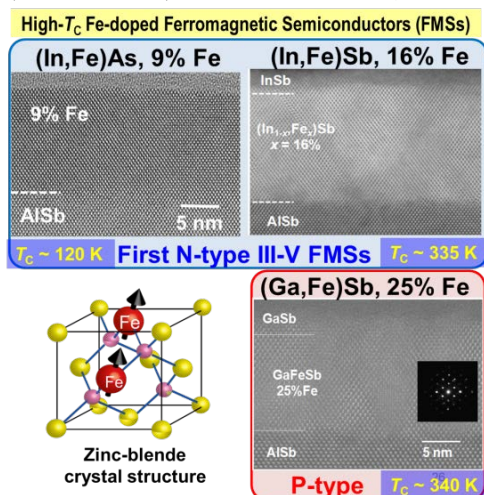


図1 高いキュリー温度(T_C)をもつ Fe 添加 III-V 族強磁性半導体(FMS)

低次元化による巨大スピン物性 (巨大磁気抵抗効果など) の創出と制御

- (4) FMS 量子井戸構造をもつ電界効果トランジスタにおける波動関数制御を用いた磁化制御技術
- (5) 上記実験と共に、理論的な理解を目指した物質設計とデバイス設計
- (6) FMS ヘテロ構造を用いた超低消費電力スピントランジスタの作製と実証

【期待される成果と意義】

本研究により、これまで長年の強磁性半導体における問題点をすべて解決する: すなわち、1) p 型と n 型の強磁性半導体を両方実現する。2) キュリー温度 T_C を室温より上げ、室温で強磁性を示す半導体を実現し、物性機能を最適化、高度化する。3) 強磁性の起源に関する統一的理解と物質設計指針を確立する。さらに 4) 不揮発性と柔軟な情報処理機能を持つスピントランジスタ、スピン依存バンド構造を用いた量子効果デバイス、トポロジカル状態を用いた機能デバイスなど、低消費電力で動作しかつ革新的な高機能デバイスを実現する。強磁性半導体を中心とする材料開発 (“強磁性半導体のルネサンス”を起こすこと) によって、将来の情報技術であるニューロモルフィック・コンピューティング (NC)、モノのインターネット化 (IoT)、人工知能 (AI) に適したデバイスの基盤技術を創ることが期待できる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- K. Takiguchi, L. D. Anh, T. Chiba, T. Koyama, D. Chiba, M. Tanaka, "Giant gate-controlled proximity magnetoresistance in semiconductor-based ferromagnetic/nonmagnetic bilayers", *Nature Physics* **15**, 1134 (2019).
- M. Jiang, H. Asahara, S. Sato, T. Kanaki, H. Yamasaki, S. Ohya, and M. Tanaka, "Efficient full spin-orbit torque switching in a single layer of a perpendicularly magnetized single-crystalline ferromagnet", *Nature Commun.* **10**, 2590 (2019).
- N. T. Tu, P. N. Hai, L. D. Anh, and M. Tanaka, "Heavily Fe-doped n-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)Sb with high Curie temperature and large magnetic anisotropy", *Appl. Phys. Express* **12**, 103004 (2019).

【研究期間と研究経費】

令和2年度-6年度 151,800千円

【ホームページ等】

<http://www.cryst.t.u-tokyo.ac.jp/>

【基盤研究(S)】 大区分C



研究課題名 医工学利用に向けた超高感度電子鼻

東京大学・大学院工学系研究科・教授

たばた ひとし
田畑 仁

研究課題番号： 20H05651 研究者番号：00263319

キーワード： 電子鼻、生体ガス、タンデム型ガスセンサ、嗅診、確率共鳴

【研究の背景・目的】

体ガスと健康状態との関係は、古くは嗅診とよばれ医師の感覚や経験に依存し、数値化・客観評価が困難なため本格的な医工学応用が未踏領域であった。

現在医療機関等では、血液やリンパ液、髄液等の生体サンプルを採取して、健康状態の確認や病気の診断を実施している。しかしこれらの生体サンプルは、採取に人体への侵襲や感染リスク、精神的な負担が伴うため、簡便で手軽な非侵襲計測の実現が喫緊の課題となっている。これに対し生体ガス(呼吸、皮膚ガス)は採取が容易で非侵襲で逐次計測が可能であり、個人のリアルタイムなヘルスコンディション、生化学・病態情報を内包している。特に皮膚ガスは(血液由来の情報を含み)無意識に常時皮膚表面から放出されているため、呼吸のように吹きかける動作も必要ない。しかし皮膚ガス計測に必要な ppb (10 億分の 1) さらには ppt (1 兆分の 1) オーダの超高感度な計測機構を有し、ウェアラブル(小型)で繰り返し計測可能な皮膚ガス計測デバイスは現存していない。

本研究では“健康状態/病態と体ガス相関における学術基盤の構築”を目指す。そのための鍵となる技術として、超高感度電子鼻の基盤技術を確立し、常時体調のモニタリングを実現するウェアラブルデバイスとして、皮膚ガスを繰り返し計測可能な小型・超高感度皮膚ガスセンサを実現することを目的としている。

【研究の方法】

本研究では、(1)機能性多孔質材料(ゼオライト)を用いて皮膚ガスを選択的に濃縮すること。(2)濃縮した皮膚ガスをナノ構造制御した半導体式ガスセンサで計測すること。この 2 つの機能を複合した複合機能(タンデム型)ガスセンサにより、1ppb(10 億分の 1)レベルの超高感度化の実現を目指す。加えてさらなる高性能化(ppt (1 兆分の 1))に向け、ガス検出部に 2 層構造(吸着層/検出層)を有する酸化物半導体コア・シェル型ナノロッドや、遺伝子改変したモザイクウイルス鑄型のバイオミネラリゼーションにより自己組織化ナノワイヤを活用する。

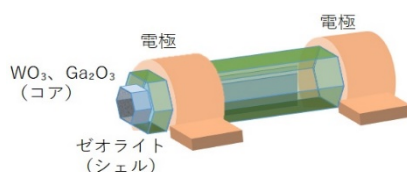


図1 コア-シェル構造ナノロッドによるガス検出

【期待される成果と意義】

複数機能の融合とナノ構造の精密制御、それにより期待される量子効果により高感度化を実現する。

従来の勘と経験から生化学的データに基づく科学的根拠により、早期発見から未病へ、高齢化社会における健康寿命延伸への鍵となる。

(1)高齢者の見守り支援、糖尿病患者・予備軍支援

食事摂取量の極端な低下、認知症患者の食事摂取状況を家族や介護者と共有することで、より適切なケアが可能となる。また糖尿病の診断や経過観察、ケトアシドーシス予防に有効。

(2)各種疾患の予防、病態管理

疾患と密接に関連する皮膚ガスとしてノナナール(肺がん)、メチルメルカプタン(大腸がん)、アセトアルデヒド(食道がん)、一酸化窒素(喘息、気道感染)、アンモニア(肝炎)、水素(腸内フローラ)等が知られている。本申請研究により開発する超高感度皮膚ガスセンサ技術は、これらの病態計測にも極めて有効であると考えられる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Y. Yamada, S. Hiyama, T. Toyooka, S. Takeuchi, K. Itabashi, T. Okubo and H. Tabata, Ultratrace Measurement of Acetone from Skin Using Zeolite: Toward Development of a Wearable Monitor of Fat Metabolism, Anal. Chem., 87(15), 7588-7594 (2015)
- Y. Yamada, S. Hiyama, H. Tabata, Studies on semiconducting gas sensors with WO₃ nanoparticles for skin-emitted acetone detection, IEICE Technical report, 117(101), 9-13 (2017)
- 田畑 仁、生体ゆらぎ物性とエレクトロニクスとの融合、応用物理、86(1)、12-24 (2017)

【研究期間と研究経費】

令和2年度-6年度 151,200千円

【ホームページ等】

<http://www.bioxide.t.u-tokyo.ac.jp/>
tabata@bioeng.t.u-tokyo.ac.jp

【基盤研究(S)】
大区分C



研究課題名 磁性ナノ粒子のダイナミクス解明が拓く革新的診断治療技術

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授
たけむら やすし
竹村 泰司

研究課題番号： 20H05652 研究者番号：30251763

キーワード： 磁性ナノ粒子、磁化ダイナミクス、磁気粒子イメージング、がん温熱治療

【研究の背景・目的】

疾病の早期発見や、患者負担を軽減する治療を実現するための新しい医療技術の開発が常に求められている。本研究では、磁性ナノ粒子を用いる新しい診断治療技術に着目した。

腫瘍等に選択的に集積させた磁性ナノ粒子に体外から交流磁界を印加すると、磁性ナノ粒子自身や、そのなかの磁化が磁界に追従するべく回転する(図1)。この磁性ナノ粒子の応答を体外に設置したコイルへの誘導起電力として検出することが可能である。検出信号を画像化することにより腫瘍等の検出と画像診断を行うのが磁気粒子イメージングである。また、高い周波数の交流磁界を印加すると磁性ナノ粒子が発熱する。この発熱は、がんの温熱治療(ハイパーサーミア)に利用することができる。

交流磁界に対する磁性ナノ粒子の磁化の応答(ダイナミクス)を解明し、実用レベルの新しい診断治療技術を確認することが本研究の目的である。

【研究の方法】

磁性ナノ粒子の2種類の応答(図2)は、交流磁界の周波数などに対する性質が大きく異なる。本研究において開発する計測システムを使用して、この2つの応答を高精度に測定し、磁化ダイナミクスを解明する。磁性ナノ粒子の粒径には分布があり、詳細な測定評価を妨げる要因になっている。磁気分離により特定の粒径群を抽出した磁気分画粒子を使用するこ

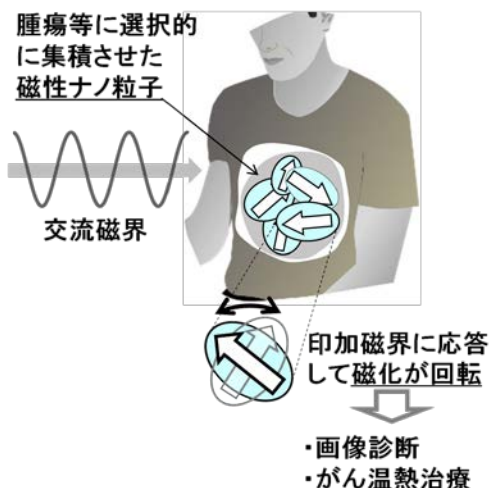


図1 磁性ナノ粒子による画像診断とがん温熱治療

磁化ダイナミクス～粒子回転+磁化回転
=印加磁界に対する磁性ナノ粒子の応答

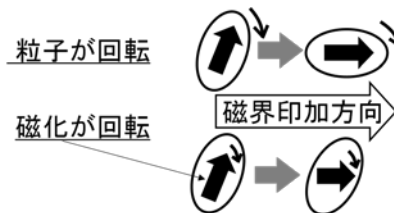


図2 磁性ナノ粒子の応答(磁化ダイナミクス)

と、磁性ナノ粒子の方向をそろえる容易軸配向試料を作製するという独自の手法により解決する。

磁化ダイナミクスの解明により、磁性ナノ粒子の磁気信号及び発熱量が極大となる磁界条件を実験・理論の両面から明らかにする。

【期待される成果と意義】

本研究により、磁性ナノ粒子の画像診断における検出感度及び温熱治療における発熱量を向上させることが期待される。磁気粒子イメージングでは、実用で求められる画像分解能1mmを実現する。またがん温熱治療では、人体サイズのコイルで発生可能なレベルまで磁界強度・周波数を低減させる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ Satoshi Ota, Yasushi Takemura, "Characterization of Neel and Brownian relaxations isolated from complex dynamics influenced by dipole interactions in magnetic nanoparticles", The Journal of Physical Chemistry C, Vol. 123, No. 47, pp. 28859-28866, 2019.
- ・ Suko Bagus Trisnanto, Yasushi Takemura, "Modulating relaxation responses of magnetic nanotracers for submillimeter imaging", Applied Physics Letters, Volume 115, Issue 12, 123101, 2019.

【研究期間と研究経費】

令和2年度～6年度 151,200千円

【ホームページ等】

<http://www.takemura.ynu.ac.jp/>

【基盤研究(S)】 大区分C



研究課題名 Anomalous 電子によるリライタブル材料強度のナノ力学

京都大学・大学院工学研究科・教授

ひらかた ひろゆき

平方 寛之

研究課題番号： 20H05653 研究者番号：40362454

キーワード： 材料強度、Anomalous 電子、ナノマイクロ材料力学、ナノ力学実験、第一原理解析

【研究の背景・目的】

材料の機械的特性や強度は材料ごとに固有のもの、すなわち素材や組織によって決まる材料定数であり、本質的には変えることができないものと信じられてきた。ところが、研究代表者らは、すべての材料機能発現の根幹である電子に着目し、本来材料が自然に持ち得る電子とは異なる余剰な電子／ホール（Anomalous 電子）を意図的かつ強制的に注入することで、材料の本質的な強度を大きく変化させることを発見した（図1）。

本研究では、Anomalous 電子が原子間結合に干渉することで多様な材料の強度・機械的特性を書き換える根源的なメカニズムを解明して、普遍的な学理を構築することを目的とする。このため、電子量を制御した微小体積試験体への強度実験と量子論的（第一原理）解析により、Anomalous 電子による強度変化特性を解明する。さらに、その特異な電子状態を評価し、「電子応力」を抽出する独自理論により、電子的強化機構と法則を解明する。

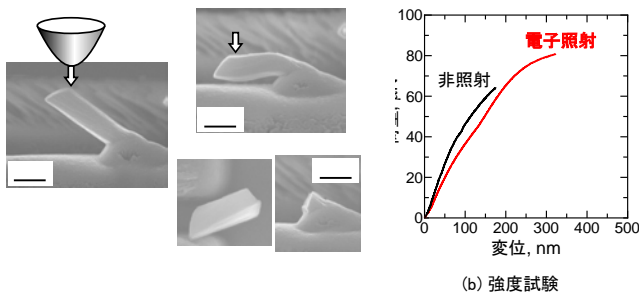


図1 電子が機械的特性に及ぼす影響

【研究の方法】

塑性変形や破壊の素過程は究極的には原子間結合の切断にある。原子間結合強度を直接反映した理想的な強度を評価するため、研究代表者らが行ってきたナノマイクロ構造体に対する強度実験を発展させて、欠陥を極力排除した微小試験体に対する強度実験方法を開発する。さらに、材料中の Anomalous 電子を制御（注入・保持・吸引）する方法を確立する。これらの方法により、電子を制御した微小試験体に対する各種強度実験を行い、材料強度に及ぼす Anomalous 電子の影響を実証・解明する。

Anomalous 電子による原子間結合状態の遷移とこれに伴う変形機構・破壊モード変化を量子力学的に解析するため、Anomalous 電子注入材の第一原理強度解析を行う。共有結合やイオン結合などの典型材料

に対する解析と個々の電子（軌道）が受け持つ応力を分解・抽出する独自理論（電子応力理論）により、Anomalous 電子による強化特性を体系化する。

実験・解析によって得た Anomalous 電子材の強度特性とその電子応力状態解析結果をもとに、強化機構を解明するとともに、Anomalous 電子材の強度に関する力学モデルを構築する。

【期待される成果と意義】

- ・究極的に微小な粒子である電子/ホールによって巨視的な材料強度を変えうる現象に着目して、この Anomalous (変則的) な現象の機構と法則を解明すること。
 - ・動的な粒子である電子をコントロールすることで、自在に材料強度を書き換えるリライタブル性を提案すること。すなわち、材料を「作る」から機能を「描く」へ材料強度設計に概念的革新をもたらす。
 - ・Anomalous 電子が材料強度に及ぼす影響を解明するための基盤評価技術、すなわち、電子/ホールの注入・評価技術、強度実験方法、電子解析技術、および電子応力理論の概念を確立すること。
 - ・Anomalous 電子の効果は力学特性にとどまらず、電気・磁気特性およびそれらのマルチフィジクス特性に及ぶため、学際的な波及効果を有すること。
- これらの実現により、Anomalous 電子による多岐に渡る材料機能設計・創出の新しい学術分野を創ることが期待できる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ Hiroyuki Hirakata, Kenta Konishi, Toshiyuki Kondo, Kohji Minoshima, Electron-beam enhanced creep deformation of amorphous silicon nano-cantilever, *Journal of Applied Physics*, Vol. **126**, 105102, 2019.
- ・ Hiroyuki Hirakata, Kyohei Sano, Takahiro Shimada, Electron-beam irradiation alters bond strength in zinc oxide single crystal, *Applied Physics Letters*, Vol. **116**, 111902, 2020.

【研究期間と研究経費】

令和2年度～6年度 154,800千円

【ホームページ等】

<http://msr.me.kyoto-u.ac.jp>

【基盤研究(S)】 大区分C



研究課題名 観測ロケットを用いた極超音速フライトテストベッド の構築と機体推進統合制御の実証

早稲田大学・理工学術院・教授

さとう てつや
佐藤 哲也

研究課題番号： 20H05654 研究者番号：80249937

キーワード： 極超音速機、飛行実験、フライトテストベッド、機体推進統合制御

【研究の背景・目的】

近年、世界的に極超音速機の研究が活発化されている中、我が国では予冷ターボジェットエンジンのシステム実証実験に成功するなど、推進系の開発という面では優位に立っている。一方、我が国には確立された飛行実験手段が存在せず、実飛行環境での機体推進統合形態での実証機会および実験データがほとんどない。

そこで、本研究では、(1)極超音速飛行環境下での機体/推進統合制御技術の実証、(2)我が国独自の自在性の高い飛行試験インフラの開発、(3)航空宇宙輸送分野の研究開発者の育成の3つを目的に掲げ、マッハ5推進風洞実験、飛行実験(HIMICO)を実施する。また、この実験の成功のため、空力、軌道、熱構造、推進に跨がる学際的テーマを数多く含む大型システムを統合する複合最適化技術、外気流との強い干渉を伴う極超音速機の熱防護技術、ロバスト性の高い燃焼器技術、計測技術などを構築する。

【研究の方法】

本研究では、システム研究としての(a)推進風洞実験、(b)飛行実験と付随する学術研究を実施する。

(a)推進風洞実験(図1は、過去に実施したマッハ4でのエンジン燃焼実験(無制御))では、機体/エンジンの相互干渉を評価する。JAXAが保有するラムジェットエンジン試験設備を用い、マッハ5フリージェット条件で実施する。今回は、より厳しい熱環境下で、機体側では操舵翼、エンジン側では可変インテーク、ノズルの形状と燃料流量を同時自動制御する。機体にかかる三分力とエンジン内部の温度、圧力を計測し、飛行実験に必要なデータを取得する。

(b)飛行実験(図2)では、地上で構築した空力、軌道、推進技術、ロバスト誘導制御則の検証として供試体を観測ロケットに搭載し、実飛行環境で機体/推進統合制御実験を行う。推進風洞実験との相違点は、飛行マッハ数、動圧、迎角が非定常的に変化する点であり、本実験により希少な飛行データを取得する。

飛行シーケンスを図2に示す。S-520観測ロケットで高度90kmまで打ち上げ、姿勢制御システム(RCS)によりロケットの姿勢を安定させる。その後、実験機を分離し、動圧が十分に大きくなり次第、空力操舵で機体を引き起こす。滑空しながら、飛行速度、動圧をほぼ一定(Mach 5, 50 kPa)に制御した後、エンジンを作動させ、統合制御を行う。風洞実験、飛行実験で得られたデータは、ロバスト性の高い複合領域最適化理論の妥当性を実証し、研究を加速させる。



図1 マッハ4推進風洞実験

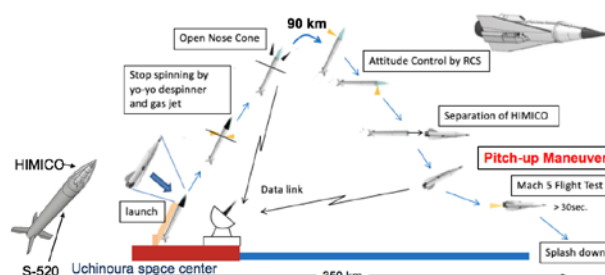


図2 極超音速統合制御実験(HIMICO)

【期待される成果と意義】

期待される成果としては、これまでにない極超音速飛行環境下で機体/エンジンの強い相互干渉を伴う飛行データを獲得することである。また、海外に頼らない自立性、自在性の高い我が国独自の飛行試験インフラを獲得することである。これらの技術は、将来のサブオービタル宇宙機等への適用という点での波及効果もある。

本研究により、我が国の航空宇宙工学分野の研究成果の創出だけでなく、世界を舞台とする熾烈な超超音速機開発競争での躍進となる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・内藤健編著, 最新・未来のエンジン, 朝倉書店, 第II部1 極超音速ターボジェットエンジン(2019).
- ・Sato, T, et al., Program of High Mach Integrated Control Experiment, "HIMICO" using S-520 Sounding Rocket, Transactions of JSASS, Aerospace Technology Japan, to be published.

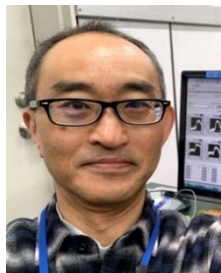
【研究期間と研究経費】

令和2年度-6年度 150,600千円

【ホームページ等】

<http://www.waseda.jp/sem-sato/himico/index.html>

【基盤研究(S)】 大区分C



研究課題名 強磁性トンネル接合素子の人工知能応用

産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・総括研究主幹
くぼた ひとし
久保田 均

研究課題番号： 20H05655 研究者番号：30261605

キーワード： 強磁性トンネル接合、人工スピナイス、ナチュラルコンピューティング

【研究の背景・目的】

現在、インターネットを通してあらゆる物がつながるIoTや画像認識、予測などで人間の能力を上回る人工知能(AI)が急速に普及し市民生活で利用され始めている。そこで行われる高度な情報処理は現在CMOS回路をベースとするノイマン型コンピュータとその上に構築されたアルゴリズムが主に担っている。このような情報処理をさらに高度化するためのアプローチの一つとして、ナチュラルコンピューティングが注目されている。ナチュラルコンピューティングは、生命・自然現象に啓発された計算技法であり、これまで分子系、化学反応系を用いた研究例がある。本研究では、強磁性トンネル接合をアレイ状に配列した人工スピナイスを作製し、ナチュラルコンピューティングに適用する。強磁性トンネル接合は、スピントロニクス分野の代表的なデバイスである磁気抵抗型ランダムアクセスメモリ(MRAM)の中核を担う素子であり、最先端の回路では直径40nm以下と非常に小さく集積性に優れている。また、情報を不揮発に保持できることから省エネルギーでもあり、高性能デバイスとして高いポテンシャルを有している。

【研究の方法】

本研究では、強磁性トンネル接合を用いて人工スピナイスを形成する。人工スピナイスとは、人工的なサブミクロンサイズの強磁性体を規則的に配列したもので、隣接する強磁性体の間には静磁気的な相互作用が働く。例えば、図1のように楕円形の磁

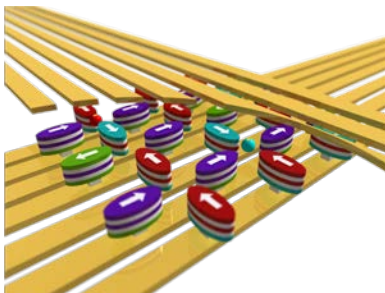


図1 強磁性トンネル接合を用いた人工スピナイス

性体が正方格子状に配列した人工スピナイスでは、磁化の方向に依存して系全体の静磁気的なエネルギーが決まる。多数の磁性体からなる配列の場合には、磁性体の磁化が2方向ある楕円の長軸方向のうちどちらを向いてもエネルギー的に不安定になる状態が生じてしまう。これをフラストレーションと呼ぶ。フ

ラストレーションが多数生じているような人工スピナイスでは、外界からの刺激(入力)に対して敏感に反応(出力)する。この反応が人間の脳内で起こる反応とよく似ているので、人工スピナイスは自然現象の力を借りて行うナチュラルコンピューティングにとって格好の材料である。このような人工スピナイスにおける磁気的な状態を理解し、計算に利用するために、本研究ではこれまで自然界にあるスピナイス結晶を対象として精力的に行われてきた物性物理研究の豊富な知見を取り入れ活用する。

【期待される成果と意義】

本研究を通して残留エントロピー、励起状態であるモノポールのダイナミクスなど人工スピナイスにおける磁性と計算性能の関係性を解明することができる。また、研究を通して得られた知見に基づき、人工スピナイスのシミュレーターを設計ツールとして公開し広く利用可能にする。これにより物性物理、物質科学、計算科学の学際領域に新たな研究領域を切り開くことができる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ ナノ磁性体の相互作用を用いたリザーバ計算、野村光、久保田 均、鈴木義茂、日本磁気学会誌まぐね vol. 14, No. 6, 321-328 (2019).
- ・ 強磁性トンネル接合を用いた集積型リザーバ計算モジュール、野村光、久保田 均、鈴木義茂、電気学会誌 Vol. 139, No. 10, 674-678 (2019).

【研究期間と研究経費】

令和2年度-6年度 154,500千円

【ホームページ等】

<https://unit.aist.go.jp/d-tech/intra/RCECT/index.html>

【基盤研究(S)】
大区分C



研究課題名 宇宙機用次世代ホールスラスト技術の検証と超高速プラズマジェット生成機構の解明

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授
ふなき いっこう
船木 一幸

研究課題番号： 20H05656 研究者番号：50311171

キーワード： 航空宇宙工学、プラズマ・核融合、宇宙機推進、ホールスラスト、ホローカソード

【研究の背景・目的】

宇宙推進研究の核心は、高速なジェットを生成して宇宙機の軌道変換能力を向上させることにある。ここで着目するホールスラストは、円環状のチャンネルに磁場と電場を印加してプラズマを生成・加速する宇宙機用推進機であり、30km/s までの排気速度を達成可能である。これは地球周辺活動には有効だが、宇宙活動を太陽系内へと拡張するには不十分である。本研究では、火星圏への往復航行や外惑星到達に求められる 40~50km/s の高い排気速度を目指し、過去に実施されたことのない高い電圧 (1~3kV) と強磁場を印加可能なスラストシステムを実験的に評価して設計最適化を図る。高電圧化することでプラズマ各粒子のエネルギーが上昇し、条件によっては乱流化して排気速度が制約される可能性がある。こうした不安定性物理を解明し、これを乗り越えることでホールスラストの新しい動作領域を開拓し、太陽系を自由に航行可能な時代を実現することを目指す。

【研究の方法】

本研究では、実験的手法により高電圧ホールスラストの排気速度と特性を評価し、排気速度 40~50km/s が可能かどうかを直接的に検証する。目標とする動作領域を従来研究との比較して図1に示した。

本研究では、初の高電圧ホールスラスト実験を行う「初期試験フェーズ」、チャンネルとカソード設計の最適化を行う「設計最適化フェーズ」、最終評価と高排気速度ホールスラストで切り拓く宇宙探査を提示する「最終評価・システム提案フェーズ」の、3ステップにて着実な進展を図る。まず初期試験フェーズでは、高排気速度動作に特化したホールスラストの実験室モデルを製作し、40km/s 以上の高い排気速

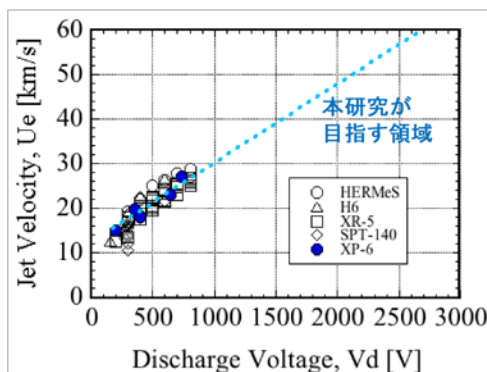


図1 本ホールスラスト研究の位置付け

度が可能であることを実験的に直接検証する。続く最適化フェーズでは、プラズマジェットの排気速度は、動作条件、チャンネル形状や、カソード形態へ依存すると予想されることから、複数の形態で比較検討しながら最適動作点と形状を探る試験を実施して設計最適化を行う。もし排気速度限界があればその物理的解釈をまとめ、推進機の損耗による寿命についても検証する。これらの結果を元に本格的なスラストの設計製作を行い、性能寿命とサブシステム全体の試作評価までを進める。

【期待される成果と意義】

化学エネルギーによらず電気エネルギーを推進剤に投入して高い排気速度を得る宇宙機推進は電気推進またはプラズマ推進と呼ばれ、小惑星探査機「はやぶさ」搭載イオンエンジンでの成功を皮切りに、世界的な広がりを見せている。その一方、イオンエンジンやその他の電気推進の限界も明らかになっており、宇宙推進の根本である「より高密度でより高速なジェットの生成と排気」に立ち返り、新しい領域を切り開く必要があると考えた。本研究は高電圧高排気ジェットの生成により、これまでに無い高い排気速度領域におけるホールスラスト動作に挑戦し、そこでのプラズマ生成と加速の物理を理解し最適化することを目指し、これら成果を基に新ホールスラストを用いた次世代太陽系探査のミッションシナリオを描く。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ I. Funaki, S. Cho, T. Sano, T. Fukatsu, Y. Tashiro, T. Shiiki, Y. Nakamura, H. Watanabe, K. Kubota, Y. Matsunaga and K. Fuchigami, Development of a 6-kW-class Hall Thruster for Geostationary and Interplanetary Missions, Acta Astronautica, 170 (2020) pp.163-171.
- ・ I. Funaki, S. Cho, T. Sano, T. Fukatsu, Y. Tashiro, T. Shiiki, Y. Nakamura, H. Watanabe, K. Kubota, Y. Matsunaga and K. Fuchigami, 1,000-hours Demonstration of a 6-kW Class Hall thruster for All-Electric Propulsion Satellite, Aerospace Technology Japan, 17 (2019) pp.589-595.

【研究期間と研究経費】

令和2年度~6年度 146,500千円

【ホームページ等】

<http://stage.tksc.jaxa.jp/asplab/funaki@isas.jaxa.jp>