

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：11301

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）

研究期間：2019～2021

課題番号：19KK0130

研究課題名（和文）磁気トンネル接合への色中心の導入と量子状態の電氣的制御

研究課題名（英文）Electrical control of spin qubit with tunnel barrier materials

研究代表者

金井 駿 (Kanai, Shun)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号：40734546

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,100,000円

研究成果の概要（和文）：量子ビットのスケーリングに大きく影響する、電氣的なスピン中心へのアクセスを将来的に達成するため、(1)磁気トンネル接合材料へのスピン中心の導入、量子状態の検出と、(2)母体材料選定手法の確立を行った。

(1)において、磁気トンネル接合として主に用いられるMgO中にNi欠陥を導入する方法を明らかにし、光学検出磁気共鳴(ODMR)を測定した。

(2)において、大規模行列計算を用いた材料探索を行い、長い位相緩和時間が予測される材料を予測した。加えて、位相緩和時間に対する母体材料物性の一般化スケーリング則を発見し、行列計算無く位相緩和時間を予測することが可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

【学術的意義】本研究の最も簡単な場合である、1電子スピン - 1核スピンの相互作用下のHahnエコーコヒーレンスの理論的研究は1950年代に端を発する。本理論における学術的目的は、「身の回りにある実用的な材料におけるスピンコヒーレンスを理論的に記述する」ことであり、半世紀を掛けてこの目標に初めてひとまず解を与えることになった。

【社会的意義】これまで行列計算を用いて、1つ当たり何日も掛けて計算してきた位相緩和時間を、関数電卓や表計算ソフトで瞬時に誰でも計算できるようになったことは、こうした計算手法が格段に「使える」ものになったことを意味している。

研究成果の概要（英文）：In order to achieve future access to electron spin centers, which have a significant impact on the scaling of qubits, we have (1) introduced spin centers into barrier materials with magnetic tunnel junction and detected its quantum states and (2) established a method for selecting host materials of spin qubit.

In (1), we clarified the way to introduce Ni defects into MgO, which is mainly used as a magnetic tunnel junction material, and measured optically detected magnetic resonance.

In (2), we performed a material investigation with a large-scale matrix calculations to predict materials with long spin coherence times. In addition, we found a generalized scaling law of spin coherence with respect to materials parameters, which enables us to predict the phase relaxation time without matrix calculations.

研究分野：量子スピントロニクス

キーワード：量子ビット スピントロニクス スピン中心 磁気トンネル接合

1. 研究開始当初の背景

量子計算の古典計算に対する優位性が提唱されて以来、量子計算機の実用化に向けた取り組みが行われている。量子ビットには、初期化・万能ゲート操作・読み出しの各機能、スケーラビリティ、低書き込みエラー(コヒーレンス時間がゲート操作時間と比較して十分に長い)が必須である。ダイヤモンド中NV中心を始めとする固体中スピン中心を用いた量子ビットは、室温でのHahnエコーのデコヒーレンス時間(T_2)が、高周波(rf)磁場による各ゲート操作時間と比較し10,000倍程度大きいことから、室温動作量子ビットを目指した研究が行われている。スピン状態は単色レーザー光により初期化・検出され、rf磁場により制御される。高品質ダイヤモンド結晶は、実験系が比較的小型であることなどから様々な物理現象を実証するプラットフォームとして積極的に利用され、PIN接合を用いたNV⁰中心のエレクトロルミネッセンス[Nature Photonics 6, 299 (2012).]や、超電導量子ビットを用いたスピンの読み出し[Nature 478, 221 (2011).]など、多様な技術的展開がなされつつある。

2. 研究の目的

こうした固体中スピン中心が持つ量子機能性は、スピン中心及び母体材料の特性により決定される。2010年に提唱された、材料選定のガイドライン[Proc. Natl. Acad. Sci. 107, 8513 (2010).]によれば、母体材料はワイドギャップであること、 T_2 が長く核スピンのスピン中心への影響が小さいことなどが必要である。実際、提唱直後の2011年に、SiCの新たな量子応用が報告された[Nature 479, 84 (2011).]。本研究では、これらの成果を得たシカゴ大学との共同研究により、新たな固体中スピン中心材料に於ける量子機能を調べるための実験・理論ツールを構築することを目的とする。

3. 研究の方法

量子ビットのスケーリングに大きく影響する、電気的なスピン中心へのアクセスを将来的に達成するため、(1)磁気トンネル接合材料へのスピン中心の導入、量子状態の検出と、(2)母体材料選定ツールの構築を行った。

母体材料選定については、最も重要かつ基本的な量子物性の一つである T_2 の予測が重要である。 T_2 は、原理的にはHahnエコーをHeisenberg方程式の時間発展にもとづいて厳密に計算可能であるが、スピン中心とその周囲の数千個程度の核スピンの相互作用がスピンダイナミクスに実質的に寄与することから、現実的な時間で厳密解を得ることは現在の技術では不可能である。近年、クラスタ相関拡張法と呼ばれる、スピン-スピンの二体相互作用に限って、 T_2 に支配的な寄与をする効果の計算を行う手法が提案され、ダイヤモンドやSiC中のスピン中心の T_2 の実験結果をよく再現することが知られている。本研究では、クラスタ相関拡張法を他の材料にも適用し、有望な固体中スピン中心母体材料を明らかにすることを目的とした。

4. 研究成果

(1)磁気トンネル接合材料へのスピン中心の導入

磁気トンネル接合として主に用いられるMgO中にNi欠陥を導入する方法を明らかにし、フォトルミネッセンス及び光学検出磁気共鳴を測定する測定系を構築した。NiはMgO中へ全率固溶するため、原子層レベルの膜厚で成膜した後、熱拡散により容易に点欠陥が得られることが分かった。特に、MgOを1100度、真空中で熱処理した際、1300 nm付近にピークを持つフォトルミネッセンス(PL)信号が観測された。加えて、励起エネルギー依存PL測定から、入射波長675 nmの際に最も大きなフォトルミネッセンス信号を持つことが分かった。これらの特徴はNi孤立スピン中心に対応する。MgO基板Niを導入後、rf磁場を印加可能なコプレーナ導波路を作製し、rf磁場及びdc磁場印加中のフ

フォトルミネッセンスから光学検出磁気共鳴(ODMR)を測定した。最適波長675 nmの入射レーザ下で円偏光を入射し、円偏光フォトルミネッセンスを検出したところ、rf磁場印加による磁場掃引スペクトルには優位な信号変化が得られなかった。MgO中のNiはd-d遷移であり、スピンのエネルギー緩和時間と比較して発光寿命が長いことが原因であると考えられる。MgO:Niのスピン緩和時間は室温では1 ms以下であることがわかった。MgO中のNi以外の欠陥による電荷余剰状態が緩和時間に寄与していること、縦緩和時間(T_1)が短いことに起因しているものと考えられる。

(2-1) クラスタ相関拡張法を用いた位相緩和時間計算ツールの構築とその材料探索への応用

クラスタ相関拡張法を用いた T_2 計算はダイヤモンドやSiCといった、スピン1/2の核種の核スピンを持つ材料に限られてきたが、本研究では画像処理ユニット(GPU)を用いた独自のHahnエコー及びRabi振動の計算コードを開発し、 T_2 計算を任意の核種へ拡張することに成功した。これは、接触項の寄与が比較的小さい、すなわちバンドギャップが大きく、深い準位のスピン中心における任意の母体材料での T_2 の予測が可能となったことを意味する。図1は本研究にて計算した、原子核が天然存在比の母体材料における材料の T_2 である。

ダイヤモンドや炭化シリコン(SiC)といった、実験報告のある材料に加え、これまでに実験報告のない機能性材料についてもその T_2 を計算した。赤点で示されたのが実験で報告された T_2 であり、青で示されたものが本計算により得られた T_2 である。実験を良く再現することがわかる。また、オレンジで示された T_2^* はRabi振動と呼ばれる現象により測定される位相緩和時間で、「量子情報をどれだけの時間操作できるか」という指標として用いられる。これらから、ダイヤモンドやSiC等、現在固体中のスピン中心として主に用いられ材料以外にも、スピンの位相緩和時間の観点からは有望な材料が存在していることがわかる。 T_2 に関する母体材料の特性に加え、様々なスピン特性、加えて、光学特性、電荷特性、材料工学上の観点からの特徴と、今後期待されるブレイクスルー等を系統的にまとめた[Nature Reviews Materials 6, 906 (2021).]。

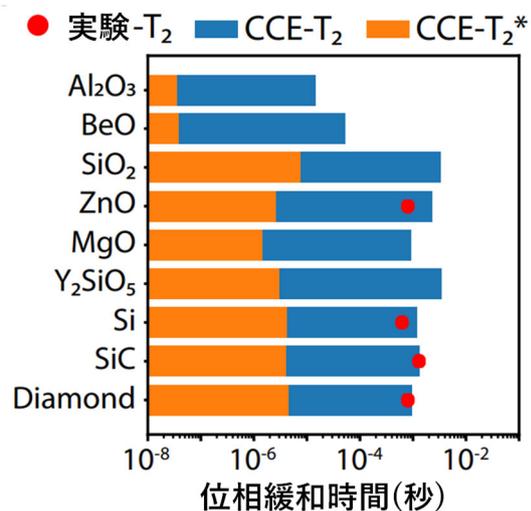


図1: スピン中心の量子ビット応用上重要な特性の一つである位相緩和時間の材料依存性。丸は実験報告値、棒グラフはクラスタ相関展開法(CCE)による理論報告値を示す。 T_2 (青、赤)はHahnエコー測定により決まる位相緩和時間(「量子情報の保持時間」)、 T_2^* (オレンジ)はRabi振動により決まる位相緩和時間(「量子情報の操作可能時間」)を示す。

(2-2) 位相緩和時間に対する一般化スケーリング則とその材料探索への応用

上記(2-1)において、これまで用いられてきたダイヤモンドやSiCと比較して、数十倍長い位相緩和時間を持つ母体材料を数種予言することに成功した。一方で、GPUを利用したクラスタ相関拡張法近似をもってしても T_2 計算には数日~数週間を要する場合がある。これを短縮する手法として、位相緩和時間の、核スピンのg因子、スピン量子数、濃度、電子スピンg因子、量子数に対するスケーリング則を調べ、これを用いることにより、位相緩和時間を代数的に記述する手法を調べた。

同種核スピン浴の T_2 のスケーリング 図2は、ある母体材料中に単一の核スピンが存在している

と仮定した場合の T_2 の計算結果である。核スピン濃度と電子スピン g 因子は同一の一定値としている。有限のスピン量子数を持つ全125種の安定核種について、図2(左)は g 因子(横軸)が大きい程相互作用が大きくなり、 T_2 が短くなる傾向を表している。図2(右)は図2(左)の横軸を g 因子 \times (スピン量子数) $^{0.66}$ としたものであり、左右の図で点数及び縦軸(T_2 値)の位置は同一であるが、図2(右)では全ての点が両対数グラフ上で一直線に載っている。従って、 $T_2 = A(g \text{ 因子} \times (\text{スピン量子数})^{0.66})^{-1.6}$ という T_2 に対する核スピンの量子数と g 因子のスケール関係が導かれる。更に、比例係数 A は図中で一定としている核スピン濃度と電子スピンの g 因子にスケールし、核スピンのスピン量子数と g 因子には依存しないことなどが明らかになり、最終的に T_2 を核スピンのスピン量子数、 g 因子、濃度及び、スピン中心の g 因子を用いた「一般化スケール則」へと拡張することに成功した。本近似は、比較的核スピン濃度が希薄な、例えばダイヤモンドや炭化シリコンのような材料について成立し、長 T_2 かつ同核種で構成される量子材料の探索に大いに役に立つことが予想される。

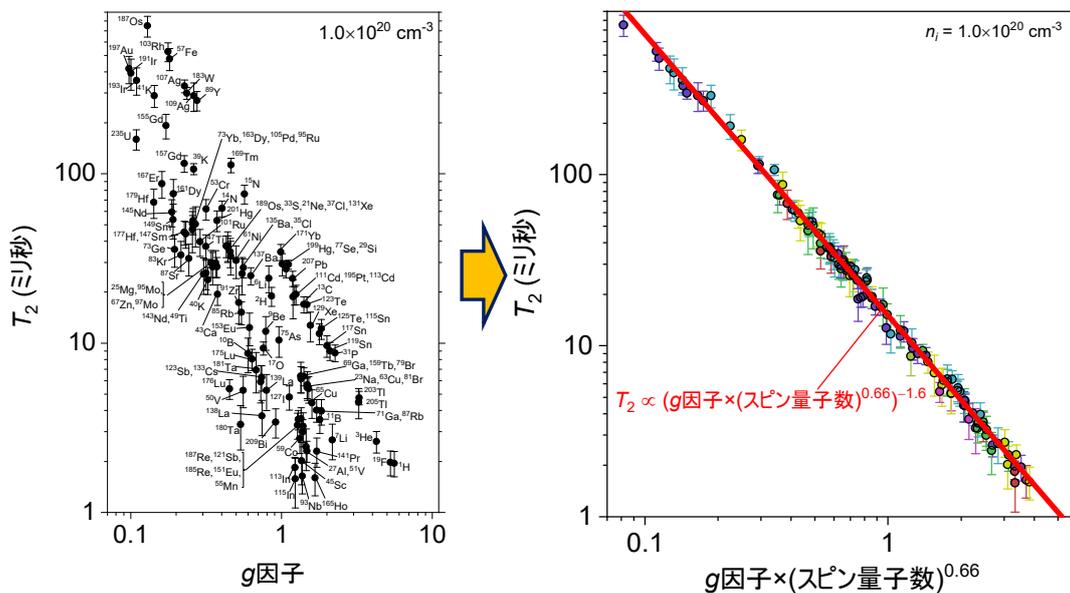


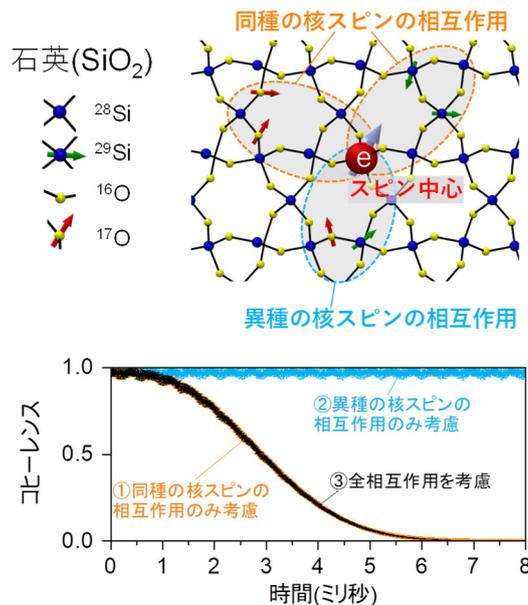
図 2 単一核種により構成される材料における T_2 のスケールリング 有限のスピン量子数を有する全 125 種の T_2 が核スピンの g 因子とスピン量子数により単一のスケール則により表現されることを表した様子。

異種核スピン浴のデカップリング 実際には、我々の身の回りにある殆どの物質は化合物であり、異なる核スピン間の相互作用を考慮する必要があるため、上で得られた「単一核種に対する一般化スケール則」を実際に材料探索へ応用するにはもう一工夫必要である。クラスタ相関展開法を用いた T_2 計算では、2つの核スピンと1つの電子スピンの相互作用を考慮した場合のスピンコヒーレンスを計算し、全ての核スピンの組み合わせについて後から適切に重ね合わせる。この際2つの核スピンが同じ種類なのか、違う種類なのかで状況が大きく異なる。下記図3(上)のように、例えば、石英(SiO_2)の場合、スピンを持つ原子核として、シリコン29 (^{29}Si)と酸素17 (^{17}O)が存在する。①同種の核スピンの相互作用(^{29}Si - ^{29}Si 及び ^{17}O - ^{17}O)のみ、②異種の核スピンの相互作用(^{29}Si - ^{17}O)のみ、③全ての相互作用 を加味した場合のコヒーレンス計算の結果を図3(下)に示す。①と③がほぼ同じ傾向であることから、デコヒーレンスには、①同種の核スピンの相互作用 が支配的な影響を及ぼしていることが分かる。Zeeman効果と磁気双極子相互作用の比較により、異なる核スピン間の相

相互作用を無視することが正当化される。

上記2つの結果を組み合わせることにより、 T_2 を大規模行列計算なしで予測する。一部の元素については同位体制御により原子核の存在比を制御することができるようになってきているが、必ずしも全ての元素に同位体制御が適用可能ではないこと、同位体制御自体が高価であることから、本研究では天然存在比の材料について検討を行った。

図3 異種核スピン浴のデカップリング (上)スピン中心周囲12,000を超える安定物質中の核スピンからの相互作用のイメージ (下)各相互作用について、 T_2 を予測した結果、加味した際の量子スピンコヒーレンス比較的最長い位相緩和時間の目安となる1ミリ秒を超える T_2 を持つと予測される材料は、800以上報告された。1つの材料を除いてはカルコゲナイドに分類され、カルコゲナイド以外の1材料は、最も長い T_2 を実験的に観測したSiCであることがわかった。[Proc. Natl. Acad. Sci. **119**, e2121808119 (2022).]



成果の意義と今後の展望

本研究で計算機実験により得られたスケーリング指数の物理的意味について、今後詳しく調べる必要がある。1電子スピン-1核スピンの相互作用下のHahnエコーコヒーレンスの理論的研究は1950年代に端を発する。本理論の究極目的は、「身の回りにある実用的な材料におけるスピンコヒーレンスを理論的に記述する」ことであり、半世紀を掛けてこの目標に初めてひとまず解を与えることになった。これまで行列計算を用いて、1つ当たり何日も掛けて計算してきた T_2 を、関数電卓や表計算ソフトで瞬時に誰でも計算できるようになったことは、こうした計算手法が格段に「使える」ものになったことを意味する。

上記計算により得られたスケーリング則は、三次元母体材料のHahnエコー信号に対するものである。今後、例えば、次元性が変わった場合(二次元系)に対するスケーリング則、dynamical decoupling、接触項による効果を明らかにすることを計画している。加えて、ここで明らかになった長い T_2 を持つトンネル絶縁体材料やピエゾ材料について、(1)にて構築したODMR測定系を用いて検討を行っており、発光緩和時間が比較的短いスピン中心において、ODMR信号が観測されており、今後こうした材料において電氣的な量子状態の制御を実験的に実証する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 S. Kanai, K. Hayakawa, H. Ohno, and S. Fukami,	4. 巻 103
2. 論文標題 Theory of relaxation time of stochastic nanomagnets	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 94423
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.094423	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Hayakawa, S. Kanai, T. Funatsu, J. Igarashi, B. Jinnai, W. A. Borders, H. Ohno, and S. Fukami,	4. 巻 126
2. 論文標題 Nanosecond Random Telegraph Noise in In-Plane Magnetic Tunnel Junctions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 117202
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.117202	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Ishibashi, S. Iihama, Y. Takeuchi, K. Furuya, S. Kanai, S. Fukami, and S. Mizukami,	4. 巻 117
2. 論文標題 All-optical probe of magnetization precession modulated by spin-orbit torque	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 122403 ~ 122403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0020852	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 H. Fulara, M. Zahedinejad, R. Khymyn, M. Dvornik, S. Fukami, S. Kanai, H. Ohno, and J. Akerman,	4. 巻 11
2. 論文標題 Giant voltage-controlled modulation of spin Hall nano-oscillator damping	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 4006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-17833-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shun Kanai, F. Joseph Heremans, Hosung Seo, Gary Wolfowicz, Christopher P. Anderson, Sean E. Sullivan, Giulia Galli, David D. Awschalom, Hideo Ohno	4. 巻 -
2. 論文標題 Generalized scaling of spin qubit coherence in over 12,000 host materials	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 2102.02986
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Gary Wolfowicz, F. Joseph Heremans, Christopher P. Anderson, Shun Kanai, Hosung Seo, Adam Galli, Giulia Galli, David D. Awschalom	4. 巻 -
2. 論文標題 Qubit guidelines for solid-state spin defects	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 2010.16395
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Gary Wolfowicz, F. Joseph Heremans, Christopher P. Anderson, Shun Kanai, Hosung Seo, Adam Galli, Giulia Galli, David D. Awschalom	4. 巻 6
2. 論文標題 Quantum guidelines for solid-state spin defects	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Reviews Materials	6. 最初と最後の頁 906-925
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41578-021-00306-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kanai Shun, Heremans F. Joseph, Seo Hosung, Wolfowicz Gary, Anderson Christopher P., Sullivan Sean E., Onizhuk Mykyta, Galli Giulia, Awschalom David D., Ohno Hideo	4. 巻 119
2. 論文標題 Generalized scaling of spin qubit coherence in over 12,000 host materials	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 e2121808119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2121808119	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Zahedinejad Mohammad, Fulara Himanshu, Khymyn Roman, Houshang Afshin, Dvornik Mykola, Fukami Shunsuke, Kanai Shun, Ohno Hideo, Akerman Johan	4. 巻 21
2. 論文標題 Memristive control of mutual spin Hall nano-oscillator synchronization for neuromorphic computing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Materials	6. 最初と最後の頁 81 ~ 87
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41563-021-01153-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Takeuchi Yutaro, Yamane Yuta, Yoon Ju-Young, Itoh Ryuichi, Jinnai Butsurin, Kanai Shun, Ieda Jun'ichi, Fukami Shunsuke, Ohno Hideo	4. 巻 20
2. 論文標題 Chiral-spin rotation of non-collinear antiferromagnet by spin-orbit torque	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Materials	6. 最初と最後の頁 1364 ~ 1370
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41563-021-01005-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kobayashi Keito, Borders William A., Kanai Shun, Hayakawa Keisuke, Ohno Hideo, Fukami Shunsuke	4. 巻 119
2. 論文標題 Sigmoidal curves of stochastic magnetic tunnel junctions with perpendicular easy axis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 132406 ~ 132406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0065919	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoon Ju-Young, Takeuchi Yutaro, DuttaGupta Samik, Yamane Yuta, Kanai Shun, Ieda Jun'ichi, Ohno Hideo, Fukami Shunsuke	4. 巻 11
2. 論文標題 Correlation of anomalous Hall effect with structural parameters and magnetic ordering in $Mn_{3-x}Sn_{x-1}$ thin films	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 065318 ~ 065318
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0043192	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計42件（うち招待講演 8件 / うち国際学会 24件）

1. 発表者名 ユン ジュヨン, 竹内 祐太郎, 伊藤 隆一, 山根 結太, 金井 駿, 深見 俊輔, 大野 英男
2. 発表標題 エピタキシャルMn-Sn合金薄膜の異常ホール効果の組成、プロセス温度依 存性
3. 学会等名 Spin-RNJ 若手オンライン研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Ishibashi, S. Iihama, Y. Takeuchi, K. Furuya, S. Kanai, S. Fukami, S. Mizukami
2. 発表標題 All-optical detection of magnetization precession frequency shift due to spin-orbit torque
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Ishibashi, S. Iihama, Y. Takeuchi, K. Furuya, S. Kanai, S. Fukami, S. Mizukami
2. 発表標題 All-optical probe of magnetization precession frequency modulated by spin-orbit torque
3. 学会等名 65th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 J.-Y. Yoon, Y. Takeuchi, Y. Yamane, S. Kanai, J. Ieda, H. Ohno, and S. Fukami
2. 発表標題 Anomalous Hall effect in Mn-Sn thin films - correlation with crystal structure
3. 学会等名 65th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石橋 一晃, 飯浜 賢志, 竹内 祐太朗, 古屋 海渡, 金井 駿, 深見 俊輔, 水上 成美
2. 発表標題 レーザー励起磁化才差ダイナミクスに及ぼす スピン軌道トルクの効果
3. 学会等名 第75回応用物理学会東北支部
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金井駿
2. 発表標題 磁気トンネル接合における磁化緩和現象
3. 学会等名 令和2年度 東 北大学 電気通信研究所 共同プロジェクト研究会 「固体中のスピン・軌道ダイ ナミクスとその制御」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Fulara, M. Zahedinejad, R. Khymyn, M. Dvornik, S. Fukami, S. Kanai, H. Ohno, and J. Akerman
2. 発表標題 Voltage-Controlled Spin Hall Nano-Oscillators For Neuromorphic Computing
3. 学会等名 The 4th International Symposium for The Core Research Cluster for Spintronics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 J.-Y. Yoon, Y. Takeuchi, Y. Yamane, S. Kanai, J. Ieda, H. Ohno, and S. Fukami
2. 発表標題 Anomalous Hall effect in Mn-Sn thin film - correlation with structural parameters and magnetic ordering
3. 学会等名 The 4th International Symposium for The Core Research Cluster for Spintronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 K. Ishibashi, S. Iihama, Y. Takeuchi, K. Furuya, S. Kanai, S. Fukami, S. Mizukami
2 . 発表標題 All-optical detection of magnetization precession frequency modulated by spin-orbit torque
3 . 学会等名 The 4th International Symposium for The Core Research Cluster for Spintronics (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 S. Kanai, Y. Nakatani, F. Matsukura, and H. Ohno
2 . 発表標題 Magnetization Dynamics under Thermal Agitation Induced by Electric-field Effect on Magnetic Anisotropy
3 . 学会等名 The 4th International Symposium for The Core Research Cluster for Spintronics (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 K. Ishibashi, S. Iihama, Y. Takeuchi, K. Furuya, S. Kanai, S. Fukami, S. Mizukami
2 . 発表標題 All-optical probe of magnetization precession frequency shift due to spin-orbit torque
3 . 学会等名 Tohoku-Lorraine Joint Conference 2021 "Spintronic" (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 S. Kanai, K. Hayakawa, T. Funatsu, W. A. Borders, J. Igarashi, B. Jinnai, H. Ohno, S. Fukami
2 . 発表標題 Relaxation time of in-plane stochastic magnetic tunnel junctions
3 . 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 T. Saino, S. Kanai, M. Shinozaki, B. Jinnai, H. Sato, S. Fukami, and H. Ohno
2 . 発表標題 "Write-error rate of nanoscale magnetic tunnel junctions in the precessional regime,"
3 . 学会等名 The 3rd Symposium for The Core Research Clusters for Materials Science and Spintronics, Sendai, Japan
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 K. Kobayashi, W.A. Borders, S. Kanai, K. Hayakawa, S. Fukami and H. Ohno
2 . 発表標題 Physical Mechanism Governing Sigmoid Curves of Stochastic Magnetic Tunnel Junctions
3 . 学会等名 INTERMAG 2021 (国際学会)
4 . 発表年 2021年 ~ 2022年

1 . 発表者名 S. Kanai, K. Hayakawa, T. Funatsu, W.A. Borders, J. Igarashi, B. Jinnai, H. Ohno and S. Fukami
2 . 発表標題 Superiority of in-Plane Easy-Axis Stochastic Nanomagnet for Shorter Relaxation Time
3 . 学会等名 INTERMAG 2021 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2021年 ~ 2022年

1 . 発表者名 S. Kanai, F. J. Heremans, H. Seo, G. Wolfowicz, C. P. Anderson, S. E. Sullivan, M. Onizhuk, G. Galli, D. D. Awschalom, and H. Ohno
2 . 発表標題 Scaling of quantum coherence in solid-state spin defects
3 . 学会等名 2021 Materials Research Society (MRS) fall meeting (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2021年 ~ 2022年

1. 発表者名 J.-Y. Yoon, Y. Takeuchi, S. DuttaGupta, Y. Yamane, S. Kanai, J. Ieda, H. Ohno, and S. Fukami
2. 発表標題 Anomalous Hall Effect of Non-collinear Antiferromagnetic Weyl Semimetal $Mn_{3+x}Sn_{1-x}$ Thin Films: Correlation with Crystalline, Magnetic, and Electronic Structures
3. 学会等名 24th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems 20th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (EP2DS-24/MSS-20) meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年 ~ 2022年

1. 発表者名 S. Kanai, F. J. Heremans, H. Seo, G. Wolfowicz, C. P. Anderson, S. E. Sullivan, M. Onizhuk, G. Galli, D. D. Awschalom, and H. Ohno
2. 発表標題 Scaling Electron Spin Coherence in Solid-state Spin Defects
3. 学会等名 24th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems 20th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (EP2DS-24/MSS-20) meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年 ~ 2022年

1. 発表者名 S. Kanai, F. J. Heremans, H. Seo, G. Wolfowicz, C. P. Anderson, S. E. Sullivan, M. Onizhuk, G. Galli, D. D. Awschalom, and H. Ohno
2. 発表標題 Scaling Spin Coherence in Solid-state Defect Qubit
3. 学会等名 American Physics Society (APS) March Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2021年 ~ 2022年

1. 発表者名 S. Kanai, K. Hayakawa, T. Funatsu, J. Igarashi, B. Jinnai, W. A. Borders, H. Ohno, and S. Fukami
2. 発表標題 Superparamagnetic Tunnel Junctions with Nanosecond Relaxation Time for Probabilistic Computing
3. 学会等名 American Physics Society (APS) March Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2021年 ~ 2022年

1 . 発表者名 K. Kishi, Y. Takeuchi, Y. Yamane, J.-Y. Yoon, R. Takechi, B. Jinnai, S Kanai, J. Ieda, H. Ohno, S. Fukami
2 . 発表標題 Effect of spin-orbit torque on non-collinear antiferromagnet Mn ₃ Sn
3 . 学会等名 The 5th Symposium for The Core Research Clusters for Materials Science and Spintronics (国際学会)
4 . 発表年 2021年 ~ 2022年

1 . 発表者名 J.-Y. Yoon, Y. Takeuchi, Y. Yamane, R. Itoh, S. DuttaGupta, B. Jinnai, S. Kanai, J. Ieda, H. Ohno, S. Fukami
2 . 発表標題 Properties and Functionalities of Non-Collinear Antiferromagnetic Mn _{3+x} Sn _{1-x} Thin Films
3 . 学会等名 The 5th Symposium for The Core Research Clusters for Materials Science and Spintronics (国際学会)
4 . 発表年 2021年 ~ 2022年

1 . 発表者名 K. Kobayashi, W. A. Borders, S. Kanai, K. Hayakawa, H. Ohno, S. Fukami
2 . 発表標題 Physical mechanism governing sigmoid curves of superparamagnetic tunnel junctions
3 . 学会等名 The 5th Symposium for The Core Research Clusters for Materials Science and Spintronics (国際学会)
4 . 発表年 2021年 ~ 2022年

1 . 発表者名 Y. Takeuchi, Y. Yamane, J.-Y. Yoon, R. Itoh, B. Jinnai, S. Kanai, J. Ieda, H. Ohno, and S. Fukami
2 . 発表標題 Chiral-spin rotation driven by spin-orbit torque in non-collinear antiferromagnetic Mn ₃ Sn
3 . 学会等名 1st Online RIEC International Workshop on Spintronics (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2021年 ~ 2022年

1 . 発表者名 J. Yoon, Y. Takeuchi, Y. Yamane, R. Itoh, B. Jinnai, S. Kanai, J. Ieda, H. Ohno, and S. Fukami
2 . 発表標題 Sputter-deposited epitaxial non-collinear antiferromagnetic Mn ₃ Sn thin films and spin-orbit torque driven chiral-spin rotation
3 . 学会等名 KAIST spintronics group seminar (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2021年 ~ 2022年

1 . 発表者名 K. Hayakawa, S. Kanai, K. Kobayashi, W.A. Borders, J. Igarashi, B. Jinnai, H. Ohno, and S. Fukami
2 . 発表標題 Determination of attempt time using stochastic magnetic tunnel junctions
3 . 学会等名 15th Joint MMM-INTERMAG Conference (国際学会)
4 . 発表年 2021年 ~ 2022年

1 . 発表者名 K. Kobayashi, K. Hayakawa, W.A. Borders, S. Kanai, J. Igarashi, H. Ohno, and S. Fukami
2 . 発表標題 Superparamagnetic tunnel junctions with a synthetic antiferromagnetic free layer
3 . 学会等名 15th Joint MMM-INTERMAG Conference (国際学会)
4 . 発表年 2021年 ~ 2022年

1 . 発表者名 K. Kishi, Y. Takeuchi, Y. Yamane, J.-Y. Yoon, R. Takechi, B. Jinnai, S. Kanai, J. Ieda, H. Ohno, and S. Fukami
2 . 発表標題 Determination of spin-orbit torque efficiency in non-collinear antiferromagnet / heavy metal heterostructures
3 . 学会等名 15th Joint MMM-INTERMAG Conference (国際学会)
4 . 発表年 2021年 ~ 2022年

1 . 発表者名 S. Kanai, K. Hayakawa, K. Kobayashi, T. Funatsu, W.A. Borders, J. Igarashi, B. Jinnai, H. Ohno, and S. Fukami
2 . 発表標題 Nanosecond Stochastic Magnetic Tunnel Junctions for Probabilistic Computing - Experiment and Theory
3 . 学会等名 15th Joint MMM-INTERMAG Conference (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2021年 ~ 2022年

1 . 発表者名 Y. Takeuchi, Y. Yamane, J.-Y. Yoon, R. Itoh, B. Jinnai, S. Kanai, J. Ieda, H. Ohno, and S. Fukami
2 . 発表標題 Chiral-spin rotation of non-collinear antiferromagnetic Mn ₃ Sn by spin-orbit torque
3 . 学会等名 15th Joint MMM-INTERMAG Conference (国際学会)
4 . 発表年 2021年 ~ 2022年

1 . 発表者名 S. Kanai, F. J. Heremans, H. Seo, G. Wolfowicz, C. P. Anderson, S. E. Sullivan, M. Onizhuk, G. Galli, D. D. Awschalom, and
2 . 発表標題 固体中のスピン中心におけるコヒーレンス時間のスケーリング
3 . 学会等名 The 82nd Japan Society of Applied Physics Autumn Meeting 2021
4 . 発表年 2021年 ~ 2022年

1 . 発表者名 Y. Takeuchi, Y. Yamane, J. Yoon, R. Itoh, B. Jinnai, S. Kanai, J. Ieda, H. Ohno, S. Fukami
2 . 発表標題 Spin-orbit torque induced chiral-spin rotation of non-collinear antiferromagnet
3 . 学会等名 The 82nd Japan Society of Applied Physics Autumn Meeting 2021
4 . 発表年 2021年 ~ 2022年

1 . 発表者名 K. Kishi, Y. Takeuchi, Y. Yamane, J. Yoon, R. Takechi, B. Jinnai, S. Kanai, J. Ieda, H. Ohno, S. Fukami
2 . 発表標題 Spin-orbit torque efficiency in non-collinear antiferromagnet / heavy metal heterostructures
3 . 学会等名 The 82nd Japan Society of Applied Physics Autumn Meeting 2021
4 . 発表年 2021年 ~ 2022年

1 . 発表者名 K. Kobayashi, W. Borders, S. Kanai, K. Hayakawa, H. Ohno, S. Fukami
2 . 発表標題 Time-averaged response of stochastic magnetic tunnel junctions to field and current
3 . 学会等名 The 82nd Japan Society of Applied Physics Autumn Meeting 2021
4 . 発表年 2021年 ~ 2022年

1 . 発表者名 K. Hayakawa, S. Kanai, K. Kobayashi, W. Borders, J. Igarashi, B. Jinnai, H. Ohno, S. Fukami
2 . 発表標題 Attempt time determined in stochastic magnetic tunnel junctions
3 . 学会等名 The 82nd Japan Society of Applied Physics Autumn Meeting 2021
4 . 発表年 2021年 ~ 2022年

1 . 発表者名 K. Kobayashi, K. Hayakawa, W. Borders, S. Kanai, J. Igarashi, H. Ohno, S. Fukami
2 . 発表標題 Stochastic magnetic tunnel junctions with a synthetic antiferromagnetic free layer
3 . 学会等名 The 82nd Japan Society of Applied Physics Autumn Meeting 2021
4 . 発表年 2021年 ~ 2022年

1 . 発表者名 T. Uchimura, Y. Sato, Y. Takeuchi, Y. Yamane, J.-Y. Yoon, R. Takechi, K. Kishi, S. Kanai, H. Ohno, and S. Fukami
2 . 発表標題 Anomalous Hall effect and magneto-optical Kerr effect in non-collinear antiferromagnetic Mn ₃ Sn thin films
3 . 学会等名 40th Electronic Materials Symposium EMS-40
4 . 発表年 2021年 ~ 2022年

1 . 発表者名 K. Kishi, Y. Takeuchi, Y. Yamane, J.-Y. Yoon, R. Takechi, B. Jinnai, S. Kanai, J. Ieda, H. Ohno, and S. Fukami
2 . 発表標題 Spin-orbit torque efficiency in non-collinear antiferromagnet Mn ₃ Sn /heavy metal heterostructures
3 . 学会等名 40th Electronic Materials Symposium EMS-40
4 . 発表年 2021年 ~ 2022年

1 . 発表者名 K. Kobayashi, W.A. Borders, S. Kanai, K. Hayakawa, H. Ohno, and S. Fukami
2 . 発表標題 Time-averaged response of superparamagnetic tunnel junctions to magnetic field and current
3 . 学会等名 40th Electronic Materials Symposium EMS-40
4 . 発表年 2021年 ~ 2022年

1 . 発表者名 S. Chiba, S. Kanai, J. Ishihara, Y. Abe, K. Hatakeyama, S. Fukami, and H. Ohno
2 . 発表標題 Optical properties of Y ₃ Al ₅ O ₁₂ :Ce ³⁺ -annealing and implantation dose density dependence
3 . 学会等名 40th Electronic Materials Symposium EMS-40
4 . 発表年 2021年 ~ 2022年

1. 発表者名 金井駿
2. 発表標題 スピントランスファトルク下に於ける磁気エネルギー障壁の実験的決定
3. 学会等名 令和3年度 東北大学 電気通信研究所 共同プロジェクト研究会 「固体中のスピン・軌道ダイナミクスとその制御」(招待講演)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 T. Uchimura, J.-Y. Yoon, Y. Sato, Y. Takeuchi, S. Kanai, R. Takechi, K. Kishi, Y. Yamane, S. DuttaGupta, J. Ieda, H. Ohno, and S. Fukami
2. 発表標題 Observation of non-collinear antiferromagnetic domain structure in epitaxial Mn ₃ Sn thin films
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年～2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東北大学深見研究室 http://www.spin.riec.tohoku.ac.jp
--

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	石原 淳 (Ishihara Jun) (50801156)	東京理科大学・理学部第一部応用物理学科・講師 (32660)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	シカゴ大学	アルゴンヌ国立研究所		
スウェーデン	ヨーテボリ大学			