

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02178

研究課題名(和文) 強磁性体ナノウィンドウによる色中心スピン対のもつれ制御

研究課題名(英文) Control of the quantum spin entanglement with ferromagnetic nanowindow

研究代表者

金井 駿 (Kanai, Shun)

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号：40734546

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：多量子ビットでユニバーサルゲートセットを構成するため、各ビットの(Pauliゲート)操作、及びビット同士の相互作用を介した制御NOT(またはSWAP)操作を両立する必要がある。のためには何らかの手法で量子ビット同士に相互作用をもたらす必要があり、ここでは近接させた量子ビット同士の電磁気的相互作用によるもつれの実現方法を明らかにした。磁性体ナノ構造を近接させることにより、近接スピン中心同士へのRF磁場がユニバーサルゲートセットを構成可能であること、また、対称性の高い母体結晶、スピン中心の組み合わせにおいてもゲートセットを構成可能であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、スピン中心を用いた量子ビットの大規模化に必要となる、近接スピン中心の構成方法を調べました。ここで可能性が広がった母体材料やスピン中心材料を用いることにより、多量子ビットを実現する固体中のスピン中心の機能性を大きく広げることが予測されます。したがって、本研究の成果は、量子ビット、特に固体中のスピン中心を用いた情報処理研究の基盤技術となることが期待されます。

研究成果の概要(英文)：To construct a universal gate set in multiple qubits, it is necessary to achieve both (1) (Pauli gate) operation of each bit and (2) controlled-NOT (or SWAP) operation via bit-to-bit interaction. To earn (2), it is necessary to bring about interaction between qubits by some method, and here we investigate how to realize entanglement through electromagnetic interaction between qubits placed close to each other.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピントロニクス 量子ビット 固体中スピン中心 スピンコヒーレンス 位相緩和時間 磁性体

## 1. 研究開始当初の背景

量子計算の古典計算に対する超越性"quantum supremacy"が提唱されて以来、汎用量子計算機の実現に向けた取り組みが行われてきた。超電導量子ビットを用いた量子ゲート方式で約70量子ビットが実証され、量子計算の超越性も実験実証された。量子ゲート方式に於いて量子ビットは初期化・万能ゲート操作・読み出し機能を備える必要があり、量子緩和時間に対しゲート操作時間の比が短い程信頼性が向上する。複数提案されている量子ビット系の中で、色中心スピンを用いた固体量子ビット、特にダイヤモンドNV中心は室温での量子緩和時間が高周波磁場による量子状態の操作時間と比較し3-4桁大きいことから、室温動作固体量子ビットを実現すべく研究が行われている。近接したNV中心対の磁気双極子相互作用を介した2量子ビットの操作・検出、窒素や炭素の核スピンの超微細相互作用を介した複数量子ビットなどが室温で実証され、色中心スピン対を用いた多量子ビットに於いてもビット数増大に向けた研究が着実に進められてきた。

## 2. 研究の目的

多量子ビットでユニバーサルゲートセットを構成するため、①各ビットの(Pauliゲート)操作、及び②ビット同士の相互作用を介した制御NOT(またはSWAP)操作を両立する必要がある。②のためには何らかの手法で量子ビット同士に相互作用をもたらす必要があり、ここでは近接させた量子ビット同士の電磁氣的相互作用によるもつれの実現方法を調べる。

## 3. 研究の方法

(1)ユニバーサルゲートセット構成に向けたもつれ状態実現のためのスピン中心の条件と、(2)母体材料の選定方法を詳細に調べた。特に、スピンスピン相互作用の効果を考えることにより、例えば、ダイヤモンドNV中心におけるNV中心同士の近接の条件、もつれ数の限界を明らかにする。

## 4. 研究成果

### (1) 多量子ビットのユニバーサルゲートセット構成に向けたもつれ状態を実現するためのスピン中心の導入方法

NV中心の場合、①Pauliゲート操作は、N-V軸方向(量子化軸方向)に印加した外部磁場によりNV中心の各準位のエネルギー差を制御し、エネルギー差に対応する周波数のrf磁場によりコヒーレンス(~状態間遷移)を制御する。個別ビットの操作にはエネルギー準位の差、即ち磁気共鳴周波数が各NV中心同士で異なる必要がある(図1)。②:NV中心間の磁気双極子相互作用を利用して制御NOT操作を実現する場合、ダイヤモンドNV中心の室温でのHahnエコの量子緩和時間である、 $T_2 \sim 1$  ms以下で制御性良く操作するためのダイポール相互作用を計算した。スピン中心のg因子を2とし、ダイポールダイポール相互作用から計算した相互作用の大きさから、数nmの距離にNV中心を近接させる必要があることがわかる(図2)。更に、多量子ビットは①②2つの制約を同時に満たす必要が

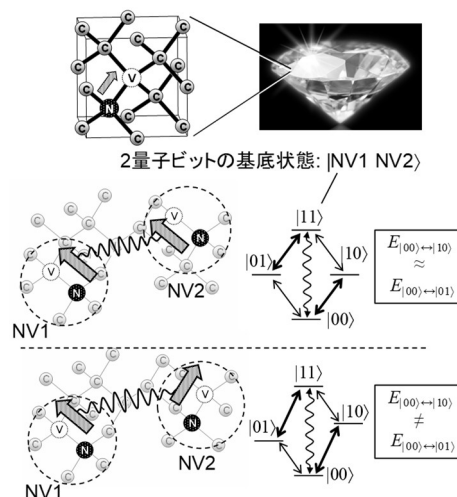


図 1: 近接ダイヤモンド窒素-空孔(NV)中心対を用いたもつれの生成と、その2量子ビット準位の模式図。2つのN-V軸(大きな矢印)方向が異なる場合(下段)、磁場による個別のビット制御(例えばNV1のみのNOT操作:太矢印)が可能。

あるが、図1中段の通り、量子化軸が平行な近接NV中心対に一樣磁場を印加した場合、各ビットの磁気共鳴周波数が殆ど同一であり個別のPauliゲート操作が不可能であることから、万能ゲートを構成できないことがわかる。実際、実証された近接NV中心対による2量子ビットの形成とその万能制御は、量子化軸(N-V軸)方向が異なる2組のNV中心対を用いることで、同じ外部磁場下で異なる磁気共鳴周波数を持たせ、この課題を解決している(図1下段)。しかし、単結晶ダイヤモンド結晶中のN-V軸が取りうる方向は4方位のみであり、単に近接NV中心の数を増やすだけでは5量子ビット以上へは拡張不可能であると考えられる。量子ビットの大規模化上のこの課題に対する有効な解決策は示されていない。

また、色中心をイオン注入で作成する場合、形成される色中心の膜厚方向の分布が大きく、結合したNV中心対の生成確率が低いという作製上の課題がある。イオン注入より膜厚方向の分布制御が容易と思われる色中心の形成手法、例えば酸化物中への元素のデルタドープと成膜後熱処理による色中心の形成等の手法が考えられるが、置換型の色中心の多くはダイヤモンドNV中心より対称性が高く、量子化軸方向が揃っていることから、色中心同士を近接させ、もつれ状態を実現した場合でも、上記制御上の理由からNV中心よりも更にもつれ状態の万能制御が困難である。

室温でNV中心は1 MHz程度の磁気共鳴周波数の半値幅を持ち、各ビットの制御には局所磁場が1 mT程度異なる必要がある。図3は、直径60 nmの強磁性体のウィンドウ下にNV中心対を配置した際の、磁場分布である。NV中心対にその位置に応じ約12 MHz/nmの勾配磁場が印加されることがわかる。従って、近接色中心の共鳴周波数に十分な差が生じ、個別ビットの操作が実現することが可能であることが計算された。

実際に図3の素子を用いてレーザーにより各ビットの磁気量子数 $m_s$ を0(状態 $|00\rangle$ )に初期化後、外部磁場とrf磁場を印加した際の各状態の計算結果を図4に示す。各ビットのPauliゲート操作とビット間(SWAP) $^{1/2}$ 操作(制御NOT操作を構成可能)より万能ゲート操作を構成し、もつれ状態(各Bell状態 $|\Psi^\pm\rangle = [|00\rangle \pm |11\rangle]/2^{1/2}$ ,  $|\Phi^\pm\rangle = [|01\rangle \pm |10\rangle]/2^{1/2}$ )を生成した。室温での量子緩和時間より100倍短い時間で(SWAP) $^{1/2}$ を含む各操作が終了、即ち1%オーダーの誤差率で2量子ビットの万能ゲート操作が実現されることが計算された。

## (2)母体材料の選定

### ①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(1)の内容は、量子化軸が揃ったスピン中心、例えば、ダイヤモンドよりも対称性の高い母体

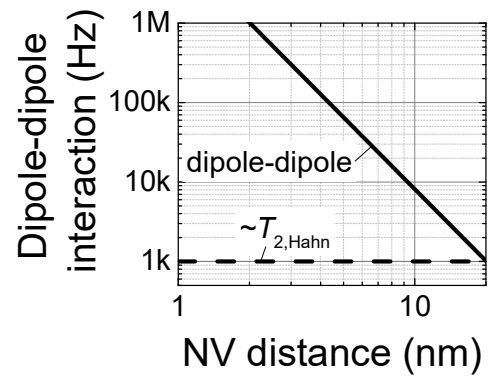


図 2:磁気双極子相互作用の NV 中心間距離依存性と、もつれ制御の誤差確率。

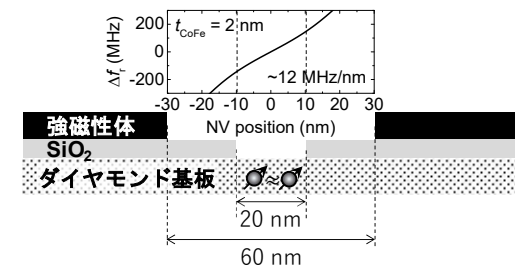


図 3:本研究で用いる素子の断面構造と、膜面平行方向へ磁化した強磁性体から生じる勾配磁場による共鳴周波数の NV 中心形成位置依存性。

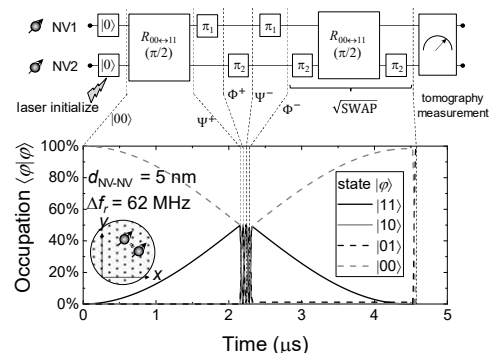


図 4: 図 3 の 2 量子ビット素子の状態制御計算。

中の近接スピン中心におけるビットの大規模化が可能であることを示しており、結晶の対称性を無視して材料選定を行って良いことを示している。一方で、忠実度の高いユニバーサルゲート計算には、相変わらず長 $T_2$ が必須である。

近年、GPUを利用したクラスタ展開法近似により、 $T_2$ 計算を理論的に実行可能となった。一方で、その各材料について $T_2$ 計算が数日～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。

### ②同種核スピン浴の $T_2$ のスケーリング

図5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5(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5(右)は図5(左)の横軸をg因子×(スピン量子数)<sup>0.66</sup>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5(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因子のスケーリング関係が導かれる。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「一般化スケーリング則」へと展開

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。

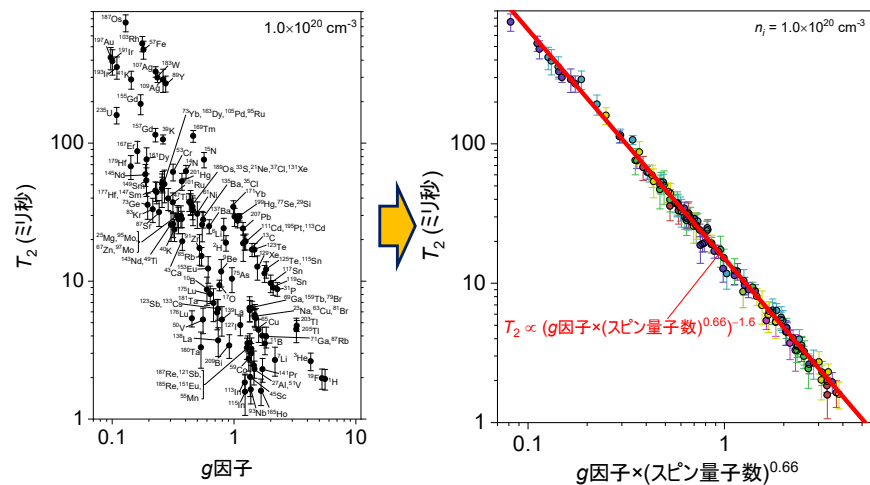


図5 単一核種により構成される材料における $T_2$ のスケーリング 有限のスピン量子数を有する全125種の $T_2$ が核スピンのg因子とスピン量子数により単一のスケール則により表現されることを表した様子。

### ③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リング則」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つの核スピンの種類が同じ種類なのか、違う種類なのかで状況が大きく異なる。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明らかになった。

#### ④長 $T_2$ を持つ材料の予測

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

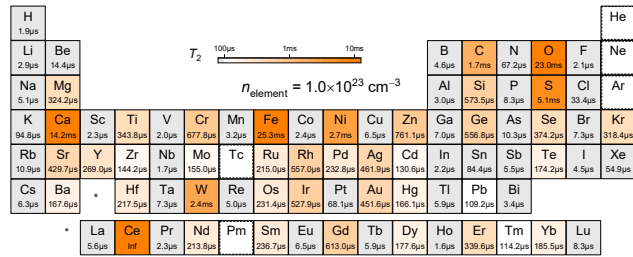


図7 周期表 各元素に対する $T_2$ で色付けした周期表。

は天然存在比の材料について検討を行った。まず、 $1.0 \times 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ を仮定し、各単体元素について $T_2$ を計算した。単体材料は必ずしもワイドギャップ材料ではなく、また固体ではないものもあるが、どの材料を用いると $T_2$ を長くすることができるのか？という目安になる。上記のスケール関係 $T_{2,i} = 1.5 \times 10^{18} |g_i|^{-1.6} I_i^{-1.1} n_i^{-1.0}$ から、スピン量子数が0ではない核スピンの含有量だけでなく、核スピンのg因子やそのスピン量子数の方が $T_2$ に大きな影響を与える事がわかり、実際、図7に示す通り、天然存在比での非零核スピンの濃度以外の因子も大きく影響することがわかる。

加えて、材料データベース上の安定でバンドギャップが1 eVを超える12,000を超える安定物質について、 $T_2$

#	Material	$T_2$ (ms)	#	Material	$T_2$ (ms)
1	CaO <sub>2</sub>	47	13	Ca <sub>2</sub> NiWO <sub>6</sub>	19
2	FeO	36	14	S	19
3	CaO	34	15	CaWO <sub>4</sub>	18
4	CaSO <sub>4</sub>	29	16	CSi <sub>4</sub>	18
5	Ce(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	29	17	Fe <sub>2</sub> NiO <sub>4</sub>	18
6	SO <sub>2</sub>	29	18	SiO	17
7	FeSO <sub>4</sub>	28	19	FeWO <sub>4</sub>	16
8	CaS <sub>2</sub> O <sub>10</sub>	28	20	NiSO <sub>4</sub>	15
9	Ca <sub>3</sub> WO <sub>6</sub>	27	21	WO <sub>3</sub>	13
10	WS <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	25	22	NiWO <sub>4</sub>	12
11	Ca <sub>2</sub> FeWO <sub>6</sub>	24	23	WS <sub>2</sub>	11
12	CaS	23	24	Sr <sub>2</sub> Si(Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ) <sub>4</sub>	11

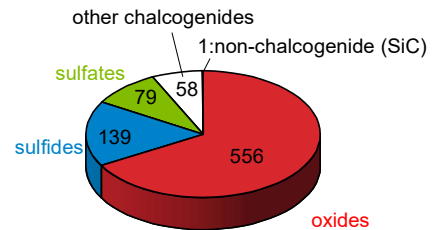


図8 予測された材料 (左) $T_2 > 10 \text{ ms}$ が予測された材料の一覧。(右) $T_2 > 1 \text{ ms}$ が予測された材料の種類。

これは、従来最大

で数週間を要していた $T_2$ 予測計算を上記(B)単体材料に対する $T_2$ のスケール関係と(C)化合物に対するその結合を代数的に行うことが可能になった本成果により初めて可能になった。図8に示す通り、比較的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が、800以上見つかった。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。そのうち6割が酸化物であり、酸化物中のスピン中心研究についての重要な示唆が得られた。

#### 成果の意義と今後の展望

(1)スピン中心を用いた量子ビットの大規模化に必要な、近接スピン中心の構成方法を調べ、それにより可能性が広がった(2)母体材料の選定に重要な物性である、位相緩和時間を代数的に求める方法とそれを用いた有望な材料群を明らかにした。本研究により明らかになった、磁性体ナノウィンドウ構造を長い $T_2$ を持つトンネル絶縁体材料やピエゾ材料上に作製し、実験的に検討を行っている。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気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13件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 6件）

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 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 <sub>3</sub> xSn <sub>1-x</sub> 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 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 -



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 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 S. Kanai, F. J. Heremans, H. Seo, G. Wolfowicz, C. P. Anderson, S. E. Sullivan, G. Galli, D. D. Awschalom, H. 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 G. Wolfowicz, F. J. Heremans, C. P. Anderson, S. Kanai, H. Seo, A. Gali, G. Galli, and D. D. Awschalom,	4. 巻 -
2. 論文標題 Qubit guidelines for solid-state spin defects	5. 発行年 2021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 G. Wolfowicz, F. J. Heremans, C. P. Anderson, S. Kanai, H. Seo, A. Gali, G. Galli, and D. D. Awschalom,	4. 巻 -
2. 論文標題 Qubit 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 accepted
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 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 M. Zahedinejad, H. Fulara, R. Khymyn, A. Houshang, S. Fukami, S. Kanai, H. Ohno, J.Akerman	4. 巻 -
2. 論文標題 Memristive control of mutual SHNO synchronization for neuromorphic computing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 2009.06594
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

[学会発表] 計41件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 22件)

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 <sub>3</sub> 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 <sub>3+x</sub> Sn <sub>1-x</sub> 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 <sub>3</sub> 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 <sub>3</sub> 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 <sub>3</sub> 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 H. Ohno
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 <sub>3</sub> 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 <sub>3</sub> 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 <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> :Ce <sup>3+</sup> -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 <sub>3</sub> 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

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)
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)
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 レーザー励起磁化オ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 ( 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

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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

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	アルゴンヌ研究所	NIST