

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K19023

研究課題名（和文）スピン流の力学的検出法の開発

研究課題名（英文）Development of dynamic detection method for spin current

研究代表者

阿部 真之（ABE, MASAYUKI）

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：00362666

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：スピンドバイスの課題の一つとして、スピン流発生部とスピン流検出部との間に存在するコンタミネーションによって、大幅にスピン流の検出効率が下がることがわかっている。本研究ではこの問題を逆手にとった実験手法として、コンタミネーションの代わりに測定試料をスピンドバイス近傍に配置させたカンチレバーに取り付け、スピン流を検出することを目的とした。具体的には、超高分解能原子間力顕微鏡とスピンドバイスの技術を融合させ、スピンドバイスを改良したスピン流発生源近傍にスピン流と反応する試料が取り付けられているカンチレバーを配置させ、スピン流との相互作用によって生じたカンチレバーの応答を高感度に測定する手法を考案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピン流は本質的に省エネルギーの情報輸送キャリアとなることが期待されており、新たな素子機能の発現や超省エネルギー電子技術への期待が大きい。スピン流を使った技術のコアは、スピン流を生成・制御・測定であるが、十分な検出感度が得られれば、スピンドバイス研究への貢献は大きいことは明らかである。さらに、近年議論がなされている鳥類の地磁気感知のような量子生命関係の基礎実験へと発展させることが可能である。他の応用としては、極低温においてスピン系と力学系（カンチレバー）を結合させたマクロな量子系の実験に発展できる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：It is known that one of the problems of the spin device is that the contamination existing between the generator and detector of the spin current often reduces the spin current detection efficiency. In this study, as an experimental method that takes this problem into consideration, we aimed to detect the spin current by attaching the measurement sample to a cantilever arranged near the spin device instead of the contamination. Specifically, by combining the technologies of high resolution atomic force microscope and spin device, a cantilever with a sample that reacts with the spin current is placed near the spin current source with improved spin device. We devised a method to measure the response of the cantilever caused by the interaction of the with high sensitivity.

研究分野：走査型プローブ顕微鏡、スピンドバイス

キーワード：スピンドバイス 原子間力顕微鏡 カンチレバー スピン流

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

スピンドバイスで解決すべき課題の一つとして、コンタミネーションによるスピン流の散乱の問題がある。スピントロニクスにおけるデバイス(スピンドバイス)は、強磁性スピン膜の電極と電流源からなるスピン流生成部と検出部からなる。スピン流の検出は、漏れ出したスピン流が生じているデバイスに磁場を印加し、生じた電位差を捉えることで行っている。スピンドバイスの課題の一つとして、スピン流発生部とスピン流検出部との間に存在する付着物(コンタミネーション)によって、大幅にスピン流の検出効率が下がることがわかっている。これはスピンとコンタミネーションが相互作用していることを意味している。コンタミネーションが磁性を持つ場合には、その影響が非常に大きく、スピン流検出への影響は非常に大きい。一方、この現象が起きる原因は、スピン軌道相互作用によって説明できると考えられており、非磁性であっても、さらに磁場を印加していない環境であってもスピン流との相互作用がある。スピン流は本質的に省エネルギーの情報輸送キャリアとなることが期待されており、新たな素子機能の発現や超省エネルギー電子技術への期待が大きい。スピン流を使った技術のコアは、スピン流を生成・制御・測定であるが、十分な検出感度が得られれば、スピンドバイス研究への貢献は大きいことは明らかである。さらに、近年議論がなされている鳥類の地磁気感知のような量子生命関係の基礎実験へと発展させることは可能であると考えている。他の応用としては、極低温においてスピン系と力学系(カンチレバー)が結合したマクロな量子系の実験に発展できる可能性がある。

そこで、カンチレバーにスピン流を吸収する材料を付着させ、スピンドバイス近傍に配置させることができれば、スピン流を力に変換して検出できると考えた。

類似の研究として、磁気共鳴を利用したスピンの検出方法がある[D. Rugar et al. Nature 430, 329 (2004)]。これは試料内部の単一スピンを、磁性体に取り付けられたカンチレバーとの相互作用として力学的に捉える。この方法では磁気共鳴を利用しているため、外部磁場が必要である(一般的に、スピンドバイスでスピン流を検出するにも外部磁場が必要である)。一方、本提案で開発する実験装置の構成では、スピン流と物質との相互作用を検出するため、外部磁場を必要としないところが特徴的である。したがって装置の小型化が可能であり、装置剛性を上げて外乱に強い測定系を実現できるだけでなく、上述した様々な分野への実験への発展の可能性もある。

### 2. 研究の目的

スピンドバイスの課題の一つとして、スピン流発生部とスピン流検出部との間に存在する付着物(コンタミネーション)によって、大幅にスピン流の検出効率が下がることがわかっている。これはスピンとコンタミネーションが相互作用していることを意味している。本研究ではこの問題点を逆手にとった実験手法として、コンタミネーションの代わりに測定試料をスピンドバイス近傍に配置させたカンチレバーに取り付け、スピン流を検出することを目的とする。具体的には、超高分解能原子間力顕微鏡とスピンドバイスの技術を融合させ、スピン流を力学的に検出する手法を開発する。スピンドバイスを改良したスピン流発生源近傍に、スピン流と反応する試料を取り付けてあるカンチレバーを配置させ、スピン流との相互作用によって生じたカンチレバーの応答を高感度に測定する。

### 3. 研究の方法

スピン流を効率良く力学的応答に変換する必要があるため、装置構成に対応するカンチレバーの開発が不可欠である。力検出感度を高めるために、スピン流検出用の微小でバネ定数が小さいカンチレバーと力検出系を開発する。次に、高効率のスピン発生源と原子間力顕微鏡の技術を応用したスピン流検出装置を設計・試作する。極低温環境下や液中環境下でも利用できるように小型化を目指す。可能ならば、ハーフメタルスピン制御手法を駆使して、スピン流の発生を向上させ、現状の10倍となるスピン流量の改善に挑戦する。また、結晶成長の制御技術を用いて、スピン流に指向性を持たせることにも挑戦する。

高効率スピン流発生源、スピン流検出用カンチレバーの開発は、大阪大学の共同利用設備である電子線露光装置等を利用することで進めていく。作製したスピン流の力学的検出システムの実験は、測定感度を向上させるために、極低温真空環境下で行う。装置は既存の極低温冷凍機と真空チャンバーを流用する。

### 4. 研究成果

スピン流を効率良く力学的応答に変換する必要があるため、装置構成に対応するカンチレバーの開発が不可欠である。力検出感度を高めるために、スピン流検出用の微小でバネ定数が小さいカンチレバーと力検出系を開発することに注力した。検出感度を高めるには、共振周波数をあげればばね定数を低くする必要はあるが、どちらもトレードオフの関係があるため、まずシミュレーションを行い、カンチレバーの形状と共振周波数、ばね定数の関係を調査した。シミュレーションを行うにあたっては、実際にエッチング処理によって所要の仕様のものが作製できるかどうかも考慮しながら行った。カンチレバー変位の検出にはこれまで我々のグループで実績のあ

る光干渉方式を採用することを検討しているが、用いている光ファイバーのサイズによる制約があり、それを配慮した設計を行った。カンチレバー（片持ち梁）の場合は共振周波数を上げることが難しいため、非常に柔らかいカンチレバーを作製することで対応するが、共振周波数が高い両持ち梁構造の検討に注力した。窒化シリコン上は上に Membrane 構造を作製し、それをダイシングや FIG 加工を行うことで構造が作製でき、かつ光干渉との接続が可能であることがわかってきた。様々な構造を検討したが、使用できる両持ち梁は共振周波数 140kHz、ばね定数 5N/m 程度であることがわかった。今後は、カンチレバーの設計を行っていく必要がある。また、カンチレバーを作製するためのシリコンエッチング装置の準備を行った。

スピン流を検出するための装置開発を。従来、スピン流検出の力感度を高めるために微小でバネ定数が小さいカンチレバーと力検出系を開発することとしていた。このためには、共振周波数をあげてばね定数を低くする必要はあるが、どちらもトレードオフの関係がある。カンチレバー変位の検出にはこれまで我々のグループで実績のある光干渉方式を採用することを検討していたが、自己検出型の力センサの検討も行い、それに対応できる装置を設計した。当初予定していた極低温・真空環境での実験が予算的に難しいことがわかってきたため、実験に温度およびガス種等を制御でき、外部からの振動を排除できる密閉構造で動作する装置とした。一方、この手の装置では、要素技術開発に時間がかかり、本格的な実験に取り掛かることができなかったが、オリジナリティのあるテーマなので引き続き研究を進めていくこととしている。そのためには、高感度のカンチレバーを作製することが重要である。

今後の研究の推進方策としては、まず原子間力顕微鏡技術を利用した「スピン流検出用カンチレバーおよび力検出系」を完成させる必要がある。スピン流を効率良く力学的応答に変換する必要があるため、装置構成に対応するカンチレバーの開発が不可欠である。力検出感度を高めるために、スピン流検出用の微小でバネ定数が小さいカンチレバーと力検出系を開発する。次に、スピンドバイスを利用した「高効率スピン流発生源」の開発を行い、スピン流の発生を向上させ、結晶成長の制御技術を用いてスピン流に指向性を持たせることを行う。これらを組み合わせることで、高効率のスピン発生源と原子間力顕微鏡の技術を応用したスピン流検出装置を設計・試作する。極低温環境下や液中環境下でも利用できるように小型化（直径 3cm 以下）を目指す。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 D. Katsube and M. Abe	4. 巻 -
2. 論文標題 "Dual contrast mode" imaging of anatase TiO <sub>2</sub> (001)-(1x4) reconstructed surface using non-contact atomic force microscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 -
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 -

1. 著者名 S. Ojima, D. Katsube, H. Yamashita, Y. Miyato, S. Abo, and M. Abe	4. 巻 -
2. 論文標題 Surface structure switching between (1x1) and (1x 2) of rutile TiO <sub>2</sub> (110) with scanning tunneling microscopy and low energy electron diffraction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 -
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 -

1. 著者名 D. Katsube and M. Abe	4. 巻 30
2. 論文標題 Imaging patterns of anatase TiO <sub>2</sub> (001) with non-contact atomic force microscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 215704
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab02a7">https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab02a7</a>	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 M. Abe and H. Toki	4. 巻 9
2. 論文標題 Theoretical Study of Lumped Parameter Circuits and Multiconductor Transmission Lines for Time-Domain Analysis of Electromagnetic Noise	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Sci. Rep.	6. 最初と最後の頁 118
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） DOI:10.1038/s41598-018-36383-3.	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 -

1. 著者名 D. Katsube and M. Abe	4. 巻 113
2. 論文標題 High-resolution imaging of LaAlO <sub>3</sub> (100)-(1x4) reconstructed surface using non-contact atomic force microscopy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Lett.	6. 最初と最後の頁 31601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1063/1.5037741">https://doi.org/10.1063/1.5037741</a>	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. Kashida, Y. Hattori, K. Tazoe, T. Inoue, K. Nishikawa, K. Ishii, S. Uchiyama, , H. Yamashita, M. Abe, Y. Kamiya, H. Asanuma	4. 巻 140
2. 論文標題 Bifacial nucleobases for hexaplex formation in aqueous solution	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Am. Chem. Soc.	6. 最初と最後の頁 8456-8462
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI: 10.1021/jacs.8b02807	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 Masami Hashimoto, Takafumi Ogawa, Satoshi Kitaoka, Shunsuke Muto, Maiko Furuya, Hiroyasu Kanetaka, Masayuki Abe, Hayato Yamashita	4. 巻 155
2. 論文標題 Control of surface potential and hydroxyapatite formation on TiO <sub>2</sub> scales containing nitrogen-related defects	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 379-385
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.05.072">https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.05.072</a>	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 -

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 神野崇馬、木虎秀二、土岐博、阿部真之
2. 発表標題 FDTD法を用いた有限なグラウンド平面の電位変動によって生じる電磁ノイズ現象の定量化
3. 学会等名 2019年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 勝部大樹、大野真也、高柳周平、尾島章輝、前田元康、吉田光、西静佳、吉越章隆、阿部真之
2. 発表標題 水吸着したアナターゼ型TiO <sub>2</sub> (001)(1×4)再構成表面の非接触原子間力顕微鏡測定
3. 学会等名 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高柳周平、大野真也、勝部大樹、尾島章輝、前田元康、吉田光、西静佳、阿部真之
2. 発表標題 リアルタイム光電子分光による水吸着二酸化チタン表面の評価
3. 学会等名 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 勝部大樹、阿部真之
2. 発表標題 非接触原子間力顕微鏡による SrTiO <sub>3</sub> (100) ( 13× 13)-R33.7°再構成表面の観察
3. 学会等名 2018年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Diao Zhuo、杉本宜昭、勝部大樹、阿部真之
2. 発表標題 機械学習を用いた周波数シフトカーブの自動解析
3. 学会等名 2018年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 D. Katsube and M. Abe
2 . 発表標題 Imaging of LaAlO <sub>3</sub> (100) (1×4) Reconstructed Surface by Non-Contact Atomic Force Microscopy
3 . 学会等名 ACSIN-14 & ICSPM26
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 D. Katsube and M. Abe
2 . 発表標題 Investigation of Anatase-TiO <sub>2</sub> (001) (1×4) Reconstructed Surface by Non-Contact Atomic Force Microscopy
3 . 学会等名 ACSIN-14 & ICSPM26
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 D. Katsube and M. Abe
2 . 発表標題 Non-Contact Atomic Force Microscopy Observation of SrTiO <sub>3</sub> (100) ( 13× 13)-R33.7° Reconstructed Surface
3 . 学会等名 ACSIN-14 & ICSPM26
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 D. Zhuo, Y. Sugimoto, D. Katsube and M. Abe,
2 . 発表標題 Machine-learning Extraction of Short-Range Force Part with Non-contact Atomic Force Microscopy
3 . 学会等名 ACSIN-14 & ICSPM26
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 M. Maeda, D. Katsube, S. Abo, Y. Miyato, H. Yamashita, S. Yamada, K. Hamaya and M. Ab
2 . 発表標題 Cleaning SrTiO <sub>3</sub> (100) surface for spin device processes
3 . 学会等名 ACSIN-14 & ICSPM26
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. Ojima, D. Katsube, H. Yamashita, Y. Miyato, S. Abo and M. Abe
2 . 発表標題 Transition of Surface Structure from (1×1) to (1×2) of Rutile TiO <sub>2</sub> (110)
3 . 学会等名 ACSIN-14 & ICSPM26
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Masami Hashimoto, Takafumi Ogawa, Satoshi Kitaoka, Shunsuke Muto, Maiko Furuya, Hiroyasu Kanetaka, Masayuki Abe, Hayato Yamashita
2 . 発表標題 MC3T3-E1 Cellular Response and Protein Detection on Surface Potential-Controlled TiO <sub>2</sub> Scale in Serum-Containing Medium
3 . 学会等名 30th Symposium and Annual Meeting of the International Society for Ceramics in Medicine
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 尾島 章輝、勝部 大樹、宮戸 祐治、山下 隼人、阿保 智、阿部 真之
2 . 発表標題 ルチル型TiO <sub>2</sub> (110)表面における(1×1)構造から(1×2)構造への構造遷移観察
3 . 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4 . 発表年 2018年



1. 発表者名 勝部 大樹、阿部 真之
2. 発表標題 非接触原子間力顕微鏡によるSrTiO <sub>3</sub> (100) ( 13 × 13) R33.7° の観察
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 ちょう たく、勝部 大樹、阿部 真之
2. 発表標題 機械学習を用いた周波数シフトカーブの自動処理法
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高柳 周平、大野 真也、勝部 大樹、吉田 光、吉越 章隆、阿部 真之、尾島 章輝、前田 元康
2. 発表標題 リアルタイム光電子分光による二酸化チタン表面電子状態の評価
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Abe
2. 発表標題 Imaging Contrast of Anatase TiO <sub>2</sub> (001) with Non-Contact Atomic Force Microscop
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on "Recent Trend in the Elucidation and Function Discovery of Next Generation Function Materials of Surface/Interface Properties (招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 M. Abe	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 853
3. 書名 Compendium of Surface and Interface Analysis	

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----