

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03227

研究課題名(和文)高周波スピンドYNAMIKSのエンジニアリング手法の開発

研究課題名(英文)Engineering technology for high frequency spin dynamics

研究代表者

岡本 聡 (Okamoto, Satoshi)

東北大学・多元物質科学研究所・准教授

研究者番号：10292278

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：高周波スピンドYNAMIKSの制御は磁気記録、スピントロニクス分野において極めて重要な課題である。本研究は高周波スピンドYNAMIKSに対するエンジニアリング手法の確立を図ることを目的とし、その具体的な実施例として次世代磁気記録技術における従来の物理限界を超える制御手法の提案を目指した。様々な層間結合状態にある積層磁性体や磁性グラニューラー薄膜を用い、結合モードによって磁化反転挙動を制御でき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

磁性体は超大容量のハードディスク、不揮発メモリ、電磁変換素子として広く社会に活用されている。一般に、磁化はGHz帯域での歳差運動を伴って運動するため、高周波スピンドYNAMIKSの制御が、これらデバイス特性に直結することになる。本研究を通じて得られた高周波スピンドYNAMIKSのエンジニアリング手法に関する成果は、ハードディスクやスピントロニクス素子の高性能化に寄与し、今後の高度情報化社会の実現に貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：High frequency spin dynamics has been intensely studied in many fields such as spintronics and magnetic recording. The main purpose of this study has been to develop engineering technology of high frequency spin dynamics. As an example of this issue, we have investigated the next-generation magnetic recording technology based on high frequency spin dynamics using samples with various inter-layer and inter-granular exchange coupling. Consequently, we have successfully found that the magnetization reversal behavior under the application of microwave fields can be well controlled by varying the magnetic coupled mode of the sample.

研究分野：磁気工学

キーワード：スピンドYNAMIKS 磁気記録 マイクロ波

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

GHz 帯域でのスピンドYNAMICSに関連した研究が基礎物性からデバイス応用に至るまで世界中で活性化している。磁気記録の分野では、マイクロ波アシスト磁気記録方式が次世代記録技術として本命視されており、活発な研究が行われていた。これは記録媒体の磁化を GHz 帯の周波数で歳差運動させることで、記録に必要な実効磁場を大幅に低減できる技術である。我々のグループではかなり初期の段階からマイクロ波アシスト磁気記録に関する研究を行い、これまでに世界に先駆けて多くの成果を発表してきた。また本格的な実用化が間近に迫っているスピントロニクス分野においても、スピントルク磁化反転やスピントルク発振素子などにみられるように、GHz 帯域のスピンドYNAMICSはデバイス特性を決める主要因子の一つであり、その制御が極めて重要となっていた。

2. 研究の目的

一般に、高周波スピンドYNAMICSの固有周波数は、 $\gamma H^{\text{eff}}/2\pi$ で与えられる。ここで γ はジャイロ磁気定数と呼ばれる定数であり、強磁性材料毎に決まっている物性値である。 H^{eff} はスピンが感じる有効場である。これまでは外場を変化させることによって固有周波数の変化を観測していた。積層磁性薄膜においては、外部磁場に加えて層間の交換結合を有効場として作用させることが出来るため、 H^{eff} の大きな制御が期待される。一方、フェリ磁性体では反平衡スピンの歳差運動となるため、有効ジャイロ磁気定数 γ^{eff} として与えられ、反平行スピンの組合せによって γ^{eff} を大きく変化させることが可能となる。フェリ磁性体と同様の挙動が期待されるのが積層フェリ磁性薄膜である。これは反強磁性交換結合を誘起する中間層を介した積層磁性薄膜であり、通常のフェリ磁性材料に比べて、材料自由度が非常に高いことが特徴である。

これに加えて、従来の高周波スピンドYNAMICS研究においては熱揺らぎの影響は殆ど考慮されていなかった。しかしながら、磁気記録においては熱揺らぎの影響は大きく、高周波スピンドYNAMICSを基礎とするマイクロ波アシスト磁気記録方式においては、その影響を評価する必要がある。

したがって、本研究では、フェリ磁性体や様々な積層磁性薄膜を用いて H^{eff} や γ^{eff} の制御を試み、マイクロ波アシスト効果に対する影響を調べ、さらに熱揺らぎの高周波スピンドYNAMICSに与える影響を評価し、これら検討を通じて高周波スピンドYNAMICS制御手法の確立を図るものである。

3. 研究の方法

主に以下の2項目に注力して研究を進めた。

(1) 層間結合を有する積層磁性体ナノドットの高周波スピンドYNAMICS

積層磁性体では中間層材料ならびにその厚みを調整することで、主たる層間結合を双極子結合、反強磁性結合、強磁性結合と変化させることが可能である。試料はスパッタ法によって作製した磁気特性の異なる Co/Pt 垂直磁化膜を中間層で積層したものとした。電子線リソグラフィ法を用いて微細加工した積層磁性薄膜試料を十字電極中央に配置することで、異常 Hall 効果(AHE)による高感度磁気検出を行った。マイクロ波線路パターンと組み合わせることで、強磁性共鳴ならびにマイクロ波アシスト磁化反転実験を行った。

(2) 積層グラニューラー磁性薄膜のマイクロ波アシスト磁化反転

現在の磁気記録においては、粒径数 nm 程度の磁性粒子の集合組織であるグラニューラー磁性薄膜が記録媒体として用いられる。試料はスパッタ法によって作製した積層 CoCrPt/SiO₂ 垂直磁化グラニューラー薄膜を用いた。研究項目(1)と同様に、微細加工を行い、マイクロ波足須磁化反転実験を行った。

4. 研究成果

各項目における研究成果をそれぞれ以下に示す。

(1) 層間結合を有する積層磁性体ナノドットの高周波スピンドYNAMICS

図1にそれぞれ双極子結合、反強磁性結合、強磁性結合の場合における Co/Pt 積層磁性体の強磁性共鳴の測定結果を示す。いずれのケースでも明瞭な共鳴ピークが確認されており、双極子結合ならびに反強磁性結合では励起モードの異なる 2 本の共鳴ピークが確認できる。共鳴周波数の磁場依存性を解析することで層間の結合強度を評価した。次に図2にこれらの層間結合状態にある試料のマイクロ波アシスト磁化反転実験の結果を示す。双極子結合の場合では、2層の Co/Pt 垂直磁化膜が独立に磁化反転している様子が分かる。マイクロ波アシスト磁化反転における反転磁場の周波数依存性の傾きは、理論計算によれば $2\pi/\gamma$ で与えられることが分かっており、双極子結合の場合は、ほぼそれに近いものとなっていることが確認された。次に反強磁性結合の場合では、反転磁場の周波数依存性の傾きが著しく小さくなっており、積層フェリ磁性体における γ^{eff} の増大によるものと推察される。さらに強磁性結合の場合では、反転磁場の周波数依存性の傾きは $2\pi/\gamma$ にほぼ一致しているが、マイクロ波アシスト効果が著しく増大しており、積層の効果による H^{eff} の増大によるものと推察される。

以上、層間結合を制御することで、 γ^{eff} や H^{eff} の制御が可能であり、その結果としてマイクロ波アシスト効果を著しく大きく制御可能であることが分かった。

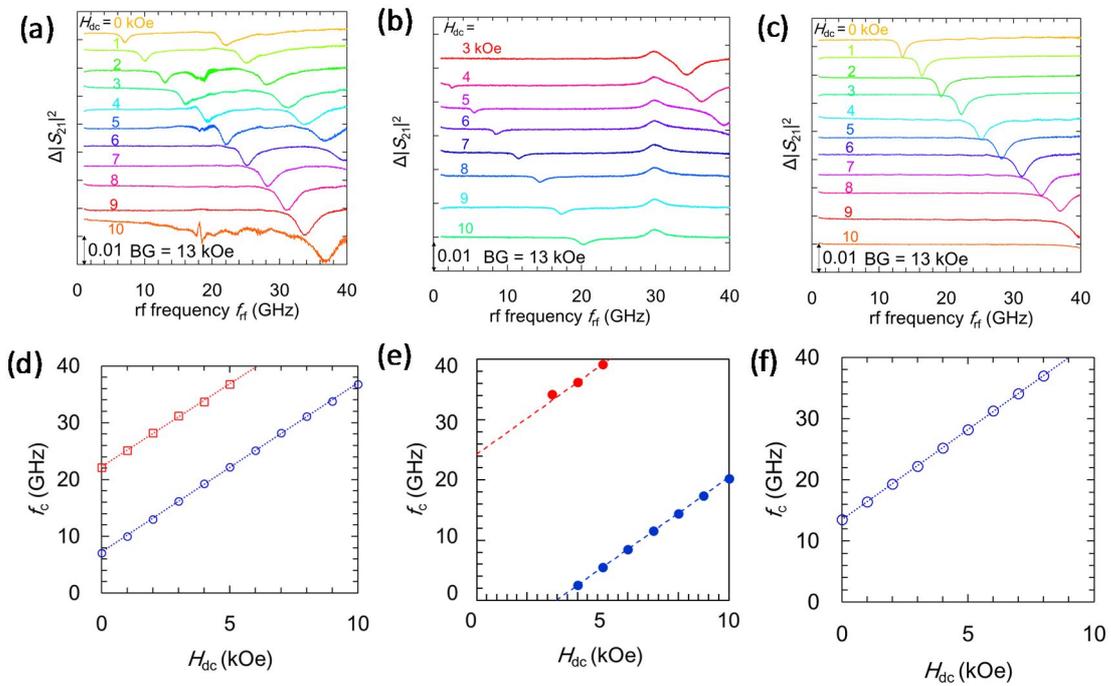


図 1 積層 Co/Pt 垂直磁化膜の強磁性共鳴の結果 . (a), (b), (c)はそれぞれ層間結合を双極子結合, 反強磁性結合, 強磁性結合の場合の強磁性共鳴スペクトルであり, (d), (e), (f)はそれらに対応する共鳴周波数の磁場依存性 .

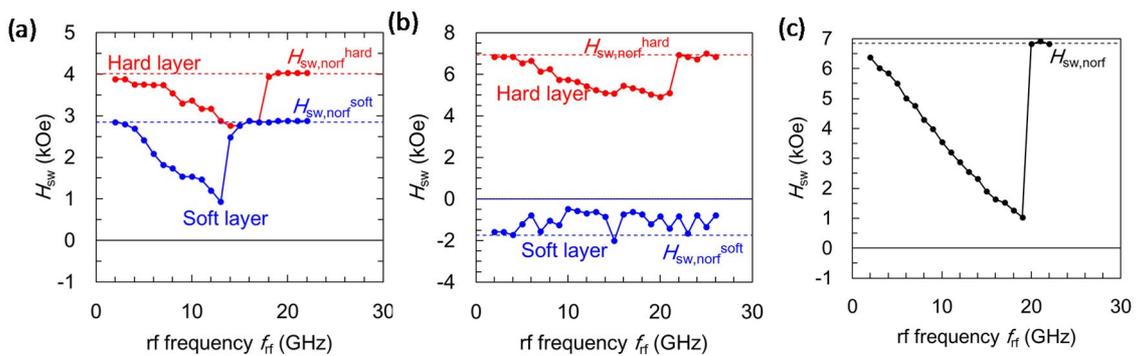


図 2 積層 Co/Pt 垂直磁化膜ナノドット試料のマイクロ波アシスト磁化反転実験における反転磁場のマイクロ波周波数依存性 . (a), (b), (c)はそれぞれ層間結合を双極子結合, 反強磁性結合, 強磁性結合の場合の結果である .

(2) 積層グラニューラー磁性薄膜のマイクロ波アシスト磁化反転

積層グラニューラー磁性薄膜は, CoCrPt/SiO₂ 垂直磁化グラニューラー薄膜と CoCrPt 連続膜の 2 層構造とし, CoCrPt 連続膜の厚みを 0, 1, 2 nm と変化させた . これにより粒子間交換相互作用を実効的に変化させることが可能となる . 図 3 に各マイクロ波周波数における磁化曲線の変化を示す . いずれの試料においてもマイクロ波周波数の増大にともない磁化曲線低磁場側にシフトしており, 明瞭なマイクロ波アシスト効果が確認できる . しかしながら, 詳細を比較すると多く異なっていることが分かった . CoCrPt 連続膜の 0 nm の試料では, 磁化曲線はほぼ形を変えずに低磁場領域にシフトしている . 一方, CoCrPt 連続膜の 1 nm の試料では, マイクロ波周波数が 20 GHz までは形を保ったまま低磁場側にシフトしているが, 30 GHz では磁化曲線の傾きが増大している様子が分かる . CoCrPt 連続膜の 2 nm の試料ではより, その傾向が顕著となっている . 反転磁場のマイクロ波周波数依存性を減磁開始点 H_n , 保磁力 H_c , ならびに飽和点 H_s の 3 か所で計測し, それぞれのマイクロ波周波数に対する傾きをまとめた結果が図 4 である . マイクロ波磁場振幅 $h_{rf} = 480$ Oe と 950 Oe の場合を比べると, やや $h_{rf} = 950$ Oe の方が全体的に傾きは大きくなっている傾向がみられるが, CoCrPt 連続膜の厚みが増加するにつれて傾きが増大する傾

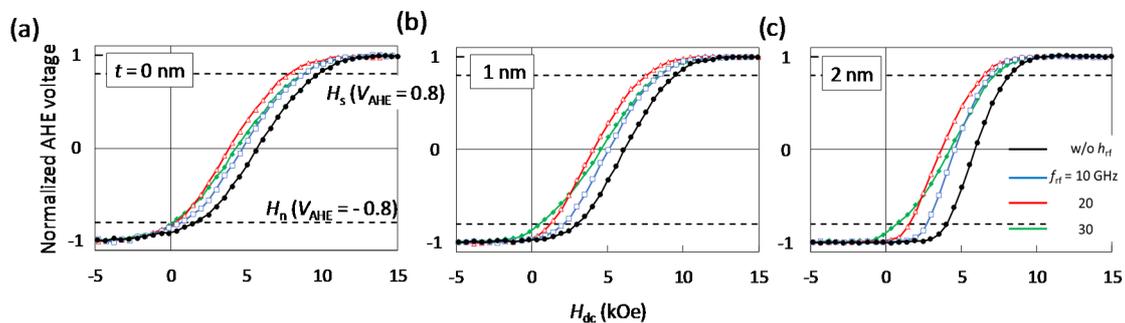


図 3 積層グラニューラー磁性薄膜のマイクロ波アシスト磁化反転実験における磁化曲線の変化．(a), (b), (c)はそれぞれ CoCrPt 連続膜の厚みを 0, 1, 2 nm と変化させた結果．

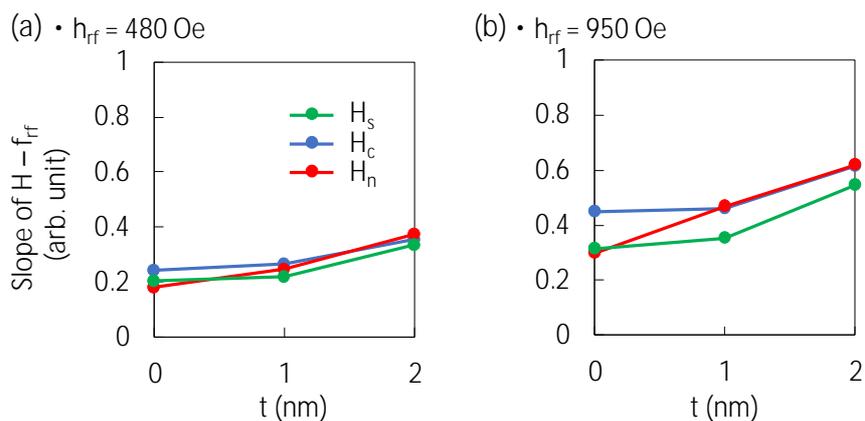


図 4 積層グラニューラー磁性薄膜の減磁開始点 H_n 、保磁力 H_c 、ならびに飽和点 H_s におけるマイクロ波周波数依存性の傾きを CoCrPt 連続膜の厚みに対してまとめた結果．

向は両者で共通している．グラニューラー薄膜においては熱揺らぎの影響が非常に大きく，そのような場合には反転磁場のマイクロ波周波数依存性の傾きは $2\pi/\gamma$ よりも低下することが最近の詳細な理論計算より分かっている．CoCrPt 連続膜の 0 nm の試料では実際に反転磁場のマイクロ波周波数依存性の傾きの大幅な低下が確認されている．一方，CoCrPt 連続膜厚みが増大するにつれて，熱揺らぎの影響が抑制された結果，反転磁場のマイクロ波周波数依存性の傾き増大がみられたものと理解できる．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kikuchi Nobuaki, Shimada Kyohei, Shimatsu Takehito, Okamoto Satoshi, Kitakami Osamu	4. 巻 57
2. 論文標題 Frequency dependence of microwave-assisted switching in CoCrPt granular perpendicular media	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 09TE02 ~ 09TE02
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.7567/JJAP.57.09TE02	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 Lu Yuming, Okamoto Satoshi, Kikuchi Nobuaki, Kitakami Osamu, Shimatsu Takehito	4. 巻 112
2. 論文標題 Layer-selective microwave-assisted magnetization switching in a dot of double antiferromagnetically coupled (AFC) layers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 162404 ~ 162404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1063/1.5027127	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 Y. Lu, S. Okamoto, N. Kikuchi, O. Kitakami, and T. Shimatsu	4. 巻 112
2. 論文標題 Layer-selective microwave-assisted magnetization switching in a dot of double antiferromagnetically coupled (AFC) layers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 162404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5027127	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 N. Kikuchi, K. Sato, S. Kikuchi, S. Okamoto, T. Shimatsu, O. Kitakami, H. Osawa, and M. Suzuki	4. 巻 126
2. 論文標題 Microwave-assisted switching in CoCrPt granular medium under continuous microwave fields	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 83908
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1063/1.5111576	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. Suto, T. Kanao, T. Nagasawa, K. Mizushima, R. Sato, N. Kikuchi, and S. Okamoto	4. 巻 125
2. 論文標題 Microwave-magnetic-field-induced magnetization excitation and assisted switching of antiferromagnetically coupled magnetic bilayer with perpendicular magnetization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 153901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi: 10.1063/1.5089799	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13件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 N. Kikuchi, K. Shimada, S. Kikuchi, K. Sato, S. Okamoto, O. Kitakami, T. Shimatsu
2. 発表標題 Microwave assisted switching behavior of CoCrPt based granular media
3. 学会等名 The 29th magnetic recording conference (TMRC2018) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Suto, T. Kanao, T. Nagasawa, K. Mizushima, R. Sato, N. Kikuchi, and S. Okamoto
2. 発表標題 Microwave-assisted magnetization switching of antiferromagnetically coupled magnetic bilayer with perpendicular magnetization
3. 学会等名 The 29th magnetic recording conference (TMRC2018) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Kikuchi, K. Shimada, S. Kikuchi, K. Sato, O. Kitakami, T. Shimatsu
2. 発表標題 Microwave assisted switching on CoCrPt based granular media
3. 学会等名 日本磁気学会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤勝成, 菊池伸明, 岡本 聡, 北上 修, 島津武仁
2. 発表標題 連続波を用いたCoCrPtグラニューラ記録媒体のマイクロ波アシスト磁化反転実験
3. 学会等名 日本磁気学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 菊地 瞬, 島津武仁, 菊池伸明, 岡本 聡, 北上 修
2. 発表標題 CoCrPtグラニューラ磁気記録媒体における マイクロ波アシスト効果の時間依存性
3. 学会等名 日本磁気学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Lu, S. Okamoto, N. Kikuchi, O. Kitakami, and T. Shimatsu
2. 発表標題 Magnetization switching of a dot composed of double AFC layers under the assistance of rf fields
3. 学会等名 The 28th Magnetic Recording Conference(TMRC) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Okamoto, Y. Lu, N. Kikuchi, O. Kitakami, T. Shimatsu
2. 発表標題 Layer-selective switching in a dot of double AFC layers under the assistance of rf fields
3. 学会等名 Junjiro Kanamori Memorial International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Lu, S. Okamoto, N. Kikuchi, O. Kitakami, T. Shimatsu
2. 発表標題 Layer-selective switching in a dot of double AFC layers under the assistance of rf fields
3. 学会等名 62nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 金原 大樹, 岡本 聡, 菊池 伸明, 北上 修, 島津 武仁
2. 発表標題 積層磁性ドットによるマイクロ波アシスト磁化反転
3. 学会等名 第41回 日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 島田恭平, 島津武仁, 菊池伸明, 岡本聡, 北上修
2. 発表標題 CoCrPtグラニューロ垂直磁気記録媒体における マイクロ波アシスト効果
3. 学会等名 第41回 日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡本 聡, 菊池 伸明, 北上 修, 島津 武仁
2. 発表標題 マイクロ波アシスト磁気記録における磁化反転挙動
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Kikuchi, K. Sato, S. Okamoto, O. Kitakami, and T. Shimatsu
2. 発表標題 Microwave assisted switching on CoPtCr-based granular media
3. 学会等名 the Magneto-Optical Recording International Symposium (MORIS2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤勝成, 菊池伸明, 岡本 聡, 北上 修, 島津武仁
2. 発表標題 CoCrPt グラニュラ 薄膜における粒子間交換結合の マイクロ波アシスト 磁化反転への影響
3. 学会等名 第42回 日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2019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
研究分担者	島津 武仁 (Shimatsu Takehito) (50206182)	東北大学・学際科学フロンティア研究所・教授 (11301)	
研究分担者	北上 修 (Kitakami Osamu) (70250834)	東北大学・多元物質科学研究所・教授 (11301)	
研究分担者	菊池 伸明 (Kikuchi Nobuaki) (80436170)	東北大学・多元物質科学研究所・助教 (11301)	