

平成 30 年 5 月 29 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K21093

研究課題名(和文)自己変形発現によるナノワイヤ加工法を利用した芯付ナノコイルの創製と応用

研究課題名(英文)Fabrication of Core Nanocoil by Self-deformation Technique

研究代表者

徳 悠葵 (TOKU, Yuhki)

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：60750180

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ナノスケールの電磁気素子実現を目的に、金属被覆ナノワイヤの自己螺旋形成による導電性ナノコイル探針の開発を行った。被覆方法の検討によりコイルの形状制御を行い、コイルピッチの制御を実現した。また、創製したコイルは電磁気特性評価において同等スケールの微小コイルに比べ100倍程度高い導電率を実現し、理論的解析により軟磁性ナノ材料の磁気制御が可能な発生磁場を示した。さらに、原子間力顕微鏡用カンチレバーの探針にナノワイヤを自己螺旋変形させることに成功し、原子間力顕微鏡とナノ電磁石を融合した新規のナノ材料評価素子としての可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：Magnetic recording has become high-density and miniaturization. According to this, the local detection technique of electromagnetic properties at nanoscale becomes extremely high demand. Researchers have spent much effort to detect the magnetic properties at nanoscale, which resulted in the development of several devices. For example, magnetic force microscope is a kind of scanning probe microscope, which detects the magnetic field of the sample surface using a magnetized probe. However, a quantitative measurement is sometimes difficult because the atomic force affects the detection results.

In this study, we demonstrated the spiral formation of the coated nanowire by self-deformation technique based on the residual stress of the thin film. The metal coated nanowire spirally formed with high conductivity. The electrical and magnetic properties of the coil was investigated. The coil is possible to be used as an electromagnet to detect the electromagnetic properties of nanomaterials.

研究分野：材料力学、ナノ材料

キーワード：ナノコイル ナノワイヤ 薄膜 残留応力 自己変形

### 1. 研究開始当初の背景

螺旋状のナノ構造体は、ナノ電磁石としてセンサ・アクチュエータへの応用が期待できる。従来、螺旋状ナノ構造体は、熱昇華法や化学気層堆積 (CVD) 法などの自己組織化を利用した方法により大量合成することが可能である。しかしながら、自己組織化のための材料が限られる点 (主に非導電性)、寸法・形状・螺旋方向の不揃い、個々に取り出し切断・配置といった操作の困難さが障害となるため、単一ナノコイルの応用 (例えば上述の電磁石) には至っていない。今後、更なる高密度実装・素子の微細化が必要とされ、ナノスケールの素子を単一に利用できる作製法が必要不可欠である。

### 2. 研究の目的

本研究では、申請者が過去に独創したコア流動法 (Y. Toku and M. Muraoka, Nanoscience and Nanotechnology Letters, 2010) の特長を活かし、「ナノコイルの形状制御」という製造技術の確立からナノコイルの応用「導電性ナノコイル探針の開発」までを目的とした。

コア流動法を従来のコイル作製法と比較すると、単一のナノコイルを作製できるだけでなく、対象物への巻付け加工が可能という点にて大きく異なる。例えば、高い透磁率を有するフェライト系ナノワイヤを芯材とし、金属被覆ナノワイヤをコア流動法によって巻付ける (コイル形成する) ことにより、ナノスケールにおいて空芯ナノコイルでは実現できない巨大な磁場の制御素子として利用できる可能性がある。一方、上記の技術が確立すれば、芯付ナノコイルの応用として、導電性ナノコイル探針を開発できる。具体的には、原子間力顕微鏡 (AFM) 用マイクロカンチレバーの探針部を芯として導電性ナノコイルを作製することにより、既存の AFM システムとナノ電磁石の融合を図り、高空間分解能かつ電磁誘導の原理に基づいた新規ナノ材料評価素子を開発できる。これは、金属ナノ材料や薄膜のナノスケールにおける未知の電磁気特性研究において極めて重要な役割を果たす。

### 3. 研究の方法

本研究では、微小コイル形成法「コア流動法」を利用し、芯付ナノコイルを創製するため、まずはナノコイルの寸法設計を行えるよう、コイル径および螺旋ピッチの制御に関する実験を行った。また、ナノコイルの電磁気的特性を評価した。さらに「導電性ナノコイル探針」の基礎研究として、AFM 用マイクロカンチレバーの探針部への金属被覆ナノワイヤ巻き付け実験を行った。2年計画により、( ) ナノコイルの形状制御、( ) ナノコイルの特性評価、( ) 導電性ナノコイル探針の開発、なる3項目により研究を推進した。

#### ( ) ナノコイルの形状制御

##### ( -1) 光学顕微鏡用マニピュレータの開発

本研究にて使用するコア流動法は、実験条件を明確にするために、制御された条件下においてナノワイヤに製膜する。そのため、単一のナノワイヤをマニピュレーションする必要がある。そこで、実験環境の整備として、光学顕微鏡下にて動作可能なマニピュレータを開発した。研究代表者は過去の研究において、ナノワイヤの分離・把持などが行える多自由度マニピュレータを試作していたが、芯付ナノコイルの創製を実現するためにナノワイヤの再配置機能が必要となり、新たに設計製作した。マニピュレータは圧電素子による把持動作を特徴としており、さらに、マイクロポジションを組み込んだ多自由度の機構により把持だけでなくナノワイヤの再配置を可能とする機能を有する。これにより、実験試料をマイクロ・ナノスケールにて操作できる。

##### ( -2) コイルピッチの制御

ピッチ制御のために行った実験の装置概略図を図1に示す。図のように基板上に片持ち梁状に分離した単一のナノワイヤをスパッタチャンバー内に設置し、「スパッタターゲットからの水平距離  $x$ 」と「コア流動後のナノワイヤに発現するピッチ」との関係性を調べた。

さらに、コイルピッチに及ぼすコア材料の断面アスペクト比の影響を調査するため、ナノベルトの作製・寸法制御を行った。

#### ( ) ナノコイルの特性評価

作製したコイルに電流試験を行い、4探針法により導電率の評価を行った。また、許容電流量からコイルの発生可能磁場の推定を行い、ナノ電磁気素子としての評価を行った。

#### ( ) 導電性ナノコイル探針の開発

導電性ナノコイル探針の開発を目的に、既存の AFM 用マイクロカンチレバーに対し、探針部への導電性ナノコイル巻き付け実験を行った。巻き付け実験の概略図を図2に示す。

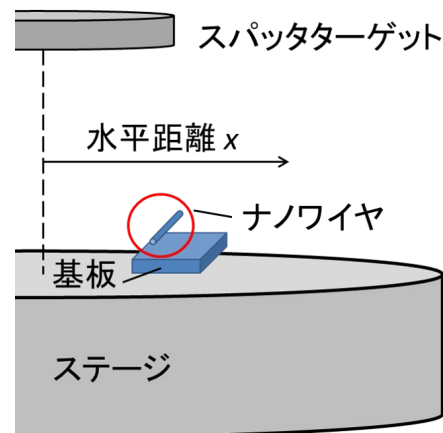


図1. コイルピッチ制御の実験装置概念図

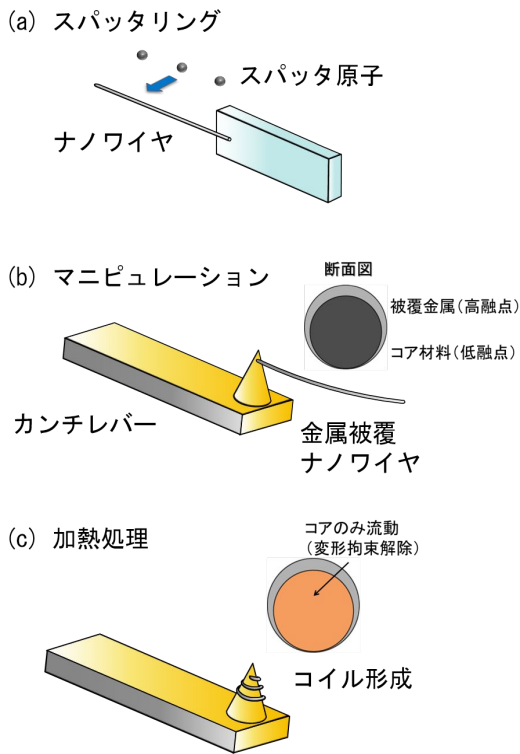


図2．ナノワイヤ巻き付けの実験手順

す．なお，フォーカスイオンビームによるカーボン堆積によって，マニピュレーションしたナノワイヤを確実に探針上に接合した．さらに，金属を周方向不均一に製膜し，導電性を付加しつつ，ナノワイヤへ膜ひずみによる変位を与えた．次に，ナノワイヤのみ流動する温度にて加熱処理することにより，探針上にナノコイルを作製した．

#### 4．研究成果

ピッチ制御に関する実験結果を図3に示す．図3(a)は基板に分離した直後の単一ナノワイヤの一例であり，(b)(c)(d)はそれぞれ図1にて示した $x$ を10, 20, 30 mmと変化させた際のナノワイヤの観察像である．なお，観察像は全てスパッタターゲット側から鉛直下向きに捉えたものである．図より， $x$ が増すにつれてピッチの発現量が大きくなっていることがわかる．また，試作したナノベルト群とナノベルトをコアとして作製した螺旋ナノ構造体の一例を図4および5に示す．断面アスペクト比が大きくなるほど，ピッチ方向の変形量が抑制され，ゼンマイ形状のようなほぼ無ピッチの状態まで制御することに成功した．

以上より，コア流動法におけるピッチ制御を実現した．

次に，電磁気特性評価の結果について述べる．本研究にて作製したコイル(Cr被覆Alナノワイヤを利用した場合)の導電率は $2.18 \times 10^6$  S/m，許容電流値約500 mA，推定発生磁場 $1.26 \times 10^{-4}$  Tであった．Niナノ粒子(軟

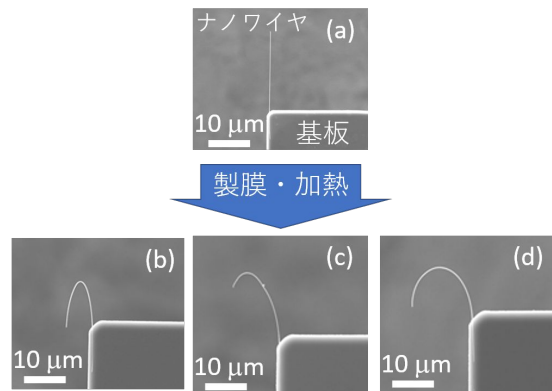


図3．ピッチ制御実験の結果: (a)  $x = 10$  mm (b)  $x = 20$  mm (c)  $x = 30$  mm

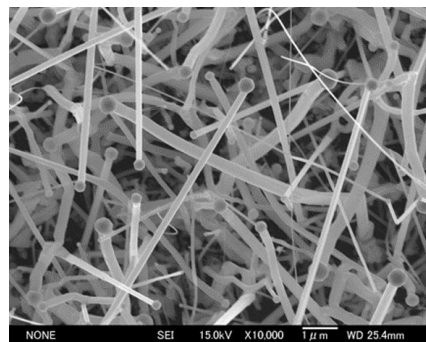


図4．CVD法によるナノベルト群の作製例

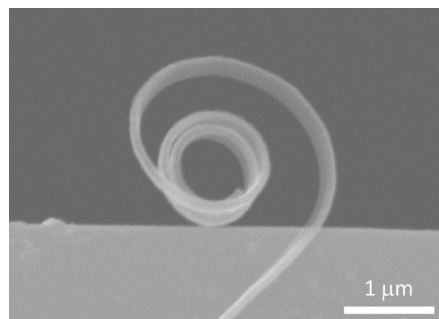


図5．試作した螺旋ナノ構造体の一例

磁性体)の保持力が $10^{-5}$  T程度であることを考えると，現状のコイルでも軟磁性ナノ材料の磁化制御素子として応用が期待できる．

最後に，AFM用カンチレバー探針に対するナノワイヤの巻き付け実験について示す．図6は実際に作製したコイル付き探針の一例である．探針への一巻きのコイル作製に成功した．

本研究では，AFM用のカンチレバー探針に金属被覆ナノワイヤを巻き付けることに成功した．また，高い導電率を有しており，電磁気アプリケーションに有効であることも確認した．しかしながら，現状では1巻きのコイルに留まっており，コイル径もマイクロ

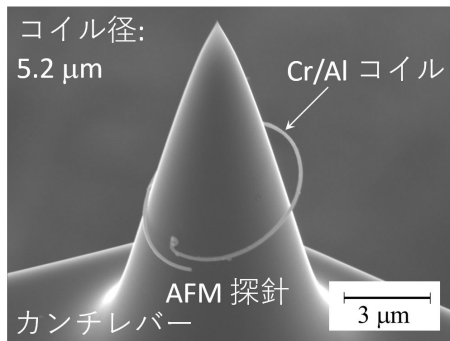


図6．マイクロコイル探針の作製例

スケールであるため、発生磁場の小ささ、磁場照射領域の広がり（分解能の低下）などに課題が残っている。これは、金属被覆後のナノワイヤのマニピュレーションが困難であり、コイル変形時におけるカンチレバー探針との干渉によって任意の形状制御が実現できていないためと考えられる。また、カンチレバー上の電極作製にはフォトリソグラフィを主体とした従来の微細加工法を利用したが、歩留まりが悪く5%以下の成功率であった。

上記の課題点は、AFM探針にナノワイヤを配置する際の位置決め精度向上によって解決できると考えられる。そこで、マニピュレーションの代わりに直接AFM探針にナノワイヤを成長させる手法を開発予定である。シリコンカンチレバーに多層金属被覆を施し、探針部に微小な空隙を設けたのちに加熱することにより、応力集中による原子拡散を誘起することによって任意の位置にナノワイヤを成長させる。その後、独自のコア流動法によってナノコイル探針を作製し、作製効率の向上を目指す。電極作製の歩留まりの悪さについては、上記の多層金属被覆を利用してカンチレバー内層と外層の2極構造とすることにより解決を図りたい。

#### 5．主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔学会発表〕（計8件）

Y. Toku, Y. Ueda, Y. Morita, and Y. Ju, Electromagnetic performance of spirally deformed coated nanowires, 6th international conference on integrity-reliability-failure, 2018.

上田 祐志, 徳 悠葵, 森田 康之, 巨 陽, 自己変形発現により作製した金属被覆微小コイルの電磁気特性に関する研究, 日本機械学会 M&M 2017 材料力学カンファレンス, 2017年.

戸川 陽介, 徳 悠葵, 森田 康之, 巨 陽, 薄膜残留応力を利用した金属被覆ナノベル

トのゼンマイ形成に関する研究, 日本機械学会 2017年度年次大会, 2017年.

Y. Toku, S. Nota, Y. Morita, and Y. Ju, Influence of thermal fatigue on the connection strength of nanowire surface fastener, 2016 M&M international symposium for young researchers, 2016.

徳 悠葵, 野田 修二, 森田 康之, 巨 陽, 熱疲労を受けるナノワイヤ面ファスナーの接続強度および電気的特性の評価, 日本機械学会 第29回計算力学講演会, 2016年

鈴木 崇真, 徳 悠葵, 森田 康之, 巨 陽, ストレスマイグレーションを利用した Al ナノワイヤの成長に及ぼす Al 薄膜構造の影響, 日本機械学会 M&M 2016 材料力学カンファレンス, 2016年.

上田 祐志, 徳 悠葵, 森田 康之, 巨 陽, 薄膜残留応力を利用した被覆 Al ナノワイヤの自己変形, 日本機械学会 2016年度年次大会, 2016年.

笠原 龍太郎, 徳 悠葵, 森田 康之, 巨 陽, カーボンナノチューブ複合材料の強度向上に関する実験的検討, 日本機械学会 2016年度年次大会, 2016年.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.mech.nagoya-u.ac.jp/ju/>

#### 6．研究組織

##### (1)研究代表者

徳 悠葵 (TOKU, Yuhki)

名古屋大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：60750180