

機関番号：11401

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008 ~2010

課題番号：20360049

研究課題名 (和文) 真性ひずみを利用した高次ナノ構造体の創製技術の開発

研究課題名 (英文) Fabrication of Helical Nanostructures by Misfit Strain

研究代表者

村岡 幹夫 (MURAOKA MIKIO)

秋田大学・大学院工学資源学研究科・准教授

研究者番号：50190872

研究成果の概要 (和文)：ナノワイヤなどの一次元ナノ材料の表面に異種原子結晶を成長させ、ナノ材料と異種原子の間に発生する不整合ひずみ (真性ひずみ) を利用したナノ材料曲げ加工技術を確立した。そこでは、コア流動法を新たに考案し、曲げ加工効率を飛躍的に向上させた。さらに、分子動力学解析により、当該不整合ひずみの特徴を理論的に把握した。また、ナノ材料の把持・移動配置を可能にする多自由度のナノ把持装置を開発した。これにより、高次ナノ構造体として特に有用なナノコイルの創製を実現した。

研究成果の概要 (英文)：A permanently bending technique of nanowires (NWs) was developed using misfit strain due to dissimilar material coating. The driving force of the bending is the residual stress. The novel mechanical process relies on a bending enhancement, where an NW's constraint against the bending deformation is removed by elevating temperature for inducing creep flow only in the NW. Theoretical investigations were also made in terms of molecular dynamics simulations and continuum mechanics. Furthermore, a manipulator was built for gripping and positioning an NW. With a help of the manipulator, the bending technique demonstrated the fabrication of micro/nanocoils.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2008年度 | 6,800,000 | 2,040,000 | 8,840,000 |
| 2009年度 | 4,800,000 | 1,440,000 | 6,240,000 |
| 2010年度 | 3,400,000 | 1,020,000 | 4,420,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 15,000,000 | 4,500,000 | 19,500,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：ナノコイル, 被覆ナノワイヤ, 不整合ひずみ, コア流動, 自己変形

1. 研究開始当初の背景

ナノコイルの作製は、化学気相成長 (CVD) 法や熱昇華法などの自己組織化を利用した合成が主流であるが、利用できる材料に限られている。また、これらの手法は、大量合成が可能ではあるが、ナノコイルの寸法・形状・螺旋方向の不揃いや、個々に取出し切断・配置といった操作の困難さが障害となり、単一ナノコイルを利用したセンサやアクチュエータなどの応用に至っていない。一方、集

束イオンビーム援用 CVD によるナノコイル形成が報告されているが、適用材料の制限に加え、長時間・高コスト消費という難がある。以上のような世界的状況にあり、単一ナノコイルの応用に適し、かつ簡便なナノコイル製法が望まれている。

2. 研究の目的

本研究は、比較的配置が容易なナノワイヤ (NW) を素材として用い、これに対する曲

げ加工によってナノコイルを作製するという新規な簡便手法の開発を目的とする。曲げ加工の駆動力として、NWの表面に異種原子結晶を成長させた際に生じる不整合ひずみを用いる点が本手法の特徴である。

3. 研究の方法

代表者らが先に提案した膜不整合ひずみを利用したナノコイル製作法は、生成効率が極めて低い(1%)という問題があった。本研究では、NWに対する製膜条件を明確にするために、単一のNWを所定位置に配置して、膜厚や温度等の製膜条件がコイル形成に及ぼす影響を詳細に検討する。また、分子動力学解析や連続体力学的考察により、当該不整合ひずみの特徴を理論的に把握する。以上により、ナノコイル作製の効率を飛躍的に向上させる。さらに、NWの把持・移動配置を可能にする多自由度のナノ把持装置を開発し、ナノコイルの作製・応用に役立てる。

4. 研究成果

(1) コア流動法によるナノコイル作製効率の飛躍的向上

代表者らが先に提案した膜不整合ひずみを利用したナノコイル製作法では、酸化銅(CuO) NWが群生する基板に対してクロム(Cr)を製膜していたため、NW個々に対する製膜条件が不明確であった。そこで、原子間力顕微鏡用カンチレバーの先端に単一のCuO NWを捕捉し、これに対してCrのスputter製膜を行った。しかしながら、コイル形成に至る程の強い曲げ変形が発生しないことが判明した。一方、代表者らは先の研究において、被覆金属が高融点であるほど、コイルが形成しやすいという実験事実を得ており、コイル形成時の温度が重要な役割を果たしていることに気付いた。その結果、コイル形成効率を約100%に向上できるコア流動法の考案に至った(図1)。コア流動法は、sputter製膜後(図1②)、Arガス中で加熱することにより、コア部であるCuO NWのみをクリープ流動させ、曲げ自己変形を発現させる独自の手法である。当該クリープ流動によりコア部による変位拘束が解かれ、駆動力であるCr膜の不整合ひずみを最大限に曲げ変形に利用できる。

(2) 分子動力学解析および連続体力学的検討

不整合ひずみ駆動のコイル形成に関して、分子動力学解析(図2)と連続体力学的考察を行い、以下の結果を得た。NWへの製膜では6%程度の大きな不整合ひずみが、転位発生による緩和なしに許容され、曲げ変形に寄与できる。NWの弾性異方性により、製膜による曲げ変形がねじり変形と連成し、螺旋状体を形成する。コア流動法によるコイル径は、

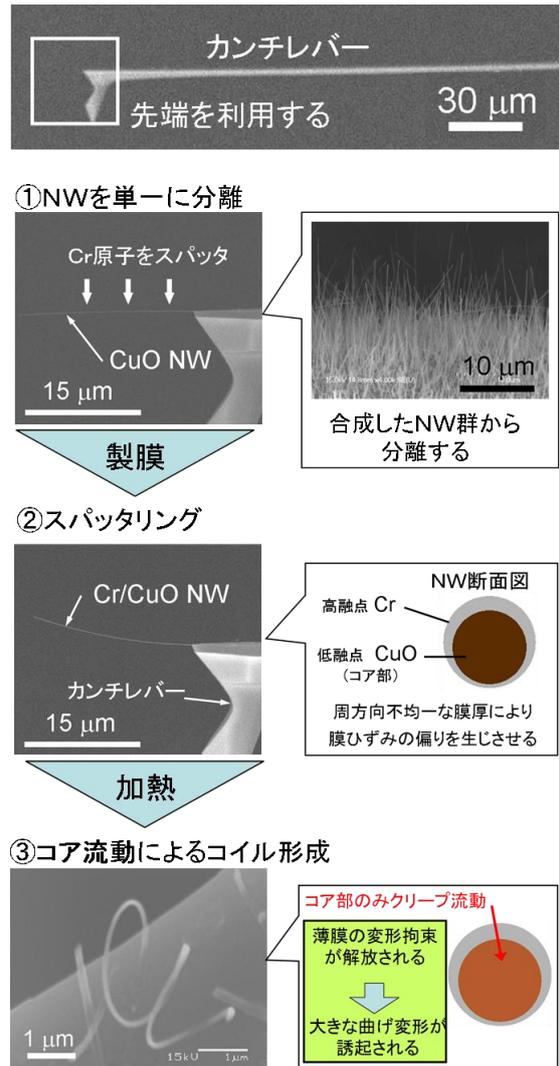


図1 コア流動法によるコイル形成

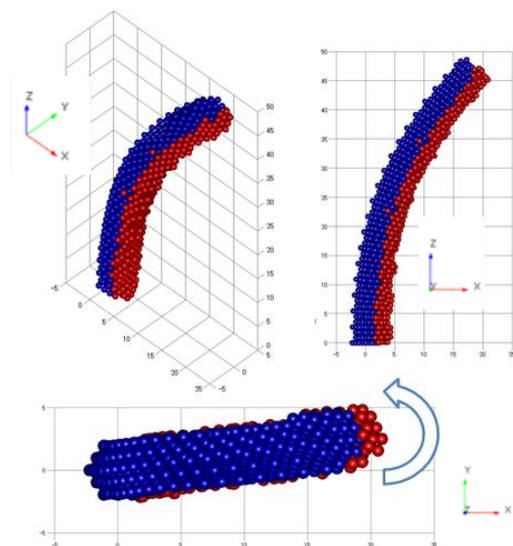


図2 分子動力学解析の例

固有ひずみ（転位発生も考慮したサイズ不整合ひずみ）に反比例し，NW 直径に比例する。したがってナノコイル形成のためには，大きな固有ひずみを発生させ，細い NW を用いるべきである。膜厚が増加すると転位発生により膜の固有ひずみが減少してしまうため，膜厚は可能な限り小さくした方がよい。膜厚が NW 直径に比べ十分に小さいとき，コア流動法によるコイル径は膜厚に依存しない。

(3) 多自由度ナノ把持装置

ナノワイヤの光学的散乱像をもとに，単一のナノワイヤを把持し，任意の場所に配置できる把持装置を開発した。これは，箸のような多様な把持操作を実現するため，8 自由度を有している。箸部は 2 個のシリコン製マイクロカンチレバーからなり，対向角が自由に調整できるように，一方のカンチレバー支持部に回転の自由度を設けている。これにより把持操作を行う。また，他方のカンチレバーは独立に XYZ 軸の平行移動が可能であり，初期の間隔が調整可能である。これにより把持力を可変できると共に把持後の NW のローリングを可能にする。さらに，2 個のカンチレバーは同時に XYZ 軸の平進移動ができると共に，2 個のカンチレバー先端が視野から外れないで，角度を変更できる視野中心を軸とした回転の自由度も有している。これにより群生する CuO NW から単一の NW を捕捉し，所定の箇所に配置する操作に成功した（図 3）。

なお，NW の光学散乱像において，直径方向の輝度分布に着目した NW の直径推定法も考案した。

(4) ナノ材料合成用管状反応炉の開発

NW やナノベルトなどの素材を合成できる反応炉を開発した。これにより，多様な形態を有する ZnO ナノ材料の合成に成功した（図 4）。これらの素材に対して本曲げ加工法を適用すれば，高次のナノ構造体の創製が期待できる。

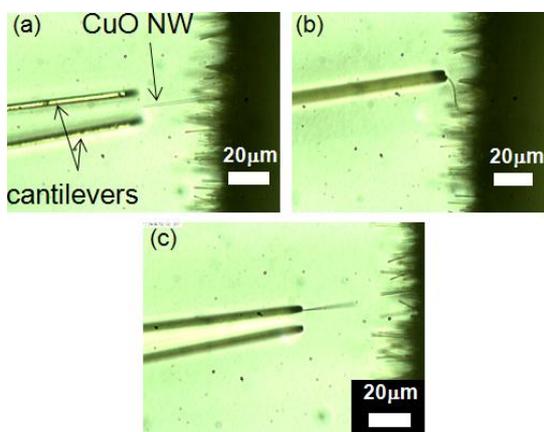


図 3 多自由度ナノ把持装置の操作例

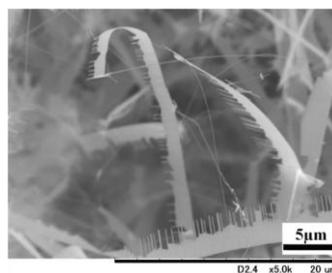


図 4 管状反応炉によるナノ材料の合成例 (ZnO ナノベルト，ナノワイヤ)

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）

〔雑誌論文〕（計 9 件）

- ① Y. Toku, M. Muraoka, Effect of film thickness on helical formation of coated nanowires in an enhanced-bending technique, Proc. ICM&P 2011, 査読有, (2011), 印刷中.
- ② M. Muraoka, Nanomachining by rubbing at ultrasonic frequency under controlled shear force, J. Nanosci. Nanotechnol., 査読有, 11 (2011), pp. 1986-1990.
- ③ M. Muraoka, S. Komatsu, Characterization of films with thickness less than 10 nm by sensitivity-enhanced atomic force acoustic microscopy, Nanoscale Res. Lett., 査読有, 6 (2011), pp. 33(1-6).
- ④ Y. Toku, M. Muraoka, Helical formation of coated nanowires by viscous flow of core material, Nanosci. Nanotechnol. Lett., 査読有, 2 (2010), pp. 197-202.
- ⑤ M. Muraoka, S. Sanada, Displacement amplifier for piezoelectric actuator based on honeycomb link mechanism, Sens. Actuator A: Physical, 査読有, 157 (2010), pp. 84-90.
- ⑥ M. Muraoka, T. Adachi, Formation of helical nanostructures by film deposition on straight nanowires, Proc. 2nd Asian Symp. Mater. Processing (CD-ROM), 査読有, Paper No. NM11 (2009), p. 1-7.
- ⑦ M. Muraoka, R. Tobe, Mechanical characterization of nanowires based on optical diffraction images of the bend shape, J. Nanosci. Nanotechnol., 査読有, 9 (2009), pp. 4566-4574.
- ⑧ M. Saka, H. Tohmyoh, M. Muraoka, Y. Ju, K. Sasagawa, Formation of metallic micro/nanomaterials by utilizing migration phenomena and technique for their applications, Mater. Sci. Forum, 査読有, 614 (2009), pp. 3-9.
- ⑨ M. Muraoka, Inverse analysis on bent shape of nanowire in fracture test to estimate the

fracture strain, Proc. 12th Int. Conf. Fracture (CD-ROM), 査読有, Paper No. T22.006, (2009), pp. 1-6.

[学会発表] (計 13 件)

- ① K. Kobayashi, Y. Toku, M. Muraoka, Manipulation of nanowires by chopsticks, Int. Conf. ATEM 2011, Kobe, Japan, September 19-21, 2011.
- ② 勝又悠樹, 村岡幹夫, 集中質量型カンチレバーのナノ接触共振による水晶ウエハの加工変質層の評価, 日本機械学会年次大会, 名古屋工業大学 (名古屋市), 2010年9月6日.
- ③ 徳 悠葵, 村岡幹夫, コア流動法によるナノコイル形成の曲率制御, 日本機械学会年次大会, 名古屋工業大学 (名古屋市), 2010年9月6日.
- ④ 臼井辰徳, 村岡幹夫, シアフォース制御下の超音波摺動によるナノリソグラフィ, 日本機械学会東北支部秋季講演会, 秋田大学 (秋田市), 2010年9月24日.
- ⑤ 徳 悠葵, 村岡幹夫, 製膜ひずみとコア流動を利用した金属被覆ナノワイヤの曲げ加工, 日本機械学会 M&M2010 材料力学カンファレンス, 長岡技術科学大学 (長岡市), 2010年10月10日.
- ⑥ Y. Toku, M. Muraoka, Enhanced Bending of Coated Nanowires Using Viscous Flow of Core Material: Production of Nanoinductance, 12th Int. Conf. Electronics Materials and Packaging (EMAP2010), Orchard Hotel, Singapore, October 26, 2010.
- ⑦ 徳 悠葵, 村岡幹夫, コア流動を利用した金属被覆ナノワイヤのコイル形成, 日本機械学会東北支部総会講演会, 東北大学 (仙台市), 2010年3月12日.
- ⑧ 徳 悠葵, 村岡幹夫, ナノワイヤの真性ひずみ誘起曲げ加工条件の実験的検討, 精密工学会東北支部学術講演会, 日本大学 (郡山市), 2009年11月28日.
- ⑨ 村岡幹夫, 岡田 生, 足立高弘, 金属被覆ナノコイルの形成メカニズムに関する分子動学的検討, 日本機械学会年次大会, 岩手大学 (盛岡市), 2009年9月15日.
- ⑩ 村岡幹夫, 勝又悠樹, 集中質量型カンチレバーの接触共振による金属ナノ材料の弾性計測, 日本機械学会年次大会, 岩手大学 (盛岡市), 2009年9月15日.
- ⑪ M. Muraoka, Optical diffraction images of nanowires and the implications for diameter estimation, 8th Seminar on Quantitative Microscopy and 4th Seminar on Nanoscale Calibration Standards and Methods (NanoScale 2008), Torino, Italy, September 23,

2008.

- ⑫ 戸部涼平, 村岡幹夫, ナノワイヤの機械特性試験 —ヤング率と破断強度の評価, 日本機械学会年次大会, 横浜国立大学 (横浜市), 2008年8月6日.
- ⑬ 村岡幹夫, 戸部涼平, ナノワイヤの付着力, 日本機械学会年次大会, 横浜国立大学 (横浜市), 2008年8月6日.

[図書] (計 2 件)

- ① M. Saka (Ed.), M. Saka, K. Sasagawa, M. Muraoka, H. Tohmyoh, Y. Ju (Authors), Metallic Micro and Nano Materials - Fabrication with Atomic Diffusion, Springer, 2011, 全 225 頁 (分担 pp. 93-141, pp. 173-220).
- ② 野口 元 編, 村岡幹夫, 他 26 名著, ハニカム構造の応用と機能 —ハニカム構造材料からナノハニカム構造まで—, シーエムシー出版, 2008, 全 285 頁 (分担 pp. 228-241).

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 1 件)

名称: 弾性係数を測定する走査型プローブ顕微鏡及びそれに使用するプローブ

発明者: 村岡幹夫

権利者: 村岡幹夫, 株式会社アクトラス

種類: 特許

番号: 特許第 4328474 号

取得年月日: 2009年6月19日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.mech.akita-u.ac.jp/~muraoka/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村岡 幹夫 (MURAOKA MIKIO)

秋田大学・大学院工学資源学研究科・准教授

研究者番号: 50190872

(2) 研究分担者

左近 拓男 (SAKON TAKUO)

秋田大学・大学院工学資源学研究科・准教授

研究者番号: 80271964

足立 高弘 (ADACHI TAKAHIRO)

秋田大学・大学院工学資源学研究科・准教授

研究者番号: 60344769