

平成 22 年 4 月 1 日現在

研究種目：若手研究(B)
研究期間：2008～2009
課題番号：20760001
研究課題名(和文) 中空ナノ粒子の磁気渦励起を利用した新しいスピン光機能素子の開発
研究課題名(英文) Spin-optoelectronics devices based on novel magnetic responses in hollow curved nanostructures

研究代表者
島 弘幸 (SHIMA HIROYUKI)
北海道大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：40312392

研究成果の概要(和文)：本研究では、中空曲面状ナノ構造体の電磁特性を理論的に解析し、その特異な幾何形状効果を活用した新規量子デバイスを設計するための基礎理論構築を行った。特に、曲面形状を示すナノ磁性薄膜・ナノ伝導体の物理特性と幾何曲率・捩率との相関関係を定量的に精査することで、具体的素子の最適化設計に必要な基礎知見を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：This project focuses on the electromagnetic response of hollow nanostructures with curved geometry, aiming to design a novel class of quantum devices based on curved nanostructures. Quantitative analyses of the correlation between physical properties and the spatial distribution of geometric curvature (or torsion) inherent to the systems have provided fundamental knowledge that should be required for an optimal design of the devices.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用物性・結晶工学

キーワード：ナノ構造体, 幾何形状効果, 曲面量子系

1. 研究開始当初の背景

今日の情報通信技術は、ハードディスクに代表される磁気デバイスと、トランジスタやレーザーに代表される半導体デバイスを基礎に成立している。しかしこれら二つのデバイス技術は近い将来、高密度化の面において限界に達しつつあることが認識されている。そのため、ナノスケール領域で発現する量子効果を効率的に活用した新しい情報処理技術の開拓が強く求められている。

上記の需要を満たす次世代テクノロジーとして広く注目されるのが、電子のスピン自由度を活用したスピントロニクスである。これは、電子の内部自由度とその相関効果を人為的に制御し、かつ量子情報として活用する技術であり、電荷のみを操作タグとする従来の手法を遙かに凌ぐ高速化・高集積化・低消費電力化が達成される。ただしナノスケールでは、界面効果やデコヒーレンス・超常磁性限界など、ナノ特有の原理的障害が顕在化する

る。従ってそのスピン制御の実現には、デバイス素子に最適な機能性物質の探索や、新しい制御理論の構築が不可欠であるが、その遂行は未だ発展の途にあるのが現状である。

2. 研究の目的

本課題の目的は、中空球殻構造を有するナノ磁性体の磁気特性を理論的に解析し、その特異な磁気渦ダイナミクスを活用した新規なスイッチング素子をデザインすることにある。国内外のこれまでの実験研究において合成に成功している各種の無機中空磁性体は、以下のような優れた操作性を示す。

- ①光や圧力などの外場印加によって磁気特性が大きく変化する「高応答性」。
 - ②原子配列構造・スピン渦構造をかなりの程度恣意的に構築できる「構造設計性」。
- すなわち中空球殻磁性体は、従来のバルク型磁性材料に比べ遙かに高い自由度を有している。よって、この柔軟性に基づく新規機能の発現・およびその操作性を活用した革新的なスイッチング素子の開発が期待できる。

3. 研究の方法

研究初年度は、磁性体の形状と磁気物性との相関を定量的に明らかにすることを目的に、曲面型ナノ磁性体の磁化秩序と磁気感受率をモンテカルロ・シミュレーションにより数値的に解析した。系の幾何曲率効果を反映した磁気格子模型を独自に開発し、その磁化過程と磁気渦分布の時間発展を広範囲の温度領域において数値的に追跡した。

以上の成果を踏まえ次年度の研究では、曲率効果が顕著に現れると予想される負曲率領域に焦点を絞り、曲面状磁性薄膜が示す磁気渦凍結状態の発現機構とそのダイナミクスを、数値計算・理論解析の両面から多角的に分析した。これと並行して次年度研究では、中空ナノ構造体の代表例であるピーナッツ型フラレン重合体と振れ量子細線について、その曲面幾何形状と系の電磁応答との相関を理論的に解析した。具体的には、曲面量子系を記述する有効運動方程式を導出し、曲率テンソル項が誘起する空間変調電磁場が系の量子状態・量子伝導に与える影響を定量的に見積もった。

4. 研究成果

初年度の研究では、磁性体の形状と磁気物性との相関を定量的に明らかにするため、曲面型ナノ磁性体の磁化秩序と磁気感受率に対する系の幾何曲率効果をモンテカルロ・シミュレーションにより数値的に解析した。その結果、曲面形状を有するナノ磁性体の表面にはその幾何学的曲率を反映したフラストレーション効果が働くこと、および、低温下における磁性体表面の磁気秩序過程におい

てはそのフラストレーションに起因する特異な磁気渦凍結状態が発現することが明らかとなった。この理論結果は、中空球殻型のナノ磁性体において系の幾何曲率に起因するヒステリシスが観測されることを示すものであり、ナノ構造体の磁気操作技術の観点から非常に興味深い成果である。

上記に加えて初年度研究では、磁気相転移温度をまたぐ広範囲の温度領域においてその秩序過程の時間変化を追跡計算した。その結果、表面曲率分布の恣意的変化による磁気秩序核の生成・消滅を制御するための基礎データを取得することができた。その成果は、中空球殻表面の磁気渦構造と秩序過程を光・磁場・格子歪み等によりコヒーレント制御する技術の確立を目指す本申請課題の目的達成に対して理論的基盤を供するものである。

上の成果を踏まえ次年度の研究では、曲率効果が顕著に現れると予想される負曲率領域に焦点を絞り、上記のフラストレーションが引き起こす特異なスピン渦凍結状態の発現機構とそのダイナミクスを理論的に解明した。その結果、負曲率領域を取り囲む境界線上では、領域内部とは本質的に異なる非常に遅い磁気緩和が現れることを明らかにした。この理論結果は、中空曲面状ナノ磁性体に特有なスピン秩序とスピン渦励起の存在を示唆するものである。

これらと並行して次年度の研究では、中空ナノ構造体の代表例であるピーナッツ型フラレン重合体と振れ量子細線について、その曲面幾何形状と系の電磁応答との相関を理論的に解析した。その結果、前者の系では凹凸表面を伝う量子(電子・フォノン等)の集団励起状態と伝導特性が、その表面曲率分布に応じて有意に変化することがわかった。また後者の系では、原子の振れ配列構造が有効的な磁気相互作用を引き起こし、非自明な量子位相付加効果を与えることを明らかにした。さらに後者の範疇に入る振れ光導波路を電磁波が伝う場合、屈折率分布の振れ度合いの増加とともに長波長モードが減衰するという振率誘起エバネッセントモードの存在を初めて明らかにした。以上の研究遂行により、中空曲面状ナノ構造体の磁気特性を電磁的・力学的に操作するための理論基盤を構築するという本申請課題の目的を達成することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 15 件)

- (1) H. Taira and H. Shima, Torsion-induced persistent current in a twisted quantum ring, *Journal of Physics: Condensed Matter* 22 (2010) 075301_1-5
- (2) M. Sato, H. Shima and K. Iiboshi, Core-tube morphology of multiwall carbon

- nanotubes, *International Journal of Modern Physics B* **24** (2010) 288-294
- (3) H. Shima, H. Yoshioka and J. Onoe, Curvature effects on collective excitations in dumbbell-shaped hollow nanotubes, *Physica B* **42** (2010) 1151-1154
- (4) S. Ono and H. Shima, Low-temperature resistivity anomalies in periodic curved surfaces, *Physica B* **42** (2010) 1224-1227
- (5) J. Onoe, T. Ito, S. Kimura, H. Shima, Y. Toda, and H. Yoshioka, One-dimensional metallic peanut-shaped nanocarbon with positive and negative Gaussian curvatures: Toward a new science of quantum electronic systems on Riemannian surfaces, *Fullerene, Nanotubes, and Carbon Nanostructures* **18** (2010) accepted.
- (6) Y. Sakaniwa and H. Shima, Survival of short-range order in the Ising model on negatively curved surfaces, *Physical Review E* **80** (2009) 021103_1-6
- (7) S. K. Baek, P. Minnhagen, H. Shima and B. J. Kim, Phase transition of q-state clock models on heptagonal lattices, *Physical Review E* **80** (2009) 011133_1-8
- (8) H. Shima and M. Sato, Pressure-induced structural transitions in multi-walled carbon nanotubes, *Physica Status Solid A* **206** (2009) 2228-2233
- (9) M. Sato and H. Shima: Buckling Characteristics of Multiwalled Carbon Nanotubes under External Pressure, *Interactions and Multiscale Mechanics* **2** (2009) 209-222
- (10) 島 弘幸, 小野頌太, 平 久夫: 曲面量子系の基礎と物質科学への適用、*表面科学* **30** (2009) 652-658
- (11) S. K. Baek, H. Shima and B. J. Kim, Curvature-induced frustration in the XY model on hyperbolic surfaces, *Physical Review E* **79** (2009) 060106_1-4
- (12) S. Nishino, K. Yakubo and H. Shima, Finite size effects in infinitely large electronic systems with correlated disorders, *Physical Review B* **79** (2009) 033105_1-4
- (13) S. Ono and H. Shima, Tuning the electrical resistivity of semiconductor thin films by nanoscale corrugation, *Physical Review B* **79** (2009) 235407_1-6
- (14) H. Shima, H. Yoshioka and J. Onoe, Geometry-driven shift in the Tomonaga-Luttinger exponent of deformed cylinders, *Physical Review B* **79** (2009) 201401_1-4
- (15) H. Shima and M. Sato, Multiple radial corrugations in multiwalled carbon nanotubes under pressure, *Nanotechnology* **19** (2008) 495705_1-8
- [学会発表] (計 31 件)
- (1) 小野頌太, 島 弘幸: 一次元ピーナツ型 C60 ポリマーのフォノン分散関係, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010. 3. 20-23, 岡山大学
- (2) 小野頌太, 島 弘幸: 曲面型ナノ構造のフォノン分散における幾何形状効果, 第 8 回 HSS ワークショップ・第 1 回 GFRG 研究会ワークショップ合同会議, 2010. 3. 11, シオノギ創薬イノベーションセンター, 札幌
- (3) H. Shima: Deformation Effects on Curved Liquid Crystal Membranes, LaCaN Seminar Series, 2009. 12. 14, Universitat Politecnica de Catalunya, Spain
- (4) H. Taira and H. Shima: Current-induced AB effect in a twisted quantum ring, 50 years of the Aharonov-Bohm effect, 2009. 10. 11-14, Tel Aviv University, Israel
- (5) 平 久夫, 島 弘幸: 振れ量子リングにおける特異 AB 振動とチャネル位相相関, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 2009. 9. 25-28, 熊本大学
- (6) J. Onoe, T. Ito, H. Shima, Y. Toda, H. Yoshioka and S. Kimura: Electronic and optical properties of one-dimensional C60 polymer with positive and negative Gaussian curvatures - a new quantum system-, 20th European Conference on Diamond, Diamond-Like Materials, Carbon Nanotubes, and Nitrides, 2009. 9. 6-10, Athens Ledra Marriott Hotel, Athens, Greece
- (7) S. Ono and H. Shima: Curvature-Induced Resistivity Enhancement in Periodically curved Layers, 3rd International Workshop on Physics and Technology of Thin Films, 2009. 8. 26-28, Fontana Hotel Lepolampi, Espoo, Finland
- (8) (招待講演)H. Shima: Anomalous Electron Transport in Curved Nanostructures, 22th DV-X α Symposium, 2009. 8. 5-7, Kagawa University, Kagawa
- (9) S. Ono and H. Shima: Low-Temperature Resistivity of Periodic Curved Surfaces, The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, 2009. 7. 19-24, Kobe International Conference Center, Kobe, Japan
- (10) H. Shima, H. Yoshioka and J. Onoe: Tomonaga-Luttinger exponent of peanut-shaped hollow nanocylinders, The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, 2009. 7. 19-24, Kobe International Conference Center, Kobe, Japan

- (11) J. Onoe, T. Ito, H. Shima, Y. Toda, H. Yoshioka and S. Kimura: One-dimensional peanut-shaped C60 polymer as a new quantum system, 5th International Conference on Diffusion in Solids and Liquids, 2009. 6. 24-26, Grand Hotel Palazzo Carpegna, Roma, Italy
- (12) (招待講演) 島 弘幸: 曲面型ナノ構造体の電子状態, 日本化学会第 89 春季年会, 2009. 3. 27-30, 日本大学船橋キャンパス, 千葉県船橋市
- (13) 平 久夫, 島 弘幸: 電流誘起型 Ahaonov-Bohm 振動, 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009. 3. 27-30, 立教大学池袋キャンパス, 東京都豊島区西池袋
- (14) S. Ono and H. Shima: Electron-electron Umklapp scattering in Periodic Curved Surfaces, International Symposium on Topological Science and Technology for Young Researchers 2009, 2009. 3. 3-5, Sapporo-Kourakuen Hotel, Sapporo, Japan
- (15) I. Hasegawa, K. Saito and H. Shima, Point defect configuration in a deformed liquid crystal membrane, International Symposium on Topological Science and Technology for Young Researchers 2009, 2009. 3. 3-5, Sapporo-Kourakuen Hotel, Sapporo, Japan
- (16) M. Sato and H. Shima: Mechanism of Radial Corrugation in Many-Walled Carbon Nanotubes, 36th Fullerene-Nanotubes General Symposium, 2009. 3. 2-4, Meijo University, Nagoya, Japan
- (17) H. Shima, H. Yoshioka, J. Onoe: Geometric curvature effects on Tomonaga-Luttinger states of one-dimensional peanut-shaped C60 polymers, 36th Fullerene-Nanotubes General Symposium, 2009. 3. 2-4, Meijo University, Nagoya, Japan
- (18) 島 弘幸: 双曲平面スピン模型の相転移における曲率効果, 首都大学東京, 首藤研究室セミナー, 2009. 2. 18, 首都大学東京, 東京都八王子市
- (19) (招待講演) 島 弘幸: 曲面量子系の物理学, 東京工業大学原子炉工学研究所学術講演会, 2009. 1. 23, 東京工業大学, 東京都目黒区大岡山
- (20) I. Hasegawa and H. Shima: Elastic Theory of disclinations on a smectic C deformed membrane, Juelich Soft Matter Days 2008, 2008. 11. 11-14, Bonn, Germany
- (21) 島 弘幸: 曲面スピン模型の臨界現象, 第 66 回形の科学シンポジウム, 2008. 10. 31-11. 3, 京都大学, 京都府京都市
- (22) S. Ono and H. Shima: Curvature effects on the electronic resistivity of a corrugated nanosurface, Nanotechnology Materials and Devices Conference 2008, 2008. 10. 20-22, Kyoto University, Kyoto, Japan
- (23) H. Taira and H. Shima: Torsion-induced AB oscillation in a twisted coherent ring, Nanotechnology Materials and Devices Conference 2008, 2008. 10. 20-22, Kyoto University, Kyoto, Japan
- (24) 長谷川 偉創, 島 弘幸: 曲面状液晶薄膜中の配向欠陥の安定位置, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008. 9. 20-23, 岩手大学上田キャンパス, 岩手県盛岡市
- (25) 平 久夫, 島 弘幸: 振れ量子リングにおける振率誘起型永久電流, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008. 9. 20-23, 岩手大学上田キャンパス, 岩手県盛岡市
- (26) 長谷川 偉創, 島 弘幸: スメクチック C 液晶薄膜における分子配向メカニズムと膜形状効果の解析, 2008 年日本液晶学会討論会, 2008. 9. 16-19, キャンパスプラザ京都、京都府京都市
- (27) H. Shima: Pressure-Induced Structural Transitions in Multiwall Carbon Nanotubes, Trend in Nano Technology 2008, 2008. 9. 1-8, Oviedo, Spain
- (28) H. Taira and H. Shima: Torsion-induced persistent current in a twisted quantum ring, Frontiers of Quantum and Mesoscopic Thermodynamics, 2008. 7. 28-8. 2, Prague, Czech Republic
- (29) I. Hasegawa, and H. Shima: Surface curvature effects on disclinations in a smectic C membrane, International Symposium on Non-Equilibrium Soft Matter, 2008. 6. 2-5, 京都大学, 京都府京都市
- (30) (招待講演) 島 弘幸: 曲面格子模型の相転移シミュレーション, 第 25 回 HSS セミナー, 2008. 5. 30, 北海道大学、北海道札幌市
- (31) (招待講演) H. Shima and M. Sato: Nanoscale Mechanics of Carbon Nanotubes, The 4th International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics, 2008. 5. 26-28, Jeju, Korea
- [図書] (計 1 件)
- (1) H. Shima and T. Nakayama: Higher Mathematics for Physics and Engineering, Springer-Verlag (2010) in press.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

島 弘幸 (SHIMA HIROYUKI)
北海道大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 40312392

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし