

平成 22 年 4 月 1 日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19560001  
 研究課題名（和文） 量子ポンピングによるゼロバイアス伝導特性の理論解明とその応用  
 研究課題名（英文） Theoretical approach to zero-bias transport by quantum pumping and its applications  
 研究代表者  
 矢久保 考介（KOUSUKE YAKUBO）  
 北海道大学・大学院工学研究科・教授  
 研究者番号：40200480

## 研究成果の概要（和文）：

本研究では、申請者らが開発した新しい転送行列法を用いることで、量子ポンピングによるゼロバイアス定常電流の諸性質を理論的に解明した。特に、応用上重要な大きな電荷電流や純粋スピン流（すなわち、電荷電流は完全にゼロであるがスピン流は有限であるような流れ）が、非断熱的な量子ポンピングを用いることによって極めて単純なシステムにおいても実現できることを示した。

## 研究成果の概要（英文）：

In this project, we have clarified theoretically several properties of zero-bias currents induced by a quantum pumping mechanism by utilizing a novel transfer matrix approach developed by us. In particular, we found that non-adiabatic quantum pumping in a rather simple system can realize large magnitudes of charge currents or pure spin currents without accompanying any charge currents.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：「応用物理学・基礎工学」・「応用物性・結晶工学」

キーワード：半導体

## 1. 研究開始当初の背景

導体に電流を流すには、通常系の両端に電位差を印加し、それにより作られるポテンシャル勾配に沿ってキャリアを移動させる必要がある。一方、キャリアの量子力学的性質が顕在化するナノスケール領域では、時間的

に変動するポテンシャルを印加することにより、ゼロバイアスであっても定常的な電流を流すことが可能となる。量子ポンピングと呼ばれるこの現象は、単に新しい量子現象の一つとして興味深いだけでなく、ジュール損失を全く伴わない純粋なスピン流を生成す

るメカニズムの一つとして工学的にも注目されている。量子ポンピングに関する理論的研究も精力的に行われているが、その多くはポテンシャルの時間変化が非常に遅い場合（断熱極限）に限られており、非断熱的なポンピングを行った場合どのような伝導特性を示すか、更にはどの程度遅く時間変動させれば断熱的とみなせるのか（断熱条件）についてほとんど知見が得られていなかった。特に、断熱極限における量子ポンプ電流やスピン流の大きさは、ポンピング振動数に比例することが知られており、実用に向けた大きなポンプ電流を得るには、高い振動数でポンプしなければならないことが明らかになっている。しかしながら、高振動数でのポンピングは断熱条件を破ることになり、従来の理論が適用できなくなる。そのため、大きな電荷電流やスピン流を生成させる非断熱的なポテンシャル変動による量子ポンピング現象の理論的説明は急務の課題となっている。

## 2. 研究の目的

本研究では、申請者らが開発した新しい転送行列法を用いることで、量子ポンピングによるゼロバイアス定常電流の諸性質を理論的に解明する。特に、量子ポンピングに対する断熱理論の適用限界、すなわち開放系における断熱条件を明らかにし、断熱的量子ポンピングと非断熱ポンピングの質的な差異を明確にする。また本研究では、応用上重要な大きな電荷電流や純粋スピン流（すなわち、電荷電流は完全にゼロであるがスピン流は有限であるような流れ）が、非断熱的な量子ポンピングを用いることによって極めて単純なシステムにおいても実現できることを示す。さらに、効率的な純粋スピン流（低ノイズの大スピン流）を得るための条件を明らかにし、これを実現するシステムを理論的にデザインする。

## 3. 研究の方法

本研究では、量子ポンピングに関する従来の研究の問題点を解決・解明するために、新しい転送行列法を用いた理論研究を行う。特に、応用上重要な大きなポンプ電流を実現するために必要な非断熱量子ポンピング現象を系統的に理解しようとする試みは、世界的に見ても稀である。具体的には、まず光支援トンネリング現象を研究するために以前我々が開発した転送行列法（Floquet 散乱を考慮した方法）を、位相差を持った複数の時間変動ポテンシャル障壁系に適用できるように拡張する。次に、この転送行列法を量子ポンピング系に適用することで、非断熱量子ポンピングによるポンプ電流の計算を行う。これと同じ系における断熱的ポンプ電流をBrouwer 公式により計算し、両者を比較する

ことで、断熱近似に基づいた理論の限界がどこにあるのかを明らかにする。特に、時間変動ポテンシャルの振動数とサイドバンド状態のエネルギー線幅を比較し、両者の大小関係と断熱条件との関係を解明する。また、現実の低次元電子の量子ポンピングにおけるポンプ電流密度の空間分布を明らかにするため、転送行列から逆算される電流分布を求める。これにより、系の形状とポンプ電流密度がどのような関係にあるかを明らかにする。以上の研究成果をもとに、非断熱ポンピングを用いた純粋スピン流生成について考察する。断熱ポンピングによる純粋スピン流生成には系の量子カオス性が必要であり、そのため系の伝導特性は強いサンプル依存性を示すことになる。非断熱ポンピングの場合、Floquet 散乱により形成される複数のサイドバンド間の複雑な干渉効果が、量子カオスと同様の効果をもたらすため、1次元導電性分子鎖のような量子カオス性を示さない単純な系においても大きな純粋スピン流が期待できる。このような純粋スピン流を高効率で生成するための条件を、スピン流ノイズの解析と外部磁場が軌道波動関数に与える影響を考慮することにより明らかにする。

## 4. 研究成果

平成19年度では、まず転送行列法の量子ポンピング系への拡張を行った。光支援トンネリングの研究において我々が開発したFloquet 散乱を取り入れた転送行列法を拡張することで、この拡張に成功した。この方法を用いることにより、ポンピング過程の断熱・非断熱を問わず、任意の振動数・任意の静的ポテンシャル形状・任意の動的ポテンシャル形状に対しポンプ電流を定量的に計算することが可能となる。また、次年度以降の研究のために、磁場が印加された量子ポンピング系にも適用可能なように転送行列アルゴリズムが拡張された。ポンプ電流を計算する転送行列法を利用することにより、量子ポンピングによる試料内の電流パターンが計算できることに着目し、実際に2次元電子系におけるポンプ電流の空間パターンを計算した。この計算により、量子ポンピングが確かにサイドバンド成分同士の複雑な干渉によって生じていることが明らかとなったのみならず、どのようなポンピングシステムを設計すればより大きなポンプ電流が得られるかに関する知見が得られた。この計算では、電荷電流とスピン流を別個に表示させることが可能なため、スピンと電荷の空間的な分離を視覚的に理解することもできる。さらに初年度では、系に不純物による不規則さを導入してポンプ電流の大きさを調べた。その結果、固有状態としての電子波動関数の局在長が系のサイズと同程度となる時にポンプ電

流が最大となることが分った。このことは、量子ポンピングには複雑な量子干渉を誘起させるためのカオス性が必要である事を示している。

平成20年度以降は、垂直磁場が印加された2次元電子系において軌道波動関数のランダウ量子化とスピンに対する異常ゼーマン効果の両方を考慮し、純粋スピン流の大きさと系の不純物散乱との関係を調べた。その結果、各ランダウバンドにおいて、フェルミ面上の電子の局在長が系のサイズと一致する際に純粋スピン流が最大となることが明らかになった。このことは、フェルミエネルギーがランダウバンド中心から僅かにずれた所に位置するように外部磁場を調整することで、効率的なスピン・ポンピングが実現されることを意味している。また本研究では、何故このような条件の下で最大スピン流が得られるのかに対する物理的理由も明らかにした。さらに、前年度までの研究で得られた電流パターンの計算方をこの系に適用することで、純粋スピン流が実際に系を流れる経路と不純物散乱との関係を視覚的にも明らかにした。最終年度では、伝導性高分子鎖におけるスピンプンピングの実現を意識して、1次元伝導における局在の効果も明らかにした。スケール理論によると、1次元系では僅かな不規則性が系に導入された場合でも波動関数は空間的に局在することが知られている。しかしながら、最近の研究によると、長距離相関をもった不規則ポテンシャルの場合、乱れの強さや電子エネルギーによっては、非局在状態が存在しうることが示唆されている。1次元系における非局在状態の存在は、伝導性高分子鎖のスピンプンピング効率を高める可能性があるため、そのような量子状態の性質を解明することは極めて重要である。本研究では、大規模数値計算を行うことによって、局在状態から非局在状態への変化が転移ではなくクロスオーバーであることを明らかにした。

##### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計42件)

- (1) K. Yakubo and M. Mitobe, Non-fractal critical clusters at the percolation transition, *Journal of the Physical Society of Japan* **76** (2007) 034004.
- (2) J. J. Xiao, K. Yakubo, and K. W. Yu, Variety of normal modes and their transition behaviors in graded elastic networks: Square networks with a diagonal gradient, *Journal of the Physical Society of Japan* **76** (2007) 024602.
- (3) J. J. Xiao, K. Yakubo, and K. W. Yu, Global phase diagram of one-dimensional

graded diatomic elastic chains: a diagrammatic approach to identifying vibrational normal modes, *Journal of Physics-Condensed Matter* **19** (2007) 026224.

- (4) J. J. Xiao, K. Yakubo, and K. W. Yu, Vibrational excitations in graded elastic chains, *International Journal of Modern Physics B* **21** (2007) 4184-4189.
- (5) K. Yakubo, J. J. Xiao, and K. W. Yu, Confined vibrational normal modes in graded elastic networks: Gradons, *Physica B-Condensed Matter* **394** (2007) 262-266.
- (6) J. J. Xiao, K. Yakubo, and K. W. Yu, Coupled plasmon modes and their localization in graded plasmonic chains, *Physica B-Condensed Matter* **394** (2007) 208-212.
- (7) W. J. Tian, T. Nakayama, J. P. Huang, and K. W. Yu, Scaling behaviours in settling process of fractal aggregates in water, *EPL* **78** (2007) 46001.
- (8) H. Shima, Y. Sakaniwa, and I. Hasegawa, Short-time relaxation of the Ising model on curved surfaces, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **310** (2007) E465-E467.
- (9) Y. Sakaniwa, I. Hasegawa, and H. Shima, New universality class of the Ising model on curved geometry, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **310** (2007) 1401-1403.
- (10) I. Hasegawa, Y. Sakaniwa, and H. Shima, Two critical temperatures of the spin-lattice model on donut-shaped surfaces, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **310** (2007) 1407-1409.
- (11) H. Taira and H. Shima, Curvature effects on surface electron states in ballistic nanostructures, *Surface Science* **601** (2007) 5270-5275.
- (12) I. Hasegawa, Y. Sakaniwa, and H. Shima, Novel scaling behavior of the Ising model on curved surfaces, *Surface Science* **601** (2007) 5232-5236.
- (13) Y. Sakaniwa and H. Shima, Numerical study on critical exponents of hyperbolic Ising lattice, *Computer Physics Communications* **117** (2007) 189-189.
- (14) K. Yakubo, J. J. Xiao, and K. W. Yu, Localized vibrations in graded lattices: Gradons, *Journal of Physics: Conference Series* **92** (2007) 012008.
- (15) H. Shima, S. Nishino, and T. Nakayama, Peculiar behaviors of excited modes in

- harmonic chains with long-range correlated disorder, *Journal of Physics: Conference Series* **92** (2007) 012156.
- (16) H. Taira and H. Shima, Electronic states in cylindrical surfaces with local deformation, *Journal of Physics: Conference Series* **61** (2007) 1142-1146.
- (17) S. Furuya and K. Yakubo, Generalized strength of weighted scale-free networks, *Physical Review E* **78** (2008) 066104.
- (18) M. J. Zheng, M. Goda, K. Yakubo, and K. W. Yu, Anomalous size dependence of inverse participation ratio of eigenfunctions in graded elastic lattices, *Journal of the Physical Society of Japan* **77** (2008) 094601.
- (19) K. Yakubo and H. Obuse, Anomalous localized states at the Anderson transition, *European Physical Journal* **161** (2008) 233-247.
- (20) M. Kumagai, A. Taguchi, T. Takagahara, T. Ohno, and K. Yakubo, Topological aspects of excitons in artificial structure, *Solid State Communications* **145** (2008) 154-158.
- (21) T. Nakayama, E. Kaneshita, Interacting dipoles in type-I clathrates: Why glass-like though crystalline?, *Europhysics Letters* **84** (2008) 66001.
- (22) H. Shima and M. Sato, Multiple radial corrugations in multiwalled carbon nanotubes under pressure, *Nanotechnology* **19** (2008) 495705.
- (23) S. Nishino, K. Yakubo, and H. Shima, Finite size effects in infinitely large electronic systems with correlated disorders, *Physical Review B* **79** (2009) 033105.
- (24) M. Mitobe and K. Yakubo, Distribution of Fluctuating Fractal Dimensions of Finite Critical Systems, *Journal of the Physical Society of Japan* **78** (2009) 074006.
- (25) M. J. Zheng, J. J. Xiao, K. Yakubo, and K. W. Yu, Energy Relaxation in Damped Two-Dimensional Graded Elastic Lattices, *Journal of the Physical Society of Japan* **78** (2009) 124603.
- (26) M. Mitobe and K. Yakubo, Fluctuations of the Order Parameter in Critical Complex Networks, *Journal of the Physical Society of Japan* **78** (2009) 124002.
- (27) S. Furuya and K. Yakubo, Statistical properties of weighted complex networks characterized by metaweights, *Physica A-Statistical Mechanics and its Applications* **289** (2009) 1265-1272.
- (28) S. Itoh, T. Nakayama, R. Kajimoto, and M. A. Adams, Single-length-scaling analysis for antiferromagnetic fractons in dilute Heisenberg system  $\text{RbMnO}_4\text{MgO}_6\text{F}_3$ , *Journal of the Physical Society of Japan* **78** (2009) 013707.
- (29) T. Nakayama, THz frequency dynamics of network/guest atom systems: liquid water, clathrates, and network glasses, *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A* **600** (2009) 267-269.
- (30) T. Nakayama, Fractal structures in condensed matter physics, *Encyclopedia of Complexity and System Science* (2009) 1-15
- (31) H. Shima, H. Yoshioka and J. Onoe, Geometry-driven shift in the Tomonaga-Luttinger exponent of deformed cylinders, *Physical Review B* **79** (2009) 201401.
- (32) S. Ono and H. Shima, Tuning the electrical resistivity of semiconductor thin films by nanoscale corrugation, *Physical Review B* **79** (2009) 235407.
- (33) 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.
- (34) Y. Sakaniwa and H. Shima, Survival of short-range order in the Ising model on negatively curved surfaces, *Physical Review E* **80** (2009) 021103.
- (35) 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.
- (36) H. Shima and M. Sato, Pressure-induced structural transitions in multi-walled carbon nanotubes, *Physica Status Solid A* **206** (2009) 2228-2233.
- (37) H. Taira and H. Shima, Torsion-induced persistent current in a twisted quantum ring, *Journal of Physics: Condensed Matter* **22** (2010) 075301.
- (38) H. Shima, H. Yoshioka and J. Onoe, Curvature effects on collective excitations in dumbbell-shaped hollow nanotubes, *Physica B* **42** (2010) 1151-1154.

他 4 編

[学会発表] (計 57 件)

- (1) K. Yakubo: Anomalous Localized States at the Anderson Transition, 392nd WE-Heraeus-Seminar, September 2-5, 2007,

- TU Ilmenau, Germany.
- (2) K. Yakubo, J. J. Xiao, and K. W. Yu: Localized Vibrations in Graded Lattices: Gradons, 12th International Conference on Phonon Scattering in Condensed Matter (Phonons 2007), July 15-20, 2007, Paris, France.
  - (3) 矢久保考介, J. J. Xiao, K. W. Yu: 不規則傾斜格子系における局在中心分布の特異な偏り、日本物理学会第 62 回年次大会、平成 19 年 9 月 21 日～24 日、北海道大学(札幌)。
  - (4) 古谷修平、矢久保考介: 重み付き複雑ネットワークに対するメタウエイト解析、日本物理学会第 62 回年次大会、平成 19 年 9 月 21 日～24 日、北海道大学(札幌)。
  - (5) 西野信也、矢久保考介: 2次元フラットバンド不規則電子系における金属-絶縁体転移、日本物理学会第 62 回年次大会、平成 19 年 9 月 21 日～24 日、北海道大学(札幌)。
  - (6) 矢久保考介: 乱れに起因した臨界現象における秩序変数の空間構造とフラクタル性の揺らぎ、第 5 回 HSS ワークショップ、平成 19 年 3 月 15 日、北海道大学(札幌)。
  - (7) H. Shima, S. Nishino, and T. Nakayama: Peculiar behaviors of excited modes in harmonic chains with correlated disorder, 12th International Conference on Phonon Scattering in Condensed Matter (Phonons 2007), July 15-20, 2007, Paris, France.
  - (8) Y. Sakaniwa and H. Shima: Ising phase transition on negatively curved geometry, 23rd International Conference on Statistical Physics (Statphys23), July 9-13, 2007, Genova, Italy.
  - (9) K. Yakubo: Fractality and Small-World Property of Complex Networks, 5th European Conference on Complex Systems, 2008 年 9 月 16 日, Jerusalem, Israel.
  - (10) K. Yakubo: Fractal Property of Critical Complex Networks, International Workshop on Complex Systems and Sociology, 2008 年 11 月 29 日, Seoul, South Korea.
  - (11) S. Furuya and K. Yakubo: Meta-weight analysis of weighted complex networks, NSC Winter Workshop 2008, March 8-9, 2008, Hokkaido University, Sapporo.
  - (12) 矢久保考介: 複雑ネットワークの臨界性とフラクタル性、第 6 回 HSS ワークショップ、平成 20 年 3 月 19 日、北海道大学(札幌)。
  - (13) 水戸部六美、矢久保考介: 秩序変数の普遍臨界揺らぎとそのフラクタル次元分布、日本物理学会 2008 年秋季大会、2008 年 9 月 23 日、岩手大学。
  - (14) 矢久保考介, 合田正毅, M. Zheng, K. W. Yu: 傾斜格子系における振動励起の空間的拡がり: グレイドン・モードの IPR 解析、日本物理学会 2008 年秋季大会、2008 年 9 月 23 日、岩手大学。
  - (15) 古谷修平、矢久保考介: 科学技術共著論文ネットワークに対するメタウエイト解析、日本物理学会第 63 回年次大会、平成 20 年 3 月 22 日～26 日、近畿大学(東大阪)。
  - (16) 岡百合子、矢久保考介: スケールフリー・ネットワークの臨界性とフラクタル性、日本物理学会第 63 回年次大会、平成 20 年 3 月 22 日～26 日、近畿大学(東大阪)。
  - (17) 川崎文也、矢久保考介: 自己組織化臨界ネットワークのフラクタル性: 効率化された解析法を用いて、日本物理学会第 63 回年次大会、平成 20 年 3 月 22 日～26 日、近畿大学(東大阪)。
  - (18) 西野信也、矢久保考介, 島弘幸: 1 次元長距離相関不規則系における量子グレイドン状態、日本物理学会 2008 年秋季大会、2008 年 9 月 20 日、岩手大学。
  - (19) 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.
  - (20) 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。
  - (21) 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.
  - (22) H. Shima: Pressure-Induced Structural Transitions in Multiwall Carbon Nanotubes, Trend in NanoTechnology 2008, 2008.9.1-8, Oviedo, Spain.
  - (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, Japan.
  - (24) 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, Japan.
  - (25) 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.
  - (26) M. Mitobe and K. Yakubo: Distribution Function of Fractal Dimensions characterizing Finite Critical Systems,

- The 9th Asia-Pacific Complex Systems Conference, 2009.11.4-7, 中央大学.
- (27) F. Kawasaki and K. Yakubo: Crossover from Fractal to Small-world Properties in Complex Networks, The 9th Asia-Pacific Complex Systems Conference, 2009.11.4-7, 中央大学.
- (28) 鈴木啓太, 古谷修平, 矢久保考介: 医薬品処方関連ネットワークの構造解析: ローカルワールドなネットワーク, 日本物理学会第64回年次大会, 2009年3月30日, 立教大学.
- (29) 古谷修平, 矢久保考介: 重み付き複雑ネットワークに対するメタウェイトを用いた統計解析, 日本物理学会第64回年次大会, 2009年3月30日, 立教大学.
- (30) 川崎文也, 矢久保考介: 複雑ネットワークにおけるフラクタル性とスモールワールド性のクロスオーバー, 日本物理学会第64回年次大会, 2009年3月30日, 立教大学.
- (31) 岡百合子, 矢久保考介: スケールフリー・ネットワーク構造の臨界的性質, 日本物理学会第64回年次大会, 2009年3月30日, 立教大学.
- (32) 水戸部六美, 矢久保考介: 臨界複雑ネットワークにおける秩序変数の普遍揺らぎ, 日本物理学会第64回年次大会, 2009年3月30日, 立教大学.
- (33) 古谷修平, 鈴木啓太, 矢久保考介: 医薬品処方関連ネットワークにおけるローカルワールド性とモジュール構造, 日本物理学会2009年秋季大会, 2009.9.25-28, 熊本大学.
- (34) 川崎文也, 矢久保考介: 臨界条件における繋ぎ替え適応度ネットワークのフラクタル次元, 日本物理学会2009年秋季大会, 2009.9.25-28, 熊本大学.
- (35) 古谷修平, 矢久保考介: スケールフリー・ネットワークのマルチフラクタル性, 日本物理学会第65回年次大会, 2010.3.20-23, 岡山大学.
- (36) 矢久保考介, Dean Korosak, フラクタル空間に埋め込まれたスケールフリー・ネットワーク, 日本物理学会第65回年次大会, 2010.3.20-23, 岡山大学.
- (37) 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, Roma, Italy.
- (38) 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, Japan.
- (39) 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, Japan.
- (40) H. Shima: Anomalous Electron Transport in Curved Nanostructures, 22th DV-X $\alpha$  Symposium, 2009.8.5-7, 香川大学.
- (41) 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, Espoo, Finland.
- (42) 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, Nagoya, Japan.
- (43) 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, Israel.
- (44) H. Shima: Deformation Effects on Curved Liquid Crystal Membranes, LaCaN Seminar Series, 2009.12.14, Universitat Politècnica de Catalunya, Spain.

他 13 件

〔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

矢久保 考介 (YAKUBO KOUSUKE)  
北海道大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 40200480

### (2) 研究分担者

中山 恒義 (NAKAYAMA TSUNEYOSHI)  
(財)豊田中央研究所・フェロー  
研究者番号: 80002236

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

### (3) 連携研究者 なし