

## 科学研費補助金研究成果報告書

平成24年 5月 8日現在

機関番号：12608

研究種目：新学術研究領域（研究課題提案型）

研究期間：2009～2011

課題番号：21200032

研究課題名（和文）新たな曲面量子物性学理の基盤構築

研究課題名（英文）Development of new science on electronic systems in curved spaces

研究代表者

尾上 順 (ONOE JUN)

東京工業大学・原子炉工学研究所・准教授

研究者番号：50241245

研究成果の概要（和文）：1次元金属ピーナッツ型凹凸周期フラレンポリマーの伝導電子の状態を光電子分光で調べた結果、リーマン幾何学効果を取り入れた理論予測を見事に再現した。この成果は、1次元電子状態が純粋に凹凸曲面曲率（リーマン幾何学）に影響を受け、凹凸周期曲面上に沿って電子が動いていることを初めて実証したもので、過去の研究ではアインシュタインにより予測された光の重力レンズ効果（曲がった空間を光子が動く）以外に観測例はなく、電子系では調べる限りこれが初めてである。

研究成果の概要（英文）：A. Einstein first applied Riemannian geometry to develop the general theory of relativity almost one hundred years ago (1916) and succeeded in understanding astronomical-scale phenomena such as the straining of time-space by a gravitational field (1920). Whether or not Riemannian space affects the electronic properties of condensed matters on a much smaller scale is of great interest. Although Riemannian geometry has been applied to quantum mechanics since the 1950s, nobody has yet answered this question, because the electronic properties of materials with Riemannian geometry have not been examined experimentally. By examining *in situ* high-resolution ultraviolet photoemission spectra of a one-dimensional metallic C<sub>60</sub> polymer with an uneven periodic peanut-shaped structure, we first observed Riemannian geometrical effects on the electronic properties of materials such as Tomonaga-Luttinger liquids, which were previously theoretically predicted by our group.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	8,400,000	2,520,000	10,920,000
2010年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
2011年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度			
年度			
総計	18,100,000	5,430,000	23,530,000

研究分野：複合新領域（数物系科学）

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・物理学、ナノ構造科学・数理物理・物性基礎

キーワード：ナノ構造物性、物性基礎論

## 1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、これまでにフラーレン薄膜に電子線（加速電圧：3 kV）を照射し、構造および電子的性質を調べた結果、Tomonaga-Luttinger 液体（TLL）挙動並びにPeierls 不安定エネルギーギャップを有する1次元（1D）金属ピーナツ型ナノカーボンを発見した。この炭素物質は、正と負のガウス曲率が交互的な周期構造をもち、表1に示すように既存のナノカーボンおよび仮想構造として提案されているMackay結晶（負のガウス曲率をもつ）とは異なる新たなナノカーボン同素体であることがわかってきた。

表1 ガウス曲率 ( $k$ ) からみたナノカーボンの分類

Nanocarbon materials	Gaussian curvature $k$	Geometrical shape
graphene	0	
fullerenes	+	
nanotubes	0 (body) + (cap)	
Mackay crystal (hypothetical)	-	
1D peanut-shaped polymer	+, -	

一方、理論的な側面では、1D ピーナツ型ナノカーボンにおける表面ガウス曲率の交互周期性が表面上を運動する電子の量子状態・量子輸送特性に非自明な効果を与えることが予想されている。具体的には、①ラプラスのテンソル化による有効質量への効果、②曲率に起因した引力・反発ポテンシャル項の出現とそれによるエネルギーギャップ形成、③波動関数の局在化、④低温における電子散乱の増大化、などが挙げられる。これら①～④として列記した幾何曲率効果は曲面量子系一般において発現すると期待されるが、これまで実在する物質が無かったため実験的な検証は全くなされていなかった。

## 2. 研究の目的

本研究では、調べる限り曲面量子系の理論予想を実験検証できる現在唯一の物質である正負のガウス曲率をもつ1D ピーナツ型ナノカーボンの光・電子物性および電子輸送特性を調べ、曲面量子系のシュレディンガー方程式から予想されている諸現象（①ラプラスのテンソル化による有効質量への効果、②曲率に起因した引力・反発ポテンシャル項の出現とそれによるエネルギーギャップ形成、③波動関数の局在化、④低温における電子散乱の増大化、など）を実験的に検証することにより、現代幾何学と物性科学が融

合した「新たな曲面量子物性」の学理基盤を構築する。

## 3. 研究の方法

本研究では、光電子分光およびフェムト秒時間分解分光を用いて、1D ピーナツ型ナノカーボンのフェルミ端近傍における電子構造を調べ、TLL 挙動およびエネルギーギャップの値を正確に決める。さらに、四探針測定により1D ピーナツ型ナノカーボンの電子輸送特性の温度依存性を調べ低温における電子散乱の増大化の観測を行い、曲面量子物性の理論モデルの結果と比較検討する。

## 4. 研究成果

### (1) 電子物性

1D金属ピーナツ型凹凸周期フラーレンポリマーの伝導電子の状態を光電子分光で調べた結果、リーマン幾何学効果を取り入れた理論予測を見事に再現した。この成果は、1次元電子状態が純粋に凹凸曲面曲率（リーマン幾何学）に影響を受け、凹凸周期曲面上に沿って電子が動いていることを初めて実証した（図1）。

ナノスケールで広がる凹凸曲面による電子のレンズ効果

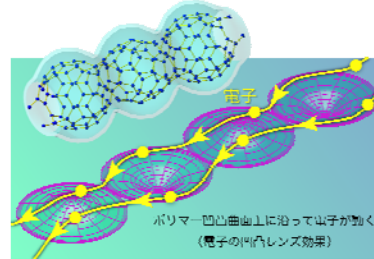


図1 1次元金属ピーナツ型凹凸周期フラーレンポリマーの構造図（左上）と凹凸曲面上に沿って動く電子（右下黄色部分）の模式図。

宇宙で広がる重力場による光のレンズ効果

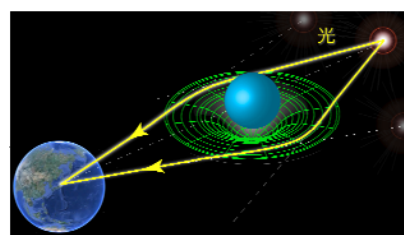


図2 光の重力レンズ効果：星（中央）の真後ろにある銀河は通常見えませんが、その星が重いと重力により周囲の空間が歪み（緑色部分）、その歪みに沿って光も曲がり（黄色）、真後ろの銀河からの光が地球（左下）に届き、銀河が観測されます。

過去の研究では、アインシュタインにより予測された光の重力レンズ効果（曲がった空間を光子が動く）以外に観測例（図2）はなく、電子系では調べる限りこれが初めてである。

### (2) フォノン物性

1Dピーナツ型エキゾチックナノカーボンの接合構造を高分解能赤外振動分光と第一原理計算の解析により、一般化Stone-Wales転移で予想されるC<sub>120</sub>構造異性体のうち、P08異性体をもつピーナツ型接合構造に良く似た接合構造をしていることを明らかにした(図1左上)。

1Dエキゾチックナノカーボンのフォノン物性を *in situ* 高分解能赤外分光により調べた結果、1Dエキゾチックナノカーボンに特徴的な2本のピークの強度が異常増大していることを見出した。また、増大機構として1Dに特徴的なvan Hove異常であることを明らかにした。また、室温から30 Kまで調べた結果、50 K以下でパイエルス転移に伴う電荷密度波に由来すると考えられる2本のフォノンモードを観測することに成功した。

### (3) 電子輸送特性

1Dエキゾチックナノカーボンの電子輸送特性を、本研究予算で立ち上げた *in situ* 温度可変 (30–350 K) 四探針測定装置を用いて調べた。最初に、膜厚 1000 nm の 1Dエキゾチックナノカーボンを *ex situ* (30分大気暴露) で電子輸送特性を測定し、シート抵抗の温度に対するアレニウスプロットした結果、140 K以上では熱励起型ホッピング (TEH) 機構を、それ以下では 2D 可変領域ホッピング (VRH) 機構を、それぞれ示すことを明らかにした。つぎに、同じ膜厚で作製した 1Dエキゾチックナノカーボンを *in situ* で測定し解析した結果、140 K以上では同様に TEH 機構であるが、シート抵抗は *ex situ* に比べて2桁以上低い値であった。また、140 K以下ではシート抵抗は *ex situ* と比べて4–5桁さらに低い値になり、しかも、シート抵抗が温度に対して依存せず一定であることを見出した。

### (4) 曲面量子理論

1D金属の電子挙動であるTomonaga-Luttinger液体のベキ乗指数が、凹凸周期曲面による曲率ポテンシャルに単調増加することを理論的に初めて明らかにした。

幾何的な曲がりや捻りを伴う非平坦型ナノ構造が示す特異物性の発現機構およびその形状物性相関について調べた結果、非平坦ナノ構造の内部では系全体の形状が伝導電子と伝導フォノンの両者に対し有効ポテンシャル場を供するため、通常平坦系とは異なる秩序相・量子輸送が発現することを明らかにした。さらに、振れ原子(分子)構造で構成される振れ量子リングに対しては、振率誘起磁場効果による特異な量子位相干渉効果が起こることを示した。

1Dエキゾチックナノカーボンの光励起キャリア緩和ダイナミクスについて、従前のボトルネック理論がもつ矛盾点を初めて指摘し、横波フォノンモードの寄与を取り入れて同理論を再構築した結果、緩和時間の単調増大現象を定量的に再現することに成功した。さらに、電荷密度波転移の発現機構が系の電子物性およびフォノン物性に作用する幾何形状効果で理解できることを明らかにした。

### 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 19 件)

1. J. Onoe, T. Ito, H. Shima, H. Yoshioka and S. Kimura: “Observation of Riemannian geometrical effects on electronic states”, *EPL (Europhys. Lett.)*, 査読有, **98**, 27001 (2012). DOI:10.1209/0295-5075/98/27001
2. J. Onoe, A. Takashima, S. Ono, H. Shima, and T. Nishii: “Anomalous enhancement in the infrared phonon intensity of one-dimensional uneven peanut-shaped C<sub>60</sub> polymer”, *J. Phys.: Condens. Matter*, 査読有, **24**, 175405 (2012). DOI:10.1088/0953-8984/24/17/175405
3. J. Onoe, T. Ito, S. Kimura, H. Shima, Y. Toda, and H. Yoshioka: “One-dimensional uneven peanut-shaped C<sub>60</sub> polymer: a quantum electronic system on Riemannian space” (Invited paper), 査読有, *Fullerene, Nanotubes, and Carbon Nanostructures* **20**, 1–16 (2012). DOI:10.1080/1536383X.2011.586618
4. S. Ono and H. Shima: “Flexible control of the Peierls transition in metallic C<sub>60</sub> polymers”, *EPL (Europhys. Lett.)*, 査読有, **96**, 27011 (2011). DOI:10.1209/0295-5075/96/27011
5. H. Yoshioka and H. Shima: “Density of states anomalies in multichannel quantum wires”, *Phys. Rev. B*, 査読有, **84**, 075443 (2011). DOI:10.1103/PhysRevB.84.075443
6. S. Ono and H. Shima: “Phonon dispersion and electron-phonon interaction in peanut-shaped fullerene polymers”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, **80**, 064704 (2011). DOI: 10.1143/JPSJ.80.064704
7. H. Shima and H. Yoshioka: “Electronic spectral shift of oxygen-filled (6,6) carbon nanotubes”, *Chem. Phys. Lett.*, 査読有, **513**, 224–228 (2011). <http://dx.doi.org/10.1016/j.cplett.2011.07.084>
8. 尾上 順: “エキゾチックナノカーボン～現代幾何学と先端物質科学との新たな接点～”, *理大科学フォーラム* **326**, 8–13 (2011).

9. H. Shima, H. Yoshioka, and J. Onoe: “Curvature effects on collective excitations in dumbbell-shaped hollow nanotubes”, *Physica E*, 査読有, **42**, 1151-1154 (2010).  
DOI: 10.1016/j.physe.2009.10.030
10. H. Shima, S. Ono and H. Yoshioka: “Manipulating the Tomonaga-Luttinger exponent by electric field modulation”, *Eur. Phys. J. B*, 査読有, **82**, 085401 (2010).  
DOI: 10.1140/epjb/e2010-10698-2
11. S. Ono and H. Shima: “Low-temperature resistivity anomalies in periodic curved surfaces”, *Physica E*, 査読有, **42**, 1224-1227 (2010).  
DOI: 10.1016/j.physe.2009.11.103
12. A. Takashima, J. Onoe, and T. Nishii: “In situ infrared spectroscopic and density-functional studies on the cross-linked structure of one-dimensional C<sub>60</sub> polymer”, *J. Appl. Phys.*, 査読有, **108**, 033514 (2010).  
<http://dx.doi.org/10.1063/1.3462446>
13. J. Onoe, A. Takashima and Y. Toda: “Infrared phonon anomaly of one-dimensional metallic peanut-shaped C<sub>60</sub> polymer”, *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, **97**, 241911 (2010).  
<http://dx.doi.org/10.1063/1.3527961>
14. H. Taira and H. Shima: “Torsion-induced persistent current in a twisted quantum ring”, *J. Phys.: Condens. Matter*, 査読有, **22**, 075301 (2010).  
DOI: 10.1088/0953-8984/22/7/075301
15. Y. Toda, K. Shimatake, S. Tanda, and J. Onoe: “Femtosecond carrier dynamics in quasi one-dimensional topological compounds” (Invited paper), *Proc. SPIE*, 査読有, **7214**, 72141G (2009).  
<http://dx.doi.org/10.1117/12.807333>
16. H. Shima, H. Yoshioka, and J. Onoe: “Geometry-driven shift in the Tomonaga-Luttinger exponent of deformed cylinders”, *Phys. Rev. B*, 査読有, **79**, 201401(R) (2009).  
DOI: 10.1103/PhysRevB.79.201401
17. 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*, 査読有, **30**, 652-658 (2009).  
<http://www.sssj.org/jsssj/Vol30/30-12/index.htm>
18. 尾上 順: “One-dimensional metallic peanut shaped nanocarbon with positive and negative Gaussian curvatures: Toward a new science of quantum electronic systems on Riemannian surface”, *表面科学*, 査読有, **30**, 659-666 (2009).  
<http://www.sssj.org/jsssj/Vol30/30-12/index.htm>
19. 戸田泰則: “擬1次元曲面物質における光励起キャリアダイナミクス”, *表面科学*, 査読有, **30**, 667-672 (2009).  
<http://www.sssj.org/jsssj/Vol30/30-12/index.htm>
- [学会発表] (計 30 件)
1. 島 弘幸: “微小材料における形状物性相関の理論解析”, 土木学会・応用力学フォーラム, 札幌, Feb. 8 (2012).
2. S. Ryuzaki, M. Nishiyama, A. Takashima, and J. Onoe: “Electron-transport properties of one-dimensional exotic-C<sub>60</sub> polymer films”, *The 6th General Meeting of ACCMS-VO (Asian Consortium on Computational Materials Science-Virtual Organization)*, Sendai, Japan, Feb. 10-12 (2012).
3. A. Takashima, T. Nishii, J. Onoe: “Formation mechanism of one-dimensional uneven peanut-shaped C<sub>60</sub> polymer”, *The 6th General Meeting of ACCMS-VO (Asian Consortium on Computational Materials Science-Virtual Organization)*, Sendai, Japan, Feb. 10-12 (2012).
4. J. Onoe, T. Itoh, H. Shima, H. Yoshioka, S. Kimura: “Photoemission spectroscopic study of electronic states in Riemannian space using one-dimensional metallic peanut-shape unevenness C<sub>60</sub> polymers”, *14th Asian Chemical Conference*, Bangkok, Thailand, Sept. 5-8 (2011).
5. J. Onoe: “An interdisciplinary between modern mathematics and materials science” (Invited lecture), *A Korea-Japan joint seminar at Korea Research Institute of Chemical Technology*, Daejeon, Korea, Dec. 9 (2011).
6. 尾上 順: “ナノ炭素材料: 基礎と応用” (特別講演), 東京理科大学理学部応用化学科特別講演, June 15 (2011).
7. J. Onoe: “One dimensional exotic nanocarbons: Electrons in a Riemannian space” (Invited talk), *Joint Seminar of WPI-AIMR Tohoku University*, Sendai, Japan, June 29 (2011).
8. J. Onoe: “One dimensional exotic nanocarbons: Electronic, optical, and phonon properties” (Invited Lecture), *Department of Physics, Clemson University, Clemson, USA*, March 17 (2011).
9. J. Onoe: “One dimensional exotic nanocarbons: observation of the electronic states in Riemannian space” (Invited Lecture), *Joint Seminar, Nanotechnology Center, Rensselaer Polytechnic Institute, NY, USA*, March 22 (2011).
10. J. Onoe, A. Takashima, and Y. Toda: “In situ low-temperature infrared spectroscopic study on Kohn anomaly of one-dimensional metallic exotic-nanocarbon”, *9th Conference on Solid*

- State Chemistry, Prague, Czech, Sept. 10–15 (2010).
11. A. Takashima, S. Ono, H. Shima, and J. Onoe: “Anomalous increase in the infrared peak intensity of one dimensional metallic peanut-shaped C<sub>60</sub> polymer”, *5th International Conference on Surface, Coatings and Nanostructured Materials*, Reims, France, Oct. 19–21 (2010).
  12. J. Onoe: “*In situ* infrared spectroscopic and density-functional studies of the cross-linked structure of one-dimensional metallic C<sub>60</sub> polymer” (Invited talk), *6th International Conference on DV-Xa Method*, Daejeon, Korea, Aug. 3–6 (2010).
  13. J. Onoe, T. Ito, H. Shima, H. Yoshioka and S. Kimura: “Riemannian geometrical effects on the electronic properties of one dimensional metallic C<sub>60</sub> polymers with a periodic peanut-shaped unevenness structure”, *The Fifth General Meeting of ACCMS-VO (Asian Consortium on Computational Materials Science – Virtual Organization)*, Sendai, Japan, Dec. 10–12 (2010).
  14. A. Takashima, M. Nishiyama, and J. Onoe: “Infrared spectroscopic study of the reaction mechanism of one-dimensional metallic peanut-shaped C<sub>60</sub> polymer”, *The Fifth General Meeting of ACCMS-VO (Asian Consortium on Computational Materials Science – Virtual Organization)*, Sendai, Japan, Dec. 10–12 (2010).
  15. J. Onoe: “Riemannian geometric effects on the Tomonaga-Luttinger liquids of one-dimensional metallic exotic nanocarbons with positive and negative Gaussian curvatures” (Invited Lecture), *Department seminar of complex matter, Jozef-Stefan Institute*, Ljubljana, Slovenia, Sept. 17 (2010).
  16. 尾上 順: “ $\pi$  電子共役系ナノカーボン: 低次元からトポロジーまで” (招待講演), 東京理科大学理学部応用化学科特別講演, June 2 (2010).
  17. 尾上 順: “炭素ナノ科学~構造・物性・機能” (招待講演), レーザー学会九州支部特別講演会, Nov. 19 (2010).
  18. H. Shima, J. Onoe, Y. Toda, T. Ito, A. Takashima, S. Ono, T. Nishii, H. Yoshioka, S. Kimura: “Electronic states in one-dimensional C<sub>60</sub> polymers: Surface curvature effects on the collective excitations”, *Psi-k Conference 2010*, Berlin, Germany, Sept. 12–16 (2010).
  19. H. Shima, M. Sato, K. Iiboshi, M. Arroyo: “High-pressure deformation of multiwall carbon nanotubes”, *The 20th International Workshop on Computational Mechanics of Materials (IWCMM 20)*, Loughborough, UK, Sept. 8–10 (2010).
  20. H. Taira and H. Shima: “Novel persistent current in a twisted quantum ring under in-plane magnetic field”, *International Conference on Superlattices, Nanostructures and Nanodevices (ICSNN-2010)*, Beijing, China, July 18–23 (2010).
  21. J. Onoe, T. Ito, H. Shima, Y. Toda, H. Yoshioka, and S. Kimura: “One-dimensional metallic peanut-shaped nanocarbon with positive and negative Gaussian curvatures: Toward a new science of quantum electronic systems on Riemannian surfaces”, *5th International Conference on Diffusion in Solids and Liquids*, Rome, Italy, June 24–26 (2009).
  22. 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*, Kobe, Japan, July 19–24 (2009).
  23. S. Ono and H. Shima: “Low-Temperature Resistivity of Periodic Curved Surfaces”, *The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems*, Kobe, Japan, July 19–24 (2009).
  24. H. Shima: “Anomalous Electron Transport in Curved Nanostructures” (Invited talk), *22th DV-Xa Symposium*, Kagawa, Japan, Aug. 5–7 (2009).
  25. S. Ono and H. Shima: “Curvature-Induced Resistivity Enhancement in Periodically curved Layers”, *The 3rd International Workshop on Physics and Technology of Thin Films*, Espoo, Finland, Aug. 26–28 (2009).
  26. J. Onoe, T. Ito, H. Shima, Y. Toda, H. Yoshioka, and S. Kimura: “Electronic and optical properties of one-dimensional C<sub>60</sub> polymer with positive and negative Gaussian curvatures”, *20th European Conference on Diamond, Diamond-Like Materials, Carbon Nanotubes, and Nitrides*, Athens, Greece, Sept. 6–10 (2009).
  27. J. Onoe: “A new allotrope of pi-electron conjugated nanocarbons with positive and negative Gaussian curvatures” (Invited lecture), Invited Seminar of Institut de Physique et Chimie des Mate'riaux, UMR 7504 CNRS-Universite' Louis Pasteur, Strasbourg, France, June 22 (2009).
  28. J. Onoe: “One dimensional metallic peanut shaped nanocarbons with positive and negative Gaussian curvatures: Toward a new science of

quantum electronic systems on curved surfaces” (Invited talk), 9th Biennial International Workshop on Fullerenes and Atomic Clusters (IWFAC 2009), St Petersburg, Russia, July 6–10 (2009).

29. 尾上 順：“古くて新しいカーボン：新たな曲面量子系への展開”（招待講演），第22回DV-X $\alpha$ 研究会，高松，Aug. 5–7 (2009).
30. 島 弘幸：“Anomalous Electron Transport in Curved Nanostructures”（招待講演），第22回DV-X $\alpha$ 研究会，高松，Aug. 5–7 (2009).

〔図書〕（計2件）

1. H. Shima and T. Nakayama: “Higher Mathematics for Physics and Engineering”, Springer-verlag, Berlin, 702 (2010).
2. 尾上 順：“トポロジーデザインング：新しい幾何学からはじめる物質・材料設計”（分担執筆），ブッカーズ出版，pp.312-324 (2009)

〔その他〕

ホームページ等

尾上 順

<http://www.nr.titech.ac.jp/~jonoe/>

島 弘幸

[http://subutu-ap.eng.hokudai.ac.jp/staff/staff\\_shima.html](http://subutu-ap.eng.hokudai.ac.jp/staff/staff_shima.html)

プレス発表

<http://news.mynavi.jp/news/2012/04/20/047/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

尾上 順 (ONOE JUN)

東京工業大学・原子炉工学研究所・准教授  
研究者番号：50241245

### (2) 研究分担者

島 弘幸 (SHIMA HIROYUKI)

山梨大学・生命環境学部・准教授  
研究者番号：40312392

### (3) 連携研究者

戸田泰則 (TODA YASUNORI)

北海道大学・工学研究院・教授  
研究者番号：00313106