

機関番号： 12608

研究種目： 特定領域研究

研究期間： 2007～2011年度

課題番号： 19054004

研究課題名（和文） ナノチューブ光・電子デバイスの基礎理論

研究課題名（英文） Theory of optical and electronic nanotube devices

研究代表者 安藤 恒也 (ANDO TSUNEYA)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授 研究者番号： 90011725

研究成果の概要（和文）：

カーボンナノチューブの(1)電子-格子相互作用と電気伝導現象、(2)多層ナノチューブの層間相互作用効果、(3)バンド構造に対する多体効果と光吸収・発光現象に対する励起子効果について主として有効質量近似を用いて理論的に明らかにした。また、グラフェン研究の急展開に対応し、その電気伝導、光学的性質、電子格子相互作用、異常反磁性帯磁率などについて最先端の研究を行った。

研究成果の概要（英文）：

Various properties of carbon nanotubes have theoretically studied together with development of a theoretical scheme based on an effective mass description of their electronic states. The topics include (1) electron-phonon interaction and transport, (2) interwall interaction in multi-wall tubes, and (3) many-body and exciton effects in optical absorption and photoluminescence.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	6,000,000	0	6,000,000
2008年度	7,700,000	0	7,700,000
2009年度	5,600,000	0	5,600,000
2010年度	4,700,000	0	4,700,000
2011年度	2,000,000	0	2,000,000
総計	26,000,000	0	26,000,000

研究分野： 物性物理学理論

科研費の分科・細目： 物理学・物性 I

キーワード： 励起子，後方散乱，電子格子相互作用，電子間相互作用，遮蔽効果

## 1. 研究開始当初の背景

カーボンナノチューブは、通常の量子細線とはトポロジカルに異なっており、さらに2次元グラファイト上で電子が自由電子とは非常に異なった運動をするために、興味深い性質を示す。この特徴は、2次元グラファイトを連続体とみなし、有効質量近似で扱うことにより、はっきりする。実際、ナノチューブ上の電子の運動はニュートリノに対する2行2列のWeyl方程式で記述される。ただし、円筒を一周したときに波動関数に余分の位相がつく。この位相はナノチューブの螺旋構造により決まり、その結果ナノチューブが金属あるいは半導体になる。

申請者はこれまで、一般研究 C、特定領域 A、基盤研究 C などの研究費を受けながら、この有効質量近似をもとにナノチューブの

構造による金属から半導体への変化、電子状態に対する磁場効果、光学スペクトルと励起子、格子振動との相互作用による格子歪とその磁場効果、アハラノフ-ボーム効果、ランダウ準位・反磁性、コンダクタンスゆらぎ、ナノチューブ接合系のコンダクタンスと磁場効果などについて、幅広い研究を行ってきた。特に、金属的ナノチューブではポテンシャルの到達距離が格子定数より大きな通常の不純物では後方散乱が全く存在せず、ナノチューブが完全導体となることを理論的に予言し、全く他の物質系にはない特徴を持っていることを示した。また、バンド構造に対する電子間相互作用効果と励起子効果の重要性をはじめて理論的に示した。

## 2. 研究の目的

ナノチューブの実験的研究が急速に発展している。ナノチューブ1本の電気伝導が測定され、量子ゆらぎや大きな磁気抵抗効果、磁束によるバンドギャップのアハラノフ・ボーム効果などが観測された。単層ナノチューブの単離に成功し、その電気伝導でクーロンブロケードが観測され、その結果、半導体チューブでは電子が強く局在するのに対して、金属的ナノチューブでは局在しないという興味深い実験結果が観測された。これは申請者による上記の理論的予言と一致している。また、ナノチューブでの光吸収と発光が観測され一本一本の構造も同定され、磁束によるバンドギャップのアハラノフ・ボーム効果などが観測されはじめた。

ナノチューブの具体的な応用の研究も急発展している。半導体ナノチューブを用いた論理素子が試作され、スピン量子情報素子なども提案され、電子の電界放出源としても注目され、大量合成が試みられている。この研究では、これらの新しい発展に対応し、光電子ナノデバイスとしての応用を視野に入れ、カーボンナノチューブの示す興味深い特異な伝導現象と光応答を理論的に解明し予言することを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) ナノチューブの電気伝導

これまでの研究での一つの大きな発展は、金属的ナノチューブでフェルミ準位に一つの線型バンドがある場合には、大部分の散乱体に対して後方散乱が抑制され完全導体となること、さらに、複数のバンドが存在する場合にはバンド間の散乱が生じるが、散乱されずに透過する完全伝導チャンネルが必ず一つ存在することである。ナノチューブのこの興味深い性質は対称性に敏感である。例えば、完全透過チャンネルは非弾性散乱により大きな影響を受け、長さが位相コヒーレント長よりも十分大きくなると、コンダクタンスが長さに反比例して減少する。この対称性の効果を十分に理解したい。さらに完全透過チャンネルによる動的伝導度など、電気伝導の振る舞いを理解したい。

#### (2) 多層ナノチューブの層間相互作用

多層ナノチューブの層間相互作用がコンダクタンスに与える効果について、強束縛模型による数値計算の結果、格子の不整合とK点とK'点の波動関数の位相による準周期性によって相互作用が相殺するために、層間結合がほとんど生じないことが明らかになってきた。現実の系で必然的に存在する不規則性の効果、フェルミエネルギーによる変化など、その詳細を明らかにするとともに、有効質量近似による有効模型の定式化によって、その本質の理解を目指したい。

#### (3) 光吸収と発光における励起子効果

半導体ナノチューブの場合、バンド構造に対する電子間相互作用についての研究を行い、通常の乱雑位相近似が有効であることを明らかにし、さらに光吸収と発光において、励起子効果が本質的に重要であることはじめて理論的に予言した。光の偏光依存性を励起子効果も考慮して理解すること、さらに、研究を励起子分子、電子-正孔プラズマなどへと発展させることが急務である。さらに、簡単な有効質量近似にバンドの非放物線性の効果、曲率の効果、格子歪みの効果など、高次効果を考慮して、ナノチューブのファミリー効果の起源を理解する必要がある。さらに、ナノチューブの光スペクトルに対する環境効果(重水などの媒質を変化させた時の吸収・発光の変化)を明らかにする必要がある。

### 4. 研究成果

#### (1) ナノチューブの電気伝導

金属ナノチューブにおいて、プローブ2個の走査顕微鏡像のモデル計算を行い、K点とK'点近傍の波の干渉による3倍周期構造が現れること、また、片方のプローブが特殊な位置にある場合にのみそれが消滅することを示した。さらに、有限長ナノチューブに励起されるプラズモンと電磁波との結合による吸収強度について、厳密な計算を行い、単に1個のプラズモンが励起されると仮定した簡単な単一モードの近似が驚くほど良く成り立つことを示した。さらに、これは、金属ナノチューブで外場の遮蔽効果が非常に大きいためであることを明らかにした。

長波長の光学フォノン、及びK点とK'点の間の谷間散乱を引き起こすブリュアン境界フォノンについて、相互作用の有効ハミルトニアンを導出し、強電場下での電気伝導での境界フォノンの重要性を明らかにした。この電子-格子相互作用により、金属ナノチューブのL0フォノンは低振動数側に、T0フォノンは逆に光波数側に変化し、半導体ナノチューブではその効果が小さいが変化の方向が逆転することがこれまでの研究で明らかになっていた。そこで、この電子-格子相互作用の電子濃度による変化を明らかにして。その結果、金属ナノチューブの場合T0フォノンはフェルミ準位により変化しないが、T0フォノンは振動数と幅が大きく変化する。フェルミエネルギーが光学フォノンのエネルギーの半分となる電子濃度で、金属ナノチューブのL0フォノンの幅が急激に減少し、それに伴い、振動数が対数的特異性を示す。一方、半導体ナノチューブの場合には、L0とT0フォノンの振動数が増加するが、その振る舞いは準位交差のようにも見える。

#### (2) 多層ナノチューブの層間相互作用

大部分の多層ナノチューブの相関の格子構造は互いに無関係な格子不整合構造をもつ。そのため、電子の相関遷移行列要素は K 点と K' 点の波動関数の位相が準周期的に空間変化し、相殺して消滅する。そのため、相関コンダクタンスはほとんど無視できるほど小さいことが以前の研究で明らかになっている。そこで、不純物などが存在する現実的な 2 層ナノチューブの場合を考察し、層間コンダクタンスが不純物効果により誘起されること、それが散乱体による平均自由行程で決まることを明らかにした。さらに、外部電場と磁場による応答を計算し、多層ナノチューブでは、印加電場が 1~2 層で遮蔽されること、また、磁場による大きな反磁性磁界分布が生じ、それが核磁気共鳴の共鳴形状として観測可能であることを示した。

電子間相互作用と励起子相互作用の層間の遮蔽効果を考慮した励起子準位と光吸収スペクトルの計算を行った。相関遮蔽により、バンドギャップや励起子の励起状態はかなり低エネルギー側へ移動するが、吸収と発光のほとんどを占める基底励起子への効果は強く抑制されることを示した。それでも、得られたエネルギー変化は実験結果よりも一桁程度大きく、この不一致の原因は将来に残された課題の一つである。さらに、垂直偏光の場合への拡張を行い、各層で誘起された電荷振動が結合し、吸収強度に特徴的なファノ効果が現れることを示した。

### (3) 光吸収と発光における励起子効果

ナノチューブの光スペクトルに関しては、電場が軸垂直方向の偏光の場合には、反電場効果で高エネルギー側へ移動し強度が一桁程度減少はするが、強い励起子効果のために、励起子吸収が観測されることを示した。さらに、金属的なナノチューブにおいても、強い遮蔽効果にもかかわらず、励起バンド間の光学遷移に励起子効果が大きく寄与することを明らかにした。また、2 光子吸収スペクトルの計算を行い、励起子の励起状態が観測されること、1 次元性にも関わらず、そのエネルギー準位が比較的水素原子と近いことを示した。励起準位のエネルギーが相互作用強度に敏感なために、2 光子吸収実験との比較により、電子間相互作用強度が精密に決定できることを示している。

半導体ナノチューブの励起子吸収効果に対するファミリー効果を有効質量近似からの補正の最低次で考察し、第一ギャップについてはほとんど完全に再現できること、第二ギャップについてはある程度不十分さが残ることを示した。補正項は、(i) グラフェンの等エネルギー線が円から三角形へとずれる band warping, (ii) ナノチューブが円筒状に丸まった効果とそれに付随する格子歪み

の効果、さらに、(ii) 伝導帯と価電子帯の間が非対称となる効果の 3 種類に分類することができる。この中では、光の電場がチューブ軸と平行な場合には、(iii) の効果は伝導帯と価電子帯で相殺するため全く重要ではない。同様の計算を垂直電場の場合にも行った。垂直偏光の場合には、(iii) の効果が最も重要で、反電場効果により光学遷移が禁止された暗励起子がわずかに吸収・発光に寄与するようになることを示した。一方、明励起子に対するファミリー効果は伝導帯と価電子帯で相殺し、弱められることを示した。

ナノチューブのまわりの誘電物質による遮蔽効果である環境効果の計算を行い、外側の媒質の効果が大きく、内側の媒質はほとんど影響を及ぼさないことを示した。ただし、環境効果はとりまく媒質とナノチューブの距離により大きく影響される。その結果、実験結果はグラファイトの層間距離程度の間隔を仮定すると理解できる。さらに、半導体ナノチューブの垂直偏光に対する環境効果について計算も行った。を行い、環境誘電率により、暗励起子と明励起子の相対強度が大きく影響を受けることを示した。

## 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 71 件, すべて査読有り)

- 1 Y. Tomio, H. Suzuura, and T. Ando, Interwall screening and excitons in double-wall carbon nanotubes, *Phys. Rev. B* **85**, 085411/1-12 (2012). DOI:10.1103/PhysRevB.85.085411
- 2 Y. Arimura and T. Ando, Diamagnetism of graphene with gap in nonuniform magnetic field, *J. Phys. Soc. Jpn.* **81**, 024702/1-7 (2012). DOI:10.1143/JPSJ.81.024702
- 3 Y. Arimura, M. Koshino, and T. Ando, Diamagnetic response of disordered graphene to nonuniform magnetic field, *J. Phys. Soc. Jpn.* **80**, 114705/1-6 (2011). DOI:10.1143/JPSJ.80.114705
- 4 M. Noro, M. Koshino, and T. Ando, Diamagnetism of graphene with long-range scatterers, *J. Phys. Soc. Jpn.* **80**, 114701/1-9 (2011). DOI:10.1143/JPSJ.80.114701
- 5 M. Koshino and T. Ando, Singular orbital magnetism of graphene, *Solid State Commun.* **151**, 1054-1060 (2011). DOI:10.1016/j.ssc.2011.05.012
- 6 T. Ando, Zero-mode anomalies of massless Dirac electron in graphene, *J. Appl. Phys.* **109**, 102401/1-7 (2011).

- DOI:10.1063/1.3575639
- 7 N. Mori and T. Ando, Magnetophonon resonance in monolayer graphene, *J. Phys. Soc. Jpn.* **80**, 044706/1-6 (2011). DOI:10.1143/JPSJ.80.044706
  - 8 S. Uryu and T. Ando, Effect of electron-hole asymmetry on cross-polarized excitons in carbon nanotubes, *Phys. Rev. B* **83**, 085404/1-10 (2011). DOI:10.1103/PhysRevB.83.085404
  - 9 T. Ando, Bilayer graphene with long-range scatterers studied in a self-consistent Born approximation, *J. Phys. Soc. Jpn.* **80**, 014707/1-8 (2011). DOI:10.1143/JPSJ.80.014707
  - 10 M. Koshino, T. Nakanishi, and T. Ando, Interface Landau levels in graphene monolayer-bilayer junction, *Phys. Rev. B* **82**, 205436/1-12 (2010). DOI: 10.1103/PhysRevB.82.205436
  - 11 T. Nakanishi, M. Koshino, and T. Ando, Transmission through a boundary between monolayer and bilayer graphene, *Phys. Rev. B* **82**, 125428/1-14 (2010). DOI: 10.1103/PhysRevB.82.125428
  - 12 M. Noro, M. Koshino, and T. Ando, Theory of transport in graphene with long-range scatterers, *J. Phys. Soc. Jpn.* **79**, 094713/1-7(2010). DOI:10.1143/JPSJ.79.094713
  - 13 A. Toyoda and T. Ando, Theory of electron scattering by lattice defects in monolayer graphene, *J. Phys. Soc. Jpn.* **79**, 094708 /1-9 (2010). DOI: 10.1143/JPSJ.79.094708
  - 14 M. Koshino and T. Ando, Anomalous orbital magnetism in Dirac-electron systems: Role of pseudo-spin paramagnetism, *Phys. Rev. B* **81**, 195431/1-9 (2010). DOI:10.1103/PhysRevB.81.195431
  - 15 T. Ando, Environment effects on excitons in semiconducting carbon nanotubes, *J. Phys. Soc. Jpn.* **79**, 024706 /1-10 (2010). DOI:10.1143/JPSJ.79.024706
  - 16 T. Nakanishi and T. Ando, Optical response of finite-length carbon nanotubes, *J. Phys. Soc. Jpn.* **78**, 114708 /1-9 (2009). DOI:10.1143/JPSJ.78.114708
  - 17 T. Ando and M. Koshino, Optical absorption by interlayer density excitations in bilayer graphene, *J. Phys. Soc. Jpn.* **78**, 104716/1-7 (2009). DOI:10.1143/JPSJ.78.104716
  - 18 T. Ando, Family effects on excitons in semiconducting carbon nanotubes, *J. Phys. Soc. Jpn.* **78**, 104703/1-9 (2009). DOI:10.1143/JPSJ.78.104703
  - 19 T. Fukuzawa, M. Koshino, and T. Ando, Weak-field Hall effect in graphene calculated within self-consistent Born approximation, *J. Phys. Soc. Jpn.* **78**, 094714/1-7 (2009). DOI:10.1143/JPSJ.78.094714
  - 20 M. Koshino, Y. Arimura, and T. Ando, Magnetic field screening and mirroring in graphene, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 177203/1-4 (2009). DOI:10.1103/PhysRevLett.102.177203
  - 21 T. Ando and M. Koshino, Field effects on optical phonons in bilayer graphene, *J. Phys. Soc. Jpn.* **78**, 034709/1-8 (2009). DOI:10.1143/JPSJ.78.034709
  - 22 S. Uryu, H. Ajiki, and T. Ando, Excitonic two-photon absorption in semiconducting carbon nanotubes with an effective-mass approximation, *Phys. Rev. B* **77**, 115414/1-6 (2008). DOI:10.1103/PhysRevB.78.115414
  - 23 M. Yamamoto, M. Koshino, and T. Ando, Electric and magnetic response of multi-wall carbon nanotubes, *J. Phys. Soc. Jpn.* **77**, 084705/1-9 (2008). DOI:10.1143/JPSJ.77.084705
  - 24 S. Uryu and T. Ando, Excitons in metallic carbon nanotubes with Aharonov-Bohm flux, *Phys. Rev. B* **77**, 205407/1-9 (2008). DOI:10.1103/PhysRevB.77.205407
  - 25 H. Suzuura and T. Ando, Zone-boundary phonon in graphene and nanotube, *J. Phys. Soc. Jpn.* **77**, 044703/1-11 (2008). DOI: 10.1143/JPSJ.77.044703
  - 26 M. Koshino and T. Ando, Magneto-optical properties of multilayer graphenes, *Phys. Rev. B* **77**, 115313/1-8 (2008). DOI:10.1103/PhysRevB.77.115313
  - 27 T. Nakanishi and T. Ando, Conductance between two scanning-tunneling-microscopy probes in carbon nanotubes, *J. Phys. Soc. Jpn.* **77**, 024703/1-6 (2008). DOI:10.1143/JPSJ.77.024703
  - 28 T. Ando, Optical phonon tuned by Fermi level in carbon nanotubes, *J. Phys. Soc. Jpn.* **77**, 014707/1-9 (2008). DOI:10.1143/JPSJ.77.014707
  - 29 T. Ando, Effects of symmetry crossover in quantum transport in graphene and nanotube, *Phil. Trans. Roy. Soc. A* **366**, 221-229 (2008). DOI:10.1098/rsta.2007.2150

- 30 S. Uryu and T. Ando, Electronic inter-tube transfer in double-wall carbon nanotubes with impurities: Tight-binding calculation, *Phys. Rev. B* **76**, 155434/1-8 (2007).  
DOI:10.1103/PhysRevB.76.155434
- 31 T. Ando, Anomaly of optical phonons in bilayer graphene, *J. Phys. Soc. Jpn.* **76**, 104711/1-9 (2007).  
DOI:10.1143/JPSJ.76.104711
- 32 S. Uryu and T. Ando, Cross polarized exciton absorption in carbon nanotubes with Aharonov-Bohm flux, *Phys. Rev. B* **76**, 115420/1-6 (2007).  
DOI:10.1103/PhysRevB.76.115420
- 33 M. Koshino and T. Ando, Orbital diamagnetism in multilayer graphenes: Systematic study with the effective mass approximation, *Phys. Rev. B* **76**, 085425/1-11(2007).  
DOI:10.1103/PhysRevB.76.085425
- 34 M. Koshino and T. Ando, Diamagnetism in disordered graphene, *Phys. Rev. B* **75**, 235333/1-8 (2007).  
DOI:10.1103/PhysRevB.75.235333
- [学会発表] (計 127 件)
- 1 T. Ando, S. Uryu, and M. Koshino, Theory of optical and electronic nanotube-devices, International Symposium on Carbon Nanotube Nano-electronics, Nagoya, Japan, June 11 - 13, 2012.
- 2 T. Ando, Theory of Dirac electrons in graphene, 2012 MRS Spring Meeting, Moscone West, San Francisco, USA, April 9 - 13, 2012.
- 3 T. Ando, S. Uryu, Y. Tomio, and H. Suzuura, Excitons in carbon nanotubes: Effects of dielectric environment and inter-wall interaction, Workshop on Carbon Nanotube in Commemoration of the 20th Anniversary of Its Discovery (2011-CNT20), The International House of Japan, Tokyo, December 12 - 13, 2011.
- 4 T. Ando, Physics of chiral electrons in graphene, 26th Nishinomiya-Yukawa Memorial International Workshop on Novel Quantum States in Condensed Matter 2011 (NQS2011), Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, November 7 - December 9, 2011.
- 5 T. Ando, Exotic transport properties of monolayer and bilayer graphene, International Conference Advanced Carbon Nanotstructures, St Petersburg, Russia, July 4 - 8, 2011.
- 6 T. Ando, Physics of chiral electrons in graphenes, The 15th International Symposium on the Physics of Semiconductors and Applications, Ramada Plaza Jeju Hotel, Cheju, Korea, July 5 - 8, 2011.
- 7 T. Ando, Chiral electrons and zero-mode anomalies in graphene, Topical Research Meeting on Physics: Graphene and Related Two-Dimensional Materials, Institute of Physics, London, UK, June 1 - 2, 2011.
- 8 T. Ando, Roles of pseudo-spin in electronic and transport properties of graphene, Frontiers in Nanoscale Science and Technology Workshop 2011 (FNST 2011), RIKEN Wako Campus, Wako, Saitama, Japan, January 5 - 7, 2011
- 9 T. Ando, Theory of monolayer and bilayer graphene: Pseudo-spin physics, 30th International Conference on the Physics of Semiconductors, COEX, Seoul, Korea, July 25 - 30, 2010
- 10 T. Ando, Field effect on phonons in graphene, Graphene Week 2010, College Park, Maryland, USA, April 19 - 23, 2010
- 11 T. Ando, Pseudo-spin physics in graphene, Symposium on Spin Manipulation in Solid State Systems, Wuerzburg, Germany, October 8 - 9, 2009
- 12 T. Ando, Electron-phonon interaction and field effects on phonons in graphene and nanotube, 16th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics, and Nanostructures (EDISON 16), Montpellier, France, August 24 - 28, 2009
- 13 T. Ando, M. Koshino, and K. Asano, Dynamical properties mono- and bi-layer graphene, International Workshop on Recent Progress in Graphene Research, Korea Institute for Advanced Study, Seoul, Korea, June 29 - July 2, 2009
- 14 T. Ando, M. Koshino, and K. Asano, Optical properties of monolayer and bilayer graphene, 3rd Workshop on Nanotube Optics and Nanospectroscopy, Matsushima, Japan, June 7 - 10, 2009
- 15 T. Ando, Electronic and transport properties of graphene: Theory based on continuum models, 18th Workshop on Nanoscale and Mesoscopic Systems: Graphene Physics, POSTECH, Korea, December 5 - 6, 2008
- 16 T. Ando, Theory of graphene and its multi-layers, International Symposium on Graphene Devices: Technology,

- Physics, and Modeling (ISGD2008), University of Aizu, Aizu-Wakamatsu, Japan, November 17 - 19, 2008
- 17 T. Ando, Exotic electronic properties of graphene and its multi-layers, 5th International Symposium on Surface Science and Nanotechnology (ISSS-5), International Conference Center, Waseda University, Tokyo, Japan, November 9 - 13, 2008
  - 18 T. Ando, Physics of graphene, The 2008 Asian Conference on Nanoscience and Nanotechnology (AsiaNANO2008), Biopolis, Singapore, November 3 - 7, 2008
  - 19 T. Ando, Electron transport in graphene mono and multi-layers, The 4th Vacuum and Surface Sciences Conference of Asia and Australia (VASSCAA-4), Kunibiki Messe, Matsue, Japan, October 28 - 31, 2008
  - 20 T. Ando, Physics of graphene: Zero-mode anomaly, symmetry crossover, and electron-phonon interaction, Graphene Canada 2008, Banff Centre for Conferences, Banff, Canada, September 14 - 19, 2008
  - 21 T. Ando, Theory of quantum transport in graphene and nanotubes, ICTP Conference Graphene Week 2008, Trieste, Italy, August 25 - 29, 2008
  - 22 T. Ando, Physics of graphene and its multi-layer, 9th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology, Advanced Research Laboratory, Hitachi Ltd., August 25 - 28, 2008
  - 23 T. Ando, Excitons and Aharonov-Bohm effect in carbon nanotubes, 8th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter, Kyoto, Japan, June 22 - 27, 2008
  - 24 T. Ando, Physics of carbon nanotube and graphene: (1) Electronic states in carbon nanotubes, (2) Quantum transport in carbon nanotubes, (3) Quantum transport in graphene, International Spring School on Sub-10 nm Wires, Institute for Solid State Physics, University of Tokyo, Kashiwa, Japan, May 28 - 30, 2008
  - 25 T. Ando, Graphene and emerging physics, 4th International Nanotechnology Conference on Communication and Cooperation, Tokyo, Japan, April 14 - 17, 2008
  - 26 T. Ando, Emerging physics in graphene and carbon nanotubes, First HOPE Meeting on Nanoscience and Nano-

- technology, Epochal Tsukuba, Ibaraki, Japan, February 24 - 28, 2008
- 27 T. Ando, Exotic electronic and transport properties of graphene, 5th International Winterschool on New Developments in Solid State Physics (Mauterndorf 2008), Kur and Kongresszentrum, Bad Hofgastein, Austria, February 18 - 22, 2008.
  - 28 T. Ando, Exotic transport properties of graphene and nanotube, Yukawa International Seminar 2007 on Interaction and Nanostructural Effects in Low-Dimensional Systems, Kyoto, November 5 - 30, 2007.
  - 29 T. Ando, Theory of quantum transport in graphene and nanotubes, International School on Magnetic Fields for Science, Cargese, Corsica, France, August 27 - September 8, 2007.

[図書] (計 5 件)

- 1 T. Ando, Phonons and electron-phonon interaction in graphene and nanotube, Graphene and Its Fascinating Attributes, edited by S. Pati, T. Enoki, and C. N. R. Rao (World Scientific, Singapore, 2011), pp. 135-150.
- 2 T. Ando, Role of the Aharonov-Bohm phase in the optical properties of carbon nanotubes, Carbon Nanotubes: Advanced Topics in the Synthesis, Structure, Properties and Applications (Topics in Applied Physics Series 111), edited by A. Jorio, G. Dresselhaus, and M. S. Dresselhaus (Springer, Berlin, 2008), pp. 229- 250.

[その他]

ホームページ等

<http://www.stat.phys.titech.ac.jp/ando/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

安藤恒也 (ANDO TSUNEYA)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：90011725

### (3) 連携研究者

越野幹人 (KOSHINO MIKITO)  
東北大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号：60361797

瓜生誠司 (URYU SEIJI)  
岩手大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：80342757