

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：12608  
 研究種目：特別推進研究  
 研究期間：2008～2012  
 課題番号：20001006  
 研究課題名（和文） ナノグラフェンの端の精密科学：エッジ状態の解明と機能  
 研究課題名（英文） Physical chemistry of nanographene edges: edge states and their electronic and magnetic functions  
 研究代表者  
 榎 敏明 (ENOKI TOSHIAKI)  
 東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
 研究者番号：10113424

研究成果の概要（和文）：ナノグラフェンの電子状態は端の幾何学構造により大きく影響を受ける。この問題は、固体物理学からは、質量のない相対論的 Dirac 電子の境界条件の問題としてまた、化学の視点からは、Clar の芳香族則の問題として捉えることができる。本研究では、STM/STS、AFM、Raman 効果、NEXAFS、磁気測定、電子輸送測定を通して、ジグザグ端構造では、局在非結合状態が発生し、この状態は端の化学構造にも大きな影響を受けること、アームチェア端構造では電子波の干渉が起こり、電子的安定化が起ることを実験的に解明した。

研究成果の概要（英文）：The electronic structure of nanographene crucially depends on the edge geometry. This is a consequence of the boundary condition of the massless Dirac fermion in physics, while it can be understood on the basis of aromaticity in chemistry. We investigated the role of edge geometry in the electronic structure using STM/STS, AFM, Raman scattering, NEXAFS and magnetic and transport investigations. It is found that nonbonding edge state, which is sensitive to edge chemistry details, is created in the zigzag edges, while electron wave interference contributing to the electronic stability takes place in the armchair edges.

### 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	127,700,000	38,310,000	166,010,000
2009 年度	52,700,000	15,810,000	68,510,000
2010 年度	42,400,000	12,720,000	55,120,000
2011 年度	37,700,000	11,310,000	49,010,000
2012 年度	37,700,000	11,310,000	49,010,000
総計	298,200,000	89,460,000	387,660,000

研究分野：化学

科研費の分科・細目：複合化学・機能物質化学

キーワード：走査プローブ顕微鏡、電子・電気材料、磁性、ナノ材料、表面・界面物性

### 1. 研究開始当初の背景

1996 年、藤田と本研究の分担者若林らはグラフェンのジグザグ型の端に非結合  $\pi$  電子状態(エッジ状態)が存在することを理論的に予言し、特異な磁性を発現することを示唆した。その問題意識を受けて、本研究の代表者らは、エッジ状態存在の実験的な証明を行うとともに、この状態がナノグラフェンに電子的、

化学的、磁氣的活性を与えることを種々の実験手法を用いて明らかにした。この我々のグラフェン端の研究は、Manchester 大学のグループのグラフェンの単離の成功とその特異な電子構造の発見、Nobel 物理学賞受賞をきっかけとするグラフェンブームの中で、多くの研究者の関心を呼び、この端の幾何学に依存した電子構造は、有機化学のアロマティシ

ティ（芳香族性）の問題とも関連し、物理学の分野では相対論的量子力学の基礎方程式である Dirac 方程式の境界値問題として位置づけられることが次第に明らかとなってきた。本特別推進研究では、研究代表者と分担者が研究のきっかけを創ったグラフェン端の特異なエッジ状態の問題の解明とその機能の開拓を行うこと、また、さらに、ナノグラフェンの端の幾何学構造と電子構造の相関を包括的に理解することを目指して、研究をスタートした。

## 2. 研究の目的

2つの独立な副格子からなる蜂の巣格子を有するグラフェン中の電子は質量の無い Dirac 型電子として振舞う。このようなグラフェンシートを切断してナノフラグメントにすると、ジグザグ方向、アームチェア方向の2つの独立な方向が存在する。任意形状のナノグラフェンはこのようなジグザグ端、アームチェア端の2つの端の幾何学構造のコンビネーションで記述され、ナノグラフェンの電子構造は、この端の幾何学に大きく依存する。この問題はナノグラフェンがナノサイズの芳香族分子とみなすことができることから、芳香族性の問題としても捉えることができる。本研究では、エッジ状態を含め、このような端の幾何学に依存したナノグラフェンの電子構造の包括的な解明とその電子的、磁氣的性質の解析と機能発現を目的として、以下の課題について研究を行った。

(1) ナノグラフェン端を水素、フッ素、酸素原子等で終端し、局所構造に依存した多様なエッジ状態の電子構造を極低温走査トンネル顕微鏡、非接触原子間力顕微鏡(NC-AFM)と物性理論、計算科学を用いて解明する。

(2) 電気化学 STM/STS を手段とし、正確に定義されたグラフェン端におけるゲスト分

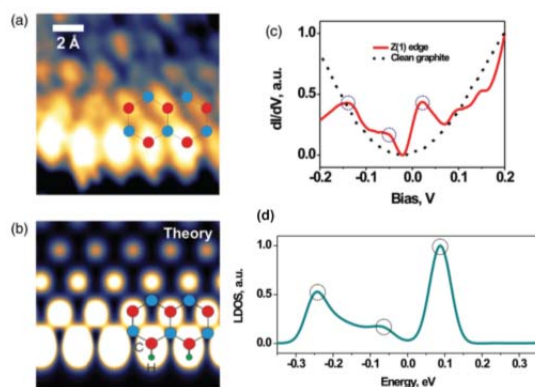


図 1. 1 水素化ジグザグ端の電子構造. (a)観測された STM 像、(b)DFT で計算された STM 像、(c) (a)で観測されたエッジ状態の STS スペクトル、(d)DFT で計算された局所状態密度。

子との電子授受機構の解明を行い、従来経験に依存していた二次電池やキャパシタ等の仕組みを精密科学へと発展させる。

(3) ナノグラファイトをホストとするホスト-ゲスト相互作用(分子間相互作用、電荷移動相互作用、イオンの静電相互作用)を用いて、種々のゲストとの界面で発現する電子・磁気・化学的新現象の発見を行うとともに、その理論的解明を行う。

(4) エッジ状態を担う電子の電荷とスピンの自由度を制御したスピントロニクス分子素子(電界効果トランジスタ(FET)を含め)の開拓を行う。

## 3. 研究の方法

グラフェン端の幾何学構造、化学構造に依存した電子構造の解析においては、STM/STS(超高真空、電気化学、大気中)、NC-AFM(超高真空、電気化学)、X線吸収(NEXAFS)、Raman 効果の実験を行うとともに、その実験結果と対応して、tight binding、DFT 計算を行った。また、磁気構造の解明については、磁化率、磁化、ESR 測定を用いた。さらに、FET等のデバイス測定においては、酸素プラズマ装置、電子ビームリソグラフィ装置を用いた。試料は、グラファイト表面、幾何的劈開グラフェン、グラフェン酸化物、ナノグラフェンが3次元無秩序ネットワークを形成した多孔性炭素(活性炭素繊維(ACF))を用いた。

## 4. 研究成果

(1) グラフェン端の幾何学構造/化学構造とエッジ状態

ジグザグ端に存在する局在エッジ状態については、①超高真空下、Ar イオン照射と水素添加により作製した水素終端グラフェンナノホール、②電気化学的酸化により作製した酸素終端グラフェン、③フッ素付加によるフッ素終端グラフェンについて解析を行った。

水素終端ナノホールでは原子分解能で種々の水素終端構造が観測された。全ての端炭素原子が1水素化されたジグザグ端(図1)では、端に局在したエッジ状態が観測され、エッジ状態の STS スペクトルにはスピン分裂が観測された。また、1つの2水素化端原子と2つの1水素化端原子からなるジグザグ端ではエッジ状態が消滅し、代わって、 $\sqrt{3}$ の蜂の巣超格子が観測された。このことは、この端構造がアームチェア端同様、K-K'谷間遷移起源の電子波干渉により支配されていることを示唆している。これらの実験結果は DFT 計算により良く再現することができた。

電気化学酸化により、酸素含有官能基で終端された安定で長いジグザグ端を作製する

ことができた。この酸素を含む官能基で終端されたジグザグ端では、エッジ状態の端からの減衰長が 1 nm 程度と長く、また、STS スペクトルには Dirac 点付近のエッジ状態に分裂構造が観測された。DFT 計算と実験結果の比較から、酸素終端端の化学構造がケトン型であることが明らかとなった。

ナノグラフェン端をフッ素終端し、その電子構造を NEXAFS スペクトルにより観測した。 $\pi$ 電子由来のエッジ状態は 284.5 eV にスペクトルピークが観測され、 $\pi^*$ 伝導バンドピーク 285.5 eV から -1.0 eV の大きな負の化学シフトを有することが見出された。この大きな負の化学シフトはエッジ状態が大きな局所状態密度を持つことを示唆している。一方、フッ素終端をすると 284.9 eV にフッ素誘起の非結合状態が観測された。小さな負の化学シフト -0.6 eV はこの非結合状態が小さな局所状態密度を持つことを示している。

### (2) グラフェン端での電子波干渉

グラフェン端の電子波干渉について、① Raman G バンドの解析、② STM による超格子の観測、③ STM、NC-AFM によるグラフェンナノ構造の観測を用いて研究を行った。

1600°C での加熱により、グラファイトステップ端にグラフェンナノリボンの作製を行った。得られたナノリボンの平均構造は幅 8 nm、長さ 1  $\mu$ m 以上の単層リボンであり、ステップエッジに平行に存在することが観測された。G バンド強度は、ナノリボンの長さ方向とレーザー光の分極方向との成す角度  $\theta$  に依存して  $\cos^2 \theta$  の依存性をもつことが明らかとなった。理論解析により、ナノリボンはアームチェア型であり、Raman 散乱が電子波干渉に支配されることが明らかとなった。

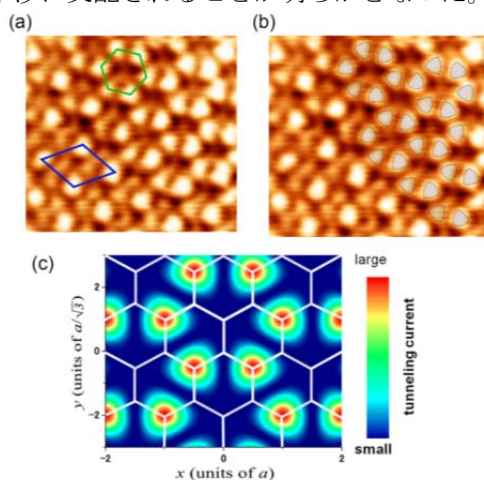


図 2. (a) アームチェア端付近で観測された蜂の巣型超格子、ひし形は通常の  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  超格子。(b) (a)の格子像の 3 回対称微細構造、(c)理論的に再現された蜂の超格子とその 3 回対称微細構造。

STM を用いてアームチェア端での電子散乱の効果を調べた。アームチェア端では  $\sqrt{3}$  の蜂の巣格子型超格子の形成が観測された。また、この超格子の各格子点は 3 回対称の微細構造を有することが見出された。この結果は K-K' 谷間散乱による電子波干渉として、波動関数から局所状態密度の空間分布を理論的に計算すると蜂の巣格子型の超格子が再現された。また、解析の結果、隣り合う超格子点が逆位相の関係にあり、その結果、格子点同士には反結合が形成され、3 回対称微細構造が形成されることが明らかとなった。

酸化グラフェン中に形成されたグラフェンナノ構造の電子構造とナノ構造の大きさ、幾何学構造との相関を STM、NC-AFM により解析をした。グラフェンナノ構造の電気伝導度はナノ構造の大きさの増加に従って増加することが明らかとなった。また、ジグザグ端を有するナノ構造がアームチェア端を有するナノ構造に比べて電気伝導度が大きいことが見出された。さらに、原子分解能での STM 測定を用いて詳細にナノ構造の電子構造を解明した結果、アームチェア端型ナノ構造では、グラフェンの特定の六員環に sextet は局在し、定在波が形成されることが見出された(図 3)。一方、ジグザグ端型ナノ構造では、sextet は六員環の間で非局在化していることが明らかとなった。これらの結果は、グラフェンナノ構造の電子構造が Clar の芳香族 sextet 則を用いて理解できることを示唆している。高い伝導性を有するジグザグ端型ナノ構造では、sextet の非局在化により、電子動きやすくなっていることを反映しており、アームチェア端型ナノ構造の低い伝導性は、sextet の局在による定在波の形成とその結果としてエネルギーギャップが開いたことと理解される。

### (3) ナノグラフェン端のエネルギー的安定性

多孔性活性炭素繊維はナノグラフェンの 3 次元無秩序ネットワークからなり、構成基本

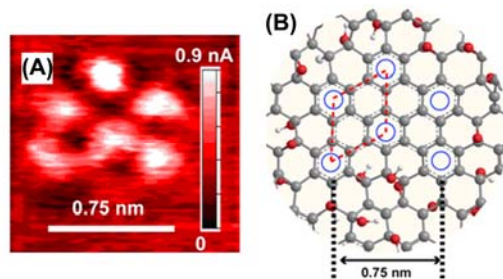


図 3. (A) STM 像で観測されたアームチェア端型グラフェンナノ構造中の局在した sextet(輝点)と (B)そのモデル構造。

単位であるナノグラフェンは約 2 nm の大きさを持ち、約 300 個の炭素原子から形成される。高温、酸素雰囲気下で加熱を行うと、ナノグラフェン端は酸化されて削られ、ナノグラフェンの大きさは次第に小さくなる。熱重量分析、伝導度、NEXAFS スペクトルにより、端酸化による端構造の変化を調べた。NEXAFS スペクトルは伝導 $\pi^*$ バンドと Fermi 準位に存在するエッジ状態の 2 つの寄与により説明できる。熱分析の結果からは、酸化温度を上昇すると次第にナノグラフェンサイズは減少することが示唆される。一方、NEXAFS スペクトルからは、酸化温度を上昇すると、エッジ状態の寄与が減少することが明らかとなった。このことは、エッジ状態はジグザグ端のみに存在することから、端を酸化して行くと、端の削られ方は一様でなく、熱力学的に不安定なジグザグ端から削られ、次第に熱力学的に安定なアームチェア型端が主体となっていくことと理解される。

#### (4) ナノグラフェンのエッジ状態の磁性

活性炭素繊維のエッジ状態の有する局在スピンの磁性と電子輸送との相関を磁化率、ESR、伝導度を用いて解析した。ESR スペクトル強度は 30 K 以上の高温領域では Curie 的な局在磁性を示すが、30 K 以下では強度は大きく低下する。このことは静磁化率が全温度領域で Curie 的であることと異なり、30 K 以下でエッジ状態の磁性がスピンの動的な挙動に支配されることを示している。これに対

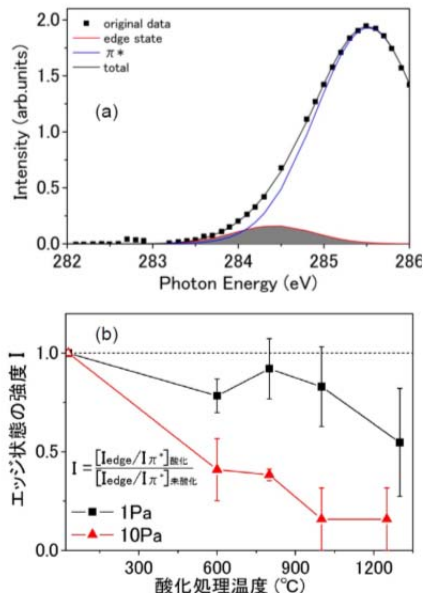


図 4. (a) 活性炭素繊維の NEXAFS スペクトル; 伝導 $\pi^*$ バンドと Fermi 準位付近に存在するエッジ状態が共存。(b) エッジ状態の NEXAFS スペクトル強度の酸化処理温度依存性。酸素分圧は 1 Pa、10 Pa で測定。

応して、ESR 線幅は Korringa 則に従い高温領域では温度に比例して変化し、局在スピンの伝導電子と強く相互作用していることが示唆されるが、30 K 以下では線幅が大きく増大し、さらに、強いマイクロ波照射下ではホールバーニング現象が起こり、不均一スピン系としての特徴を示す。一方、伝導度は Coulomb gap 型可変長ホッピングの挙動を示し、ナノグラフェン間の電子輸送は Coulomb 相互作用の影響下でのナノグラフェン間ホッピングが支配することで理解され、低温ではナノグラフェン内に電子は局在する。この磁性と電子輸送の実験結果は、ナノグラフェン内部のエッジ状態スピンの本質的挙動を反映しており、線幅の 30 K 以下の不均一増大は個々のナノグラフェンのエッジ状態スピンが不均一な静的内部磁場の影響下にあることと理解される。このことは、任意の形状のナノグラフェンはジグザグ端とアームチェア端の任意のコンビネーションで記述され、ジグザグ端内での強い強磁性相互作用とジグザグ端間での中くらいの大きさの強磁性/反強磁性相互作用の連携効果により、ナノグラフェン内部のエッジ状態スピンがフェリ磁性構造を形成していることと結論される。

#### (5) グラフェンナノ構造の作製

①酸化グラフェンを非接触AFMにより調べ、約9 nmの間隔で配列した1次元皺の周期構造

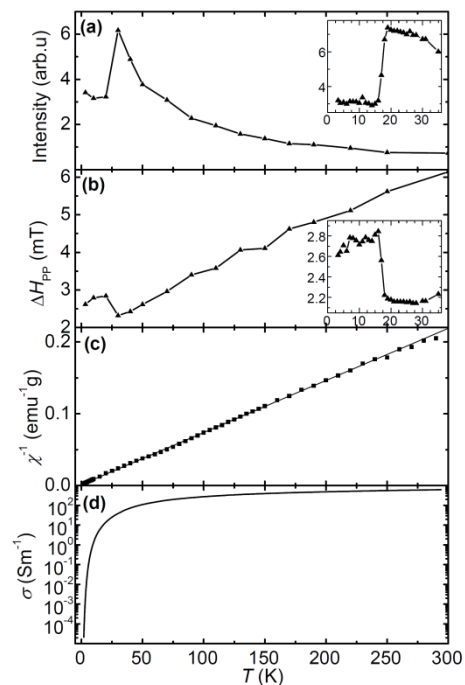


図 5. 活性炭素繊維の磁性と電子輸送. ESR 強度 (a)、ESR 線幅 ( $\Delta H_{PP}$ ) (b)、静磁化率 ( $\chi$ ) (c)、電気伝導度 ( $\sigma$ ) (d) の温度依存性。照射マイクロ波強度 1  $\mu\text{W}$ 。(a) と (b) の挿入図は低温の拡大図。

を見出した。これは、ジグザグ方向に、エポキシリングが配列することによって出来る酸化構造であり、1次元酸化グラフェンを挟んで、ジグザグ端ナノグラフェンリボンが形成されたことと理解される。また、AFM針により、意図的にカットすることにより、グラフェンナノ構造の作製に成功した。

②電気化学環境下でのグラフェンナノ構造の形成を試み、イオン液体中でグラファイト電極との界面にイオン液体のイオンペアの大きさに相当する層からなるステップ構造が生じることを電気化学 FM-AFM により見いだした。平坦で電荷をもたないグラファイト電極上でも局所的に厚みの異なる層構造が液体中でも安定に存在することを示した。

#### (6) ナノグラフェンの電子状態の理論解析

①ナノグラフェン端の形状効果と電子物性との関係性を理論数値解析により解明し、エッジ状態に起因するサブバンドのため、谷間散乱が抑制される状況では、ジグザググラフェンナノリボンは、長距離型不純物に対して電子伝導の影響を受けにくく、完全伝導チャンネルを有することを見出した。

② 修飾端構造を有するナノグラフェンを強結合モデルおよび第一原理計算によって解析し、AB 副格子間に強い非対称を導入することで磁性発現が可能であることを解明した。また、有効質量近似により、Raman G バンドの電子格子相互作用と電磁相互作用を解析し、グラフェン端でのラマン強度がレーザーの偏光方向と端の方向性に強く依存することを明らかにした。

③配置間相互作用の数値計算手法を用いて、ナノグラフェンのジグザグ端に現れる磁性状態の電荷・スピン励起構造を調べた。電荷励起に関しては、平均場近似で得られる一電子描像とよく一致することを示した。一方、スピン励起構造には、一電子描像では得られないギャップレスのスピン励起がおきることを明らかにした。さらに、キャリア・ドーピングによって、電荷・スピンともに励起ギャップが消えることを明らかにした。

④ グラフェンに関連する 2 次元蜂の巣構造をもつ物質 BC<sub>3</sub> に関して、密度汎関数理論に基づく第一原理計算によって、その電子構造とエッジ構造の安定性を調べた。バルクの BC<sub>3</sub> シートは、半導体であるが、リボン構造にすることによって表面状態が形成し、金属化することを明らかにした。また、通常のリボン系とは異なり、バンドギャップがリボンの幅が広がるに従って広がっていくという特異な振る舞いを明らかにした。

⑤ グラフェンナノリボンの電子状態を密度汎関数理論に基づくスピン密度近似によって調べた。平均場 Hubbard 模型と比較する

ことで、ナノリボンの反強磁性状態及び強磁性状態を記述する有効モデルの導出を議論した。

#### 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 89 件) (すべて査読有り)

1. M. Ziatdinov, S. Fujii, K. Kusakabe, M. Kiguchi, T. Mori, and T. Enoki, Visualization of Electronic States on Atomically Smooth Graphitic Edges with Different Types of Hydrogen Termination, *Phys. Rev. B*, **87**, 115427-1-7 (2013).
2. S. Fujii and T. Enoki, Nanographene and Graphene Edges: Electronic Structure and Nanofabrication, *Acc. Chem. Res.*, (2013), ASAP DOI: 10.1021/ar300120y.
3. T. Enoki, K. Takai, M. Kiguchi, Magnetic Edge State of Nanographene and Unconventional Nanographene-Based Host-Guest Systems, *Bull. Chem. Soc. Jpn. Award Accounts* **85**(3), 249-264 (2012).
4. K. Wakabayashi and S. Dutta, Nanoscale and Edge Effects on Electronic Properties of Graphene, *Solid State Commun.* **152**, 1420-1430 (2012).
5. S. Fujii and T. Enoki, Clar's Aromatic Sextet and  $\pi$ -Electron Distribution to Nanographene, *Angew. Chem. Int. Ed.* **51**, 7236-7241 (2012).
6. T. Enoki, Role of Edges in the Electronic and Magnetic Structures of Nanographite, *Phys. Scr. T* **146**, 014008-1-14 (2012), (*Proc. of the Nobel Symposium on Graphene and Quantum Matter*).
7. K. Sasaki, K. Wakabayashi, and T. Enoki, Electron Wave Function in Armchair Graphene Nanoribbon, *J. Phys. Soc. Jpn.* **80**, 044710-1-7 (2011).
8. K. Sasaki, K. Wakabayashi, and T. Enoki, Polarization Dependence of Raman Spectra in Strained Graphene, *Phys. Rev. B* **82**(20), 205407-1-10 (2010).
9. K. Takahara, S. Hao, H. Tanaka, T. Kadono, M. Hara, K. Takai, and T. Enoki, Mechanical-Compression-Induced Magnetic Ordering of Nanographene Spins, *Phys. Rev. B* **82**(12), 121417-1-4 (2010).
10. S. Fujii and T. Enoki, Cutting up the Graphene into Small Pieces, *J. Amer. Chem. Soc.* **132**(29), 10034-10041 (2010).
11. K. Sakai, K. Takai, K. Fukui, T. Nakanishi, and T. Enoki, Honeycomb Superperiodic Pattern and its Fine Structure near the Armchair Edge of Graphene observed by

- Low-temperature Scanning Tunneling Microscopy, *Phys. Rev. B* **81**(23), 235417-1-7 (2010).
12. V. L. J. Joly, K. Takahara, K. Takai, K. Sugihara, and T. Enoki, M. Koshino and H. Tanaka, Effect of Electron Localization on a Edge-State Spins in a Disordered Network of Nanographene Sheets, *Phys. Rev. B* **81**(11), 115408-1-5 (2010).
  13. K. Sasaki, M. Yamamoto, S. Murakami, R. Saito, M. S. Dresselhaus, K. Takai, T. Mori, T. Enoki, K. Wakabayashi, Kohn Anomalies in Graphene Nanoribbons, *Phys. Rev. B* **80**, 155450-1-11 (2009).
  14. T. Enoki and K. Takai, The Edge-state of Nanographite and the Magnetism of the Edge-State Spins, *Solid State Commun.* **149**, 1144-1150 (2009).
  15. H. Sijia, K. Takai, and T. Enoki, Electronic and Magnetic Properties of Acid-adsorbed Nanoporousactivated Carbon Fibers, *Carbon* **46**(1), 110-116 (2008).

[学会発表] (計 290 件)

1. T. Enoki, “Edge geometry and electronic structure of nanographene”, ACS Meeting, New Orleans (USA) Apr. 11 (2013). (招待講演)
2. T. Enoki “Electronic properties of grapheme edges”, The 13<sup>th</sup> Edition of Trends in Nanotechnology International conference (TNT2012), Madrid (Spain), Sep. 12, 2012. (招待講演)
3. T. Enoki “Magnetic and electronic structures of nanographene and fluorinated nanographene with an interplay of edge-state spins and dangling bond spins”, Graphene 2012, Brussels (Belgium), Apr. 12 (2012). (招待講演)
4. T. Enoki “Graphene edges; unconventional electronic and magnetic properties”, Fundamental Aspects of Graphene and Other Carbon Allotropes, Santa Barbara (USA), Jan. 9 (2012). (招待講演)
5. T. Enoki “Magnetism of nanographene; edge state of topological origin and sigma dangling bond state of defect origin”, UK-Japan Workshop on Graphene, Growth, Characterisation, and Applications of Graphene, Windermere (UK), Nov. 17 (2011). (招待講演)
6. T. Enoki “Nanographene-based host-guest systems” 16th Int. Symp. Intercalation Compounds (ISIC16), Seč-Ústupy (Czech Rep.), May. 24 (2011). (招待講演)
7. T. Enoki “Edge effect on the electronic structure of graphene”, UK-Japan Workshop

- on Graphene, Lancaster (UK), Feb. 4, 2011. (招待講演)
8. T. Enoki “Nanographene Important Roles of Edges in the Electronic Structures and Magnetism”, Graphene Brazil 2010, Belo Horizonte (Brazil), Dec. 16 (2010). (招待講演)
  9. T. Enoki “Edge state of nanographene and its magnetic functions”, Nobel Symposium on Graphene and Quantum Matter, Stockholm (Sweden), May. 30 (2010). (招待講演)
  10. T. Enoki, “Magnetic properties of nanographene and nanographene-based host guest systems”, KIAS Workshop on Graphene, Seoul (Korea), Jun. 29 (2009). (招待講演)
  11. T. Enoki, “Nanographene and its Unconventional Electronic and Magnetic Properties”, 9<sup>th</sup> Int. Conf. on Nanostructured Materials (Nano 2008), Rio de Janeiro (Brazil), Jun. 4 (2008). (招待講演)
  12. T. Enoki “Unconventional electronic and magnetic properties of nanographene”, ICTP Conference ‘Graphene Week 2008’, International Center for Theoretical Physics, Trieste (Italy), Aug. 26 (2008). (招待講演)

[図書] (計 2 件)

1. T. Enoki and T. Ando, Physics and Chemistry of Graphene, Pan Stanford Pub., 460p, 2013.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

榎 敏明 (ENOKI TOSHIAKI)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：10113424

### (2) 研究分担者

- ・高井 和之 (TAKAI KAZUYUKI)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号：80334514
- ・福井 賢一 (FUKUI KEN-ICHI) (~H23.3)  
大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授  
研究者番号：60262143
- ・若林 克法 (WAKABAYASHI KATSUNORI)  
独立行政法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・独立研究員  
研究者番号：50325156
- ・横田 泰之 (YOKOTA YASUYUKI)  
大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教  
研究者番号：00455370

### (3) 連携研究者

- ・木口 学 (KIGUCHI MANABU) (H21.3~)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号：70313020
- ・福井 賢一 (FUKUI KEN-ICHI) (H23.4~)  
大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授  
研究者番号：60262143