

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24651115

研究課題名(和文) グラフェンナノリボンの新規液相合成法の開拓

研究課題名(英文) Electrochemical synthesis of graphene nanoribbons

研究代表者

坂口 浩司 (Sakaguchi, Hiroshi)

京都大学・エネルギー理工学研究所・教授

研究者番号：30211931

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、我々が世界に先駆けて開発した電気化学エピタキシャル重合法をグラフェンナノリボンの合成に応用し、(1)液相法である電気化学を用いて、原料である“分子パーツ”を電極表面で重合させてGNR前駆体を形成させ、(2)高真空中で前駆体を加熱し、脱水素縮環反応を起こさせる、液相中の電気化学と高真空中加熱を組み合わせた世界で初めての新しいGNR合成法の提案し、実証に成功した。

研究成果の概要(英文)：Extremely new synthetic method of Graphene Nanoribbons (GNR) using electrochemical technique was demonstrated. Precursor of naphthalene derivative was applied to the electrochemical epitaxial polymerization technique, resulting in producing GNR on Au(111) surface. Produced GNR was annealed in ultra high vacuum condition to form perfect dehydrogenation. This structure was analyzed by scanning tunneling microscope and Raman spectroscopy.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・ナノ構造科学

キーワード：グラフェンナノリボン 表面重合 電気化学

### 1. 研究開始当初の背景

近年、電子デバイス材料として、グラフェンの持つ高い電子移動度が注目を集めている。グラフェンは炭素で形成された六角形の構造を持つシート状の物質であり、2004年、Geimらは、グラファイトを粘着テープで一層ずつ剥離していくという簡単な方法で、グラフェンを単離することに成功した。これにより、グラフェンの電気的特性を測定することが可能になり、室温での電子移動度が  $10000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  と、シリコンに比べ非常に高い電子移動度を持つことや、ゼロギャップ半導体であることが明らかとなり、大きな注目を集めた。しかしゼロギャップ半導体であるグラフェンは、バンドギャップが無い疑似金属であることから、半導体デバイスへの応用が限定される。そこでバンドギャップを広げることにより、高移動度を維持したまま半導体としての性質を持たせ、デバイスへの幅広い応用を可能にすることが求められている。その1つの有効な手段として、グラフェンナノリボン (GNR) の合成に大きな興味を持たれている。

### 2. 研究の目的

上述した GNR は、“有限幅を持つグラフェン”すなわち“梯子型導電性高分子”であり、優れた半導体的性質を持つことが理論的に予測されている。しかし完全共役系を達成する反応が難しく、且つ不融・不溶であるため、有効な合成法の確立が世界的に望まれている。これまでに報告された GNR の作製手法は、大きく分けてトップダウン法とボトムアップ法に分けられる。トップダウン法は、グラフェンやカーボンナノチューブを微細加工技術により加工し、GNR を作製する手法である。多層カーボンナノチューブにアルゴンイオンエッチングを施すことにより、幅が 20 nm 以下の GNR の作製が報告された。また、電子ビームリソグラフィを用いて 20 nm 幅の GNR を作製した後、さらにアルゴンイオンエッチングを施すことにより、10 nm 以下の幅を持つ GNR の作製に成功し、オン/オフ比  $10^4$  の性能を持つトランジスタの開発も報告されている。最近では、プラズマ CVD を用いて Ni 基板上での GNR 作製に成功し、移動度  $40 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 、オン/オフ比  $10^4$  の性能を持つトランジスタも報告されている。しかし、トップダウン法はエッジの均一性が低い上に、幅のコントロールには限界がある。それを解決する方法として、ボトムアップ法が挙げられる。ボトムアップ法とは、化学反応を用いて、原料分子を組み立てながら GNR を作製する手法である。1986年、村上はペリレンテトラカルボン酸二無水物 (PTCDA) をアルゴンガス中で加熱することにより、ナフタレン骨格の GNR の作製に成功した。しかしこれは、生成した高分子同士が凝集し、糸状になってしまっているため、電子デバイスに応用できるものではなかった。Mullen

らは臭素原子を有するアントラセン誘導体を真空条件下で加熱した金 (111) 基板上に蒸着することにより化学反応を起こさせ、アントラセン骨格を持った、長さ約 20 nm の GNR を作製することに成功した。また 2011 年には Talyzin らによって、ペリレンやコロネンを昇華させ、カーボンナノチューブ内で合成させることで、GNR を作製する報告された。

一方、金属表面は強い電子的相互作用により有機分子を二次元配列させる原子スケールの鑄型でありこれまで様々な表面科学研究が行われて来た。我々は、単一分子レベルで導電性高分子の長さ・密度・方向・形を任意に制御しながら金属表面上に合成する新しい分子細線構築技術“電気化学エピタキシャル重合”を開発した (Nature Materials, 3, 551 (2004).)。この方法は原料：モノマーを含む電解質液中、ヨウ素で表面修飾した金電極に電圧パルスを印加する手法であり、一軸に成長した導電性高分子細線を作製することに成功した。更に 2 種類の異なる導電性高分子細線を基板上 1 分子レベルで連結させることにも初めて成功した (Science, 310, 1002 (2005).)。

現在までに報告されているボトムアップ型の GNR 作製手法は気相中での合成であり、液相中での合成例は未だにない。これは従来の気相中での合成法である超高真空蒸着法などは 400 以上という高温で加熱することにより脱水素縮環反応を起こし、GNR 合成を行っていたのに対し、液相中では溶液の分解、蒸発が起こる高温加熱が不可能であることで、脱水素縮環反応に必要な高いエネルギー注入が行えないことが原因である。しかし液相系には多様な原料を溶解でき、溶媒和により活性種が安定化されるなど様々な利点がある。そこで本研究提案では、我々が世界に先駆けて開発した電気化学エピタキシャル重合法を GNR の合成に応用し、(1) 液相法である電気化学を用いて、原料である“分子パーツ”を電極表面で重合させて GNR 前駆体を形成させ、(2) 高真空中で前駆体を加熱し、脱水素縮環反応を起こさせる、液相中の電気化学と高真空中加熱を組み合わせた世界で初めての新しい GNR 合成法の提案と実証を行う事を目的とした。

### 3. 研究の方法

高いキャリア移動度を持つ高性能電子デバイスが期待される GNR を金属表面上で合成することを目的とした。具体的には、グラフェンナノリボンの原料となる“パーツ分子”を液中で電気化学重合させ、金属表面上に GNR 前駆体 (共役系が未発達な不完全なナノリボン) を形成させた。次に、作製した前駆体を真空中で加熱し、脱水素縮環反応を起こさせ全共役系である GNR を合成した。

電気化学エピタキシャル重合は 3 電極法を用いて行った。作用極にはマイカ上に蒸着さ

れた金基板を、対極と参照電極には白金線を用いた。初めに、それぞれの電極の準備を行った。作用極である金基板上をガスバーナーで十分にあぶり、表面を(111)面に整えた。また、対極と参照電極もガスバーナーで十分に加熱し、表面の不純物を蒸発させた。その後、3種類それぞれの電極をホルダーにセットした。次に、溶液の準備を行った。出発物質であるモノマーとして合成したナフタレン誘導体と電解質であるテトラブチルアンモニウムヘキサフルオロフォスファートを用いた。窒素で満たされたグローブボックス内で溶媒であるオルトジクロロベンゼンを加え、ホルダーをセットした。その後、ヒーター上で120℃まで加熱し、電解質を完全に溶かした。

次にポテンシオ/ガルバノスタットを用いて、電解重合を行った。この時に、電解条件として短周期条件(電圧2.5V、電圧印可時間500ms、周期1s)あるいは長周期条件(電圧2.5V、電圧印可時間500ms、周期10s)を用いた。次に重合度の低い物質を溶解させるために、ホルダーごと金基板を180℃に加熱しておいたo-DCBに10分間浸し、その後、ホルダーから金基板を取り外し、DCMで十分に洗浄した。

電気化学エピタキシャル重合により合成したGNRを顕微ラマン分光計測、質量分析装置、走査トンネル顕微鏡(STM)により、グラフェンナノリボン前駆体の化学構造や電子状態を詳細に検討した。また、電気化学合成した前駆体を超高真空中( $10^{-10}$  Torr.)に移し、400~500℃に加熱し、脱水素縮環表面重合を行うことにより、グラフェンナノリボンへの変換を行った。また、管状炉で加熱した石英管中で、H<sub>2</sub>/Arを流して還元雰囲気・低真空中で同様な加熱(400~500℃)を行い、より簡便な加熱法によるグラフェンナノリボンの作製を行った。

#### 4. 研究成果

長周期条件で作製した電解重合物質のラマンスペクトルから化学構造を同定した。電解重合物質のラマンスペクトルとGaussianによる理論計算値との比較を行った。Gaussianの計算方法にはDFTを用い、基底関数は6-31G-(d)で計算を行った。電解重合物質のラマンスペクトルの結果より、545 cm<sup>-1</sup>にGNRの幅に由来する振動であるRadial-breathing-like mode (RBLM)、1342 cm<sup>-1</sup>にエッジカーボンの振動であるDバンド、1584 cm<sup>-1</sup>に長軸方向の振動であるGバンドというGNRに現れる3つの特徴的なピークが見られた。RBLMのピーク値はGNRの幅により決定され、2007年にDongらがVienna Ab-initio Simulation Packageを用いて行った理論計算の結果より、ナフタレン幅GNRのRBLMは545.7 cm<sup>-1</sup>であると報告されている。この値は、作製した電解重合物質のRBLM値と一致した。

次にGNRのラマンシミュレーション結果より、各ピークの詳細な振動解析することで、1332 cm<sup>-1</sup>にエッジカーボンの振動であるDバンド、1587 cm<sup>-1</sup>に長軸方向の振動であるGバンドのピークが現れていることが明らかとなった。このピーク位置も電解重合物質に現れる各バンドの位置と良い一致を示している。以上の結果より、作製した電解重合物質はナフタレン幅を持つGNRであると考えられる。電解重合物質の質量分析スペクトルより、196、198の間隔で規則的なピークが見られた。ナフタレン誘導体の分子量が200であることから、196はナフタレン同士が2か所で結合したことを示し、198は1か所で結合したことを示していると考えられる。以上のようにピーク間隔を説明できることから、この規則的ピークはナフタレン誘導体が結合していくことによって現れたものであると考えられる。4量体、5量体、6量体の各ピーク部分において、一番小さい質量のピークである788、984、1180のピークが各量体のGNRの分子量と一致する。各GNRのピークからプラス1の分子量に現れているピークは、レーザーで昇華させた試料へのプロトン付加によるピークであると考えられるため、これもGNR由来のピークとなる。また各GNRのピークからプラス2の分子量に現れるピークは、水素2つ分多い構造由来のものであるため、脱水素未縮環が1か所存在するGNRのピークであると考えられる。以上より、4,5,6量体の各ピークの強度を相対化することで算出した脱水素縮環率から、各量体で主鎖の中に1か所脱水素縮環できていない部分があるプレポリマーの形成もわずかに確認できるものの、主生成物は完全に脱水素縮環したGNRであるということが確認された。

電気化学表面合成した試料を走査トンネル顕微鏡(STM)を用いて直接観察を行った。GNRが基板上で3軸方向に成長していることが確認された。これは金(111)の格子に沿って成長したことを示していることが明らかになり、GNRのエピタキシャル成長が確認できた。また微細領域では、形成されたGNRが数本一組となり、同じ方向に成長していることが確認できた。これはナフタレン誘導体のプトキシ基中のアルキル鎖部分がGNR間で入子構造になっているものと考えられる。STM像から得られたGNRの分子鎖長ヒストグラムの結果より、幅広い鎖長のGNRが形成されており、約10nmのGNRが最も多く形成されていることが分かった。また一部では、長さ30nm以上の高分子量のGNRも形成されていることが確認された。

次にGNRの高さに関する解析を行った。2010年にMullenらにより、金(111)基板上に合成された2種類のプレポリマーと、それが脱水素縮環したGNRに関して、STMによる高さの報告がされている。その結果、プレポリマーはねじれた構造を有することで、金(111)面に対して不均一な高さを持つことが

示されている。また異なる構造のプレポリマー同士を比較しても、その高さが異なることが示されている。一方で、GNR は剛直な構造を有するため、金 (111) 面に対して均一な高さを持つと考えられる。更に構造の異なる GNR 同士を比較しても、共に 0.18 nm の高さとなることが明らかにされている。本研究で得られた STM 像のラインに沿った断面高さの解析より、電解重合物質が金 (111) 面上で 0.18 nm の均一な高さを持ち形成されていることが明らかになった。これは mullen らが報告している GNR の特徴と一致した。この結果から、金 (111) 基板上で GNR 形成が行われていることが確認され、また金 (111) 基板上での GNR の高さは 0.18 nm であることが明らかになった。

更に分子幅 GNR の電気物性を明らかにするため、走査トンネル分光 (STS) 測定を行うことにより、作製した GNR のバンドギャップ値を明らかにした。Set point 電流を変化させ、STS を測定すると変曲点を持つスペクトルが得られた。作製した GNR がバンドギャップを有する半導体であることが分かった。バンドギャップ値を求めるために、Set point を 50 pA 時の STS スペクトルの結果を微分した、微分トンネルコンダクタンスを求めた。この結果より、ナフタレン幅 GNR のバンドギャップが 0.82 eV であることが実験的に初めて求められた。2007 年に Young らが第一原理計算を用いて行った理論計算の結果では、理論計算に局所密度近似 (LDA) あるいは GW 近似を用いることにより、ナフタレン幅 GNR のバンドギャップがそれぞれで、0.44 eV あるいは 1.68 eV であると計算されている。GNR は幅、エッジ構造により、バンドギャップ値が大きく変化することが理論計算の結果より明らかにされている。しかし、現在までに幅を規定した GNR のバンドギャップ測定は、アントラセン幅 GNR でバンドギャップが 2.3 eV であるとの報告しかなく、その他の GNR の値は実験的には確かめられていなかった。本研究により、アームチェアエッジ構造を有するナフタレン幅 GNR のバンドギャップ値を初めて実験的に確定することに成功した。

STM 像及びラマンスペクトルにより、金 (111) 基板上での GNR 形成における電位依存性を明らかにした。電解重合時の印加電圧を 2 V、2.3 V、2.5 V と変化させて作製した電解重合物質の STM、ラマンスペクトルの測定の結果より、印可電圧を 2 V、2.3V として作製した試料では、分子長が短い生成物しか形成されていないことが分かった。これらに対し印加電圧 2.5 V で作製した GNR にはほぼ縮環した高分子が金 (111) 基板上に形成されていると考えられる結果を得た。以上から、GNR の形成に必要な電気二重層界面への高エネルギー注入を行うには、2.5 V 以上という電位の閾値が存在することが分かった。

モノマーの構造が電気化学エピタキシャル重合により作製した電解重合物質に与え

る影響について検討した。電気化学エピタキシャル重合では、電解重合のみで重合反応及び脱水素縮環反応を行い、GNR 合成を行うため、効率的にこの 2 つの反応が進むことが重要な点になる。ナフタレンをモノマーとして用いた電解重合では、この 2 つの反応が十分に進行しないと考え、効率的な反応の行えるモノマーの設計を検討した。重合反応機構及び脱水素縮環反応機構より、どちらの反応も酸化反応により、電子が引き抜かれ、カチオンラジカルの生成が起こることで反応が進行すると考えられる。各反応を促進するためには、カチオンラジカルを安定化させる必要があると考え、電子供与性の増大効果のあるプトキシ基を付加したナフタレン誘導体を合成した。またこのプトキシ基は適度な長さのアルキル基を含むことによる自己組織化のアンカー効果として機能も期待できる。このモノマーが他のモノマーに比べ、効率よく GNR を形成することが明らかとなった。

電気化学エピタキシャル重合で作製した GNR を超高真空下で加熱することで、加熱による GNR の変化を STM 観察及びラマンスペクトルを用いて明らかにした。430、500、580 で加熱し作製した加熱後物質の STM 像及びラマンスペクトルの結果より、430 で加熱した加熱後物質の STM 像及びラマンスペクトルは、加熱前と比べて変化は見られなかった。過去に報告されている超高真空蒸着法による GNR 合成では、超高真空下 400 で加熱することにより脱水素縮環反応を起こし GNR 合成を行っている。500 で加熱した加熱後の STM 像では GNR の形状を保持したまま、GNR 同士が凝集し始めていることが分かった。更に高温で加熱を行った STM 像では凝集した GNR の形状が消え、大きな 1 つの生成物を形成していることが分かった。またこれに合わせて、ラマンスペクトルの 1340  $\text{cm}^{-1}$  付近の D バンドがブロードになっていくことが観測された。ラマンスペクトルがブロードな D バンドと 1600  $\text{cm}^{-1}$  での G バンドのみというアモルファスカーボンのラマンスペクトルに近づいていくことから、加熱により GNR が一部アモルファスカーボン化していると考えられる。

以上より、本研究では、以下の成果を達成した。有機合成したナフタレン誘導体を含む電解質溶液中で、金単結晶電極にパルス電圧を印可することにより、電極表面上でナフタレン誘導体が重合、更に脱水素縮環が起こりナフタレン系グラフェンナノリボンの電極表面上での合成に成功した。走査トンネル顕微鏡測定より、最長で長さ 30 nm のワイヤ状の構造を確認し、金単結晶上に配列して成長することを明らかにした。またラマン分光顕微鏡により得られたスペクトルは、ナフタレン系グラフェンナノリボンのシュミレーションとほぼ一致することを確認した。更に、質量分析装置により、低分子量のグラフェンナノリボンを選択的に解析することができ、

このモノマーが高い脱水素縮環率を持つことを明らかにした。以上から、本研究では、固液界面での電気化学反応を用いる初めての GNR 合成を提案し実証した。

#### 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 6 件)

1. “Effect of gold nanoparticle in hole-transport layer on inverted organic thin-film solar cell performance”, T. Akiyama, T. Nishida, T. Matsumoto, H. Sakaguchi, A. Suzuki, T. Oku, *Physica Status Solidi A*, (2014), 査読有, in press, (DOI:10.1002/pssa.201330674)
2. “Width-Controlled Sub-nanometer Graphene Nanoribbon Films Synthesized by Radical-Polymerized Chemical Vapor Deposition”, H. Sakaguchi, Y. Kawagoe, Y. Hirano, T. Iruka, M. Yano, T. Nakae, *Advanced Materials*, (2014), 査読有, in press, (DOI:10.1002/adma.201305034)
3. “ボトムアップ表面重合の展望”, 坂口 浩司, *高分子*, 62(11), pp.685-688, (2013), 査読有,
4. “異種分子ワイヤーのボトムアップ表面合成”, 坂口 浩司, *マテリアルステージ*, 12(12), pp.18-20, (2013), 査読有
5. “Benzol[b]trithiophene Polymer Network Prepared by Electrochemical Polymerization with a Combination of Thermal Conversion”, T. Nakae, S. Mizobuchi, M. Yano, T. Ukai, H. Sato, T. Shinmei, T. Inoue, T. Irifune, H. Sakaguchi, *Chemistry Letters*, 41(2), pp.140-141, (2012), 査読有
6. “Effective Synthesis of Diiodinated Picene and Dibenzo[a,h]anthracene by AuCl-Catalyzed Double Cyclization”, T. Nakae, R. Ohnishi, Y. Kitahata, T. Soukawa, H. Sato, S. Mori, T. Okujima, H. Uno, H. Sakaguchi, *Tetrahedron Letters*, 53(13), pp.1617-1619, (2012), 査読有

[学会発表](計 26 件)

1. 小島 崇寛, 平野 善崇, 中江 隆博, 矢野 真葵, 坂口 浩司, “2 ゾーン CVD 法による幅制御した極細グラフェンナノリボンの合成”, 電気化学会第 81 回大会, 関西大学千里山キャンパス, (2014.3.29-31)
2. 矢野 真葵, 平野 善崇, 小島 崇寛, 中江 隆博, 坂口 浩司, “ラジカル重合型化学気相成長法による sub-1 nm 幅グラフェンナノリボンの表面合成”, 日本化学会第 94 春季年会, 名古屋大学東山キャンパス, (2014.3.27-30)

3. 小島 崇寛, 平野 善崇, 矢野 真葵, 坂口 浩司, “新規化学気相成長法を用いたボトムアップ型グラフェンナノリボンの合成とその半導体特性”, 日本化学会第 94 春季年会, 名古屋大学東山キャンパス, (2014.3.27-30)
4. 杉村 卓哉, 中江 隆博, 森 重樹, 奥島 鉄雄, 宇野 英満, 坂口 浩司, “3-ナフトペリレンの 2 量化によるヘキサリレンの合成”, 2013 ハロゲン利用ミニシンポジウム(第 6 回臭素化学懇話会年会), 愛媛大学城北キャンパス, (2013.11.29)
5. 宮城 要, 中江 隆博, 森 重樹, 奥島 鉄雄, 宇野 英満, 坂口 浩司, “BCOD 縮環アントラセンダイマーを用いたナノグラフェン分子の合成”, 2013 ハロゲン利用ミニシンポジウム(第 6 回臭素化学懇話会年会), 愛媛大学城北キャンパス, (2013.11.29)
6. 中江 隆博, 坂口 浩司, “極細炭素細線の低真空ボトムアップ合成法の開発”, 2013 日本化学会中国四国支部大会, 広島大学東広島キャンパス, (2013.11.17-18), (招待講演)
7. 中江 隆博, 坂口 浩司, “分子細線グラフェンナノリボンの低真空ボトムアップ合成法の開発”, 錯体化学会第 63 回討論会, 琉球大学千原キャンパス, (2013.11.2-4), (招待講演)
8. 川越 吉恭, 矢野 真葵, 小島 崇寛, 坂口 浩司, “化学気相成長したグラフェンナノリボンの電気特性”, 2013 年電気化学秋季大会, 東京工業大学大岡山キャンパス, (2013.9.27-28)
9. 小島 崇寛, 平野 善崇, 矢野 真葵, 坂口 浩司, “化学気相成長法によるグラフェンナノリボンの合成”, 2013 年電気化学秋季大会, 東京工業大学大岡山キャンパス, (2013.9.27-28)
10. H. Sakaguchi, “Bottom-up Massively Grown Graphene Nanoribbon Films”, The 7th International Symposium of Integrated Molecular/Materials Science&Engineering (IMSE-7), Beijing, China, (2013.9.19-22), (Invited)
11. 平野 善崇, 矢野 真葵, 小島 崇寛, 坂口 浩司, “新規化学気相成長法によるグラフェンナノリボンの表面合成”, 第 62 回高分子討論会, 金沢大学角間キャンパス, (2013.9.11-13)
12. 川越 吉恭, 矢野 真葵, 小島 崇寛, 坂口 浩司, “金属表面上に化学気相成長したグラフェンナノリボンの電子機能”, 第 62 回高分子討論会, 金沢大学角間キャンパス, (2013.9.11-13)
13. 坂口 浩司, “導電性高分子”, 新材料・新技術利用研究会, 京都, (2013.7.26), (招待講演)
14. T. Nakae, M. Yano, H. Sakaguchi,

- “Bottom-Up Synthesis of Graphene Nanoribbons from Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons at Extremely Low-Vacuum Condition”, Challenges in Organic Materials & Supramolecular Chemistry (ISAC10), Kyoto, Yoshida Campus, Kyoto University, (2013.6.18-21)
15. H. Sakaguchi, “Bottom-up Massive Production of Graphene Nanoribbons”, New Diamond and Nano Carbons Conference 2013, Singapore, Novotel Singapore Clarke Quay Hotel, (2013.5.19-23), (Invited)
  16. 坂口 浩司, 山元 朋毅, 川越 吉恭, 萩原 宏紀, “電気化学エピタキシャル重合によるグラフェンナノリボンのボトムアップ表面合成”, 電気化学会第 80 回大会, 東北大学川内キャンパス, (2013.3.29-31)
  17. 北畑 吉晴, 大西 竜二, 中江 隆博, 森 重樹, 奥島 鉄雄, 宇野 英満, 坂口 浩司, “塩化金(Ⅰ)触媒を用いたハロゲン化フェナセン類の合成”, 日本化学会第 93 春季年会, 立命館大学びわこ・くさつキャンパス, (2013.3.22-25)
  18. 杉村 卓哉, 矢野 真葵, 中江 隆博, 森 重樹, 奥島 鉄雄, 宇野 英満, 坂口 浩司, “キラルグラフェンナノリボン構造モチーフ分子の合成”, 日本化学会第 93 春季年会, 立命館大学びわこ・くさつキャンパス, (2013.3.22-25)
  19. 北畑 吉晴, 大西 竜二, 中江 隆博, 森 重樹, 奥島 鉄雄, 宇野 英満, 坂口 浩司, “塩化金(Ⅰ)触媒のヨードエチニル基への反応を用いた縮環芳香族化合物の高収率合成”, 第 5 回臭素化学懇話会年会, 岡山大学津島キャンパス, (2012.11.30)
  20. 石岩 大敦, 矢野 真葵, 中江 隆博, 森 重樹, 奥島 鉄雄, 宇野 英満, 坂口 浩司, “ハロゲン化 p-ターフェニル 2 量体合成と化学酸化による共役拡張検討”, 第 5 回臭素化学懇話会年会, 岡山大学津島キャンパス, (2012.11.30)
  21. 杉村 卓哉, 矢野 真葵, 中江 隆博, 森 重樹, 奥島 鉄雄, 宇野 英満, 坂口 浩司, “ジベンゾ[a,h]アントラセンを用いたナノグラフェンの合成”, 第 5 回臭素化学懇話会年会, 岡山大学津島キャンパス, (2012.11.30)
  22. 宮城 要, 石岩 大敦, 中江 隆博, 森 重樹, 奥島 鉄雄, 宇野 英満, 坂口 浩司, “ホモカップリングによるアームチェア型グラフェンナノリボンの部分構造の合成”, 第 5 回臭素化学懇話会年会, 岡山大学津島キャンパス, (2012.11.30)
  23. 石岩 大敦, 矢野 真葵, 中江 隆博, 奥島 鉄雄, 森 重樹, 宇野 英満, 坂口 浩司, “p-ターフェニルの連結によるオリゴフェニレン分子の合成と化学酸化によ

- る脱水素共役拡張”, 第 23 回基礎有機化学討論会, 京都テルサ, (2012.9.19-21)
24. 山元 朋毅, 仲 淵龍, 萩原 宏紀, 矢野 真葵, 中江 隆博, 坂口 浩司, “電気化学エピタキシャル重合により作製したグラフェンナノリボンの STM 観察”, 第 61 回高分子討論会, 名古屋工業大学, (2012.9.19-21)
  25. 北畑 吉晴, 大西 竜二, 中江 隆博, 森 重樹, 奥島 鉄雄, 宇野 英満, 坂口 浩司, “多環芳香族化合物の塩化金(Ⅰ)触媒を用いる多点環化反応による高収率合成”, 第 59 回有機金属化学討論会, 大阪大学コンベンションセンター, (2012.9.13-15)
  26. T. Nakae, R. Ohnishi, Y. Kitahata, H. Sato, S. Mori, T. Okujima, H. Uno, H. Sakaguchi, “Synthesis of Iodinated Fused Aromatics by Multiple Cyclization using AuCl Catalyst”, The 6th International Conference on Gold Science, Technology and its Applications, 京王プラザホテル東京, (2012.9.5-8)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

坂口 浩司 (SAKAGUCHI HIROSHI)  
京都大学・エネルギー理工学研究所・教授  
研究者番号：30211931