

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25246002

研究課題名(和文)形態制御されたグラファイト薄膜の創製と形態機能の開発

研究課題名(英文) Development of Morphology-Controllable Graphite Films and Their Morphology-Based Optoelectrical Functions

研究代表者

赤木 和夫 (Akagi, Kazuo)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：20150964

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,500,000円

研究成果の概要(和文)：巨視的配向およびヘリシティを制御したグラファイト薄膜を創成し、その形態機能を明らかにした。基板に対して平行および垂直に配向した、階層的スパイル形態を有する種々の共役系ポリマーを炭素化前駆体として、形態保持炭素化法により、形態制御された種々のカーボンやグラファイト薄膜を創製し、その分光学的特性、導電性さらにスーパーキャパシター等の電気物性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We prepared macroscopically aligned and helicity-controlled graphite films and clarified their morphology-based optoelectrical functions. Several types of conjugated polymers that have hierarchically spiral morphologies and/or aligned parallel and perpendicular to the substrate were synthesized through chemical and electrochemical polymerizations, and subsequently they were subjected as precursors for thermal heating procedures based on the morphology-retaining carbonization and graphitization. The spectroscopic properties and electrical characteristics such as supercapacitor of the prepared carbon and graphite films were investigated from the viewpoint of next-generation functional materials.

研究分野：電子・光機能性を有する共役系高分子の合成、形態保持炭素化および機能発現

キーワード：三重結合部位 共役複素環ポリマー 炭素化収率 キラル液晶 不斉電気化学重合 ヘリカル炭素化物
形態保持炭素化 配向グラファイト

1. 研究開始当初の背景

グラファイトは、力学強度に優れ、熱力学的にも化学的にも安定な炭素材料である。しかし不溶不融であるため、ナノレベルで構造を制御したり、特異な形態を付与することは困難である。最近、研究代表者らは、ヨウ素ドーピングを施したポリアセチレン (PA) を前駆体として、これを炭素化するとその形態が保持されるばかりか、格段に炭素化収率が向上することを見出した。さらにより高温でグラファイト化しても、PA の形態は保持されることを明らかにした¹。この「形態保持炭素化法」で調製したグラファイトは、100 S/cm の高導電性を示すため、そのスパイラル形態を活かすことで、熱的にも化学的にも安定な誘起磁性体や、捻れたグラフェン集積体としての利用が期待できる。

2. 研究の目的

配向やヘリシティを制御したグラファイト薄膜を創製し、特異な形態に基づく電気的・光学的機能を明らかにする。具体的には、炭素化前駆体として、巨視的に配向した、階層的スパイル形態を有するヘリカルポリアセチレン (H-PA) をはじめ、種々の芳香族共役系ポリマー (らせん状ポリエチレンジオキシチオフェン、ウイスカー状ポリメタフェニレン)、さらにはアミロース等の非共役ポリマーを対象に、形態保持炭素化法を用いて、形態が制御された多様なグラファイト薄膜を調製し、新規の力学的・光学的・電気的な機能や物性を検証する。

3. 研究の方法

本研究では、(1) 炭素化前駆体で共役ポリマーの合成と構造および形態制御、(2) 共役ポリマーへのドーピングと炭素化条件の最適化、(3) 巨視的配向やヘリシティを制御したヘリカルグラファイトの調製、(4) 炭素化物やグラファイト化物の構造解析と形態観察および物性評価、(5) ウイスカー状ポリマーの炭素化によるグラファイトウイスカーの調製、(6) 非共役ポリマーを用いたグラファイト化を実施する。なお、スパイル形態をもつ共役ポリマーの合成には、キラルネマチック液晶からなる不斉重合場を用いる。

4. 研究成果

(1) 軸不斉ビナフチル誘導体をキラルドーパントして、ネマチック液晶に添加することで、キラルネマチック液晶を調製した。キラル液晶を溶媒とする不斉反応場でアセチレンの界面化学重合を行い、らせん状フィブリル形態を有するヘリカルポリアセチレン (H-PA) を合成した²。得られた H-PA に対してヨウ素気体にさらすことで化学ドーピングを行い、不活性アルゴンガス下で加熱処理して炭素化を行った。加熱温度 800°C での炭素化物および 2600°C でのグラファイト化物について、走査型電子顕微鏡による形態観察を行い、前

駆体ポリマーのスパイラル形態が完全に保持されていることを明らかにした (図 1)。

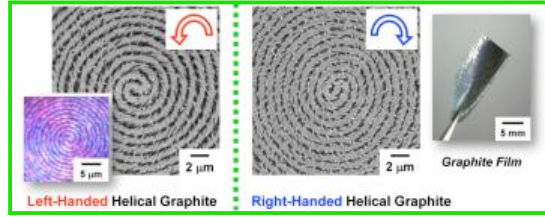


図 1 ヘリカルポリアセチレン (H-PA) を前駆体とする炭素化により調製したヘリカルグラファイトのスパイラル形態とその金属的光沢と構造色を示すフィルム

(2) ウイスカー形態を有するポリメタフェニレン (PMP) 誘導体について、側鎖の安息香酸エステル部位を加水分解反応してカルボキシ基置換 PMP 誘導体を合成した。次に、ポリテトラフルオロエチレンの配向基板上で PMP 誘導体を自己組織化して巨視的に配向させ、加熱処理により巨視的に配向したウイスカー状カーボンおよびグラファイトを調製した (図 2)。得られた配向カーボンウイスカーについて異方的導電性を確認した³。

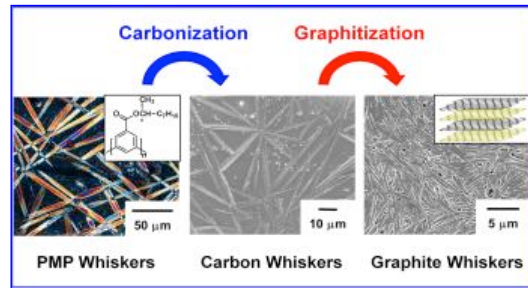


図 2 ウイスカー状ポリメタフェニレンを前駆体として調製した巨視的配向カーボンおよびグラファイトウイスカー

(3) 芳香族共役ポリマーであるポリエチレンジオキシチオフェン (PEDOT) を前駆体として、ヨウ素ドーピングに代わって、過塩素酸イオンによる電気化学的ドーピングを行うことで、PEDOT を前駆体とする形態保持炭素化を初めて可能とした (図 3)。これにより、ポリアセチレン以外の共役ポリマーを前駆体とすることでも、ヘリカルカーボンおよびヘリカルグラファイトを調製できることを実証した⁴。

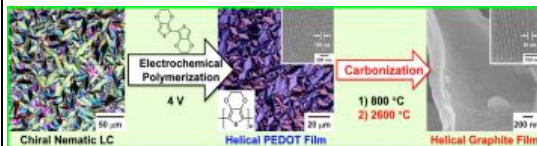


図 3 キラル液晶場での電解重合により合成したヘリカル PEDOT フィルムを前駆体とするヘリカルカーボンおよびヘリカルグラファイトフィルム

(4) PEDOT に対して、スルホン酸による

ロトンドーピングを行うと、高温加熱に伴う脱水反応が促進され、形態保持炭素化が進むことを見出した。形態保持炭素化に必須の過程であるドーピング処理は、ヨウ素による化学ドーピングのみならず過塩素酸イオンをドーパントとする電気化学的ドーピングや、スルホン酸を用いたプロトンドーピングでも可能であることがわかり、形態保持炭素化法の汎用性をさらに拡大した。

(5) 本研究代表者らにより開発されたアセチレン重合法である「脱溶媒法」および「無溶媒法」を用いて、引張り強度とヤング弾性率に富んだ高強度・高延伸性ポリアセチレン（配向性 PA）を合成した。この配向性 PA を力学的に延伸して高配向 PA を得た。この高配向 PA に対してヨウ素ドーピングを施し、これを前駆体として高温熱処理を行い、巨視的に配向したカーボンおよびグラファイトを得た（図 4）⁵。さらに、配向カーボンおよび配向グラファイトについて、配向度の評価および電気的異方性の発現を確認した。

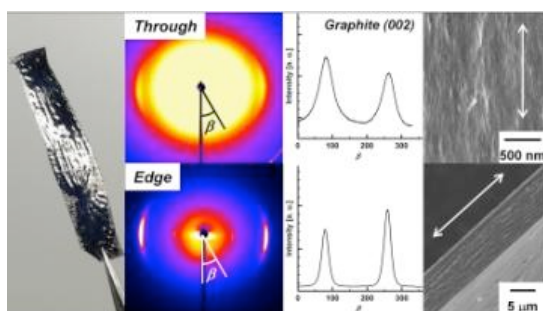


図 4 高延伸性ポリアセチレン薄膜の形態保持炭素化による巨視的配向グラファイト薄膜

(6) 炭素化基板と炭素対象物との加熱時のシュリンクの度合いを極力近づけることで、前駆体の形態保持をさらに高める手法を考案した。すなわち、電気化学的に酸化したポリエチレンジオキシチオフェン (PEDOT) を炭素化したフィルムを新たな炭素化用基板として用いることで、らせん状 PEDOT のらせん構造を精緻に形態保持したカーボンおよびグラファイトを創製することに成功した（図 5）⁶。

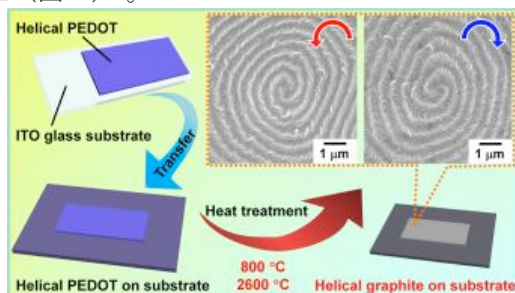


図 5 新規炭素化用基板を用いて創製したらせん状カーボンとグラファイト

(7) エチレンジオキシチオフェンをモノマーとする固相重合法により、結晶性の高いポ

リエチレンジオキシチオフェン (PEDOT) を合成し、これを前駆体とする炭素化により、従来の形態保持炭素化法では得られなかった高結晶性のカーボンおよびグラファイトを調製することに成功した。ファイバーの内部ではグラフェンのシート構造が板状組織と平行に高度に配向しており、その配向秩序度は高く 0.85 であった（図 6）。また、ファイバー軸方向に沿った電気伝導度は 10^2 S/cm と高導電性を示した⁷。作製したカーボン材料の応用展開として、アモルファス構造でポラスな形態を有するカーボンフィルムを調製し、そのキャパシタンスをサイクリックボルタンメトリーおよび定電流充放電法により評価し、最高で 54.4 F/g と良好な値を得た。

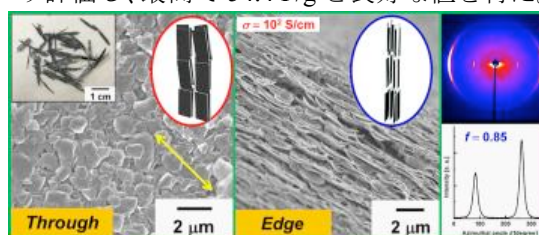


図 6 固相重合法により合成した共役ポリマーを炭素化前駆体とする高結晶性カーボンおよびグラファイト

(8) 天然ポリマーの一種であるアミロースは、多数の α -グルコース分子がグリコシド結合によって重合した直鎖状の多糖類である。アミロースはヨウ素デンプン反応により青～青紫色を呈色するが、これはアミロースのチューブ状構造の中に、ヨウ素が包摂されて電荷移動錯体を形成するためである。そこで、アミロースフィルムをメタノール・水混合溶媒に浸した後、ヨウ素の気体を晒すことでヨウ素ドーピングを行い、炭素化を行った。その結果、炭素化収率は 30% でフィルムの原型を保持した炭素化物を得ることができた。

<引用文献>

1. K. Akagi, *Chem. Rev.*, 2009, **109**, 5354-5401.
2. S. Matsushita, M. Kyotani, K. Akagi, *J. Am. Chem. Soc.* 2011, **133**, 17977-17992
3. B. Yan, S. Matsushita, K. Suda, K. Akagi, *Chem. Mater.*, 2015, **27**, 2973-2980
4. S. Matsushita, B. Yan, S. Yamamoto, Y. S. Jeong, K. Akagi, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2014, **53**, 1659-1663.
5. S. Matsushita, K. Akagi, *J. Am. Chem. Soc.*, 2015, **137**, 9077-9087.
6. B. Yan, S. Matsushita, K. Akagi, *Chem. Mater.*, 2016, **28**, 8781-8791.
7. B. Yan, S. Matsushita, K. Akagi, *J. Mater. Chem. C*, 2017, **5**, 3823- 3829.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 33 件, 内査読有 27 件)

- ① B. Yan, S. Matsushita, K. Akagi, Aligned Carbon and Graphite Fibers Prepared from Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) Single

- Crystals Synthesized by Solid-State Polymerization and Their Supercapacitor Performance, *J. Mater. Chem. C*, 2017, **5**, 3823-3829. DOI: 10.1039/c7tc00709d 查読有
- ② J. Yan, F. Ota, B. A. San Jose, K. Akagi, Chiroptical Resolution and Thermal Switching of Chirality in Conjugated Polymer Luminescence via Selective Reflection using a Double-Layered Cell of Chiral Nematic Liquid Crystal, *Adv. Funct. Mater.*, 2017, **27**, 1604529-1604539. DOI: 10.1002/adfm.201604529 查読有
- ③ B. Yan, S. Matsushita, K. Akagi, Morphology-Controlled Carbon and Graphitic Films Prepared from Helical PEDOT Films as Precursors via Solid-State Carbonization, *Chem. Mater.*, 2016, **28**, 8781-8791. DOI: 10.1021/acs.chemmater.6b04355 查読有
- ④ B. A. San Jose, S. Matsushita, K. Akagi, Liquid Crystallinity-Enforced Chirality Transfer from Chiral Monosubstituted Polyacetylene Copolymer to Poly(*para*-phenyleneethynylene), *Macromolecules*, 2016, **49**, 7703-7708. DOI: 10.1021/acs.macromol.6b01952 查読有
- ⑤ B. Yan, S. Matsushita, K. Suda, K. Akagi, Macroscopically Aligned Carbon and Graphite Whiskers Prepared from Poly(*meta*-phenylene) Derivatives with Helicene-like Helical Structures, *Chem. Mater.*, 2015, **27**, 2973-2980. DOI: 10.1021/acs.chemmater.5b00303 查読有
- ⑥ K. Watanabe, H. Hayasaka, T. Miyashita, K. Ueda, K. Akagi, Dynamic Control of Full-Colored Emission and Quenching of Photoresponsive Conjugated Polymers by Photostimuli, *Adv. Funct. Mater.*, 2015, **25**, 2794-2806. DOI: 10.1002/adfm.201500136 查読有
- ⑦ J. Park, T. Yu, T. Inagaki, K. Akagi, Helical Network Polymers Exhibiting Circularly Polarized Luminescence with Thermal Stability. Synthesis via Photo-Cross-Link Polymerizations of Methacrylate Derivatives in a Chiral Nematic Liquid Crystal, *Macromolecules*, 2015, **48**, 1930-1940. DOI:10.1021/acs.macromol.5b00063 查読有
- ⑧ K. Watanabe, Z. Sun, K. Akagi, Interchain Helically π -Stacked Assembly of Cationic Chiral Poly(*para*-phenylene) Derivatives Enforced by Anionic π -Conjugated Molecules through Both Electrostatic and π - π Interactions, *Chem. Mater.*, 2015, **27**, 2895-2902. DOI: 10.1021/acs.chemmater.5b00121 查読有
- ⑨ K. Watanabe, H. Hayasaka, T. Miyashita, K. Ueda, K. Akagi, Dynamic Control of Full-Colored Emission and Quenching of Photoresponsive Conjugated Polymers by Photostimuli, *Adv. Funct. Mater.*, 2015, **25**, 2794-2806. DOI: 10.1002/adfm.201500136 查読有
- ⑩ J. Park, T. Yu, T. Inagaki, K. Akagi, Helical Network Polymers Exhibiting Circularly Polarized Luminescence with Thermal Stability. Synthesis via Photo-Cross-Link Polymerizations of Methacrylate Derivatives in a Chiral Nematic Liquid Crystal, *Macromolecules*, 2015, **48**, 1930-1940. DOI:10.1021/acs.macromol.5b00063 查読有
- ⑪ S. Ahn, S. Yamakawa, K. Akagi, Liquid Crystallinity-Embodied Imidazolium-Based Ionic Liquids and Their Chiral Mesophases Induced by Axially Chiral Tetra-Substituted Binaphthyl Derivatives, *J. Mater. Chem. C*, 2015, **3**, 3960-3970. DOI: 10.1039/c4tc02968b 查読有
- ⑫ S. Matsushita, K. Akagi, Macroscopically Aligned Graphite Films Prepared from Iodine-Doped Stretchable Polyacetylene Films Using Morphology-Retaining Carbonization, *J. Am. Chem. Soc.*, 2015, **137**, 9077-9087. DOI: 10.1021/jacs.5b04012 查読有
- ⑬ S. Ahn, K. Yabumoto, Y.S. Jeong, K. Akagi, Low Bandgap Poly(thienylenemethine) Derivatives Bearing Terarylene Moieties in the Side Chains, *Polym. Chem.*, 2014, **5**, 6977-6989. DOI: 10.1039/c4py00849a 查読有
- ⑭ B. A. San Jose, J. Yan, K. Akagi, Dynamic Switching of Circularly Polarized Luminescence of *Di*-Substituted Polyacetylene by Selective Transmission through a Thermotropic Chiral Nematic Liquid Crystal, *Angew. Chem., Int. Ed.*, 2014, **53**, 10641-10644. DOI: 10.1002/anie.201404250 查読有
- ⑮ B. A. San Jose, T. Ashibe, N. Tada, S. Yorozyua, K. Akagi, Helicity Control of π -Stacked Assemblies of Oligo(*para*-phenylene) Derivatives using Photoresponsive Chiral Moieties at Terminal Sites, *Adv. Funct. Mater.*, 2014, **24**, 6166-6171. DOI: 10.1002/adfm.201401453 查読有
- ⑯ J. Bu, K. Watanabe, H. Hayasaka, K. Akagi, Photochemically Colour-Tuneable White Fluorescence Illuminants consisting of Conjugated Polymer Nanosphere, *Nat. Commun.*, 2014, **5**, 3799-3806. DOI: 10.1038/ncomms4799 3 查読有

⑰ S. Matsushita, B. Yan, S. Yamamoto, Y. S. Jeong, K. Akagi, Helical Carbon and Graphite Films Prepared from Helical Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) Films Synthesized by Electrochemical Polymerization in Chiral Nematic Liquid Crystals, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2014, **53**, 1659-1663.
DOI: 10.1002/anie.201308462 査読有

⑱ T. Mori, K. Akagi, Superhelix Structure in Helical Conjugated Polymers Synthesized in an Asymmetric Reaction Field, *Macromolecules*, 2013, **46**, No.17, 6699 - 6711.
DOI:10.1021/ma401092v 査読有

⑲ K. Watanabe, K. Suda, K. Akagi, Hierarchically Self-Assembled Helical Conjugated Polymers, *J. Mater. Chem. C.*, 2013, **1**, No.16, 2797-2805.
DOI: 10.1039/C3TC00045A 査読有

⑳ B. A. San Jose, K. Akagi, Liquid Crystalline Polyacetylene Derivatives with Advanced Electrical and Optical Properties, *Polym. Chem.*, 2013, **4**, No. 20, 5144 - 5161.
DOI: 10.1039/C3PY00063J 査読有

㉑ S. Matsushita, Y.-S. Jeong, K. Akagi, Electrochromism-Driven Linearly and Circularly Polarised Dichroism of Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) Derivatives with Chirality and Liquid Crystallinity, *Chem. Commun.*, 2013, **49**, No.19, 1883 - 1890.
DOI: 10.1039/C2CC37116B 査読有

その他の査読有 6 件、査読無 6 件

[学会発表] (計 84 件、内招待講演 26 件)

① K. Akagi, Conjugated Polymers-Based Multifunctional Materials with Photoresponsive Helical Structures and Chiroptical Properties, Energy Materials Nanotechnology (EMN) Meeting on Smart and Multifunctional Materials, June 24-28, 2017, Rome, Italy (基調講演)

② K. Akagi, Hierarchically Assembled Conjugated Polymers with Photoresponsive Helical Structures and Chiroptical Properties, International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals (ICSM2016), June 26-July1, 2016, Guangzhou, China (招待講演)

③ K. Akagi, Advances in Conjugated Polymers, The 2015 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (PACIFICHEM 2015), December 15-20, 2015, Honolulu, Hawaii, USA (招待講演)

④ K. Akagi, Recent Progress in Conjugated Polymers, Pacific Polymer Conference 14, December 9-13, 2015, Kauai, Hawaii, USA (招待講演)

⑤ K. Akagi, Recent Progress in Conjugated Polymers, IUPAC 11th International Conference on Advanced Polymers via Macromolecular Engineering (APME 2015), October 18-20, 2015 Yokohama, Japan (招待講演)

⑥ K. Akagi, Advances in Conjugated Polymers The International Symposium on Carbon Electronics (ISCE) 2015, May 11, 2015, Pusan, Korea (招待講演)

⑦ K. Akagi, Advances in Conjugated Polymers, Lecture of Applied Chemistry, November 27, 2014, National Chiao Tung University (NCTU), Taiwan (招待講演)

⑧ K. Akagi, Helical Conjugated Polymers Synthesized in Chiral Liquid Crystal Field and Carbonization-based Helical Graphites, International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals (ICSM2014), June 30-July 5, 2014, Turku, Finland (招待講演)

⑨ K. Akagi, Synthesis of Helical Conjugated Polymers in Chiral Liquid Crystal Reaction Field, Functional Polymeric Materials Conference, 10-13 Feb. 2014, Fiesta Americana Condesa Hotel, Cancun, Mexico (招待講演)

⑩ K. Akagi, Hierarchically Controlled Helical Graphite Films, International Symposium on Carbon Electronics (ISCE) 2013, May 6-9, 2013, Hoam Convention Center, Seoul National University, Korea (招待講演)

⑪ 赤木和夫, 液晶と共役ポリマーとの融合化学の開拓と展開, 日本化学会, 2017年3月16日, 慶応大学日吉キャンパス (招待講演)

⑫ 赤木和夫, キラル液晶が織りなす捻れの世界 - ヘリカル積層型共役ポリマーの合成とキラル液晶の選択反射による円偏光発光の巻き制御, 日本学術振興会第142委員会, 2016年3月10日, PORTA (ポルタ) (東京都新宿区神楽坂) (招待講演)

⑬ 赤木和夫, 次世代機能ポリマー, 科学研究費・新学術領域研究「元素ブロック高分子材料の創出」第5回公開シンポジウム, 2015年1月29日, 東京理科大学神楽坂キャンパス (東京都新宿区) (招待特別講演)

⑭ 赤木和夫, ラセン共役ポリマーの合成と超階層構造制御, 高分子学会東海シンポジウム, 2015年1月15日(木), 名古屋国際会議

場（愛知県名古屋市）（招待講演）

⑮ 赤木和夫，イオン性共役ポリマーの階層的集積化による球晶の創成と円偏光発光，日本化学会第 94 春季年会、分子協調光子化学シンポジウム，2014 年 3 月 27-30 日，名古屋大学（愛知県名古屋市）（招待講演）

その他の招待講演 11 件、一般発表 58 件

〔図書〕（計 8 件）

① S. Matsushita, B. A. San Jose, K. Akagi (分担執筆), “Functional Nanostructured Conjugated Polymers”, In Functional Organic and Hybrid Nanostructured Materials: Fabrication, Properties, and Applications, Ed., Q. Li, Wiley-VCH, (2017), Chapt. 14, in press.

② 赤木和夫（分担執筆），“高分子機能，電気・電子・磁性”，「日本の高分子科学技術史第 2 巻」，高分子学会，58-61 (2016).

③ K. Akagi (分担執筆), “Polymer Synthesis in a Chiral Liquid Crystal Field”, In The Liquid Crystal Display Story: 50 Years of Liquid Crystal R&D that lead The Way to the Future, Ed. N. Koide, Springer, Tokyo, (2014), Chapt. 9.5, 278-286.

④ B. A. San Jose, K. Akagi (分担執筆) , “Self-Assembled Liquid Crystalline Conjugated Polymers: Synthesis, Development, and Their Advanced Electro-Optical Properties”, In Nanoscience with Liquid Crystals: From Self-Organized Nanostructures to Applications, Ed., Q. Li, Springer, Switzerland, (2014), Chapt. 9, 319-353.

⑤ Kazuo Akagi (分担執筆) , “Polyacetylenes”, In Conjugated Polymers: A Practical Guide To Synthesis, Eds. K. Muellen, J. R. Reynolds, T. Masuda, RSC Polymer Chemistry Series, Chapt. 2, 12-36 (2014).

⑥ 赤木和夫，渡辺和誉，“不斉液晶反応場を用いたらせん状共役ポリマーの創出”，「CSJ カレントレビュー キラル化学」，第 7 章キラル液晶最前線 2 日本化学会編，化学同人，83-91 (2013).

その他の図書 2 件

〔産業財産権〕

○出願状況（計 2 件）

名称：シート状炭素材料

発明者：藤野謙一、京谷陸征、赤木和夫

権利者：日本製紙（株）

種類：特許

番号：2014-071212

出願年月日：平成 29 年 2 月 28 日

国内外の別：国内

その他出願 1 件

○取得状況（計 5 件）

名称：有機半導体

発明者：劉承訓、朝野剛、赤木和夫

権利者：JX 日鉱日石エネルギー会社

種類：特許

番号：5650051

出願年月日：平成 23 年 5 月 9 日

取得年月日：平成 26 年 11 月 21 日

国内外の別：国内

名称：有機半導体(Organic Semiconductor)

発明者：劉承訓、朝野剛、赤木和夫

権利者：JX 日鉱日石エネルギー会社

種類：特許

番号：US 8,981,120 B2

出願年月日：平成 25 年 11 月 8 日

取得年月日：平成 27 年 3 月 17 日

国内外の別：米国

名称：光学活性縮合系ポリマー及びその製造方法

発明者：赤木和夫、廣井良一

権利者：京都大学、大塚化学株式会社

種類：特許証

番号：5921312 号

出願年月日：平成 24 年 4 月 24 日

取得年月日：平成 28 年 4 月 22 日

国内外の別：国内

名称：METHOD FOR PRODUCING CARBON MATERIAL USING CATALYST, AND CARBON MATERIAL

発明者：京谷陸征、赤木和夫、木村伸一

権利者：日本製紙（株）

種類：特許

番号：US 9,523,163 B2

出願年月日：平成 26 年 12 月 4 日

取得年月日：平成 28 年 12 月 20 日

国内外の別：米国

その他の取得特許 1 件

〔その他〕ホームページ：

<http://www.fps.polym.kyoto-u.ac.jp/research.html>

受賞：研究代表者（赤木和夫）平成 28 年度

日本化学会賞受賞

6. 研究組織

(1) 研究代表者

赤木和夫（AKAGI Kazuo）

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20150964

(2) 研究分担者

松下哲士（MATSUSHITA Satoshi）

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：90589186