

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2005～2008

課題番号：17067003

研究課題名（和文）次世代共役ポリマーの超階層性らせん構造の制御と革新機能の創出

研究課題名（英文）Control of Super-Hierarchical Helical Structures of Next-Generation Conjugated Polymers and Their Innovative Functions

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

研究成果の概要：

本研究は、キラル液晶を反応場とする不斉重合法を確立し、ヘリカルポリアセチレン（H-PA）をはじめとする共役ポリマーの合成を展開した。主たる研究成果は次の通りである。1．極限的にねじれたキラルネマチック（N⁻-LC）液晶場を構築することで、フィブリルの束を形成しないH-PAを合成した。2．H-PAのねじれの強さやらせんの向きを温度変化のみで制御した。3．H-PAのらせん形態を保持したヘリカルグラファイトを得た。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	11,400,000	0	11,400,000
2006年度	7,600,000	0	7,600,000
2007年度	7,600,000	0	7,600,000
2008年度	7,600,000	0	7,600,000
総計	34,200,000	0	34,200,000

研究分野：化学

科研費の分科・細目：材料化学・高分子・繊維材料、複合化学・高分子化学

キーワード：共役ポリマー・階層制御・機能制御・ヘリカルポリアセチレン・キラル液晶場・らせん構造・キラル発光・キラルドーパント

1．研究開始当初の背景

本研究者らは、これまでに、液晶のもつ自発配向性や外場応答性を利用して、電子共役ポリマーの新しい合成法を開発し、その階層的な高次構造を制御し、新規の機能を導出してきた。具体的には、ネマチック液晶を重合溶媒に用いることで、重合時に直接配向した高導電性ポリアセチレンを合成した。また液晶基を共役系高分子の側鎖に導入して、電気的異方性や発光二色性をもつ液晶性共役系高分子を世界に先駆けて合成した。

近年、キラルネマチック液晶を用いることで、従来にないらせん構造のヘリカルポリア

セチレンや、外部電場に高速に応答する強誘電型液晶性共役系高分子を合成した。また、キラル液晶性に基づくらせん状共役系高分子を合成し、発光円偏光二色性を発現させることに成功した。本研究では、こうした研究成果と知見を基に、次世代共役ポリマーの超階層性らせん構造の制御と革新機能の創出を図ることを意図した。

2．研究の目的

(1) キラル液晶を反応場とする不斉重合法を確立し、ヘリカルポリアセチレンの合成のみならず、新たに階層的らせん構造をもつ芳

香族共役ポリマーを創成する。これにより、新規の電磁気・光学的性質を発現する。

(2) 液晶性共役ポリマーにキラル化合物を添加したり、ポリマーの側鎖にキラル置換基を導入して、液晶性とらせん構造を併せ持つ多元機能型共役ポリマーを合成する。これにより、直線偏光や円偏光性発光をもつ新規機能ポリマーを開発する。

3. 研究の方法

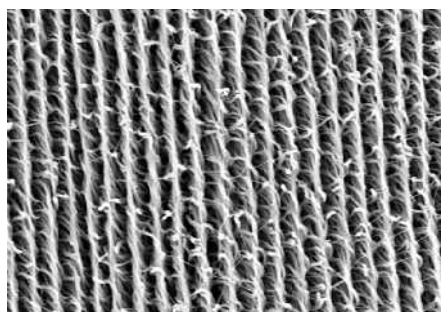
(1) 軸不斉キラル化合物を合成する。(2) キラル化合物を母液晶に添加して、不斉液晶場を構築する。(3) 不斉液晶場の温度を変えて重合を行う。(4) 走査型電子顕微鏡によりポリマーの形態を観測する。(5) ポリマーの円偏光二色性や円偏光蛍光スペクトルを測定する。(6) 不斉液晶を用いた電気化学重合を行う。(7) 共役ポリマーの側鎖に液晶基を導入し、液晶性共役ポリマーを合成する。(8) 液晶性共役ポリマーにキラル化合物を添加し、らせん状スタック構造を構築する。

4. 研究成果

(1) 不斉液晶溶媒に流動落下あるいは磁場による外部摂動を印加して、配向した不斉反応場を構築した。そこでアセチレンを重合することにより、フィブリルのらせん構造は保



(a) 5 μm



(b) 2 μm

図1 キラル液晶場で合成したヘリカルポリアセチレン (a) と、液晶流動法により配向したキラル液晶場で合成した巨視的配向ヘリカルポリアセチレン (b) のらせん状フィブリル形態

ったまま、巨視的に配向したヘリカルポリアセチレンを合成することに成功した(図1)。

(2) これまでで最高のらせん誘起力をもつ軸不斉型四置換ピナフチル誘導体を合成し、極限的にねじれたキラルネマチック液晶場を構築した。これを不斉液晶溶媒としてアセチレン重合すると、フィブリルの束を形成しない、単一ヘリカルフィブリルからなるヘリカルポリアセチレンが合成できることを見出した(図2)。

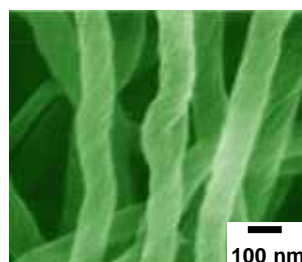
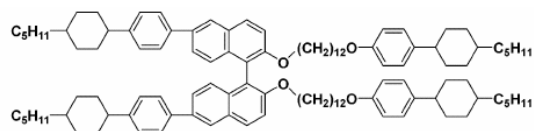


図2 四置換ピナフチル誘導体と、フィブリルの束をとらないヘリカルポリアセチレン

(3) 液晶の配向を司る配向ドーパントを新たに開発し、これを用いて基板に対して垂直に巨視的に配向したヘリカルポリアセチレンを合成し、フィブリル形態の配向制御を可能とした(図3)。

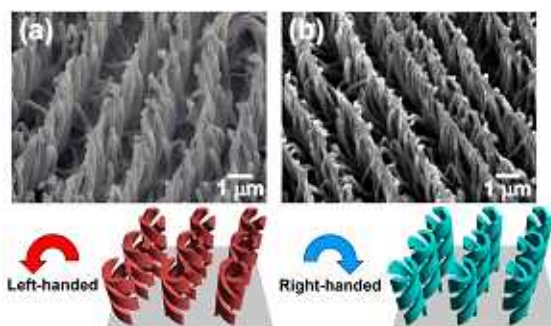


図3 垂直配向キラルネマチック液晶場で合成した垂直配向ヘリカルポリアセチレン (a: 左巻き、b: 右巻き)

(4) キラルドーパントであるピナフチル誘導体の橋架け構造の有無で、液晶反応場の巻き方向や、生成物であるヘリカルポリアセチレンのらせんの向きが制御できることを明らかにした(図4)。

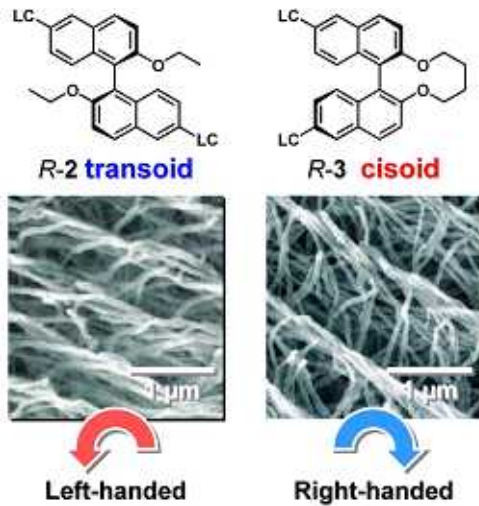


図4 同じ立体配置(R)をもつ二種類のキラルピナフチル誘導体をそれぞれ含む不斉液晶場で合成したヘリカルポリアセチレン

(5) ヘリカルポリアセチレンのフィブリルのらせん方向は、反応場であるキラルネマチック液晶のそれとは逆向きであることを明らかにし、これをもとに、不斉液晶反応場のらせん構造とスパイラル形態の形成メカニズムを提示した。

(6) 特異な温度依存性をもつキラルドーパントを合成して、温度を変化させることで、キラルネマチック液晶場のねじれの強さとらせんの向きを温度変化のみで自在に制御することに成功した(図5)。

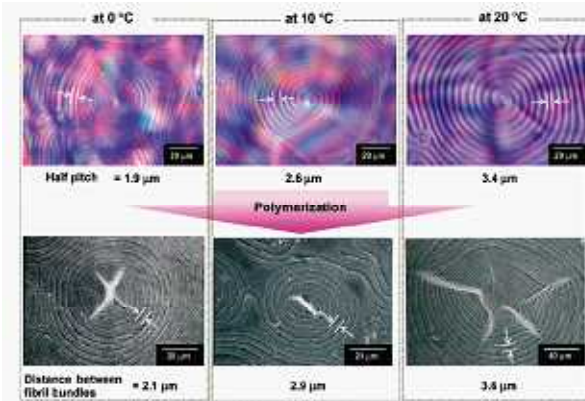


図5 キラルネマチック液晶の0 °C(上左), 10 °C(上中央), 20 °C(上右)での偏光顕微鏡写真、および0 °C(下左), 10 °C(下中央), 20 °C(下右)で合成したヘリカルポリアセチレンの走査電子顕微鏡(SEM)写真

(7) 前駆体の形態を完全に保持する「形態保持炭素化法」を開発し、これによりヘリカルポリアセチレンを前駆体とするヘリカルグラファイト薄膜を合成することに成功し

た(図6)。

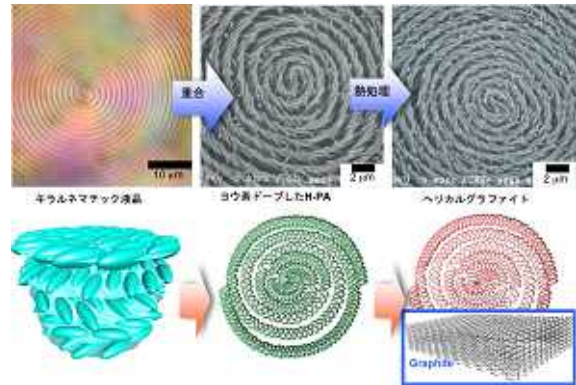


図6 形態保持炭素化のスキーム キラルネマチック液晶反応場(左図) スパイラル形態のヘリカルポリアセチレン(中央図) ヨウ素ドーブしたヘリカルポリアセチレンを前駆体として、加熱処理により得たヘリカルグラファイト(右図)

(8) 不斉液晶反応場を用いた電気化学的重合および化学重合により、種々の芳香族共役ポリマーおよびコポリマーにらせん構造に基づくスパイラル形態や、誘起キラリティを発現させることに成功した。

(9) 側鎖型液晶性共役ポリマーにキラル化合物を添加したり、主鎖型液晶性共役ポリマーの側鎖にキラル置換基を導入することで、液晶性とらせん構造を併せ持つ共役ポリマーを合成した。次に、これらの発光時での直線偏光と円偏光性を確認し、多元機能を有する発光ポリマーを開発した。

(10) ポリパラフェニレンおよびポリメタフェニレンの側鎖に、含フッ素キラル液晶基を導入して、電場に対して高速に応答する強誘電液晶性共役ポリマーを合成した。このポリマーは、電場を切っても自発分極と同等の残留分極を示すため、優れたメモリー効果を有することも見出した(図7)。

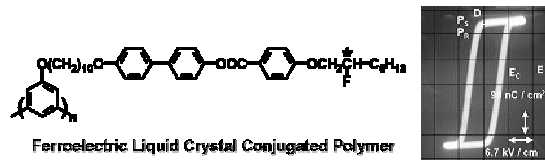


図7 強誘電液晶性ポリメタフェニレン誘導体と、その分極・電場履歴曲線

(11) フェニレンおよびチエニレンからなるコポリマーの側鎖に、ジチエニルエテン部位を含む置換基を導入することで、ポリマーの直線偏光蛍光を外部の紫外・可視光で発光

と消光をスイッチングできる、光応答性と液晶性をあわせもつ共役ポリマーを開発した(図8)。

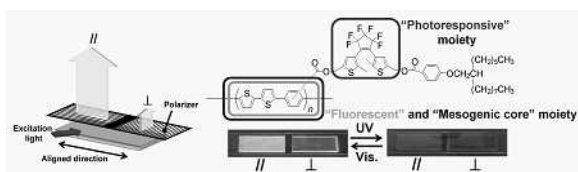


図8 光応答性側鎖を有する液晶性共役ポリマーの直線二色性発光とその可逆的スイッチング挙動

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計51件)

(主な論文)

- (1) K. Suda, J. Yoshida, S. N imori, K. Akagi "Hierarchical Structures of Self-Assembled Helical Conjugated Polymers - Magnetically Forced Alignment of Liquid Crystalline Poly(*meta*-phenylene) Derivatives" *Synth. Met.*, **159**, No. 9-10, (2009) 943 - 948. 査読有
- (2) K. Akagi "Advances in Liquid Crystalline Conjugated Polymers" *J. Polym. Sci. Part A: Polym. Chem.*, **47**, No.10, (2009), 2463-2485. (Highlight Review). 査読有
- (3) T. Mori, T. Sato, M. Kyotani, K. Akagi "Macroscopically Aligned Helical Conjugated Polymers in Orientation-Controllable Chiral Nematic Liquid Crystal Field" *Macromolecules*, **42**, No. 6, (2009) 1817-1823. 査読有
- (4) K. Akagi, T. Mori "Helical Polyacetylene - Origins and Synthesis" *The Chemical Record*, **8**, No. 6 (2008) 395-406. 査読有
- (5) M. Goh, K. Akagi "Powerful Helicity Inducer: Axially Chiral Binaphthyl Derivatives" *Liq. Cry.*, **35**, No. 8, (2008) 953-965. 査読有
- (6) M. Kyotani, S. Matsushita, T. Nagai, Y. Matsui, M. Shimomura, A. Kaito, K. Akagi, "Helical Carbon and Graphitic Films Prepared from Iodine-Doped Helical Polyacetylene Film using Morphology-Retaining Carbonization" *J. Am. Chem. Soc.*, **130**, No. 33, (2008) 10880-10881. *Nature Materials*, **7**, (2008) 689. (Highlight in Nature Materials). 査読有
- (7) K. Suda, K. Akagi "Electro-optical Behavior of Ferroelectric Liquid Crystalline Polyphenylene Derivatives", *J. Polym. Sci. Part A: Polym. Chem.*, **46**, No. 11, (2008) 3591-3610. 査読有
- (8) H. Hayasaka, K. Tamura, K. Akagi "Dynamic Switching of Linearly Polarized Emission in Liquid Crystallinity-Embedded Photoresponsive Conjugated Polymers", *Macromolecules*, **41**, No. 7, (2008) 2341-2346. 査読有
- (9) T. Mori, M. Kyotani, K. Akagi "Helicity-Controlled Liquid Crystal Reaction

Field Using Nonbridged and Bridged Binaphthyl Derivatives Available for Synthesis of Helical Conjugated Polymers", *Macromolecules*, **41**, No. 3, (2008) 607-613. 査読有

- (10) M. Kyotani, H. Goto, K. Suda, T. Nagai, Y. Matsui, K. Akagi "Tubular-Shaped Nanocarbons Prepared from Polyaniline Synthesized by a Self-Assembly Process and Their Electrical Conductivity" *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **8**, No. 4, (2008) 1999 - 2004. 査読有
- (11) 赤木和夫, 鄭 龍洙「共役系高分子の次世代光材料への期待 -共重合型ポリ(エチレンジオキシチオフェン)誘導体の合成と光学的特性-」*化学工業*, 59, No. 1, 34 - 42 (2008). 査読無
- (12) M. Kyotani, S. Matsushita, T. Nagai, Y. Matsui, K. Akagi "Structural Properties of Carbon Prepared from Aligned Polyacetylene Thin Films" *Synth. Met.*, **157**, No.13-15, (2007) 546 - 550. 査読有
- (13) M. Goh, T. Matsushita, M. Kyotani, K. Akagi "Helical Polyacetylenes Synthesized in Helical Sense and Pitch Controllable Chiral Nematic Liquid Crystal with Unprecedented Temperature Dependence" *Macromolecules*, **40**, No. 14, (2007) 4762 - 4771. 査読有
- (14) M. Goh, M. Kyotani, K. Akagi "Highly Twisted Helical Polyacetylene with Morphology Free From Bundle of Fibrils Synthesized in Chiral Liquid Crystal Reaction Field" *J. Am. Chem. Soc.* **129**, No. 27, (2007) 8519 - 8527. *Science*, **316**, 29 June, (2007) 1814 - 1815. (Highlight in Science). 査読有
- (15) K. Akagi "Hyperstructured Polyacetylene" *Polymer Int.*, **56**, No. 10, (2007) 1192 - 1199. 査読有
- (16) K. Akagi "Synthesis and Properties of Liquid-Crystalline-Conjugated Polymers" *Bull. Chem. Soc. Jpn. (Accounts)*, **80**, No. 4, (2007) 649 - 661. 査読有
- (17) 高文柱, 赤木和夫「キラル液晶場での共役ポリマーの合成と超階層構造制御および機能化」*表面*, **45**, No. 5, 6 - 25 (2007). 査読無
- (18) H. Hayasaka, K. Tamura, K. Akagi "Control of Linearly and Circularly Polarized Fluorescences on Photoresponsive Liquid Crystalline and Chiral Conjugated Polymer" *Trans. Mat. Res. Soc. Jpn.* **32**, No. 2, (2006) 395 - 398. 査読有
- (19) H. Hayasaka, K. Tamura, K. Akagi "Synthesis and Properties of Photoresponsive Liquid Crystalline Conjugated Polymers" *J. Photopolym. Sci. & Tech.*, **19**, No. 12, (2006) 29 - 34. 査読有
- (20) Y. S. Jeong, H. Goto, S. Iimura, T. Asano, K. Akagi "Chiral BEDOT-based Copolymers Prepared by Chemical and Electrochemical

Polymerization" *Current Appl. Phys.*, **6**, No. 5, (2006) 960 - 963. 査読有

(21) Y. S. Jeong, H. Goto, J. R. Reynolds, K. Akagi "Synthesis and Properties of PEDOT Derivatives Containing Liquid Crystalline Groups" *Current Appl. Phys.*, **6**, No. 5, (2006) 956 - 959. 査読有

(22) T. Matsushita, M. J. Goh, M. Kyotani, K. Akagi "Vertically Aligned Helical Polyacetylene Synthesized in Chiral Nematic Liquid Crystal under Magnetic Field" *Current Appl. Phys.*, **6**, No. 5, (2006) 952-955. 査読有

(23) M. J. Goh, M. Kyotani, K. Akagi "Syntheses of Highly Twisted Helical Polyacetylene under Nano-order Chiral Nematic Liquid Crystal Reaction Field" *Current Appl. Phys.*, **6**, No. 5, (2006) 948 - 951. 査読有

(24) M. Ofuji, Y. Takano, Y. Houkawa, Y. Takanishi, K. Ishikawa, H. Takezoe, T. Mori, M. Goh, S. Guo, K. Akagi "Microscopic Orientational Order of Polymer Chains in Helical Polyacetylene Thin Films Studied by Confocal Laser Raman Microscopy" *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45**, 3A, (2006) 1710 - 1713. 査読有

(25) H. Goto, K. Akagi "Optically Active Electrochromism of Poly(3,4-ethylenedioxy thiophene) Synthesized by Electrochemical Polymerization in Lyotropic Liquid Crystal of Hydroxypropyl Cellulose/Water" *Chem. Mater.*, **18**, No. 2, (2006) 255 - 262. 査読有

(26) H. Goto, K. Akagi "Vertically Aligned Polypyrrole Drawing a Fingerprint Array Prepared by Electrochemical Polymerization in Chiral Nematic Electrolyte" *J. Polym. Sci. Part A: Polym. Chem.*, **44**, No. 2, (2006) 1042 - 1047. 査読有

(27) 赤木和夫「液晶場での共役高分子超階層構造の構築」*応用物理*, **76**, No.12, 1439 - 1444 (2006) (Front Cover). 査読無

(28) 赤木和夫「キラル液晶場を用いた共役系高分子の合成と機能化」*高分子*, **55**, No. 8, 607 (2006) (Front Cover). 査読無

(29) 森泰蔵, 高文柱, 赤木和夫「不斉液晶反応場でのヘリカル共役ポリマーの合成とらせん構造形成メカニズム」*液晶*, **10**, No. 2, 149- 158 (2006) (Front Cover). 査読無

(30) 赤木和夫, 後藤博正「キラル液晶反応場でのヘリカル共役ポリマーの合成とその新展開」*化学*, **61**, No. 3, 70 - 71 (2006). 査読無

(31) H. Goto, S. Nimori, K. Akagi, "Synthesis and Properties of Mono-Substituted Liquid Crystalline Polyacetylene Derivatives - Doping, Magnetic Orientation, and Photo-Isomerization" *Synth. Met.*, **155**, No. 3, (2005) 576 - 587. 査読有

(32) A. N. Aleshin, H. J. Lee, S. H. Jhang, H. S. Kim, K. Akagi, Y. W. Park "Coulomb-Blockade

Transport in Quasi One-Dimensional Polymer Nanofibers" *Phys. Rev. B*, **72**, No. 15, (2005) 153202(1- 4). 査読有

(33) K. Akagi, S. Guo, T. Mori, M. Goh, G. Piao, M. Kyotani, "Synthesis of Helical Polyacetylene in Chiral Nematic Liquid Crystals using Crown Ether Type Binaphthyl Derivatives as Chiral Dopants" *J. Am. Chem. Soc.*, **127**, No. 42, (2005) 14647 - 14654. 査読有

(34) A. N. Aleshin, H. J. Lee, K. Akagi, Y. W. Park "One-Dimensional Transport in Polymer Nanowires" *Microelectro. Eng.*, **81**, No. 2-4, (2005) 420 - 427. 査読有

(35) H. Goto, N. Nomura, K. Akagi "Electrochemical Polymerization of 3,4-Ethylene dioxythiophene in a DNA Liquid-Crystal Electrolyte" *J. Polym. Sci. Part A: Polym. Chem.*, **43**, No. 18, (2005) 4298 - 4302. 査読有

(36) H. Goto, K. Akagi, "Optically Active Conjugated Polymers Prepared from Achiral Monomers by Polycondensation in a Chiral Nematic Solvent", *Angew. Chem. Int. Ed.*, **44**, No. 28, (2005) 4322 - 4328 (Front Cover). 査読有

(37) H. Goto, K. Akagi "Asymmetric Electrochemical Polymerization: Preparation of Polybithiophene in a Chiral Nematic Liquid Crystal Field and Optically Active Electrochromism" *Macromolecules*, **38**, No. 4, 1091 - 1099. (2005). 査読有

(38) H. Goto, Y. S. Jeong, K. Akagi "Electrochemical Synthesis and Optical Properties of a Chiral Polymer - Polymerization of 1,4-bis[2-(3,4-ethylenedioxy)thienyl]-2,5-benzoic acid-1-methyl heptyl ester" *Macromol. Rapid Commun.*, **26**, No. 3, 164 - 167. (2005). 査読有

(39) H. Goto, K. Akagi "Synthesis of Pyrrole-Based Methine Bridge Type Liquid Crystalline Conjugated Polymer" *J. Polym. Sci. Part A : Polym. Chem.*, **43**, No. 3, 616 - 629. (2005) 616 - 629 (Front Cover). 査読有

【学会発表】(計 157 件)

内、国際学会 基調・招待講演 15 件、国内学会 招待講演 34 件

(主な発表)

(1)K. Akagi (Plenary Lecture), From Helical Polyacetylene to Helical Graphite: Synthesis in Helical Sense-Controllable Liquid Crystal Field and Morphology-Retaining Carbonization, US-Japan POLYMAT 2008 Summit, Ventura, USA, August 10-13 2008

(2)K. Akagi, "Construction of Super hierarchical Structure of Helical Polyacetylene by using Liquid Crystal Field", 30 Years of Conducting Polymers for American Chemical Society, Chicago, Illinois, March 25-29, 2007.

- (3) K. Akagi, "Helical Sense and Pitch Controllable Chiral Nematic Liquid Crystal Available for Synthesis of Helical Polyacetylene", AMN-3 Satellite Meeting on Nano-and Bionano-Technology, Transport and Quantum Functional Semiconductors (NBT-QT 2007), Wellington, New Zealand, February 8-10, 2007
- (4) K. Akagi (Plenary Lecture), "Hyperstructured Polyacetylene", 3rd IUPAC Int. Symp. on Macro- and Supramolecular Architectures and Materials (MAM-06), Waseda, Japan, May 28-31, 2006
- (5) K. Akagi (Plenary Lecture), "Liquid Crystal Inspired Conjugated Polymers", New Waves in Supramolecular Chemistry and Superstructured Materials, 2nd International Forum, Kumamoto, Japan, March, 14, 2006
- (6) K. Akagi (Plenary Lecture), "Highly Twisted Helical Polyacetylene Fibril Synthesized in Chiral Nematic Liquid Crystal", International Conference on Quantum Transport in Synthetic Metals (QTSM2005), Bologna, Italy, July, 3-5, 2005

〔図書〕(計 12 件)

- (1) 赤木和夫, "次世代共役ポリマーの超階層性らせん構造の制御と革新機能の創出" *次世代共役ポリマーの超階層制御と革新機能* (赤木和夫監修), 第 2 編第 1 章, シーエムシー出版, 115-121 (2009).
- (2) K. Akagi, "Liquid Crystalline and Optically Active Polythiophenes" *Thiophene-based materials for electronics*, Ed. by I. Perepichka, Wiley, (2008).
- (3) 赤木和夫, 須田清 "液晶性電子共役高分子の創製" *電子共役系有機材料の創製と機能開発*, 応用編第 8 章, シーエムシー出版, 224 - 244 (2008).
- (4) 赤木和夫, 松下哲士 "共役導電性ポリマー" *導電性材料大全集*, 上巻第 1 部 1 章 1 節, 技術情報協会, 5- 27 (2007).
- (5) 赤木和夫, 松下哲士 "導電性高分子" *自己組織化ナノマテリアル・フロントランナー 85 人が語るナノテクノロジーの新潮流*, 国武豊喜監修, 下村正嗣, 山口智彦編集幹事, フロンティア出版, 93 - 99 (2007)
- (6) K. Akagi, "Liquid Crystalline Conjugated Polymers - Synthesis and Properties" *Thermotropic Liquid Crystals: Recent Advances*, Ed. By A. Ramamoorthy, Springer, Dordrecht (Netherlands), Chap. 9, 249 - 275 (2007).
- (7) K. Akagi, "Helical Polyacetylene Synthesized in Chiral Nematic Liquid Crystal" *Handbook of Conducting Polymers, Third Edition, Conjugated Polymers*, Eds. T. A. Skotheim and J. R. Reynolds, CRC Press, New York, 3-3 - 3-14 (2007). (Front Cover)

- (8) 赤木和夫, 早坂裕之 "光応答性を有する液晶性共役系高分子の合成と性質" *液晶ポリマーの改質と最新応用技術*, 第 6 章第 4 節, 技術情報協会, 284 - 293 (2006).
- (9) 赤木和夫, 高文柱, 森泰蔵 "ナノコイル・導電性らせん状共役ポリマー" *ファイバー・スーパーバイオミメティックス~ 近未来の新技术創成*, 本宮達也監修, 第 6 編第 1 章第 1 節エヌ・ティー・エス, 1005-1010 (2006)
- (10) 赤木和夫 "さらなる進化が期待される有機半導体", *進化する有機半導体・有機エレクトロニクス創成へ向けた光・電子機能デバイスへの応用最前線*, おわりに, エヌ・ティー・エス, 503-505 (2006)
- (11) 赤木和夫, 飯田洋 "導電性高分子高機能化分子設計", *進化する有機半導体・有機エレクトロニクス創成へ向けた光・電子機能デバイスへの応用最前線*, 基礎編 1, エヌ・ティー・エス, 32-41 (2006)
- (12) 赤木和夫, "導電性ポリマーにおけるヨウ素ドーブ剤", *ヨウ素化合物の機能と応用*, 横山正孝監修, 第 6 章, シーエムシー, 207 - 215 (2005)

〔特記事項〕(計 6 件)

(主な特記事項)

- (1) 米国化学会誌 *J. Am. Chem. Soc.*, **130**, 10880-10881 (2008) に掲載された論文が, 科学雑誌 *Nature Materials* のハイライト論文, *Nature Materials*, **7**, 689 (2008) に選出された。
- (2) 高分子科学雑誌 *J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem.*, **46**, 3591-3610 (2008) に掲載された論文が, 化学合成誌 *SYNFACTS* の最新合成有機化学のハイライト *SYNFACTS*, **7**, 697 (2008) に選出された。

〔その他〕

ホームページ: 特定領域研究・超階層制御
<http://www.choukaisou.com/>

賞: 2005 年 文部科学大臣表彰科学技術賞
 2009 年 筑波大学名誉教授称号授与

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 (分担期間: 2005-2006)
 後藤 博正 (GOTO HIROMASA)
 筑波大学・大学院数理物質科学研究科・講師
 研究者番号: 40292528