

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 27 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23350095

研究課題名(和文)近赤外強吸収機能色素の合成と応用

研究課題名(英文) Synthesis and Application of Functional Dyes Having Strong Absorption in the Near-IR

研究代表者

小林 長夫 (KOBAYASHI, NAGAO)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60124575

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,400,000円

研究成果の概要(和文)：近赤外領域(700 nm以上)に吸収を持つ化合物は太陽エネルギーの捕集、癌の光化学治療等に有効に使える可能性がある。我々の研究ではポルフィリン、フタロシアニン、BODIPYと呼ばれる化合物でこの領域に吸収、蛍光を示す化合物をデザインし証明した。ピロールを環状に8-10量体化させると、最長波長帯は1400-1600 nmに現れた。フタロシアニンの周辺置換基として硫黄、セレン、テルル、中心元素として燐、ヒ素、アンチモンを導入すると主吸収が1000nm以上に延び、癌治療に有効な蛍光を1100nm以上に示した。BODIPYを2量化し、吸収波長を近赤外に持つてくと共に、強い蛍光を発せると成功した。

研究成果の概要(英文)：The compounds having strong absorption bands in the near-IR region have attracted attention due to their applicability as photosensitizer in photodynamic therapy and energy-capturing materials in solar cells. In order to meet these demands, we have designed and synthesized porphyrin, phthalocyanine, and BODIPY derivatives having strong absorption beyond 700 nm. When 8-10 pyrrole rings were linked directly to make cyclic compounds, the resultant aromatic compounds showed strong absorption in the 1300-1600 nm region. Phthalocyanines modified by sulfur, selenium, or terbium in their periphery, and phosphorus, arsenic, and antimony in the center, showed main absorption between 1000 and 1100 nm, together with fluorescence. Linearly dimerized BODIPYs showed absorption and strong fluorescence between 700 and 900 nm, suitable for the detection of cancer cells.

研究分野：芳香環金属錯体

キーワード：近赤外色素 フタロシアニン ポルフィリン 蛍光 BODIPY 合成

1. 研究開始当初の背景

例えば、**1**) 癌などの病気の光化学治療の増感色素として近赤外領域吸収色素は重要である。今までフォトフィリンというポルフィリン誘導体が西側諸国で使われてきたが、基本的欠陥があった。それはフォトフィリンの吸収は波長の短い領域にあるため、身体の中に増感剤を投与して光を当てた際、当てた光が皮膚によって殆ど吸収されてしまい、増感剤に届かないことにある。皮膚は 700nm 以上の光を殆ど吸収しないため、この領域で強い吸収があり癌組織に優先的に吸着する無毒な増感剤が必要とされている。**2**) 更に近赤外領域吸収色素のうち蛍光を示すものは異常細胞検出の際の検出試薬として最近研究が活発である。この際蛍光を示すことは前提であるが、如何にして蛍光試薬を異常細胞に選択的に吸着させるかという事が大きな問題である。**3**) エネルギーに関する分野では有機色素材料を用いた太陽電池の開発の必要性が叫ばれて久しい。現在のシリコンを用いるものでは 600nm 以下の比較的短波長の光しか使えないため、変換効率には限界があった。これに対し、色素増感電池では 600-1300nm の太陽光まで利用できるため原理的には約 2 倍の変換効率を達成できる。さらに軽量で変形が自在な電池の作成に繋がるため、世界で激しい開発競争が行なわれている。最近、会合しやすいシアニン色素を塗布するだけで 3% 以上の変換効率を達成したという報告があり (9 月応用物理学会) 化合物が容易に合成できること、シリコン程高純度にする必要がないことにより、ますます注目を集めている。また、**4**) 紙幣の印刷に私たちの目に直接見えない近赤外領域吸収色素を用いることで、専用の機械で読み取ることで偽造紙幣が簡単に判別できる。そのため、長年にわたり世界中の造幣局で安定な近赤外領域吸収色素が探求されているが、未だ決定的な色素は見つかっていない。

2. 研究の目的

近赤外領域に強い吸収を持つ色素の開発が目的である。近赤外領域吸収色素は偽造紙幣防止用インクとして、病気の光化学治療用増感剤として、病気診断センサー用マーカーとして、或は太陽電池用色素として社会的に強い要求がある。この要求に応えるため、フタロシアニン、アザポルフィリン BODIPY 系を中心とし、実用化実験に使える要素を備えた化合物をデザイン・合成し、その機能を評価・解析する。即ち企業が実用化実験する前の段階までの化合物のデザイン、調製、証明である。

3. 研究の方法

まず **1**) の癌の光化学治療の増感剤としては既に申請者が開発し実用化されこれまで

16 年間病院で使われているテトラベンズポルフィリンスルホン酸のアルミニウム錯体に葉酸を結合する (構造などは計画の欄参照) 癌の光化学治療では増感剤の能力は勿論大切であるが、いかに癌細胞に優先的に増感剤を吸着させるかが問題であるが、葉酸 (folic acid; N- $\{p\{[(2\text{-amino-4-hydroxy-6-pteridiny])\text{methyl}\}\text{amino}\}\text{benzoyl}\}\text{glutamic acid}$) が癌細胞に蓄積するという報告を踏まえ (*J. Control. Release*, 1998, **53**, 39; *Small*, 2009, **5**, 2716) 葉酸の構造を増感剤に導入し、治療成績の向上を確認した。また増感剤としてより長波長に吸収を有するフタロシアニンやフェナンスロポルフィリン (小林等 *Chem. Asian. J.* 2010) も用いた。

2) の蛍光色素についてはアザ BODIPY (4,4'-ifluoro-4-bora-3a,4a-diaza-s-indacene) 誘導体について蛍光の量子収率を求めた (構造などは計画欄参照) これらの化合物の主吸収は 700nm 以上にあり、簡明合成法は当研究室で報告した (*Tetrahedron Lett.* **49**, 6152-6154 (2008))。アザ BODIPY では二つのイソインドール環の間に一般にはホウ素を含むが、ホウ素の代わりにアルミニウム、亜鉛、シリコンを導入した。また葉酸の単位を組み込み、通常の状態での蛍光量子収率を求めると共に、HeLa 細胞への吸着の増加を調べた。

3) の太陽電池関連ではフタロシアニンを用いて主吸収を 1000nm まで伸ばすことを目指した。当時 900nm 弱まで伸ばせることが分かっていた。その方法としては置換基の導入、対称性の低下、金属の交換があった。当研究室の研究データの蓄積で 1000 nm を越えるものも作れることが判りつつあった。更に、太陽光を幅広い領域で吸収できるように吸収のブロード化も目指した。

目的のうち、特に難しいのは **4**) 紙幣用の色素であった。近赤外色素であっても波長の短い領域に吸収があっては人間の目に見える可視領域色素にもなってしまうためである。

4. 研究成果

以下に示す様に論文、総説、著書を合わせて計 80 報以上の報告にまとめる事が出来た。一番の成果は合理的概念と理論に基づいて考案された 1000 nm 以上に吸収を示すフタロシアニンの創製成功である。安定でしかも数段階の過程で合成する事ができ、蛍光も発するため偽札のインクや癌の光化学治療に最適である。動物実験までは行かなかったが、癌細胞に組み入れた実験では、これらのフタロシアニンががん細胞に集まる事を確認できた。BODIPY も近赤外の波長に主吸収を示すものが出来た。しかしこちらは癌細胞を使った実験をする時間はなかった。

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 81 件)

Cyclophanes Containing Bowl-Shaped Aromatic Chromophores: Three Isomers of anti-[2.2](1,4)Subphthalocyaninophane
Q. Liu, S. Shimizu, and N. Kobayashi
Angew. Chem. Int. Ed. **54**, 5187-5191 (2015);
Angew. Chem. **127**, 5276-5280 (2015).
DOI:10.1002/anie.201411510;DOI:10.1002/ange.201411510. (査読有)

Metallophthalocyanin-ocenes: Scandium Phthalocyanines with An η^5 -Bound Cp Ring.
R. H. Platerl, T. T. Tasso, W. Zhou, T. Furuyama, N. Kobayashi, and D. B. Leznoff
Chem. Commun. **51**, 5986-5989 (2015).
DOI: 10.1039/c5cc00237k. (査読有)

π -Conjugated Porphyrinic Oligomers
S. Ito, S. Hiroto, S. Lee, M. Son, I. Hisaki, T. Yoshida, D. Kim, Nagao Kobayashi, and H. Shinokubo

J. Am. Chem. Soc. **137**, 142-145 (2015),
DOI: 10.1021/ja511905f (査読有)

Optical, Electrochemical, and Magnetic Properties of Pyrrole- and Thiophene-Bridged 5,15-Diazaporphyrin Dimers.

S. Omomo, H. Maruyama, K. Furukawa, T. Furuyama, H. Nakano, N. Kobayashi, and Y. Matano

Chem. Eur. J. **21**, 2003-2010 (2015).

DOI: 10.1002/chem.201405482 (査読有)

Dinitriles Having AIE-Active Moieties: Synthesis, *E/Z* Isomerization and Fluorescence Properties.

T. T. Tasso, T. Furuyama, and N. Kobayashi
Chem. Eur. J. **21**, 4817-4824 (2015)

DOI: 10.1002/chem.201406128. (査読有)

Synthesis, Spectral Properties and TD-DFT Calculations of Nonclassical Binuclear Thienoporphyrazines.

T. V. Dubinina, N. E. Borisova, L. G. Tomilova, T. Furuyama, and N. Kobayashi
Dyes & Pigm. **117**, 1-6 (2015).

DOI: 10.1016/j.dyepig.2015.01.023. (査読有)

Asymmetric Core-Expanded Aza-BODIPY Analogues: Facile Synthesis and Optical Properties.

H. Liu, H. Lu, Z. Zhou, S. Shimizu, Z. Li, N. Kobayashi, and Z. Shen

Chem. Commun. **51**, 1713-1716 (2015).

DOI: 10.1039/c4cc06704e (査読有)

Rational Molecular Design towards Vis/NIR Absorption and Fluorescence by using Pyrrolopyrrole aza-BODIPY and its Highly Conjugated Structures for Organic Photovoltaics.

S. Shimizu, T. Iino, A. Saeki, S. Seki, and N. Kobayashi

Chem. Eur. J. **21**, 2893-2904 (2015).

DOI: 10.1002/chem.201405761 (査読有)

Control of Absorption Properties of Tetraazaporphyrin Group 15 Complexes by Modification of Their Axial Ligands.

T. Furuyama, M. Asai, and N. Kobayashi
Chem. Commun. **50**, 15101-15104 (2014).

DOI: 10.1039/c4cc07408d (査読有)

Reduction-Triggered Aromatic to Aromatic Electronic Structure Switching in a Tribenzotetraazachlorin-Fullerene Conjugate.

T. Fukuda, J. Sato, N. Hashimoto, and N. Kobayashi

Chem. Commun. **50**, 14269-14272 (2014).

DOI: 10.1039/c4cc04689g (査読有)

Sizeable Red-shift of Absorption and Fluorescence of Subporphyrazine Induced by Peripheral Push and Pull Substitution.

L. Xu, S. Shimizu, and N. Kobayashi

Chem. Commun. **50**, 13781-13784 (2014).

DOI: 10.1039/c4cc05943c (査読有)

Synthesis and Spectroscopic Properties of Chiral Binaphthyl-Linked Subphthalocyanines.

L. Zhao, K. Wang, T. Furuyama, J. Jiang, and N. Kobayashi

Chem. Commun. **50**, 7663-7665 (2014).

DOI: 10.1039/c4cc03426k (査読有)

Synthesis of New Chlorin e_6 Trimethyl Ester and Protoporphyrin-IX Dimethyl Ester Derivatives and Their Photophysical and Electrochemical Characterizations.

J. C. J. M. D. S. Menezes, M. A. F. Faustino, K. T. de Oliveira, M. P. Uliana, V. F. Ferreira, S. Hackbarth, B. Röder, T. T. Tasso, T. Furuyama, N. Kobayashi, A. M. S. Silva, M. G. P. M. S. Neves, and J. A. S. Cavaleiro
Chem. Eur. J. **20**, 13644-13655 (2014).

DOI: 10.1002/chem.201403214 (査読有)

Phosphorus(V) Tetraazaporphyrins: Porphyrinopids Showing an Exceptionally Strong CT Band between the Soret and Q Bands.

T. Furuyama, T. Yoshida, D. Hashizume, and N. Kobayashi

Chem. Sci. **5**, 2466-2474 (2014).

DOI: 10.1039/c4sc00569d (査読有)

Core-Modified Rubyrins Containing Dithienylethene Moieties.

Z. Zhou, Y. Chang, S. Shimizu, J. Mack, C. Schutt, R. Herges, Z. Shen, and N. Kobayashi

Angew. Chem. Int. Ed. **53**, 6563-6567 (2014).

DOI: 10.1002/anie.201402711 (査読有)

Phosphorous(V) Corrole: Synthesis, Spectroscopic Properties, Theoretical Calculations and Potential Utility for *In Vivo* Applications in Living Cells.

X. Liang, J. Mack, L. -M. Zheng, Z. Shen, and N. Kobayashi

Inorg. Chem. **53**, 2797-2802 (2014).

- DOI:10.1021/ic402347w
Design, Synthesis, and Properties of Phthalocyanine Complexes with Main-Group Elements Showing Main Absorption and Fluorescence beyond 1000 nm. T. Furuyama, K. Satoh, T. Kushiya, and N. Kobayashi (査読有)
J. Am. Chem. Soc. **136**, 765-776 (2014).
DOI:10.1021/ja411016f
A Phthalocyanine-Subphthalocyanine Heterodinuclear Dimer: Comparison of Spectroscopic Properties with Those of Homodinuclear Dimers of the Constituting Units.
N. Shibata, S. Mori, M. Hayashi, M. Umeda, M. Shiro, E. Tokunaga, H. Sato, L. Lusso, T. Hoshi, N. Kobayashi
Chem. Commun. **50**, 3040-3043 (2014).
DOI: 10.1039/c3cc49831j (査読有)
Control of Practical Chromophore Symmetry by Positional Isomerism of the Peripheral Substituents.
S. Shimizu, Y. Haseba, M. Yamazaki, G. Kumazawa, N. Kobayashi
Chem. Eur. J. **20**, 4822-4828 (2014).
DOI: 10.1002/chem.201304043
A Core-Expanded Subphthalocyanine Analogue with a Significantly-Distorted Conjugated Surface and Unprecedented Properties.
S. Shimizu, S. Nakano, A. Kojima, and N. Kobayashi
Angew. Chem. **53**, 2408-2412 (2014).
DOI: 10.1002/anie.201310028 (査読有)
- ②① A μ -Oxo Hetero Dimer of Silicone Phthalocyanine and Naphthalocyanine.
K. Oniwa, S. Shimizu, Y. Shiia, T. Fukuda, and N. Kobayashi
Chem. Commun. **49**, 8341-8343 (2013).
DOI: 10.1039/c3cc44490b (査読有)
- ②② Acenaphthylene-fused Cyclo[8]pyrroles with Intense NIR Absorptions.
T. Okujima, C. Ando, J. Mack, S. Mori, N. Matsumoto, J. Nakamura, T. Nakae, H. Yamada, K. Ohara, N. Kobayashi, H. Uno
Chem. Eur. J. **19**, 13970-13978 (2013).
DOI: 10.1002/chem.201301294 (査読有)
- ②③ Tetrathiafulvalene-Annulated Subphthalocyanines
S. Shimizu, Y. Yamazaki, N. Kobayashi
Chem. Eur. J. **19**, 7324-7327 (2013).
DOI: 10.1002/chem.201300709
- ②④ Pyrrolopyrrole Aza-BODIPY Analogues: A Facile Synthesis and Intense Fluorescence.
S. Shimizu, T. Iino, Y. Araki, and N. Kobayashi
Chem. Commun. **49**, 1621-1623 (2013).
DOI: 10.1039/c3cc38452g
- ②⑤ Synthesis, Characterization, MCD Spectroscopy, and TD-DFT Calculations of Copper Metalated Nonperipherally Substituted Octa-Octyl Derivatives of Tetrabenzotriazaporphyrin, *cis* and *trans* Tetrabenzodiazaporphyrin, Tetrabenzomonoazaporphyrin, and Tetrabenzoporphyrin.
J. Mack, L. Sosa-Vargas, S. J. Coles, G. J. Tizzard, I. Chambrier, A. N. Cammidge, M. J. Cook, and N. Kobayashi
Inorg. Chem. **51**, 12820-12833 (2012)
DOI:10.1021/ic301712h (査読有)
- ②⑥ Superazaporphyrins: *Meso*-Pentaazapentaphyrins and One of Their Low-Symmetry Derivatives. T. Furuyama, Y. Ogura, K. Yoza, and N. Kobayashi,
Angew. Chem. Int. Ed. **51**, 11110-11114(2012)
- ②⑦ Gram-Scale Synthesis of Nickel(II) Norcorrole: The Smallest Antiaromatic Porphyrinoid.
T. Ito, Y. Hayashi, S. Shimizu, J. Shin, N. Kobayashi, and H. Shinokubo
Angew. Chem. Int. Ed. **51**, 8542-8545 (2012).
Highlighted in Synfacts, **8**, 1198 (2012).
DOI: 10.1002/anie.201204395 (査読有)
- ②⑧ Synthesis and Properties of Fused-Ring-Expanded Porphyrins that were Core-Modified with Group 16 Heteroatoms.
H. Xu, J. Mack, D. Wu, Z. Xue, A. B. Descalzo, K. Rurack, N. Kobayashi, and Z. Shen
Chem. Eur. J. **18**, 16844-16867 (2012).
DOI: 10.1002/chem.201200956 (査読有)
- ②⑨ A Zinc Gable Phthalocyanine and Derived Planar Bis-phthalocyanine Containing a Shared Anthracene Unit.
Y. Asano, J. Sato, T. Furuyama, and N. Kobayashi
Chem. Commun. **48**, 4365-4367 (2012).
DOI: 10.1039/c2cc31264f (査読有)
- ③⑩ Synthesis of 5,10,15-Triazaporphyrins - Effect of Benzo-Annulation on the Electronic Structures.
S. Shimizu, Y. Ito, K. Oniwa, S. Hirokawa, Y. Miura, O. Matsushita, and N. Kobayashi
Chem. Commun. **48**, 3851-3853 (2012).
DOI: 10.1039/c2cc30625e (査読有)
- ③① Rectangular-Shaped Expanded Phthalocyanines with Two Central Metal Atoms.
O. Matsushita, V. M. Derkacheva, A. Muranaka, S. Shimizu, M. Uchiyama, E. A. Luk'yanets, and N. Kobayashi
J. Am. Chem. Soc. **134**, 3411-3418 (2012).
DOI:10.1021/ja209589x (査読有)
- ③② Gallium Phthalocyanine Photosensitizers: Carboxylation Enhances the Cellular Uptake and Improves the Photodynamic Therapy of Cancers.
J. F. Zhao, J. Wang, J. -Y. Chen, W. Chidawanykia, T. Nyokong, K. Ishii, and N.

Kobayashi

Anti-Cancer Agents in Med. Chem. **12**, 604-610 (2012).

DOI: 10.2174/187152012800617740

- ③③ Effects of Carbon–Metal–Carbon Linkages on the Optical, Photophysical, and Electrochemical Properties of Phosphametallacycle-Linked Coplanar Porphyrin Dimers.
Y. Matano, K. Matsumoto, H. Hayashi, Y. Nakao, T. Kumpulainen, V. Chukharev, N. V. Tkachenko, H. Lemmetyinen, S. Shimizu, N. Kobayashi, D. Sakamaki, A. Ito, K. Tanaka, and H. Imahori
J. Am. Chem. Soc. **134**, 1825-1839 (2012).
DOI:10.1021/ja210205v (査読有)
- ③④ Synthesis, Optical Properties, and Electronic Structures of Fully Core-Modified Porphyrin Dications and Isophlorins.
M. Konno, J. Mack, N. Kobayashi, M. Suenaga, K. Yoza, and T. Shinmyozu
Chem. Eur. J. **18**, 13361-13371 (2012).
DOI: 10.1002/chem.201200776 (査読有)
- ③⑤ Gold(II) Phthalocyanine Revisited: Synthesis and Spectroscopic Properties of Gold(III) Phthalocyanines and an Unprecedented Ring-Contracted Phthalocyanine Analogue.
E. W. Y Wong, A. Miura, M. D. Wright, Q. He, C. J. Walsby, S. Soji, N. Kobayashi, and D. B. Leznoff
Chem. Eur. J. **18**, 12404-12410 (2012).
DOI: 10.1002/chem.201201701 (査読有)
- ③⑥ Synthesis, Characterization, and Spectroscopic Analysis of Antiaromatic Benzofused Metalloporphyrins. S. Sugawara, Y. Hirata, S. Kojima, Y. Yamamoto, E. Miyazaki, K. Takimiya, S. Matsukawa, D. Hashizume, J. Mack, N. Kobayashi, Z. Fu, K. M. Kadish, Y. M. Sung, K. S. Kim, and D. Kim
Chem. Eur. J. **18**, 3566-3581(2012).
DOI: 10.1002/chem.201101846 (査読有)

[学会発表](計 110 件)

Synthesis and Properties of Rectangular Phthalocyanines, Superazaporphyrins, and Chiral and/or Low-Symmetry Subphthalocyanines.

N. Kobayashi, 13th Eurasia Conference on Chemical Sciences, Bangalore, India, Dec. 17, 2014 (**Lead Lecture**).

Synthesis and Properties of Superazaporphyrins, Rectangular Phthalocyanines, and Chiral and/or Low-Symmetry Subphthalocyanines.

N. Kobayashi, 17th Brazilian Meeting on Inorganic Chemistry, Araxa, Minas Gerais, Brazil, Aug. 11, 2014 (**Invited Lecture**).

A Casual Encounter with Phthalocyanines and the 40-Year Relationship which Followed.

N. Kobayashi, The 8th International Conference on Porphyrins and Phthalocyanines, Istanbul, Turkey, June 25, 2014 (**Award Lecture**).

Synthesis and Properties of Superazaporphyrins and Chiral and/or Low-Symmetry Subphthalocyanines.

N. Kobayashi, CanBIC-4, Parry Sound, May 23, 2013 (**Invited Lecture**).

Synthesis and Properties of Superazaporphyrins and Chiral and/or low-Symmetry Subphthalocyanines.

N. Kobayashi, 1st Conference on Science Diplomacy and Developments in Chemistry, Alexandria, Egypt, Nov. 25, 2012 (**Plenary Lecture**).

Synthesis and Characterization of Subporphyrin and Subphthalocyanine Derivatives.

N. Kobayashi, Department of Chemistry, Universidad Autonoma de Madrid, Madrid, Spain, Sept. 17, 2012 (**Invited Lecture**).

Synthesis, Applications, and Practical Use of Functional Metallophthalocyanines.

N. Kobayashi, Department of Chemistry, University of Aveiro, Aveiro, Portugal, Sept. 14, 2012 (**Invited Lecture**).

Synthesis and Properties of Superazaporphyrins and Novel Subphthalocyanines.

N. Kobayashi, S. Shimizu, T. Furuyama, A. Miura, S. Khene, T. Nyokong, Y. Ogura, T. Otaki, T. Hosoya, and S. Nakano, 40th International Conference on Coordination Chemistry, Valencia, Spain, Sept. 12, 2012 (**Invited Lecture**).

Chiral and/or Low-Symmetry Subphthalocyanine Analogues.

N. Kobayashi, S. Shimizu, A. Miura, T. Otaki, S. Khene, T. Nyokong.

7th International Conference on Porphyrins and Phthalocyanines, Jeju, Korea, July 2, 2012 (**Invited Lecture**).

Syntheses and Properties of Core-Modified and Periphery-Expanded Subphthalocyanines.

S. Shimizu, S. Nakano, Y. Yamazaki, A. Kojima, and N. Kobayashi, 7th International Conference on Porphyrins and Phthalocyanines, Jeju, Korea, July 6, 2012 (**Invited Lecture**).

Relationship between the Molecular Structures and Spectroscopic and Electrochemical Properties of Azaporphyrinoids.

N. Kobayashi, Lever Symposium, 95th Canadian Chemical Society, Calgary, Alberta, May 27, 2012 (**Invited Lecture**).

[図書](計 6 件)

ポルフィリンおよびフタロシアニン系色素 (Porphyrinoid and Phthalocyaninoid Dyes).

N. Kobayashi
In “機能性色素の科学 (Science of Functional Dyes)”, Ed by H. Nakasumi, Chapter 11, pp. 157-172, Kagakudojin, Tokyo, 2013.

The Effect of Structural Modifications on the Properties of Porphyrinoids. J. Mack, N. Kobayashi, and Z. Shen

In “Handbook of Porphyrin Science”, Ed. by K. M. Kadish, K. M. Smith, and R. Guilard. Vol. 23, Chapter 109 (pp. 281-371), World Scientific, Singapore, 2012.

Synthesis and Characterization of Chiral Phthalocyanines. N. Kobayashi
In “*Handbook of Porphyrin Science*”, Ed. by K. M. Kadish, K. M. Smith, and R. Guilard. Vol. 23, Chapter 110 (pp. 373-440), World Scientific, Singapore, 2012.

Circular Dichroism and Magnetic Circular Dichroism for Organic Chemists (textbook).

N. Kobayashi, A. Muranaka, and J. Mack
Royal Society of Chemistry, London, 2012
(comments in *Angew. Chem. Int. Ed.* **51**,
(pp.1-191) 2012.

Recent Applications of MCD Spectroscopy to Porphyrinoids. J. Mack and N. Kobayashi,
In “*Multiporphyrin Arrays*”, Ed. by D. Kim,
Pan Stanford Publ. Chapter 3 (pp. 91-147) 2012.

〔その他〕

ホームページ等

<http://kinou.chem.tohoku.ac.jp/KobayashiLabHP/Home.html>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

小林 長夫 (KOBAYASHI , Nagao)
東北大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号 : 60124575