光機能有機ケイ素化合物

Photofunctional Organosilicon Compounds

東京大学大学院理学系研究科 中江豊崇・西尾正樹・山野井慶徳*

Department of Chemistry, School of Science, The University of Tokyo

Toyotaka Nakae, Masaki Nishio, and Yoshinori Yamanoi*

Received, August 28, 2020 Accepted, September 28, 2020; Published, November 30, 2020

Extensive investigation of functional organosilicon compounds has identified various valuable applications in materials chemistry. This review summarizes the major developments of metal-mediated coupling reactions between hydrosilanes and organic halides during the last decade with an emphasis on our recent studies. This transformation shows good functional group compatibility, and can serve as a powerful tool for the synthesis of photofunctional organosilicon compounds. The important aspects of the experimental observations on fluorescence, OLED (organic light emitting diode), SHG (second harmonic generation), and CPL (circularly polarized luminescence) have been described.

■ ■ 1. はじめに

有機ケイ素化合物とは、ケイ素と炭素の直接結合 (Si-C 結合) を持つ化合物である。1863 年に合成された最初の有機ケイ素化合物であるテトラエチルシラン (Et_4Si) を出発点とし、現在に至るまで膨大な数の有機ケイ素化合物が報告されている。有機ケイ素化合物の合成研究を通して、炭素化合物とは異なる反応性が報告されている¹⁻⁶。

近年、有機ケイ素化学の分野においてケイ素の特性を活用した機能性有機ケイ素化合物の開拓が進められている。特に光機能材料への応用を指向した分子として、芳香族有機ケイ素化合物が数多く報告されている⁷⁻¹⁴。例えば、アントラセンやピレンの側鎖にトリメチルシリル基を導入するだけで光物性が変化する¹⁵⁻¹⁷。これらの分子では、ケイ素の σ^* 軌道と芳香環の π^* 軌道との軌道間相互作用による電子的摂動が生じており、それによる LUMO 準位の低下 (安定化) が光機能発現の駆動力となっている。

有機ケイ素化合物は通常、有機ハロゲン化物を対応する有機金属試薬に誘導した後、クロロシラン類とカップリングさせる手法で合成する¹⁸⁻²¹。この合成手法はケイ素に導入可能な基質の種類が限定される点が問題となる。例えば、シアノ基、ケトン基、エステル基といった有機金属試薬から求核攻撃される置換基が分子内に存在する場合、その置換基の保護-脱保護プロセスが必要となる。

最近、画期的な Si-C 結合の形成法として、ヒドロシラン類をケイ素導入源とした有機ケイ素化合物の合成が報告されている²²⁻³⁴。ヒドロシラン類-とりわけトリアルキルシラン類-は強力な還元剤として働き、有機ハロゲン化物を定量的に脱ハロゲン化することが知られている (Scheme 1a)³⁵⁻³⁷。筆者らは遷移金属触媒と塩基の存在下での芳香族ヨウ化物とヒドロシラン類のカップリング反応を報告している (Scheme 1b)。この反応は温和な条件 (0 °C ~ 室温) で進行し、高い収率で対応する芳香族ケイ素化合物が得られる。基質の適応範囲も広く、反応性が高い置換基を有した誘導体であっても容易に合成することが可能である。この合成法を駆使することで、従来の手法では合成困難であった有機ケイ素化合物を容易に合成できる。本稿では、最近 10 年間にわたり、筆者らが開発した光機能有機ケイ素化合物について紹介する。ケイ素に機能性芳香族置換基を導入することで、多様な光機能を発現する有機ケイ素化合物を開発した。

Scheme 1. Reactivity of hydrosilane toward aryl iodide. (a) Reduction (deiodination). PdCl_2 , Et_2O , >95%. (b) Arylation. $\text{Pd}(\text{P}(\text{t-Bu})_3)_2$, Et_3N , THF, up to 99%.

■ ■ 2. ジベンゾシロール類の発光特性

シロールとはシクロペンタジエンのケイ素同族体である (Fig. 1a)。密度汎関数理論 (DFT) 計算の結果は、シロール類は $\sigma^*-\pi^*$ 共役によってピロール、チオフェン、フランなど他の複素五員環化合物に比べて低い LUMO 準

連絡先著者名: 山野井 慶徳

連絡先: 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

東京大学 大学院理学系研究科 化学専攻

Tel: 81-3-5841-4348 Fax: 81-3-5841-8063

Corresponding Author: Yoshinori Yamanoi

E-mail: yamanoi@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

Address: Department of Chemistry, School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

Keywords: organosilicon compounds, fluorescence, OLED, SHG, CPL

位を有することを示している。従って、電子輸送・発光特性を有し、導電性材料や光機能材料としての応用が期待されている³⁸⁻⁴⁹。その中でもジベンゾシロール類は安定な無色結晶となるものが多く、取り扱いやすいことから有機エレクトロルミネッセンス (EL) 材料への応用が試みられている。

筆者らは 2,2'-ジヨードビフェニルとジヒドロシランの環化反応を利用した単工程のジベンゾシロール合成を報告している⁵⁰。本手法で合成した化合物 **1-4** の構造を Fig. 1b に示す。この合成法では、置換基としてエステル基を有している場合でも、その置換基を保護する必要なく対応するジベンゾシロール類を合成でき、有機金属試剤による従来の合成手法が抱えていた問題点を解決できた。

ジベンゾシロール **1-4** の発光特性について調査した。発光波長を無置換体 **1** と比較すると、メチル基やメトキシ基を有する **2** および **3** では長波長側へ、エステル基を有する **4** では短波長側へシフトした。発光量子収率は、側鎖にエステル基を含む場合に高い結果を与えた。溶液中と結晶状態での発光波長を比較すると、エステル基を有するジベンゾシロール **4** では、結晶状態で大きな長波長側へのシフトが見られた (Fig. 1c)。結晶状態では溶液中と比較し、発光量子収率も向上する。

Fig. 1 (a) Chemical structures of cyclopentadiene, silole, and dibenzosilole. (b) Chemical structures of dibenzosiloles **1-4** prepared in our study. (c) Fluorescence spectra and photographs (excited at 250 nm) of **4** at room temperature in dichloromethane and in the crystalline state.

シロール骨格の 2,5 位を修飾し、シロールの物性を制御している例は多い。例えば、2,5 位に電子供与性の芳香族置換基を導入すると分子内電荷移動効果が発現する⁵¹。では、1 位を修飾した場合は物性に影響を与えるであろうか。ジベンゾシロール骨格を用いて 1 位の修飾効果を調査した⁵²。様々な誘導体を合成したところ、ジベンゾシロールの 1 位にチオフェン骨格を導入すると共役系拡張に効果的であることがわかった。化合物 **5** は *syn* と *anti* の二つのコンホメーションが考えられるが、計算結果から *syn* 体が安定であると示唆された (Fig. 2a)。単結晶 X 線構造解析の結果はこれを支持している (Fig. 2b)。**5** は溶媒中よりも結晶状態で発光効率が高くなる。結晶パッキングを見ると π - π スタックなど強い分子間相互作用が見られない。結晶内の分子間相互作用が弱い (疎にパッキングした) 場合、エネルギー移動による失活が抑制され、結晶状態での発光効率が向上する。

Fig. 2 (a) Chemical structures of *anti* and *syn* forms of **5**. (b) ORTEP drawing of *syn*-**5** using 50% probability ellipsoids. Hydrogen atoms are removed for clarity.

3. 9,10-ジヒドロ-9,10-ジシラアントラセン類の発光特性

9,10-ジヒドロ-9,10-ジシラアントラセンは 9,10-ジヒドロアントラセンの 9,10 位をケイ素原子に置き換えた化合物である (Fig. 3a)。この化合物群も DFT 計算の結果から σ^* - π^* 共役によって共役系が拡張される化合物であり、発光特性を示すことが期待されている⁵³⁻⁶⁴。

しかしながら、いまだにこの化合物群の光物性について、系統だった調査はされていなかった。筆者らが開発したプロセスにより、合成が困難であった非対称な 9,10-ジヒドロ-9,10-ジシラアントラセン誘導体 **6-9** の合成に成功した (Fig. 3b)⁶⁵。単結晶 X 線構造解析の結果から 9,9,10,10-テトラメチル-9,10-ジヒドロアントラセン (**10**) は平面構造を有しているのに対し、9,10-ジヒドロ-9,10-ジシラアントラセン誘導体は折れ曲がった構造を取っていることが明らかとなった^{66,67}。**6-9** は室温、ヘキサン中で紫外光領域 (303–344 nm) に発光量子収率 0.01–0.13 で蛍光を示した。その中でも、**7-9** は凍結した 2-メチルテトラヒドロフラン中 (77 K) で発光量子収率 0.02–0.06 であるが、寿命 40–100 ms の青色燐光を示した (Fig. 3c)。

Fig. 3 (a) Chemical structures of 9,10-dihydroanthracene and 9,10-dihydro-9,10-disilaanthracene. (b) Chemical structures of 9,10-dihydro-9,10-disilaanthracenes **6**–**9** prepared in our study. (c) Photograph of phosphorescence of **9**. (d) Chemical structure of 9,9,10,10-tetramethyl-9,10-dihydroanthracene (**10**).

■ 4. 芳香族オリゴシラン類の発光特性

芳香族オリゴシラン類は、Si-Si 結合の σ 結合と π 平面間の σ - π 共役を利用した導電性材料や光機能性材料として注目を集めている⁶⁸⁻⁷⁹。 σ - π 共役は Fig. 4 に示すように Si-Si 結合上の σ 軌道と芳香環上の π 軌道の相互作用と、 σ^* 軌道と π^* 軌道の相互作用によって共役系を拡張し、その物性に大きな影響を与える。筆者らはトリス（トリメチルシリル）シランやその類縁体と芳香族ヨウ化物がパラジウム触媒と塩基の存在下、Si-Si 結合を開裂せずにカップリング反応を起こし、目的とする芳香族オリゴシラン類を収率良く合成できることを報告している⁸⁰⁻⁸⁴。

Fig. 4 Orbital overlapping between Si-Si σ bond and π plane.

特に芳香環を 2,2'-ビチオフェンとした場合、結晶状態で強く発光した (Fig. 5)。オリゴシラン分子 **11** に 352 nm の紫外光を照射すると青色蛍光 (λ : 409 nm) を発し、その発光量子収率は 0.74 であった⁸⁵。芳香環を 2,2':5',2''-テルチオフェン、2,2':5',2''':5'',2'''-クアテルチオフェン、ジチエノ [3,2-b:2',3'-d] チオフェンにそれぞれ変化したオリゴシラン分子 **12**–**14** を合成し、結晶状態の発光特性について詳細に議論した⁸⁶。結晶状態での σ - π を含む分子全体の共役系の拡張度合や疎な結晶パッキング状態が、結晶状態における高い発光効率の発現に有効であることが分かった。

Fig. 5 Chemical structures and photographs of emission in the crystalline state of **11**–**14**.

■ 5. ジシラン架橋ドナー・アクセプター型分子の発光特性

分子内に電子供与性のドナー部位 (D) と電子求引性のアクセプター部位 (A) を有するドナー・アクセプター (DA) 分子は、ドナー・アクセプター間で起こる分子内電荷移動 (ICT) 遷移により強い吸収や発光特性を示すことが知られている⁸⁷⁻⁹²。これまでのドナー・アクセプター部位を π 共役系で連結させた分子群は、分子間の強い π - π 相互作用によりエネルギーが拡散し結晶状態では発光効率が低下する⁹³⁻¹⁰¹。また、 π - π スタッキングによる分子間相互作用により溶媒に対する溶解性も低下する。この性質は π 共役系ドナー・アクセプター分子の材料展開の問題点となっている。

この問題点解決のためジシラン (Si-Si) 架橋型 DA 分子を考案した。ジシラン架橋型 DA 分子では、Fig. 4 のようにドナー・アクセプター部それぞれが持つ芳香環の π 軌道とジシラン部の σ 軌道の間に σ - π 共役が生じるので、ジシラン架橋型 DA 分子はこの σ - π 共役を介したドナー・アクセプター間の ICT に伴って光を吸収し、発光する¹⁰²。

筆者らは前述のパラジウム触媒による Si-C 結合形成反応を用いて系統的にジシラン架橋型 DA, DAD, そして ADA 分子の合成を行った^{103,104}。合成したジシラン架橋型分子の光物性について解析したところ、結晶状態において高い発光強度を持ち ($\Phi \approx 0.8$)、紫外線照射下で青色～緑色の発光色を示した。これはケイ素の大きな原子半径、正四面体 ($3sp^3$) 構造、かさ高いテトラメチルジシラン部位の構造などにより分子間相互作用が抑制されるためと考えられる。

化合物 **15** を発光層として用いた非ドープ型の有機 EL 素子を作製し、その評価を行った¹⁰⁵⁻¹⁰⁹。EL 素子の構造と発光の様子を Fig. 6 に示す。この分子は、トリフェニルアミン骨格の高い電子ドナー性により、他のジシラン架橋型 DA 分子に比べて HOMO 準位が上昇し、ホール注入障壁が低下する。また、トリフェニルアミン部位の高いホール輸送能によりホール移動度の改善も期待される^{110,111}。ホール注入障壁の低下とホール移動度の改善は有機 EL への応用において有利に働く。アクセプター

基としては、チエノピラジン誘導体を用いた。真空蒸着法によって化合物 **15** の均質な薄膜 (90 nm) を形成させ、EL 素子を作製した。EL スペクトルの形状は化合物 **15** の結晶状態の蛍光スペクトルと一致しており、緑色の電界発光 (λ : 495 nm) を示した。外部発光量子収率が 0.65% と改善の余地はあるものの、ジシラン架橋型 DA 分子を用いた有機 EL 材料へのはじめての展開例である¹¹²。

Fig. 6 (a) Chemical structure of **15**. (b) Organic light emitting diode (OLED) architecture investigated in our study. BCP: Bathocuproine (2,9-Dimethyl-4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline). α -NPD: *N,N'*-di-1-naphthyl-*N,N'*-diphenylbenzidine. (c) Photographs of OLED in (b) at a driving voltage of 18 V.

6. 外部刺激によって SHG 強度が変化する芳香族ジシラン化合物

第二次高調波発生 (SHG) を示す芳香族ジシラン化合物について述べる。SHG とはレーザーのような強力な光を結晶に照射すると二光子吸収が起こり、2 倍のエネルギーを持った (半分の波長) 光を放出する現象を指す。結晶が分極を打ち消すパッキング状態、オイル状態、溶液状態では SHG は起こらず、強く分極した分子が双極子モーメントを残すようにパッキングをした結晶のみ SHG を示す。この現象は赤外線レーザー (1068 nm) を照射し、可視光レーザー (緑色: 532 nm) を発生させる一般的な手法である。身近なところでは、プレゼンテーション用に用いる可視光 (緑色) レーザーポインターに SHG 結晶が用いられている。

有機 SHG 材料はこれまでに多くの報告例がある¹¹³⁻¹¹⁶。ほとんどはドナー基・アクセプター基を π 共役で連結した分極性化合物 (D- π -A 分子) であるが、可視光領域に吸収がある (有色である) ために材料化の際、SHG 効率が低下する。そのため、吸収が可視光領域にない (無色の) 結晶が求められている。

筆者らは様々なジシラン架橋ドナー・アクセプター型

分子を調査した。その中でも化合物 **16** (Fig. 7(a)) に赤外線レーザーを照射したところ尿素 (SHG 基準物質) の約 3 倍の強度の SHG 活性を示すことが分かった。この化合物は可視光領域に吸収がない無色の結晶 (λ_{abs} : 305 nm) であり、SHG 材料に適している。単結晶 X 線構造解析から非対称型のパッキング (空間群: Cc) をしており、結晶全体として遷移双極子モーメントが足し合わされる状態で配列するため SHG が発現する (Fig. 7b)¹¹⁷。この分子を融解後 (融点: 52–53 °C), 1 °C/min で冷却すると -30 °C においても過冷却状態を取る。この状態で静置すると SHG 非活性結晶 (空間群: $P2_1/c$) が (Fig. 7c), メタノール蒸気存在下では SHG 活性結晶がそれぞれ再現性良く得られる。また、SHG 非活性結晶をメタノール蒸気に暴露すると結晶相転移が起こり、SHG 活性結晶に変化する¹¹⁸。

結晶多形をもつことを利用して、温度変化や溶媒蒸気の暴露など弱い外部刺激で結晶構造と物性が連動変化する物質群を「ソフトクリスタル」と呼ぶ^{119,120}。芳香族ジシラン化合物は Si-Si σ 結合の柔軟性や σ - π 共役による物性変化から有機元素化学における「ソフトクリスタル」の候補となり、現在筆者らのグループで研究を進めている¹²¹。

Fig. 7 (a) Chemical structure of **16**. (b) Molecular packing of SHG active **16**. (c) Molecular packing of SHG inactive **16**. Gray arrows in (b) and (c) indicated the dipole moment of each molecule.

7. 円偏光発光 (CPL) を示す光学活性有機ケイ素化合物

不斉ケイ素原子を有する光学活性化合物の合成例はいくつか知られている¹²²⁻¹²⁸。筆者らは、パラジウム触媒 $\text{Pd}_2(\text{dba})_3$ と不斉配位子である (*R,R*)-TADDOL から誘導したアミドリン酸エステル存在下、光学不活性な二級シランからケイ素原子上に立体選択的に芳香族置換基を導入する反応を報告している (Fig. 8)^{129,130}。反応温度は、反応が進行するギリギリの温度 (-40 °C) が最も適していた。反応温度を -40 °C よりも低くすると反応進行が極端に遅くなる。また、反応温度が 0 °C, -20 °C, -40 °C の順で不斉収率が向上する。芳香環上の置換基の位置が不斉収率に大きく影響を与え、特にオルト位に置換基が

存在すると高い不斉収率を与えた (17–23)。本手法には、二級シランから逐次的に2種類の芳香族ヨウ化物を反応させることにより光学活性四級シランを合成できるメリットも存在する (24)。この場合、不斉収率は二級シランから三級シランに変換する段階の寄与による。

Fig. 8 Construction of chiral silicon-stereogenic centers introducing aryl group (gray colored moiety) from secondary silanes.

円偏光発光特性 (CPL) とは、キラリティーを持つ発色団による右円偏光と左円偏光のうちいずれかを多く含む発光のことを指し、三次元ディスプレイ発光素子^{131,132}、CPL レーザー¹³³、エナンチオ選択性センサー¹³⁴などの分野で近年注目を集めている。円偏光発光の度合いは非対称因子 g_{lum} ($= 2(I_L - I_R)/(I_L + I_R)$) (I_L : 左円偏光の強度, I_R : 右円偏光の強度) を用いて評価され、高い g_{lum} と発光強度の両方を兼ね備えた有機分子の研究が盛んに行われている。CPL を発現する有機化合物はヘリシティを有する分子量が比較的大きいものが多く、 g_{lum} の値は $10^{-1} \sim 10^{-3}$ 程度である¹³⁵⁻¹⁴⁷。筆者らは、ピレン骨格を有する光学活性三級シラン (25) において、高濃度条件下で高い発光効率 (Φ : 0.42) と g_{lum} 値 (8×10^{-3}) の両立を実現した (Fig. 9a)¹⁴⁸。これは分子設計次第で、不斉中心を持つ化合物でも CPL を発現できることを示唆している。

次に不斉ケイ素原子を側鎖として白金錯体に導入した燐光性円偏光発光分子の開発を行った。具体的には、典型的な燐光性白金錯体である $Pt(thpy)(acac)^{149,150}$ の thpy ($= 2\text{-thienylpyridine}$) 配位子の側鎖に三級ケイ素の側鎖を導入した新規の光学活性白金錯体を合成し、その構造と光物性の研究を行った (Fig. 9b)¹⁵¹。白金錯体 26 は溶液中において発光量子収率 $\Phi = 0.4$ 、非対称因子 $g_{lum} = 0.9 \times 10^{-3}$ を示した。白金錯体 26 の g_{lum} 値は従来のキラルな有機分子のレベルに留まったが、発光量子収率の値は円偏光発光性の白金錯体としては高い。強い円偏光発光性を有する白金錯体は低い発光量子収率を示す場合が多い ($\Phi < 0.1$)。これはキラリティーを付与するために修飾された側鎖が無輻射失活を促進することや、発光性の弱い白金錯体母骨格にキラリティーが導入されていること

による¹⁵²⁻¹⁵⁵。不斉ケイ素置換基を白金錯体に直接導入することで、白金錯体母骨格の発光量子収率を損なわずキラリティーを付与できる。

Fig. 9 CPL properties of 25 and 26.

8. まとめ

本稿では、発光、SHG、CPL を示す光機能有機ケイ素化合物を紹介した。筆者らが取り扱っている芳香族ケイ素化合物の多くは、少数の例外を除き室温・大気下で安定な無色結晶として単離でき、結晶状態で良好な光機能を示す。また、製膜性の良い化合物が多いことも魅力の1つである。この研究では分子骨格の設計に加え、分子集合体の構造、結晶状態におけるパッキングなども重要な要素となる。発光材料をはじめとした光学材料はさらなる高機能化が求められ、改善しなければならない点も多い。分子設計や合成法の検討を深く行うことで、この分野の発展に寄与していきたい。

9. 謝辞

本研究は文部科学省 新学術領域研究「ソフトクリスタル」(領域番号 2903, 課題番号 JP17H06369)、基盤研究 (C) (課題番号 JP19K05627)、発酵研究所一般研究助成 (課題番号 G-2019-3-001)、御器谷科学技術財団、八洲環境技術振興財団、東燃ゼネラル石油研究奨励・奨学財団、村田学術振興財団、谷川熱技術振興基金の助成の下で行われたものである。また、研究遂行に当たっては、東京大学大学院理学系研究科の西原 寛名誉教授 (現 東京理科大学研究推進機構総合研究院教授) をはじめとした学内外の多くの共同研究者にお世話になった。学問的な点では文献を記載したが、他にも日常的に研究室で一緒に研究したメンバー各位に深く感謝申し上げる。

10. 文献

- 1 The Chemistry of Organic Silicon Compounds, (Eds.: S. Patai, Z. Rappaport), Wiley, New York, 1989.
- 2 「現代ケイ素化学—体系な基礎概念と応用に向けて—」 吉良満夫・玉尾浩平 編, 化学同人, 2013.
- 3 「ブックレット群馬大学 7 最強エレメント ケイ素の不思議」 海野雅史 他, 上毛新聞社, 2011.

- 4 「21 世紀の有機ケイ素化学—機能性物質科学の宝庫—」玉尾浩平 編, シーエムシー出版, **2004**.
- 5 Y. Kawakami, *J. Synth. Org. Chem. Jpn.* **2008**, *66*, 148–157.
- 6 「有機ケイ素ポリマーの新展開」, 櫻井英樹 監修, シーエムシー出版, **2002**.
- 7 M. Shimizu, K. Oda, T. Bando, T. Hiyama, *Chem. Lett.* **2006**, *35*, 1022–1023.
- 8 Y. Toma, T. Kuribara, T. Iizuka, H. Nagashima, S. Kyushin, *Chem. Lett.* **2013**, *42*, 250–252.
- 9 S. Kyushin, K. Yoshimura, K. Sato, H. Matsumoto, *Chem. Lett.* **2009**, *38*, 324–325.
- 10 M. Shimizu, H. Tatsumi, K. Mochida, K. Oda, T. Hiyama, *Chem. Asian J.* **2008**, *3*, 1238–1247.
- 11 T. Karatsu, T. Shibata, A. Nishigaki, A. Kitamura, Y. Hatanaka, Y. Nishimura, S. Sato, I. Yamazaki, *J. Phys. Chem. B* **2003**, *107*, 12184–12191.
- 12 H.-S. Oh, I. Imae, Y. Kawakami, S. S. S. Raj, T. Yamane, *J. Organomet. Chem.* **2003**, *685*, 35–43.
- 13 T. Karatsu, M. Terasawa, S. Yagai, A. Kitamura, T. Nakamura, Y. Nishimura, I. Yamazaki, *J. Organomet. Chem.* **2004**, *689*, 1029–1035.
- 14 S. Kyushin, M. Ikarugi, M. Goto, H. Hiratuska, H. Matsumoto, *Organometallics* **1996**, *15*, 1067–1070.
- 15 H. Maeda, H. Ishida, Y. Inoue, A. Merpuge, T. Maeda, K. Mizuno, *Res. Chem. Intermed.* **2009**, *35*, 939–948.
- 16 Y. Niko, S. Kawauchi, S. Otsu, K. Tokumaru, G.-i. Konishi, *J. Org. Chem.* **2013**, *78*, 3196–3207.
- 17 A. Iida, Y. Yamaguchi, *Chem. Commun.* **2009**, 3002–3004.
- 18 S. M. Moerlein, *J. Organomet. Chem.* **1987**, *319*, 29–39.
- 19 T. Ohmura, T. Torigoe, M. Suginome, *Organometallics* **2013**, *21*, 6170–6173.
- 20 M. Khuong, P. Ghanshyam, *J. Org. Chem.* **1986**, *51*, 3545–3548.
- 21 K. Murakami, H. Yorimitsu, K. Oshima, *J. Org. Chem.* **2009**, *74*, 1415–1417.
- 22 Y. Yamanoi, H. Nishihara, *J. Synth. Org. Chem. Jpn.* **2009**, *67*, 778–786.
- 23 M. Shimada, Y. Yamanoi, H. Nishihara, *J. Synth. Org. Chem. Jpn.* **2016**, *74*, 1098–1107.
- 24 山野井 慶徳, 化学工業, **2019**, *70*, 260–266.
- 25 山野井 慶徳, ケイ素化学協会誌, **2018**, *35*, 11–17.
- 26 Y. Yamanoi, *J. Org. Chem.* **2005**, *70*, 9607–9609.
- 27 Y. Yamanoi, H. Nishihara, *Tetrahedron Lett.* **2006**, *47*, 7157–7161.
- 28 Y. Yamanoi, H. Nishihara, *J. Org. Chem.* **2008**, *73*, 6671–6678.
- 29 Y. Yamanoi, T. Taira, J.-I. Sato, I. Nakamura, H. Nishihara, *Org. Lett.* **2007**, *9*, 4543–4546.
- 30 A. Lesbani, H. Kondo, Y. Yabusaki, M. Nakai, Y. Yamanoi, H. Nishihara, *Chem. Eur. J.* **2010**, *16*, 13519–13527.
- 31 Y. Kurihara, Y. Yamanoi, H. Nishihara, *Chem. Commun.* **2013**, *49*, 11275–11277.
- 32 H. Inubushi, H. Kondo, A. Lesbani, M. Miyachi, Y. Yamanoi, H. Nishihara, *Chem. Commun.* **2013**, *49*, 134–136.
- 33 M. Murata, Y. Masuda, *J. Synth. Org. Chem. Jpn.* **2010**, *68*, 845–853.
- 34 M. Murata, Y. Maeda, *J. Synth. Org. Chem. Jpn.* **2019**, *77*, 876–882.
- 35 R. Boukherroub, C. Chatgililoglu, G. Manuel, *Organometallics* **1996**, *15*, 1508–1510.
- 36 M. A. Esteruelas, J. Herrero, F. M. Lopez, M. Martin, L. A. Oro, *Organometallics* **1999**, *18*, 1110–1112.
- 37 *Advanced Inorganic Chemistry, 6th Edition*, F. A. Cotton, G. Wilkinson, C. A. Murillo, M. Bochmann, Wiley, New York, **1999**.
- 38 K. Tamao, M. Uchida, T. Izumizawa, K. Furukawa, S. Yamaguchi, *J. Am. Chem. Soc.* **1996**, *118*, 11974–11975.
- 39 S. Yamaguchi, K. Tamao, *J. Chem. Soc. Dalton Trans.* **1998**, 3693–3702.
- 40 S. Yamaguchi, K. Tamao, *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **1996**, *69*, 2327–2334.
- 41 R. Chen, C. Zheng, Q. Fan, W. Huang, *J. Comput. Chem.* **2007**, *28*, 2091–2101.
- 42 S. Yamaguchi, C. Xu, K. Tamao, *J. Am. Chem. Soc.* **2003**, *125*, 13662–13663.
- 43 J. Dubac, A. Laporterie, G. Manuel, *Chem. Rev.* **1990**, *90*, 215–263.
- 44 K. Tamao, S. Ohno, S. Yamaguchi, *Chem. Commun.* **1996**, 1873–1874.
- 45 K. Tamao, S. Yamaguchi, Y. Ito, Y. Matsuzaki, T. Yamabe, M. Fukushima, S. Mori, *Macromolecules* **1995**, *28*, 8668–8675.
- 46 S. Yamaguchi, K. Tamao, *J. Synth. Org. Chem. Jpn.* **1998**, *56*, 500–510.
- 47 M. Shimizu, H. Tatsumi, K. Mochida, K. Oda, T. Hiyama, *Chem. Asian J.* **2008**, *3*, 1238–1247.
- 48 S. Yamaguchi, K. Tamao, *J. Chem. Soc. Dalton Trans.* **1998**, 3693–3702.
- 49 S. Yamaguchi, K. Tamao, *Chem. Lett.* **2005**, *34*, 2–7.
- 50 Y. Yabusaki, N. Ohshima, H. Kondo, T. Kusamoto, Y. Yamanoi, H. Nishihara, *Chem. Eur. J.* **2010**, *16*, 5581–5585.
- 51 K. Tamao, S. Yamaguchi, M. Shiozaki, Y. Nakagawa, Y. Ito, *J. Am. Chem. Soc.* **1992**, *114*, 5867–5869.
- 52 Y. Yamanoi, T. Nakashima, M. Shimada, H. Maeda, H. Nishihara, *Molecules* **2016**, *21*, 1173/1–1173/10.
- 53 A. Kawachi, A. Tani, K. Machida, Y. Yamamoto, *Organometallics* **2007**, *26*, 4697–4699.
- 54 W. Z. McCarthy, J. Y. Corey, E. R. Corey, *Organometallics* **1984**, *3*, 255–263.
- 55 A. Kawachi, T. Teranishi, T. Deguchi, Y. Yamamoto, *Heteroatom Chem.* **2013**, *24*, 53–57.
- 56 J. Y. Corey, W. Z. McCarthy, *J. Organomet. Chem.* **1984**, *271*, 319–326.
- 57 S. Kyushin, T. Shinnai, T. Kubota, H. Matsumoto, *Organometallics* **1997**, *16*, 3800–3804.
- 58 H. Gilman, E. A. Zuech, *J. Am. Chem. Soc.* **1960**, *82*, 3605–3608.
- 59 K. Nishiyama, M. Oba, H. Takagi, T. Saito, Y. Imai, I. Motoyama, S. Ikuta, H. Hiratsuka, *J. Organomet. Chem.* **2001**, *626*, 32–36.
- 60 M. Oba, Y. Kawahara, R. Yamada, H. Mizuta, K. Nishiyama, *J. Chem. Soc. Perkin Trans.2* **1996**, 1843–1848.
- 61 A. Kawachi, T. Teranishi, Y. Yamamoto, *Tetrahedron Lett.* **2009**, *50*, 1226–1228.
- 62 K. M. Welsh, J. Y. Corey, *Organometallics* **1987**, *6*, 1393–1398.
- 63 A. Nakamoto, Y. Yamamoto, A. Kawachi, *Chem. Lett.* **2017**, *46*, 1760–1762.
- 64 M. Oba, T. Kondo, K. Tanaka, S. Koguchi, K. Nishiyama, *J. Organomet. Chem.* **2011**, *696*, 982–985.
- 65 T. Nakashima, M. Shimada, Y. Kurihara, M. Tsuchiya, Y. Yamanoi, E. Nishibori, K. Sugimoto, H. Nishihara, *J. Organomet. Chem.* **2016**, *805*, 27–33.
- 66 S. G. Makarov, K. N. Maksimova, E. V. Baranov, G. K. Fukin, O. N. Suvorova, D. Wöhrle, G. A. Domrachev, *Russ. Chem. Bull. Int. Ed.* **2006**, *55*, 1748–1754.
- 67 G. A. Crosby, J. N. Demas, *J. Phys. Chem.* **1971**, *75*, 991–1024.
- 68 J. Ohshita, T. Uemura, T. Inoue, T. Iida, A. Kunai, *Organometallics* **2005**, *24*, 2570–2576.

- 69 M. Shimizu, K. Oda, T. Bando, T. Hiyama, *Chem. Lett.* **2006**, 1022–1023.
- 70 W. Nakanishi, S. Hitosugi, Y. Shimada, H. Isobe, *Chem. Asian J.* **2011**, *6*, 554–559.
- 71 K. Takahashi, Y. Nishimura, T. Arai, S. Yagai, A. Kitamura, T. Karatsu, *J. Photochem. Photobiol. A* **2011**, *218*, 204–212.
- 72 P. Gualco, A. Amgoune, K. Miqueu, S. Ladeira, D. Bourissou, *J. Am. Chem. Soc.* **2011**, *133*, 4257–4259.
- 73 M. Tanabe, R. Yumoto, K. Osakada, T. Sanji, M. Tanaka, *Organometallics* **2012**, *31*, 6787–6795.
- 74 N. T. Kim, H. Li, L. Venkataraman, J. L. Leighton, *J. Am. Chem. Soc.* **2016**, *138*, 11505–11508.
- 75 H. Sakurai, *Pure Appl. Chem.* **1987**, *59*, 1637–1646.
- 76 D.-D. H. Yang, N.-C. C. Yang, I. M. Steele, H. Lui, Y.-Z. Ma, G. R. Fleming, *J. Am. Chem. Soc.* **2003**, *125*, 5107–5110.
- 77 T. Karatsu, *J. Photochem. Photobiol. C Photochem. Rev.* **2008**, *9*, 111–137.
- 78 H. Tsuji, Y. Shibano, T. Takahashi, M. Kumada, K. Tamao, *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **2005**, *78*, 1334–1344.
- 79 Y. Shibano, M. Sasaki, Y. Kawanishi, Y. Araki, H. Tsuji, O. Ito, K. Tamao, *Chem. Lett.* **2007**, *36*, 1112–1113.
- 80 A. Lesbani, H. Kondo, J.-i. Sato, Y. Yamanoi, H. Nishihara, *Chem. Commun.* **2010**, *46*, 7784–7786.
- 81 Y. Yamanoi, J. Sendo, T. Kobayashi, H. Maeda, Y. Yabusaki, M. Miyachi, R. Sakamoto, H. Nishihara, *J. Am. Chem. Soc.* **2012**, *134*, 20433–20439.
- 82 Y. Yamanoi, T. Kobayashi, H. Maeda, M. Miyachi, M. Ara, H. Tada, H. Nishihara, *Langmuir* **2016**, *32*, 6825–6829.
- 83 A. Henriksson, H. Maeda, M. Miyachi, Y. Yamanoi, H. Nishihara, *Surf. Sci.* **2018**, *669*, 140–144.
- 84 H. Nishihara, Y. Yamanoi, J.-i. Sato, *Jpn. Kokai Tokkyo Koho*, **2010**, JP 2010163405.
- 85 H. Inubushi, Y. Hattori, Y. Yamanoi, H. Nishihara, *J. Org. Chem.* **2014**, *79*, 2974–2979.
- 86 S. Hirata, M. Nishio, H. Uchida, T. Usuki, T. Nakae, M. Miyachi, Y. Yamanoi, H. Nishihara, *J. Phys. Chem. C* **2020**, *124*, 3277–3286.
- 87 Q. Peng, Q. Huang, X. Hou, P. Chang, J. Xub, S. Deng, *Chem. Commun.* **2012**, *48*, 11452–11454.
- 88 K. Shizu, T. Miwa, Y. Wada, I. Ogata, H. Kaji, *J. Photopolym. Sci. Technol.* **2017**, *30*, 475–481.
- 89 H. Shono, T. Ohkawa, H. Tomoda, T. Mutai, K. Araki, *ACS Appl. Mater. Inter.* **2011**, *3*, 654–657.
- 90 C. Chow, *RSC Adv.* **2013**, *3*, 18835–18843.
- 91 S. Y. Lee, T. Yasuda, Y. S. Yang, Q. Zhang, C. Adachi, *Angew. Chem.* **2014**, *126*, 6520–6524.
- 92 D. K. Mai, J. Lee, I. Min, T. P. Vales, K.-H. Choi, B. J. Park, S. Cho, H.-J. Kim, *Nanomater.* **2018**, *8*, 728/1–728/12.
- 93 J. Zhang, W. Chen, J. A. Rojas, V. E. Jucov, V. E. Timofeeva, C. T. Parker, S. Barlow, R. S. Marder, *J. Am. Chem. Soc.* **2013**, *135*, 16376–16379.
- 94 M. H. Kim, R. B. Cho, *Chem. Commun.* **2009**, 153–164.
- 95 L. Chen, L. Wang, X. Jing, *J. Mater. Chem.* **2011**, *21*, 10265–10267.
- 96 G. S. Beddard, G. Porter, *Nature* **1976**, *260*, 366–367.
- 97 Y. Hong, J. W. Y. Lam, B. Z. Tang, *Chem. Commun.* **2009**, 4332–4353.
- 98 R. Jakubiak, C. J. Collison, W. C. Wan, L. J. Rothberg, B. R. Hsieh, *J. Phys. Chem. A* **1999**, *103*, 2394–2398.
- 99 Y. Kubota, Y. Ozaki, K. Funabiki, M. Matsui, *J. Org. Chem.* **2013**, *78*, 7058–7067.
- 100 Y. Ooyama, T. Okamoto, T. Yamaguchi, T. Suzuki, A. Hayashi, K. Yoshida, *Chem. Eur. J.* **2006**, *12*, 7827–7838.
- 101 J. Cornil, D. Beljonne, J.-P. Calbert, J. L. Brédas, *Adv. Mater.* **2001**, *13*, 1053–1067.
- 102 H. Hiratsuka, H. Horiuchi, Y. Takanoha, H. Matsumoto, T. Yoshihara, T. Okitsu, K. Negishi, S. Kyushin, H. Matsumoto, *Chem. Lett.* **2007**, *36*, 1168–1169.
- 103 M. Shimada, M. Tsuchiya, R. Sakamoto, Y. Yamanoi, E. Nishibori, K. Sugimoto, H. Nishihara, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2016**, *55*, 3022–3026.
- 104 T. Usuki, K. Omoto, M. Shimada, Y. Yamanoi, H. Kasai, E. Nishibori, H. Nishihara, *Molecules* **2019**, *24*, 521/1–521/11.
- 105 Z. Ruan, L. Li, C. Wang, Y. Xie, Q. Hu, Q. Peng, S. Ye, Q. Li, Z. Li, *Small* **2016**, *12*, 6623–6632.
- 106 *Organic Light Emitting Devices: Synthesis, Properties and Applications* (Eds.: K. Müllen, U. Scherf), Wiley–VCH, Weinheim, Germany, **2006**.
- 107 *Flat Panel Displays: Advanced Organic Materials* (Ed.: J. A. Connor), RSC Materials Monograph; Royal Society of Chemistry, Cambridge, U.K., **2000**.
- 108 D. Li, H. Zhang, Y. Wang, *Chem. Soc. Rev.* **2013**, *42*, 8416–8433.
- 109 U. Mitschke, P. Bäuerle, *J. Mater. Chem.* **2000**, *10*, 1471–1507.
- 110 Y. Kuwabara, H. Ogawa, H. Inada, N. Noma, Y. Shiota, *Adv. Mater.* **1994**, *6*, 677–679.
- 111 J. Preat, C. Michaux, D. Jacquemin, E. A. Perpète, *J. Phys. Chem. C* **2009**, *113*, 16821–16833.
- 112 T. Usuki, M. Shimada, Y. Yamanoi, T. Ohto, H. Tada, H. Kasai, E. Nishibori, H. Nishihara, *ACS Appl. Mater. Inter.* **2018**, *10*, 12164–12172.
- 113 D. J. Williams, “Nonlinear Optical Properties of Organic and Polymeric Materials”, ACS Symposium Series, No. 233, Washington DC, **1983**.
- 114 *Nonlinear Optical Properties of Organic Molecules and Crystals* (Eds.: J. Zyss, D. S. Chemla), Academic Press, Orlando, FL, **1987**.
- 115 *Molecular Nonlinear Optics* (Ed.: J. Zyss), Academic Press, San Diego, CA, **1994**.
- 116 *Nonlinear Optics of Organic Molecules and Polymers* (Eds.: H. S. Nalwa, S. Miyata), CRC Press, Boca Raton, FL, **1996**.
- 117 M. Shimada, Y. Yamanoi, T. Matsushita, T. Kondo, E. Nishibori, A. Hatakeyama, K. Sugimoto, H. Nishihara, *J. Am. Chem. Soc.* **2015**, *137*, 1024–1027.
- 118 M. Nishio, M. Shimada, K. Omoto, T. Nakae, H. Maeda, M. Miyachi, Y. Yamanoi, E. Nishibori, N. Nakayama, H. Goto, T. Matsushita, T. Kondo, M. Hattori, K. Jimura, S. Hayashi, H. Nishihara, *J. Phys. Chem. C* **2020**, *124*, 17450–17458.
- 119 M. Kato, H. Ito, M. Hasegawa, K. Ishii, *Chem. Eur. J.* **2019**, *25*, 5105–5112.
- 120 最近, 「ソフトクリスタル」に関して以下の特集号が報告されている。化学と工業, **2020**, *73*, 616–630.
- 121 K. Omoto, T. Nakae, M. Nishio, Y. Yamanoi, H. Kasai, E. Nishibori, T. Mashimo, T. Seki, H. Ito, K. Nakamura, N. Kobayashi, N. Nakayama, H. Goto, H. Nishihara, *J. Am. Chem. Soc.* **2020**, *142*, 12651–12657.
- 122 J. O. Bauer, C. Strohmman, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2014**, *53*, 720–724.
- 123 K. Yamamoto, Y. Kawanami, M. Miyazawa, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* **1993**, 436–437.
- 124 R. Shintani, C. Takagi, T. Ito, M. Naito, K. Nozaki, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2015**, *54*, 1616–1620.

- 125 T. Ohta, M. Ito, A. Tsuneto, H. Takaya, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* **1994**, 2525–2526.
- 126 K. Igawa, D. Yoshihiro, N. Ichikawa, N. Kokan, K. Tomooka, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2012**, *51*, 12745–12748.
- 127 Y. Yasutomi, H. Suematsu, T. Katsuki, *J. Am. Chem. Soc.* **2010**, *132*, 4510–4511.
- 128 R. Shintani, K. Moriya, T. Hayashi, *J. Am. Chem. Soc.* **2011**, *133*, 16440–16443.
- 129 Y. Kurihara, M. Nishikawa, Y. Yamanoi, H. Nishihara, *Chem. Commun.* **2012**, *48*, 11564–11566.
- 130 H. Nishihara, Y. Yamanoi, Y. Kurihara, R. Ishii, *Jpn. Kokai Tokkyo Koho*, **2016**, JP 2016030743.
- 131 F. S. Richardson, J. P. Rlehl, *Chem. Rev.* **1977**, *77*, 773–792.
- 132 M. Schadt, *Annu. Rev. Mater. Sci.* **1997**, *27*, 305–379.
- 133 S. Furumi, *Chem. Rec.* **2010**, *10*, 394–408.
- 134 F. Song, G. Wei, X. Jiang, F. Li, C. Zhu, Y. Cheng, *Chem. Commun.* **2013**, *49*, 5772–5774.
- 135 M. Inouye, K. Hayashi, Y. Yonenaga, T. Itou, K. Fujimoto, T. Uchida, M. Iwamura, K. Nozaki, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2014**, *53*, 14392–14396.
- 136 K. Nakamura, S. Furumi, M. Takeuchi, T. Shibuya, K. Tanaka, *J. Am. Chem. Soc.* **2014**, *136*, 5555–5558.
- 137 S. Abbate, G. Longhi, F. Lebon, E. Castiglioni, S. Superchi, L. Pisani, F. Fontana, F. Torricelli, T. Caronna, C. Villani, R. Sabia, M. Tommasini, A. Lucotti, D. Mendola, A. Mele, D. A. Lightner, *J. Phys. Chem. C* **2014**, *118*, 1682–1695.
- 138 J. C. Y. Ng, J. Liu, H. Su, Y. Hong, H. Li, J. W. Y. Lam, K. S. Wong, B. Z. Tang, *J. Mater. Chem. C* **2014**, *2*, 78–83.
- 139 J. Kumar, T. Nakashima, H. Tsumatori, T. Kawai, *J. Phys. Chem. Lett.* **2014**, *5*, 316–321.
- 140 H. Li, J. Cheng, H. Deng, E. Zhao, B. Shen, J. W. Y. Lam, K. S. Wong, H. Wu, B. S. Li, B. Z. Tang, *J. Mater. Chem. C* **2015**, *3*, 2399–2404.
- 141 E. M. Sánchez-Carnerero, F. Moreno, B. L. Maroto, A. R. Agarrabeitia, M. J. Ortiz, B. G. Vo, G. Muller, S. D. L. Moya, *J. Am. Chem. Soc.* **2014**, *136*, 3346–3349.
- 142 E. M. Sánchez-Carnerero, A. R. Agarrabeitia, F. Moreno, B. L. Maroto, G. Muller, M. J. Ortiz, S. D. L. Moya, *Chem. Eur. J.* **2015**, *21*, 13488–13500.
- 143 Y. Sawada, S. Furumi, A. Takai, M. Takeuchi, K. Noguchi, K. Tanaka, *J. Am. Chem. Soc.* **2012**, *134*, 4080–4083.
- 144 T. Kawai, K. Kawamura, H. Tsumatori, M. Ishikawa, M. Naito, M. Fujiki, T. Nakashima, *ChemPhysChem* **2007**, *8*, 1465–1468.
- 145 J. E. Field, G. Muller, J. P. Riehl, D. Venkataraman, *J. Am. Chem. Soc.* **2003**, *125*, 11808–11809.
- 146 Y. Yamanoi, T. Usuki, K. Omoto, M. Shimada, H. Koike, M. Iwamura, K. Nozaki, D. Saito, M. Kato, H. Nishihara, *Tetrahedron Lett.* **2019**, *60*, 1108–1112.
- 147 S. Sato, A. Yoshii, S. Takahashi, S. Furumi, M. Takeuchi, H. Isobe, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **2017**, *114*, 13097–13101.
- 148 S. Koga, S. Ueki, M. Shimada, R. Ishii, Y. Kurihara, Y. Yamanoi, J. Yuasa, T. Kawai, T. Uchida, M. Iwamura, K. Nozaki, H. Nishihara, *J. Org. Chem.* **2017**, *82*, 6108–6117.
- 149 J. Brooks, Y. Babayan, S. Lamansky, P. I. Djurovich, I. Tsyba, R. Bau, M. E. Thompson, *Inorg. Chem.* **2002**, *41*, 3055–3066.
- 150 H. Tsujimoto, S. Yagi, Y. Honda, H. Terao, T. Maeda, H. Nakazumi, Y. Sakurai, *J. Lumin.* **2010**, *130*, 217–221.
- 151 T. Usuki, H. Uchida, K. Omoto, Y. Yamanoi, A. Yamada, M. Iwamura, K. Nozaki, H. Nishihara, *J. Org. Chem.* **2019**, *84*, 10749–10756.
- 152 T. Ikeda, M. Takayama, J. Kumar, T. Kawai, T. Haino, *Dalton Trans.* **2015**, *44*, 13156–13162.
- 153 P. Z. Xiao, Y. Victoria, L. Jian, L. Y. Xiao, H. Wei, Li. Yizhi, H. L. Cheng, M. Gilles, Z. Y. Xiao, *Inorg. Chem.* **2015**, *54*, 143–152.
- 154 T. Ikeda, K. Hirano, T. Haino, *Mater. Chem. Front.* **2018**, *2*, 468–474.
- 155 R. B. Jochen, W. Xuhua, Y. Ying, J. C. Alasdair, J. F. Matthew, *J. Am. Chem. Soc.* **2016**, *138*, 9743–9746.

Profile

中江 豊崇

東京大学大学院理学系研究科特任研究員 博士（理学）

〔経歴〕2013年大阪市立大学理学部化学科卒業，2017年日本学術振興会特別研究員 (DC2)，2018年大阪市立大学大学院理学研究科後期博士課程修了，同年フランス国立科学研究センター博士研究員，2019年より現職。

〔専門〕有機金属化学，錯体化学

西尾 正樹

東京大学大学院理学系研究科技術補佐員 博士（理学）

〔経歴〕2009年金沢大学理学部化学科卒業，2016年金沢大学大学院自然科学研究科物質科学専攻博士後期課程修了，2017年金沢大学大学院理工研究域生命理工学系博士研究員，2019年より現職。

〔専門〕錯体化学，固体物性化学

山野井 慶徳

東京大学大学院理学系研究科准教授 博士（理学）

〔経歴〕1994年東京理科大学理学部化学科卒業，1999年千葉大学大学院自然科学研究科博士課程修了，1999年日本学術振興会特別研究員，2001年分子科学研究所助手，2002年東京大学大学院理学系研究科産官学連携研究員，2003年東京大学大学院理学系研究科助手，2007年東京大学大学院理学系研究科助教，2009年より現職。

〔専門〕有機化学