

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 20 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25410099

研究課題名(和文) 生体分子を利用した色素組織体の構築と光機能

研究課題名(英文) Construction and photoelectric property of DNA templated dye aggregates

研究代表者

中村 光伸 (Nakamura, Mitsunobu)

兵庫県立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50285342

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：電子ドナー性および電子アクセプター性色素に核酸塩基レセプターを連結した色素ユニットを合成し、ドナー性色素分子として太陽電池や発光型電界効果トランジスタなどの光電子デバイス材料であり、化学的に安定で合成が容易であるジケトピロロピロールを用い、アクセプター性色素にはナフタレンジイミドを用いた。構築した色素組織体でヘテロ接合型電極を作成し、その光電変換特性の評価、組織体構造による光電変換効率の制御を検討した。その結果、ヘテロ接合型電極では両色素の電荷移動(CT)錯体のDNA組織体を固定した電極に比べ、50倍の高い光電応答が得られ、組織体構造による光電応答の制御を達成することができた。

研究成果の概要(英文)：Multichromophore arrays of bis(2-thienyl)diketopyrrolopyrrole (DPP) and naphthalenediimide (NDI) with two ZnII-cyclens were constructed using thymidine DNAs as a scaffold via the binding of the ZnII-cyclens with thymine bases. We demonstrate photocurrent generation in a donor/acceptor heterojunction configuration consisting of the DPP (donor) and NDI (acceptor) arrays co-immobilized on an Au electrode. The co-immobilized electrode exhibited good photocurrent responses because of the efficient charge separation between the DPP and NDI arrays. In contrast, an immobilized electrode consisting of randomly assembled DPP-NDI arrays generated no photocurrent response because DPP formed ground-state charge-transfer complexes with NDI in the randomly assembled arrays. Therefore, our approach to generate donor/acceptor heterojunctions based on DNA-multichromophore arrays is a useful method to efficiently generate photocurrent.

研究分野：光化学、核酸化学

キーワード：色素組織体 自己組織化 DNA 光電変換 ナフタレンジイミド ジケトピロロピロール

1. 研究開始当初の背景

最も身近な光エネルギー変換の例である光合成では、蛋白質複合体中の色素分子が階層的に配列した色素組織体で光吸収、エネルギー移動、多段階電子移動というプロセスを経て長寿命の電荷分離状態を作り出して光エネルギーを電気エネルギーに効率よく変換している。このような光合成を模倣して光エネルギー変換システムを構築するためには色素分子の空間制御が変換効率を向上させるうえで重要な鍵となっており、化学修飾した色素分子の結晶化や液晶化、高分子材料の主鎖や側鎖に色素分子を導入するなどして、さまざまな手法を使って色素分子の空間制御が検討されている。生体分子であり、かつ塩基配列をプログラムすることで厳密に制御した構造体を構築できるナノテクノロジー素材でもある DNA も色素組織体を構築するための鑄型材料として利用でき、希望する数の色素分子をその立体配置を制御して配列させることができるという他の鑄型材料にはない特徴を持っている。

申請者は、核酸塩基であるチミン塩基に選択的に配位結合するレセプターであるサイクレン亜鉛錯体をナフタレントラカルボジイミド(NDI)に連結した分子を合成し、水溶液中でチミンのみからなるオリゴDNA (dT_n) を添加することで、自己組織化により DNA の長さ(n) に対応したサンドイッチ型の NDI 組織体の構築に成功した。さらにこの NDI 組織体を修飾した電極へ光照射することにより DNA の長さ依存した光電流が発生することを見出している。しかしながら、NDI のみからなる組織体では光電変換効率は数パーセント程度であり、変換効率の向上は望めない。

2. 研究の目的

そこで本研究では電子ドナー性および電子アクセプター性色素に核酸塩基レセプターを連結した色素ユニットを合成し、このユニットと鑄型 DNA との自己組織化によりそれぞれの色素組織体の構築を行う。これらの組織体によるヘテロ接合型システムを構築し、その光電変換特性の評価、組織体構造による光電変換効率の制御を行う。ドナー性色素分子として太陽電池や発光型電界効果トランジスタなどの光電子デバイス材料であり、化学的に安定で合成が容易であるジケトピロピロール(DPP)を用い、アクセプター性色素には NDI を使って色素組織体を構築する。

3. 研究の方法

(1) 電子ドナーとして作用する DPP にレセプターであるサイクレン亜鉛錯体を連結したユニットを合成する。

(2) 上記ユニットと別途に合成した鑄型 DNA との自己組織化により色素組織体を構築し、その組織体構造および色素分子間の空間配置を明らかにする。

(3) 構築した色素組織体を使ったヘテロ接合型光電変換システムの変換効率を評価す

る。ドナーおよびアクセプターユニットの構造、あるいは鑄型 DNA の鎖長を変えることにより組織体構造を制御して変換効率の向上を図ることで光電変換材料への応用を目指す。

4. 研究成果

3'-末端をチオール(-SH)修飾したオリゴDNA (dT_n) により形成した色素集積体の溶液に Au 電極を浸すことで Au-S 結合を介して色素集積体を電極上に固定化した。本研究では 1-dT_n と 2-dT_n が固定化された電極 (E1)、1 と 2 がランダムに配列した 1-2-dT_n が固定化された電極 (E2)、1-dT_n が固定化された電極 (E3) の三種類の電極を作成した(図 1)。

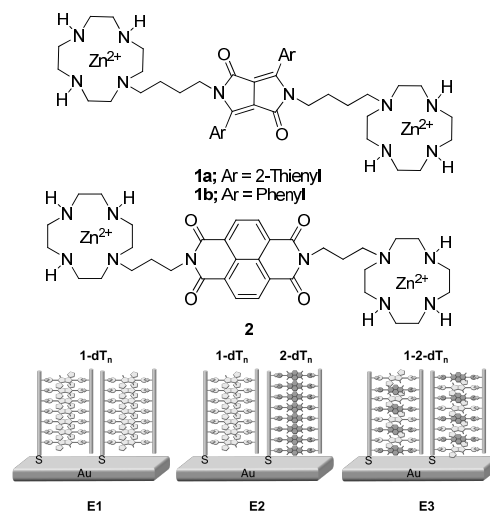


Fig. 1 Schematic illustration of electrodes E1, E2, and E3.

これらの固定化電極に色素が吸収帯を有する波長領域の光 (460-600 nm) を 300 W Xe ランプとバンドパスフィルターを用いて照射し、光電流応答を測定した。測定は色素集積体固定化電極を作用電極とし、対極に Pt、参照電極に Ag/AgCl 電極を用い、溶液には 10 mM L-アスコルビン酸を含む pH 7.6 緩衝溶液を用いた。

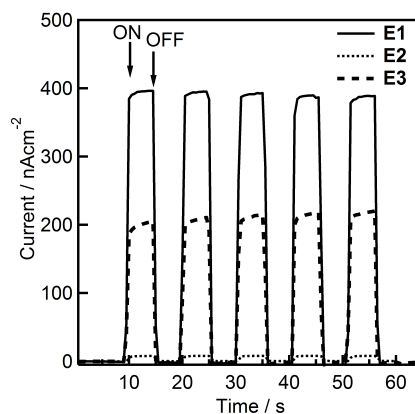


Fig. 2 Anodic photocurrent responses of electrodes E1, E2, and E3. Action spectra of electrodes E1 and E3.

1 および 2 の DNA による色素集積体の形成は、UV 滴定、CD スペクトル、HPLC を用

いたゲルろ過クロマトグラフィーにより確認した。図2にアスコルビン酸(AsA)存在下の **E1-3** の光電流応答を示す。**E1** では光の ON-OFF に応じてアノード電流が観察された。一方、**E2** では光電応答は観察されず、**E3** は **E1** の 1/2 の強度の光電流が観察された。**E1** のアクションスペクトル(図3)は **E3** のアクションスペクトルおよび溶液中の 1-dT_n の吸収と一致したことから、1-dT_n の励起状態から光電流は発生していることが明らかになった。

1-dT_n の 2-dT_n による UV 滴定では 500-600 nm の DPP に由来する吸収帯は 2-dT_n を添加しても変化せず、反対に 1-dT_n の蛍光は 2-dT_n の添加により消光されることから、溶液中で 1-dT_n と 2-dT_n は色素間の混雑が起こらず安定に存在し、光照射により 1-dT_n の励起状態から 2-dT_n への光電子移動が起こることが示唆された。一方、**1** の **2** による UV 滴定では、**2** の添加に伴い **1** の 500-600 nm の吸収が減少し、600 nm 以上の吸収が増加したことから、**1** と **2** は溶液中で電荷移動 (CT) 錯体を形成することが示唆された。したがって、**E1** では光励起された 1-dT_n から 2-dT_n への電荷移動が効率的に起こり、1-dT_n のみの **E3** に比べて高い光電応答を示すと考えられる。**E2** では **1** と **2** がランダムに配列した **1-2-dT_n** 中で CT 錯体が形成されており、この CT 錯体の影響により光電応答が抑制されると考えられる。ドナーおよびアクセプターとなる色素をそれぞれ DNA により集積させることで光電応用を阻害するような CT 錯体形成を抑制できることが明らかになった。

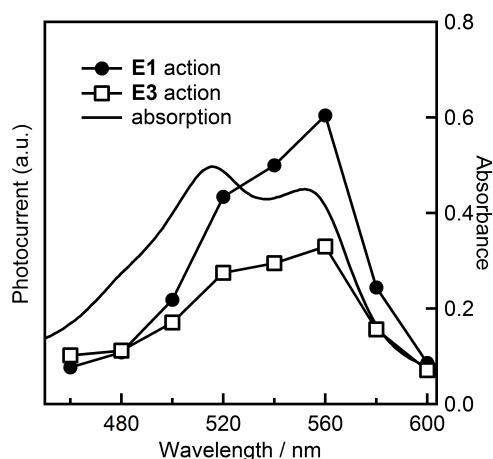


Fig. 3 Action spectra of electrodes **E1** and **E3**.

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 12 件)

1. 中村光伸、津門貢司、除村あゆみ、高田忠雄、山名一成、Donor-acceptor heterojunction configurations based on DNA-multichromophore arrays, Chem. Eur.

J.、査読有、Vol. 21、2015、pp.11788-11792、DOI: 10.1002/chem.201501955

2. 高田忠雄、井戸美佐、芦田 茜、中村光伸、藤塚 守、真嶋哲朗、山名一成、Photocurrent generation through charge-transfer processes in noncovalent perylenediimide/DNA complexes, Chem. Eur. J.、査読有、Vol. 21、2015、pp.6846-6851、DOI: 10.1002/chem.201406592
3. 高田忠雄、竹村真衣、河野裕太、中村光伸、山名一成、Photoresponsive DNA monolayer prepared by primer extension reaction on the electrode, Langmuir、査読有、Vol. 31、2015、pp.3933-3998、DOI: 10.1021/la505013u
4. 津門貢司、中村光伸、高田忠雄、山名一成、Diketopyrrolopyrrole J-aggregates formed by self-organization with DNA, Chem. Asian J.、査読有、Vol. 9、2014、pp.1618-1622、DOI: 10.1002/asia.201402063
5. 高田忠雄、芦田 茜、中村光伸、藤塚 守、真嶋哲朗、山名一成、Photocurrent Generation Enhanced by Charge Delocalization over Stacked Perylenediimide Chromophores Assembled within DNA, J. Am. Chem. Soc.、査読有、Vol. 136、2014、pp.6814-6817、DOI: 10.1021/ja501535z
6. 高田忠雄、山口こさと、塚本 傑、中村光伸、山名一成、Light-up fluorescent probes utilizing binding behavior of perylenediimide derivatives to a hydrophobic pocket within DNA, Analyst,、査読有、Vol. 139、2014、pp.4016-4021、DOI: 10.1039/C4AN00493K
7. 高田忠雄、土地貴明、中村光伸、山名一成、Preparation of ferrocene-functionalized gold nanoparticles by primer extension reaction on the particle surface, Bioorg. Med. Chem. Lett.、査読有、2014、Vol. 24,、pp.2661-2663、<http://dx.doi.org/10.1016/j.bmcl.2014.04.062>
8. 高田忠雄、大塚友美子、中村光伸、山名一成、Formation of a charge transfer complex within a hydrophobic cavity in DNA, RSC Adv.、査読有、2014、Vol. 4、pp.59440-59443、DOI: 10.1039/C4RA11761A
9. 高田忠雄、谷水陽介、中村光伸、山名一成、Preparation of fluorescent nucleic acids generating unique emission by primer extension reaction using pyrene-labeled deoxyuridine triphosphate derivatives, Rapid Communication in Photoscience、査読有、2014、Vol. 3、pp.76-78、<http://koreascience.or.kr/article/ArticleFullR>

- ecord.jsp?cn=GGGHY_2014_v3n4_76
10. 中村光伸、津門貢司、高田忠雄、山名一成、DNA length dependent photocurrent of diketopyrrolopyrrole aggregates constructed with DNA、*Rapid Communication in Photoscience*、査読有、2014、Vol. 3、pp.76-78、http://koreascience.or.kr/article/ArticleFullRecord.jsp?cn=GGGHY_2014_v3n4_67
 11. 高田忠雄、河野裕太、芦田 茜、中村光伸、川井清彦、真嶋哲朗、山名一成、Synthesis and charge transferability of DNA possessing a naphthalimide photosensitizer at an extrahelical position、*Tetrahedron Lett.*、査読有、2013、Vol. 54、pp.4796-4799、<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040403913011258>
 12. 高田忠雄、芦田 茜、中村光伸、山名一成、Cationic perylenediimide as a specific fluorescent binder to mismatch containing DNA、*Bioorg. Med. Chem.*、査読有、2013、Vol. 21、pp.6011-6014、<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968089613006615>
- 〔学会発表〕(計 46 件)
1. 除村あゆみ、中村光伸、高田忠雄、山名一成、DNA を利用した色素会合体による光電変換、日本化学会第 9 6 春季年会、2016 年 3 月 24 日～27 日、京都府京田辺市、同志社大学
 2. 鈴木淳平、中村光伸、高田忠雄、山名一成、DNA を鋳型にした色素会合体の構築とその連結の検討、日本化学会第 9 6 春季年会、2016 年 3 月 24 日～27 日、京都府京田辺市、同志社大学
 3. 高田忠雄、石野俊也、井戸美佐、中村光伸、山名一成、Photochemical characterization of homo and hetero complexes of perylenediimide derivatives constructed within DNA duplex、The 42nd International Symposium on Nucleic Acids Chemistry 2015、2015 年 9 月 23 日～25 日、兵庫県姫路市、イーグレ姫路
 4. 石野俊也、高田忠雄、中村光伸、山名一成、Molecular beacon probes possessing stacked perylenediimide oligomer、The 42nd International Symposium on Nucleic Acids Chemistry 2015、2015 年 9 月 23 日～25 日、兵庫県姫路市、イーグレ姫路
 5. 井戸美佐、高田忠雄、中村光伸、山名一成、DNA-templated synthesis of functional dye clusters、The 42nd International Symposium on Nucleic Acids Chemistry 2015、2015 年 9 月 23 日～25 日、兵庫県姫路市、イーグレ姫路
 6. 井脇世拓、高田忠雄、中村光伸、山名一成、Electrochemical DNA sensors using a pillar-shaped electrode、The 42nd International Symposium on Nucleic Acids Chemistry 2015、2015 年 9 月 23 日～25 日、兵庫県姫路市、イーグレ姫路
 7. 守法寿恵、高田忠雄、中村光伸、山名一成、Construction of DNA-modified electrodes with gold nanoparticles showing photocurrent response、The 42nd International Symposium on Nucleic Acids Chemistry 2015、2015 年 9 月 23 日～25 日、兵庫県姫路市、イーグレ姫路
 8. 高田忠雄、石野俊也、井戸美佐、中村光伸、山名一成、ペリレンジイミドのヘテロ二量体を有する DNA 複合体の発光応答と蛍光バイオセンサーへの応用、2015 年光化学討論会、2015 年 9 月 9 日～11 日、大阪府大阪市、大阪市立大学
 9. 除村あゆみ、中村光伸、高田忠雄、山名一成、DNA による色素集積体形成とその光電機能、2015 年光化学討論会、2015 年 9 月 9 日～11 日、大阪府大阪市、大阪市立大学
 10. 鈴木淳平、中村光伸、高田忠雄、山名一成、ジケトピロロピロール修飾核酸の合成と性質、第 6 1 回 高分子研究発表会(神戸)2015 年 7 月 17 日、兵庫県神戸市、兵庫県民会館
 11. 除村あゆみ、中村光伸、高田忠雄、山名一成、核酸により構築された色素組織体の光電変換、第 6 1 回 高分子研究発表会(神戸)2015 年 7 月 17 日、兵庫県神戸市、兵庫県民会館
 12. 中村光伸、福田 稔、高田忠雄、山名一成、Pyrene Arrays Exhibiting Static Excimer Fluorescence on RNA Duplexes、27th International Conference on Photochemistry、2015 年 6 月 28 日～7 月 3 日、大韓民国、済州、International Convention Center Jeju Island
 13. 中村光伸、除村あゆみ、津門貢司、高田忠雄、山名一成、Photocurrent generation from DNA-multichromophore arrays、The 11th Korea-Japan Symposium on Frontier Photoscience、2015 年 6 月 26 日～28 日、大韓民国、済州、Bareve Hotel
 14. 高田忠雄、石野俊也、井戸美佐、中村光伸、山名一成、Photochemical processes of stacked perylenediimide assembly constructed within a DNA duplex、The 11th Korea-Japan Symposium on Frontier Photoscience、2015 年 6 月 26 日～28 日、大韓民国、済州、Bareve Hotel
 15. 井戸美佐、高田忠雄、中村光伸、山名一成、DNA 構造をテンプレートに利用したペリレンジイミド集積体の構築、日本化学会第 9 5 春季年会、2015 年 3 月 26 日～29 日、千葉県船橋市、日本大学
 16. 井脇世拓、高田忠雄、中村光伸、山名一成、DNA 構造を利用したポルフィリン集合体の構築、日本化学会第 9 5 春季年会、2015 年 3 月 26 日～29 日、千葉県船橋市、日本大学

17. 守法寿恵、高田忠雄、中村光伸、山名一成、光応答特性を示す金ナノ粒子/DNA修飾電極の作製、日本化学会第95春季年会、2015年3月26日~29日、千葉県船橋市、日本大学
18. 除村あゆみ、津門貢司、中村光伸、高田忠雄、山名一成、DNA-色素会合体による光電変換システム、日本化学会第95春季年会、2015年3月26日~29日、千葉県船橋市、日本大学
19. 高田忠雄、馬越 優、中村光伸、山名一成、核酸の変異塩基部位に結合するペリレンジイミド誘導体の開発と蛍光センサーへの応用、日本化学会第95春季年会、2015年3月26日~29日、千葉県船橋市、日本大学
20. 井戸美佐、高田忠雄、中村光伸、山名一成、DNA template synthesis of cofacially stacked perylene diimide assembly、The 41st International Symposium on Nucleic Acids Chemistry 2014、2014年11月5日~7日、福岡県北九州市、北九州国際会議場
21. 守法寿恵、高田忠雄、中村光伸、山名一成、Enhancement of photocurrent by a localized electric field that occurs in the gap between gold surface bridged by DNA、The 41st International Symposium on Nucleic Acids Chemistry 2014、2014年11月5日~7日、福岡県北九州市、北九州国際会議場
22. 津門貢司、中村光伸、高田忠雄、山名一成、Photochemical properties of DNA template dye aggregates、The 41st International Symposium on Nucleic Acids Chemistry 2014、2014年11月5日~7日、福岡県北九州市、北九州国際会議場
23. 津門貢司、中村光伸、高田忠雄、山名一成、DNAテンプレートを利用した色素集積体の光電変換、2014年光化学討論会、2014年10月11日~13日、北海道札幌市、北海道大学
24. 高田忠雄、山口こさと、塚本傑、芦田茜、中村光伸、山名一成、核酸の変異部位に結合するペリレンジイミド誘導体を利用した蛍光センサー、2014年光化学討論会、2014年10月11日~13日、北海道札幌市、北海道大学
25. 井脇世拓、高田忠雄、中村光伸、山名一成、DNA構造を利用したポルフィリン二量体の構築と特性評価、第60回高分子研究発表会(神戸)、2014年7月24日~25日、兵庫県神戸市、兵庫県民会館
26. 井戸美佐、高田忠雄、中村光伸、山名一成、DNAテンプレート合成によるペリレンジイミド集積体の作製、第60回高分子研究発表会(神戸)、2014年7月24日~25日、兵庫県神戸市、兵庫県民会館
27. 津門貢司、中村光伸、高田忠雄、山名一成、DNA-色素会合体による光電変換、第60回高分子研究発表会(神戸)、2014年7月24日~25日、兵庫県神戸市、兵庫県民会館
28. 守法寿恵、高田忠雄、中村光伸、山名一成、DNA自己組織化を利用した金ナノ粒子/色素複合体の構築と光応答、第60回高分子研究発表会(神戸)、2014年7月24日~25日、兵庫県神戸市、兵庫県民会館
29. 中村光伸、津門貢司、高田忠雄、山名一成、Photoelectric conversion of chromophore aggregates using DNA、2014 Korea-Japan Symposium on Frontier Photoscience、2014年6月21日~23日、大韓民国ソウル市、ソウル大学
30. 高田忠雄、山口こさと、芦田茜、中村光伸、山名一成、Nucleic acid sensors utilizing fluorescence response of cationic perylene diimide derivatives bound to defect sites and cavity on DNA、2014 Korea-Japan Symposium on Frontier Photoscience、2014年6月21日~23日、大韓民国ソウル市、ソウル大学
31. 中村光伸、DNA scaffolded chromophore aggregates and their photochemical behavior、Asian International Symposium on Photochemistry (日本化学会第94春季年会)、2014年3月27日~30日、愛知県名古屋市、名古屋大学
32. 高松佑太、高田忠雄、中村光伸、前中一介、山名一成、ピラー構造電極を用いた高感度な電気化学核酸検出デバイス、日本化学会第94春季年会、2014年3月27日~30日、愛知県名古屋市、名古屋大学
33. 津門貢司、中村光伸、高田忠雄、山名一成、DNAを鋳型にした色素会合体の光化学特性、日本化学会第94春季年会、2014年3月27日~30日、愛知県名古屋市、名古屋大学
34. 井戸美佐、高田忠雄、芦田茜、中村光伸、山名一成、塩基除去反応を利用したDNA/ペリレンジイミド複合体の作製、日本化学会第94春季年会、2014年3月27日~30日、愛知県名古屋市、名古屋大学
35. 井脇世拓、高田忠雄、中村光伸、山名一成、クリック反応を利用したポルフィリン-DNA複合体の作製、日本化学会第94春季年会、2014年3月27日~30日、愛知県名古屋市、名古屋大学
36. 守法寿恵・高田忠雄・芦田茜・中村光伸・山名一成、DNAを利用して構築した金ナノ粒子集合体の光電応答、日本化学会第94春季年会、2014年3月27日~30日、愛知県名古屋市、名古屋大学
37. 中村光伸、津門貢司、高田忠雄、山名一成、Photoelectric properties of dye aggregates constructed using oligonucleotides、2013 Korea-Japan

- Symposium on Frontier Photoscience*, 2013年11月25日～27日、大韓民国ソウル市、梨花女子大
38. 高田忠雄、芦田茜、中村光伸、藤塚守、真嶋哲朗、山名一成、Photochemical behavior of cationic perylene diimide derivatives bound to defect sites and cavity within DNA, *2013 Korea-Japan Symposium on Frontier Photoscience*, 2013年11月25日～27日、大韓民国ソウル市、梨花女子大
 39. 津門貢司、中村光伸、高田忠雄、山名一成、Aggregation of Diketopyrrolopyrrole Derivative Using DNA, *The 40th International Symposium on Nucleic Acids Chemistry 2013*, 2013年11月13日～15日、神奈川県横浜市、横浜国際平和会議場
 40. 高松佑太、高田忠雄、前中一介、山名一成、Pillar Shaped Electrode Surface for Highly Sensitive Electrochemical DNA/RNA Detection Device, *The 40th International Symposium on Nucleic Acids Chemistry 2013*, 2013年11月13日～15日、神奈川県横浜市、横浜国際平和会議場
 41. 井戸美佐、高田忠雄、芦田茜、中村光伸、山名一成、DNA-templated oligomerization of perylene diimide chromophores via Schiff base formation, *The 40th International Symposium on Nucleic Acids Chemistry 2013*, 2013年11月13日～15日、神奈川県横浜市、横浜国際平和会議場
 42. 高田忠雄、芦田茜、中村光伸、川井清彦、藤塚守、真嶋哲朗、山名一成、Photoinduced charge transfer dynamics of perylene diimide assembly organized in DNA duplex, *The 40th International Symposium on Nucleic Acids Chemistry 2013*, 2013年11月13日～15日、神奈川県横浜市、横浜国際平和会議場
 43. 津門貢司、中村光伸、高田忠雄、山名一成、蛍光性ジケトピロロピロールのDNAによる集合体形成、2013年光化学討論会、2013年9月11日～13日、愛媛県松山市、愛媛大学
 44. 高田忠雄、芦田茜、中村光伸、川井清彦、藤塚守、真嶋哲朗、山名一成、DNA上に組織化されたペリレンジイミドの光誘起電子移動反応、2013年光化学討論会、2013年9月11日～13日、愛媛県松山市、愛媛大学
 45. 亀山良太、中村光伸、高田忠雄、山名一成、蛍光プローブを指向したジケトピロロピロール修飾核酸の合成、第59回高分子研究発表会(神戸)、2013年7月12日、兵庫県神戸市、兵庫県民会館
 46. 高松佑太、高田忠雄、中村光伸、山名一成、ピラー型電極を用いる電気化学DNAセンサーの開発、第59回高分子研

究発表会(神戸)、2013年7月12日、兵庫県神戸市、兵庫県民会館

〔図書〕(計4件)

1. 高田忠雄、中村光伸、山名一成、Springer、DNA Assisted multichromophore assembly, In *Modified Nucleic Acids, Nucleic Acids and Molecular Biology*, 2016、Chapter 5、pp.101-121、DOI: 0.1007/978-3-319-27111-8_5
2. 中村光伸(分担執筆)、朝倉書店、*励起エネルギーの移動・伝達・拡散、光と生命の事典*、日本光生物学協会編、2015、1章14節、pp.28-29
3. 中村光伸、高田忠雄、山名一成、John Wiley & Sons、Highly ordered pyrene π -stacks on an RNA duplex, In *Current Protocols in Nucleic Acids Chemistry*, Egli, M.編、2015、Supplement 63、Unit 4.66、DOI: 10.1002/0471142700.nc0466s63
4. 中村光伸(分担執筆)、朝倉書店、*リン化合物の光化学、光化学の事典*、4章4節(3)、pp.174-175

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.eng.u-hyogo.ac.jp/msc/msc1/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

中村 光伸 (NAKAMURA, Mitsunobu)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：50285342

(2)連携研究者

山名 一成 (YAMANA, Kazushige)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：70192408

高田 忠雄 (TAKADA, Tadao)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：60511699