最近の研究から

環状 π 電子共役系・シクロフェナセンの合成と構造研究

科学技術振興機構 ERATO 中村活性炭素クラスタープロジェクト 松尾 豊

東京大学大学院理学系研究科化学専攻 中村栄一

Yutaka MATSUO and Eiichi NAKAMURA: Syntheses and Structural Studies of Cyclic π -Electron Conjugated System, Cyclophenacenes

This review article describes recent developments in the studies of hoop-shaped cyclic benzenoid, [10]cyclophenacene, derived from functionalization of [60] fullerene. The authors mainly discuss background, history, synthetic strategy, structure, and properties of such cyclic π -conjugates systems. Theoretical studies of structures and properties of finite-length armchair carbon nanotubes are also described.

1. 序

平面状多環芳香族分子は、主要な有機機能材料であり、電子デバイスへの応用研究が盛んに行われている。¹⁾ フラーレンやカーボンナノチューブは、豊かな機能をもつため、有機機能材料の中でも最近特に注目されている。機能の1つの例としては、小さな再配列エネルギーで多段階にわたり電子を受容する性質が挙げられる。新しい機能性多環芳香族分子として、ほかの一連の多環ベンゼノイドについても興味をもたれている (図1)。1つは、一次元ベンゼノイドを環状に巻いた、フープ型環状多環ベンゼノイド群である。^{2,4)} もう1つは、二次元ベンゼノイドを丸めて得られる、ボウル型多環ベンゼノイド群である。^{5,6)} ボウル型ベンゼノイドは、二次元のグラファイトネットワークと0次元のグラファイトネットワークと言えるフラーレンの両者の中間にあたる。さまざまなボウル型ベンゼノイドの合成は達成されているが、フープ型環状多環ベンゼノイドは合成されたことのない、未知の仮想分子であった。

図1 フープ型およびボウル型ベンゼノイド。(Hoop- and Bowl-shaped benzenoids.)

2. シクラセンとシクロフェナセン

2.1 2種類の分子ベルト

分子ベルトと言えるフープ型環状多環ベンゼノイドは、その π 電子共役系の共鳴構造、化学反応性、材料科学における潜在的な有用性に興味をもたれてきた。また、近年はこれがカーボンナノチューブの基本構造であることから、さまざまな分野で改めて大きな注目を集めていた。フープ型環状多環ベンゼノイドの骨格は、2種類の基本構造に分類される (図2)。すなわち、[n]シクラセンは、n個の直線状に連なったベンゼン環をもつ[n]アセンの端と端を丸めて繋いだ環状分子である。また、[n]シクロフェナセンは、n個のジグザグ状に連なったベンゼン環をもつ[n]フェナセンの端と端を丸めて繋いだ環状分子である。

2.2 理論化学的研究

1954年、Heilbronnerはシクラセンの存在とその構造を提案した。⁷⁾ その後、多くの理論化学的研究が行われた。HoukやKimらは、一連の[n]シクラセンの理論計算を

図2 [10]シクラセン、[10]シクロフェナセンおよびトラニユレン。([10]cyclacene, [10]cyclophenacene, and trannulene.)

行い,^{8),9)} シクラセンが2つの平行に位置したトラニユレン¹⁰⁾ からなる構造をもつことを提案した。トラニユレンは all-*trans*, all-*s-trans* 構造を有する環状の共役ポリエンである (図2)。また、環が大きくなるほど HOMO-LUMO ギャップが小さくなり、分子が不安定になると予測された。

[n] シクロフェナセンの理論解析は、相原により行われた。¹¹⁾ トポロジ的共鳴エネルギー (topological resonance energy : TRE)¹²⁾ (クリスタリット欄参照) の値からシクロフェナセンの安定性についての議論がなされ、シクロフェナセンは安定であると提案された。[10] シクロフェナセンの芳香族性はパーセント共鳴エネルギー (% TRE)¹³⁾ を用いて見積もられ、その値は 2.573 であった。[10] シクロフェナセンは、[60] フラーレン (% TRE = 1.795) よりも高い芳香族性を持ち、ベンゼン (% TRE = 3.528) よりも低い芳香族性をもつことがわかる。Türker も半経験的理論計算 (AM1 および ZINDO/S) によりシクロフェナセンの安定性や電子構造について調べ、 $n = 8$ または 10 となる中程度の大きさのシクロフェナセンが合成可能なのではないかと予測している。¹⁴⁾ 以上の理論化学的研究の結果から、シクラセンよりもシクロフェナセンのほうが合成のターゲットとして相応しいことがわかる。

2.3 合成の試み

Heilbronner の予測の後、フープ型環状多環ベンゼノイドの合成は過去 50 年間何度か試みられた。平らな芳香族

分子を前駆体として用いて丸めて合成することは、歪みエネルギーに打ち勝たねばならないため、困難であると予想できる。合成化学者は、まず部分的に共役した環状分子を合成した後、芳香族化を行うというアプローチを選んだ。Stoddart は、ビスジエンとビスジエノフィルを用いた多段階 Diels-Alder 反応を経由する、[12] および [14] シクラセンの合成を検討した (図 3a)。¹⁵⁾ Schlüter もビスジエンとジキノンの Diels-Alder 反応を経る、[8] シクラセンの合成を検討した (図 3b)。¹⁶⁾ 両方の例において、環状前駆体の芳香族化がうまくいかず、目的とするシクラセンの合成は達成されなかった。

シクロフェナセンの合成の試みについても報告されている。桑谷、伊与田らは、[10] シクロフェナセンの前駆体としてペンタベンゾ [20] アヌレンの合成を報告した (図 3c)。¹⁷⁾ 前駆体からシクロフェナセンへ至る光環化反応の段階において、*Z*-オレフィンから *E*-オレフィンへの異性化が起こり、望ましくない渡環反応が進行したため、望みの光環化体は得られなかった。Scott も [12] シクロフェナセンの合成をフラッシュ・バキューム・パイロリシス (FVP) と呼ばれる、化合物を石英管に封じて真空中瞬間的に 1000 °C 前後の高温をかけて熱分解を行うという特殊な手法を用いて検討したが、成功しなかった。

3. π 電子共役系の縮小

フラーレンの 60π 電子共役系の選択的な縮小は、新たな π 電子共役系を得るための新しいアプローチである。例え

図3 フープ型環状ベンゼノイドの合成の試み。(Attempted syntheses of hoop-shaped cyclic benzenoids.) (a) Stoddart らの試み。(b) Schlüter らの試み。(c) 桑谷、伊与田らの試み。

図4 フラーレン骨格上に構築されたさまざまな π 電子共役系。(Various π -electron conjugated systems constructed on [60] fullerene skeleton.) (a) 臭素化フラーレン $C_{60}Br_6$. (b-d) 14, 13 および 18 員環開口部をもつ穴あきフラーレン。(e-g) $C_{60}[C(CH_3)(COOBu)_2]_6$, $C_{60}F_{15}[CBr(COOEt)_2]_3$ および $C_{60}Cl_{30}$ の結晶構造とシュレーゲルダイアグラム。

ば、フラーレンの化学修飾により、新しい曲面芳香族系が得られている(図4)。ボウル型の50π電子共役系は、[60]フラーレンに対する有機銅試薬の位置選択的な五重付加反応によって得られる。¹⁸⁾ [60]フラーレンの1つの5員環の1つ隣の炭素原子に選択的に付加反応が進行する。また、位置選択的なハロゲン化によっても、ボウル型の50π電子共役系が得られている(図4a)。¹⁹⁾ 穴あきフラーレンは、一連の新しいボウル型π電子共役系を提供している(図4b-d)。²⁰⁾⁻²²⁾

トランユレンも[60]フラーレンのπ電子共役系の縮小によって得られている。[60]フラーレンのヘキサアニオン C_{60}^{6-} に2-ブロモマロン酸エステルを反応させると、ヘキサダクト $C_{60}[C(CH_3)(COO^tBu)_2]_6$ が得られる(図4e)。²³⁾ この官能基化フラーレンはトランユレン構造を有し、狭いHOMO-LUMOギャップに由来して、近赤外領域での光の吸収($\lambda_{max} = 760\text{ nm}, 850\text{ nm}$)が見られる。フッ素化フラーレン $C_{60}F_{15}$ に対するマロン酸エステルの付加反応においては、エメラルドグリーン色($\lambda_{max} = 658\text{ nm}$)の化合物として、トランユレン構造を有する $C_{60}F_{15}[CBr(COOEt)_2]_3$ が得られる(図4f)。²⁴⁾ トランユレンのπ電子共役系は、 $SbCl_5$ を用いた[60]フラーレンに30個の塩素原子を付加させる反応によっても得られる。²⁵⁾ $C_{60}Cl_{30}$ のX線結晶構造解析により、トランユレン部位において単結合・二重結合の結合交替の度合いが小さいこと(1.381 Å, 1.391 Å)が明らかとなった。これは理論計算により予測されていたとおりであった。

4. [10]シクロフェナセンの合成と構造

4.1 合成戦略

筆者らは、[60]フラーレンの赤道部位に元から存在する環状π電子共役系に着目し、北極および南極部位のπ電子共役系を付加反応により取り除くことによって、フープ型の環状π電子共役系シクロフェナセンを得るという戦略を立てた(図5)。^{26),27)} このアプローチは、五重付加反応によりラジアレ型π電子共役系を取り除いて50π電子共役系を得る反応を、2回適用することから成り立っている。すなわち、2回目の五重付加反応を50π電子共役系の底部に対して行い、望みの環状40π電子共役系を得ようとするものである。環状π電子共役系を拡張して組み立てていくのではなく、元からあるπ電子共役系を縮小して

図5 [10]シクロフェナセンの合成戦略。(Strategy for the synthesis of [10]cyclophenacenes)

欲しいところだけ残すという、逆転の発想である。

4.2 [10]シクロフェナセンの合成

五重付加型[60]フラーレンに対し、有機銅試薬を作用させることにより、十重付加型[60]フラーレン $C_{60}Me_5Ph_5H_2$ を得た(図6)。さらに、上下2カ所のシクロペンタジエン部位を酸化してシクロペンタジエンの二重結合をエポキシドへ、水素原子を水酸基へ変換し、π電子共役系を赤道部位にのみ残した $C_{60}Me_5Ph_5O_5H_2$ を得た。

十重付加型[60]フラーレンは2つのシクロペンタジエン部位をもつ。上下2カ所に鉄原子を導入し、二核金属錯体 $Fe_2(C_{60}Me_{10})Cp_2$, $Fe_2(C_{60}Me_5Ph_5)Cp_2$ などを得た(図7)。²⁸⁾ 筆者らは、これらの二核金属-フラーレン錯体のことをダブルデッカーバッキーフェロセン(二階建てバッキ

図6 フープ型およびボウル型π電子共役系の合成。(Hoop- and bowl-shaped π-electron conjugated systems.) 中段左から、シクロフェナセン、ジベンゾ縮合コラニユレン、フェニレン架橋ジベンゾ縮合コラニユレン。

図7 二核金属-十重付加型[60]フラーレン錯体。(dimetal-deca (organo) fullerene complexes.) (a) 二核金属錯体の合成。(b) ダブルデッカーバッキーフェロセンの結晶構造。

図8 シクロフェナセン $C_{60}Me_5Ph_5O_5H_2$ の結晶構造. (Crystal structure of cyclophenacene, $C_{60}Me_5Ph_5O_5H_2$.) (a) ORTEP 図. (b) CPK モデル (上から見た図). (c) CPK モデル (横から見た図).

ーフエロセン)と呼んでいる。 $Fe_2(C_{60}Me_{10})Cp_2$ は、アームチェア型のカーボンナノチューブと同じ D_{5d} 対称性を有している。結晶構造解析の途上、構造が現れた瞬間、その美しい姿にしばし見とれてしまったことは忘れられない。これら二核錯体は酸化側に2電子、還元側に2電子、合計4電子の多段階の可逆なレドックスを示す。 $Fe_2(C_{60}Me_{10})Cp_2$ では上下の鉄原子は等価な環境にあるが、ベンゾニトリル中での酸化において、両者の酸化電位には110 mVの差がみられた。このことは、2つの鉄原子はシクロフェナセンを介して互いに電子的に相互作用を及ぼし合っていることを示し、2つの金属を端子とする単分子デバイスの観点から興味深い。

4.3 [10] シクロフェナセンの構造と性質

$C_{60}Me_5Ph_5O_5H_2$ のX線結晶構造解析(図8)は、初めてシクロフェナセンの構造に関する実験値を与えた。その構造を詳細に調べることで、フープ型 π 電子共役系における単結合と二重結合の結合交替の度合い(1.37~1.44 Å)は、元の[60]フラーレン(1.36 vs. 1.47 Å)よりも減少していることがわかった。このことは、フラーレンのベルト部位の π 電子共役の度合いが強まったことを意味し、シクロフェナセンが芳香族性をもつ分子であることを示唆している。この事実は、10個の有機基の付加により、歪みのかかった10個の sp^2 炭素原子がより歪みの少ない sp^3 炭素原子に変換され、フラーレンの球状の歪みから解放されたためだと考えれば説明がつく。実際、フープ型 π 電子共役系は、臭素の付加などの酸化反応を受け付けず、化学的に安定であった。また、電気化学測定を行い、フープ型 π 電子共役系は可逆な2電子還元を受けることを明らかにした。ここで 40π 電子系から 42π 電子系へ変換されるが、 $4n+2$ 則で知られるヒュッケル則はフープ型 π 電子共役系などの非平面共役系には適用できない。フープ型 π 電子共役系の理解には、空のd軌道を考慮に入れた比較的

高いレベルの基底関数を用いた量子化学計算が必要である。メチル基やフェニル基などの付加基を水素原子に置き換えたモデル化合物 $C_{60}H_{12}$ について、B3LYP/6-31G*レベルの量子化学計算を行った。実験値として得られた構造をよく再現し、ここでも[60]フラーレンに比べて結合交替の度合いが減少している事実が明らかとなった。

環状共役系シクロフェナセンの研究において、構造解析は重要な役割を果たした。構造が決定されることにより、合成の研究が推進された。さらには分子の機能の理解、機能設計において、構造解析は不可欠であった。十重付加型[60]フラーレンなど官能基化フラーレンの結晶構造解析においては、フラーレン誘導体がつま曲面形状に由来する結晶性の問題、大きな π 電子共役系に由来する凝集の問題、溶解度の問題、分子充填のミスマッチによる結晶溶媒の問題、ディスオーダーの問題、などの多数の困難を乗り越えなければならぬが、それを越えてあまりある魅力的な分子構造と決定的な成果を得ることができる。

5. 縮合コラニユレンの合成

ボウル型の π 電子共役系は、平面型の π 電子共役系と球型の π 電子共役系を繋ぐリンクとして注目され、その性質に興味をもたれてきた。しかし、歪みのかかった大きな π 電子共役系を構築するためには、多段階にわたる手間のかかる合成や、フラッシュ・バキューム・パイロリシスを用いた合成が必要であった。

筆者らは、非常に簡便な合成法で、ボウル型の π 電子共役系である縮合コラニユレン類(コラニユレン: 1つの5員環の周りに5つのベンゼン環をもつボウル型分子)を得ることに成功した(図6)²⁷⁾すなわち、五重付加型[60]フラーレンに対し有機銅試薬を作用させることにより、十重付加型[60]フラーレンであるシクロフェナセンとともに、その位置異性体であるジベンゾ縮合コラニユレンおよび八重付加型[60]フラーレンであるフェニレン架橋ジベンゾ縮合コラニユレンを得た。

6. シクロフェナセンと縮合コラニユレンの発光特性

シクロフェナセン、ジベンゾ縮合コラニユレン、フェニレン架橋ジベンゾ縮合コラニユレンは、シクロヘキサン溶液中、365 nmの紫外線照射下、それぞれ、黄色、青色、赤色に発光することを明らかにした。発光極大波長と発光量子収率は、それぞれ、560 nm($\Phi = 0.10$)、460 nm($\Phi = 0.028$)、649 nm($\Phi = 0.012$)であった。この発光量子収率は、これまで知られていたフラーレンおよびフラーレン誘導体の中で、最高の値である。フラーレン類の発光は大変弱いことが知られ、発光量子収率は、[60]フラーレンにおいて $\Phi = 0.00032$ 、[60]フラーレンのモノ付加体において $\Phi = 0.0006 \sim 0.0012$ であり、これまでの最高値は、[60]フラーレンのヘキサ付加体における $\Phi = 0.024$ であった。²⁹⁾

現在, さらに π 電子共役系の最適化を行うことにより, 量子収率をさらに3倍程度向上させることに成功している. また, シクロフェナセン, 縮合コラニユレン類を用いて, エレクトロルミネッセンス (EL) 素子の構築にも成功した.

7. 有限長カーボンナノチューブの構造や性質の3回周期性

カーボンナノチューブは, 量子細線やトランジスタなどへ応用されることが期待され, 未来の材料の最有力候補の1つである. カーボンナノチューブの物性のしくみを本質的に理解するために, 理論研究においては, 無限の長さをもつカーボンナノチューブを研究対象とするだけでなく, 有限の長さをもつカーボンナノチューブの構造や性質を解明しなければならない. 特に, 物性の理解の基となる構造に関するパラメータを0.02 Å程度の分解能で詳細に明らかにする必要がある. これまでに, 原子レベルの分解能をもつSTM観察や理論計算から, カーボンナノチューブの構造に関するおおまかな情報が得られているが, 分解能に限界があったり, 比較となる実験値が存在しない状況での理論計算の困難さのため, その構造は十分詳細に理解されたとはいえなかった. さらに, 有限の長さをもつカーボンナノチューブについては, その構造に関する知見はほとんど得られておらず, 理論計算による有限長カーボンナノチューブの物性の予測もグラファイトと同じ結合長を用いて計算されていた.

シクロフェナセンの結晶構造の実験値を基に, 量子化学計算により有限長アームチェア型単層カーボンナノチューブの構造と電子状態を調べた (図9).³⁰⁾ 最短のカーボンナノチューブ構造であるシクロフェナセン $C_{40}H_{20}$ に1列ずつ炭素原子を加えた $C_{50}H_{20}$, $C_{60}H_{20}$, $C_{70}H_{20}$, $C_{80}H_{20}$, $C_{90}H_{20}$ などについて理論計算を行った. 構造最適化計算はB3LYP/6-31G*レベルで, 芳香族性を求めるNICS計算はHF/6-31G*レベルで行った. その結果, カーボンナノチューブの構造や芳香族性が, チューブの長さに依存して3回周期で変化することがわかった. $C_{40}H_{20}$ では, フラーレン骨格をもつシクロフェナセン $C_{60}H_{12}$ (4.3節) とほぼ同じような, 結合交替の度合いが減少したケクレ構造が見られた. $C_{50}H_{20}$ においては, チューブの両端に二重結合, 中心部にクラー構造 (ベンゼンのように6員環の6つの炭素-炭素結合の長さが同じになる構造) が見られた. 筆者らはこの構造を不完全クラー構造と名付けた. $C_{60}H_{20}$ では, チューブの両端にもクラー構造が現れた. これを完全クラー構造と名付けた. $C_{70}H_{20}$, $C_{80}H_{20}$, $C_{90}H_{20}$ においては, ケクレ構造, 不完全クラー構造, 完全クラー構造が再び順に現れた. この3回周期性は $C_{90}H_{20}$ 以降 $C_{200}H_{20}$ まで, 同様に現れることを確認した. また, 芳香族性のパターンも3回周期をもって変化した. 以上のことは, カーボンナノチューブの反応性がその長さに依存して3回周期で変化するこ

日本結晶学会誌 第48巻 第4号(2006)

図9 カーボンナノチューブの構造と性質の3回周期性. (Three-cycle periodicity in structure and property of the carbon nanotubes.) (a) $C_{40}H_{20}$, ケクレ型. (b) $C_{50}H_{20}$, 不完全クラー型. (c) $C_{60}H_{20}$, 完全クラー型. (d) $C_{70}H_{20}$, ケクレ型. (e) $C_{80}H_{20}$, 不完全クラー型. (f) $C_{90}H_{20}$, 完全クラー型. 濃い灰色の部分は芳香族性, 薄い灰色の部分は非芳香族性であることを示す.

とを示しており, ナノチューブの化学修飾に向けた有用な知見を提供している.

8. おわりに

フラーレンの共役系を縮小することによって得られるシクロフェナセンは, 過去半世紀にわたって合成が待たれてきた環状 π 電子共役系である. ポリアセンなどのリボン型非環状ベンゼノイドが有機電子材料として有望視されているなか, 新しい様式の π 電子共役系であるシクロフェナセンは機能設計に新局面を拓くものと期待できる. π 電子共役系が環状に繋がることで, 分子全体を巡る環電流の誘起など, リボン型の π 電子共役系では実現し得ないことが可能になると考えられる. シクロフェナセンの機能を開拓するうえで, 今後, 結晶・液晶・単分子膜中における配列・配向制御が鍵を握る.³¹⁾⁻³³⁾ シクロフェナセンの上下に2つの金属を配した十重付加型 [60] フラーレンの二核金属錯体は, 分子レベルでシクロフェナセンに大きな摂動を与えることができる有望な化合物群である. また, カーボンナノチューブの最小単位構造であるシクロフェナセンの構造を解明したことで, カーボンナノチューブの化学や物理, さらに応用研究へ波及する影響は大きいと考えられる.

文 献

- 1) M. Müller, C. Kübel and K. Müllen: *Chem. Eur. J.* **4**, 2099 (1998).
- 2) L. T. Scott: *Angew. Chem. Int. Ed.* **42**, 4133 (2003).
- 3) M. Randić: *Chem. Rev.* **103**, 3449 (2003).
- 4) R. Hoffmann: *Int. J. Phil. Chem.* **9**, 7 (2003).

- 5) A. Sygula and P. W. Rabideau: *J. Am. Chem. Soc.* **122**, 6323 (2000).
- 6) M. M. Boorum, Y. V. Vasil'ev, T. Drewello and L. T. Scott: *Science* **294**, 828 (2001).
- 7) E. Heilbronner: *Helv. Chim. Acta* **37**, 921 (1954).
- 8) H. S. Choi and K. S. Kim: *Angew. Chem. Int. Ed.* **38**, 2256 (1999).
- 9) K. N. Houk, P. S. Lee and M. Nendel: *J. Org. Chem.* **66**, 5517 (2001).
- 10) A. B. McEwen and P. v. R. Schleyer: *J. Org. Chem.* **51**, 4357 (1986).
- 11) J. Aihara: *J. Am. Chem. Soc.* **98**, 2750 (1974).
- 12) J. Aihara: *J. Chem. Soc., Perkin Trans.* **2**, 971 (1994).
- 13) J. Aihara: *J. Am. Chem. Soc.* **114**, 865 (1992).
- 14) L. Türker: *J. Mol. Struct. (Theochem)* **491**, 275 (1999).
- 15) P. R. Ashton, G. R. Brown, N. S. Isaacs, D. Giuffrida, F. H. Kohnke, J. R. Mathias, A. M. Z. Slawin, D. R. Smith, J. F. Stoddart and D. J. Williams: *J. Am. Chem. Soc.* **114**, 6330 (1992).
- 16) A. Godt, V. Enkelmann and A. D. Schlüter: *Angew. Chem. Int. Ed.* **28**, 1680 (1989).
- 17) Y. Kuwatani, T. Yoshida, A. Kusaka and M. Iyoda: *Tetrahedron Lett.* **41**, 359 (2000).
- 18) M. Sawamura, H. Iikura and E. Nakamura: *J. Am. Chem. Soc.* **118**, 12850 (1996).
- 19) P. J. Krusic, E. Wassermann, P. N. Keizer, J. M. Morton and K. F. Preston: *Science* **254**, 1183 (1991).
- 20) Y. Rubin: *Chem. Eur. J.* **3**, 1009 (1997).
- 21) Y. Murata, M. Murata and K. Komatsu: *Chem. Eur. J.* **9**, 1600 (2003).
- 22) S. -i. Iwamatsu, T. Uozaki, K. Kobayashi, S. Re, S. Nagase and S. Murata: *J. Am. Chem. Soc.* **126**, 2669 (2004).
- 23) T. Cantenewala, P. A. Padmawar and L. Y. Chiang: *J. Am. Chem. Soc.* **127**, 26 (2005).
- 24) G. A. Burley, P. W. Fowler, A. Soncini, J. P. B. Sandall and R. Taylor: *Chem. Commun.* 3042 (2003).
- 25) P. A. Troshin, R. N. Lyubovskaya, I. N. Ioffe, N. B. Shustova, E. Kemnitz and S. I. Troyanov: *Angew. Chem. Int. Ed.* **44**, 234 (2005).
- 26) E. Nakamura, K. Tahara, Y. Matsuo and M. Sawamura: *J. Am. Chem. Soc.* **125**, 2834 (2003).
- 27) Y. Matsuo, K. Tahara, M. Sawamura and E. Nakamura: *J. Am. Chem. Soc.* **126**, 8725 (2004).
- 28) Y. Matsuo, K. Tahara and E. Nakamura: *J. Am. Chem. Soc.* **128**, 7154 (2006).

- 29) G. Schick, M. Levitus, L. Kvetko, B. A. Johnson, I. Lamparth, R. Lunkwitz, B. Ma, S. I. Khan, M. A. Garcia-Garibay and Y. Rubin: *J. Am. Chem. Soc.* **121**, 3246 (1999).
- 30) Y. Matsuo, K. Tahara and E. Nakamura: *Org. Lett.* **5**, 3181 (2003).
- 31) M. Sawamura, K. Kawai, Y. Matsuo, K. Kanie, T. Kato and E. Nakamura: *Nature* **419**, 702 (2002).
- 32) S. Okada, R. Arita, Y. Matsuo, E. Nakamura, A. Oshiyama and H. Aoki: *Chem. Phys. Lett.* **399**, 157 (2004).
- 33) Y. Matsuo, A. Muramatsu, R. Hamasaki, N. Mizoshita, T. Kato and E. Nakamura: *J. Am. Chem. Soc.* **126**, 432 (2004).

プロフィール

松尾 豊 Yutaka MATSUO

科学技術振興機構 ERATO 中村活性炭素クラスタープロジェクト

Nakamura Functional Carbon Cluster Project, ERATO, Japan Science and Technology Agency

〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学理学部 4 号館

4th build. School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

e-mail: matsuo@chem.s.u-tokyo.ac.jp

最終学歴：大阪大学大学院基礎工学研究科 博士 (理学)

専門分野：有機金属化学, 炭素クラスター科学
現在の研究テーマ：フラーレン金属錯体の合成・材料科学

趣味：グライダー

中村栄一 Eiichi NAKAMURA

東京大学大学院理学系研究科 化学専攻

Department of Chemistry, The University of Tokyo
〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

e-mail: nakamura@chem.s.u-tokyo.ac.jp

最終学歴：東京工業大学大学院理工学研究科 理学博士

専門分野：有機金属化学, 物理有機化学

現在の研究テーマ：有機合成化学, 活性炭素クラスターの材料科学および生命科学

趣味：音楽演奏