有機系吸着分子の電子・イオン誘起反応

正 員 持地 広造*

Electron and Ion-Induced Reactions of Organic Molecules Adsorbed on the Surfaces

Kozo Mochiji*, Member

The studies on the chemical reactions of organic molecules induced by low-energy electrons and gas cluster ions are reviewed. The author's group has developed the in-situ observation technique for electron-irradiated surfaces. The technique employs a scanning tunneling microscope as a field-emitted electron source, as well as a probe for surface analysis. By using the technique, we have investigated the effect of low-energy-electron irradiations to adsorbed molecules, such as ethylene and DNA. Desorption, dissociation of the molecules and changes to other chemical species, were observed, depending on electron energy and electron dosage. When a gas cluster ion, consisting of thousands of atoms or molecules, collides with a solid surface, several types of reactions are uniquely induced at the surface. The average kinetic energy of a constituent atom of the cluster can be defined by dividing the acceleration energy by the number of constituent atoms. Thus, very low-energy-ion irradiation is easily achieved by using large cluster ions. DNA adsorbed graphite surfaces were irradiated with argon(Ar) gas cluster ions. The secondary ion yield and the structural changes of the surfaces were investigated. These results are compared with the case by the irradiation with monomer ions (Ar^+) and are discussed from the view point of the kinetic energy of a constituent atom of the cluster ion.

キーワード：電子，ガスクラスターイオン，有機分子，エチレン，グラファイト，DNA，走査トンネル顕微鏡

Keywords : electron, gas cluster ion, organic molecule, ethylene, graphite, DNA, STM

1. はじめに

電子，イオン，光などのビーム利用技術は半導体微細加工への応用をきっかけとして著しい進歩を遂げてきた。その加工サイズはマイクロメートルからナノメートル，そして原子オーダーへと近づきつつある。一方でこれらのビーム利用技術は半導体分野以外にバイオ工学や医療などにも活発に利用されるようになってきている。これらの分野ではさまざまな有機分子や高分子，あるいはこれらの有機系物質と無機・金属などとの複合材料が対象となる。無機物質や金属材料のビーム誘起反応に関する報告はこれまで多くなされているが，有機系物質に関する研究報告は少ない^{(1)~(3)}。とくに，低エネルギーの電子やイオンの照射効果については極めて少ない。著者らは，2，3 の有機分子をモデルとして低エネルギーの電子あるいはイオンの照射効果を検討してきたので報告する。

2. 低エネルギー電子照射効果

〈2・1〉 電子照射「その場」観察方法 現在，微細な

電子線やSTM (Scanning Tunneling Microscope, 走査トンネル顕微鏡) を利用して表面を原子・分子レベルで操作する研究が活発化している。一般に電子線やSTMによって生じる反応では，数10 eV以下の低エネルギー電子(トンネル電流を含む)と吸着分子との相互作用が重要な鍵を握っている。しかし，これまでいくつかの原子や分子の操作例が報告されているが⁽⁴⁾，低エネルギー電子線照射による吸着分子の反応機構を基礎的な立場から検討した例は少ない。

我々はこれまで，STM探針からの電界放射電子を照射ビーム源として利用する方法を独自に開発してきた(図1)⁽⁵⁾。この方法の特長は，(1) 数10 eV以下の電子が一般の電子銃より4~5桁高い照射密度で得られる，(2) 電子源であるSTM探針をそのままプローブに使う事により，電子ビーム照射前後の構造変化を原子レベルで比較できる，(3) 電子ビームサイズを10nm以下にできるので，吸着量を抑える事によって単一分子への照射効果を調べる事が可能，等である。また，この手法は，試料を探針に近づけて(<1nm)トンネル電流で行う原子マニピュレーションと比べると，探針の先鋭度に左右されにくい為，再現性及び安定性が高いという利点がある。

この観察方法をSi(100)表面に吸着させたエチレン分子やHOPG (Highly Oriented Pyrolytic Graphite, 高配向性熱分解グ

* 兵庫県立大学大学院 工学研究科
〒671-2280 兵庫県姫路市書写 2167
Graduate School of Engineering, University of Hyogo
2167 Shosha, Himeji, Hyogo 671-2280

図 1 電子線照射その場観察方法

Fig. 1. The in-situ observation system for electron-irradiated surfaces.

ラファイト) 表面に吸着させた DNA 分子に適用し、電子線照射による吸着分子の構造変化を検討してきた⁽⁶⁾。

〈2・2〉 吸着エチレンへの電子照射効果 エチレン分子(C_2H_4)は不飽和炭化水素の中で最も基本的な分子であり、Si(100)表面への吸着状態について 2, 3 の報告がある。この吸着状態に含まれる結合の種類は、C-Si, C-H, C-C, Si-Si の四種類のみである。電子照射によって、どの結合が切断されるか、あるいはどのような結合の組み替えが起こるのかを解明できれば、より複雑な分子(例えば DNA 等の生体高分子)の反応を解明する手掛かりとなる。

本研究では 1200℃ 付近の加熱処理によって酸化膜などを除去して形成した Si(100)-2x1 表面にエチレンガスを曝露させて吸着表面を作成した。エチレン分子は自身の二重結合を開裂し、同じく開裂された Si(100)-2x1 表面の Si ダイマーの π 結合と 2 本の σ 結合を新たに形成するものと解釈されている(図 2)⁽⁷⁾。

エチレン吸着表面の STM 像を図 3(a)に示す。エチレン吸着位置は清浄なダイマーと比べて少し暗く、やや細い形状をしている(矢印部)。この表面に電子(エネルギー: 50eV, 照射量: 50nA・s)を照射した後の STM 像を図 3(b)に示す。

照射後の表面では、大半の吸着エチレンは消滅しているが、照射前には存在しない、大きさが 1 ダイマー程度でほぼ円形の明るい点(小点)と、大きさが 2 ダイマー程度でほぼ円形の明るい点(大点)が現れている。消滅した吸着エチレンは、電子線照射によって脱離したものと考えられる。これらの結果より、電子線照射による吸着エチレンの反応には、脱離反応と小点への変化の大きく 2 通りの経路があることが判明した。ここで、小点は電子線照射量が低いときのみ観察され、2mA・s 程度まで増やした表面では存在が認められなかった。したがって、電子線照射によりエチレン吸着部はまず小点に変化するが、これは不安定であり別の構造をもつ大点に変化し易いものと解釈される。いったん生成された大点の多くは、その後の電子照射によって形状が変化しにくいという特徴が認められた。このことは、電子照射によって、エチレン吸着状態が最終的に

図 2 エチレンの Si(100)への吸着モデル

Fig. 2. The model of adsorption of ethylene to Si(100).

図 3 エチレン吸着 Si(100)への電子線照射

Fig. 3. Electron-irradiation to ethylene-chemisorbed Si(100) surface.

は電子照射に対して安定な状態に変化していることを示すものである。

以上の結果を次の様に考察した。電子照射により、エチレン分子内の 4 つの C-H 結合が切断されれば水素原子が脱離し、4 本の破断結合が残る。破断結合は STM で明るく観察される可能性が高いので、上記の小明点は、この水素が脱離した状態のエチレン(以下、脱水素エチレン)である可能性が高い。我々の研究グループにおいて、電子照射時の脱離イオンを飛行時間法(TOF)により計測した結果、水素イオン(H^+)が検出されている。この結果は、上記の解釈を裏付けるものである。

破断結合を含んだ脱水素エチレンは反応性が高く、隣接するダイマーにエチレンが吸着している場合には、互いに反応(重合)してシクロブタン(C_4H_4)を形成する事が可能である(図 4)。ここで、電子照射によっていったん脱離したエチレンが、脱水素エチレンの近傍に再吸着する事も十分考えられる。このシクロブタンは、4 本の C-Si 結合で Si に吸着しているため電子照射に対して安定であると考えられる。気相中のエチレンは、放射線照射によって重合反応を起こす事はよく知られている。本研究で取り上げた反応は、吸着状態における重合反応とみなすことができる。

〈2・3〉 吸着 DNA 分子への電子照射効果 現在、癌治療の分野において高エネルギーの放射線や粒子線の照射を利用した方法が行われている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。放射線や粒子線の照射効果には、DNA を電離して直接分子を切断する過程(直接効果)及び、周辺の原子(水など)を電離し、これらが化学的に DNA を切断する過程(間接効果)がある。いずれの過

図4 脱水素エチレンとエチレンの反応過程

Fig. 4. Reaction process between dehydrogenated ethylene and ethylene.

程でも電離作用によって大量の二次電子が発生する。これらの大半は20eV以下の低エネルギーであり、これまでDNA切断には影響を与えないと考えられてきた。しかし2000年頃より、このような低エネルギーの二次電子も重要な影響を与えうると報告がなされるようになってきた⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。これらの事例として、20eV以下のエネルギーの電子照射によりDNA分子の切断が起こることや、5eV以下の電子照射によってDNAの塩基が破壊されることなどが報告されている⁽¹²⁾⁽¹³⁾。しかし現状では低エネルギー電子照射効果に関する報告は数もまだ少なく、照射効果の機構には多くの不明な点が残されている。

本研究では、低エネルギー電子照射効果の機構解明の第一歩として、低エネルギー電子を照射した場合のDNA分子の形状変化を直接観察することを目的とした。これまでに電子照射によるDNA分子の形状変化を観察した例は報告されていない。著者らは、グラファイトに付着させたDNA分子にSTM探針からの電界放射電子を照射し、照射前後の分子形状の変化をSTMで解析し検討してきた。

DNA試料として環状型のプラスミドDNA (2686塩基対)を使用した。緩衝剤等を含んだDNA水溶液をグラファイト基板上に滴下して、流水と窒素ガスによって溶媒を洗い流して乾燥させた。グラファイトに付着させたDNA試料のSTM像の一例を図5に示す。環状DNAはネットワーク状に観察され、ネットワークを構成するDNA部分の幅は明らかにDNA1分子の幅(約2nm)より大きい。これは複数の環状DNA分子が部分的に凝集しているか、あるいは同一の分子内で分子鎖が捩れて接触しているためと考えられる。

付着状態にあるDNAに何種類かのエネルギーの電子を照射し、照射前後のSTM像を比較した結果を図6および図7に示す。8eVあるいは13eVのエネルギーの電子照射では、DNA領域の増加が観察された(図6(a)→(b))。しかし、この増加現象はある程度の電子照射量で飽和する傾向にあった(図6(b)→(c))。一方、18eVでは逆にDNA領域の周辺が消失する現象が観察された(図7(a)→(b))。この消失現象もある程度の電子照射量で飽和する傾向が見られた(図7(b)→(c))。さらに38eVでは、増加と消失との両方が起こっていた。以上の結果は、照射電子のエネルギーによってDNA分子が異なるタイプの化学反応を起こしていることを示唆するものである。

図5 グラファイトに付着したプラスミドDNAのSTM像

Fig. 5. STM image of plasmid DNA on graphite.

図6 8 eV 電子の照射前後におけるDNAのSTM像

Fig. 6. STM images of DNA before and after irradiation With 8 eV electrons.

図7 18 eV 電子の照射前後におけるDNAのSTM像

Fig. 7. STM images of DNA before and after irradiation with 18 eV electrons.

Sancheらは、薄膜状態のプラスミドDNA分子の電子照射による主鎖切断の収率に対する電子エネルギー依存性を電気泳動法によって調べている⁽¹⁴⁾。彼らの報告によれば、DNA分子の主鎖切断には、一重鎖切断、二重鎖切断、多重鎖切断の3種類のタイプが存在する。ここで、一重鎖切断、二

重鎖切断とはDNA分子の一重鎖あるいは二重鎖が一箇所のみ切断された状態であり、多重鎖切断とは分子の二重鎖が2箇所以上切断されている状態、すなわち初期の環状分子の周長より短い線状形態になったものである。それぞれの切断反応は照射電子のエネルギーによって共鳴的(resonantly)、あるいは非共鳴的(nonresonantly)に起きると解析されている。共鳴反応とは、照射電子1個のエネルギーが全て吸収されて起きる反応であり、非共鳴反応とは、電子エネルギーの一部が吸収されて起きる反応である。それぞれの切断反応を起こし得る電子エネルギーの領域に関するSancheらの解析結果を表1にまとめる。DNA分子の切断反応は 10^4 個の電子照射あたり1回程度のオーダーで起きると報告されている。15eV以下の領域で共鳴的に起きる一重鎖および二重鎖の切断については次のように解釈されている。これらの低エネルギー電子はDNA分子に付着し、いったん負の分子イオン状態を形成する。しかし、これらは不安定で寿命が短いため、より安定な負イオンと中性の化学種に解離する(解離性電子付着反応)。この解離反応によってDNAの主鎖が切断されるというものである。彼らは電子照射時に脱離する負イオンを計測し、負イオン収率と主鎖切断収率の電子エネルギー依存性がよく対応していることから上記の解釈の妥当性を主張している。

今回我々が観察したDNAの形状変化をSancheらの結果と比較することによりつぎのように考察することができる。

DNA分子の一重鎖あるいは二重鎖の1箇所が切断されると、ストレスの大きい二重鎖構造が部分的にほどかれて緩和された状態になる。8eVあるいは13eVの電子照射によってDNAの付着領域が増加して観察されたのはこの緩和効果によってDNA分子が拡張された状態がSTM分解能の制約で観察されたものと推定される。一方、電子エネルギー18eVの条件では多重鎖切断が共鳴的に起こり始めるのでDNAが分解し、これらのフラグメントが脱離することにより付着領域の消失が生じるものと解釈される。さらに38eVの照射条件ではすべてのタイプの切断反応が生じることによって付着領域の増加と消失が観察されたものと考えられる。

すでに述べたようにこのDNAの増加および消失現象はある程度の電子照射量で飽和する傾向にある。ここで、電子照射によってDNAが付着している領域の一部が消失する場合、その高さは増加することが判った。これは、DNA分子が分解反応とともに新たな反応を起こすことによって原子

構造の組み換えが生じ、高さ方向に増加したものと考えられる。一般に、放射線照射によって分解しやすい高分子物質でも、非常に多量の照射量を与えると架橋反応を起こすようになり、分解反応が抑えられる。DNA分子においても、高エネルギーの電子照射によって架橋がおこることが報告されている⁽¹⁵⁾。上にのべたDNA変化の飽和傾向も架橋反応によるものと考えられる。

3. ガスクラスターイオン照射効果

〈3・1〉 ガスクラスターイオン照射効果の特長 ガスクラスターイオンとは、多数の気体原子がファンデルワールス力などの分子間力によって集合したクラスターのイオンである。ガスクラスターイオンの照射効果の特長として、①イオンを構成する一原子あたりの平均の運動エネルギーは、加速エネルギーを構成原子数で割った値になる。例えば、1000個のアルゴン(Ar)原子で構成されるクラスターイオンを1kVで加速した場合、Ar原子1個あたりの運動エネルギーはたかだか1eVである。②極浅い表面層のみにクラスターの原子密度に相当する高密度のエネルギーが付与されるため入射イオン1個あたりのスパッタ収率が高い(図8)⁽¹⁶⁾。

〈3・2〉 ガスクラスターイオン照射装置 図9にガスクラスターイオン照射装置の構成を示す。クラスター生成部において、数気圧程度の試料ガスを0.1mm程度の微小口径ノズルを通して真空中に噴射させたとき、ガスの断熱膨張による冷却効果によってクラスターが生成する。この時のクラスターサイズは、原理的には、ガス圧力、ノズル径、ガスの温度、沸点、比熱によって決まる。現状ではサイズ10000以上のクラスターを生成することができる。これまでにArなどの不活性原子に加えて酸素(O₂)や六フッ化硫黄

図8 ガスクラスターイオン照射効果
Fig. 8. Effects of gas cluster ion irradiation.

図9 ガスクラスターイオン照射装置の構成
Fig. 9. Schematic of gas cluster ion irradiation apparatus.

表1 DNAの各種主鎖切断を起こす電子エネルギー
Table 1. Electron energies for DNA strand breaks⁽¹⁴⁾.

切断反応 \ 反応機構	共鳴	非共鳴
一重鎖切断	3-15 eV	>15 eV
二重鎖切断	6-15 eV	>15 eV
多重鎖切断	20-30 eV	>30 eV

(SF₆)などの分子のガスクラスターを生成している。上記の方法により生成されたクラスターを電子衝撃によってイオン化する。このイオン化段階ではクラスターイオンのサイズ（構成原子数）は分布を持っており、分布形状はクラスターの生成条件によって決まる。なかには、原料の原子あるいは分子のままのイオン（モノマーイオン）も存在する。イオン化部の後方に設置したマグネットの磁場の偏向作用により、モノマーイオンを除去したり、クラスターサイズを選別できるようにしている。

〈3・3〉 グラファイトおよび DNA への照射効果 Ar クラスターイオンを照射したグラファイト表面を走査トンネル顕微鏡(STM)で観察すると、図 10 に示すようなクレーター状の大きな照射痕が発生する。従来用いられていたモノマーイオンの照射ではこのようなクレーター状の照射痕は発生せず、照射痕のサイズも 1 桁以上小さい。これは、クラスターイオンを構成する多数の原子が同時に同じ場所に入射することになるのでこれらの衝突現象が干渉し合うことによって、モノマーイオンの衝突とは異なる照射効果を生じるためである。クラスターイオンの構成原子数（クラスターサイズ）を変えてこの照射痕の発生状況を調べた結果、照射痕発生にクラスターサイズのしきい値があることが判明した。上記のクラスターサイズのしきい値と加速エネルギー値から、照射痕の発生に必要な運動エネルギーはクラスターの構成原子 1 個あたり約 10eV であることが判った⁽¹⁷⁾。グラファイトにおいて、1 つの炭素原子は周囲の 3 個の炭素原子と結合している（層間結合は無視）こと、および炭素間の結合エネルギーが 1 本あたり 3.5eV 程度であることを考慮すると、上記の運動エネルギーのしきい値は 3 本の炭素原子間の結合を同時に切断されるために必要な値に近いことがわかる。この実験結果は重要な可能性を示唆する。すなわち、クラスターイオンの構成原子数を調整して 1 原子あたりの運動エネルギーを制御することによって、試料表面の化学結合を選択的に切断できるという可能性がある。

次に著者らは、DNA 分子を物理吸着させたグラファイト表面にガスクラスターイオンを照射して二次イオンの発生と表面の構造変化を調べた。図 11(a)は Ar ガスクラスターイオン（サイズ：1000～2000 付近に分布）および Ar モノマーイオンの照射によって試料表面から放出される二次イオンの飛行時間スペクトルを示す。イオンの加速電圧および照射量はどちらも 5kV および $3 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ である。ガスクラスターイオン照射の方がモノマーイオン照射の場合に比べて二次イオン強度が 1 桁以上大きく、その飛行時間も 1 桁以上長い。質量に換算すれば 2 桁以上重い成分が多く含まれていることがわかる。これは、ガスクラスターイオンの構成原子あたりの運動エネルギーが極めて低い(2.5～5eV)ことによって DNA 分子内の解離が抑えられているためと考えられる。図 11(b)(c) は、それぞれイオン照射した後の試料表面の STM 像である。ガスクラスターイオン照射の場合、DNA がスパッタ除去された表面にはイオン照射痕は観察さ

図 10 グラファイトの照射痕に及ぼすイオンエネルギーの影響

Fig. 10. The effect of ion energy on irradiation traces on graphite.

図 11 DNA を吸着させたグラファイトへのイオン照射効果

Fig. 11. Ion irradiation effects on DNA-adsorbed graphite.

れておらず無損傷なグラファイトの原子構造が確認される。これは、照射したクラスターイオンの構成原子 1 個あたりの運動エネルギーが DNA を脱離させるのには十分であるが、グラファイトに照射痕を発生させるには至らないためと解釈できる。一方、モノマーイオン照射の場合は、明点状の欠陥が発生している。以上の結果から、ガスクラスターイオンの一原子あたりの運動エネルギーを調整して照射することによって、分子の化学結合を選択的に切断したり、あるいは下地基盤の表面に損傷を与えることなく表面の吸着分子のみを脱離させることなどが可能になるものと期待される。

4. おわりに

STM を利用した低エネルギー電子照射による分子構造変化のその場観察、およびガスクラスターイオンを利用した極低エネルギーイオン照射効果について述べてきた。はじめにも述べたように、低エネルギー電子の DNA への影響は環境放射線やビーム医療などの観点からも極めて重要なテーマである。現状では試料の DNA が部分的に凝集状態にあるため単一分子の挙動を明らかにできていない。今後、試料調製の方法を検討することにより単一分子状態での照射効果を究明していく必要がある。ガスクラスターイオン利用では、クラスター構成原子あたりの運動エネルギーを制御することにより損傷の極めて少ない加工技術や計測技術が可能になるものと期待される。例えば、二次イオン質量

分析(SIMS)では有機分子などの試料を非破壊で分析するためにクラスターイオンが一次イオンとして利用されつつある。しかしこれまでに使用されているクラスターはC₆₀や金属クラスターなど小さなサイズのものに限られている。今後、巨大サイズのガスクラスターイオンを一次イオンに利用することができれば、たんぱく質など生体高分子のSIMS計測も可能になるかもしれない。

(平成 18 年 11 月 28 日受付)

文 献

- (1) E. S. Parilis, et al. : "Atomic collision on solid surfaces", North-Holland, (1993)
- (2) F. Aumayer and H. Winter, eds : "Photonic, electronic and atomic collisions", World Scientific (1997)
- (3) C. D. Lin, ed : "Review of fundamental processes and applications of atoms and ions", World Scientific (1993)
- (4) C. Bai : "Scanning tunneling microscopy and its applications", Springer Ser. Surf. Sci., Vol.32, Springer (2000)
- (5) K. Mochiji and M. Ichikawa : "Atomic structural changes of a Br-chemisorbed Si (111)-7x7 surface under 10-150 eV electron impact", Phys. Rev. B Vol.62, pp.2029-2033 (2000)
- (6) T. Hasegawa, K. Mochiji, H. Imai, and T. Mitamura : "Electron-induced modification of ethylene molecules chemisorbed on Si(100) surface", *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol.44, pp.3222-3225 (2005)
- (7) J. Yoshinobu, H. Tsuda, M. Onchi, and M. Nishijima : "The adsorbed states of ethylene on Si(100)c(4x2), Si(100)(2x1), and vicinal Si(100) 9°", *J. Chem. Phys.* Vol.87, pp.7332-7340 (1987)
- (8) 坂本澄彦 : 放射線生物学, 秀潤社 (1998)
- (9) A. Yokoya, S. M. T. Cuniffe, and P. O'Neill : "Effect of hydration on the induction of strand breaks and base lesions in plasmid DNA films by γ -radiation", *J. Am. Chem. Soc.*, Vol.124, pp.8859-8866 (2002)
- (10) B. Boudaiffa, P. Cloutier, D. Hunting, M. A. Huels, and L. Sanche : "Resonant formation of DNA strand breaks by low-energy (3 to 20 eV) electrons", *Science*, Vol.287, pp.1658-1660 (2000)
- (11) X. Pan, P. Cloutier, D. Hunting, and L. Sanche : "Dissociative electron attachment to DNA", *Phys. Rev. Lett.*, Vol.90, p.208102 (2003)
- (12) G. Hanel, B. Gstir, S. Denifl, P. Scheier, M. Probst, B. Farizon, M. Farizon, E. Illenberger, and T. D. Märk : "Electron attachment to uracil", *Phys. Rev. Lett.*, Vol.90, p.188104 (2003)
- (13) S. Denifl, S. Ptasinska, M. Cingel, S. Matejcik, P. Scheier, and T. D. Märk : "Electron attachment to the DNA bases thymine and cytosine", *Chem. Phys. Lett.*, Vol.377, pp.74-80 (2003)
- (14) M. A. Huels, B. Boudaiffa, P. Cloutier, D. Hunting, and L. Sanche : "Single, double, and multiple double strand breaks induced in DNA by 3-100 eV electrons", *J. Am. Chem. Soc.*, Vol.125, pp.4467-4477 (2003)
- (15) K. Washino and W. Schnabel : "Radiation-induced molecular sizechanges in DNA in the presence of p-nitroacetophenone. Pulse radiolysis in conjunction with light-scattering measurements", *Int. J. Relat. Biol.* Vol.41, pp.271-282 (1982)
- (16) I. Yamada, J. Matsuo, Z. Insepov, T. Aoki, T. Seki, and N. Toyoda : "Nano-processing with gas cluster ion beams", *Nucl. Instr. And Meth. In Phys. B* 164-165, pp.944-959 (2000)
- (17) S. Houzumi, K. Mochiji, N. Toyoda, and I. Yamada : "Scanning tunneling microscopy observation of graphite surfaces irradiated with size-selected Ar cluster ion beams", *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol.44, pp.6252-6254 (2005)

持 地 広 造

リーダー (兼務)。

(正員) 1950 年 4 月 30 日生。1975 年東北大学大学院理学研究科化学専攻修士課程修了。理学博士, 工学博士。1975 年日立製作所入社, 1988 年同社中央研究所主任研究員。1993-1994 年北海道大学客員助教授。1994-1997 年 JST さきがけ研究 21 (兼務)。2002 年姫路工業大学 (現, 兵庫県立大学) 大学院工学研究科教授。2006 年より JST 先端計測分析技術機器開発事業チーム