

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成26年 5月30日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360019

 研究課題名(和文) 電子ドーピングされたC₆₀への分子状水素吸着機構の解明
 ～新規な高効率水素吸蔵の実現～

 研究課題名(英文) Investigation of the mechanism of molecular hydrogen adsorption
 onto the electron-doped C₆₀ - to realize the novel and efficient hydrogen storage -

研究代表者

佐々木 正洋 (SASAKI, Masahiro)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号：80282333

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,900,000円、(間接経費) 4,770,000円

研究成果の概要(和文)：高効率実用水素吸蔵材料の実現をめざし、電子ドーピング(電子が添加)されたC₆₀等の有機半導体分子の幾何的形狀、電子状態、水素吸着・脱離過程を計測した。その結果、Cu(111)表面上に吸着することで電子ドーピングされたC₆₀分子層において、室温で水素が一部解離吸着し、150℃程度への昇温で脱離することを明らかにした。この材料が水素吸蔵材料として有望であることを示している。さらに、Ru(0001)表面に吸着したグラフェン、アルカリ金属添加芳香族半導体分子層でも水素吸蔵の可能性を検討した。

研究成果の概要(英文)：In order to develop highly efficient and practical hydrogen storage materials, we have investigated the geometrical and electronic structures as well as the hydrogen adsorption and desorption features of the electron-doped organic semiconductor molecules such as C₆₀. We find that hydrogen is adsorbed onto C₆₀/Cu(111) at room temperature apparently through a dissociation process and desorbed from it at about 150°C. It is proved that this material is promising for hydrogen storage. Further, we also examined alkali-deposited aromatic semiconductor monolayers and graphene adsorbed on metal surfaces as hydrogen storage materials.

研究分野：表面科学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 薄膜・表面界面物性

 キーワード：水素吸蔵、C₆₀、有機半導体分子、電子ドーピング、超音速ヘリウム原子線散乱、アルカリ金属、走査トンネル顕微鏡

1. 研究開始当初の背景

高度水素利用社会における水素インフラ整備に向けて、多岐に渡る水素貯蔵材料の研究が推進されている。現在検討されている水素吸蔵方式には、分子状水素を表面に吸着させる「物理吸着」の手法と、解離させた水素をバルクに吸蔵する「化学吸着」の手法の二種類がある。前者は水素の結合エネルギーが小さく(～10 meV)、吸着させるために極低温と高圧が必要である。後者は結合エネルギーが大きく(～数 eV)、放出に高温が必要となる。このため膨大な研究が行われているにもかかわらず、未だに実用可能で十分な量の水素を吸着・放出可能な吸蔵材料は実現されていない。

近年、水素吸着において、物理吸着と化学吸着の中間領域が注目されつつある。多くの理論研究により[1]、遷移金属やアルカリ金属等の異種元素を添加した炭素系ナノ材料では、分子状水素が数 100 meV 程度で結合することが示唆された。この相互作用の機構として、静電的なもの、電荷移動を伴うもの(Kubas 結合)が提案されているが十分な実験的検証は行われていない。この機構を利用することで室温付近での吸蔵・放出と実用レベルの水素吸蔵量が実現する可能性がある。

[1]例えば、Nano Lett. **8**, 13 (2008); **7**, 663 (2007); Phys. Rev. Lett. **94**, 155504 (2005); **94**, 175501 (2005); **96**, 016102 (2006); J. Am. Chem. Soc. **128**, 9741 (2006); **132**, 1654 (2010).

2. 研究の目的

最近、我々は金属基板上の有機低分子単分子層における、金属からの自発的な電子注入（セルフ・ドーピング）に注目した。これまでに、Cu(111)面上の C₆₀ 単分子層を加熱処理することにより分子と基板が強く結合し、基板からのセルフドーピングにより C₆₀ 単分子層の電子状態が大きく改質されることを見出した。このとき、C₆₀ 単分子層のフェルミ準位付近に金属的なバンドが形成されていることを確認した[2]。

電子ドーピングされた C₆₀ 単分子層への水素曝露による表面状態の変化を超音速 He 原子線散乱で計測したところ、室温で顕著に吸着の兆候が見られた。このような変化は、表面計測で一般的な電子線回折法では観測されず、He 原子線散乱の極めて高い表面感性が有効に生きていたといえる。また、吸着物は直接特定できていないが、状況を考慮すると水素である可能性が極めて高い。この試料を 70°C 程度に加熱することによりこの吸着物は消失した。すなわち、金属基板との相互作用により、有機低分子の電子状態が変化し、室温付近での水素吸着、水素放出という、水素吸蔵材料として理想的な性質が発現している可能性を示している。

本研究は、吸着物を特定すると共に、ここで観測された現象の背景にある機構を明らかにすることにより、電子ドーピングによる有機低分子の状態変調を利用した、実用水素吸蔵材料実現の可能性を検討することを目的とした。ここでは、予備的研究においてその有効性が明らかになっている、超音速原子線散乱法、走査トンネル顕微鏡法に加えて、より定量性の高い、イオンを用いた弾性反跳粒子検出法、中性子散乱法、基板への影響を通して基板との相互作用を明らかにする光学歪みセンサーを用いて、包括的な検討を試みた。

[2] Y. Yamada et al., Jpn. J. Appl. Phys. **50**, 08LB06 (2011)

3. 研究の方法

本研究では、超音速原子線散乱から重要な知見が得られた。超音速原子線技術を用いる事により、10~数 10 meV のエネルギーの単色化された原子線を得る事ができる。このときの波長が原子スケールであり、無擾乱で表面構造を計測するプローブとなる。この低いエネルギーでは、原子の束縛電子と物質から表面に染み出した電子の間で強いパウリ反発が生じるため、原子は表面電子密度の形状を反映して散乱される。ここで表面電子構造に原子スケールで周期性があれば、これに対応した回折による角度分布が現れる。これか

ら表面構造に関する情報を得ることができ。また、角度分布を計測しなくても、鏡面反射強度は、原子スケールの表面平坦性、表面構造における周期性、さらに表面デバイ温度によって変化するので、これから表面の状態変化を実時間で計測する事が可能となる。

一方、本研究で注目している水素は、電子に対する散乱断面積が極めて小さく、通常の電子線散乱では検出が困難であることが知られている。しかし、水素の吸着によって電子密度の形状が変化するので、ヘリウム原子線散乱における鏡面反射強度の実時間計測と散乱角度分布計測から、水素の高感度検出が可能になる。ただし、本手法だけでは、定量性が低いため、本研究では、昇温脱離法、反跳イオン散乱法(ERDA)、中性子散乱法(NR)などを組み合わせることで、表面にある水素の高度な計測を試みる。

さらに、電子状態の変化、幾何的配置の変化を知るため、光電子分光、偏光 X 線吸収スペクトルを計測した。

本研究においては、有機半導体分子に電子をドーピングすることによって電子状態を大きく変化させ、水素吸蔵材料としての可能性を検討する。原子スケールで良く規定された状態を準備する必要があるため、単結晶金属基板上の分子層を用いることを基本とする。適切な基板を選ぶことにより基板から大きな電荷移動が期待できる。研究の第1段階では、この手法を用い、研究のきっかけとなった Cu(111)表面に吸着した C₆₀、及び、基板との相互作用が極めて大きい事が知られている Ru(0001)表面に吸着したグラフェンを中心に検討を行った。さらに、検討する系の幅を広げるため、より詳細な状態変化が期待できるコロネン等の有機半導体分子に対するアルカリ金属添加も試みた。

4. 研究成果

(1) C₆₀/Cu(111)における水素の吸着・脱離

本研究では、まず、Cu(111)基板の上に吸着させることにより多量の電子ドーピングを実現させた C₆₀ 単分子層について、水素吸着、脱離過程に関して詳細に検討を行った。

清浄 Cu(111)表面への C₆₀ 分子の照射によ

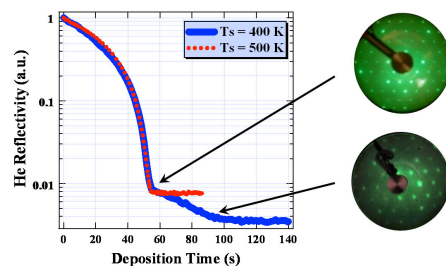


図1 400 K と 500 K における Cu(111) 上への C₆₀ 照射による He 鏡面反射強度の時間変化

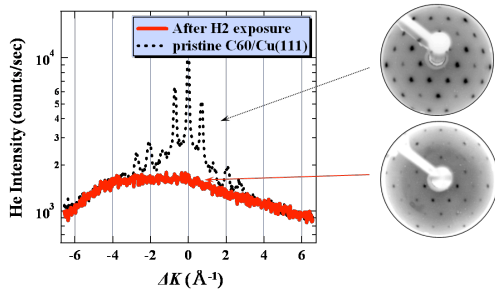


図2 室温水素曝露前後での He 散乱角度分布と LEED 像

る C₆₀ 分子層の成長の過程を、超音速 He 原子線を用いて実時間で計測した。図 1 は、表面温度 400 K と 500 K の Cu(111) 表面に C₆₀ 分子を照射し続けたときの He 鏡面反射強度の時間変化を示す。この結果は、吸着 C₆₀ 分子間の引力により C₆₀ 分子がアイランド成長し、表面温度 500 K では、単分子層の成長が完了したところで成長が停止することを示している。また、ここから表面温度を低下させることにより、成長はさらに進行して、第 2 層の成長が起こることを確認することができた。以上ことから、500 K で、表面全体に C₆₀ の単分子層が形成できることが明らかになった。この時形成された C₆₀ 層は、STM 計測で観測している、高温処理で形成した C₆₀ 分子層に対応し、C₆₀ 分子当たり 3 個の電子が移動し、電子状態を著しく変化させた状態にあると判断できる。図 2 の点線はその時の He の散乱角度分布を示す。STM 像で観測された 4x4 の周期構造が明瞭に現れている。これは、低速電子線回折(LEED)で回折像としても観測されている。この時の C₆₀ 単分子層の基板との結合は極めて強固であり、Cu(111) の状態を反映した鏡面反射強度の表面温度依存性を示した。

この C₆₀ 単分子層表面に 8x10⁻⁷ Torr の H₂ 分子を照射しながら He の鏡面反射強度の時間変化を計測した。これから、240 分間 (23,000 L) の照射で He 表面反射強度が 1/10 程度にまで減少した。この挙動は電離真空計を停止しても動作させても変化せず、電離真空計の

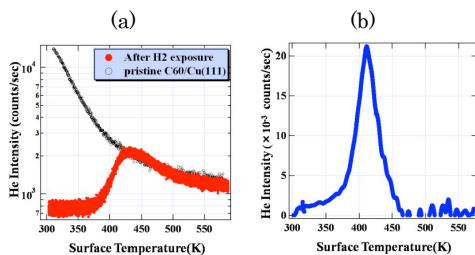


図3 一定速度で昇温した場合の(a)He 鏡面反射強度の時間変化と(b)温度の効果を除いた後の時間微分(昇温脱離スペクトルに対応)

フィラメントによる H₂ 解離の影響がないことも確認している。

図 2 の赤の実線は、H₂ 分子を照射後に計測した He の散乱角度分布を示す。He 原子線散乱で見える限り、H₂ の照射で 4x4 の超構造が消滅したことがわかる。一方、図 2 には、その時の低速電子線回折(LEED)像も示した。LEED では、回折強度の低下は見られるものの 4x4 の超構造は明確に観測され、C₆₀ の周期構造は依然維持されている様に見える。ここで、原子線散乱と低速電子線観測で見え方が異なるのは、散乱の機構が異なるためである。LEED では、電子が内殻コアで散乱される。電子の水素コアによる散乱断面積が小さいため、表面に水素が吸着したとしてもその影響は小さい。一方、その背景にある C₆₀ 分子の周期構造が変化しないため、C₆₀ 分子の炭素の周期的な構造を反映して電子の回折像が残ったものと判断することができる。これに対し、He 原子線散乱では、最表面電子の原子スケールでの幾何形状を反映して散乱する。C₆₀ 表面に水素が吸着することにより、原子スケールでの表面形状が変化するが、吸着位置に規則性がないため、散乱パターンが消滅したものと判断することができる。すなわち、得られた結果から、水素原子が C₆₀ 分子の最表面にランダムに吸着していること、下地の C₆₀ 構造は配置を大きく変えていないことが明らかになった。

図 3 (a)に、水素を十分に吸着させた表面を室温から一定速度で昇温したときの He 鏡面反射強度の時間変化を示す。380 K 付近から鏡面反射強度が増大し、420 K 付近で最大値をとり、その後は、水素を吸着させない試料を同じ条件で昇温したときの信号強度の時間変化と一致した。すなわち、440 K 以上では、水素吸着させる前の状態にもどったと判断することができる。表面温度を上昇させた場合、Debye-Waller 効果により回折強度は減少するが、その効果を取り除き、温度で微分したものを図 3 (b)に示す。これは、散乱強度の減少が吸着水素の被覆率に比例すると仮定すると、脱離水素量を温度の関数で示したものに对应する。この場合、420 K 付近にピークをもつことがわかる。

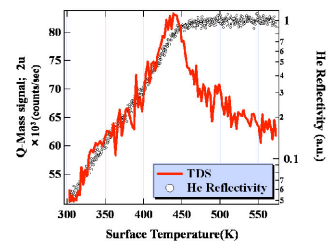


図4 水素を曝露した C₆₀/Cu(111)表面からの H₂ の昇温脱離スペクトル

He 原子線散乱では、表面吸着種に対して極めて高い感度を有するが、その吸着種を定量、同定することができない。そこで、質量分析計を試料に近づけ、脱離種の直接計測を試みた。その結果を図4に示す。同一昇温速度での He 鏡面反射強度の時間変化に概ね対応する結果が得られた。すなわち、He 原子線散乱で観測している吸着種は、水素（由来のもの）であると結論づけることができる。また、一定速度での昇温脱離ピークが対称であることから、脱離過程は1次の反応である事が予想される。

水素は、残留ガスとして多く存在することから、定量的な計測を行うことは困難である。そこで、吸着分子を重水素に変えて同様の実験を行った。ここでは、He 鏡面反射強度から求めた脱離ピークの形状と、脱離種を直接計測した脱離ピークの形状が高い精度で一致した。これは、先の H₂ を用いて行った実験の結果の正当性を裏付けるものである。さらに、重水素の暴露量を変化させて行った計測から、暴露量に対して吸着量は飽和し、その量は C₆₀ 分子当たり水素約 100 原子に相当することを示している。脱離種の測定では、最表面のみならず、試料に吸着している水素を全て計測しており、He 原子線散乱で見ているものと異なるが、その量は予想を遙かに超えるものであった。このことに関しては、より定量性の高い手法で検証する必要がある。

さらに、水素吸着のメカニズムを明らかにするため、H₂ と D₂ を共吸着させて、脱離種の直接計測を行った。図5は、同量の H₂ と D₂ を供吸着させた後に計測した、H₂、HD、D₂ の昇温脱離スペクトルである。これから、HD が H₂ や D₂ と同程度の強度で観測された事が分かる。すなわち、水素分子の一部が表面上で一旦解離していることが明らかになった。すべて、完全に解離した後、ランダムに会合して脱離したのであれば、HD の強度は H₂ や D₂ の2倍になるはずであるが、得られた結果は、必ずしも全てが解離しているものではないことを示している。また、H₂ と D₂ の間にはピーク位置に差が見られ、何らかの同位体効果が存在していることも明らかになった。

理論的には、分子状の化学吸着が予想されているが、得られた実験結果は、相当数の解離吸着が含まれていることを示唆している。1次の脱離におけるアレニウスの式の pre-exponential 因子を 10¹³ s⁻¹ と仮定して吸着エネルギーを見積もると 1 eV 程度となり、理論で予想される吸着エネルギーよりかなり大きくなった。一方、この値は、水素の解離吸着としては小さすぎる。すなわち、従来の理論的な予想、あるいは単純なモデルとは異なる機構が存在していることを示唆するものである。実験的な検証を進めると共に、理論的な検討も進める必要がある。

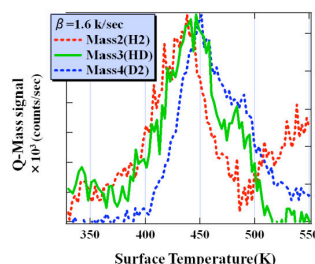


図5 H₂ と D₂ を供給着させた C60/Cu(111) 表面からの H₂、D₂、DH の昇温脱離スペクトル

(2) グラフェン上の水素吸着

Cu(111)表面に吸着して電子状態が変調した C₆₀ 分子が水素吸蔵剤として有効である事が明らかになったが、その機構の理解は不十分である。一方、グラフェンは、単体では構造が安定で化学反応性の低いことが知られているが、基板からの強い相互作用をうけることで電子状態が大きく変化し、原子状水素が吸着することが報告されている[3]。C₆₀ での水素吸着の機構を明らかにするために、基板からの影響を特に強く受けることが報告されている[4] Ru(0001)表面に吸着させたグラフェンを原子状水素に晒し、その時の状況を、He 超音速原子線散乱を用いて観測した。

電離真空計のフィラメントを点灯させない状況で水素を照射すると Ru(0001)上グラフェンで水素吸着の兆候を得る事はできなかったが、電離真空計を動作させた状況で水素を照射した場合には、鏡面反射強度が変化し、同時にモアレ様凹凸に対応した角度分布のサブピークが消失した。すなわち、何らかの方法で水素の解離を援用すれば、吸着グラフェンであっても水素を吸着できることを示している。さらに、吸着した水素は、温度を上げることにより全て脱離し、最終的には、水素脱離後は吸着前と同じ状態に戻った。水素の可逆的な吸着・脱離が起こったということは、ここでも C₆₀ の場合と同様。従来の予想に反する特異な現象が起こっていると判断することができる。この現象についても、詳細に検討する必要がある。

[3] R. Balog et al., *Nature Mat.* **9**, 315 (2010).

[4] Y. Yamada et al., *J. Phys. Condensed Matter* **22**, 304010 (2010); J. Lu et al., *ACS Nano* **6**, 944 (2012).

(3) アルカリドーブによる半導体有機分子の状態変化

半導体有機分子を利用した水素吸蔵材料の可能性を追求するため、適用する分子の範囲を拡大し、その電子状態変化を比較検討することが重要である。そこで、いくつかの芳

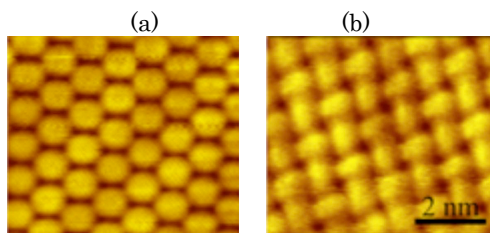


図6 (a) Au(111)表面に形成したコロネン単分子層と(b)そこにカリウムを堆積させた時のSTM像

香族半導体分子について、表面との相互作用、アルカリ添加の電子状態に与える変化を検討した。

Cu(111)上にコロネンを吸着させた場合、室温で安定な単分子層を形成する程度には相互作用は強いものの、基板と分子の電荷移動量は大きくなく、電子状態の明瞭な変調は認められなかった。そこで、吸着したコロネン分子層にアルカリ金属を堆積させた時の変化を、STMおよび光電子分光を用いて詳細に計測した。図6に、コロネン分子にアルカリ金属を蒸着したときの構造と状態の変化を示す。アルカリ金属を分子当たり3個のカリウム原子を堆積することにより、コロネン単体の場合と対称性が全く異なる特徴的な構造を形成した。この構造は、基板を変えても大きな変化が現れないことから、分子とアルカリの相互作用によって現れた構造であると判断できる。また、内殻の光電子分光から、アルカリと分子の間で大きな電荷移動がおき、紫外線光電子分光から、金属的な状態になったことを確認した。アルカリ金属を添加した有機半導体分子も、水素吸蔵材料として有望であると判断することができる。今後、実際に水素吸着の状態を検討する予定である。

(4) 水素の定量計測、基板材料の状態計測

C₆₀等の半導体有機分子上に吸着した水素の検出にはHe原子線散乱が有効であり、本研究において実際に水素の吸着が確認されている。しかし、昇温脱離の直接観測に因れば、He原子線観測で観測されているよりも大量に水素が吸着されているように見える。ここで起きている現象を正確に把握するためには、独立した別の、定量性が高く吸着位置の検出が可能な計測が不可欠である。ここでは、ERDAあるいはNR法が極めて有望である。本研究課題の初期からこれらの方法を活用すべく高分解能化をめざしてきたが、東日本大震災で、本手法に不可欠なイオン加速器等が甚大な被害を受け、研究計画が大幅に遅れた。最近になって、高分解能化、高感度化の作業が終わり、実際の実験に利用できるよ

うになったところである。近日中に実験を行う予定である。不確定な部分の大半を解明できるものと期待できる。

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 10 件)

1. 遠藤めぐみ、矢野雅大、長谷川友里、岡田遼介、山田洋一、佐々木正洋 「Coronene 単分子層へのアルカリ金属吸着」表面科学 **34**, 432-436 (2013) 査読有
dx.doi.org/10.1380/jsssj.34.432
2. Y. Yokoyama, Y. Yamada, H. Asaoka and M. Sasaki “Preferential adsorption of C₆₀ molecules to step edges of the Si(110)-16 x 2 single domain surface”, J. Phys Conference Series **417** (2013) 012036 査読有
doi:10.1088/1742-6596/417/1/012036
3. K. Ozeki, D. Sekiba, T. Suzuki, K. Kanda, M. Niibe, K.K. Hirakuri, T. Masuzawa “Influence of the source gas ratio on the hydrogen and deuterium content of a-C:H and a-C:D films: Plasma-enhanced CVD with CH₄/H₂, CH₄/D₂, CD₄/H₂ and CD₄/D₂”, Applied Surface Science **265** (2013) 750-757. 査読有
http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.11.100
4. H. Asaoka, T. Yamazaki, K. Yamaguchi, S. Shamoto, S.N. Filimonov, M. Suemitsu, “Direct measurement of surface stress during Bi-mediated Ge growth on Si”, Surf. Sci. **609** (2013) 157-160. 査読有
doi:10.1016/j.susc.2012.12.002
5. H. Asaoka, T. Yamazaki, Y. Yokoyama, K. Yamaguchi “Direct stress measurement of Si(111) 7x7 reconstruction”, J. Cryst. Growth **378** (2013) 37-40. 査読有
10.1016/j.jcrysgro.2012.12.124
6. Y. Yokoyama, A. Sinsarp, Y. Yamada, H. Asaoka, and M. Sasaki, “Ordering of C₆₀ on One-Dimensional Template of Single-Domain Ge(110)-16x2 and Si(110)-16x2 Surfaces”, Applied Physics Express **5** (2012) 025203 査読有
doi:10.1143/APEX.5.025203
7. D. Sekiba, N. Takemoto, M. Okada, S. Ishii, T. Sakurai, K. Akimoto, “Hydrogen isotope tracer experiment in a-C:H film deposition: Reactive RF magnetron sputtering with CH₄ and D₂”, Diamond & Related Materials **27-28** (2012) 60-63 査読有
http://dx.doi.org/10.1016/j.diamond.2012.05.014
8. T. Yamazaki, H. Asaoka, T. Taguchi, S. Yamamoto, D. Yamazaki, R. Mruyama, M. Takeda, S. Shamoto “Analysis of buried heterointerfacial hydrogen in highly lattice-mismatched epitaxy on silicon”, Thin

Solid Films **520** (2012) 3300-3303 査読有
DOI: 10.1016/j.tsf.2011.10.081

9. Y. Yamada, Y. Satake, K. Watanabe, Y. Yokoyama, R. Okada, M. Sasaki “Hydrogen adsorption on electron-doped C₆₀ monolayer on Cu(111) studied by He atom scattering”, Phys. Rev. B **84**, (2011) 235425. 査読有
10. Y. Yamada, S. Yamada, T. Nakayama, M. Sasaki, and Tomohito Tsuru, “Electronic Modification of C₆₀ Monolayers via Metal Substrates”, Jpn. J. Appl. Phys. **50** (2011) 08LB06. 査読有
doi:10.1143/JJAP.50.08LB06

[学会発表] (計 13 件)

1. 國原淳, 七辺寛幸, 金城厚, 山田洋一, 佐々木正洋 「He 原子線散乱を用いた K ドープ coronene 分子層の構造変化の計測」第 61 回応用物理学会春期学術講演会 青山学院大学相模原キャンパス 2014 年 3 月 17~20 日
2. 清水亮助, 矢野雅大, 岡田遼介, 遠藤めぐみ, 山田洋一, 佐々木正洋 「K ドープした picene 単分子層の微視的構造」第 61 回応用物理学会春期学術講演会 青山学院大学相模原キャンパス 2014 年 3 月 17~20 日
3. M. Yano, M. Endo, R. Okada, Y. Hasegawa, Y. Yamada, and M. Sasaki, “Structural and Electronic changes of potassium adsorbed coronene monolayer”, The 12th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-12) 2013 年 11 月 4~8 日 Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan
4. Yuri Hasegawa, Yoichi Yamada, Masahiro Sasaki, “Doping of organic semiconductor molecules with Alkali metal”, ACSIN-12, 2013 年 11 月 4~8 日 Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan
5. Y. Yamada, M. Yano, M. Endo, R. Okada, Y. Hasegawa, and M. Sasaki, “Microscopic of Structure of metal-doped Organic layers”, ACSIN-12, 2013 年 11 月 4~8 日 Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan
6. M. Endo, M. Yano, R. Okada, R. Shimizu, T. Ishidu, Yuri Hasegawa, Y. Yamada and M. Sasaki, “STM investigation of aromatic molecule films doped with alkali-metals”, ACSIN-12, 2013 年 11 月 4~8 日 Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan
7. Y. Yamada, M. Yano, M. Endo, Y. Hasegawa R. Okada, M. Sasaki, “Alkali Adsorption on Coronene Monolayer”, 2013 NIMS conference 2013.7.1-3, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan
8. T. Ishizu, M. Yano, M. Endo, Y. Hasegawa, S. Sato, Y. Yamada, M. Sasaki, “STM

investigation of alkali-intercalated [n]phenacenes monolayer”, 2013 NIMS conference, 2013.7.1-3, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan

9. 七辺寛幸, 金城厚, 國原淳, 山田洋一, 佐々木正洋 「超音速希ガス原子線散乱による金属基板上単層 graphene の計測」第 74 回応用物理学会秋季学術講演会 同志社大学京田辺キャンパス 2013 年 9 月 16~20 日
10. 矢野雅大, 遠藤めぐみ, 長谷川友里, 岡田遼介, 石津友康, 山田洋一, 佐々木正洋 「異なる基板上の coronene 分子層へのカリウム吸着」第 74 回応用物理学会秋季学術講演会 同志社大学京田辺キャンパス 2013 年 9 月 16~20 日
11. 山田洋一, 矢野雅大, 遠藤めぐみ, 長谷川友里, 岡田遼介, 佐々木正洋 「coronene 単分子層へのアルカリドーピング」第 32 回表面科学学術講演会 東北大学片平キャンパス 2012.11.20~22
12. 七辺寛幸, 渡邊研人, 山田洋一, 佐々木正洋 「超音速希ガス原子線散乱による有機単分子層の計測」第 53 回真空に関する連合講演会 甲南大学ポートアイランドキャンパス 2012.11.14~16
13. 七辺寛幸, 渡邊研人, 山田洋一, 佐々木正洋 「電子ドーピングされた C₆₀ 単分子層における水素の吸着・脱離過程」2012 年春季第 59 回応用物理学関係連合講演会 早稲田大学 2012.3.15~18

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木 正洋 (SASAKI, Masahiro)
筑波大学・数理物質系・教授
研究者番号：80282333

(2) 研究分担者

山田 洋一 (YAMADA, Yoichi)
筑波大学・数理物質系・講師
研究者番号：20435598

関場 大一郎 (SEKIBA, Dai-ichirou)
筑波大学・数理物質系・講師
研究者番号：20396807

朝岡 秀人 (ASAOKA, Hideto)
日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用
研究センター・研究主幹
研究者番号：40370340