

令和元年6月11日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K19100

研究課題名(和文)分子の状態がどこまで分かれば表面増強ラマンの増強機構を完全に理解できるのか?

研究課題名(英文) Investigation on the enhancement mechanism of the surface enhanced Raman scattering based on the identification of the atomic and electric configuration of the molecular junction

研究代表者

木口 学 (Kiguchi, Manabu)

東京工業大学・理学院・教授

研究者番号：70313020

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：単分子接合の表面増強ラマン散乱(SERS)と電流-電圧特性(I-V)の同時計測に基づく界面構造の決定に関して特に顕著な成果を得た。アミノベンゼチオール単分子接合における、ラマンシフトとI-Vから決定した電気的な金属-分子カップリング強度の相関図を用いる事により、SERSのみもしくはI-V計測のみでは分離できなかった状態の検出に成功した。モデルクラスターを用いた理論計算と組み合わせることによりそれぞれの状態が、ABT分子がbridgeサイトとhollowサイトに吸着している状態に対応することが分かった。以上のように分子の吸着構造を決定したSERS計測によりSERSの増強機構の解明を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

表面増強ラマン散乱計測は高感度の分子検出技術として注目を集めている。しかし、その増強機構はいまだ完全には解明されておらず信頼性の高い検出方法として未だ課題がある。増強機構の解明に向け単分子スケールでの吸着状態の決定が必要不可欠であるが分子スケールで吸着状態を決定することは非常に困難であった。本研究では分子の吸着構造を規定した表面増強ラマン散乱の観測に成功した。従って、本研究成果は表面増強ラマン散乱計測を信頼性の高い分析手法として発展させるものである。

研究成果の概要(英文)：We have developed a new methodology for characterizing the adsorption site of single-molecule junctions through the combination of surface enhanced Raman scattering (SERS), current-voltage (I-V) curve measurements. Using this technique, we recognized two distinct conductance states in a single aminobenzenethiol (ABT) molecular junction. It is noticeable the two states cannot be recognized by SERS or I-V measurement alone. The combination of this hybrid experimental technique and theoretical calculation, the two conductance states are assigned to the states where ABT is attached on the bridge and hollow sites.

研究分野：機能物性化学

キーワード：単分子接合 表面増強ラマン散乱

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

表面増強ラマン散乱(SERS)スペクトル計測は高感度検出法として注目を集めており盛んに研究がなされている。しかし、SERS 増強機構の解明は十分に進んでおらず、長年の課題となっている。SERS 増強は電場増強機構及び、電荷移動機構に由来しているといわれている。電場増強効果は金属ナノ構造体の形状に強く依存し、電荷移動機構は化学種や吸着構造等に依存することが知られている。これまで、様々な金属ナノ構造体を用いた SERS 計測により電場増強機構に関しての知見が集められ、電場増強機構については解明されつつある。しかし単分子状態において電極形状を規定し、吸着状態を規定した計測が少ないため、単分子 SERS における電荷移動機構に関する知見は不足しており、SERS 増強機構の解明は十分でなく、単分子状態における SERS 増強機構は重要な課題の一つである。一方、我々はこれまで金属ナノギャップに一つの分子を架橋させた安定な単分子接合の作製方法の開拓とその電子輸送特性の計測および架橋構造の決定手法の開発を行ってきた。単分子接合の作製に関しては単分子接合の安定性に決定的な役目を果たす金属-分子接合界面に注目し、20 種類以上の新規金属-分子接合部位を開拓し、単分子接合の安定性、伝導性を飛躍的に向上させることに成功してきた(*J. Am. Chem. Soc.* 2011)。また、極低温超高真空下で非弾性トンネル分光による単分子の振動検出[*Phys. Rev. Lett.* 2007, *J. Phys. Chem. Lett.* 2010 他]、ショットノイズ計測による伝導チャンネルの決定[*Phys. Rev. Lett.* 2008, *Nanotechnology*, 2016 他]、電流-電圧(I - V)計測による吸着構造解析[*Sci. Rep.* 2016 他]等、電気計測を用いた単分子接合の架橋構造解明方法の開拓を精力的に行ってきた。一方、単分子接合は分子が数 nm のギャップに単一分子が架橋した構造を持っているため、SERS を観測するためには最適な構造を持っている。我々はこの発想に基づき近年、単分子接合の表面増強ラマン散乱の観測に成功している[*J. Am. Chem. Soc.* 2016]。我々が構築してきた単分子接合の電気計測と SERS 計測技術を組み合わせることにより、SERS 増強機構の解明を推進するものであると期待される。

2. 研究の目的

本研究では SERS 計測に我々が開発してきた単分子接合の先端計測を組み合わせる事で SERS の増強機構の解明に挑戦した。まず、単分子接合の電流-電圧特性(I - V)計測と SERS 計測から得られる振動情報を組み合わせることにより、単分子接合における分子吸着状態を決定する。次に、 I - V 特性を詳細に解析する事により、伝導を担う軌道のエネルギー位置及び、金属-分子間の相互作用の強さを決定した。詳細な分子の電子状態を決定するために I - V 特性と熱起電力の同時計測法の開発も行なった。

次に金属-分子間相互作用を積極的に変化させることにより、SERS スペクトルの金属-分子間相互作用依存性の計測を試みた。単分子接合は可変ナノギャップ電極を用いて作製し、ギャップ間隔を連続的に変えた際の SERS 計測と I - V 計測を行った。 I - V 計測から見積もられる電子状態と SERS 計測から得られる、信号相関及び振動エネルギーの相関関係を計測した。得られた相関関係に基づき単分子状態における SERS スペクトルの増強機構の解明を目指した。

3. 研究の方法

単分子接合の作製には Mechanically controllable break junction (MCBJ)法を活用した。MCBJ に用いる金電極は電子線描画とリフト-オフにより、リン青銅基板上に作製した。酸素プラズマアッシングにより、電極中心部に数 μm サイズの中空のブリッジ構造を作製した。室温・大気中でピエゾ素子を用いて基板を押し曲げ、電極の中心部を破断させる際に形成されるナノギャップに分子を架橋させることにより単分子接合を作製した。ピエゾ素子に印加する電圧を調節することにより、基板の押し曲げを調節し、分子が架橋されるギャップのサイズを調節した。単分子接合形成時における SERS スペクトル及び I - V 特性を計測した。

I - V 計測には Keithley 社の電流アンプ(Keithley 428)を用い、 -1 V から $+1\text{ V}$ まで電圧を掃引させた。ラマンスペクトルには東京インスツルメンツ社の Nanofinder 30 を用い、785 nm の励起光を用いた。

4. 研究成果

まず単分子接合の SERS スペクトルと I - V の同時計測により、単分子接合における分子吸着サイトの決定を行った。特にアミノベンゼンチオール単分子の表面増強ラマン散乱に関して顕著な成果が得られた。まずアミノベンゼンチオールが吸着した金ナノ接合の自己破断過程における SERS スペクトルと I - V 特性を連続的に計測した。金属ナノ接合形成時、単分子接合形成時、接合破断時においてそれぞれ SERS と I - V の同時計測を行った所、単分子接合形成時に SERS 強度が著しく増強され、単分子の SERS を計測していることが示された。 I - V 計測から得られる電気伝導度の情報と、観測された単分子接合の SERS スペクトルから得られる分子の振動情報を組み合わせることにより、電気伝導度に応じて振動数が変化することが分かった。次にアミノベンゼンチオール単分子接合における I - V 特性を、ブライト・ウィグナーの式を用いる事で解析を行い、分子軌道エネルギー及び、金属-分子間の軌道の重なりに相当するカップリングを見積もった。カップリング強度のアミノベンゼンチオールの CC 伸縮振動の振動エネルギーの相関関係を調べたところ、振動エネルギーが小さく、カップリングが大きい状態(状態 1)と、振動

数が大きく、カップリングの小さな状態（状態2）が観測された。モデルクラスターを用いた理論計算により、電気的なカップリングと振動数を求め、実験結果と比較することで、状態1がbridgeサイト、状態2がhollowサイトに分子が吸着した構造に対応することが分かった。ここで強調したいのは、SERSスペクトルから得られる振動情報および電気計測から得られるカップリング強度、各々単体の情報では分離出来なかった2つの吸着状態を、SERSとI-Vの情報を組み合わせることで、初めて分離出来たことである。SERSとI-Vの解析から、単分子接合における分子の吸着サイトを決定出来ることが分かったので、本手法を吸着サイトの時間変化の解析に適用した。単分子接合形成時にSERSとI-Vを連続的に計測することによりhollowからbridgeに時間と共に吸着構造が変化している様子を明らかにすることにも成功した。

またカップリングとSERS強度の相関関係を求めた。結果、SERS強度はカップリングの増大に従って単調増加した。このことは下記の通り定性的に理解することが可能である。カップリングは金属と分子の軌道間の重なりに相当するため、カップリングが大きい時、金属-分子間の電子移動は促進され、結果として、分子軌道の電子占有数を増加させるため、これにより架橋分子の双極子の時間変化は増加すると考えられる。SERS強度と電子状態の相関によりSERSシグナルが増強される因子を解明した。

次にピピリジンを用いて単分子接合のSERSスペクトルのギャップ間隔依存性を計測した。まず電気伝導度の値を表示しながらギャップ間隔を調節し、分子接合を作製した。電気伝導度が0.03 G_0 程度するとき、ピピリジンに固有な ν_1 , ν_{8a} モードに由来するピークをSERSスペクトルで観測した。分子接合を作製した後、ピエゾ素子に印加する電圧を変化させることにより8.5 pm間隔でギャップ間隔を変化させた。各ギャップ間隔でSERSスペクトル及び、I-V計測を行った。各ギャップ間隔において電気伝導度、カップリング、分子軌道エネルギー、各振動モードの振動エネルギーを見積もった。結果、ギャップ間隔を広げることにより電気伝導度とカップリングは連続的に減少し、分子軌道エネルギーは変化しなかった。従って電気伝導度の減少は主にカップリングの減少に由来し、金属と分子の軌道間の重なりが弱められていることが分かった。次に、ギャップ間隔を広げることにより ν_{8a} モードの振動エネルギーは減少し、 ν_1 モードの振動エネルギーは増加した。ピリジン分子の表面吸着状態に関する先行研究ではピピリジン分子の ν_{8a} モードの振動エネルギーは分子吸着サイトの変化依存した相互作用の変化に敏感応答し、相互作用が減少した場合、振動エネルギーが減少することが知られている。本研究においてギャップ間隔を拡大することで、金属と分子の相互作用が減少し、振動エネルギーが減少したと考えられる。以上のように、分子が架橋した状態でギャップ間隔をさせ、I-V計測とSERS計測を行うことにより振動エネルギーの金属-分子間相互作用依存性を観測することに成功した。

また、接合形成時におけるSERSスペクトルの印加電圧依存性について検討を行なった。1'4-ベンゼンジチオール分子を金ナノギャップに架橋させ、ギャップ間隔を保持してSERSスペクトルを計測した。まず、単分子状態のSERS計測を行った所、CS伸縮振動、環呼吸振動モード、CC伸縮振動モードが観測された。次に接合を保持した状態で印加電圧を変調させた所、CS伸縮振動の振動エネルギーが印加電圧の増大に追従して増加した。モデルクラスターを用いた理論計算により、仮想的にナノギャップ間に電場勾配を想定した理論計算を行った所、面外振動モードの振動エネルギーが電場の増加により増大することが示された。電場を印加することによる共役系の変調により面外振動の振動エネルギーが変調を受けたと考えられる。C-S振動のエネルギーと面外振動のカップリングにより振動エネルギーの印加電圧依存性が観測されたと考えられる。

以上より、単分子接合におけるSERSスペクトルを計測することにより分子吸着構造及び、金属-分子間相互作用がSERSスペクトルに与える影響を明らかにすることに成功した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計36件)

1. S. Kaneko, K. Yasuraoka, **M. Kiguchi***, "Bias Voltage Induced SERS Enhancement on the Single Molecule Junction", *J. Phys. Chem. C* **123**, 6502-6507 (2019). (DOI: 10.1021/acs.jpcc.8b11595) (査読有).
2. S. Kaneko, S. Watanabe, S. Kasai, T. Nishino, K. Tsukagoshi, **M. Kiguchi*** "Near-infrared-light-induced decomposition of Rhodamine B triggered by localized surface plasmon at gold square dimers with well-defined separation distance", *AIP Advances* **9**, 035153 (2019). (DOI: 10.1063/1.5093763) (査読有).
3. F. Ishiwari, G. Nascimbeni, E. Sauter, H. Tago, Y. Shoji, S. Fujii, **M. Kiguchi***, T. Tada, M. Zharnikov, E. Zojer, T. Fukushima, "Triptycene Tripods for the Formation of Highly Uniform and Densely Packed Self-Assembled Monolayers with Controlled Molecular Orientation", *J. Am. Chem. Soc.* **141**, 5995-6005 (2019). (DOI: 10.1021/jacs.9b00950) (査読有).
4. S. Fujii, F. Ishiwari, Y. Komoto, L. Su, Y. Yamagata, A. Kosaka, A. Aiba, T. Nishino, T. Fukushima, **M. Kiguchi***, "Control of Molecular Orientation in Single-Molecule Junction with Tripodal Triptycene Anchoring Unit: Toward Simple and Facile Single-Molecule Diode", *Jpn. J. Appl. Phys.* **58**, 035003 (2019). (DOI: 10.7567/1347-4065/ab0436) (査読有).

5. R. Koizumi, A. Aiba, S. Kaneko, S. Fujii, T. Nishino, **M. Kiguchi***, "Investigation on Formation Process of Metal Atomic Filament for Metal Sulfide Atomic Switch by Electrical Measurement", *Nanotechnology* **30**, 125202 (2019). (DOI: 10.1088/1361-6528/aafc79) (査読有).
6. **M. Kiguchi***, A. Aiba, S. Fujii, S. Kobayashi, "Surface enhanced Raman scattering on molecule junction", *Appl. Mater. Today* **14**, 76-83 (2019). (DOI: 10.1016/j.apmt.2018.10.008) (査読有).
7. S. Kobayashi, S. Kaneko, S. Fujii, T. Nishino, K. Tsukagoshi, **M. Kiguchi***, "Stretch dependent electronic structure and vibrational energy of the bipyridine single molecule junction", *Phys. Chem. Chem. Phys. in press*. (DOI: 10.1039/C9CP01442J) (査読有).
8. **M. Kiguchi***, "Studies on the single molecule bridging metal electrodes: development of new characterization technique and functionalities", *Proc. Jpn. Aca. B* **94**(9), 350-359 (2018). (DOI: 10.2183/pjab.94.023) (査読有).
9. M. Iwane, T. Tada, T. Osuga, T. Murase, M. Fujita, T. Nishino, **M. Kiguchi***, S. Fujii, "Controlling Stacking Order and Charge Transport in pi-Stacks of Aromatic Molecules Based on Surface Assembly", *Chem. Commun.* **54**, 12443-12446 (2018). (DOI: 10.1039/C8CC06430J) (査読有) (**Inside front cover に採択**).
10. A. Aiba, M. Iwane, S. Fujii, **M. Kiguchi*** "Electronic Properties of Single Atom and Molecule Junctions", *ChemElectroChem* **5**, 2508-2517 (2018). (DOI: 10.1002/celec.201800787) (査読有) (**表紙絵に採択**).
11. Y. Tanaka, Y. Kato, T. Tada, S. Fujii, **M. Kiguchi***, M. Akita, "Doping" of Polyyne with An Organometallic Fragment Leads to Highly Conductive Metallapolyne Molecular Wire", *J. Am. Chem. Soc.* **140**, 10080-10084 (2018). (DOI: 10.1021/jacs.8b04484) (査読有).
12. S. Kobayashi, S. Kaneko, S. Fujii, T. Nishino, K. Tsukagoshi, **M. Kiguchi***, "Dependence of Stretch Length on Electrical Conductance and Electronic Structure of the Benzenedithiol Single Molecular Junction", *e-J. Surf. Sci. Nanotech.* **16**, 145-149 (2018). (DOI: 10.1380/ejsnt.2018.145) (査読有).
13. Y. Matsuzawa, S. Kaneko, S. Fujii, T. Nishino, K. Tsukagoshi, **M. Kiguchi***, "Photochemical Reaction Using Aminobenzenethiol Single Molecular Junction", *e-J. Surf. Sci. Nanotech.* **16**, 137-141 (2018). (DOI: 10.1380/ejsnt.2018.137) (査読有).
14. Y. Komoto, Y. Yamazaki, Y. Tamaki, M. Iwane, T. Nishino, O. Ishitani, **M. Kiguchi***, S. Fujii, "Single Ruthenium Tris Bipyridine Molecular Junction having Multiple Joint Configurations", *Chem. Asian J.* **13**, 1297-1301 (2018). (DOI: 10.1002/asia.201800166) (査読有) (**表紙絵に採択**).
15. Y. Isshiki, S. Fujii, T. Nishino, **M. Kiguchi***, "Fluctuation in Interface and Electronic Structure of Single-Molecule Junctions Investigated by Current versus Bias Voltage Characteristics", *J. Am. Chem. Soc.* **140**, 3760-3767 (2018). (DOI: 10.1021/jacs.7b13694) (査読有). (**化学工業日報 3月15日、科学新聞 3月23日掲載**).
16. Y. Isshiki, S. Fujii, T. Nishino, **M. Kiguchi***, "Impact of junction formation process on single molecular conductance", *Phys. Chem. Chem. Phys.* **20**, 7947-7952 (2018). (DOI: 10.1039/C8CP00317C) (査読有). (**Back cover に採択**).
17. T. Enoki, **M. Kiguchi***, "Magnetism of nanographene-based microporous carbon and its applications: Interplay of edge geometry and chemistry details in the edge state", *Phys. Rev. Appl.* **9**, 037001 (1-18) (2018). (DOI: 10.1103/PhysRevApplied.9.037001) (査読有).
18. Y. Isshiki, Y. Matsuzawa, S. Fujii, **M. Kiguchi***, "Investigation on Single-Molecule Junction Based on Current-Voltage Characteristics", *Micromachines* **9**, 67 (2018). (DOI: 10.3390/mi9020067) (査読有).
19. T. Enoki, **M. Kiguchi***, "Challenges for single molecule electronic devices with nanographene and organic molecules. Do single molecules offer potential as elements of electronic devices in the next generation?", *Physica Scripta* **93**, 053001 (2018). (DOI: 10.3390/mi9020067) (査読有).
20. Y. Komoto, S. Fujii, **M. Kiguchi***, "Single-molecule junction of π molecule", *Mater. Chem. Front* **2**, 214-218 (2018). (DOI: 10.1039/C7QM00459A) (査読有).
21. M. Koike, S. Fujii, H. Cho, Y. Shoji, T. Nishino, T. Fukushima, **M. Kiguchi***, "Single-molecule junction of an overcrowded ethylene with binary conductance states", *Jpn. J. Appl. Phys.* **57**, 03EG05-1-4 (2018). (DOI: 10.1039/C7QM00459A) (査読有).
22. M. Iwane, S. Fujii, **M. Kiguchi***, "Surface Enhanced Raman Scattering in Molecular Junctions", *Sensors* **17** 1901(2017). (DOI: 10.3390/s17081901) (査読有).
23. S. Fujii, S. Marques-Gonzalez, J. Shin, H. Shinokubo, T. Masuda, T. Nishino, N. P. Arasu, H. Vazquez, **M. Kiguchi***, "Highly-conducting molecular circuits based on antiaromaticity", *Nat. Comm.* **8** 15984 (2017). (DOI: 10.1038/ncomms15984) (査読有).
24. A. Aiba, F. Demir, S. Kaneko, S. Fujii, T. Nishino, K. Tsukagoshi, A. Saffarzadeh, G. Kirczenow, **M. Kiguchi***, "Controlling the thermoelectric effect by mechanical manipulation of the electron's quantum phase in atomic junctions", *Sci. Rep.* **7** 7949 (2017). (DOI: 10.1038/s41598-017-08553-2) (査読有).

25. S. Kaneko, Y. Hashikawa, S. Fujii, Y. Murata, **M. Kiguchi***, “Single Molecular Junction Study on H₂O@C₆₀: H₂O is “Electrostatically Isolated””, *ChemPhysChem* **18(10)** 1229-1233 (2017). (DOI: 10.1002/cphc.201700173) (査読有).
26. 金子哲, **木口学**, “単一分子の表面増強ラマン散乱”, *日本物理学会誌* **72(5)** 328 (2017). (DOI: 10.11316/butsuri.72.5_328) (査読有).
27. S. Furukawa, Y. Suda, J. Kobayashi, T. Kawashima, T. Tada, S. Fujii, **M. Kiguchi***, M. Saito, “A Triphosphasumanene Trisulfide: High Out-of-Plane Anisotropy and Two-Faced Pi-Surfaces”, *J. Am. Chem. Soc.* **139 (16)** 5787-5792 (2017). (DOI: 10.1021/jacs.6b12119) (査読有).
28. M. Iwane, S. Fujii, **M. Kiguchi***, “Molecular diode studies based on a highly sensitive molecular measurement technique”, *Sensors (Basel)*, **17(5)**, 956 (2017). (DOI: 10.3390/s17050956) (査読有).
29. S. Watanabe, S. Kaneko, S. Fujii, T. Nishino, S. Kasai, K. Tsukagoshi, **M. Kiguchi***, “Gap Width-independent Spectra in ATP Surface Enhanced Raman Scattering stimulated in Au-gap Array”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **56**, 065202, (2017) (DOI: 10.7567/jjap.56.065202) (査読有).
30. S. Kaneko, R. Takahashi, S. Fujii, T. Nishino, **M. Kiguchi***, “Controlling the Formation Process and Atomic Structures of Single Pyrazine Molecular Junction by Tuning the Strength of the Metal-Molecule Interaction”, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **19** 9843-9848 (2017). (DOI: 10.1039/C6CP08862G) (査読有).
31. S. Kaneko, Y. Hashikawa, S. Fujii, Y. Murata, **M. Kiguchi***, “Single Molecular Junction Study on H₂O@C₆₀: H₂O is “Electrostatically Isolated””, *ChemPhysChem*, **18**, 1-6 (2017). (DOI: 10.1002/cphc.201700173) (査読有).
32. Y. Komoto, S. Fujii, **M. Kiguchi***, “Statistical *I-V* measurements of single-molecule junctions with an asymmetric anchoring group, 1,4-aminobenzenethiol”, *Adv. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol.* **8(2)**, 025007 (2017). (DOI: 10.1088/2043-6254/aa5e24) (査読有).
33. Y. Li, S. Kaneko, S. Fujii, T. Nishino, **M. Kiguchi***, “Atomic structure of water/Au, Ag, Cu and Pt atomic junction”, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **19**, 4673-4677 (2017). (DOI: 10.1039/C6CP07549E).
34. A. Aiba, S. Kaneko, S. Fujii, T. Nishino, K. Tsukagoshi, **M. Kiguchi***, “In-situ Observation of Formation Process of Free Standing Au Nano Wire with Scanning Electron Microscope”, *Nanotechnology* **28** 105707/1-7 (2017). (DOI: 10.1088/1361-6528/aa59f0) (査読有).
35. Y. Komoto, Y. Isshiki, S. Fujii, T. Nishino, **M. Kiguchi***, “Evaluation of Electronic Structure of the Single-molecule Junction Based on Current-Voltage Measurement and Thermopower Measurement – Application to C₆₀ Single-molecule Junction”, *Chem. Asian J.*, **12**, 440-445 (2017). (DOI: 10.1088/1361-6528/aa59f0) (査読有).
36. E. Bedogni, S. Kaneko, S. Fujii, **M. Kiguchi***, “Mechanical control of the plasmon coupling with Au nanoparticle arrays fixed on the elastomeric film *via* chemical bond”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **56**, 035201/1-5 (2017). (DOI:10.7567/JJAP.56.035201), (査読有).

〔学会発表〕(計 10 件)

1. **木口学**, “表面増強ラマン散乱と電気計測を用いた単一分子計測”, 第 99 回日本化学会年会, 甲南大学, 神戸, 2019/3/19.
2. 安楽岡浩司, 金子哲, 塚越一仁, **木口学**, “1,4-ベンゼンジチオール単分子接合における振動エネルギーの印加電圧依存性”, 日本化学会第 99 春季年会, 甲南大学, 神戸, 2019/3/19.
3. **木口学**, “Cu 電極に架橋した水単分子の光化学反応”, 日本物理学会 2018 秋季大会, 同志社大学, 京田辺, 京都, 2018/9/10.
4. 小林柊司, 金子哲, **木口学**, “電気伝導特性と SERS スペクトルの同時連続計測による BDT 単分子接合の構造変化の解明”, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 同志社大学, 京田辺, 京都, 2018/9/10.
5. **木口学**, “SERS と *I-V* の同時計測による金属—分子局所界面構造の解析”, 日本学術振興会ナノプローブテクノロジー第 167 委員会 定例研究会, 東京, 2017/7/20 (招待講演).
6. **M. Kiguchi**, “Characterization of Molecular Adsorption Site of Single Molecular Device based on Simultaneous SERS and Electrical Measurement”, *ECOSS34*, Aarhus (Denmark), 2018/8/28.
7. S. Kobayashi, S. Kaneko, **M. Kiguchi**, “Continuous and Simultaneous Measurement of Electrical Conductance and SERS for the Single Molecular Junction”, *ECOSS34*, Aarhus (Denmark) 2018/8/29.
8. **M. Kiguchi** “Electrical and Optical Response of Single Molecular Junction (Invited)”, *Japanese-German Workshop- Single-Molecule Science and Technology*, Konstanz (Germany) 2017/12/12.
9. Y. Matsuzawa, S. Kaneko, T. Nishino, **M. Kiguchi** “In-Situ SERS Study on Photo Chemical Reaction of Aminobenzenethiol Molecular Junction” *ISSS-8*, Tsukuba 2017/10/24.
10. **M. Kiguchi**, “Single Molecular Junction towards Single Molecular Electronics”, *9th International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics*, Kanazawa, 2017/6/27, (Invited).

〔図書〕(計 0 件)
〔産業財産権〕
○出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.chemistry.titech.ac.jp/~kiguti/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

該当なし

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

(2) 研究協力者

該当なし

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。