Wed. Nov 3, 2021

Room C

Surface Science(SS1) Physical Property

[1Ca02-12] SS1

Chair:(Waseda University), Shinichiro Hatta(Kyoto University)
9:15 AM - 12:00 PM Room C (Takamatsu)

[1Ca02R] Magnetism of epitaxial Fe nanofilms on three-dimensionally structuralized Si {111} facet surfaces
*Liliany Noviyanty Pamasi[1], Aydar Irmikimov[1], Yuya Sakai[1], Tomoya Shimizu[1], Haobang Yang[1], Nobuyoshi Hosoito[1], Azusa Hattori[2], Ai Osaka[2], Hidekazu Tanaka[2], Ken Hattori[1] (1. Nara Institute of Science and Technology, 2. Institute of Scientific and Industrial Research Osaka University)
9:15 AM - 9:30 AM

[1Ca03S] Electronic structure and magnetic properties of magnetic topological sandwich structures
*Ryushiro Fukushima[1], Kazuki Sumida[2], Yukiharu Takeda[2], Satoru Ichinokura[1], Toru Hirahara[1] (1. Tokyo Institute of Technology, 2. JAEA-SPring-8)
9:30 AM - 9:45 AM

[1Ca04Y] Observation of structure and electronic states of a single-layer Kondo lattice $CePt_6$/Pt(111)
*koichiro ienaga[1,2], Sunghun Kim[1,3], Toshio Miyamachi[1,4], Fumio Komori[1,5] (1. ISSP, the Univ. of Tokyo, 2. Dept. of Phys., Tokyo Tech., 3. KAIST, 4. ImaSS, Nagoya Univ., 5. IIS, the Univ. of Tokyo)
9:45 AM - 10:00 AM

[1Ca05] Visualization of charge density wave domains in 2H-$NbSe_2$ by STM
*Shunsuke Yoshizawa[1], Keisuke Sagisaka[1] (1. National Institute for Materials Science)
10:00 AM - 10:15 AM

[1Ca06] Superconducting state of nodal line semimetal NaAlSi studied by STM
*masahiro haze[1], Yudai Sato[1], Takahiro Yamada[2], Hisanori Yamane[2], Daigorou Hirai[1], Zenji Hiroi[1], Yukio Hasegawa[1] (1. University of Tokyo, 2. Tohoku University)
10:15 AM - 10:30 AM

[その他] Break time
10:30 AM - 10:45 AM

[1Ca08] Role of steps on superconductor-insulator transition in mono-atomic-layer metal films grown on semiconducting substrates
*Yudai Sato[1], Masahiro Haze[1], Shunsuke Yoshizawa[2], Takashi Uchihashi[2], Yukio Hasegwa[1] (1. The Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo, 2. National Institute for Materials Science)
10:45 AM - 11:00 AM

[1Ca09S] Transport properties of monolayer FeSe on Nb-doped $SrTiO_3$ substrate
*Koshiro Ide[1], Toshihiro Kobayashi[1], Tomoaki Tanaka[1], Satoru Ichinokura[1], Ryota Shimizu[2], Taro Hitosugi[2], Toru Hirahara[1] (1. School of Science, Tokyo Institute of Technology, 2. School of Materials and Chemical Technology, Tokyo Institute of Technology)
11:00 AM - 11:15 AM

[1Ca10S] Tuning the transition temperature of atomic-layer superconductor
*Kenta Yokota[1,2], Takahiro Kobayashi[3], Wenxuan Qian[1], Shunsuke Inagaki[3], Kazuyuki Sakamoto[3], Takashi Uchihashi[1,2] (1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. National Institute for Materials Science, 3. Graduate School of Engineering, Osaka University)
11:15 AM - 11:30 AM

[1Ca11R] Can we enhance diradical character using surface interactions?— A theoretical investigation using chemical indices
*Kohei Tada[1], Hiroyuki Ozaki[1], Koji Fujimaru[1,2], Yasutaka Kitagawa[3], Takashi Kawakami[2], Mitsutaka Okumura[2] (1. Research Institute of Electrochemical Energy, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 2. Graduate School of Science, Osaka University, 3. Graduate School of Engineering Science, Osaka University)
11:30 AM - 11:45 AM

[1Ca12S] How do viscoelastic objects begin to slide? - relation between precursor slip and friction coefficient-
*Wataru Iwashita[1], Hiroshi Matsukawa[2], Michio Otsuki[1] (1. Graduate School of Engineering Science, Osaka University, 2. College of Science and Engineering, Aoyama Gakuin University)
11:45 AM - 12:00 PM

Thu. Nov 4, 2021

Room F

Surface Science(SS1) Physical Property

[2Fa03-07] SS1

Chair:Kazuyuki Sakamoto(Osaka University)
9:00 AM - 10:15 AM Room F (Marugame)

[2Fa03] Electronic properties of ultrathin Bi_2Te_3 films grown on CaF_2(111)
*shinichiro hatta[1], shinpei higaki[1], hiroshi okuyama[1], tetsuya aruga[1] (1. Kyoto university)
9:00 AM - 9:15 AM

[2Fa04] Thickness-dependence of van Hove singularity in Li-intercalated graphene
*Satoru Ichinokura[1], Masayuki Toyoda[1], Mizuki Hashizume[1], Kentaro Horii[1], Syotaro Kusaka[1], Shin-ichiro Ideta[2], Kiyohisa Tanaka[2], Ryota Shimizu[3], Taro Hitosugi[3], Susumu Saito[1], Toru Hirahara[1] (1. Department of Physics, Tokyo Institute of Technology, 2. UVSOR Facility, Institute for Molecular Science, 3. Department of Applied Chemistry, Tokyo Institute of Technology)
9:15 AM - 9:30 AM

[2Fa05] Study of layer-dependent dynamics of Dirac Fermions in quasi-crystalline bilayer graphene by *concerting* usages of positron diffraction and time-resolved photoemission spectroscopy
*iwao matsuda[1], Yuhao Zhao[1], Yuki Fukaya[2] (1. the University of Tokyo, 2. Japan Atomic Energy Agency)
9:30 AM - 9:45 AM

[2Fa06] Evolution of atomic and electronic structure of double-layer In by Mg deposition
*Shigemi Terakawa[1], Shinichiro Hatta[1], Hiroshi Okuyama[1], Tetsuya Aruga[1] (1. Graduate School of Science, Kyoto University)
9:45 AM - 10:00 AM

[2Fa07] The electronic structure of PdCu surface alloy
*Kei Nagatomo[1], Nanao Morii[1], Takushi Iimori[2], Fumio Komori[1], Hiroyuki Hirayama[3], Kan Nakatsuji[1] (1. Department of Material Science and Engineering,Tokyo Institute of Technology, 2. Institute for Solid State Physics, University of Tokyo, 3. Department of Physics ,Tokyo Institute of Technology)
10:00 AM - 10:15 AM

Room C

Surface Science(SS1) Physical Property

[2Cp01-06] SS1

Chair:Shunsuke Yoshizawa(NIMS)
1:30 PM - 3:00 PM Room C (Takamatsu)

[2Cp01] Real-space studies of single-molecule reactions induced by localized surface plasmons
*emiko kazuma[1] (1. RIKEN)
1:30 PM - 2:00 PM

[2Cp03] Investigation of Low-dimensional Si Structures on Ag(111) by Scanning Probe Microscopy
*Lingyu Feng[1], Keisuke Yabuoshi[1], Jo Onoda[3], Akitoshi Shiotari[1], Masahiro Fukuda[2], Taisuke Ozaki[2], Yoshiaki Sugimoto[1] (1. Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, 2. Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo, 3. University of Alberta)
2:00 PM - 2:30 PM

[2Cp05R] Observation of STM-luminescence induced by THz-field-driven tunneling electrons
*kensuke kimura[1], Yuta Morinaga[2], Hiroshi Imada[1], Ikufumi Katayama[2], Kanta Asakawa[2], Katsumasa Yoshioka[2], Yousoo Kim[1], Jun Takeda[1,2] (1. Cluster for pioneering research, RIKEN, 2. Graduate school of engineering science, Yokohama National University)
2:30 PM - 2:45 PM

[2Cp06] Nano-scale imaging of optical property of pentacene thin-film by Photoinduced Force Microscopy
*Kanata Fukuzawa[1], Tatsuya Yamamoto[1], Kazuki Saito[1], Yasuhiro Sugawara[1] (1. Graduate School of Engineering, Osaka University)
2:45 PM - 3:00 PM

Surface Science(SS1) Physical Property

[1Ca02-12] SS1

Chair:(Waseda University), Shinichiro Hatta(Kyoto University)
Wed. Nov 3, 2021 9:15 AM - 12:00 PM Room C (Takamatsu)

[1Ca02R] Magnetism of epitaxial Fe nanofilms on three-dimensionally structuralized Si {111} facet surfaces

*Liliany Noviyanty Pamasi[1], Aydar Irmikimov[1], Yuya Sakai[1], Tomoya Shimizu[1], Haobang Yang[1], Nobuyoshi Hosoito[1], Azusa Hattori[2], Ai Osaka[2], Hidekazu Tanaka[2], Ken Hattori[1] （1. Nara Institute of Science and Technology, 2. Institute of Scientific and Industrial Research Osaka University）

9:15 AM - 9:30 AM

[1Ca03S] Electronic structure and magnetic properties of magnetic topological sandwich structures

*Ryushiro Fukushima[1], Kazuki Sumida[2], Yukiharu Takeda[2], Satoru Ichinokura[1], Toru Hirahara[1] （1. Tokyo Institute of Technology, 2. JAEA-SPring-8）

9:30 AM - 9:45 AM

[1Ca04Y] Observation of structure and electronic states of a single-layer Kondo lattice $CePt_6$/Pt(111)

*koichiro ienaga[1,2], Sunghun Kim[1,3], Toshio Miyamachi[1,4], Fumio Komori[1,5] （1. ISSP, the Univ. of Tokyo, 2. Dept. of Phys., Tokyo Tech., 3. KAIST, 4. ImaSS, Nagoya Univ., 5. IIS, the Univ. of Tokyo）

9:45 AM - 10:00 AM

[1Ca05] Visualization of charge density wave domains in 2H-$NbSe_2$ by STM

*Shunsuke Yoshizawa[1], Keisuke Sagisaka[1] （1. National Institute for Materials Science）

10:00 AM - 10:15 AM

[1Ca06] Superconducting state of nodal line semimetal NaAlSi studied by STM

*masahiro haze[1], Yudai Sato[1], Takahiro Yamada[2], Hisanori Yamane[2], Daigorou Hirai[1], Zenji Hiroi[1], Yukio Hasegawa[1] （1. University of Tokyo, 2. Tohoku University）

10:15 AM - 10:30 AM

[その他] Break time

10:30 AM - 10:45 AM

[1Ca08] Role of steps on superconductor-insulator transition in mono-atomic-layer metal films grown on semiconducting substrates

*Yudai Sato[1], Masahiro Haze[1], Shunsuke Yoshizawa[2], Takashi Uchihashi[2], Yukio Hasegwa[1] （1. The Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo, 2. National Institute for Materials Science）

10:45 AM - 11:00 AM

[1Ca09S] Transport properties of monolayer FeSe on Nb-doped $SrTiO_3$ substrate

*Koshiro Ide[1], Toshihiro Kobayashi[1], Tomoaki Tanaka[1], Satoru Ichinokura[1], Ryota Shimizu[2], Taro Hitosugi[2], Toru Hirahara[1] （1. School of Science, Tokyo Institute of Technology, 2. School of Materials and Chemical Technology, Tokyo Institute of Technology）

11:00 AM - 11:15 AM

[1Ca10S] Tuning the transition temperature of atomic-layer superconductor

*Kenta Yokota[1,2], Takahiro Kobayashi[3], Wenxuan Qian[1], Shunsuke Inagaki[3], Kazuyuki

©-

Sakamoto[3], Takashi Uchihashi[1,2] （1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. National Institute for Materials Science, 3. Graduate School of Engineering, Osaka University）

11:15 AM - 11:30 AM

[1Ca11R] Can we enhance diradical character using surface interactions?— A theoretical investigation using chemical indices

*Kohei Tada[1], Hiroyuki Ozaki[1], Koji Fujimaru[1,2], Yasutaka Kitagawa[3], Takashi Kawakami[2], Mitsutaka Okumura[2] （1. Research Institute of Electrochemical Energy, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 2. Graduate School of Science, Osaka University, 3. Graduate School of Engineering Science, Osaka University）

11:30 AM - 11:45 AM

[1Ca12S] How do viscoelastic objects begin to slide? -relation between precursor slip and friction coefficient-

*Wataru Iwashita[1], Hiroshi Matsukawa[2], Michio Otsuki[1] （1. Graduate School of Engineering Science, Osaka University, 2. College of Science and Engineering, Aoyama Gakuin University）

11:45 AM - 12:00 PM

Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2021

Magnetism of epitaxial Fe nanofilms on three-dimensionally structuralized Si{111} facet surfaces

○L. N. Pamasi[1], A. Irmikimov[1], Y. Sakai[1], T. Shimizu[1], H. Yang[1], N. Hosoito[1], A. N. Hattori[2], A. I. Osaka[2], H. Tanaka[2], and K. Hattori[1*]

[1]Nara Institute of Science and Technology, [2]Institute of Scientific and Industrial Research Osaka University

In nanostructured magnetic materials, such as ferromagnetic nanofilms, the magnetic behavior is widely determined by the interaction of the magnetization with its shape, by fabricating thin-film patterns with controlled boundaries between ferromagnetic regions, such as disks and squares, characteristic in-plane magnetic moment distributions such as magnetic vortices can be created [1,2]. In this case, the magnetic interaction is restricted to the flat surface. On the other hand, in ferromagnetic nanofilms on three-dimensional structures such as pyramids, the creation of various magnetically stable structures such as symmetric and asymmetric magnetic vortices depending on the three-dimensional pyramid's size and thickness of the film is predicted from Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) simulations have been predicted [2]. However, so far, there is no successful experimental demonstration have been obtained due to the difficulty in fabricating micro- and nano-sized 3D nanofilms with high accuracy [2].

Our group has successfully fabricated pyramidal structures with Si{111} clean faceted surfaces (edge width $\boldsymbol{W}$ 16 μm) on Si(001) substrate by combining Si substrate processing technology and ultra-high vacuum surface technology, and performed Fe deposition (film thickness $\boldsymbol{\Theta_{Fe}}$ 30 nm). The magnetization field (*M-H*) curve of the pyramid-shaped Fe nanofilm controlled with atomic precision was measured by vibrating sample magnetometer, and the characteristic of the *M-H* curve (bending point due to stable magnetic vortex formation) predicted by LLG was observed (Fig. 1) [3].

In the present study, in order to further understand the magnetic behavior of three-dimensional magnetic nanofilms, we have investigated 1) the thickness dependence of Fe film ($\boldsymbol{\Theta_{Fe}}$ = 30-150 nm) in the pyramidal structure ($\boldsymbol{W}$ 16 μm), 2) the aspect ratio dependence of the pyramidal structure with different length ($\boldsymbol{L}$) and fixed width ($\boldsymbol{W}$), that is, the facet line structure (Fig. 2, $\boldsymbol{W}$ 16 μm, $\boldsymbol{L}$ / $\boldsymbol{W}$ = 1-10, $\boldsymbol{\Theta_{Fe}}$ 150 nm) were measured. In this talk, we will report the details.

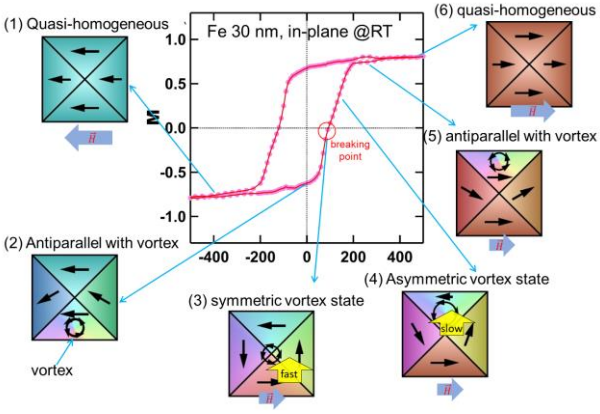

Fig. 1. *M-H* curves of pyramidal Fe nanofilms.

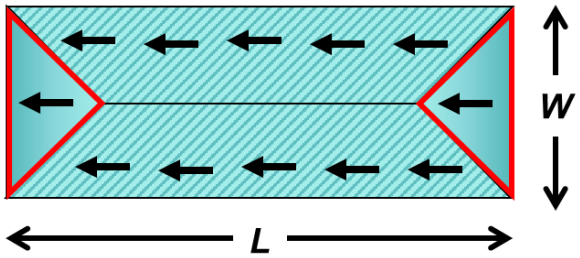

Fig. 2. Facet line structure with different aspect ratio (L/W).

References

1) A. Knittel et al., New. J. Phys. **12**, 113048 (2010).
2) R. P. Cowburn et al., Phys. Rev. Lett. **83**, 1042 (1999).
3) A. Irmikimov, L. N. Pamasi, K. Hattori, et al., ACS Cryst. Growth Des. **21**, 946 (2021).

*E-mail: khattori@ms.naist.jp

©The Japan Society of Vacuum and Surface Science

磁性トポロジカル絶縁体サンドウィッチ構造の電子状態と磁化特性

◯福嶋隆司朗 [1], 角田一樹 [2], 竹田幸治 [2], 一ノ倉聖 [1], 平原徹 [1]
[1] 東工大理, [2]JAEA-SPring-8

Electronic structure and magnetic properties of magnetic topological sandwich structures

◯R. Fukushima1, K. Sumida[2], Y. Takeda[2], S. Ichinokura[1] , T. Hirahara[1*],
[1]Dept. Phys., Tokyo Tech., [2]JAEA-SPring-8

トポロジカル絶縁体（TI）に磁性を導入し時間反転対称性(TRS)を破ると表面ディラックコーンにギャップが開き、フェルミ準位がギャップ内にあれば、量子異常ホール効果(QAHE)などの現象が発現する[1]。我々は、このような磁性トポロジカル絶縁体で QAHE を高温で実現させることを目指している。

これまでの研究でトポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 に Mn と Se を同時蒸着すると表面最上位層が磁性絶縁体 $MnBi_2Se_4$ になることがわかり、$MnBi_2Se_4$/ Bi_2Se_3 ヘテロ構造が開拓された[2](図左)。この系では Mn 原子層挿入による TI の磁気拡張によって TRS が破られており、ディラックコーンのギャップが確かに TRS 由来であることが明らかになっている。ただ、ヘテロ構造では Bi_2Se_3 の下面に強磁性が到達しないため、基板との界面でギャップレスな状態が残り、QAHE の発現の妨げになる。

そこで本研究では、通常のヘテロ構造から、TI を磁性層で挟んだサンドウィッチ構造(ダブルヘテロ構造)へ発展させ、下面にも強磁性層を作ることを試みた(図右)。さらに二次元磁性体という観点からは、二つの磁性層の磁気的相互作用については未解明であり、それを調べることも興味深い。Bi_2Se_3 の上下に $MnBi_2Se_4$ を接合させた $MnBi_2Se_4$/*n*-QL Bi_2Se_3/$MnBi_2Se_4$ サンドウィッチ構造を作製し、層数 *n* が異なるサンプルを用意した。角度分解光電子分光により、層数 *n* が 0-3 のサンドウィッチ構造ではヘテロ構造に比べて大きなギャップが観測され、*n* が大きくなるとヘテロ構造の場合のギャップサイズに近づいていった。また X 線磁気円二色性測定により、層数 *n* が 0,1,2,3,6 のサンドウィッチ構造ではキュリー温度がヘテロ構造より高くなり、Mn 層間の磁気相互作用が強磁性状態を安定化させていることが明らかになった。

[1]C. Z. Chang *et al*., Science **340**, 167 (2013).
[2]T. Hirahara *et al*., Nano Lett. **17**, 3493 (2017).

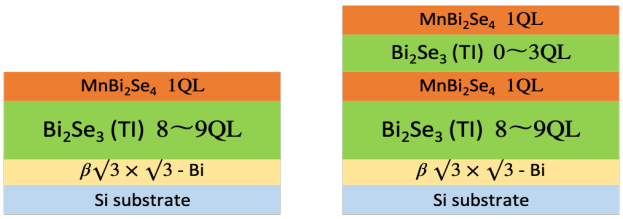

図 ： 磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ構造（左）とサンドウィッチ構造（右）の模式図

hirahara@phys.titech.ac.jp

©公益社団法人 日本表面真空学会

Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2021

単層近藤格子 $CePt_6$/Pt(111)の構造評価と電子状態観測

○家永紘一郎 [1,2*]，金聖憲 [1,3]，宮町俊生 [1,4]，小森文夫 [1,5]

[1] 東京大学物性研究所，[2] 東京工業大学理学院，[3] 韓国科学技術院，[4] 名古屋大学未来材料・システム研究所，[5] 東京大学生産技術研究所

Observation of structure and electronic states of a single-layer Kondo lattice $CePt_6$/Pt(111)

○Koichiro Ienaga[1,2*], Sunghun Kim[1,3], Toshio Miyamachi[1,4], and Fumio Komori[1,5]

[1]ISSP, the Univ. of Tokyo, [2]Dept. of Phys., Tokyo Tech., [3]KAIST, [4]ImaSS, Nagoya Univ., [5]IIS, the Univ. of Tokyo

表面構造パラメータに依存した電子磁気特性を解明することは表面物理の重要なテーマである．Ce系，U系化合物に代表される近藤格子系では，外部圧力や元素置換により格子定数を変化させることで，*f*電子軌道と伝導電子の混成の強さに応じた多彩な電子相関現象が報告されている．これらの物質群に対してエピタキシャル成長を用いることで，膜厚制御によって電子状態が劇的に変わることが近年明らかにされてきた[1].

そこで我々は，Ce系合金である$CePt_5$に着目した．バルク$CePt_5$結晶はPt_3カゴメ格子層と$CePt_2$六角格子層の積層からなり，1.0 K以下で反強磁性秩序を示す．一方でPt(111)基板上へ成長した多層膜$CePt_5$/Pt(111)では，20 K以下でコヒーレント近藤状態を形成することが角度分解光電子分光によって示唆されている[2]．多層膜では膜厚に依存して様々な超構造を形成することが報告されているが[3]，特に単層膜の成長可能性や構造に関してはコンセンサスが得られておらず，詳細な電子状態観測の報告もない．単層膜による２次元近藤格子が実現すれば，Au(111)基板上に自己集積したFe(II)フタロシアニン分子による2次元近藤格子[4]のように，*f*電子磁性イオンの配置制御が可能な新たな実験舞台となると期待される．

本研究では単層膜をエピタキシャル成長させ，走査トンネル顕微鏡/分光を用いて構造と電子状態の観測を行なった[5]．試料はPt(111)清浄表面へのCe室温蒸着とアニールにより作製された．原子分解能での構造観察の結果，Pt(111)基板と整合する(2×2)構造が観測され，最表面にはPt_3層に余剰なPt原子が付加されたPt_4層の存在が確認された．(2×2)の構造変調は，Pt(111)基板の上にバッファ層としてPt_3カゴメ格子層があり，その上に$CePt_2$層，最表面にPt_4層があるという積層モデルによって再現され，第一原理計算で予想されたものと一致した[6]. 5Kでトンネル分光による準粒子干渉測定を実施したところ，Pt(111)の非占有表面状態と同様の分散を持ち，低エネルギー側へシフトした電子状態が観測された．これは， Pt(111)と同じ原子密度を持つ最表面Pt_4層が，下地の$CePt_2$層からの電荷移動を受けたものと解釈される．さらに，フェルミエネルギー付近で実施したトンネル分光測定では，近藤共鳴と混成ギャップとして解釈可能なゼロバイアス異常が観測され，単層膜でもコヒーレント近藤状態の形成が示唆された．

*E-mail: ienaga.k.aa@m.titech.ac.jp

文　献

1) H. Shishido, T. Shibauchi, K. Yasu, T. Kato, H. Kontani, T. Terashima, Y. Matsuda, Science **327**, 980 (2010).
2) M. Klein A. Nuber, H. Schwab, C. Albers, N. Tobita, M. Higashiguchi, J. Jiang, S. Fukuda, K. Tanaka, K. Shimada, M. Mulazzi, F. F. Assaad, and F. Reinert, Phys. Rev. Lett. **106**, 186407 (2011)
3) J. Kemmer, C. Praetorius, A. Krönlein, P.-J. Hsu, K. Fauth, and M. Bode, Phys. Rev. B **90**, 195401 (2014).
4) N. Tsukahara, S. Shiraki, S. Itou, N. Ohta, N. Takagi, and M. Kawai, PRL **106**, 187201 (2011).
5) K. Ienaga, S. Kim, T. Miyamachi, and F. Komori, submitted to Phys. Rev. B
6) P. Tereshchuk, M. J. Piotrowski, and J. L. F. Da Silva, RSC Adv. **5**, 521 (2015).

©公益社団法人 日本表面真空学会

Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2021

STM による 2H-$NbSe_2$ の電荷密度波ドメインの可視化

○吉澤 俊介 [1*], 鷺坂 恵介 [1]

[1] 物質・材料研究機構

Visualization of charge density wave domains in 2H-$NbSe_2$ using STM

○Shunsuke Yoshizawa[1*] and Keisuke Sagisaka[1]

[1]National Institute for Materials Science

遷移金属ダイカルコゲナイド 2H-$NbSe_2$ は、33 K で格子不整合な電荷密度波（CDW）転移を示し [1)]、7.2 K で超伝導転移を示す。層状構造を有し、劈開により清浄表面が容易に得られるため、極低温 STM による CDW の観察もよく行われている。そのため、CDW の観察自体に真新しさはあまり無いが、今日でも新しい発見が報告されている。たとえば比較的最近の STM 研究 [2)]によると、2H-$NbSe_2$ の CDW は局所的には hollow centered（HC）ドメインと anion centered（AC）ドメインとよばれる格子整合な 2 種類の 3×3 構造からなる。そして HC ドメインは変調の位相の違いによってさらに 9 種類に区別され、それらが AC ドメインのハニカム状ネットワークによって仕切られているという、興味深いドメイン構造をなしていることが報告されている。しかし、この描像が提示されるにあたって、HC ドメイン（9 種類）と AC ドメイン（1 種類）が非対称に取り扱われている点、ドメイン構造の抽出が（おそらく）目視で行われている点で、解析の仕方に改善の余地がある。また、格子整合に近い不整合 CDW が discommensuration と呼ばれるドメイン境界を介して位相の異なる整合領域に分離することは以前から知られており [3)]、2 次元 CDW に関してもランダウ理論の枠組みで理論研究が行われているが [4)]、それとの関係も明らかでない。

そこで 2H-$NbSe_2$ の CDW をより正確に理解するため、先に述べた問題を解消する研究を行った。極低温 STM により 2H-$NbSe_2$ の CDW 状態の観察を行い（Fig. 1）、得られた原子分解能イメージをフーリエ変換ないし畳み込み演算を利用する微小変位抽出の手法 [4,5)]を使って処理することで、CDW のドメイン構造について恣意性をできるだけ排除した解析を行った。その結果、先行研究 [2)]で HC ドメインと AC ドメインと呼ばれていた領域が三角形タイリングを構成しており、さらに各ドメインを整数値の組により統一的に指数付けできることを明らかにした。この結果は、70～80 年代の STM が発明される以前に主に行われた理論研究 [4)]で予測されたタイリング構造をよく再現する。

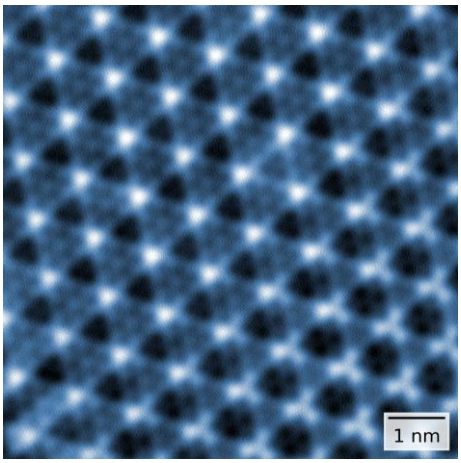

Fig. 1. 2H-NbSe2 劈開面の STM イメージ。温度 4.5 K、試料バイアス 100 mV、トンネル電流 100 pA で測定。

文　献

1) D. E. Moncton, J. D. Axe, and F. J. DiSalvo, Phys. Rev. Lett. 34, 734 (1975).
2) G. Gye, E. Oh, and H. W. Yeom, Phys. Rev. Lett. 122, 016403 (2019).
3) W. L. McMillan, Phys. Rev. B 14, 1496 (1976).
4) H. Shiba and K. Nakanishi, In K. Motizuki (ed.), Structural Phase Transitions in Layered Transition-metal Compounds (Reidel, 1986).
5) M. J. Hÿtch, E. Snoeck, R. Kilaas, Ultramicroscopy 74, 131 (1998).
6) M. J. Lawler, K. Fujita, J. Lee , A. R. Schmidt, Y. Kohsaka, C. K. Kim, H. Eisaki, S. Uchida, J. C. Davis, J. P. Sethna, and E. -A. Kim, Nature 466, 347 (2010).

*E-mail: YOSHIZAWA.Shunsuke@nims.go.jp

©公益社団法人 日本表面真空学会

Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2021

STM によるラインノード半金属 NaAlSi の超伝導状態測定

○土師将裕 [1*]，佐藤優大 [1]，山田高広 [2]，山根久典 [2]，平井大悟郎 [1]，
広井善二 [1]，長谷川幸雄 [1]

[1] 東京大学物性研究所，[2] 東北大学多元物質科学研究所

Superconducting state of nodal line semimetal NaAlSi studied by STM

○M. Haze[1*], Y. Sato[1], T. Yamada[2], H. Yamane[2], D. Hirai[1], Z. Hiroi[1],
and Y. Hasegawa[1]

[1]Institute for solid state physics, University of Tokyo, [2]Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University

1. はじめに

トポロジカル絶縁体の発見以降、ワイル半金属、ディラック半金属など、様々な種類のトポロジカルに非自明な物質が提案されてきた。これらのトポロジカルな状態は、超伝導と結びつくことにより、マヨラナ粒子を始めとした新奇な物理現象のプラットフォームとなりうる。

近年、NaAlSi は伝導帯と価電子帯がブリルアンゾーンの線上で交差するギャップレスな電子系を持つラインノード半金属であることが示され、比較的高い温度(7K)で超伝導転移を示すことが報告された[1,2]。一方で、NaAlSi は走査トンネル顕微鏡(STM)を用いた表面研究が行われておらず、どのような電子状態が実現しているかは明らかではない。

2. 目的

本研究では、極低温走査トンネル顕微鏡測定によって NaAlSi で実現している電子状態を明らかにすることを目的としている。

3. 測定結果

NaAlSi 表面は、清浄表面を得るために、超高真空・極低温中でへき開することにより準備した。図(a)に示すように非常に広い平坦な表面がへき開によって得られ、原子分解能イメージングにより、Si 原子が可視化された。図(b)にフェルミ面近傍で取得した dI/dV スペクトルを示す。ここから、フェルミ面に対して対称なギャップが開いていることが確認され、Dynes 関数による解析から超伝導ギャップであるという結論を得た。さらに詳細な解析から、多バンド超伝導が実現している可能性が示された。

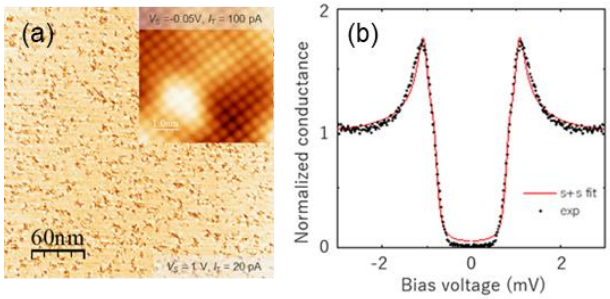

Fig. 1. 図 (a) STM トポグラフ像
(b) フェルミ面付近での dI/dV スペクトル

講演では、波数空間とエネルギーの分散関係を測定する準粒子干渉測定を本試料に適用した結果や、超伝導ギャップの空間・磁場依存性を詳細に測定した結果を用いて、トポロジカルな状態と超伝導状態について詳しい議論を行う予定である。

文　献

1) L. Muechler et al., APL Materials 7, 121103 (2019).
2) T. Yamada et al., J. Phys. Soc. Jpn. 90, 034710 (2021).

*E-mail: haze@issp.u-tokyo.ac.jp

©公益社団法人 日本表面真空学会

10:30 AM - 10:45 AM (Wed. Nov 3, 2021 9:15 AM - 12:00 PM Room C)

[その他] Break time

©-

Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2021

半導体基板上に形成された金属単原子層薄膜の超伝導絶縁体転移におけるステップの影響

○佐藤 優大[1*], 土師 将裕[1], 吉澤 俊介[2], 内橋 隆[2], 長谷川 幸雄[1]

[1]東京大学物性研究所, [2]物質・材料研究機構

Role of steps on superconductor-insulator transition in mono-atomic-layer metal films grown on semiconducting substrates

○Yudai Sato[1*], Masahiro Haze[1], Shunsuke Yoshizawa[2], Takashi Uchihashi[2] and Yukio Hasegawa[2]

[1]The Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo, [2]National Institute for Materials and Science

二次元超伝導体では、磁場印加により、超伝導絶縁体転移(superconductor-insulator transition; SIT)を示す。これは、絶対零度でも生じる量子相転移の一つであり、その多くは、量子位相揺らぎの結果として生じるボソン的シナリオで説明されている[1]。ボゾン的シナリオでは、超伝導相では、クーパー対は凝縮し渦糸は局在する一方で、絶縁相では、クーパー対が局在し渦糸は凝縮する。また、転移温度や転移磁場が、不純物や欠陥などの乱れによって変化することが知られている。二次元超伝導体は乱れに極めて敏感なため、わずかな乱れの導入であっても、SIT の振る舞いに変化が現れることが期待される。

近年、結晶性が高く乱れの少ない二次元超伝導体において、絶対零度近傍において、磁場印加により異常な金属状態の出現が報告されている[2]。異常金属状態は、絶対零度近傍での温度依存しない残留抵抗として検出される。しかしながら、SIT のほとんどの先行研究は電気伝導測定をはじめとする巨視的手法が用いられており、クーパー対が局在した相や異常金属相の微視的視点の研究は不十分である。したがって、超伝導の微視的研究の強力な手法である走査トンネル顕微鏡(STM)による研究が不可欠である。一方で、磁場中での STM による電子状態測定から SIT を議論する研究[3]も報告されているものの、いずれも乱れの強い系に対するものであり、異常金属状態が起こるとされる乱れの弱い系および、その乱れを制御した系での SIT を STM により観測した報告はない。

我々はこれまで、Si(111)表面上の Pb 単原子層薄膜の超伝導特性を電気伝導測定および STM 観察によって評価しており[4]、この系が異常金属状態が発現する結晶性の高い系であり、加えて、ステップが乱れとして機能することを明らかにしている。さらなる解析の結果、結晶性の高い系の特徴である異常金属状態を含む磁場誘起 SIT の振る舞いが、ステップ密度に依存することが判明した。興味深いことに、ステップ密度が大きい試料では、ステップ密度が小さい場合とは異なり、軌道対破壊臨界磁場よりも高い磁場で超伝導ギャップが残る。この結果から、ステップ密度の増大によって、クーパー対が局在したボゾン的 SIT が実現していることが推測される。

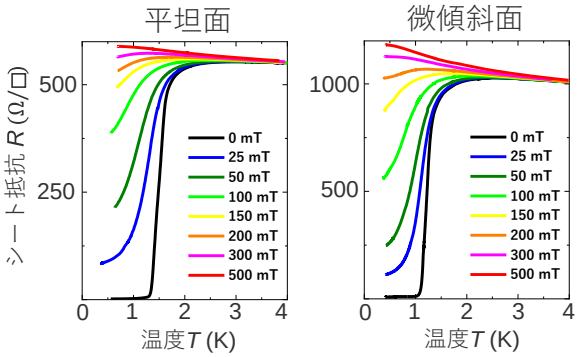

Fig. 1. Si(111)平坦面(左)および微傾斜面(右)上の Pb 単原子層薄膜の磁場中の電気抵抗の温度依存性

文　献

1) Matthew P. A. Fisher, *et al*., Phys. Rev. B **40**, 546 (1989).
2) K. Ienaga, *et al*., Phys. Rev. Lett. **125**, 257001 (2020).
3) M. Žemlička, *et al*., Phys. Rev. B **88**, 180508(R) (2020).
4) 佐藤優大, *et al*., 2020 年表面真空学会 学術講演会, 2Ba05S (2020)

*E-mail: ysatoissp@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

©公益社団法人 日本表面真空学会

Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2021

Nb ドープ $SrTiO_3$ 上の単層 FeSe の電気伝導特性

○出 高志朗[1]，小林 俊博[1]，田中 友晃[1]，一ノ倉 聖[1]，
清水 亮太[2]，一杉 太郎[2]，平原 徹[1*]

[1] 東京工業大学理学院，[2] 東京工業大学物質理工学院

Transport properties of monolayer FeSe on Nb-doped $SrTiO_3$ substrate

○Koshiro Ide[1] , Toshihiro Kobayashi[1], Tomoaki Tanaka[1], Satoru Ichinokura[1],
Ryota Shimizu[2], Taro Hitosugi[2], Toru Hirahara[1*]

[1] *Dept. of Phys., Tokyo Institute of Technology,*
[2]*School of Materials and Chemical Technology, Tokyo Institute of Technology*

鉄系超伝導体の一つである FeSe はバルクでは超伝導転移温度(T_c)が 8 K である。単一ユニットセルの厚さの FeSe の薄膜(単層 FeSe)を Nb ドープされた $SrTiO_3$(Nb-STO)基板上に成長させると T_c が大幅に上昇することが知られている。超伝導体を薄膜化すると T_c は減少するのが普通なので、これは特異な振る舞いであるが、これまでに報告された T_c は 65 K~109 K とばらついている[1,2]。この T_c の上昇には FeSe と STO の界面が重要な役割を果たすと言われているが、その微視的起源に関する統一的見解は得られておらず、T_c のバラツキの原因も明らかではない。我々はこれを解明するため、STO 基板の表面超構造依存性 [3]や STO 基板のドープ量に着目して研究を行っている。以前、超高真空中での電気伝導測定により絶縁 STO 基板上の FeSe 単層膜において T_c = 40 K の超伝導を検出した[4]。この T_c の値は Nb-STO 基板上の FeSe 単層膜で報告されているものより低いため[2]、本研究では Nb-STO 上 FeSe 単層膜について in situ 電気伝導測定を行った。

導電性基板への変更に伴い、超伝導転移を常伝導状態が mΩ オーダーの抵抗変化から検出する必要が生じた。そのため、まず測定回路とプログラムの改良を行い、抵抗測定の精度を 1mΩ まで向上させ、10 mK 以下の間隔で温度依存性が測定できるようにした。これを用いた測定例として図 1(a)に 10 nm の Nb 薄膜の抵抗の温度依存性を示す。超伝導転移に伴い、4.5 K から急激に抵抗が減少し、3.6 K にて検出限界以下まで抵抗が減少する様子を観測できた。さらに、Dual configuration 法[5]を自動で行うことのできる回路を作成し、Nb-STO 基板上単層 FeSe 薄膜の測定を行った結果を図 1(b)に示す。約 40 K 以下で急激に抵抗が減少した。講演では、この変化が超伝導転移であるか否か、電流-電圧測定や角度分解光電子分光の結果も用いて議論する。

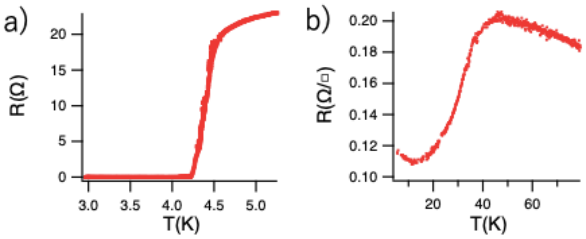

Fig. 1. (a)10 nm の厚さの Nb 薄膜の抵抗-温度曲線。(b) 1 UC FeSe/Nb-STO の面抵抗-温度曲線。

文　献

[1] W. Qing-Yan *et al.,* Chin. Phys. Lett. **29,** 037402 (2012).
[2] J.-F. Ge *et al.,* Nat. Mat. **14,** 285 (2015).
[3] T. Tanaka *et al.,* Phys. Rev. B **98,** 121410(R) (2018); Phys. Rev. B **101,** 205421 (2020).
[4] A. Pedersen *et al.,* Phys. Rev. Lett. **124,** 227002 (2020).
[5] M. Yamada *et al.*, e-J. Surf. Sci. Nanotechnol. **10,** 400−405 (2012).

*E-mail: ide@surfnano.titech.ac.jp

©公益社団法人 日本表面真空学会

Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2021

有機分子蒸着による Si(111)-(√7×√3)-In 超伝導転移温度の変化

○横田 健太 [1,2], 小林宇宏 [3], Wenxuan Qian[1], 稲垣俊輔 [3], 坂本一之 [3], 内橋 隆 [1,2*]

[1] 北海道大学大学院理学院, [2] 物質・材料研究機構, [3] 大阪大学大学院工学研究科

Tuning the transition temperature of atomic-layer superconductor

○Kenta Yokota [1], Takahiro Kobayashi[3], Wenxuan Qian[1], Shunsuke Inagaki[3], Kazuyuki Sakamoto[3], and Takashi Uchihashi[1,2*]

[1] Hokkaido University, [2] National Institute for Materials Science, [3] Osaka University

近年、グラフェンや SrTi03 基板上の FeSe などの原子層物質の研究が盛んに行われている[1]。このような低次元電子構造を有する系は表面・界面に対して非常に敏感であり、表面上に異種の物質を蒸着し、電荷移動や交換相互作用などの近接効果を利用することで物性を変化させることが可能である[2]。本研究ではシリコン基板表面上のインジウム原子層超伝導体上に PTCDA 分子を蒸着し、各蒸着量における超伝導転移温度(Tc)の変化を調べた。Tc は多元極限環境下（超高真空 ：～2.0 × 10^{-11} mbar・極低温 ：～1.7 K）において、電子輸送測定を行うことで決定した。Si(111)-(√7×√3)-In は Si 基板上にエピタキシャル成長した In 2 原子層による表面超構造をもつ原子層物質であり、およそ 3 K で超伝導転移する[3]。 明確な金属的な電子バンドが存在し、複雑な相関効果を無視して議論することができる。In 原子層上に PTCDA 分子を蒸着すると蒸着量に応じて Tc が減少した(Fig.1A)。走査トンネル顕微鏡(STM)を用いて吸着構造を調べたところ、PTCDA 分子は In 層を壊して配列していた。これが Tc が減少した原因であると考えられる。また、我々は In 原子層上に ZnPc 分子を蒸着し、同様に Tc の変化を調べた。また、我々は In 原子層上に ZnPc 分子を蒸着し、同様に Tc の変化を調べた。ZnPc を蒸着すると PTCDA 分子の場合とは異なり、Tc は最大でおよそ 0.3 K 上昇した(Fig.1B)。STM の結果から ZnPc は In 原子層を壊すことなく、規則的に配列していることがわかった。ZnPc の場合では In 原子層と弱いながらも有限の相互作用を示し、電荷移動効果によって転移温度が上昇したと考えられる。詳細は当日報告する。。

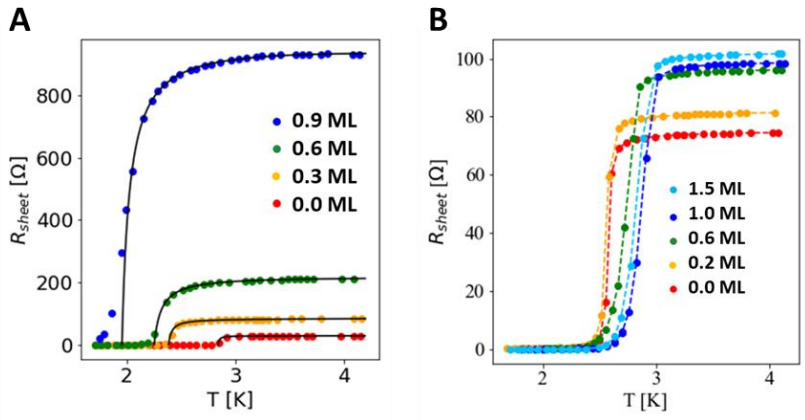

Fig.1 分子蒸着による In 原子層の Tc 変化 (A) PTCDA 蒸着。(B) ZnPc 蒸着。

参考文献

1) T. Uchihashi, Supercond. Sci. Technol. **30**, 013002 (2017). 2) S. Yoshizawa et al., Nano Lett. **17**, 2287 (2017).
3) T. Uchihashi et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 207001 (2011).

*E-mail: YOKOTA.Kenta@nims.go.jp

©公益社団法人 日本表面真空学会

Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2021

表面相互作用によるジラジカル性変調に関する理論研究

○多田 幸平[1*], 尾崎 弘幸[1*], 藤丸 航志[1,2], 北河 康隆[3], 川上 貴資[2], 奥村 光隆[2]

[1] 産業技術総合研究所電池技術研究部門, [2] 大阪大学大学院理学研究科, [3] 大阪大学大学院基礎工学研究科

Can we enhance diradical character using surface interactions?—A theoretical investigation using chemical indices

○Kohei Tada[1*], Hiroyuki Ozaki[1], Koji Fujimaru[1,2], Yasutaka Kitagawa[3], Takashi Kawakami[2], and Mitsutaka Okumura[2]

[1]Research Institute of Electrochemical Energy, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, [2]Department of Chemistry, Graduate School of Science, Osaka University, [3]Department of Materials Engineering Science, Graduate School of Engineering Science, Osaka University

分子の分解過程において生じるジラジカル状態とよばれる電子状態の詳細検討は量子化学分野における重大な研究トピックスの一つである[1,2]。このジラジカル状態は開殻電子状態の一つであり、酵素の活性中心や単分子磁石、安定有機ラジカルや複核錯体など様々な材料にあらわれ、その物性の根源となっている[2]。近年、このジラジカル状態の特異性を分子デバイスとして確立すべく、ジラジカル分子の表面固定化が試みられている。しかしながら、実践例は未だ少なく理論計算に基づくデータ駆動型の設計が望まれている。一方で、固体表面の理論計算で一般的に用いられる密度汎関数平面波法（DFT/plane-wave 法）によるバンド計算結果からジラジカル分子の特性を理解・解析する手段は未だ確立されておらず、データ駆動型のジラジカル修飾表面デバイス研究の実行を妨げている。本研究では、このような現状を打破すべく、DFT/plane-wave 法の標準出力から簡便にジラジカル分子の特徴量を計算する近似手法を提案する[3]。この近似精度は量子化学計算による定義に基づく算出値と比較することで確かめられた。そして、開発手法を用いてジラジカル分子の性質が表面で変調する可能性を理論的に検討した。

ジラジカル状態の特徴量として最も広く利用されているのが、ジラジカル性である。ジラジカル性は 2 電子励起配置の寄与として定義されており、量子化学計算で求まる軌道占有数を用いて解析的に求まる（理論値）[2]。他方、我々は DFT/plane-wave 法の標準出力でもある電荷密度分布より近似的に算出する方法を見出した（近似値）[3]。Fig. 1(a)は開発手法で計算したジラジカル性の近似値を理論値に対してプロットした結果であり、それらは非常に良い一致を示す。Fig. 1(b)

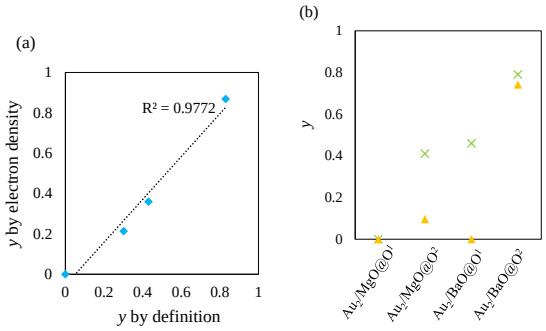

Fig. 1. (a) ジラジカル性（y）の理論値と近似値（開発手法）の比較。最小二乗による傾きは 1.062, R^2 は 0.9772 であった。(b) 表面（MgO (001), BaO (001)）吸着前後のモデルジラジカル（金二量体）のジラジカル性。@O^1, @O^2 は吸着サイトの違いを示すインデックス。×が吸着後の値で、△が吸着前の値。

はモデルジラジカル分子のジラジカル性を表面吸着の有無で比較した結果である。採用したジラジカル分子は金二量体、吸着表面は MgO (001) と BaO (001) である。表面相互作用によりジラジカル性が増幅されている。金二量体と表面の間に電荷移動は確認されず、この増幅効果は酸化物アニオンによる磁性軌道に対する分極誘起であることが確認された。当日では、具体的な計算式とともに他の特徴量の結果も発表する。

文　献

1) A. Szabo and N.S. Ostlund. Modern Quantum Chemistry, (Dover Publications, 1996).
2) T. Stuyver, B. Chen, T. Zeng, P. Geerlings, F. De Proft, R. Hoffinann, Chem. Rev., **119**, 11291 (2019).
3) K. Tada, Y. Kitagawa, T. Kawakami, M. Okumura, S. Tanaka, Chem. Lett., **50**, 392 (2021).

*E-mail: k-tada@aist.go.jp

©公益社団法人 日本表面真空学会

Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2021

粘弾性体はどうやって滑りだすか —前駆滑りと摩擦係数の挙動—

○岩下 航[1*]，松川 宏[2]，大槻 道夫[1]

[1] 大阪大学大学院基礎工学研究科， [2] 青山学院大学理工学部

How do viscoelastic objects begin to slide? –relation between precursor slip and friction coefficient–

○Wataru Iwashita[1*], Hiroshi Matsukawa[2], and Michio Otsuki[1]

[1]Osaka University, [2]Aoyama Gakuin University

せん断力が最大静摩擦力を超えたとき，固体は滑りだす。アモントン則によると，最大静摩擦力は荷重に比例し，見かけの接触面積には依存しない。すなわちアモントン則は，摩擦力と荷重の比である摩擦係数が圧力や物体のサイズによらないことを示している。しかし，近年の研究では，弾性変形をする物体の場合，系全体の滑りの前に発生する前駆滑りによってアモントン則が破れることが明らかになっている [1, 2)]。ただし，先行研究の解析は 2 次元系に限定されており，より現実的な 3 次元系に適用できるかは明らかではない。そこで，本研究では，より一般的な粘弾性体での滑りの発生を調べるために，有限要素法（FEM）を用いた数値計算により，基板上の 3 次元物体の滑り運動を調べた。

本研究では，Fig. 1 に示したような基板上の粘弾性体ブロックの有限要素法による数値計算を行った。ブロックの長さをL，幅をW，高さをH，ヤング率をEとする。上面には一様圧力P_{ext}を加える。そして，底面から高さhの側面の中心を，剛体棒によってy方向に十分ゆっくり一定速度で押す。底面には，局所的にアモントン則に従うと仮定して摩擦力を与える。局所的な静摩擦係数と動摩擦係数はそれぞれμ_{S}とμ_{K}とする。

物体は巨視的に Stick-Slip 運動をし，その摩擦力の時間変化から巨視的な静摩擦係数μ_{M}が決まる。μ_{M}のP_{ext}とWに対する変化を Fig. 2 に示した。P_{ext}とWが増加すると，μ_{M}は減少しており，アモントン則の破れが見られる。また，物体と基板間の 2 次元界面では前駆滑りの発生が確認され，前駆滑りが臨界サイズに達したときにバルク滑りが起こることが分かった。

これらの結果を理論的に理解するために 1 次元有効モデルの解析を行った。このモデルではz方向とx方向の変位を無視し，x方向に依存するy方向の変位のみを考慮する。このモデルは定性的に 3 次元 FEM 計算での結果を再現する。解析の結果，速度弱化の摩擦力と粘性力の競合で決まる安定性により，前駆滑りの臨界サイズが求められることが分かった。さらに，その臨界サイズによって，μ_{M}が求めることができ，それを Fig. 2 に線で示した。解析結果は FEM の結果と定性的に一致しており，μ_{M}のP_{ext}とW対する依存性が説明されることを示している。

*E-mail: w_iwashita@fm.me.es.osaka-u.ac.jp

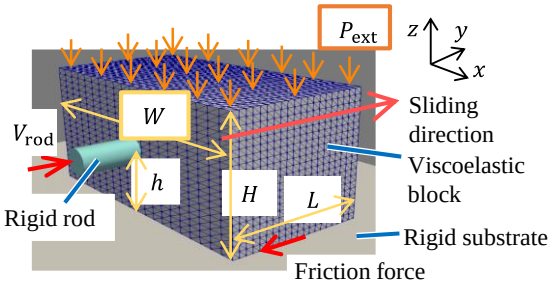

Fig. 1. 3 次元 FEM の概要図

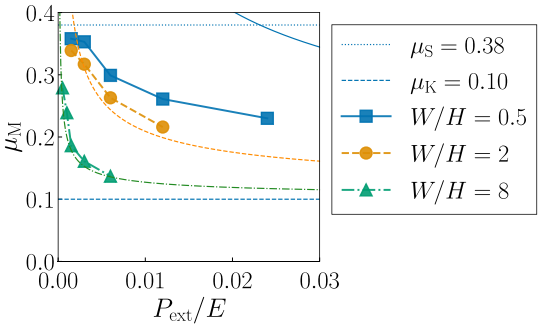

Fig. 2. 巨視的な静摩擦係数μ_{M}のP_{ext}とWに対する依存性。塗りつぶしたシンボルが有限要素法の結果，細線が 1 次元有効モデルの解析結果を示す。

文　献

1) M. Otsuki and H. Matsukawa: Sci. Rep. **3**, 1586 (2013).
2) Y. Katano, K. Nakano, M. Otsuki, and H. Matsukawa: Sci. Rep. **4**, 6324 (2014).

©公益社団法人 日本表面真空学会

Surface Science(SS1) Physical Property

[2Fa03-07] SS1

Chair:Kazuyuki Sakamoto(Osaka University)

Thu. Nov 4, 2021 9:00 AM - 10:15 AM Room F (Marugame)

[2Fa03] Electronic properties of ultrathin Bi_2Te_3 films grown on CaF_2(111)

*shinichiro hatta[1], shinpei higaki[1], hiroshi okuyama[1], tetsuya aruga[1] （1. Kyoto university）

9:00 AM - 9:15 AM

[2Fa04] Thickness-dependence of van Hove singularity in Li-intercalated graphene

*Satoru Ichinokura[1], Masayuki Toyoda[1], Mizuki Hashizume[1], Kentaro Horii[1], Syotaro Kusaka[1], Shin-ichiro Ideta[2], Kiyohisa Tanaka[2], Ryota Shimizu[3], Taro Hitosugi[3], Susumu Saito[1], Toru Hirahara[1] （1. Department of Physics, Tokyo Institute of Technology, 2. UVSOR Facility, Institute for Molecular Science, 3. Department of Applied Chemistry, Tokyo Institute of Technology）

9:15 AM - 9:30 AM

[2Fa05] Study of layer-dependent dynamics of Dirac Fermions in quasi-crystalline bilayer graphene by *concerting* usages of positron diffraction and time-resolved photoemission spectroscopy

*iwao matsuda[1], Yuhao Zhao[1], Yuki Fukaya[2] （1. the University of Tokyo, 2. Japan Atomic Energy Agency）

9:30 AM - 9:45 AM

[2Fa06] Evolution of atomic and electronic structure of double-layer In by Mg deposition

*Shigemi Terakawa[1], Shinichiro Hatta[1], Hiroshi Okuyama[1], Tetsuya Aruga[1] （1. Graduate School of Science, Kyoto University）

9:45 AM - 10:00 AM

[2Fa07] The electronic structure of PdCu surface alloy

*Kei Nagatomo[1], Nanao Morii[1], Takushi Iimori[2], Fumio Komori[1], Hiroyuki Hirayama[3], Kan Nakatsuji[1] （1. Department of Material Science and Engineering,Tokyo Institute of Technology, 2. Institute for Solid State Physics, University of Tokyo, 3. Department of Physics ,Tokyo Institute of Technology）

10:00 AM - 10:15 AM

©-

Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2020

CaF_2(111)表面上に成長させた Bi_2Te_3 超薄膜の電子物性

○八田 振一郎，檜垣 慎平，奥山 弘，有賀 哲也
京都大学大学院理学研究科

Electronic properties of ultrathin Bi_2Te_3 films grown on CaF_2(111)

○Shinichiro Hatta, Shinpei Higaki, Hiroshi Okuyama and Tetsuya Aruga
Graduate school of Science, Kyoto University

Bi_2Te_3は三次元トポロジカル絶縁体の一種であり、結晶構造が Te と Te の二次元三角格子が相対するファンデルワールス（vdW）界面をもつことから層状物質でもある。そのため、様々な薄膜作製手法によって薄膜化やヘテロ構造の作製が高い結晶性で得られている。薄膜化は、表面間相互作用によってトポロジカル表面状態（TSS）が壊れる限界膜厚の調査[1]やバルク伝導の寄与を抑制し、TSS による伝導が支配的とする[2]目的で行われている。最近、我々のグループでは、Bi_2Te_3を Si(111)基板上で Te-Bi-Te-Bi-Te で構成される最小単位、1 quintuple layer（QL）から layer-by-layer で成長させることに成功した[3]。さらに、1 QL と 2 QL の超薄膜の電子状態および電気伝導度を測定し、vdW 界面に局在する 2 次元電子状態が非常に高い移動度を示すことを見出した。一方 TSS による伝導はそれより小さいことが示唆された。その要因の一つとして、作製した膜が逆向きのスタッキングが共存するダブルドメイン構造を有していることが挙げられる。そこで、シングルドメインで Bi_2Te_3を成長させることができる基板として、ダングリングボンドをもたない CaF_2(111)表面を用いることにし、Bi_2Te_3の成長および物性を調べた。

CaF_2(111)表面は Si(111)上に約 1 nm（3 層分）、エピタキシャル成長させることにより得た。400 K 程度に保持した CaF_2(111)表面に Bi_2Te_3 蒸着し、低速電子回折（LEED）、角度分解光電子分光法（ARPES）、4 端子電気伝導測定をすべて in situ で行った。作製された Bi_2Te_3超薄膜の LEED パターンは 3 QL 以上で明確に 3 回対称を示した。LEED *I-V* 測定も行い、(10)と(01)スポットの強度比から少数ドメインの割合は高々9%と見積もられた。また ARPES による価電子帯バンドの k 空間マップも三回対称のパターンを示した。これらのことから、Bi_2Te_3はシングルドメイン成長することが確認できた。ARPES では、5 QL までの Bi_2Te_3薄膜についてバンド構造の変化を測定し、バンド計算と比較した。また、同じく膜厚 5 QL までの範囲で電気伝導度の温度依存性を測定した。2 QL 以下では金属状態が存在しているにもかかわらず、金属伝導が観測されなかった。この原因は、膜厚にばらつきがあり、ドメイン間のギャップによって伝導パスがマクロにつながっていないことが挙げられる。一方、3 QL 以上では Si 基板上の Bi_2Te_3よりも高い伝導度が測定された。講演では、伝導度と電子状態の関係についてくわしく考察する。

参考文献

1) Y.–Y. Li *et al.*, Adv. Mater. **22**, 4002 (2010).
2) K. Hoefer *et al*, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. **111**, 14979 (2014).
3) S. Hatta, *et al.*, Sci. Rep. **11**, 5742 (2021).

*E-mail: hatta@kuchem.kyoto-u.ac.jp

©公益社団法人 日本表面真空学会

Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2021

Li インターカレートしたグラフェンにおける van Hove 特異性の層数依存性

○一ノ倉聖 [1,*]，豊田雅之 [1]，橋爪瑞葵 [1]，堀井健太郎 [1]，日下翔太郎 [1]，出田真一郎 [2]，田中清尚 [2]，清水亮太 [3]，一杉太郎 [3]，斎藤晋 [1]，平原徹 [1]

[1] 東京工業大学理学院，[2] 分子科学研究所 UVSOR，[3] 東京工業大学物質理工学院

Thickness-dependence of van Hove singularity in Li-intercalated graphene

○S. Ichinokura[1,*], M. Toyoda[1], M. Hashizume[1], K. Horii[1], S. Kusaka[1], S. Ideta[2], K. Tanaka[2], R. Shimizu[3], T. Hitosugi[3], S. Saito[1], and T. Hirahara[1]

[1] Department of Physics, Tokyo Institute of Technology, [2] UVSOR Facility, Institute for Molecular Science, [3]Department of Applied Chemistry, Tokyo Institute of Technology

最近、2 次元物質中でフラットバンドによる多体効果の増強が精力的に研究されている [1)]。フラットバンドがフェルミ面上に現れたとき、van Hove 特異性(VHS)と呼ばれる状態密度の発散が起こる。グラフェンには約 2eV 非占有側にフラットバンドが存在する。電子供与性物質からの過剰なキャリアドープにより、それを占有状態とすることができる。多体効果による多彩な電子相図を調べるには、さらに電界効果などにより VHS 条件の近傍でフェルミ準位を細かく制御する必要がある。Li は電気化学的インターカレーションが可能であり、制御性が高い。Li 侵入グラフェンの電子状態は真空蒸着と角度分解光電子分光法により調べられてきたが、VHS に着目してフェルミ面近傍を解析した例はこれまでなかった。また、Li が侵入した多層グラフェンの電子状態も調べられていなかった。そこで、本研究では層数制御したグラフェンに Li をインターカレートさせ、VHS に着目してバンド構造測定を行い、さらに第一原理計算と比較した。

SiC 基板上の単層グラフェンに Li を蒸着すると、グラフェン下のバッファ層が遊離し、２層グラフェンとなる。Li は更にその間に√3×√3 周期で侵入する(Fig. 1a)。すると Γ 点を中心とした 2 重のディラックコーン π_1^*，π_2^*が生じる [2)]。Li 侵入 2 層グラフェンのフェルミ面近傍のバンド構造を Fig. 1b に示す。π_2^*は√3×√3 ブリルアンゾーンの M 点において VHS 条件を満たしている。同様に *n* 層グラフェンからは *n*+1 層の Li 侵入グラフェンができる。そこで単層から多層のグラフェンに Li を侵入させ、バンド構造を系統的に調べた。すると、層数増加に伴いフラットバンドは高束縛エネルギー側に単調にシフトしたが、変化は最大でも 60 meV にとどまった。しかし第一原理計算を行うと、層数変化に

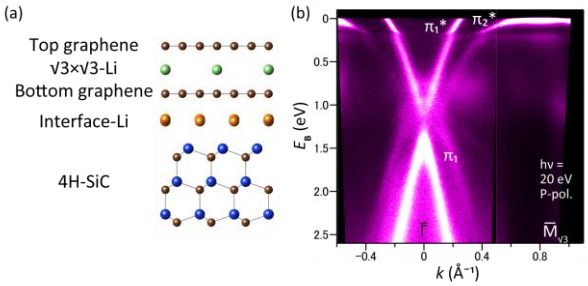

Fig. 1. SiC 基板上の Li 侵入 2 層グラフェンの(a)結晶構造と(b) Γ 点近傍の電子状態。

よりフラットバンドのエネルギーは不規則に変化した。これは主にグラフェン層間の相互作用の変化を反映している。実験で見られたシフトも層間相互作用の変化が要因であると考えられる。しかし、計算ではフラットバンドが最大 0.4 eV 動いていたため、何らかの機構によりシフトが抑制されていると考えられる。SiC 基板を含んだモデルで計算を行うと、基板の表面状態がディラックバンドと混成し、フェルミ面近傍の電子状態に変化を与え、バンドシフトを抑制し得ることが明らかとなった。また、グラフェンと SiC の界面にはショットキー接合が生じており、SiC 基板はバックゲートとして用いることができる。従って、Li 侵入グラフェンにおいては層数および電界効果によって VHS 点近傍でのフェルミ面制御が可能であることがわかった。

文　献

1) Y. Cao *et al.*, Nature **556,** 43-50 (2018).
2) C. Bao *et al.*, Phys. Rev. Lett. **126,** 206804 (2021).

*E-mail:　ichinokura@phys.titech.ac.jp

©公益社団法人 日本表面真空学会

Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2021

Study of layer-dependent dynamics of Dirac Fermions in quasi-crystalline bilayer graphene by *concerting* usages of positron diffraction and time-resolved photoemission spectroscopy

Yuhao Zhao[1], Yuki Fukaya[2], and ○Iwao Matsuda[1*]

[1]*Institute for Solid State Physics (ISSP), The University of Tokyo, Kashiwa, Chiba 277-8581, Japan*

[2]*Advanced Science Research Center, Japan Atomic Energy Agency, Tokai, Ibaraki 319-1195, Japan*

Dynamical behavior of carriers in graphene has attracted academic interests to investigate temporal evolutions of the massless Dirac Fermions and also technical needs to develop the next-generation optoelectronic devices. The comprehensive understanding has been conducted by direct observations of the electronic states by time- and angle-resolved photoemission spectroscopy (TARPES) [1-3]. Using optical pulses, photo-excited carriers in graphene layers were traced in real time and the dynamics was described by various elementary processes. Recently, twisted bilayer graphene was synthesized and showed intriguing properties, such as quasi-crystallinity at twisted angle of 30° [4]. The novel material has further opened a research filed of ”Twistronics”. TARPES measurements on the epitaxial quasi-crystalline bilayer graphene (QCBG) observed the transient voltage between the two layers that were not expected theoretically. The experimental reasoning has required contributions from the substrate or the interface but the detailed scenario has remained unknown. Compared to a free-standing layer of graphene, the epitaxial graphene layer is complicated with various external factors, *i.e.* interface, substrate, and doping. Thus, it is required to investigate the environmental effect to reveal dynamics of the Dirac Fermions in reality.

In the present research, we performed TARPES measurements on various systems of single and bilayer graphene on the Si-face SiC substrates to extensively study the carrier dynamics. In QCBG, we confirmed temporal evolutions of photo-excited carriers in Dirac cones that were asymmetric between the upper and lower layers, which should be described by the transient doping from the interface. The quantitative discussion was made with the structural parameters, interlayer distance, determined by positron diffraction (PD) experiments [5]. The concerting usages of TARPES and PD quantitatively revealed the transport mechanism that was induced by the optical pumping. Furthermore, our systematic results of graphene layers on various types of the SiC substrate [1-3] have led to assign a reasonable source of the doping carrier. The details will be described in the presentation.

*E-mail: imatsuda@issp.u-tokyo.ac.jp

Reference

[1] T. Suzuki, T. Iimori, S. J. Ahn, Y. Zhao, M. Watanabe, J. Xu, M. Fujisawa, T. Kanai, N. Ishii, J. Itatani, K. Suwa, H. Fukidome, S. Tanaka, J. R. Ahn, K. Okazaki, S. Shin, F. Komori, and I. Matsuda, ACS Nano, **13**, 11981(2019).

[2] T. Someya, H. Fukidome, H. Watanabe, T. Yamamoto, M. Okada, H. Suzuki, Y. Ogawa, T. Iimori, N. Ishii, T. Kanai, K. Tashima, B. Feng, S. Yamamoto, J. Itatani, F. Komori, K. Okazaki, S. Shin, and I. Matsuda, Phys. Rev. B **95**, 165303 (2017).

[3] T. Someya, H. Fukidome, Y. Ishida, R. Yoshida, T. Iimori, R. Yukawa, K. Akikubo, Sh. Yamamoto, S. Yamamoto, T. Yamamoto, T. Kanai, K. Funakubo, M. Suemitsu, J. Itatani, F. Komori, S. Shin, and I. Matsuda, Appl. Phys. Lett. **104**, 161103 (2014).

[4] S. J. Ahn, P. Moon, T. H. Kim, H. W. Kim, H. C. Shin, E. H. Kim, H. W. Cha, S. J. Kahng, P. Kim, M. Koshino, Y. W. Son, C. W. Yang, J. R. Ahn, Science **361**, 782 (2018).

[5] Y. Fukaya, I. Matsuda, B. Feng I. Mochizuki, T. Hyodo, and S. Shamoto, 2D Materials **3**, 035019 (2016).

©The Japan Society of Vacuum and Surface Science

Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2021

Mg 蒸着による In２原子層金属の構造と電子状態の変化

○寺川 成海，八田 振一郎，奥山 弘，有賀 哲也*

京都大学大学院理学研究科

Evolution of atomic and electronic structure of double-layer In by Mg deposition

○Shigemi Terakawa, Shinichiro Hatta, Hiroshi Okuyama and Tetsuya Aruga*

Graduate School of Science, Kyoto University

Si や Ge などの半導体基板上の金属超薄膜は、低次元金属の物性研究を行う理想的な系であり盛んに研究されてきた。近年では、2 種類以上の金属元素からなる表面合金の研究も進められ、Rashba 効果によるスピン分裂と超伝導の両方を示す(Tl, Pb)/Si(111) [1] など、興味深い物性を示す表面合金相が報告されている。最近、我々は、Si(111)表面上の Pb 単原子層金属に Mg を蒸着することで、金属的な電子構造をもつ表面合金相の作製に成功した[2]。本研究では、さらなる表面合金相の探索を目的として、In/Si(111)表面への Mg 蒸着による構造と電子状態の変化を調べた。

In/Si(111)表面には In 被覆率 0.3 ~ 2.4 ML の複数の相が知られており[3]、各相への Mg 蒸着による構造変化を低速電子回折(LEED)および走査トンネル顕微鏡(STM)を用いて調べた。2 原子層構造をもつ In/Si(111) (√7 ×√3)相（In 被覆率 2.4 ML, Fig. 1(a)）[4, 5]に、Mg を室温以下の温度で蒸着することで、(2√3×2√3) (Mg 被覆率 0.2 ML, Fig. 1(b)) および(√3×√3) (Mg 被覆率 1 ML, Fig. 1(c)) の 2 つの新たな超構造ができることがわかった。

作製した 2 つの相の電子構造を角度分解光電子分光(ARPES) で調べた。(2√3×2√3)相と(√3×√3)相のそれぞれにおいて、各相の周期を反映し、かつフェルミ準位を横切る表面バンドが観察された。(2√3×2√3)相は、2 次元自由電子的な円形のフェルミ面を持ち、そのフェルミ波数は 1.41 Å^{-1} であり、In/Si(111) (√7 ×√3)相 (1.40 Å^{-1})よりわずかに増加した。一方、(√3×√3)相はより複雑な電子構造を示し、フェルミ面は波数 1.30, 1.46 Å^{-1} の 2 つの円で構成される。第一原理計算により、(√3×√3)相のバンド構造の特徴は In 2 層と Mg 1 層が積層した 3 原子層構造モデルで再現されることがわかった。

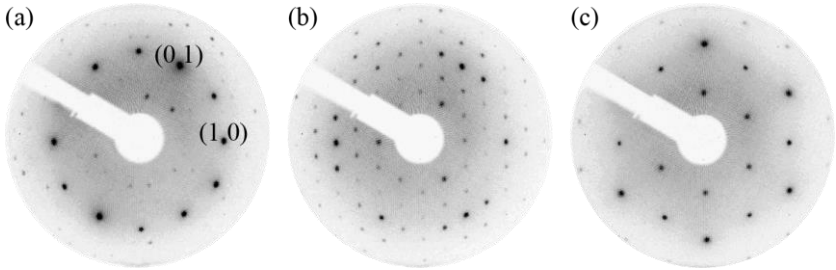

Fig. 1. (a) In/Si(111) (√7 ×√3), (b) (Mg, In)/Si(111) (2√3× 2√3), (c) (√3×√3)の LEED パターン(E_p = 85 eV).

文　献

1) A. V. Matetskiy *et al*.: Phys. Rev. Lett. **115**, 147003 (2015).
2) 寺川成海 他: 2020 年日本表面真空学会学術講演会 2Ba04S (2020).
3) J. Kraft *et al*.: Phys. Rev. B **55**, 5384 (1997).
4) J. W. Park and M. H. Kang: Phys. Rev. Lett. **109**, 166102 (2012).
5) T. Shirasawa *et al*.: Phys. Rev. B **99**, 100502(R) (2019).

*E-mail: aruga@kuchem.kyoto-u.ac.jp

©公益社団法人 日本表面真空学会

Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2021

PdCu 表面合金層の電子構造

○永友 慶[1]，森井 七生[1]，飯盛 拓嗣[2]，小森 文夫[1]，平山 博之[3]，中辻 寛[1*]

[1]東京工業大学物質理工学院，[2]東京大学物性研究所，[3]東京工業大学理学院

The electronic structure of PdCu surface alloy

○Kei Nagatomo[1]，Nanao Morii[1] ,Takushi Iimori[2] ,Fumio Komori[1] ,Hiroyuki Hirayama[3] , Kan Nakatsuji[1*]

[1]Department of Materials Science and Engineering,Tokyo Institute of Technology,
[2]Institute for Solid State Physics,University of Tokyo, [1]Department of Physics,Tokyo Institute of Technology

安全な水素化社会実現のためには，水素の貯蔵・輸送・ガス検知などあらゆる場面で安全に管理することが必要である。パラジウム(Pd)は代表的な水素吸蔵金属であり，水素反応において優れた触媒作用を持つことが知られている。特に Pd は銅(Cu)と合金化させることで水素吸蔵量を制御することができ，さらなる水素特性の向上に期待ができる。しかし，PdCu 合金への水素吸着・吸蔵のメカニズムについて電子状態の観点からは必ずしも明らかになっていない。そこで，本研究では Cu(001)単結晶基板を用いて PdCu 表面合金層を作製し，低速電子回折(LEED)，X 線光電子分光(XPS)，角度分解光電子分光(ARPES)から電子状態を調べることを目的とした。

Cu(001)清浄表面上に Pd を 0.5～7 ML 室温蒸着したのち,LEED を用いて表面構造を確認した(Fig. 1)。以前の報告にもあるように，0.5 ML では c(2×2)構造，1.0 ML では p(2×2)p4g 構造が得られた。[1] 一方で，7 ML 蒸着後に 600K 熱処理を行うと，新たな c(2×2)構造が観察された。0.5 ML の c(2×2)構造は最表面の Cu 原子の半分が Pd と置き換わることによって表面合金層を形成している。[2] Figure 2 はCu(001)1×1表面のブリルアンゾーンのΓ-M方向に沿って測定された c(2×2)構造の電子状態である。結合エネルギー2 eV 以下の領域で，0.5 eV，M 点付近の放物線バンドや 1.3 eV 付近に広がるフラットバンドなど c(2×2)構造に由来する表面状態が観察された。これらは第一原理計算によるバンド構造とよく一致しており，Pd 4d 状態と Cu 3d 状態の混成に由来するものである。[3] さらにこれらの表面状態は p(2×2)p4g の電子構造にも観察された。この結果は p(2x2)p4g の構造モデルとして第 2 層に c(2×2)表面合金層が存在することを裏付ける。[4]

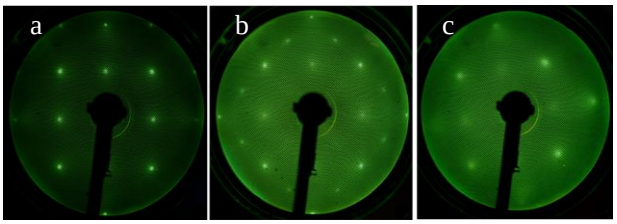

Fig. 1. Pd/Cu(001)表面の LEED 像. (a) c(2×2), (b) p(2×2)p4g，(c) 600 K 熱処理後 c(2×2)

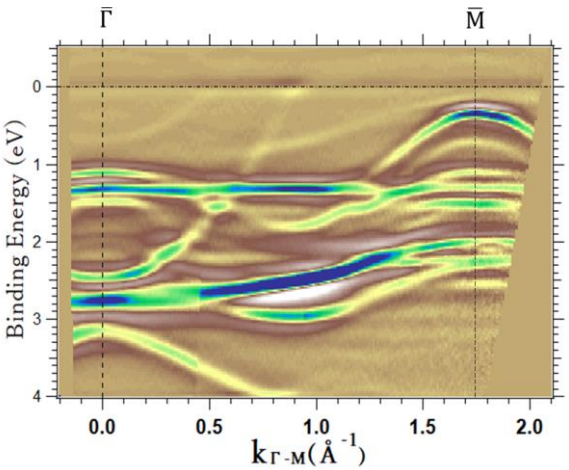

Fig. 2. 0.5 ML の c(2×2)-Pd 表面の電子構造

一方，7 ML 蒸着時に現れる c(2×2)構造は異なる電子構造を示した。詳細な原子構造については未だ明らかではないが,XPS の結果は,熱処理によって PdCu 合金超薄膜が形成されたことを示唆している。

文　献

1) T. D. Pope et al., Surf. Sci. 337 (1995) 79-91.
2) P. W. Murray et al., Surf. Sci. 365 (1996) 591-601.
3) L. Li et al., Phys. Rev. B 71 (2005) 075406.
4) T. Wadayama et al., Surf. Sci. 592 (2005) 72-82.

*E-mail:　nakatsuji.k.aa@m.titech.ac.jp

©公益社団法人 日本表面真空学会

Surface Science(SS1) Physical Property

[2Cp01-06] SS1

Chair:Shunsuke Yoshizawa(NIMS)

Thu. Nov 4, 2021 1:30 PM - 3:00 PM Room C (Takamatsu)

[2Cp01] Real-space studies of single-molecule reactions induced by localized surface plasmons

*emiko kazuma[1] （1. RIKEN）

1:30 PM - 2:00 PM

[2Cp03] Investigation of Low-dimensional Si Structures on Ag(111) by Scanning Probe Microscopy

*Lingyu Feng[1], Keisuke Yabuoshi[1], Jo Onoda[3], Akitoshi Shiotari[1], Masahiro Fukuda[2], Taisuke Ozaki[2], Yoshiaki Sugimoto[1] （1. Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, 2. Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo, 3. University of Alberta）

2:00 PM - 2:30 PM

[2Cp05R] Observation of STM-luminescence induced by THz-field-driven tunneling electrons

*kensuke kimura[1], Yuta Morinaga[2], Hiroshi Imada[1], Ikufumi Katayama[2], Kanta Asakawa[2], Katsumasa Yoshioka[2], Yousoo Kim[1], Jun Takeda[1,2] （1. Cluster for pioneering research, RIKEN, 2. Graduate school of engineering science, Yokohama National University）

2:30 PM - 2:45 PM

[2Cp06] Nano-scale imaging of optical property of pentacene thin-film by Photoinduced Force Microscopy

*Kanata Fukuzawa[1], Tatsuya Yamamoto[1], Kazuki Saito[1], Yasuhiro Sugawara[1] （1. Graduate School of Engineering, Osaka University）

2:45 PM - 3:00 PM

©-

Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2021

プラズモンが誘起する単一分子反応の実空間研究

○数間 恵弥子*

理化学研究所 Kim 表面界面科学研究室，JST PRESTO

Real-space studies of single-molecule reactions induced by localized surface plasmons

○Emiko Kazuma*

RIKEN, JST PRESTO

金や銀などの金属ナノ構造に光を照射することで励起できる局在表面プラズモンは、太陽光エネルギーを高効率に利用する手段として、局所分光分析法から光機能デバイスまで幅広い応用が期待されている。プラズモンが分子に直接作用することで起こるプラズモン誘起化学反応は、2010 年頃から応用研究が盛んに進められている[1-3]。プラズモンは生成から緩和過程において、増強電場、ホットキャリア、熱を生成し（Fig. 1）、そのいずれもが分子の励起源となり得ることから、主に 4 つの分子の励起機構が提案されている[3]。しかし、プラズモンの近接場は金属表面近傍のナノメートル領域に局在することから、従来のマクロスコピックな手法では反応を直接観察することは困難であり、反応機構は未解明な部分が多くある。さらに、多くの金属ナノ粒子の表面は様々な結晶面から構成されており、表面に吸着した分子の電子状態は不明であるため、分子の電子状態を絡めた反応機構の議論は困難であった。

走査型トンネル顕微鏡に光照射を組み合わせた光 STM は、プラズモン誘起化学反応を実空間観測、解析する上で非常に強力な手法である（Fig. 2a）。形状制御した銀や金製の STM 探針と基板との間に光照射することで生成するギャッププラズモンを利用すれば、プラズモン誘起化学反応の単一分子レベル観測・解析も可能である。さらに、精密に規定された表面および分子を解析対象とすることで、吸着分子の電子状態が反応にどのように関わるのかといった基礎的知見を得ることができる。

本発表では、光 STM を用いたプラズモン誘起化学反応の単一分子レベル研究の成果（Fig. 2b, c）[4,5]について紹介する。ジメチルジスルフィドおよび酸素分子のプラズモン誘起解離反応を単一分子レベルで解析した結果から、金属表面と分子の相互作用の強さによって反応機構が異なることが示唆された。

*E-mail: emiko.kazuma@riken.jp

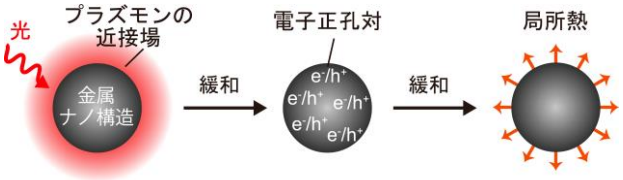

Fig. 1. プラズモンは生成から緩和過程で強電場、ホットキャリア、熱を生成する。

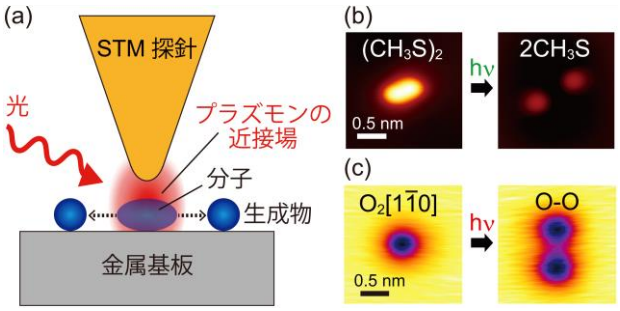

Fig. 2. (a) STM 探針と試料間への光照射により生成するプラズモンが分子の解離反応を誘起。(b) ジメチルジスルフィド分子、(c) 酸素分子のプラズモン誘起解離反応を単一分子レベルで観測。

文　献

[1] S. Linic, U. Aslam, C. Boerigter, and M. Morabito: Nature Mater. **14**, 567 (2015).
[2] M. L. Brongersma, N. J. Halas and P. Nordlander: Nature Nano. **10**, 25 (2015).
[3] E. Kazuma and Y. Kim: Angew. Chem. Int. Ed. **58**, 4800 (2019).
[4] E. Kazuma, J. Jung, H. Ueba, M. Trenary and Y. Kim: Science **360**, 521 (2018).
[5] E. Kazuma, M. Lee, J. Jung, M. Trenary and Y. Kim: Angew. Chem. Int. Ed. **59**, 7960 (2020).

©公益社団法人 日本表面真空学会

Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2021

Investigation of Low-dimensional Si Structures on Ag(111) by Scanning Probe Microscopy

○Lingyu Feng[1*], Keisuke Yabuoshi[1], Onoda Jo[2], Akitoshi Shiotari[1], Masahiro Fukuda[3], Taisuke Ozaki[3], and Yoshiaki Sugimoto[1]

[1]GSFS, The University of Tokyo, [2]University of Alberta, [3]ISSP, The University of Tokyo

Recent years, the progress of miniaturization of electronic devices stimulates a growing interest in low-dimensional materials. Among them, silicene, the allotrope of silicon equivalent of graphene, has attracted increasing attention owing to its superior electronic properties. Silicene has a honeycomb structure similar with graphene. The band structure of silicene, which forms 'Dirac cone' at the symmetric point K in the reciprocal space, indicates that the charge carriers in silicene sheet behave like massless Dirac fermions [1].

In contrast with the totally planar graphene, silicene has a buckled structure, which makes it difficult to determine the detailed structures of silicene. So far, scanning tunneling microscopy (STM) and low-energy electron diffraction (LEED) have been mainly used as characterization method for analysis of silicene structures.

Recently, it was reported that non-contact atomic force microscopy (nc-AFM) has a higher spatial resolution for (4×4) phase of silicene on Ag(111) than STM [2]. The high-resolution AFM imaging can even resolve all the constituent Si atoms, while STM resolves only the upper-buckled ones. Moreover, nc-AFM also for the first time identified the detailed atomic structures of (√13×√13)R13.9° phase of silicene on Ag(111) [3].

In this research, we carried out the AFM observation for T phase of silicene on Ag(111). All the constituent Si atoms including the lower-buckled ones are successfully resolved by high-resolution AFM imaging (Fig.1). The observation results also identified that there are two different types of ordering pattern of T phase [4].

During the synthesis of silicene of Ag(111), a new low-dimensional Si structure, silicon nano-ribbons (SiNRs) on Ag(111) (Fig.2), was also found. Under STM observation, SiNRs appear as two rows of bright protrusions. Based on the STM observation, DFT calculation was carried out to investigate its atomic structure. In the proposed structural model, SiNRs are composed of hexagonal and tetragonal Si rings.

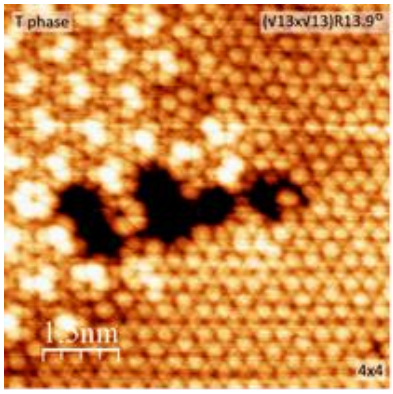

Fig. 1. High-resolution AFM imaging of silicene on Ag(111), on which T phase, (√13×√13)R13.9° and (4×4) phase coexist.

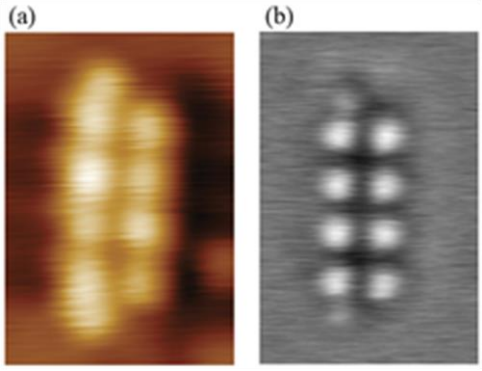

Fig. 2: STM image (a) and AFM image (b) of a SiNR on Ag(111).

References

1) C.-C. Liu et al., Physical review letters **107**, 076802 (2011).
2) J. Onoda, K. Yabuoshi, H. Miyazaki, and Y. Sugimoto, Physical Review B **96**, 241302 (2017).
3) L. Feng, K. Yabuoshi, Y. Sugimoto, J. Onoda, M. Fukuda, and T. Ozaki, Physical Review B **98**, 195311 (2018).
4) J. Onoda, L. Feng, K. Yabuoshi, and Y. Sugimoto, Physical Review Materials **3**, 104002 (2019).
5) L. Feng, A. Shiotari, K. Yabuoshi, M. Fukuda, T. Ozaki and Y. Sugimoto, Physical Review Materials **5**, 034002 (2021).

*E-mail: fenglingyu@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

©The Japan Society of Vacuum and Surface Science

Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2021

テラヘルツ電場駆動トンネル電子により誘起される STM 発光の観測

○木村 謙介 [1], 森永 悠太 [2], 今田 裕 [1*], 片山 郁文 [2*], 浅川 寛太 [2], 吉岡 克将 [2], 金 有洙 [1*], 武田 淳 [1,2*]

[1] 理化学研究所開拓研究本部, [2] 横浜国立大学大学院理工学府

Observation of STM-luminescence induced by THz-field-driven tunneling electrons

○Kensuke Kimura[1], Yuta Morinaga[2], Hiroshi Imada[1*], Ikufumi Katayama[2*], Kanta Asakawa[2], Katsumasa Yoshioka[2], Yousoo Kim[1*], Jun Takeda[1,2*]

[1]Cluster for pioneering research, RIKEN, [2]Graduate school of engineering science, Yokohama National University

シングルサイクルなテラヘルツ(THz)光パルスが有する高強度な光電場を用いることで、走査トンネル顕微鏡(STM)を超高速に駆動することが可能である [1)]。THz-STM と呼ばれるこの手法により、サブピコ秒の高い時間分解能で、局所領域における様々な物性ダイナミクスが調べられてきた [1-4)]。しかしながら、従来の THz-STM で測定される物理量は THz 光電場によって駆動されたトンネル電流のみであることから、超高速駆動された電子が物質中でどのようなエネルギー変換過程を辿るのかを調べることは難しい。そこで本研究では、局所領域で生じるエネルギー変換過程を調べる事を得意とする STM 発光分光技術 [5,6)]を、THz-STM 技術に組み合わせることで THz-STM 発光分光法を開発 [7)]し、STM 探針と金属基板間に形成される局在プラズモンからの発光現象の観測に成功した(Fig.1a)。

本研究で用いた THz 光は、Yb ファイバーレーザー(1030 nm、700 mW, 100 kHz)を用いて、パルス面傾斜法により $LiNbO_3$ 結晶から発生させた。この THz 光を極低温超高真空 STM に導き、STM 内部に備え付けられたレンズを用いて探針に集光した(Fig. 1a)。そして、THz 光により駆動されたトンネル電子により誘起される発光を反対側のレンズでコリメートして STM チャンバー外に導き、グレーティング方式の分光器を通過したのち高感度電荷結合素子(Charge Coupled Device: CCD)で検出した。Fig. 1b は清浄な Ag(111)基板上で測定したトンネル電流の時間変化を示している。THz を STM に照射しているとき(赤の網掛け)、2.6 pA の THz 誘起トンネル電流が観測された。トンネル接合における伝導を記述する Simmons モデル [1-2)]に基づきシミュレーションを行った結果、THz パルスにより 6.5 V の電圧が印加され、瞬間的に 250 μA の電流が流れていることが明らかになった。Fig. 1c は Fig. 1b で THz 光を照射しているときに取得した STM 発光スペクトルである。THz 照射下では、エネルギー幅が広い発光ピークが観測され、局在プラズモンからの発光と結論付けた。本講演では、THz 誘起トンネル電子によるプラズモン励起機構について詳細に議論する。

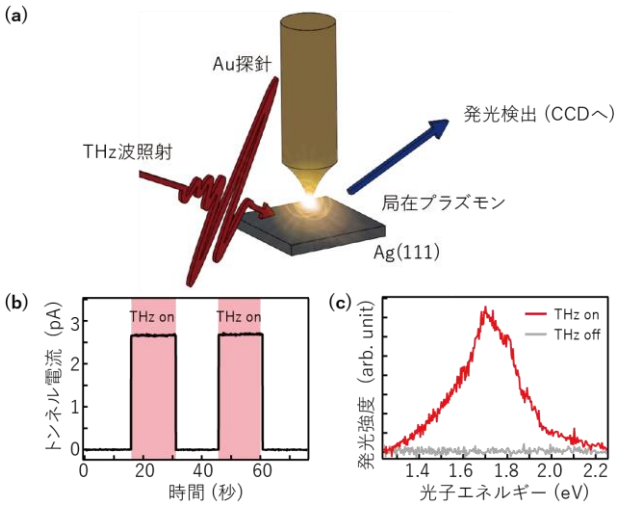

Fig. 1. (a) THz-STM 発光分光法の模式図. (b) トンネル電流の時間変化計測. 赤の網掛け部で THz を照射した. (c) THz-STM 発光スペクトル.

文　献

1) T. L. Cocker *et al.*, *Nat. Photon.* 7, 620 (2013).
2) K. Yoshioka *et al.*, *Nat. Photon.* 10, 762 (2016).
3) S. Yoshida *et al.*, *ACS photon.* 8, 315 (2021).
4) D. Peller *et al.*, *Nature* 585, 58 (2020).
5) H. Imada *et al.*, *Nature* 538, 364 (2016).
6) K. Kimura *et al.*, *Nature* 570, 210 (2019).
7) K. Kimura *et al.*, *ACS photon.* 8, 982 (2021).

*E-mail: himada@riken.jp; katayama-ikufumi-bm@ynu.ac.jp; ykim@riken.jp; jun@yun.ac.jp

©公益社団法人 日本表面真空学会

Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2021

光誘起力顕微鏡による有機薄膜光学特性のナノスケール観測

○福澤 哉太[1], 山本 達也[1], 斎藤 一貴[1], 菅原康弘[1]

[1] 大阪大学大学院工学研究科

Nano-scale imaging of optical property of pentacene thin-film by Photoinduced Force Microscopy

○Kanata Fukuzawa[1],Tatsuya Yamamoto[1],Kazuki Saito[1],Yasuhiro Sugawara

[1] **Graduate School of Engineering, Osaka University**

1. 背景

有機薄膜は、太陽電池や OLED に代表される有機薄膜エレクトロニクスの主要な構成要素であり、その光学特性を知ることは非常に重要である。有機薄膜の光学特性は分子の局所配列構造に依存しており、ナノスケールで不均一である。したがって、有機薄膜の局所配列構造と光学特性を結びつけることのできる高分解能観測法が求められている。光誘起力顕微鏡 (PiFM) は、原子間力顕微鏡 (AFM)をベースとしており、試料表面の光学特性をナノスケール分解能で観測することのできる顕微鏡である。光誘起力顕微鏡では試料に光を入射しており、試料が光を吸収したときの分極の大きさを力として検出している（図 1）。本研究では、光誘起力顕微鏡を用いて、典型的な有機薄膜材料であるペンタセン薄膜のナノスケールでの光学特性の観察を試みた。

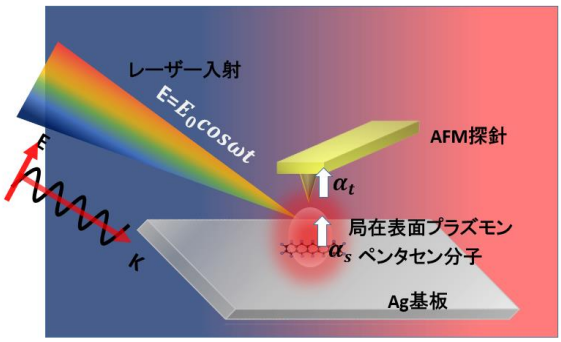

図 1:光誘起力顕微鏡の概念図

2. 実験方法および結果

試料作製の手順としては、まず、基板温度 78K の Ag(001)表面にペンタセン分子を蒸着した後、120℃で 10 分加熱することでペンタセン 2 層膜を作製した。照射する光の波長は 690nm、探針としては金コートした Si カンチレバーを用いた。また光誘起力の測定に際して、探針試料間の接触電位差(CPD)や表面光起電力(SPV)によるアーティファクトを除去するために KPFM フィードバックによる CPD 補償も同時に行った。また、光照射によるカンチレバーの光熱励振の影響を除去するためヘテロダイン FM 方式［1, 2］を導入し、光誘起力をより高感度に検出できるようにした。光誘起力顕微鏡によるペンタセン薄膜表面の光誘起力像は図 2 のようになった。光誘起力は 1 層膜上よりも 2 層膜上での方が大きかった。これは、探針と基板間のギャップモードプラズモンによる増強電場の方向が面直方向であるため、遷移双極子の方向が面直方向である 2 層膜ペンタセンのみで光の吸収が起きていたからであると考えられる（図 2(a)、(b)）。

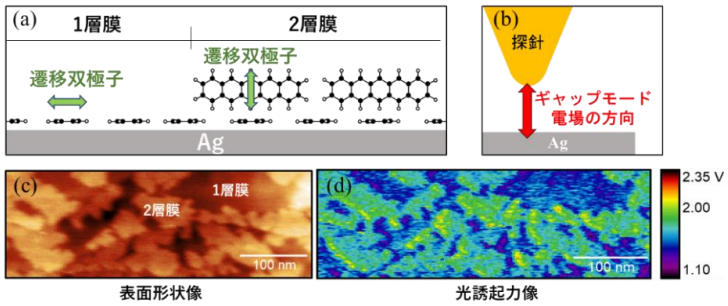

図 2:光誘起力顕微鏡によるペンタセン薄膜の光誘起力イメージング

文　献

［1］J. Yamanishi ,Y. Naitoh, Y. J .Li and Y. Sugawara: Phys. Rev. Appl. 9, 024031 (2018).
[2] J. Yamanishi *et. al*. Nature Communications, 12, 3865 (2021).

*E-mail: kanaty@ap.eng.osaka-u.ac.jp

©公益社団法人 日本表面真空学会