

令和 3 年 5 月 26 日現在

機関番号：14401
研究種目：基盤研究(S)
研究期間：2016～2020
課題番号：16H06333
研究課題名（和文）単原子スペクトロスコピーの高度化研究

研究課題名（英文）Development of single atom spectroscopy

研究代表者

末永 和知 (Suenaga, Kazu)

大阪大学・産業科学研究所・教授

研究者番号：00357253

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 131,550,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、電子顕微鏡と電子線分光を組み合わせた手法を発展させて、単原子ひとつひとつの分析法を発展させることを目的とした。単原子分析は従来において、極めて限られた条件でのみ可能であったが、本研究ではとくにハードウェアの開発や試料準備法の開発を通じて、その応用範囲を広げることによって成功した。

これらの成果は、3報のNature誌(2018, 2019, 2020年)と1報のScience誌(2020年)を含む109報の国際誌に発表された。また国内外の招待講演39件でも発表された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物質の根源に思いをはせた古代ギリシア人以来、モノや生命を構成する最小単位をひとつひとつ可視化しカウントすることは何世紀もの間、科学者の夢であった。古代原子論を提唱したデモクリトスも近代原子論の祖ダルトンも、原子の動きが人間の目に捉えられ、かつひとつひとつ区別されるような時代が訪れるとは考えてもいなかったであろう。本研究では、（素粒子をのぞけば）物質の最小単位である原子ひとつひとつの追跡や分析を実現するための研究を発展させてきた。単原子の電子状態およびそれらの変化の実時間観測を可能にし、物性研究および生命研究の基礎的発展に大きく貢献できる基盤技術開発にとって重要な研究である。

研究成果の概要（英文）： This work aimed to develop the single atom spectroscopy techniques based on electron microscopy and spectroscopy. So we have pushed the possibilities of electron spectroscopy to its limit by using the state-of-the-art electron optics and related technologies. High performance CMOS detector has been installed and the single atom spectroscopy for the light element (Li Z=3) and noble metal (Ru Z=44) have been made possible for the first time. Also the high speed shutter-time for the new detector enables us to record the single atom spectra at the speed 5 times faster. This will allow us to track the single atom electron state during a phase transition or chemical reaction in future. Also the energy resolution of electron spectroscopy was improved by introducing the monochromator and now the spectroscopy in the optical range becomes possible at a sub nanometer resolution. These results have been published in many international journals including 3 Nature and 1 Science.

研究分野：固体物理学

キーワード：電子線分光

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

単原子の分析・識別は、1800年にダルトンが原子論を提唱して以来、全科学者の目標の一つであった。近年の電子顕微鏡の発展はめざましく、細く絞った電子線と高性能の分光器を用いることで、従来は不可能とされていた原子ひとつひとつからの分光がなされるまでに至った。本研究ではこの単原子分光法のさらなる応用と発展を目指す。とくに電子顕微鏡を用いた電子分光測定の高速度化・高感度化・高精度化を通して、単原子のスピン状態、配位数およびそれらの変化の実時間観測を可能にし、物性研究および生命研究の基礎的発展に大きく貢献できる基盤技術開発につなげる。

2. 研究の目的

本研究では、軽元素から重元素まで幅広い元素に応用できる単原子分光技術を開発する。貴金属などこれまで不得手であった幅広い元素の分析にも挑戦する。またスペクトルの高速取り込みを実現するために分光器及び検出器の高速度化・輝度の高い電子銃開発などを行う。また光学特性や振動特性の局所的測定にも挑戦し、単原子レベルでの高エネルギー分解能分光を目指す。

3. 研究の方法

EELS法の高速度化・高感度化・高分解能化を目指すためにベースとなる透過型電子顕微鏡において、観察時の試料環境制御、高速静電シャッター導入、電子顕微鏡中間レンズ色収差低減、分光器の高次収差低減、高速・高感度検出器の導入、新型電子銃開発などの装置における要素技術開発・整備を行う。

4. 研究成果

本研究では、電子顕微鏡と電子線分光を組み合わせた手法を進展させて、単原子ひとつひとつの分析法を進展させることを目的とした。単原子分析は従来において、極めて限られた条件でのみ可能であったが、本研究ではとくにハードウェアの開発や試料準備法の開発を通じて、その応用範囲を広げることによって成功した。電子分光測定の高速度化・高感度化を狙った新しい電子線分光用検出器の導入により、リチウム(Li: Z=3)軽元素やルテニウム(Ru: Z=44)の貴金属の単原子検出に世界で初めて成功した。また電子分光のシャッター速度を向上させることで、従来より少なくとも5倍速の時間分解能で単原子のシグナルを取得できるようになった。今後、相転移や酸化反応などの構造変化を電子分光を用いて実時間でトラッキングすることなどに応用できると考えられる。また単原子レベルには至っていないが、電子線分光の高度化の一環として行ったスペクトルのエネルギー分解能の向上により、ナノスケール物質における格子欠陥ごとの光学吸収スペクトルの測定や局所的な振動スペクトルの測定も可能になった。これらの成果は、3報のNature誌(2018, 2019, 2020年)と1報のScience誌(2020年)を含む109報の国際誌に発表された。また国内外の招待講演39件でも発表された。以下にいくつかの例をあげる。

(1) 軽元素Liの単原子検出(Ultramicroscopy誌 2017年)

電子線分光に限らず、多くの元素分析技術において軽元素の検出は一般に重元素と比べて困難である。本研究では、カーボンナノチューブにLi金属を内包するフラレン分子を挿入する

ことで、Li 単原子検出が可能であることを示した。図 1 に示したのは、Li フラーレンピーポッドの元素マップである。比較のために La および Ce 金属フラーレンの例を載せてある。左図のモデルにあるようにフラーレン分子(C60 または C84)に各種金属ひとつを含むフラーレン分子をカーボンナノチューブに内包させ、加速電圧 30 kV の電子線を用いて元素マップを取得した実験例である。La や Ce 単原子に比べて、Li 原子のマップが広がっているのは、電子線散乱の非局在性と Li 原子のフラーレン分子内部での動きによるものと解釈されている。Li 原子は原子番号が La や Ce に比べて小さいので、電子線による運動量遷移によってノックオンと呼ばれる現象が起きるからである。

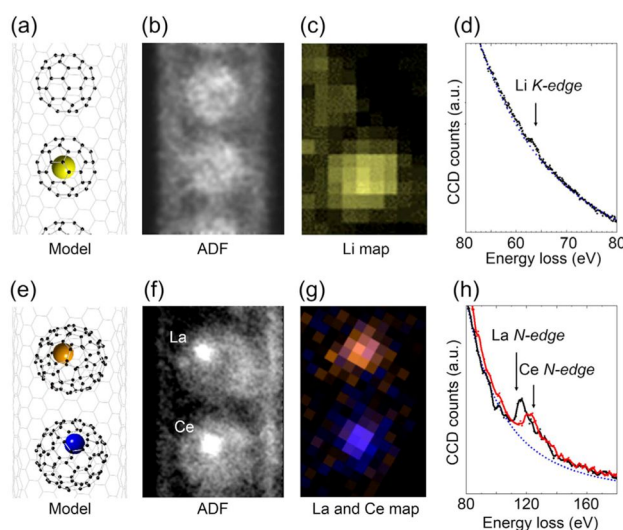


図 1 Detection of a single Li atom in peapods (by STEM operated at 30 kV). (a, b) A model and an ADF image, respectively, for a Li@C60 peapod and (e, f) those for La@C82 and Ce@C82 peapods. In the ADF images, no visible contrast for the Li atom can be seen inside the fullerene cages in (b), while the La and Ce atoms are clearly imaged as bright spots in (f). However, the EELS chemical map in (c) composed by the Li *K-edge* around 60 eV in (d) indicates the existence of a Li atom in the bottom C60 cage. Compared to the La and Ce EELS chemical maps in (g) composed by the La and Ce *N-edges* around 120 eV in (h), the Li map seems to be more delocalised because of EELS delocalisation and the atomic movement in which the Li atom inside the cage escapes from the electron beam. The EELS elemental maps in (c) and (g) are smoothed by the convolution of a 3×3 pixel matrix. The images are adapted from the previous report. Both experiments were performed at 30 kV.

(2) Ru 単原子の検出(投稿中)

Ru 原子を MgO 表面に担持させると単原子触媒として期待されている。図 2 に示したのは MgO(111)面に担持された Ru 単原子の検出例である。図 2 e には Ru 原子上で得られた電子線スペクトルが Ru の M 吸収端を示しているのがみと取れる。また Ru 原子の表面サイトも特定できる。この研究成果は現在投稿中である。

また従来は困難であった Nb や Mo など四属遷移金属の単原子検出にも成功した。この研究成果は現在論文印刷中である。

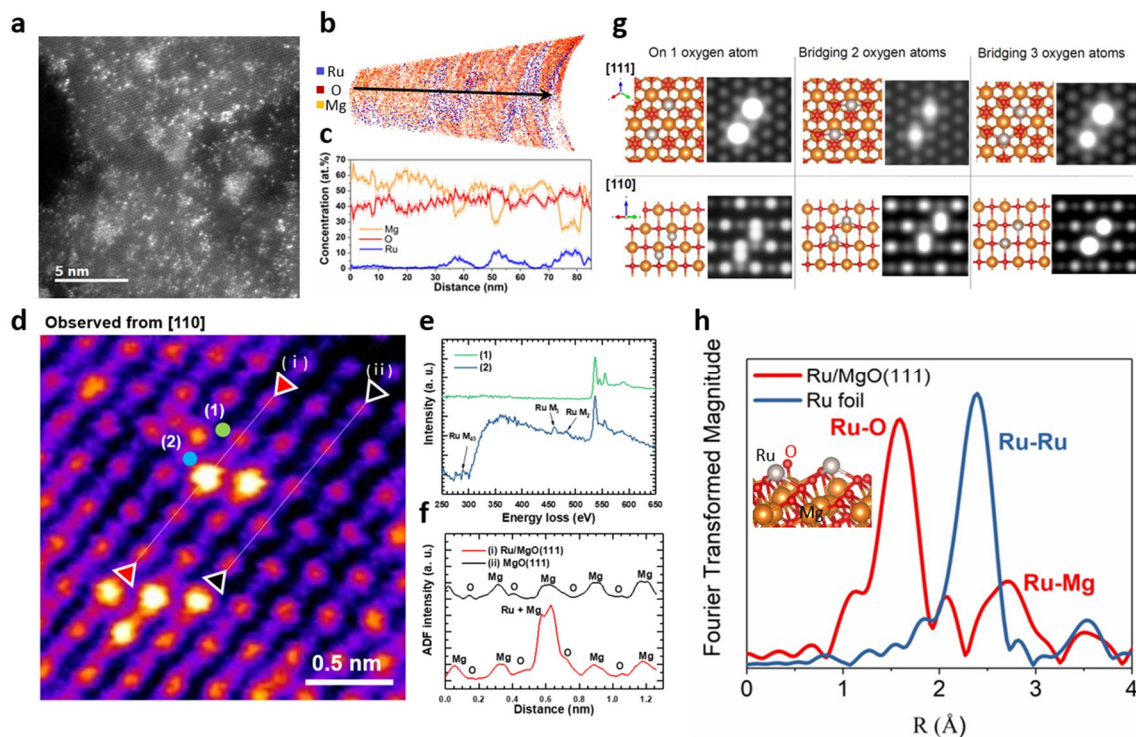


図 2 TEM image of 3.4 wt%-Ru/MgO(111) showing 2-D islands and scattered Ru atoms; **b** APT Atom map of 3.4 wt%-Ru/MgO(111), blue: Ru, red: O, orange: Mg; **c** Composition profile of Ru, Mg, O of 3.4 wt%-Ru/MgO(111) along the black line in **b**; **d** HAADF-STEM image of 3.4 wt%-Ru/MgO(111) observed from [110] direction; **e,f** Simultaneous acquisition **e** EELS extracted on oxygen atom (green circle in **d**), Ru atom (blue circle in **d**) and **f** HAADF acquired along the line in **d**; **g** Simulation of STEM images of 2 Ru atoms supported on different positions of MgO(111) from [111] and [110] direction. Atomic model was also provided for reference; **h** Fourier transform of k^3 -weighted Ru K-edge of X-ray absorption fine structure spectroscopy (EXAFS) spectra of the post hydrogen-reduced 3.4 wt%-Ru/MgO(111) measured at 300 °C. The Ru metal foil is also included here for reference. Inset shows a simulated model of Ru coordinating with 3-oxygen atoms (trigonal site) on (111) oxygen terminated surface.

(3) 局所的な振動スペクトル測定の場合 (Nature 誌 2019 年)

電子線分光の高精度化は、おもにモノクロメータの導入によってエネルギー分解能を向上させることで行われた。我々は電子線分光のエネルギー範囲を可視光・赤外領域まで広げることにして、かつ運動量分散を測定することで、局所的にフォノン分散を測定することに成功した。この成果は Nature 誌に 2019 年に発表された。

この実験では、走査可能な平行ビームを使った角度分解能 EELS を用いている (Fig. 3(a))。ディフラクション面に挿入したピンホール型の EELS 絞りで各 q における振動スペクトルを取得することで、Fig. 4(b-e)に示すフォノン分散関係を得ることができる。この方法では第一ブリュアンゾーン内だけでなく第二、第三ブリュアンゾーンも含めた高角度領域も測定に含めている。実際、第一ブリュアンゾーンだけでは完全なフォノン分散関係を描くことはできない。これはグラフェンのような非極性物質の場合、 q が小さい領域では隣り合う原子間に働く双極子モーメントが小さく、十分な信号が得られないためである。逆に q が大きくなると、材料の極性に関わらず損失ピークの強度は q^2 に反比例して小さくなるため、やはり十分な信号は期待できない。ところが今回の研究でフォノンに関してはこれが当てはまらないことを見出した。 q が大きくなるにつれ、原子核と電子雲の中心位置のズレから生ずる原子一つひとつに働く双極子の影響が

大きくなり、実際には外側のブリュアンゾーンでの計測であっても信号強度はほとんど落ちることがない。この結果は当然ながら従来の剛体イオンモデルでは説明できないが、原子核の局所的な電荷変調を考慮した独自のモデルを使った理論計算によって高い精度で再現することに成功した。

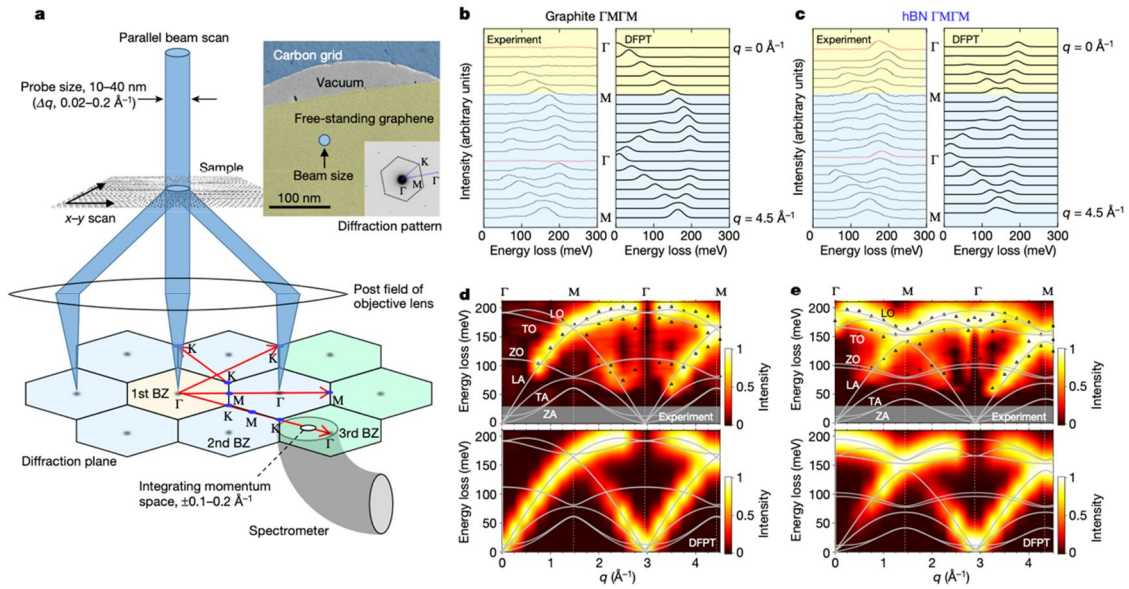


図 3 Momentum-resolved vibrational spectroscopy of graphite and hBN using EELS. **a**, Schematic of the experimental set-up. Inset, a typical transmission electron microscopy (TEM) image of the sample and its diffraction pattern, showing a central spot. The EEL spectra are obtained from each spot along several lines, as shown in the lower part of the main panel, with the EELS aperture focused on the diffraction plane. The post field of the objective lens and other imaging lenses were used to form a magnified diffraction pattern. **b, c**, Series of momentum-resolved EEL spectra for graphite (**b**) and hBN (**c**): in each panel the experimental spectra are on the left, and the simulated spectra (obtained using DFPT) are on the right. Spectra are obtained along the $\Gamma M \Gamma M$ direction (from top to bottom) for both graphite and hBN. The spectra are recorded at every 0.25 \AA^{-1} from $q = 0$ to 4.50 \AA^{-1} in the $\Gamma M \Gamma M$ direction, as well as at the second Γ point (2.88 \AA^{-1}) of hBN. The spectra at every Γ point (red lines) include the Bragg reflection spots. **d, e**, Colour-coded intensity maps of graphite (**d**) and hBN (**e**), constructed from the measured EEL spectra (top) and from the simulated ones (bottom), shown with the simulated phonon dispersion curves (solid lines). Peak positions extracted from the measured spectra by line shape analysis are indicated by open triangles in the top panels. The grey regions show experimentally inaccessible energy regions where the peaks are difficult to discriminate from the quasi-elastic line. The observed redshift of the LO branch in the $q = 0 \text{ \AA}^{-1}$ data can be explained by the suppression of LO/TO splitting occurring at the zone centre in BN slabs of finite thickness, which is not taken into account in our present bulk calculation.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計32件（うち査読付論文 32件／うち国際共著 30件／うちオープンアクセス 1件）

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Nagata Masataka, Shukla Shivani, Nakanishi Yusuke, Liu Zheng, Lin Yung-Chang, Shiga Takuma, Nakamura Yuto, Koyama Takeshi, Kishida Hideo, Inoue Tsukasa, Kanda Naoyuki, Ohno Shun, Sakagawa Yuki, Suenaga Kazu, Shinohara Hisanori | 4. 巻 19 |
| 2. 論文標題 Isolation of Single-Wired Transition-Metal Monochalcogenides by Carbon Nanotubes | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Nano Letters | 6. 最初と最後の頁 4845 ~ 4851 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.8b05074 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Lau Thomas H. M., Wu Simson, Kato Ryuichi, Wu Tai-Sing, Kulhavy Jiri, Mo Jiaying, Zheng Jianwei, Foord John S., Soo Yun-Liang, Suenaga Kazu, Darby Matthew T., Tsang S. C. Edman | 4. 巻 9 |
| 2. 論文標題 Engineering Monolayer 1T-MoS ₂ into a Bifunctional Electrocatalyst via Sonochemical Doping of Isolated Transition Metal Atoms | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 ACS Catalysis | 6. 最初と最後の頁 7527 ~ 7534 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acscatal.9b01503 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|-----------------------------|
| 1. 著者名 Zhou Jiadong, Kong Xianghua, Sekhar M. Chandra, Lin Junhao, Le Goualher Frederic, Xu Rui, Wang Xiaowei, Chen Yu, Zhou Yao, Zhu Chao, Lu Wei, Liu Fucui, Tang Bijun, Guo Zenglong, Zhu Chao, Cheng Zhihai, Yu Ting, Suenaga Kazu, Sun Dong, Ji Wei, Liu Zheng | 4. 巻 13 |
| 2. 論文標題 Epitaxial Synthesis of Monolayer PtSe ₂ Single Crystal on MoSe ₂ with Strong Interlayer Coupling | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 ACS Nano | 6. 最初と最後の頁 10929 ~ 10938 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.8b09479 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名 Gogoi Pranjali Kumar, Lin Yung-Chang, Senga Ryosuke, Komsa Hannu-Pekka, Wong Swee Liang, Chi Dongzhi, Krasheninnikov Arkady V., Li Lain-Jong, Breese Mark B. H., Pennycook Stephen J., Wee Andrew T. S., Suenaga Kazu | 4. 巻 13 |
| 2. 論文標題 Layer Rotation-Angle-Dependent Excitonic Absorption in van der Waals Heterostructures Revealed by Electron Energy Loss Spectroscopy | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 ACS Nano | 6. 最初と最後の頁 9541 ~ 9550 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.9b04530 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Senga Ryosuke, Suenaga Kazu, Barone Paolo, Morishita Shigeyuki, Mauri Francesco, Pichler Thomas | 4. 巻 573 |
| 2. 論文標題 Position and momentum mapping of vibrations in graphene nanostructures | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Nature | 6. 最初と最後の頁 247 ~ 250 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-019-1477-8 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|--------------------|
| 1. 著者名 Cui Jian, Li Peiling, Zhou Jiadong, He Wen-Yu, Huang Xiangwei, Yi Jian, Fan Jie, Ji Zhongqing, Jing Xiunian, Qu Fanming, Cheng Zhi Gang, Yang Changli, Lu Li, Suenaga Kazu, Liu Junwei, Law Kam Tuen, Lin Junhao, Liu Zheng, Liu Guangtong | 4. 巻 10 |
| 2. 論文標題 Transport evidence of asymmetric spin-orbit coupling in few-layer superconducting 1Td-MoTe2 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Nature Communications | 6. 最初と最後の頁 2044 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-019-09995-0 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Toh Chee-Tat, Zhang Hongji, Lin Junhao, Mayorov Alexander S., Wang Yun-Peng, Orofeo Carlo M., Ferry Darim Badur, Andersen Henrik, Kakenov Nurbek, Guo Zenglong, Abidi Irfan Haider, Sims Hunter, Suenaga Kazu, Pantelides Sokrates T., ?zyilmaz Barbaros | 4. 巻 577 |
| 2. 論文標題 Synthesis and properties of free-standing monolayer amorphous carbon | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Nature | 6. 最初と最後の頁 199 ~ 203 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-019-1871-2 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Xian Rong, Inoue T., Zheng Y., Kumamoto A., Qian Y., Sato Y., Kauppinen Esko I., Ikuhara Yuichi, Suenaga Kazu, Maruyama Shigeo | 4. 巻 367 |
| 2. 論文標題 One-dimensional van der Waals heterostructures | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Science | 6. 最初と最後の頁 537 ~ 542 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aaz2570 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|--------------------|
| 1. 著者名 de Weerd Chris, Gomez Leyre, Capretti Antonio, Lebrun Delphine M., Matsubara Eiichi, Lin Junhao, Ashida Masaaki, Spoor Frank C. M., Siebbeles Laurens D. A., Houtepen Arjan J., Suenaga Kazutomo, Fujiwara Yasufumi, Gregorkiewicz Tom | 4. 巻 9 |
| 2. 論文標題 Efficient carrier multiplication in CsPbI ₃ perovskite nanocrystals | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Nature Communications | 6. 最初と最後の頁 4199 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-018-06721-0 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Senga Ryosuke, Pichler Thomas, Yomogida Yohei, Tanaka Takeshi, Kataura Hiromichi, Suenaga Kazu | 4. 巻 18 |
| 2. 論文標題 Direct Proof of a Defect-Modulated Gap Transition in Semiconducting Nanotubes | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Nano Letters | 6. 最初と最後の頁 3920 ~ 3925 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.8b01284 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Li Shisheng, Lin Yung-Chang, Zhao Wen, Wu Jing, Wang Zhuo, Hu Zehua, Shen Youde, Tang Dai-Ming, Wang Junyong, Zhang Qi, Zhu Hai, Chu Lei, Zhao Weijie, Liu Chang, Sun Zhipei, Taniguchi Takaaki, Osada Minoru, Chen Wei, Xu Qing-Hua, Wee Andrew Thye Shen, Suenaga Kazu, Ding Feng, Eda Goki | 4. 巻 17 |
| 2. 論文標題 Vapour?liquid?solid growth of monolayer MoS ₂ nanoribbons | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Nature Materials | 6. 最初と最後の頁 535 ~ 542 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41563-018-0055-z | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Lin Junhao, Zhou Jiadong, Zuluaga Sebastian, Yu Peng, Gu Meng, Liu Zheng, Pantelides Sokrates T., Suenaga Kazu | 4. 巻 12 |
| 2. 論文標題 Anisotropic Ordering in 1T Molybdenum and Tungsten Ditelluride Layers Alloyed with Sulfur and Selenium | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 ACS Nano | 6. 最初と最後の頁 894 ~ 901 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.7b08782 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Zhou Jiadong, Lin Junhao, Huang Xiangwei, Zhou Yao, Chen Yu, Xia Juan, Wang Hong, Xie Yu, Yu Huimei, Lei Jincheng, Wu Di, Liu Fucai, Fu Qundong, Zeng Qingsheng, Hsu Chuang-Han, Yang Changli, Lu Li, Yu Ting, Shen Zexiang, Lin Hsin, Yakobson Boris I., Liu Qian, Suenaga Kazu, Liu Guangtong, Liu Zheng | 4. 巻 556 |
| 2. 論文標題 A library of atomically thin metal chalcogenides | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Nature | 6. 最初と最後の頁 355 ~ 359 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-018-0008-3 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|---|---------------------|
| 1. 著者名 Lin Junhao, Zuluaga Sebastian, Yu Peng, Liu Zheng, Pantelides Sokrates T., Suenaga Kazu | 4. 巻 119 |
| 2. 論文標題 Novel Pd ₂ Se ₃ Two-Dimensional Phase Driven by Interlayer Fusion in Layered PdSe ₂ | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review Letters | 6. 最初と最後の頁 1 ~ 6 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.119.016101 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Kharlamova Marianna V., Kramberger Christian, Saito Takeshi, Sato Yuta, Suenaga Kazu, Pichler Thomas, Shiozawa Hidetsugu | 4. 巻 9 |
| 2. 論文標題 Chirality-dependent growth of single-wall carbon nanotubes as revealed inside nano-test tubes | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Nanoscale | 6. 最初と最後の頁 7998 ~ 8006 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c7nr01846k | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名 Koklioti Malamatenia A., Skaltsas Theodosios, Sato Yuta, Suenaga Kazu, Stergiou Anastasios, Tagmatarchis Nikos | 4. 巻 9 |
| 2. 論文標題 Mechanistic insights into the photocatalytic properties of metal nanocluster/graphene ensembles. Examining the role of visible light in the reduction of 4-nitrophenol | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Nanoscale | 6. 最初と最後の頁 9685 ~ 9692 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c7nr02944f | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|---|-----------------------------|
| 1. 著者名 de Weerd Chris, Lin Junhao, Gomez Leyre, Fujiwara Yasufumi, Suenaga Kazutomo, Gregorkiewicz Tom | 4. 巻 121 |
| 2. 論文標題 Hybridization of Single Nanocrystals of Cs4PbBr6 and CsPbBr3 | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C | 6. 最初と最後の頁 19490 ~ 19496 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.7b05752 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|---|-------------------|
| 1. 著者名 Wang Hong, Huang Xiangwei, Lin Junhao, Cui Jian, Chen Yu, Zhu Chao, Liu Fucai, Zeng Qingsheng, Zhou Jiadong, Yu Peng, Wang Xuwen, He Haiyong, Tsang Siu Hon, Gao Weibo, Suenaga Kazu, Ma Fengcai, Yang Changli, Lu Li, Yu Ting, Teo Edwin Hang Tong, Liu Guangtong, Liu Zheng | 4. 巻 8 |
| 2. 論文標題 High-quality monolayer superconductor NbSe2 grown by chemical vapour deposition | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Nature Communications | 6. 最初と最後の頁 1-8 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-017-00427-5 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Susi Toma, Kepaptsoglou Demie, Lin Yung-Chang, Ramasse Quentin M, Meyer Jannik C, Suenaga Kazu, Kotakoski Jani | 4. 巻 4 |
| 2. 論文標題 Towards atomically precise manipulation of 2D nanostructures in the electron microscope | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 2D Materials | 6. 最初と最後の頁 042004 ~ 042004 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2053-1583/aa878f | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|---------------------------------|
| 1. 著者名 Yu Peng, Fu Wei, Zeng Qingsheng, Lin Junhao, Yan Cheng, Lai Zhuangchai, Tang Bijun, Suenaga Kazu, Zhang Hua, Liu Zheng | 4. 巻 29 |
| 2. 論文標題 Controllable Synthesis of Atomically Thin Type-II Weyl Semimetal WTe2 Nanosheets: An Advanced Electrode Material for All-Solid-State Flexible Supercapacitors | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Advanced Materials | 6. 最初と最後の頁 1701909 ~ 1701909 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adma.201701909 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|---|------------------------|
| 1. 著者名 Aoki Kaede, Senga Ryosuke, Suga Yosuke, Totani Kenro, Maki Tei, Itoh Hiroshi, Shinokura Kiichiro, Suenaga Kazutomo, Watanabe Toshiyuki | 4. 巻 123 |
| 2. 論文標題 Structural analysis and oxygen reduction reaction activity in bamboo-like nitrogen-doped carbon nanotubes containing localized nitrogen in nodal regions | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Carbon | 6. 最初と最後の頁 99 ~ 105 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2017.03.087 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|---------------------------------|
| 1. 著者名 Lin Yung-Chang, Li Shisheng, Komsa Hannu-Pekka, Chang Li-Jen, Krashennikov Arkady V., Eda Goki, Suenaga Kazu | 4. 巻 28 |
| 2. 論文標題 Revealing the Atomic Defects of WS ₂ Governing Its Distinct Optical Emissions | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Advanced Functional Materials | 6. 最初と最後の頁 1704210 ~ 1704210 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adfm.201704210 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|---|-----------------------------|
| 1. 著者名 Jeon Il, Seo Seungju, Sato Yuta, Delacou Clement, Anisimov Anton, Suenaga Kazu, Kauppinen Esko I., Maruyama Shigeo, Matsuo Yutaka | 4. 巻 121 |
| 2. 論文標題 Perovskite Solar Cells Using Carbon Nanotubes Both as Cathode and as Anode | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C | 6. 最初と最後の頁 25743 ~ 25749 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.7b10334 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|-----------------------------|
| 1. 著者名 Wen Wen, Lin Junhao, Suenaga Kazu, Guo Yuzheng, Zhu Yiming, Hsu Hung-Pin, Xie Liming | 4. 巻 9 |
| 2. 論文標題 Preferential S/Se occupation in an anisotropic ReS ₂ (1-x)Se _{2x} monolayer alloy | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Nanoscale | 6. 最初と最後の頁 18275 ~ 18280 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C7NR05289H | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|---|-----------------------------|
| 1. 著者名 Wang Xinsheng, Lin Junhao, Zhu Yiming, Luo Chen, Suenaga Kazutomo, Cai Congzhong, Xie Liming | 4. 巻 9 |
| 2. 論文標題 Chemical vapor deposition of trigonal prismatic NbS ₂ monolayers and 3R-polytype few-layers | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Nanoscale | 6. 最初と最後の頁 16607 ~ 16611 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C7NR05572B | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Lin Junhao, Zhou Jiadong, Zuluaga Sebastian, Yu Peng, Gu Meng, Liu Zheng, Pantelides Sokrates T., Suenaga Kazu | 4. 巻 12 |
| 2. 論文標題 Anisotropic Ordering in 1T Molybdenum and Tungsten Ditelluride Layers Alloyed with Sulfur and Selenium | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 ACS Nano | 6. 最初と最後の頁 894 ~ 901 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.7b08782 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Kharlamova Marianna V., Kramberger Christian, Sato Yuta, Saito Takeshi, Suenaga Kazu, Pichler Thomas, Shiozawa Hidetsugu | 4. 巻 133 |
| 2. 論文標題 Chiral vector and metal catalyst-dependent growth kinetics of single-wall carbon nanotubes | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Carbon | 6. 最初と最後の頁 283 ~ 292 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2018.03.046 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Brehm John A., Lin Junhao, Zhou Jiadong, Sims Hunter, Liu Zheng, Pantelides Sokrates T., Suenaga Kazu | 4. 巻 18 |
| 2. 論文標題 Electron-Beam-Induced Synthesis of Hexagonal 1H-MoSe ₂ from Square -FeSe Decorated with Mo Adatoms | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Nano Letters | 6. 最初と最後の頁 2016 ~ 2020 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.7b05457 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|----------------------|
| 1. 著者名 Junhao Lin, Yung-Chang Lin, Xinsheng Wang, Liming Xie and Kazutomo Suenaga | 4. 巻 4 |
| 2. 論文標題 Gentle transfer method for water- and acid/alkali-sensitive 2D materials for (S)TEM study | 5. 発行年 2016年 |
| 3. 雑誌名 APL MATERIALS | 6. 最初と最後の頁 116108 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4967938 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名 Junhao Lin, Leyre Gomez, Chris de Weerd, Yasufumi Fujiwara, Tom Gregorkiewicz, and Kazutomo Suenaga | 4. 巻 16 |
| 2. 論文標題 Direct Observation of Band Structure Modifications in Nanocrystals of CsPbBr3 Perovskite | 5. 発行年 2016年 |
| 3. 雑誌名 Nano Lett. | 6. 最初と最後の頁 7198 - 7202 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.6b03552 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Wen-Wen Zhan, Qi-Long Zhu, Song Dang, Zheng Liu, Mitsunori Kitta, Kazutomo Suenaga, Lan-Sun Zheng, and Qiang Xu | 4. 巻 16 |
| 2. 論文標題 Synthesis of Highly Active Sub-Nanometer Pt@Rh Core Shell Nanocatalyst via a Photochemical Route: Porous Titania Nanoplates as a Superior Photoactive Support | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 small | 6. 最初と最後の頁 1603879 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/smll.201603879 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|-------------------|
| 1. 著者名 Ryosuke Senga, Kazu Suenaga | 4. 巻 印刷中 |
| 2. 論文標題 Single-atom detection of light elements: Imaging or spectroscopy? | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Ultramicroscopy | 6. 最初と最後の頁 印刷中 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ultramic.2016.12.007 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 7件 / うち国際学会 7件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kazu SUENAGA |
| 2. 発表標題 Atomic Resolution Imaging and Spectroscopy of Low-Dimensional Materials with Interrupted Periodicities |
| 3. 学会等名 2017 MRS Spring Meeting & Exhibit (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kazu SUENAGA |
| 2. 発表標題 Single atom imaging and spectroscopy of low-dimensional materials |
| 3. 学会等名 Nature Conference, Electron Microscopy for Materials (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kazu SUENAGA |
| 2. 発表標題 State-of-the-art TEMs for atomic resolution analysis and local property measurements of low-dimensional materials |
| 3. 学会等名 Frontiers of Nanochemistry 2017 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kazu SUENAGA |
| 2. 発表標題 Electron microscopy and spectroscopy of low-dimensional materials at single-atom level |
| 3. 学会等名 International Wrokshop on Nanomaterials and Nanodevices (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kazu SUENAGA |
| 2. 発表標題 Low-Voltage TEM/STEM for Imaging and Spectroscopy of Low-Dimensional Materials |
| 3. 学会等名 Microscopy & Microanalysis (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kazu SUENAGA |
| 2. 発表標題 Low-voltage STEM-EELS characterization of novel low-dimensional materials |
| 3. 学会等名 International Workshop on Advanced and In-situ Microscopies of Functional Nanomaterials and Devices (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kazu SUENAGA |
| 2. 発表標題 Polymorphic structures and diversified properties of 2D materials investigated by state-of-the-art TEMS |
| 3. 学会等名 The 3rd International Conference on 2D Materials and Technology (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

〔図書〕 計1件

| | |
|-----------------------------------|-----------------|
| 1. 著者名 千賀 亮典、末永 和知 | 4. 発行年 2016年 |
| 2. 出版社 株式会社エヌ・ティー・エス | 5. 総ページ数 9 |
| 3. 書名 カーボンナノチューブ・グラフェンの応用研究最前線 | |

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|--|--|----|
| 研究分担者 | 千賀 亮典 (Senga Ryosuke) (80713221) | 国立研究開発法人産業技術総合研究所・材料・化学領域・研究員 (82626) | |
| 研究分担者 | L i n Y u n g C h a n g (Lin YungChang) (90772244) | 国立研究開発法人産業技術総合研究所・材料・化学領域・研究員 (82626) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
| | |