日本学士院賞 受賞者 幾く 原はら

雄ら



生 専攻学科目 年 月 昭和三三年一〇月 材料科学・電子顕微鏡学

昭和五八年 六三年 六三年 三月 三月 三月 九州大学工学部金属系学科卒業

略

六三年 七月 九州大学大学院総合理工学研究科博士課程修了 工学博士(九州大学) (財)ファインセラミックスセンター試験研究所入所

七月 東京大学大学院工学系研究科助教授

東京大学大学院工学系研究科総合研究機構教授(現在に至る)

同同同同

一五年 一七年 一九年 九年

月

四月

平成 三年

米国ケースウエスタンリザーブ大学材料科学科客員助教授

(財)ファインセラミックスセンター試験研究所主管主席研究員

五年

七月 七月

九月 四月 (一財)ファインセラミックスセンター客員主管研究員(兼任、現在に至る)

東京大学大学院工学系研究科総合研究機構長(平成三〇年三月まで)

東北大学原子分子材料科学高等研究機構主任研究者(兼任、現在に至る) (平成二九年四月名称変更 東北大学材料科学高等研究所)

Ŧī.

日本学士院賞 受賞者 柴ば 田た 直な 哉ゃ



専攻学科目 電子顕微鏡学・材料科学

歴 平成 九年 三月

略

生

年 月

昭和四八年一二月

東京大学工学部材料学科卒業

五年 三月 博士 (工学) (東京大学)

同

同

五年

三月

東京大学大学院工学系研究科博士課程修了

一五年 四月 日本学術振興会海外特別研究員

同

同 同 二三年 二九年一二月 六月 東京大学大学院工学系研究科総合研究機構教授 東京大学大学院工学系研究科総合研究機構准教授 (現在に至る)

同

三年

四月

東京大学大学院工学系研究科総合研究機構長(現在に至る)

六

に対する授賞審査要旨発とナノ界面工学への貢献」(共同研究)柴田直哉氏の「最先端電子顕微鏡法の開生日直哉氏の「最先端電子顕微鏡法の開工学博士幾原雄一氏及び博士(工学)

び計算により定量的に評価・解析する革新的な手法を確立した。 子欠陥における局所原子構造、元素分布、局所電子状態を実験およ おける諸問題の解決に応用し続けた。その結果、ナノ界面および格 にわたって透過型電子顕微鏡法の最先端を開拓し、ナノ材料科学に にわたって透過型電子顕微鏡法の最先端を開拓し、ナノ材料科学に とってきた。具体的には、四半世紀 が、国際的なリーダーシップをとってきた。具体的には、四半世紀 が、国際的なリーダーシップをとってきた。具体的には、四半世紀 が、国際的なリーダーシップをとってきた。具体的には、四半世紀 にわたって透過型電子顕微鏡法の最先端電子顕微鏡学およびナノ

し、これを材料界面の解析に高度に適用するとともに、原子分解能(STEM)を高度に駆使し、材料界面におけるドーパントや不純物などの材料機能に直結する原子の直接観察に成功した成果があげられる。この成果は、材料科学分野に大きなブレークスルーをもたられる。この成果は、材料科学分野に大きなブレークスルーをもたられる。この成果は、材料科学分野に大きなブレークスルーをもたられる。これを材料界面の解析に高度に適用するとともに、原子分解能と導入の材料機能に直接である。

用する手法を提唱し、世界に先駆けて界面・転位などの原子構造・での電子エネルギー損失分光法(EELS)と第一原理計算手法を併

電子状態の定量解析法を確立した。

ムの解明に資する数多くの研究成果を報告している。 て普及させるとともに、 に先駆けて開発し、材料・デバイス分野の新たなナノ計測手法とし 体的には、原子スケールで電磁場分布を直接可視化する手法を世界 の卓越した業績を挙げ、 の高度化と材料界面研究への応用に関して、世界を先導する数多く して世界的に広く普及した。現在では、海外の研究機関においても 成功した。この研究を起点として、本手法は日本発の新解析手法と リチウム原子や水素吸蔵材料中の水素原子カラムの観察にはじめて ギー・環境材料として注目されているリチウムイオン電池材料中の メーカーとともに新たに提案・開発した。これにより、 電子を選択的に取り込む環状明視野(ABF)-STEM 法を電子顕微鏡 高性能の記録を打ち立てている。さらに同氏は、低角に散乱された 分解能四○・五四を達成し、現時点において STEM としての世界最 般的な手法として日常的に用いられていることは特筆に価する。 二〇一七年、同氏は電子顕微鏡メーカーと共同で、STEM の空間 方、柴田直哉氏は、原子分解能走査透過電子顕微鏡 様々な材料界面における機能発現メカニズ 当該分野の発展に大きく貢献してきた。具 (STEM) エネル

同氏の具体的な研究として、原子分解能対応型の多分割STEM 検出器を開発し、この検出器を用いた微分位相コントラスト法により、半導体 p-n 接合界面の電場観察や磁気スキルミオン内部の磁場 と電子雲の負電荷との間に存在する電場によって電子線が受ける僅 と電子雲の負電荷との間に存在する電場によって電子線が受ける僅 空間観察できるという原理を初めて見出した。本成果は、原子配列 空間でをも実空間観察できる装置へと飛躍させる革新的な成果であ 造までをも実空間観察できる装置へと飛躍させる革新的な成果であ る。

二〇一九年には電子顕微鏡メーカーと共同で、電子顕微鏡の未踏領域であった試料上を無磁場に保ったまま原子分解能観察するための新たな対物レンズの開発に成功した。これにより、世界で初めてし、これまで困難であった磁性材料の原子構造観察を可能にした。さらにこの装置を用いて、二〇二二年には反強磁性体に内在する原子磁場の実空間観察に初めて成功した。これらの成果は電子顕微鏡の未踏の常識を打ち破る画期的な成果であり、国際的にも極めて高い評価を受けている。

幾原・柴田両氏は、相補的かつ連携して開発した最先端電子顕微

を示している。 顕微鏡学およびナノ材料科学分野に大きな貢献を果たしてきたこと で極めて高く評価されている。これらの業績は、 な国際誌など九○○報を超える原著論文に掲載されており、 設計・創出を実現した。これら一連の研究成果は、ハイインパクト これらの成果に立脚し、界面や格子欠陥の機能を利用した新材料の される一次元規則結晶の発見、 メカニズムの解明、不均一触媒界面構造の解明、粒界三重点に形成 よる材料変形および破壊のメカニズム解明、セラミックス粒界偏析 同定と物性との関係、転位芯・格子欠陥構造の解明、その場観察に 子・電子構造と機能特性の相関、 材料現象を解明する研究を精力的に進めてきた。すなわち、 鏡解析手法を駆使して、これまでブラックボックスであった種々の などを次々と解明してきた。さらに 無機材料中の軽元素の原子位置の 両氏が最先端電子 国内外 界面

主要業績リスト(幾原・柴田)

- T. Futazuka, R. Ishikawa, N. Shibata, and Y. Ikuhara, "Grain boundary structural transformation induced by co-segregation of aliovalent dopants", *Nature Communications*, 13, 5299 (2022).
- J. K. Wei, B. Feng, E. Tochigi, N. Shibata, and Y. Ikuhara, "Direct imaging of the disconnection climb mediated point defects absorption by a grain boundary", *Nature Communications*, 13, 1455 (2022).
- Y. Kohno, T. Seki, S. D. Findlay, Y. Ikuhara, and N. Shibata, "Real-space vi-

[3]

[2]

- sualization of intrinsic magnetic field of an antiferromagnet", Nature, 602, 234–239 (2022).
- [4] J. K. Wei, B. Feng, R. Ishikawa, T. Yokoi, K. Matsunaga, N. Shibata, and Y. Ikuhara, "Direct imaging of atomistic grain boundary migration", Nature Materials, 20, 951–955 (2021).
- [5] K. Inoue, K. Kawahara, M. Saito, M. Kotani, and Y. Ikuhara, "3D arrangement of atomic polyhedra in tilt grain boundaries", *Acta Materialia*, 202, 266–276 (2021).
- [6] E. Tochigi, B. Miao, A. Nakamura, N. Shibata, and Y. Ikuhara, "Atomic-scale mechanism of rhombohedral twinning in sapphire", Acta Materialia, 216, 117137 (2021).
- [7] S. Sasano, R. Ishikawa, G. Sánchez-Santolino, H. Ohta, N. Shibata, and Y. Ikuhara, "Atomistic origin of Li-ion conductivity reduction at (Li₃La_{2/3-x}) TiO₃ grain boundary", *Nano Letters*, 21, 6282–6288 (2021).
- [8] R. Ishikawa, R. Tanaka, K. Kawahara, N. Shibata, and Y. Ikuhara, "Atomic-resolution topographic imaging of crystal surfaces", ACS nano, 15, 9186–9193 (2021).
- [9] K. Nakayama, R. Ishikawa, S. Kobayashi, N. Shibata, and Y. Ikuhara, "Dislocation and oxygen-release driven delithiation in Li₂MnO₃", Nature Communications, 11, 4452 (2020).
- 10] J. K. Wei, T. Ogawa, B. Feng, T. Yokoi, R. Ishikawa, A. Kuwabara, K. Matsunaga, N. Shibata, and Y. Ikuhara, "Direct measurement of electronic band structures at oxide grain boundaries", *Nano Letters*, 20, 2530–2536 (2020).
- [11] D. Q. Yin, C. L. Chen, M. Saito, K. Inoue, and Y. Ikuhara, "Ceramic phases with one-dimensional long-range order", *Nature Materials*, 18, 19–23 (2019).
- [12] N. Shibata, Y. Kohno, A. Nakamura, S. Morishita, T. Seki, A. Kumamoto, H. Sawada, T. Matsumoto, S. D. Findlay, and Y. Ikuhara, "Atomic resolution electron microscopy in a magnetic field free environment", *Nature Commu-*

- nications, 10, 2308 (2019).
- [13] S. Kondo, A. Ishihara, E. Tochigi, N. Shibata, and Y. Ikuhara, "Direct observation of atomic-scale fracture path within ceramic grain boundary core", Nature Communications, 10, 2112 (2019).
- [14] B. Feng, R. Ishikawa, A. Kumamoto, N. Shibata, and Y. Ikuhara, "Atomic scale origin of enhanced ionic conductivity at crystal defects", *Nano Letters*, 19, 2162–2168 (2019).
- [15] H. P. Li, M. Saito, C. L. Chen, K. Inoue, K. Akagi, and Y. Ikuhara, "Strong metal-metal interaction and bonding nature in metal/oxide interfaces with

large mismatches", Acta Materialia, 179, 237-246 (2019).

- [16] P. Gao, S. Z. Yang, R. Ishikawa, N. Li, B. Feng, A. Kumamoto, N. Shibata, P. Yu, and Y. Ikuhara, "Atomic-scale measurement of flexoelectric polarization at SrTiO₃ dislocations", *Physical Review Letters*, 120, 267601 (2018).
- at SrTiO₃ dislocations", *Physical Review Letters*, 120, 267601 (2018).

 [17] S. Kobayashi, A. Kuwabara, C. A. J. Fisher, Y. Ukyo, and Y. Ikuhara, "Microscopic mechanism of biphasic interface relaxation in lithium iron phosphate

after delithiation", Nature Communications, 9, 2963 (2018).

- [18] S. Morishita, R. Ishikawa, Y. Kohno, H. Sawada, N. Shibata, and Y. Ikuhara, "Attainment of 40.5 pm spatial resolution using 300 kV scanning transmission electron microscope equipped with fifth-order aberration corrector", *Micros-copy*, 67, 46–50 (2018).
- [19] N. Shibata, S. D. Findlay, T. Matsumoto, Y. Kohno, T. Seki, G. Sánchez-Santolino, and Y. Ikuhara, "Direct visualization of local electromagnetic field structures by scanning transmission electron microscopy", Accounts of Chemical Research, 50, 1502–1512 (2017).
- [20] E. Tochigi, Y. Kezuka, A. Nakamura, A. Nakamura, N. Shibata, and Y. Ikuhara, "Direct observation of impurity segregation at dislocation cores in an ionic crystal", *Nano Letters*, 17, 2908–2912 (2017).
- [21] N. Shibata, T. Seki, G. Sánchez-Santolino, S. D. Findlay, Y. Kohno, T. Matsu-

- moto, R. Ishikawa, and Y. Ikuhara, "Electric field imaging of single atoms", *Nature Communications*, 8, 15631 (2017).
- 22] P. Gao, H. J. Liu, Y. L. Huang, Y. H. Chu, R. Ishikawa, B. Feng, Y. Jiang, Y. Jiang, N. Shibata, E-G. Wang, and Y. Ikuhara, "Atomic mechanism of polarization-controlled surface reconstruction in ferroelectric thin films", *Nature Communications*, 7, 11318 (2016).
- [23] B. Feng, T. Yokoi, A. Kumamoto, M. Yoshiya, Y. Ikuhara and N. Shibata. "Atomically ordered solute segregation behaviour in an oxide grain boundary", *Nature Communications*, 7, 11079 (2016).
- [24] S. Kondo, T. Mitsuma, N. Shibata, and Y. Ikuhara, "Direct observation of in-dividual dislocation interaction processes with grain boundaries", Science Advances, 2, e1501926 (2016).
- [25] S. Kobayashi, C. A. J. Fisher, T. Kato, Y. Ukyo, T. Hirayama, and Y. Ikuhara, "Atomic-scale observations of (010) LiFePO₄ surfaces before and after chemical delithiation", *Nano Letters*, 16, 5409–5414 (2016).
- [26] H. Yu, Y.-G. So, A. Kuwabara, E. Tochigi, N. Shibata, T. Kudo, H. Zhou, and Y. Ikuhara, "Crystalline grain interior configuration affects lithium migration kinetics in Li-rich layered oxide", Nano Letters, 16, 2907–2915 (2016).
- [27] Z. Wang, M. Saito, K. P. McKenna, S. Fukami, H. Sato, S. Ikeda, H. Ohno, and Y. Ikuhara, "Atomic-scale structure and local chemistry of CoFeB-MgO magnetic tunnel junctions", *Nano Letters*, 16, 1530–1536 (2016).
- [28] R. Sun, Z. Wang, M. Saito, N. Shibata, and Y. Ikuhara, "Atomistic mechanisms of nonstoichiometry-induced twin boundary structural transformation in titanium dioxide", *Nature Communications*, 6, 7120 (2015).
- [29] C. L. Chen, Z. C. Wang, F. Lichtenberg, Y. Ikuhara, and J. G. Bednorz, "Patterning oxide nanopillars at the atomic scale by phase transformation", *Nano Letters*, 15, 6469–6474 (2015).
- [30] C. Chen, Z. Wang, T. Kato, N. Shibata, T. Taniguchi, and Y. Ikuhara, "Misfit

- accommodation mechanism at the heterointerface between diamond and cubic boron nitride", *Nature Communications*, 6, 6327 (2015).
- [31] R. Ang, Z. C. Wang, C. L. Chen, J. Tang, N. Liu, Y. Liu, W. J. Lu, Y. P. Sun, T. Mori, and Y. Ikuhara, "Atomistic origin of an ordered superstructure induced superconductivity in layered chalcogenides", *Nature Communications*, 6, 6091 (2015).
- [32] S.-Y. Choi, S.-D. Kim, M. Choi, H.-S. Lee, J. Ryu, N. Shibata, T. Mizoguchi, E. Tochigi, T. Yamamoto, S.-J. L. Kang, and Y. Ikuhara, "Assessment of strain-generated oxygen vacancies using SrTiO₃ bicrystals", *Nano Letters*, 15, 4129–4134 (2015).
- [33] L. Gu, D. Xiao, Y.-S. Hu, H. Li, and Y. Ikuhara, "Atomic-scale structure evolution in a quasi-Equilibrated electrochemical process of electrode materials for rechargeable batteries", *Advanced Materials*, 27, 2134–49 (2015).
- [34] C. Chen, Z. Wang, M. Saito, T. Tohei, Y. Takano, and Y. Ikuhara, "Fluorine in shark teeth: Its direct atomic-resolution imaging and strengthening function",
- Angewandte Chemie-International Edition, 53, 1543–1547 (2014).

 [35] K. P. McKenna, F. Hofer, D. Gilks, V. K. Lazarov, C. Chen, Z. Wang, and Y. Ikuhara, "Atomic-scale structure and properties of highly stable antiphase
- boundary defects in Fe₃O₄", *Nature Communications*, 5, 5740 (2014).

 [36] Z. Wang, M. Saito, K. P. McKenna, and Y. Ikuhara, "Polymorphism of dislocation core structures at the atomic scale", *Nature Communications*, 5, 3239

(2014).

- [37] R. Ishikawa, N. Shibata, F. Oba, T. Taniguchi, S. D. Findlay, I. Tanaka, and Y. Ikuhara, "Functional complex point-defect structure in a huge-size-mismatch system", *Physical Review Letters*, 110, 065504 (2013).
- [38] H. Moriwake, A. Kuwabara, C. A. J. Fisher, R. Huang, T. Hitosugi, Y. H. Ikuhara, H. Oki, and Y. Ikuhara, "First-principles calculations of lithium-ion migration at a coherent grain boundary in a cathode material, LiCoO₂", Ad-

- vanced Materials, 25, 618-622 (2013).
- [39] A. Nakamura, T. Mizoguchi, K. Matsunaga, T. Yamamoto, N. Shibata, and Y. Ikuhara, "Periodic nanowire array at the crystal interface", ACS Nano, 7, 6297–6302 (2013).

[48]

- 40] I. Sugiyama, N. Shibata, Z. Wang, S. Kobayashi, T. Yamamoto, and Y. Ikuhara, "Ferromagnetic dislocations in antiferromagnetic NiO", *Nature Nanotech-nology*, 8, 266–270 (2013).
- [41] S.-Y. Chung, S.-Y. Choi, S. Lee, and Y. Ikuhara, "Distinct configurations of antisite defects in ordered metal phosphates: Comparison between LiMnPO₄ and LiFePO₄", *Physical Review Letters*, 108, 195501 (2012).
- [42] N. Shibata, S. D. Findlay, Y. Kohno, H. Sawada, Y. Kondo, and Y. Ikuhara, "Differential phase-contrast microscopy at atomic resolution", *Nature Physics*, 8, 8, 11–615 (2012).
- [43] Y. Ikuhara, "Grain boundary atomic structures and light-element visualization in ceramics: combination of Cs-corrected scanning transmission electron microscopy and first-principles calculations", *Journal of Electron Microscopy*, Review paper, 60 (Supplement 1), S173-S188 (2011).
- [44] Z. Wang, M. Saito, K. P. McKenna, L. Gu, S. Tsukimoto, A. L. Shluger, and Y. <u>Ikuhara</u>, "Atom-resolved imaging of ordered defect superstructures at individual grain boundaries", *Nature*, 479, 380–383 (2011).
- [45] S. D. Findlay, T. Saito, N. Shibata, Y. Sato, J. Matsuda, K. Asano, E. Akiba, T. Hirayama, and Y. Ikuhara, "Direct imaging of hydrogen within a crystalline environment", *Applied Physics Express*, 3, 116603 (2010).
- 46] Z. Wang, M. Okude, M. Saito, S. Tsukimoto, A. Ohtomo, M. Tsukada, M. Kawasaki, and Y. Ikuhara, "Dimensionality-driven insulator-metal transition in A-site excess non-stoichiometric perovskites", *Nature Communications*, 1, 106 (2010).
- [47] N. Shibata, Y. Kohno, S. D. Findlay, H. Sawada, Y. Kondo, and Y. Ikuhara.

- "New area detector for atomic-resolution scanning transmission electron microscopy," *Journal of Electron Microscopy*, 59, 473–479 (2010).
- S.-Y. Choi, S.-Y. Chung, T. Yamamoto, and Y. Ikuhara, "Direct determination of dopant site selectivity in ordered perovskite CaCu₃Ti₄O₁₂ polycrystals by aberration-corrected STEM", *Advanced Materials*, 21, 885–889 (2009).
- [49] N. Shibata, S. D. Findlay, S. Azuma, T. Mizoguchi, T. Yamamoto, and Y. Ikuhara, "Atomic-scale imaging of individual dopant atoms in a buried interface", Nature Materials, 8, 654–658 (2009).
- [50] N. Shibata, A. Goto, K. Matsunaga, T. Mizoguchi, S. D. Findlay, T. Yamamoto, and Y. Ikuhara, "Interface structures of gold nanoparticles on TiO₂ (110)", *Physical Review Letters*, 102, 136105 (2009).
- [51] Y. Ikuhara, "Nanowire design by dislocation technology", Progress in Materials Science, 54, 770–791 (2009).
- [52] S.-Y. Chung, S.-Y. Choi, T. Yamamoto, and Y. Ikuhara, "Atomic-scale visualization of antisite defects in LiFePO₄", *Physical Review Letters*, 100, 125502 (2008).
- [53] N. Shibata, A. Goto, S. Y. Choi, T. Mizoguchi, S. D. Findlay, T. Yamamoto, and Y. Ikuhara, "Direct imaging of reconstructed atoms on TiO₂ (110) surfaces", *Science*, 322, 570–573 (2008).
- [54] N. Shibata, M. F. Chisholm, A. Nakamura, S. J. Pennycook, T. Yamamoto, and Y. Ikuhara, "Nonstoichiometric dislocation cores in alpha-alumina", Science, 316, 82–85 (2007).
- [55] J. P. Buban, K. Matsunaga, J. Chen, N. Shibata, W. Y. Ching, T. Yamamoto, and Y. Ikuhara, "Grain boundary strengthening in alumina by rare earth impurities", *Science*, 311, 212–215 (2006).
- [56] Y. Sato, J. P. Buban, T. Mizoguchi, N. Shibata, M. Yodogawa, T. Yamamoto, and Y. Ikuhara, "Role of Pr segregation in acceptor-state formation at ZnO grain boundaries", *Physical Review Letters*, 97, 106802 (2006).

- [57] Y. Ikuhara, H. Nishimura, A. Nakamura, K. Matsunaga, and T. Yamamoto, "Dislocation structures of low-angle and near-Sigma 3 grain boundaries in alumina bicrystals", *Journal of the American Ceramic Society*, 86, 595–602 (2003).
- [58] A. Nakamura, K. Matsunaga, J. Tohma, T. Yamamoto, and Y. Ikuhara, "Conducting nanowires in insulating ceramics", *Nature Materials*, 2, 453–456 (2003).