

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540377

研究課題名(和文) 層状窒化物における異常な超伝導電子状態の走査及び破断トンネル分光による微視解明

研究課題名(英文) STM/STS and break-junction tunneling spectroscopy of layered nitro-chloride superconductors

研究代表者

浴野 稔一 (EKINO, Toshikazu)

広島大学・総合科学研究科・教授

研究者番号：40185103

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：層状窒化物超伝導体に関する微視研究を走査型トンネル顕微鏡/分光法(STM/STS)及び破断接合トンネル分光法(BJTS)により行った。基本物理量の超伝導ギャップは、電子対平均距離以下のスケールで不均一に分布する事が明らかとなった。また、平均ギャップ値がBCS理論値より遥かに大きいのみならず、これが T_c に依存せず一定である事を発見した。これらの事実から、電子状態の不均一性の抑制により、 T_c が30 K以上の高温超伝導が実現する可能性を指摘した。この一連の実験の再現性から、層状窒化物の超伝導電子状態が銅酸化物高温超伝導の特徴と類似しており、BCS機構とは著しく異なっていることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：We investigated the electronic properties of the layered nitro-chloride superconductors by means of low-temperature ultra-high-vacuum scanning microscopy/spectroscopy (STM/STS) and break-junction tunneling spectroscopy (BJTS) with clean surface conditions. The STM measurements clarified the electronic inhomogeneity in sub-nanometer scale of the crystal surface. The averaged-superconducting gap values, which are much larger than the BCS prediction, were found to be independent of the critical temperatures T_c . From a series of the experiments, it is pointed out that the possible enhancement of T_c above 30 K should occur when the electronic inhomogeneity of the sample is being suppressed. Both the inhomogeneity and the huge magnitude of the gap size confirmed in the present research resemble those of the high- T_c cuprates except for the gap symmetry which can be described by the conventional picture in the nitro-chloride superconductors.

研究分野：超伝導ナノスケール電子物理学

キーワード：層状窒化物 高温超伝導 STM/STS Break-Junction tunneling ナノスケール電子状態 エネルギーギャップ 非従来型超伝導機構

1. 研究開始当初の背景

銅酸化物超伝導体(1986年)以降に発見された窒化物 β -HfNCI(臨界温度 $T_c=25.5$ K) (1998年)、硼化物 MgB_2 (39 K) (2001年)、鉄系化合物 $Sm(Nd)FeAsO$ (55 K) (2008年)などにより、超伝導物質科学の可能性が顕示されている。これらは何れも2次元伝導ネットワーク構造を有し、このような新しい物質群から高い T_c を持ち銅酸化物と異なる超伝導体が出現すると期待されている。これらの新規超伝導に関しては実験理論の両面から精力的に研究されているが、解明すべき最も重要な物理量の一つがフェルミ面に開くエネルギーギャップ 2Δ である。これは超伝導を担う電子対の束縛エネルギーであるので超伝導機構を直接反映し、その大きさや、多重性・異方性は電子間引力の起源に直結している。これを観測する最も直接的な手段としてトンネル効果の測定(トンネル分光)がある。上述の新規物質群についても、この効果を利用した走査型トンネル顕微鏡・分光(STM・STS)により調べられている。しかしながら、層状窒化物に関する限り、このような実験の報告は本研究グループ以外には存在しない。高温超伝導の発展的な理解のためには、この物質の超伝導電子状態を詳細に調べる事が重要と考える。

2. 研究の目的

層状窒化物 $MNCl$ ($M=Ti, Zr, Hf$)はインターカレートにより電子を注入すると超伝導を発現するが、 T_c が約 26K(Hf)と高く、またその電子物性から超伝導機構がBCS規範理論では説明できないのではないかと注目されている。これらの物質には矩形格子面をもつ $FeOCl$ (α)型と、ハニカム格子面をもつ $SmSI$ (β)型の層状多形が存在し、 β 型は α 型より T_c の最高値が顕著に高い。本研究では、この一連の物質の面内原子配列やキャリア注入の違いが超伝導発現にどう関わるのかを、STM・STSおよび低温破断接合トンネル分光(BJTS)により詳細に調べ、超伝導電子状態を原子スケールで直接明らかにすることを目的とする。

また、これらと構造が似ている鉄系超伝導体や T_c の近い従来型超伝導も研究対象として比較検討する事により、もっと高い T_c を示す物質を見出す指針を与える。

3. 研究の方法

トンネル分光では、 10^{-9} m 程度隔てたトンネル接合の電流(I)-電圧(V)特性の微分伝導度(トンネルスペクトル)が電子状態密度に比例することを利用して、エネルギーギャップを直接観測する事が出来る。STMでは金属探針-試料間を真空中で一定に保ちつつ結晶表面を走査して実空間で原子像をなぞることで原子分解能を実現する。STSでは局所的なトンネルスペクトルを測定して原子スケールで電子状態やギャップの分布を測定できる。

対象物質である層状窒化物は嫌気性が極めて強い。また、単結晶の育成も難しく、多結晶試料のみが得られている。多結晶中の微細結晶粒は $100 \mu m$ 程度の大きさを持つが(図1)、このような試料に対しては通常の方法ではトンネル接合の作製がまず不可能である。そこで、本研究では、極低温(温度 $T=2$ K)超高真空(10^{-8} Pa) (LT-UHV)-STM/STS及び独自のBJTSによる複合トンネル分光システムにより研究を進めた(図1)。STM/STSでは、表面敏感な物質の測定に必須の、独自設計による極低温超高真空劈開機構及び超高真空試料移送装置を整備しており、清浄結晶表面における原子配列や電子状態の空間依存性をナノスケールで検出できる。BJTSでは、究極清浄接合界面を持つので、表面劣化のない状態での結晶電子情報を得る事が可能であり、トンネルスペクトルとその温度変化を精密に測定できる。これはデータの本質を探るために必須の技術である。このような手段を相補的に活用することにより、層状窒化物の結晶対称性と超伝導電子状態の特徴や、それらの相関を原子スケールで明らかにできる。これらより電子対形成に関する知見を得ると共に、局所的な高温超伝導状態の実現の可能性を見極める。

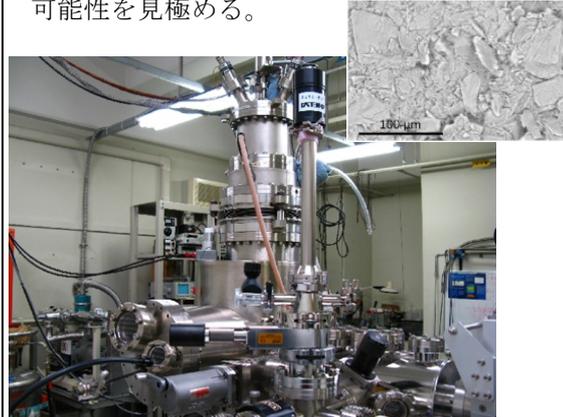


図1. LT-UHV-STM/STS 装置と試料(↑)

4. 研究成果

STM観測においては、仕事関数の値 Φ が最も重要な指標となる。これはトンネル効果を引き起こすポテンシャル障壁の高さであり、

トンネル電流が探針-試料間距離に指数関数的に依存する事から求まる。本研究では、前述の如く超高真空中で試料表面の前処理を施す技術を確認しているので、 $\Phi = 3-5$ eV という理想的な値を常に得る事が出来る(図2)。

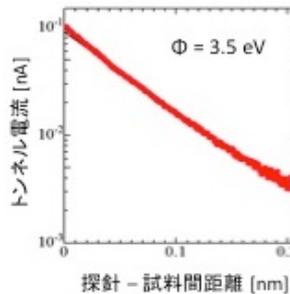


図2. α - $Na_{0.16}TiNCl$ における仕事関数の測定 $T=5$ K

このような条件下で測定を行なう事で、 α -TiNiCl ($T_c=16-18$ K)、及び β -HfNiCl_{0.7}共に鮮明な原子表面像を捉える事が可能となり、ドーブ原子K、Na、欠損原子Clの不規則分布や d - p 混成電子密度分布、等を調べる実験を開始した。

特に α -TiNiClに関しては試料合成技術の向上により、ほぼ完全な体積分率を持つ多結晶試料(α -Na_{0.16}TiNiCl)が得られたので(S.Zhang, et al., Phys.Rev.B86(2012)024516)、

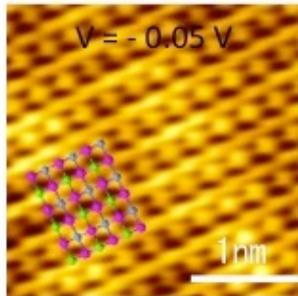


図3. α -Na_{0.16}TiNiClのSTM原子像(c面)

これを用いてSTM測定を行なった。その結果、周期的な輝斑点及び縞状構造が観測された(図3)。これらの構造間隔は格子定数と比較するとかなり小さく、表面層から離れた第2層の原子像を捉えた内部の構造を含んだものであると考えられる。すなわち、縞状構造は表面層のTi原子の波動関数が格子間隔の短い b 軸方向に連なったものであり、輝点構造は第2層のN原子によるものであると推測される。このような微細な構造は体積分率の低い試料では観測されておらず、超伝導に関与する電子の密度との関連が示唆される。

本研究初期段階に測定した β -HfNiCl_{0.7}と同じ結晶構造を持ち、 T_c が14-15 Kで α -TiNiClと同程度に低い β -ZrNiCl_{0.7}についても測定を行ない、 β -HfNiCl_{0.7}と同様な三角格子のZr原子配列像の存在を直接確かめた(図4)。こ

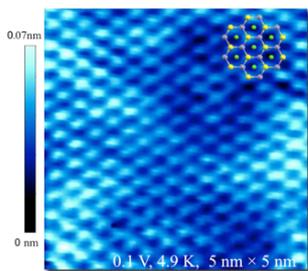


図4. β -ZrNiCl_{0.7}のSTM原子像(c面)

こでも β -HfNiCl_{0.7}と同様、STM像に電子密度分布の明瞭な濃淡が観測されている。その原因の一つとして塩素原子の欠損が挙げられるが、それらの相関は今のところ明らかではない。

このような原子像が得られる条件で、STSによる局所エネルギーギャップの測定を行なった。その結果、 α -TiNiClについては、 $T = 5$ Kにおいて超伝導の電子対形成エネルギーがコヒーレンス長(~ 3 nm)よりも短い範囲で幅広く不均一に分布する様子が観測された(図5)。この特徴は体積分率の低い試料でも観測されおり、その際には超伝導性の空間不均一によるものと見なしていたが、本研究で得られた高い体積分率を示す試料による測定結果から、このようなナノスケール不均一性は α -TiNiClに固有な性質である事が明らかとなった。

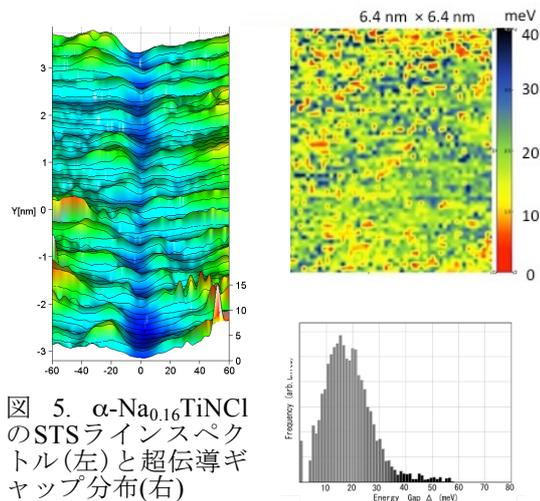


図5. α -Na_{0.16}TiNiClのSTSラインスペクトル(左)と超伝導ギャップ分布(右)

この領域でのSTSの平均スペクトルはかなりぼやけているが、準粒子の寿命効果として取り入れた現象論的パラメータ Γ を考慮したBCS状態密度曲線で表される(図6)。これより、超伝導エネルギーギャップの平均値は $2\Delta = 10$ meVとなり、規格化平均ギャップ $2\Delta/k_B T_c \sim 12$ が求まった。ちなみに、 $2\Delta/k_B T_c$ の下限はBCS理論値3.5に近いが、上限はその15倍程度となり、この超伝導の異常な強結合性が明らかになった。このような電子状態の不均一性や超伝導ギャップの異常な強結合性は銅酸化物高温超伝導体の特徴と良く似ている。

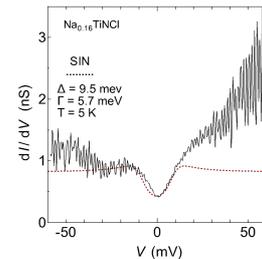


図6. α -Na_{0.16}TiNiClの平均STSスペクトル

この α -TiNiClとの系統性を調べる為に、 β -ZrNiCl_{0.7}に関してSTS測定を行なった(図7)。その結果、次のような事実が明らかとなった。すなわち、比較的均質なギャップ構造が得られている β -HfNiCl_{0.7}と同じ β 型の構造をもつが、 $T = 5$ Kにおいて α 型のTiNiClと同様な不均一STSコンダクタンスの特徴を示し、また、ギャップの値も $\Delta \sim 7 - 25$ meVと幅広い範囲に分布している。その平均値は13 meV程度である。同じ β 型でのこの顕著な違いについては、まだ十分な理解は得られていないが、 α -TiNiCl

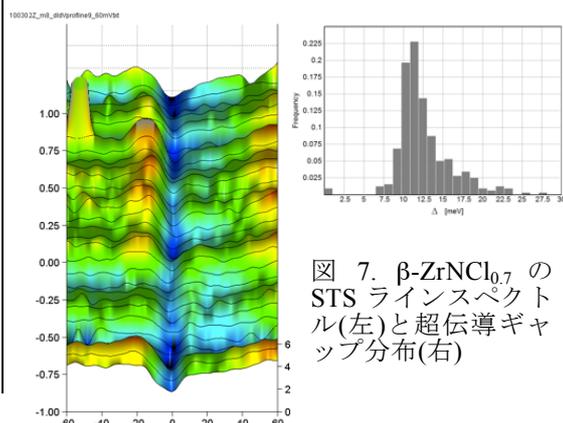


図7. β -ZrNiCl_{0.7}のSTSラインスペクトル(左)と超伝導ギャップ分布(右)

llについてそうであったように、超伝導体積分率がその原因でないとすれば、 β -ZrNCl_{0.7}での低い T_c が結晶表面での不均一性の要因の一つである可能性が高い。

このようなギャップの振舞いについて更に詳しく調べるためには究極清浄界面を持つBJTS測定が不可欠であるが、 β -ZrNCl_{0.7}については既に測定を行ない、結果を得ている。本研究では α -TiNClに関してこの測定を行った。BJTS法では測定ステージに装着する際、試料は一旦大気に曝されて激しく劣化するので、データの取得には困難を極め時間を費やした。そのような過程を経て、ようやくギャップ構造を捉える事が出来た(図8)。これから

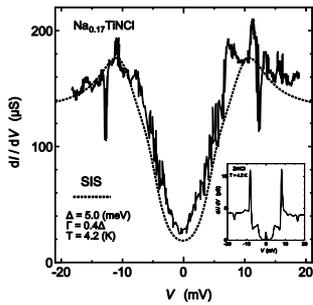


図 8. α -Na_{0.17}TiNCl の BJTS コンダクタンス

明らかなように、深いV字形のスペクトルが得られている。これはギャップの顕著な分布を反映していると考えられ、幅広い空間分布を示すSTSの測定結果と矛盾しない。また、このようなV字形を持つギャップ構造の特徴は、挿入図に示すように、 T_c が同程度の β -ZrNCl_{0.7}において最良の接合条件で観測されるBCSのギャップ構造と、大きく異なっている。ただし、ギャップの大きさがBCS理論値よりも遙かに大きい、という事実は β -ZrNClと同様である。

このような異常なエネルギーを持つ低温でのギャップ構造は、温度変化を調べる事でその性質を明らかにする事が出来る。この物質に関しては、比較的安定したSTSスペクトルの観測が可能であり、温度変化の測定を行なった(図9)。これにより、 β -ZrNCl_{0.7}における異常な大きさのSTSギャップが、 T_c 以上ではバイアス依存性の強いバックグラウンドコンダクタンスとして観測された。各温度でのギャップスペクトルから、ぼやけのパラメーター Γ を取り入れたBCS状態密度曲線により抽出したギャップの値は、規格化されたBCSギャップの温度依存性とほぼ一致する。

このようにほぼ同じ T_c を持つ2つの物質について、超伝導ギャップの不均一性や異常性の存在を明らかにした。これを詳しく追求

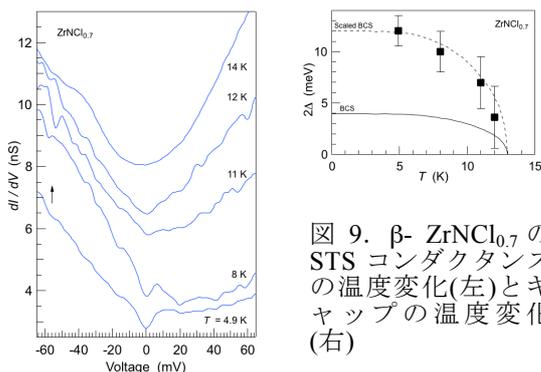


図 9. β -ZrNCl_{0.7} の STS コンダクタンスの温度変化(左)とギャップの温度変化(右)

求する為に、ほぼ一様なSTSスペクトルが得られている β -HfNCl_{0.7}において、STSの温度変化の測定を行なった。そこでは任意の温度に保ちながら結晶表面を走査してSTSスペクトル分布図を作製した。その結果、 T_c 以下で低温から高温に向かうに連れて、ギャップの分布が拡がり不均一性が大きくなる事が明らかとなった。さらに、平均ギャップの大きさは T_c に向かって減少するが、 T_c 以上ではぼやけつつも再び成長するという、非常に興味深い事実が明らかとなった(図10)。

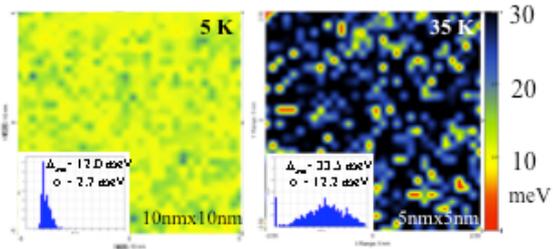


図 10. STS による β -HfNCl_{0.7}のギャップ分布

この特異な振る舞いについて、ウクライナ科学アカデミーA.M. Gabovich教授と共同で、超伝導と電荷密度波(CDW)の共存競合という考えに基づいて詳細に考察し、その振る舞いを計算で再現した(図11)。このような、 T_c 付近での超伝導ギャップと他の原因によるギャップ構造のそれぞれの温度変化における拮抗の様子は、銅酸化物超伝導体での擬ギャップの振る舞いと似ている事が明らかとなった。超伝導と共存競合するギャップ状態に関しては、鉄系超伝導体Fe(Se,Fe)やA-15典型超伝導体Nb₃Snにおいてもトンネルスペクトルにその痕跡を観測しており、解明すべき課題として残っている。

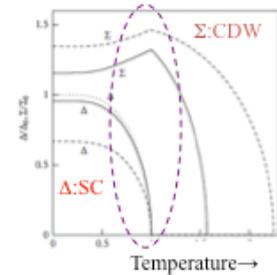


図 11. 超伝導ギャップとCDWギャップの温度変化

上で述べた一連のSTS、BJTSの測定による超伝導ギャップと臨界温度の関係をもとめた(図12)。それによると、 T_c が大きく異なってもギャップ

の大きさの平均値はほぼ一定である。本STSで見られた、 T_c の低い場合での電子状態の不均一性は、この事実と関係すると考えられる。またこの測定から、得られた分布の標準偏差は T_c に反比例する事が判った。分散がなく均質性の高

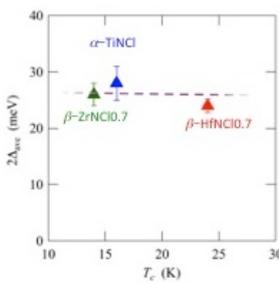


図 12. 超伝導ギャップと T_c

い極限に T_c を外挿して見積もると、約30 - 35 Kとなった。

このように、本研究では層状窒化物超伝導の異常性を明らかにし、銅酸化物高温超伝導との類似性を指摘しつつ、更なる解明を目指して研究を続行している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 14 件)

① T. Ekino, K. Nagasaka, Y. Sakai, A. Sugimoto, A.M. Gabovich, Break junction tunneling spectroscopy of superconducting $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ Phys Procedia, 査読有 (to be published). DOI: 10.1016/j.phpro.2015.05.123

② A. Sugimoto, Y. Sakai, K. Nagasaka, T. Ekino, The spatial distributions of large gap-like structure on $\text{Fe}(\text{Se},\text{Te})$ single crystals observed by STM/STS, Physica C, 査読有 (to be published) DOI:10.1016/j.physc.2015.04.007

③ A. Sugimoto, T. Ekino, K. Tanaka, K. Mineta, K. Tanabe, K. Tokiwa, Observation of the gap distribution on multi-layered cuprate superconductor $\text{Ba}_2\text{Ca}_4\text{Cu}_5\text{O}_{10}(\text{O}_{1-x}\text{F}_x)_2$ by STM/STS, Physics Procedia, 査読有, 58 (2014) 78-81. DOI:10.1016/j.phpro.2014.09.023

④ T. Ekino, A. Sugimoto, Y. Sakai, A.M. Gabovich, J. Akimitsu, Tunneling spectra of break junctions involving Nb_3Sn , Low Temp. Physics, 査読有, 40 (2014) 1182 - 1186. http://fnte.ilt.kharkov.ua/fnt_e.html

⑤ T. Ekino, A. Sugimoto, A.M. Gabovich, Z. Zheng, S. Zhang, S. Yamanaka, Tunneling STM/STS and break-junction spectroscopy of the layered nitro-chloride superconductors $M\text{NCl}$ ($M = \text{Ti, Hf, Zr}$), J. Phys. Conf. Ser., 査読有, 507 (2014) 012010(1-5). DOI: 10.1088/1742-6596/507/1/012010

⑥ Y. Sun, Y. Tsuchiya, T. Taen, T. Yamada, S. Pyon, A. Sugimoto, T. Ekino, Z. Shi, T. Tamegai, Dynamics and mechanism of oxygen annealing in $\text{Fe}_{1+y}\text{Te}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$ single crystal, Scientific reports, 査読有, 4 (2014) 04585 (1-7). DOI:10.1038/srep04585

⑦ A. Sugimoto, T. Ekino, A.M. Gabovich, Variable electronic stripe structures of the parent iron chalcogenide superconductor Fe_{1+d}Te observed by STM/STS, Phys.Rev.B, 査読有, 90 (2014) 224503(1-8). DOI:10.1103/PhysRevB.90.224503

⑧ T. Ekino, A. Sugimoto, A.M. Gabovich, Z. Zheng, S. Yamanaka, Superconducting $\beta\text{-ZrNCl}_x$,

probed by scanning-tunnelling and break junction spectroscopy, Physica C, 査読有, 494 (2013) 89-94.

DOI: 10.1016/j.phys.2013.05.009

⑨ T. Ekino, A. Sugimoto, A.M. Gabovich, Scanning tunneling microscopy/spectroscopy and break-junction tunneling spectroscopy of $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$, Low Temp. Physics, 査読有, 39 (2013) 343 - 353. http://fnte.ilt.kharkov.ua/fnt_e.html

⑩ T. Ekino, A. Sugimoto, A.M. Gabovich, H. Kinoshita, J. Akimitsu, Tunneling break-junction measurements of the superconducting gap in Y_2C_3 , Physica C, 査読有, 484 (2013) 52-55. DOI: 10.1016/j.phys.2012.03.044

⑪ R. Ukita, A. Sugimoto, T. Ekino, Scanning-tunneling microscopy and break-junction spectroscopy on the superconducting $\text{Fe}(\text{Se},\text{Te})$ single crystal, Physica C, 査読有, 484 (2013) 22-26. DOI: 10.1016/j.phys.2012.03.034

⑫ A. Sugimoto, R. Ukita, T. Ekino, Nano-scale stripe structures on FeTe Observed by low-temperature STM/STS, Physics Procedia, 査読有, 45(2013) 85-88. DOI: 10.1016/j.phpro.2013.04.058

⑬ A. Sugimoto, K. Shohara, T. Ekino, Z. Zheng, Yamanaka, Nano-scale Electronic Structures on Layered Nitride Superconductors $\alpha\text{-K}_x\text{TiNCl}$ and $\beta\text{-HfNCl}_y$ Observed by Scanning Tunneling Microscopy/Spectroscopy, Phys. Rev. B, 査読有, 85 (2012)144517 (1-7). DOI: 10.1103/PhysRevB.85.144517

⑭ A. Sugimoto, R. Ukita, T. Ekino, Z. Zheng, S. Yamanaka, STM/STS Observation on Layered Nitride Superconductor $\alpha\text{-(DDA)}_x\text{TiNCl}$, J. Phys.: Conf. Ser., 査読有, 400 (2012) 022112 (1-4). 10.1088/1742-6596/400/2/022112

〔学会発表〕(計 15 件)

① Toshikazu Ekino, Break junction tunneling spectroscopy of superconducting $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x=0.4-0.5$) with our STM/STS results, International Symposium on Superconductivity (ISS2014), 2014年11月25-27日, 船堀タワーホール(東京都・江戸川区)

② A. Sugimoto, Y. Sakai, K. Nagasaka, T. Ekino, The spatial distributions of large pseudo gap on $\text{Fe}(\text{Se}, \text{Te})$ single crystals observed by STM/STS, International Symposium on Superconductivity (ISS2014), 2014年11月25-27日, 船堀タワーホール(東京都江戸川区)

③坂井優太, 杉本暁, S. Zhang, 田中将嗣, H. Zhu, 山中昭司, 浴野稔一, 層状窒化物超伝導体 Na_xTiNCl の電子状態密度の観測, 日本物理学会秋季大会, 2014年9月7-10日, 中部大学 (愛知県・春日井市)

④杉本暁, 坂井優太, 浴野稔一, STM/STS による鉄カルコゲナイド超伝導体 $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ における過剰鉄スポット形状と電子状態の観測, 日本物理学会秋季大会, 2014年9月7-10日, 中部大学 (愛知県・春日井市)

⑤ Toshikazu Ekino, STM/STS of the layered iron-chalcogenide and nitro-chloride superconductors, AnalytiX-2014, 2014年4月25-28日, 大連 (中国)

⑥坂井優太, 杉本暁, S. Zhang, 田中将嗣, H. Zhu, 山中昭司, 浴野稔一, 層状窒化物超伝導体 Na_xTiNCl のSTM/STS観測, 日本物理学会年次大会, 2014年3月27-30日, 東海大学 (神奈川県・平塚市)

⑦杉本暁, 坂井優太, 浴野稔一, STM/STS を用いた鉄カルコゲナイド鉄カルコゲナイド超伝導体 $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ の局所障壁高さとトンネルスペクトルの観測, 日本物理学会年次大会, 2014年3月27-30日, 東海大学 (神奈川県・平塚市)

⑧ Toshikazu Ekino, STM/STS and break junction tunneling spectroscopy of the layered nitro-chloride superconductors, International workshop on Novel superconductors and super materials, 2013年11月21-22日, 品川グランドセントラルタワー (東京都・品川区)

⑨杉本暁, 田中勝大, 峰田恭平, 田辺健治, 常磐和靖, 浴野稔一, STM/STS による頂点フッ素系多層超伝導体 $\text{Ba}_2\text{C}_4\text{F}_5(\text{O}, \text{F})_x$ におけるギャップ分布観測, 日本物理学会秋季大会, 2013年9月25-28日, 徳島大学 (徳島県・徳島市)

⑩ Toshikazu Ekino, Tunneling STM/STS and break junction spectroscopy of the layered superconductors b-MNCl_x ($M = \text{H}$ for Zr), European Conference on Applied Superconductivity, 2013年9月15-19日, ジェノバ (イタリア)

⑪ Toshikazu Ekino, Superconducting gap of $\beta\text{-HfNCl}$ and related compounds investigated by scanning tunneling microscopy / spectroscopy and break-junction tunneling, International Conference on Nanoscience and Nanotechnology, 2013年9月9-13日, パリ (フランス)

⑫杉本暁, 浴野稔一, 鉄カルコゲナイド超伝

導体及びその母物質における局所状態密度の変調構造 (2), 日本物理学会年次大会, 2013年3月26-29日, 広島大学 (広島県・東広島市)

⑬ Toshikazu Ekino, Superconducting $\beta\text{-ZrNCl}_x$ probed by scanning-tunnelling and break-junction spectroscopy, International Symposium on Superconductivity (ISS2012), 2012年12月3-5日, 船堀タワーホール (東京都・江戸川区)

⑭杉本暁, 浴野稔一, 鉄カルコゲナイド超伝導体及びその母物質における局所状態密度の変調構造, 日本物理学会秋季大会, 2012年9月18-21日, 横浜国立大学 (神奈川県・横浜市)

⑮ Toshikazu Ekino, STM, scanning and break-junction spectroscopy of $\text{Fe}(\text{X}=\text{Se}, \text{S}), \text{Te}$, International Conference on Nanoscience and Nanotechnology, 2012年7月23-27日, パリ (フランス)

[図書] (計2件)

① T. Ekino, A.M. Gabovich, A. Sugimoto, Y. Sakai, J. Akimitsu, Gap structures of A-15 alloys from the superconducting and normal-state break-junction tunneling, in Superconductors - Materials, Properties, Applications, edited by A.M. Gabovich, 査読有, InTech publishing (ISBN 978-953-51-4163-1) (印刷中).

② T. Takasaki, T. Ekino, A.M. Gabovich, A. Sugimoto, S. Yamanaka, J. Akimitsu, Tunneling Spectroscopy of Novel Layered Superconductors: MgB_2 , $\text{Li}_{0.48}(\text{THF})_x\text{HfNCl}$ and Related Substances, in Superconductivity: Theory, Materials and Applications, edited by V.R. Romanovskii, 査読有, Nova Science Publishers, Inc., New York (2012) pp. 1-110 (ISBN 978-1-61324-843-0).
https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=34113

[その他]

ホームページ等

<http://home.hiroshima-u.ac.jp/ekinolab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浴野 稔一 (EKINO TOSHIKAZU)

広島大学・大学院総合科学研究科・教授
研究者番号 : 40185103

(4) 研究協力者

杉本 暁 (SUGIMOTO AKIRA)

広島大学・大学院総合科学研究科・助教